

Mémoire de MASTER I

Mention : Géographie et Sciences des Territoires (GST), Spécialité : Télédétection et Géomatique
Appliquées à l'Environnement (TGAE)

Impact des changements environnementaux sur l'occupation du sol au Centre-Nord du Sénégal



Présentée par : **Samar ZIADI**

Sous la direction de Nicolas DELBART et Olivier NINOT

Jury

Mme. Catherine MERING Professeur, Université Paris Diderot-Paris 7..... Présidente

M. Nicolas DELBART : Maître de Conférences, Université Paris Diderot7..... Membre

M. Olivier NINOT : Ingénieur de Recherche/ PRODIG, CNRS..... Membre

24 JUIN 2016

Remerciements

J'adresse toute ma gratitude et mon profond respect à tous ceux et celles qui ont contribué de prêt ou de loin à l'élaboration de ce travail. Mes remerciements s'adressent en premier lieu à mes encadreurs :

M. Nicolas Delbart et M. Olivier Ninot qui m'ont accompagné sur le chemin du mémoire avec de la patience, de la fermeté, une grande compétence et beaucoup de gentillesse pour leurs soutiens d'encadreurs. Sans eux, ce travail aurait eu énormément de difficultés à se réaliser. Qu'ils en soient remerciés très vivement.

Mes remerciements vont également à Mme Françoise Duraffour Ingénieur de recherche à l'UMR PRODIG. Elle a montré une grande disponibilité et m'a facilité la tâche pour effectuer mon stage dans de bonnes conditions d'encadrement.

Je dois également exprimer ma gratitude au membre de jury en leur adressant mes vifs remerciements :

- Madame Catherine Mering pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Mots-clés : Changement climatique ; Sénégal ; Ferlo ; Bassin arachidier ; Cartographie de l'occupation du sol ; Dégradation de couvert végétal ; Sécheresse ; Vulnérabilité écosystémique ; Élevages transhumants ; Mobilité.

RÉSUMÉ

Les écosystèmes sahéliens sont soumis depuis la fin des années 1960 à des pressions climatiques, accompagnées par une péjoration pluviométrique, dégradation du sol et une avancée du désert. Cette situation a engendré des conséquences sur la végétation et sur les systèmes pastoraux qui constituent l'activité économique la plus dominante au sahel. Dans la présente étude nous avons choisi de travailler sur le Sénégal plus précisément sur le Ferlo et le bassin arachidier. L'objectif principal de notre étude vise à caractériser la dynamique foliaire et la réponse végétale face aux changements climatiques. Pour ce faire, nous avons eu recours à la télédétection et le traitement des images satellites. Pour caractériser la fluctuation chlorophyllienne ainsi que l'évolution de production végétale au pas du temps, nous avons calculé l'indice de végétation NDVI sur la base d'une série d'images de Landsat 5 et 8 durant la période de 1988-1989 et 2014-2015. Le résultat de cette méthode montre la présence d'une forte corrélation positive entre l'évolution végétale et les conditions climatiques. En revanche nous avons remarqué la présence d'autres facteurs anthropiques qui ont perturbé cette étroite liaison. Ils ont engendré des conséquences négatives sur l'élevage transhumant dans le Ferlo, tel que les politiques d'aménagement qui ont largement marginalisé l'élevage extensif. Cette situation a été justifiée par les résultats obtenus dans l'analyse de cartographie des changements de l'occupation du sol entre les années de 1988 et 2014. Dans cette étude nous avons montré que dans le Ferlo le tapis herbacé a sensiblement reculé durant 30 ans à cause de la récurrence des années de sécheresse ainsi que la pression du pâturage. Le bassin arachidier a connu aussi une dégradation écosystémique à cause de la monotonie de culture et le défrichement du sol.

Keywords : Climate change ; Senegal ; Ferlo ; Senegal center ; Mapping of land cover ; Degradation of vegetation cover ; Drought ; Vulnerability of ecosystem ; transhumant farms ; Mobility.

ABSTRACT

Sahelian ecosystems are under climatic pressures since 1960, accompanied by a worsening rainfall, soil degradation and an advanced desert. This situation has created an impact on vegetation and on pastoral systems that are the most dominant economic activity in the Sahel. In this study we have chosen to work on Senegal specifically on the Ferlo and the groundnut basin. The main objective of our study is to characterize the dynamic leaf and plant response to climate change. To do this, we used remote sensing and processing of satellite images. To characterize the chlorophyll fluctuation and changes in crop production, we calculated the vegetation index NDVI based on a series of images from Landsat 5 and 8 during the period of 1988-1989 and 2014-2015. The result of this method shows the presence of a positive correlation between plant evolution and climate conditions. However we noticed the presence of other anthropogenic factors that disturbed this closely. They have created negative consequences for the nomadic grazing in the Ferlo, such as planning policies that have largely marginalized cattle ranching. This was justified by the results obtained in mapping analysis of changes in land use between 1988 and 2014. In this study we showed that in the Ferlo, grass cover has declined significantly for 30 years because of the recurrence of years of drought and grazing pressure. The Groundnut Basin also experienced an ecosystem degradation because of the monotony of culture and the clearing of the ground.

INTRODUCTION GÉNÉRALE ET OBJECTIFS

La bande sahélienne de l'Ouest africain est une région semi-aride. Elle a connu depuis les années 1970 des changements climatiques¹ et socioéconomiques qui ont eu des impacts importants sur la structure des paysages végétaux, l'écosystème et sur le mode de vie de la société rurale.

En effet, la géographie physique du sahel, et les contraintes environnementales conduisent les populations sahéliennes d'adopter des stratégies et des pratiques reposées sur des modes de production extensive tel que l'élevage transhumant² et l'agriculture vivrière.

Le pastoralisme constitue la principale activité économique dans la région sahélienne « il représente 70 à 90% du bétail sahélien et 30 à 40% de ses brebis et chèvres » (Hellendorff B., 2012). Cependant ce dernier qui dépend fortement du système écologique, est devenu de plus en plus en situation critique avec la variation climatique et la grande sécheresse des années 1970.

Dans la présente étude nous allons rapporter des connaissances sur la réponse de la végétation face aux changements environnementaux au Sénégal (faisant partie de la bande sahélienne), plus particulièrement dans le Ferlo (nord du Sénégal) et le bassin arachidier (centre du Sénégal).

Le Sénégal, est situé à l'extrémité Ouest du continent africain. Il s'étend sur une superficie totale de 196 720 km². Au Nord et au Nord-Est il est limité par la Mauritanie, au Sud-Est par le Mali, au Sud par la Guinée et à l'Ouest par l'Océans Atlantique.

La Gambie forme une enclave dans le Sénégal à côté du Nord de la Casamance, pénétrant de 300 km de long sur 20 km de large à l'intérieur du Sénégal.

Le territoire sénégalais est compris entre 12°8 et 16°41 de latitude nord et 11°21 et 17°32 de longitude ouest.



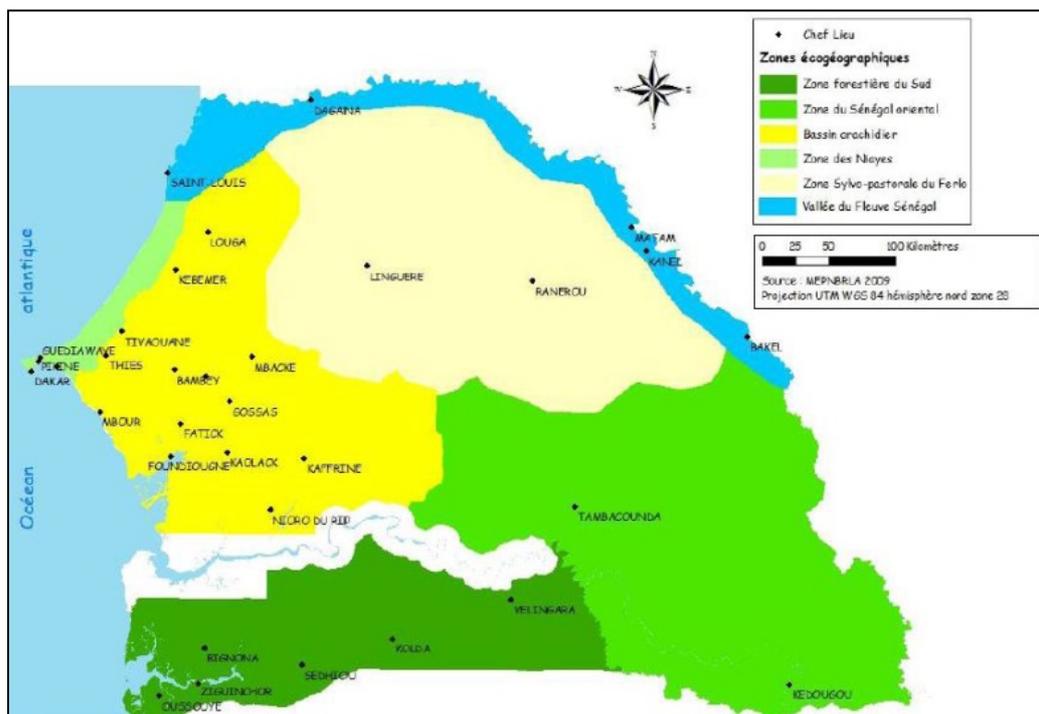
Source : UNICEF et al., 2009

¹ Températures de plus en plus élevées, réduction drastique de précipitation, variabilité et précarité pluviométrique, etc.

² « Le terme transhumance désigne une migration structurée, par exemple un déplacement annuel d'un site à un autre » (Bruno, 2012)

Le Ferlo se situe au cœur de domaine sahélien sénégalais, Il s'étend sur une superficie de 56 269 km², soit environ 28% de la superficie nationale (Sarr, 2009). Il est délimité par trois régions : Louga, Matam et Saint-Louis. Il s'est doté principalement d'une vocation pastorale. Cette région rassemble plus d'éleveurs que toutes autres régions du pays. Au nord du Ferlo on trouve la vallée du fleuve du Senegal qui s'étend de Matam à Richard Toll, sa longueur est de 1770 km.

Le bassin arachidier a une superficie de 46 367 Km² (Fall, 2014), il se situe entre la latitude 13° et 15°30 Nord et les longitudes 13° et 16°30 Est. Cette région appartient à la zone sahélo-soudanienne, elle est délimitée à l'Ouest par la zone de Niayes et Dakar, au Nord par la zone Sylvopastorale, au Sud par la Gambie, et à l'Est par a région de Tambacounda.



Source : Fall, 2014

Figure1 : Les zones éco-géographiques du Sénégal

« Au Sénégal, les terres arables représentent seulement 19 % de la superficie du pays, soient 3,8 millions d'hectares. Ces terres arables sont inégalement réparties dans les zones écogéographiques (57 % au bassin arachidier, 20 % en Casamance, 10 % au Sénégal oriental, 8 % au Fleuve Sénégal, 4 % dans la zone Sylvopastorale et 1 % dans les Niayes).» (UNICEF, 2009) (voir annexe 5).

Plusieurs études ont été faites permettant de comptabiliser les espèces dominantes dans le Ferlo. Par exemple Fall A. (2014), a montré que la strate herbacée au Ferlo est constituée essentiellement d'arbustes (*Boscia senegalensis*) et d'arbres (*Balanites aegyptiaca*, *Acacia raddiana*, *Combretum glutinosum*). Ceux-ci peuvent être des sources fourragères (CSE, 2006). La domination de ces espèces dans la zone sylvopastorale du Ferlo est expliquée par leur résistance aux conditions climatiques extrêmes et à la sécheresse (Dendoncker1 M., 2015). Sarr (2008) a recensé les types de végétations ligneuses les plus caractéristiques et les plus répandues au Ferlo : *Acacia senegal*, *Balanites aegyptiaca* et *Combretum glutinosum*.

Etudier l'évolution environnementale et le changement climatique dans la région semi-aride, est désormais important dans le développement du pays. L'environnement est devenu un enjeu incontournable dans les choix des politiques des pays sahéliennes. Au Sénégal, plusieurs politiques ont été mise en place pour la protection environnementale. Cependant, l'application de ces politiques s'est trouvé dans des situations difficiles avec la dégradation climatique au Sahel. « *Les variations du temps et du climat constituent un phénomène contraignant à l'application de politiques efficaces de développement, surtout dans la bande sahélienne qui présente une sensibilité accrue aux situations extrêmes (inondations, « vagues de froid », sécheresses, etc...)* » (Sarr, 2009)

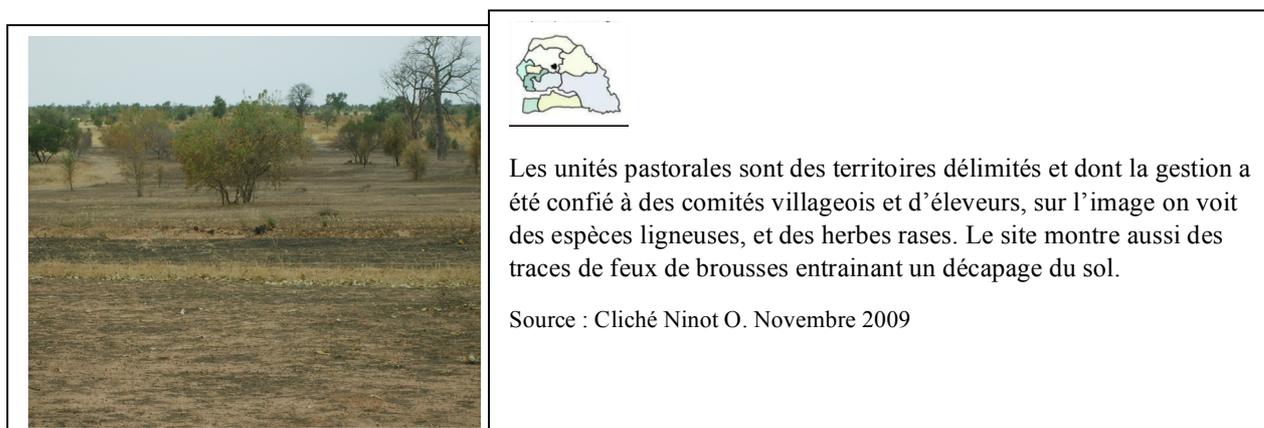
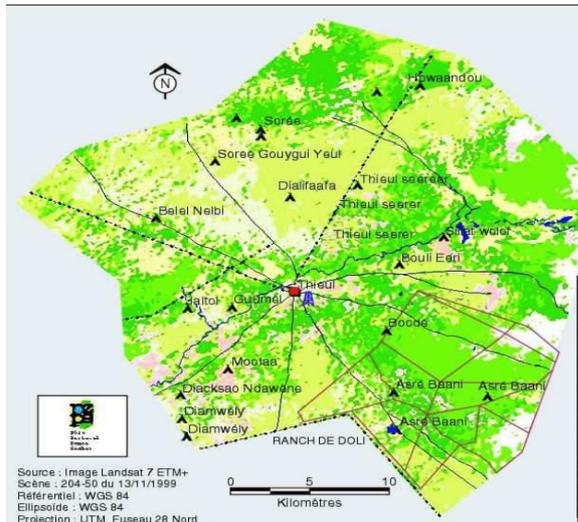


Figure 2: paysage de l'unité pastorale de Thiel au sud de Ferlo.



Source : MOUNDJOA, 2008

Figure 3 : présentation de l'Unité pastorale de Thiel



Figure 4 : Présentation d'une strate herbacée dense au Ferlo

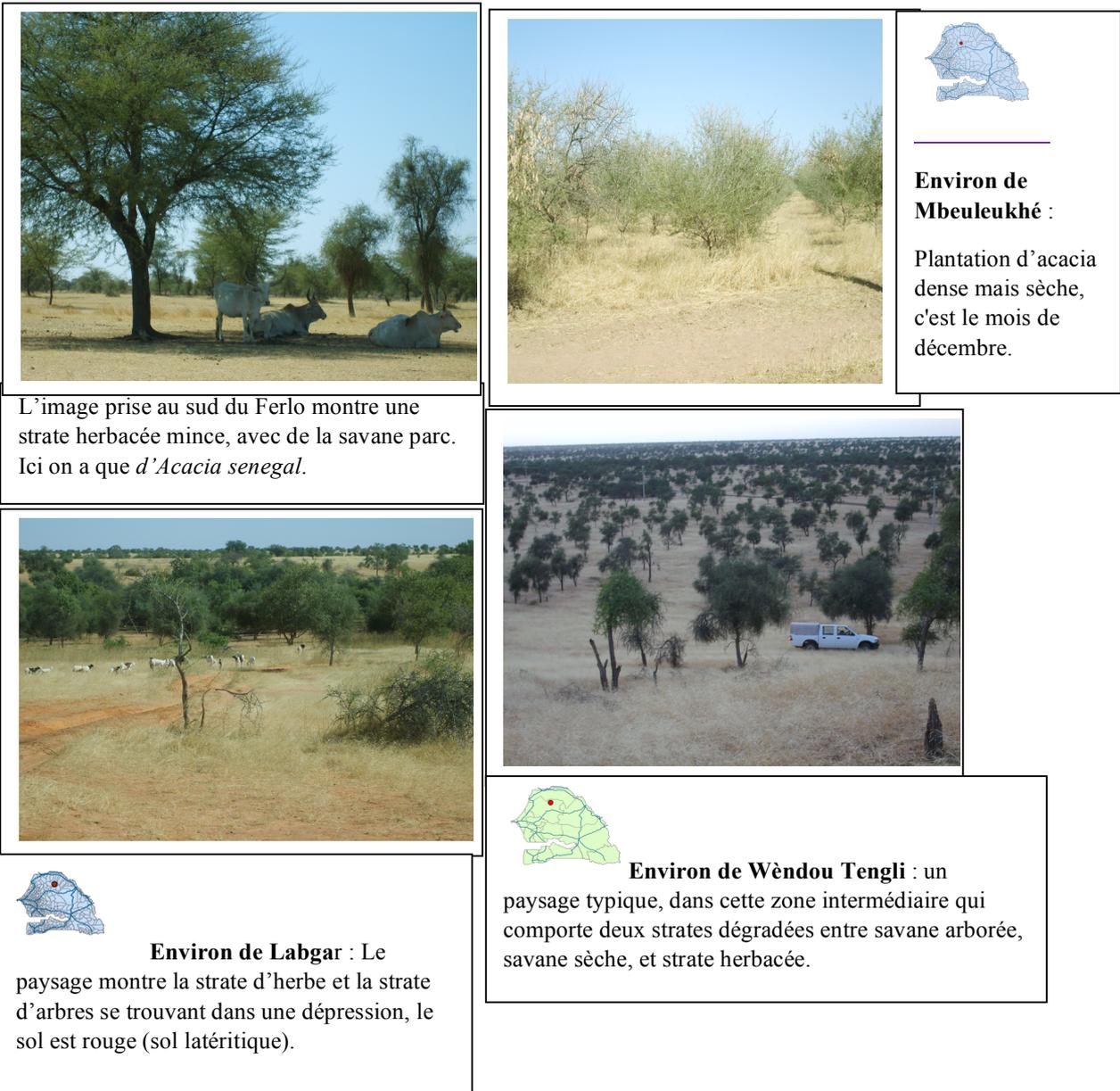


Figure 5 : Physiognomie de quelques relevés du Ferlo (photos : Ninot O., 2009)



Mbeuleukhé : La vallée fossile de Ferlo, se caractérise par la présence de l'eau pendant les fortes pluies et entourée par des grandes mares capables de retenir l'eau jusqu'au mois Décembre

Ces points d'eau constituent une source d'abreuvoir pour les bétails, ce qui amène les éleveurs transhumants à faire des campements pour séjourner autour de ces mares. Plus loin, sur l'image on voit une sorte de bourrelet. Le paysage est formé par une strate arborée assez dense pour conserver le sol.

Figure 6 : présentation de quelques mares au sud de Ferlo (cliché Ninot O., 2009)



L'image montre une strate arborée et une strate herbacée rase.



Paysage du nord de Ferlo montrent un état d'herbe rase. Le sol est fragilisé, a du mal de se restituer.

Figure 7 : paysage montre un état d'herbe rase (Cliché Ninot O., 2009)



Sol complètement “ décapé ” au nord du Ferlo, on voit qu’une sorte de buisson, les sols sont sableux et pauvres incapable des fournir des ressources fourragères.

Figure 8 : image du sol “ décapé ” au nord du Ferlo (photo : Ninot O., 2009)

Cette étude s’inscrit de dans le cadre du projet CERISE (Scénarios d’invasion de rongeurs au Sahel : Impact des changements globaux sur l’expansion de la gerbille nigérienne et la souris domestique au Sénégal), au sein de l’une Unité mixte de recherche « PRODIG ».

❖ **Problématique et objectif**

Au cours des cinquante dernières années, le Sénégal comme toute la bande sahélienne ont connu des problèmes environnementaux constituant des enjeux majeurs sur les différentes sous zones de l’Afrique de l’Ouest et leurs habitants qui ont été touchées de diverses manières. Cette crise environnementale se traduit par des variabilités climatiques et des fluctuations pluviométriques ainsi qu’une dégradation des ressources naturelles aggravées par une sécheresse et une avancée du désert, dont les séquelles restent encore visibles.

Au regard de ce constat, notre objectif dans ce mémoire c’est d’étudier l’impact de changements climatiques sur l’évolution du couvert végétal.

Pour ce faire notre étude va être basée sur une grande échelle afin d’avoir des informations fines et concrètes dans le but de connaître les caractéristiques exactes du climat et ses variabilités. C’est pourquoi nous avons choisi de travailler sur le Ferlo et le bassin arachidier au nord-centre du Sénégal. Cette zone est basée sur des caractéristiques très particulières à savoir : la production végétale, le développement économique et sociale qui sont tributaires des ressources naturelles et des fluctuations pluviométriques. Cette spécificité de la région nous facilitera de répondre à notre questionnement de recherche.

La question majeure qui découle de ce constat et qu’on va traiter à travers ce travail est :

- Quels sont les impacts des changements climatiques sur le comportement évolutif du couvert végétal au Centre-Nord du Sénégal ?

❖ **Hypothèse :**

Nous avons émis une hypothèse qui nous guidera dans notre recherche

- La crise climatique et la période de sécheresse des années 1970 ont engendré une dégradation des couverts végétal au centre-nord du Sénégal.

Partie I : Données et Méthodologie

Ce chapitre sera consacré à exposer les données, la méthode et les outils de télédétection proposées dans cette étude, afin d'analyser l'évolution spatio-temporelle et la phénologie des principales cultures au Centre-Nord du Sénégal. Dans la première section nous allons mettre l'accent sur les différentes bandes spectrales ainsi que le satellite d'observation de la terre utilisé dans le cadre de cette étude. Dans un deuxième temps, nous expliquerons notre critère de choix pour les données. Dans un troisième temps, nous présenterons la méthode suivie dans le traitement des images satellites.

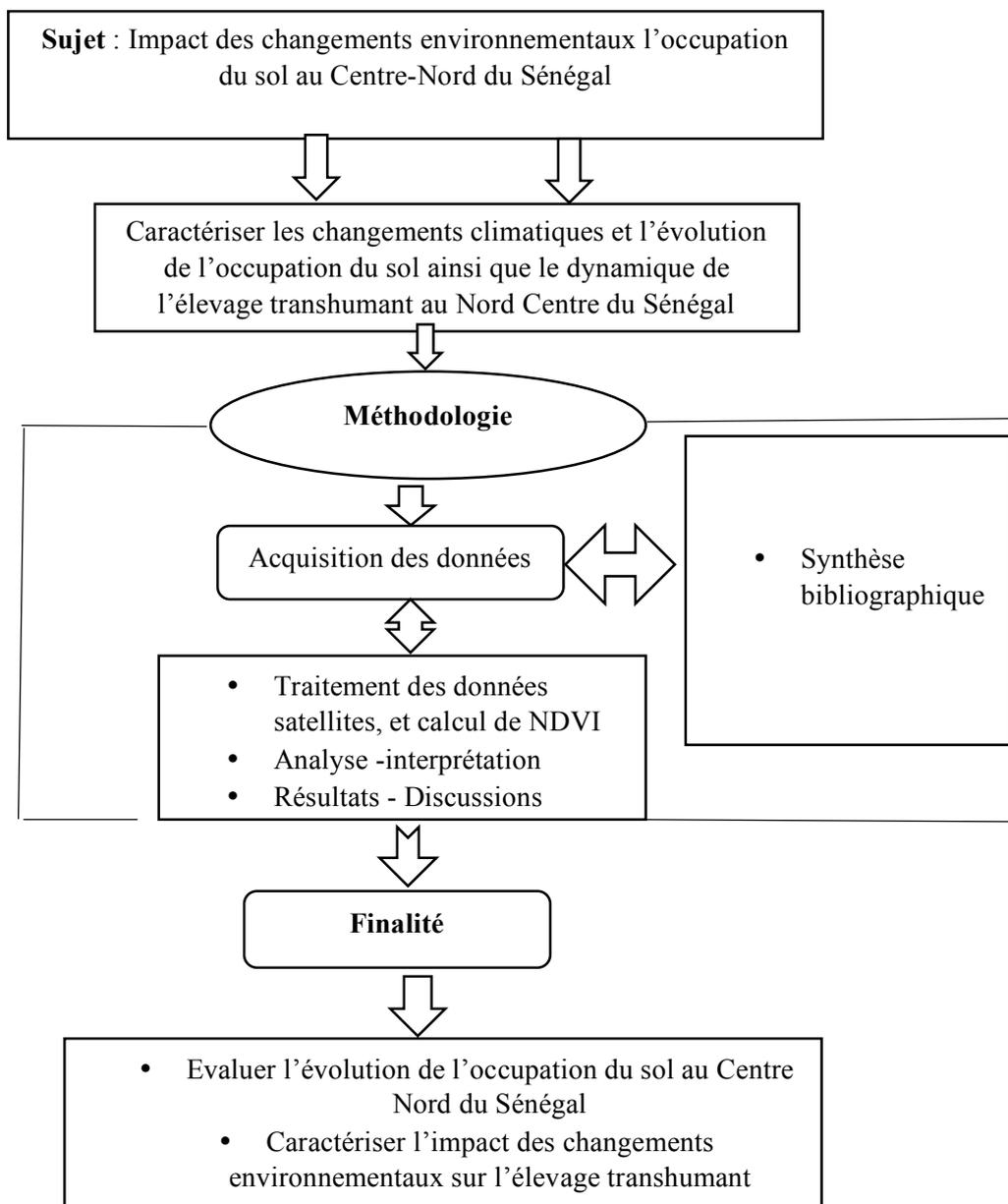


Figure 9 : Démarche méthodologique générale de ce travail de mémoire

I- Données

I-1 Acquisition des images satellites Landsat TM.

I-1-1 Images satellites utilisées

Nous avons utilisé les images LANDSAT 5 et 8 pour les années 1988, 1989, et 2014, 2015 en mode réflectance (voir description ci-dessous) pour créer les cartes d'occupation et du changement du sol à haute résolution (30m), et d'autre part pour calculer l'indice de végétation (NDVI). Dans la première zone d'étude Nord du Sénégal : 9 images ont été acquises durant la saison 1988 – 1989 et 24 images durant la saison 2014- 2015 (Tab. 1). En ce qui concerne le Centre du Sénégal nous avons collecté 8 images durant la saison 1988-1989 et 26 images durant la saison 2014-2015 (Tab. 2).

Tableau 1 : Listes des images utilisées au Nord du Sénégal :

Saison Agricole au Nord du Sénégal	Type de capteur	Résolution (mètres)	Date d'acquisition	
1988-1989	LANDSAT 4 et 5 en mode réflectance	30	21/10/1988	03/03/1988
			01/07/1988	08/12/1988
			17/07/1988	08/10/1989
			19/08/1988	22/09/1989
			05/10/1988	
2014-2015	LANDSAT 8	30	14/01/2014	07/01/2015
			30/01/2014	06/03/2015
			15/02/2014	22/03/2015
			19/03/2014	07/04/2015
			20/04/2014	23/04/2015
			06/05/2014	09/05/2015
			22/05/2014	25/05/2015
			26/08/2014	26/06/2015
			27/09/2014	28/07/2015
			11/09/2014	29/08/2015
			13/10/2014	14/09/2015
			14/11/2014	03/12/2015
			30/11/2014	

Tableau 2 : Listes des images utilisées au Centre du Sénégal :

Saison Agricole au centre du Sénégal	Type de capteur	Résolution (mètres)	Date d'acquisition	
1988-1989	LANDSAT 4 et 5 en mode réflectance	30	03/03/1988	30/11/1988
			01/07/1988	08/12/1988
			19/09/1988	22/09/1989
			05/10/1988	08/10/1989
2014-2015	LANDSAT 8	30	14/01/2014	14/11/2014
			30/01/2014	30/11/2014
			15/02/2014	18/02/2015
			19/03/2014	06/03/2015
			04/04/2014	22/03/2015
			20/04/2014	07/04/2015
			22/05/2014	23/04/2015
			23/06/2014	09/05/2015
			25/07/2014	25/05/2015
			11/09/2014	10/06/2015
			27/09/2014	26/06/2015
			13/10/2014	14/09/2015
29/10/2014	03/12/2015			

I-1-2 Les bandes spectrales des capteurs Landsat TM utilisées

Les données utilisées dans le cadre de ce travail découlent toutes des capteurs Thematic Mapper (TM) du satellite Landsat. Nous avons acquis les images sur le portail et système de base de données en ligne USGS (United States Geology Survey).

LANDSAT TM est un capteur de télédétection qui se base sur la mesure de la luminance de rayonnement solaire réfléchi dans un certain domaine de fréquence/longueur d'onde.

Les images de Landsat Thematic Mapper (TM) 4 et 5 sont constituées de sept bandes spectrales avec une résolution spatiale de 30 mètres pour les bandes 1 à 5 et 7. La résolution spatiale pour la bande 6 (infrarouge thermique) est de 120 mètres sur-échantillonnée à 30m (non-utilisée ici). La taille de la scène approximative est de 170 km au nord-sud par 183 km à l'est-ouest. (Girard M.C., Colette M. ; 2010)

Tableau 3 : Fenêtres spectrales des capteurs LANDSAT TM 4 et 5 utilisés dans l'étude :

Bande spectrale	Longueur d'onde en μm	Résolution
Bande 1 – Bleu	0,45-0,52 μm	30m
Bande 2 – vert	0,52-0,6 μm	30m
Bande 3 - rouge	0,63-0,69 μm	30m
Bande 4 – Proche infra-rouge	0,76-0,9 μm	30m
Bande 5 – Moyen Infrarouge	1,55-1,75 μm	30m
Bande 6 – Infrarouge Thermique	10.40-12.50 μm	120* (30) m
Bande 7 – Moyen Infrarouge	2.08-2.35 μm	30m

Source : http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php

Le Landsat 8 opérationnel Terre Imager (OLI) a été lancé le 11 février 2013, il acquiert des images qui se composent de neuf bandes spectrales. Sa résolution optique est de 30 m sur toutes les bandes sauf la bande panchromatique (15m) c'est à dire une résolution spatiale de 30 mètres pour les bandes 1 à 7 et 9 et une résolution de 15 m de la bande 8 (panchromatique). La taille de la scène approximative est de 170 km au nord-sud de 183 km à l'est-ouest.³

Tableau 4 : Fenêtres spectrales des capteurs LANDSAT TM 8 utilisés dans l'étude :

Bande spectrale	Longueur d'onde	Résolution
Bande 1 - Aérosols	0,433 - 0,453 μm	30m
Bande 2 - Bleu	0,450 - 0,515 μm	30m
Bande 3 - Vert	0,525 - 0,600 μm	30m
Bande 4 - Rouge	0,630 - 0,680 μm	30m
Bande 5 - Infrarouge proche	0,845 - 0,885 μm	30m
Bande 6 - Infrarouge moyen 1	1,560 - 1,660 μm	30m
Bande 7 - Infrarouge moyen 2	2,100 - 2,300 μm	30m
Bande 8 - Panchromatique	0,500 - 0,680 μm	15m
Bande 9 - Cirrus	1,360 - 1,390 μm	30m

Source : http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php

I-2 Les critères de choix d'images satellites

Le choix des images Landsat TM est justifié par la compatibilité de sa résolution spatiale avec notre échelle d'étude ainsi que par l'importance de sa fauchée (scène de 180×180), son temps de revisite et de sa gratuité.

Utiliser Landsat 4-5 et 8 permet d'avoir des images qui décrivent aussi bien un état d'occupation du sol actuel qu'un état antérieur durant la période de sécheresse au Sénégal.

³ http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php

Les images utilisées ont subi des prétraitements pour les convertir en réflectance bas-de-l'atmosphère. En amont du corps de notre étude, nous avons testé ce choix en comparant les NDVI (on va le définir dans la section suivante) calculés avec ceux dérivés du niveau de prétraitement plus classique qui est le mode luminance, pour une (05/08/1988). Les deux types d'images qui se trouvent sur le portail USGS sont :

- Des images Landsat 4 et 5 en mode réflectance dont le segment-sol calcule la réflectance en corrigeant l'absorption et la diffusion atmosphérique. Dans ce cas-là le NDVI calculé est appelé NDVI bas de l'atmosphère.
- Des images Landsat 4 et 5 en mode luminance, dans ce cas-là nous allons calculer suivant une opération la luminance apparente et après on va la transformer en réflectance. Le NDVI calculé ici est appelé NDVI haut de l'atmosphère. Donc deux étapes vont être suivies pour mesurer la réflectance haut de l'atmosphère

Avant de commencer par le calcul de NDVI nous expliquons dans la section suivante les variables de luminance et réflectance.

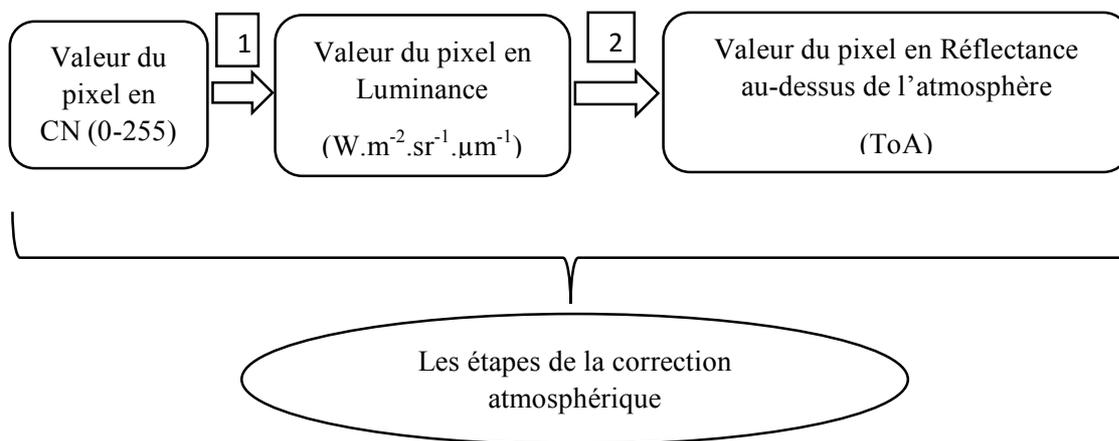
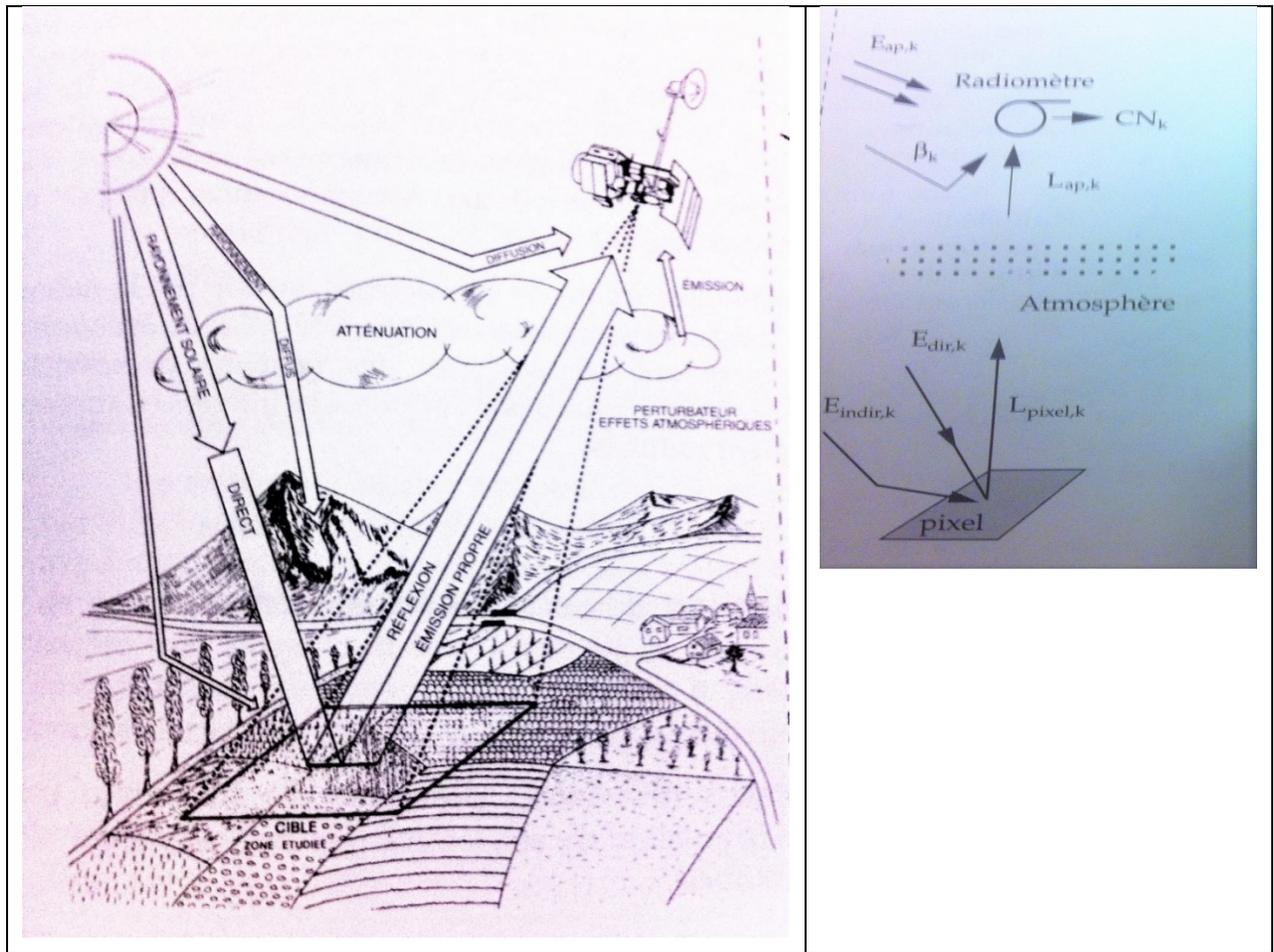


Figure 10 : représentation simplifiée des étapes de conversion des images de compte numérique en Réflectance haut de l'atmosphère.

I.2.1 Conversion des images compte numérique CN en luminance apparente



Source : Régis Caloz, Claude Collet (2001)

Figure 11 : Schéma du principe de la télédétection et du cheminement des rayonnements électromagnétiques.

La luminance apparente $L_{ap,k}$ ⁴ dépend des facteurs suivants :

« - De l'éclairement (irradiance) provenant du soleil reçu par le pixel, fonction de la position du soleil ainsi que de l'orientation du pixel par rapport à celui-ci.

- Du relief environnant le pixel, susceptible de produire un rayonnement indirect
- Des propriétés spectrales de la couverture du sol, de sa rugosité
- De l'angle sous lequel le capteur reçoit le rayonnement
- Des effets atmosphériques tels que ceux de diffusion et d'absorption. » (Régis Caloz, 2001)

Les images satellites sont codées en compte numérique CN_k (Digital Number) compris entre 0 et 255, On peut facilement les convertir par la suite en une luminance apparente, soit une quantité d'énergie en $W.m^{-2}.sr^{-1}$ que reçoit le capteur dans une longueur d'onde donnée.

Cette transformation CN_k -luminance est effectuée par une équation linéaire en prenant en compte les coefficients de calibration pour chaque bande fournis avec les images. (Lavorini Damien, 2010 ; Cyrielle GUÉRIN, 2010 ; Régis Caloz, 2001)

Les équations suivantes évoquent le passage des comptes numériques à la luminance :

$$L_{ap,k} = CN_k \times Gain + Biais$$

Avec

- $L_{ap,k}$: La luminance apparente en $W/(m^2.sr.um)$
- CN_k : La valeur des comptes numérique
- Gain et Biais : Coefficients de calibration pour chaque bande (et biais pour les images Landsat) sont des valeurs données par chaque satellite et se trouvent dans le fichier metadata

I.2.2 Transformation réduisant les effets de l'atmosphère et du relief : conversion de la luminance en réflectance au-dessus de l'atmosphère (TOA).

Cette étape consiste en une conversion de la luminance en réflectance au-dessus de l'atmosphère (TOA), afin de rendre possible l'analyse du couvert végétal par sa biomasse verte, par le taux de recouvrement du sol nu. En effet La luminance est définie en radiométrie de dimensions $[W.m^{-2}.sr^{-1}.um^{-1}]$ « *Cependant, elle ne correspond ni à notre système de perception visuelle, ni à notre manière habituelle d'appréhender les phénomènes de la surface du sol... ainsi que la réflectance présente l'avantage de normaliser la valeur du signal et de rendre comparables des images (de réflectance) entre elles. Le facteur de normalisation est l'éclairement solaire* » (Régis Caloz, 2001).

La transformation de la luminance en réflectance, au-dessus de l'atmosphère (TOA), est effectuée selon une équation qui prend en compte des constantes d'éclairement solaire. (Chander et al. (2009) ; The Yale Center for Earth Observation, 2013)

$$\rho = \frac{\pi \times L \times d^2}{E_0 \times \cos\theta}$$

Avec :

- ρ : La réflectance haut de l'atmosphère (TOA)
- E_0 : L'éclairement solaire est une constante donnée pour chaque bande et pour chaque capteur (The Yale Center for Earth Observation, 2013 ; Jim Irons, 2011)
- d^2 : La distance Terre Soleil , peut être trouvée dans plusieurs sites et publications par exemple

⁴ L'indice k révèle le niveau de cette énergie en fonction de la bande spectrale k considérée.

ici (The Yale Center for Earth Observation, 2013 ; Jim Irons, 2011)

- θ_s : L'angle zénithal solaire

Les différentes caractéristiques des images sont regroupées et fournies par USGS dans un fichier qui se termine par "_MTL.TXT". Nous avons utilisé après le logiciel Terrset pour effectuer le calcul de la luminance et de la réflectance.

Les informations contenues dans ce fichier sont des informations sur la

- Géométrie de la scène
- Date et heure et jour de l'image,
- Type et numéro du satellite et numéro de capteur,
- Angle zénithal du soleil (θ_i),
- Coefficients de calibration pour chaque bande (et biais pour les images Landsat).

Tableau 5 : Tableau récapitulatif de définition de la luminance et réflectance

Nom	Définition	Unité
Luminance spectrale	Rapport de l'intensité énergétique, dans une direction et une bande spectrale définies, d'un élément de surface à l'aire de la projection orthogonale de cet élément sur le plan perpendiculaire à cette direction	$W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$
Réflectance spectrale	Rapport du flux radiatif réfléchi par un milieu matériel au flux radiatif incident, dans une bande spectrale définie.	Aucune

Source : Régis Caloz, Claude Collet (2001)

I.2.3 Résultats de la correction atmosphérique et calcul de NDVI

Après avoir fait les conversions de CN en Luminance et de Luminance en réflectance haut de l'atmosphère, nous avons calculé l'indice de végétation NDVI haut de l'atmosphère (Normalized Difference Vegetation Index).

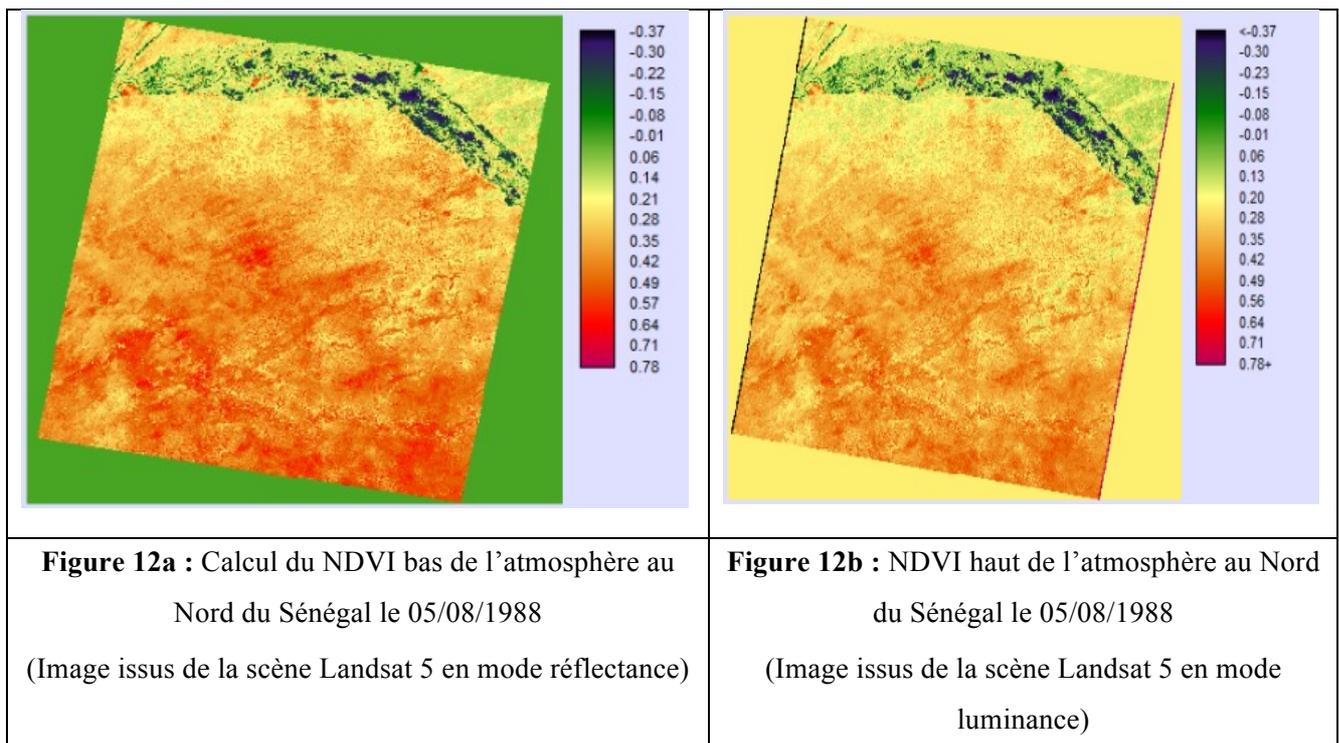
Cet NDVI haut de l'atmosphère est comparé par l'indice de végétation NDVI bas de l'atmosphère que nous avons calculé directement à partir de la scène Landsat 5 en mode réflectance.

L'indice de végétation NDVI est calculé à partir de deux bandes spectrales, le rouge R et le proche infrarouge PIR selon la formule suivante :

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$$

La justification principale de l'utilisation de la bande rouge (R) et proche infrarouge (PIR) pour le calcul de NDVI est que la première absorbe l'énergie lumineuse pour la photosynthèse, alors que la deuxième réfléchit au contraire fortement cette énergie. Cet écart entre ces deux bandes permet de discriminer et de distinguer les caractéristiques particulières des végétaux. (Bram Govaerts et al. 2010). « *La normalisation par la somme des deux bandes tend à réduire les effets d'éclairement ou de pente. Il permet ainsi une comparaison de la couverture végétale en relative indépendance du relief.* » (Régis Caloz et al., 2001)

« *Les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux (les milieux aquatiques, les nuages, pour lesquels la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge). Pour les sols nus, les valeurs de la réflectance étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente alors des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7 - les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses et les plus actifs* »⁵



A ce stade-là, on fait la différence entre les deux calculs de NDVI (NDVI bas de l'atmosphère – NDVI haut de l'atmosphère).

⁵ <http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/vegetation/indices/qques-indices/indices-simples.html>

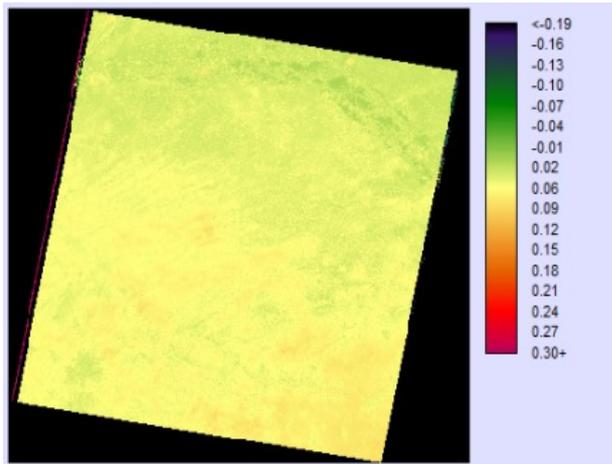


Figure 12 c : calcul de différence de NDVI Haut de l’atmosphère et bas de l’atmosphère

Ce dernier calcul nous montre une différence de l’ordre de 0.08, il ne s’agit pas d’une différence énorme, on a une erreur et une incertitude d’environ de 10% de NDVI maximal. De plus les différences les plus fortes concernent des espaces en eau.

Selon ce résultat, nous avons choisi de travailler avec des images de Landsat 4 et 5 pour les années 1988/1989, en prenant en compte les corrections atmosphériques, sachant que si nous travaillons avec les images de Landsat 4 et 5 en mode luminance, des différences peuvent apparaître dans la carte finale.

I-3 Photographies aériennes et images à hautes résolutions spatiale

Dans la phase de traitement des images satellites nous avons utilisé des photographies aériennes disponibles sur *Google Earth*, qui nous ont permis de localiser empiriquement les zones urbaines par exemple. En outre, si avec les images de satellites on peut détecter les zones de végétation, la tâche est difficile en ce qui concerne leur typologie (végétation herbacée et différents degrés de couvert ligneux) pour ce faire nous compléterons notre étude en ayant recours aux images de très haute résolution sur le site *Google Earth*.



Source Google Earth, 2010

Figure 13 : Exemple d'une image de photographie aérienne pour la zone de Linguère situé entre le sud de Ferlo et le Nord du bassin arachidier.

II- Méthode et outils

Pour retracer l'évolution de l'occupation du sol au nord-centre du Sénégal, nous avons procédé aux traitements des images satellites. Ce traitement nous permettra de mettre en évidence l'évaluation des superficies et la nature de changement de paysage dans la zone d'étude durant 30 ans.

Le logiciel Terrset a été utilisé pour traiter la carte d'occupation du sol, l'analyse diachronique et la classification.

Nous détaillerons après les méthodologies de classifications des images.

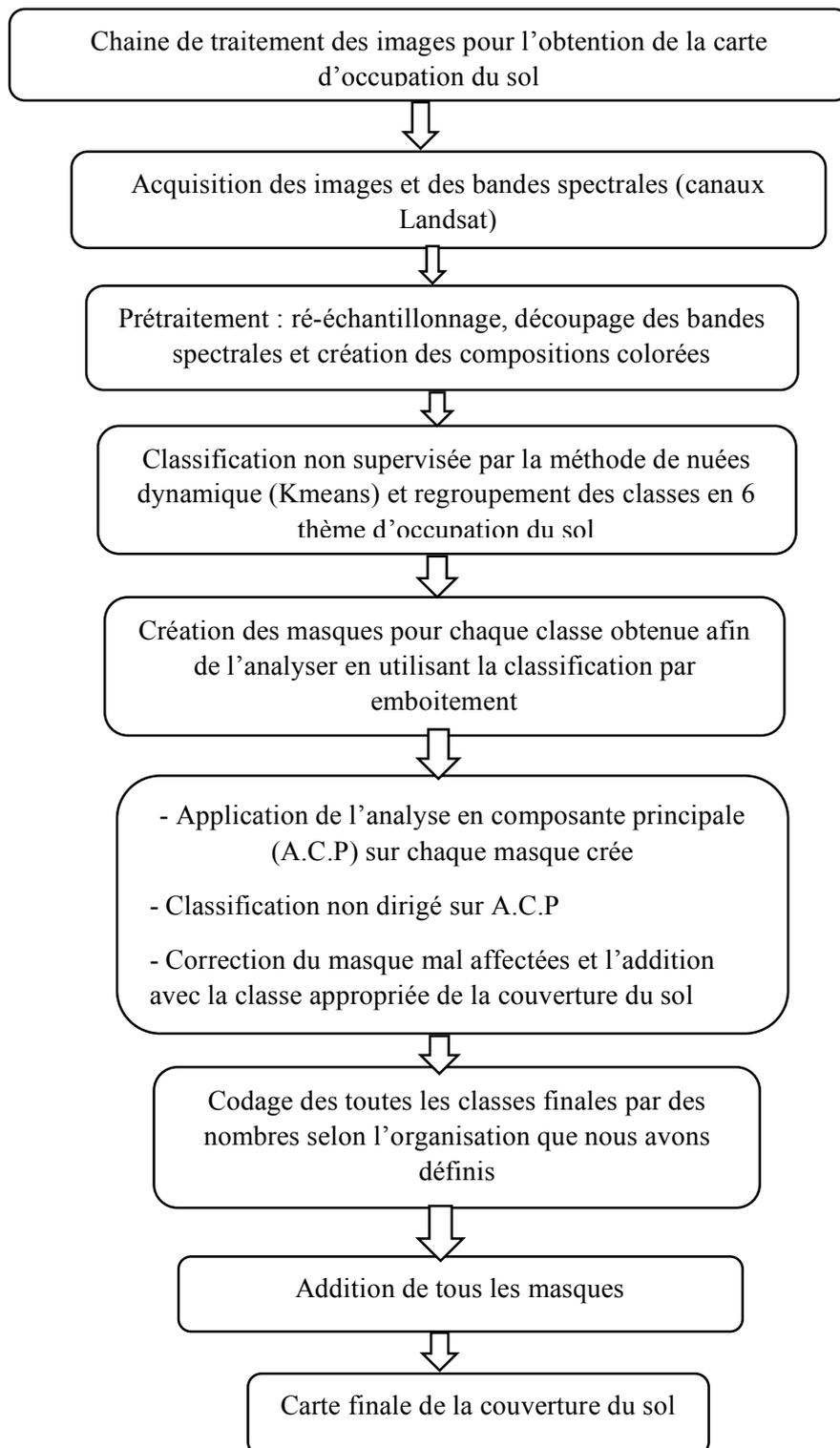


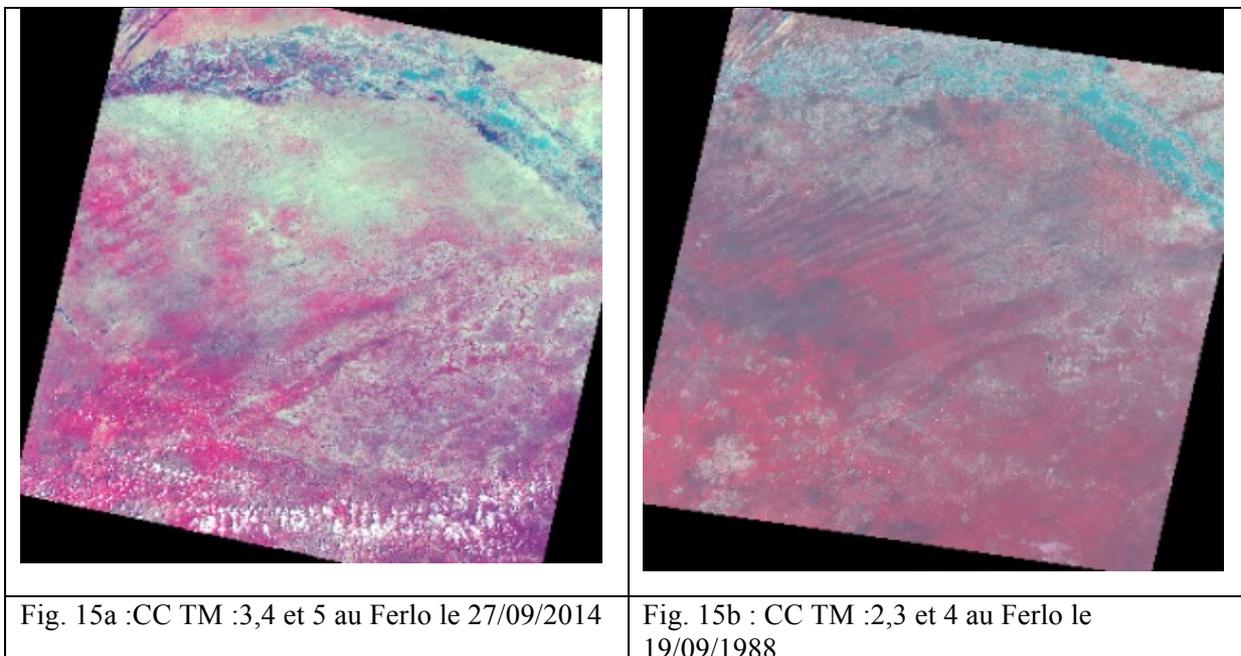
Figure 14 : Schéma récapitulatif du traitement d'images pour la réalisation des cartes d'occupation du sol

II-1 Correction géométrique et ré-échantillonnage

Afin de comparer l'occupation du sol en 1988 avec celle de 2014 et de superposer efficacement les couches pour une analyse diachronique nous avons eu recours au ré-échantillonnage de l'image de 1988 qui permet une homogénéisation de base de données Landsat. Le ré-échantillonnage a pour but de recalculer de valeurs des pixels d'une taille donnée à partir des valeurs des pixels d'une image d'origine (Ferdinand Bonn et al. 1993).

II-3 La composition colorée.

Une des étapes fondamentales pour la visualisation globale des différents objets sur les images satellites (eau, sol nu, bâti, végétations) c'est la composition colorée. Elle nous permet de voir les grands ensembles et de faire une classification primaire. Plusieurs compositions colorées peuvent être faites. Dans notre étude, ce qui nous intéresse c'est l'analyse du couvert végétal, Plusieurs ouvrages de télédétection (par exemple Michel-Claude Girard, 2010), ont conseillé d'utiliser la composition colorée entre les longueurs d'onde Vert, Rouge et Proche infrarouge pour l'étude des couverts végétaux. Pour ce faire nous avons fait une combinaison entre la bande vert (exprimé dans la couleur primaire d'affichage bleu), rouge (exprimé en vert) et proche infrarouge (exprimé en rouge), c'est-à-dire TM 2, TM3, TM4 pour les images issues de Landsat5 et TM3, TM4, TM5 pour les images issues de Landsat8.



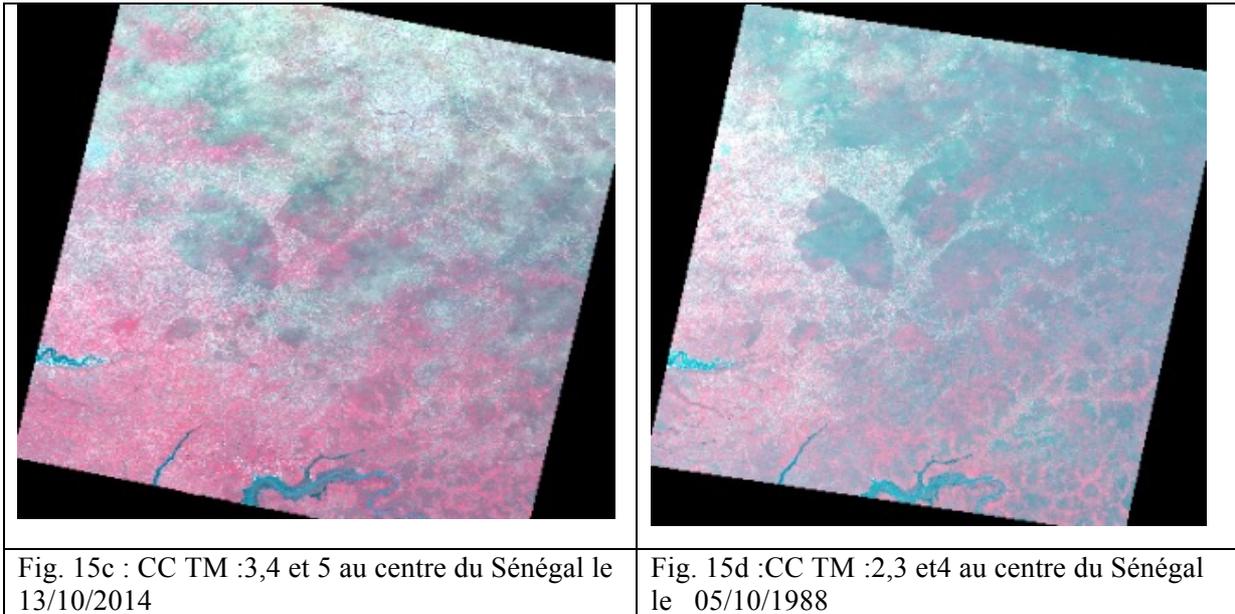


Figure 26 a, b, c, d : compositions colorées (CC) du Ferlo et du centre du Sénégal R=bande PIR
V=bande rouge et B=bande verte

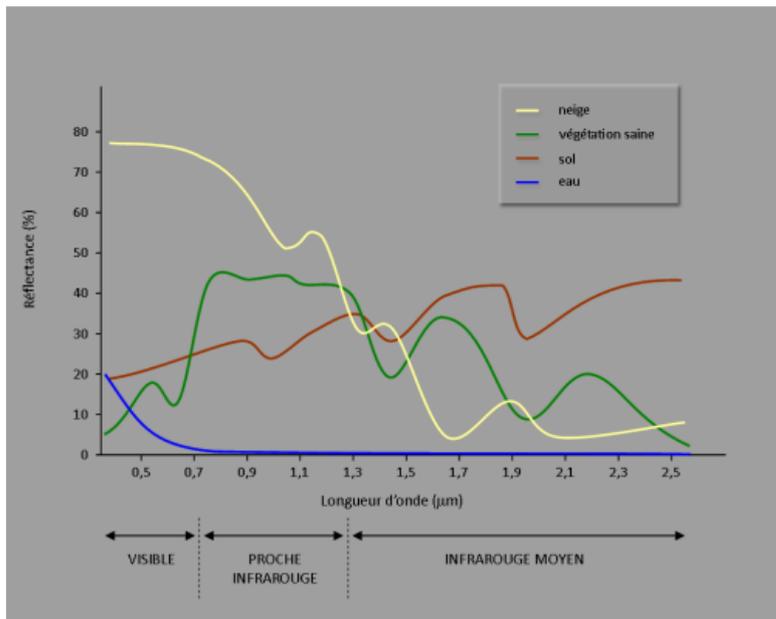
La combinaison entre les bandes spectrales Vert, Rouge et Proche infrarouge, a facilité l'identification de l'eau qui apparaît en bleu clair sur les compositions colorées, des zones de végétations en fonction de leurs densifications, colorées en rouge clair à rouge sombre. Les taches blanches qui se manifestent sur l'image du Ferlo en 2014 correspondent aux nuages. Le sol nu et autres sont colorés en teintes vert et bleues- turquoises.

II-4 Classification par nuées dynamiques

Le principe de la classification non supervisées ou classification par nuées dynamique (Kmeans) consiste à une partition des données. En choisissant un nombre de classes, un processus de classification automatique va être établi. Il permet de rassembler d'une façon homogène tous les pixels dans différentes classes. L'opération de Kmeans consiste à calculer d'abord les moyennes de N classes, puis, une affectation des pixels se fait par itération vers les centres des classes en fonction de la distance minimale. (DIDAY E., 1971 ; Michel-Claude Girard et al, 2010)

« L'algorithmme s'arrête soit lorsque deux itérations successives conduisent à la même partition soit lorsqu'un critère convenablement choisi (par exemple la variance intra-classe) cesse de décroître de façon sensible soit encore parce qu'un nombre maximal d'itérations a été fixé a priori. » (Alain Morineau, 2004).

II-5 Réponses spectrales des quelques surfaces naturelles



Source : <http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/2-rayonnement-matiere/2-7-signatures-spectrales.html>

Figure 16 : Courbes de réflectance de la végétation et du sol

La végétation : Comme la végétation présente des pigments foliaires, elle a une réponse spectrale faible dans le rayonnement visible (rouge) et forte dans le proche infrarouge. En effet le premier absorbe l'énergie lumineuse pour la photosynthèse, alors que la deuxième réfléchit cette énergie

La signature spectrale de la végétation est tributaire des changements physiologiques qui accompagnent sa croissance.

Les sols : La signature spectrale des sols se caractérise par accroissement allant du visible à l'infrarouge, et selon l'humidité ou la rugosité du sol on peut remarquer une baisse de sa réflectance sur tout le spectre. (Girard M.C. et al, 2010)

L'eau : L'eau pure a une réponse spectrale très faible dans toutes les longueurs d'onde, mais si l'eau est turbide et contient des suspensions et sédiments sa réflectance peut avoir une augmenter sur toutes les longueurs d'onde.

II-6 Analyse de composantes principales ACP :

Dans ce travail de recherche, on a fait le calcul de NDVI. Les images qu'on a eu durant l'année sont inégalement réparties : On a eu plus d'images en période de mousson qu'en période sèche. Pour traiter ces images on a fait la classification non dirigée (kmeans) sur des résultats d'Analyse en Composantes Principales (A.C. P) sur des données multi spectrales. L'application de l'A.C. P permet de réduire l'information c'est-à-dire que les données qui sont concentrées et très corrélées pendant la saison de pluie vont avoir le même poids que celles qui se trouvent pendant la saison sèche et sont décorréées. L'ACP permet donc d'extraire les principaux contrastes spatiotemporels, ce qui nous a permis par la suite de bien distinguer les fluctuations saisonnières et interannuelles du NDVI.

Le principe de l'ACP reste le même si on l'applique sur les canaux Landsat : au fait le canal bleu, rouge et vert sont très corrélées entre eux par rapport au PIR et MIR. L'ACP permet de donner le même poids à chaque domaine de longueur d'onde. « *L'ACP permet donc la détection de faibles contrastes radiométriques* » (Mering C., et al. 2008).

II-7 Le système d'information géographique (SIG).

Le SIG combine des informations spatiales, temporelles et des bases de données socio-économiques géoréférencées facile à consulter et à mettre à jour. Dans notre travail nous avons eu recours au système d'information géographique (SIG), afin de superposer la carte d'occupation du sol sur une carte du Sénégal dont les limites des communautés rurales, les voies de communications et les localités sont bien repérées et distinguées.

Partie II Résultats : Mesures de l'évolution de l'occupation du sol et de caractéristique spatiale

Chapitre I : Analyse des changements d'occupation du sol dans la zone d'étude

L'un des principaux objectifs dans ce travail de recherche est de caractériser, d'analyser et de mesurer la dynamique de l'évolution d'occupation du sol entre le Ferlo et le bassin arachidier sénégalais afin d'évaluer la dégradation ou non de la partie centre-nord du Sénégal à cause des changements climatiques. Pour atteindre notre objectif nous avons eu recours à une analyse diachronique des images multi spectrales.

L'étude de la partie deux du mémoire, s'articule autour de deux chapitres :

Le premier chapitre se divise en deux sections, la première se consacre à définir la tendance d'évolution des indices de végétation NDVI (Indice Normalisé de Végétation) sur une période marquée par la grande sécheresse jusqu'à une période récente. Cette étude a pour but de déterminer l'état phénologique de la couverture végétale, ainsi que les changements spatiotemporels de l'activité biologique de la végétation durant l'année 1988-1989 et 2014-2015.

Dans la deuxième section, il s'agit d'analyser l'occupation du sol et sa distribution spatiale. Cette analyse porte sur deux dates (1988 et 2014).

Dans le chapitre deux nous allons faire les cartes de changements, dans le but de décrire les majeures évolutions du couvert végétal qui sont effectuées entre le Ferlo et le bassin arachidier du Sénégal.

Nous avons rencontré quelques contraintes dans notre étude lors de calcul de l'indice de végétation, ce dernier est sensible aux effets atmosphériques et à l'aérosol, puisque nous avons utilisé quelques images avec des nuages, les valeurs de l'indice NDVI sont susceptible d'être légèrement biaisé par la présence de ces nuages.

Nous rappelons ci-dessous que les deux zones d'études que nous allons traiter sont les emprises 204 49 et 204 50.

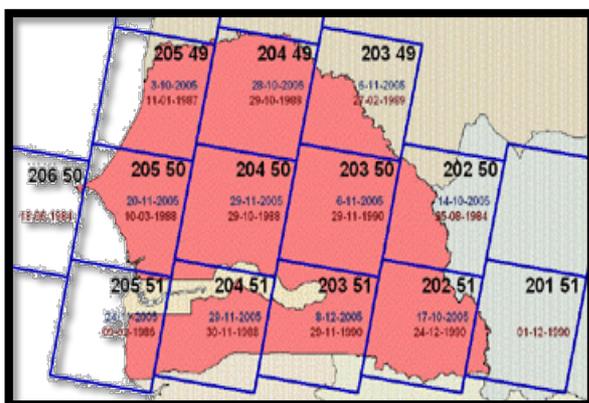


Figure 17 : délimitation de la zone d'étude

I- Analyse de calcul de l'indice de végétation NDVI au nord-centre du Sénégal

I-1 Analyse de calcul de l'indice de végétation NDVI au nord du Sénégal

La stratégie adoptée dans notre étude pour afficher le profil de NDVI ainsi que leur variation dans le temps que ce soit au nord ou au centre du Sénégal, c'est d'appliquer l'Analyse en Composantes Principales (ACP) sur les images NDVI mensuelles sur les période 88/89 et 2014/2015.

Nous donnons ci-dessous un exemple de calcul d'ACP faite sur des images NDVI en 1988 au nord du Sénégal.

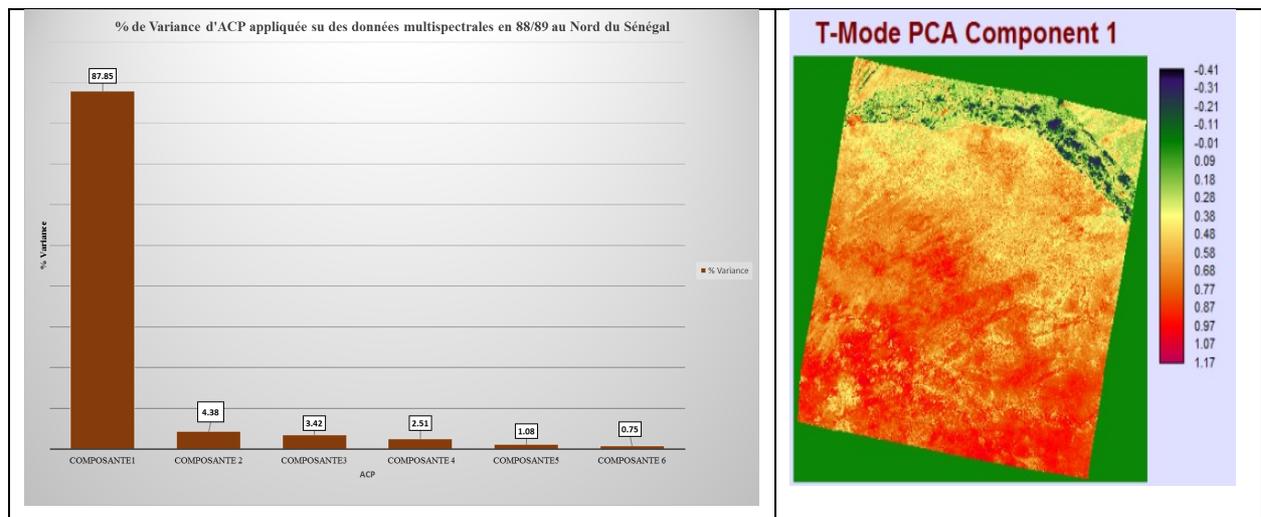


Figure 18 : Pourcentage de variance d'ACP et cartographie de la couverture végétale selon la composante 1.

Les résultats obtenus, montrent une concentration d'information sur les quatre premiers facteurs qui ont plus de 98% d'inertie cumulés. Sur la base du niveau de signification de leurs variances, seuls ces quatre facteurs vont être pris en considération dans la partie qui suit.

La cinquième et la sixième composante présentent un pourcentage insignifiant de l'information sur la variance totale.

La composante 1 représente près de 88% de la variance totale, et traduit une opposition nette des comportements phénologiques de savane arborée au sud du Ferlo (en rouge) et celui de steppe herbacé/arbustive (en jaune), plus au nord en domaine sahélien. L'image de la première composante ci-dessus restitue le gradient sud-nord d'abondance de pluies (premier chapitre) et décrit finement la distribution spatiale de la couverture végétale.

Dans l'étape suivante, une reclassification des pixels par l'algorithme des nuées dynamique (Kmeans) a été faite en utilisant les quatre premières composantes principales. Cette classification nous a permis d'identifier et de cartographier une organisation spatiale de la couverture végétale.

I-1-1 Profil de NDVI dans le Ferlo (nord du Sénégal) au cours de la saison 1988 /1989

Le climat du Nord du Sénégal est de type sahélien. Il comporte deux saisons :

- Une saison de pluies, c'est la période de moussons, elle s'étale en générale du mois de juin au mois d'octobre avec un pic en mois d'aout-septembre, et suivant la latitude elle peut commencer tôt ou tard. Plus on est nord plus elle commence tard, et elle s'arrête tôt ; et plus on est au sud donc elle commence tôt et s'arrête tard. La saison des pluies est donc plus longue au sud qu'au nord.
- Une saison sèche s'étend du mois de novembre à juin⁶.

Avant d'afficher le profil NDVI pour chaque image, nous définissons les différentes catégories choisies et la différence entre steppe et savane :

Steppes :

Les steppes sont de vastes plaines parsemées d'herbes basses disposées en touffes plus ou moins espacées⁷. Ils se trouvent généralement dans des régions de climat tropical à longue saison sèche et des semi-déserts (en particulier les bordures désertiques). Selon yangambi le Steppe c'est une « Formation herbeuse ouverte ...graminées vivaces largement espacées, n'atteignent généralement pas 80 cm ... »⁸, Selon les caractéristiques des espèces ligneuses et du couvert herbacé et leur densité, variant avec les climats (notamment la pluviométrie) et les sols, on parle de steppe herbacée, de steppe arborée, de pseudo steppe arbustive, de steppe rase, de steppe clairsemée...⁹

Savanes :

Parfois appelés « prairies tropicales," se situent généralement entre une forêt tropicale et un désert. Elle est plus ou moins parsemée d'arbres ou d'arbustes. Selon la densité (dans l'ordre croissant) des espèces ligneuses (à tige unique de plus de 8 mètres de hauteur), on parle de « savane herbeuse », de « savane arbustive », de « savane boisée (où le recouvrement est compris entre 25 et 60%) », de « savane arborée (où il est inférieur à 25%.)», puis de forêt claire (recouvrement supérieur à 60%), la transition se faisant en général de manière progressive.¹⁰

⁶ <http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/dossiers-pays/senegal/presentation-du-senegal/article/geographie-et-histoire-110755>

⁷ http://www.professeurphifix.net/eveil/geographie_steppes.pdf

⁸ http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_06-07/06707.pdf

⁹ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Steppe>

¹⁰ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Savane>

« Leurs racines forment souvent un feutrage de plusieurs dizaines de centimètres de profondeur qui interdit l'installation d'autres espèces, mais qui leur permet de résister aux feux naturels ou anthropiques qui périodiquement, pendant la saison sèche, parcourent la savane. Les arbres, presque tous à feuilles caduques, ont une écorce épaisse et drageonnent facilement. Les plus emblématique, en Afrique, sont les Baobab. On y trouve aussi des Acacias, des Palmiers »¹¹

Et selon Yangambi « La savane est une formation herbeuse comportant un tapis de grandes herbes graminéennes mesurant, en fin de saison de végétation, au moins 80 cm de hauteur, avec des feuilles planes disposées à la base ou sur les chaumes, des herbes et plantes herbacées de moindre taille. »¹²

¹¹ <http://lesanimaux949.skyrock.com/2356036089-savane.html>

¹² <https://com.revues.org/5567>

Tableau 6 : Définition des différentes formations végétales.

Catégorie	Définition
Steppe herbacée	Formation herbeuse ouverte à couvert discontinu, composée de graminées annuelles, éventuellement mêlées à des herbacées vivaces (de moins de 80 cm), alors largement espacées
Steppe arbustive	Formations essentiellement herbeuses et buissonnantes. Elles sont peu développées, surtout composées d'épineux (<i>Balanites</i> , <i>Acacia</i> , etc.)
Pseudo steppe arbustive	La couverture herbacée est très clairsemée (<5%). La variabilité interannuelle de l'activité de la végétation reflète le caractère erratique des précipitations. (<i>P. Mayaux, et al ; 2003</i>), la différence entre steppe arbustive et pseudo steppe arbustive, tient au fait que cette dernière ressemblant à une steppe mais en fait plus désertifié.
Savane claire	Formation herbeuse comportant une strate herbacée supérieure continue d'au moins 80 cm de hauteur. La différence entre savane claire et savane arborée, ce que pour la première, le couvert arboré est beaucoup moins dense et très dispersé dans l'espace. Sa réponse spectrale est très faible par rapport à la savane arborée et on ne peut pas toujours la distinguer de formations steppiques.
Savane arborée	Les arbres et arbustes sont dispersés. La hauteur des arbres se situe entre 8 et 12 m pour une densité de couvert de 25 à 35 %. Ce type de végétation se rencontre dans la zone sahélo-soudanienne sous plusieurs formes : Savane arborée avec <i>Khaya senegalensis</i> , <i>Parkia biglobosa</i> , <i>Tamarindus indica</i> , <i>Butyrospermum paradoxum</i> et diverses combrétacées, localisée dans le Sud-Est du pays ; savane arborée à <i>Acacia seyal</i> , <i>Sclerocarya birrea</i> et <i>Combretum micranthum</i> dans le Centre du pays (régions de Fatick et de Kaolack), savane arborée à <i>Acacia senegal</i> , <i>A. raddiana</i> , <i>Balanites aegyptiaca</i> et <i>Ziziphus mauritiana</i> dans le Nord (zone sylvo-pastorale).
Savane boisée	Formation ouverte, même si les arbres et les arbustes sont plus regroupés (forêts galeries, petits massifs dispersés, par exemple). La hauteur des arbres se situe entre 10 et 15 m pour une densité de couvert de 30 à 45 %. Ce type de végétation se rencontre dans le domaine soudanien sous deux formes (i) savane boisée à <i>Anogeissus leucocarpus</i> et <i>Sterculia setigera</i> , localisée dans la région de Kaolack, au Sud de la route nationale, et dans le département de Tambacounda, savane boisée avec <i>Khaya senegalensis</i> , <i>Cordyla pinnata</i> et <i>Sterculia setigera</i> , localisée dans le Nord des départements de Kolda et de Vélingara, vers la frontière avec la Gambie ; ce type de végétation, de même que le suivant, appartiennent, dans la classification FAO, aux "Formations arborées feuillues mixtes, forestières et graminéennes"

Source : <http://www.fao.org/docrep/004/X6815F/X6815F06.htm>

Nous affichons dans la figure ci-dessous les variations de profil de l'indice NDVI à partir des données de 1888 et 1989. Selon la composition floristique de la zone d'étude qu'on a vu dans la première partie, et selon des travaux de terrain qui a été faite par plusieurs chercheurs dans la même zone d'étude (GERES, et al., 2013 ; CSE 2006 ; SARR, 2009, Fall 2014, etc.), nous avons définie 6 formations végétales :

- 1- Fleuve
- 2- Bâti+ sol nu sec+ steppe sèche
- 3- Savane claire
- 4- Steppe herbacée / arbustive
- 5- Savane arborée
- 6- Culture de décrue à faible croissance + sols hydro morphes

Dans la classe Bâti + sol nu + steppes sèches le signal ne permet pas de distinguer chacun différemment mais que ce qui domine ce sont des surfaces très peu végétalisées.

On crée pour chaque type de couverture végétale, un masque et on l'affiche avec la variation du son profil NDVI.

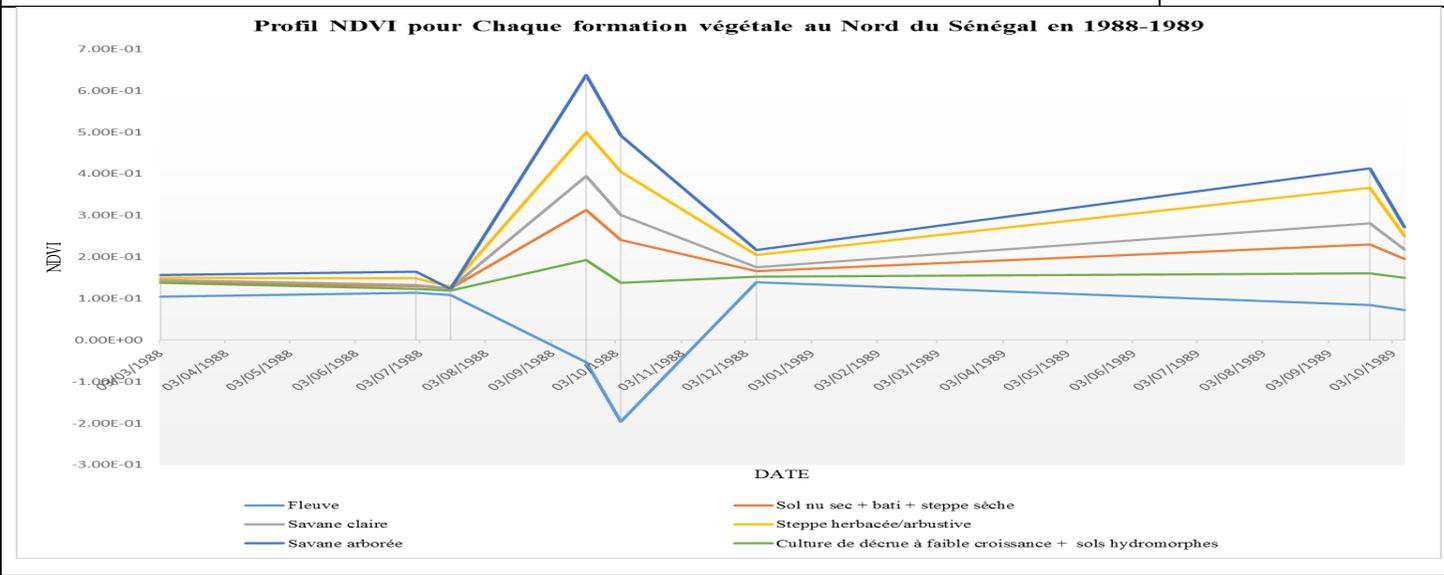
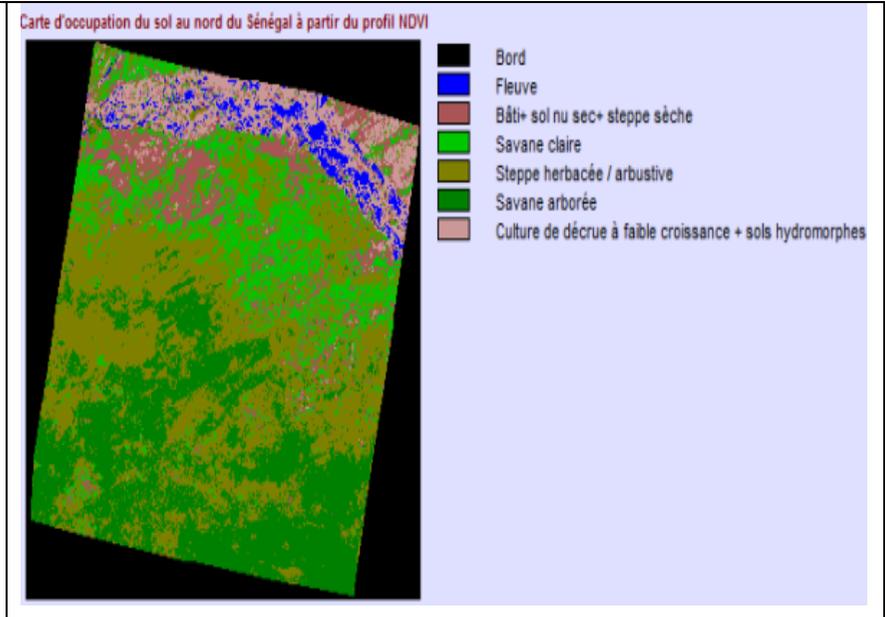
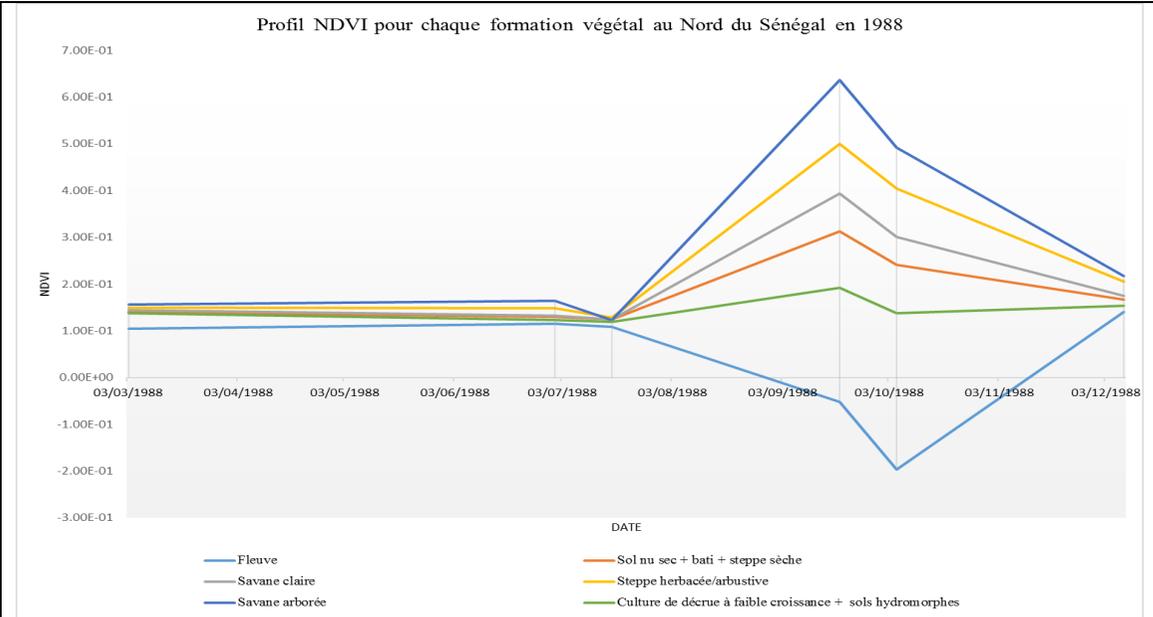


Figure 19 : Profil NDVI pour chaque formation végétale au nord du Sénégal en 1988 et Classification (par la méthode des Nuées dynamiques) en 6 classes en fonction des valeurs obtenues sur les 4 premières composantes principales

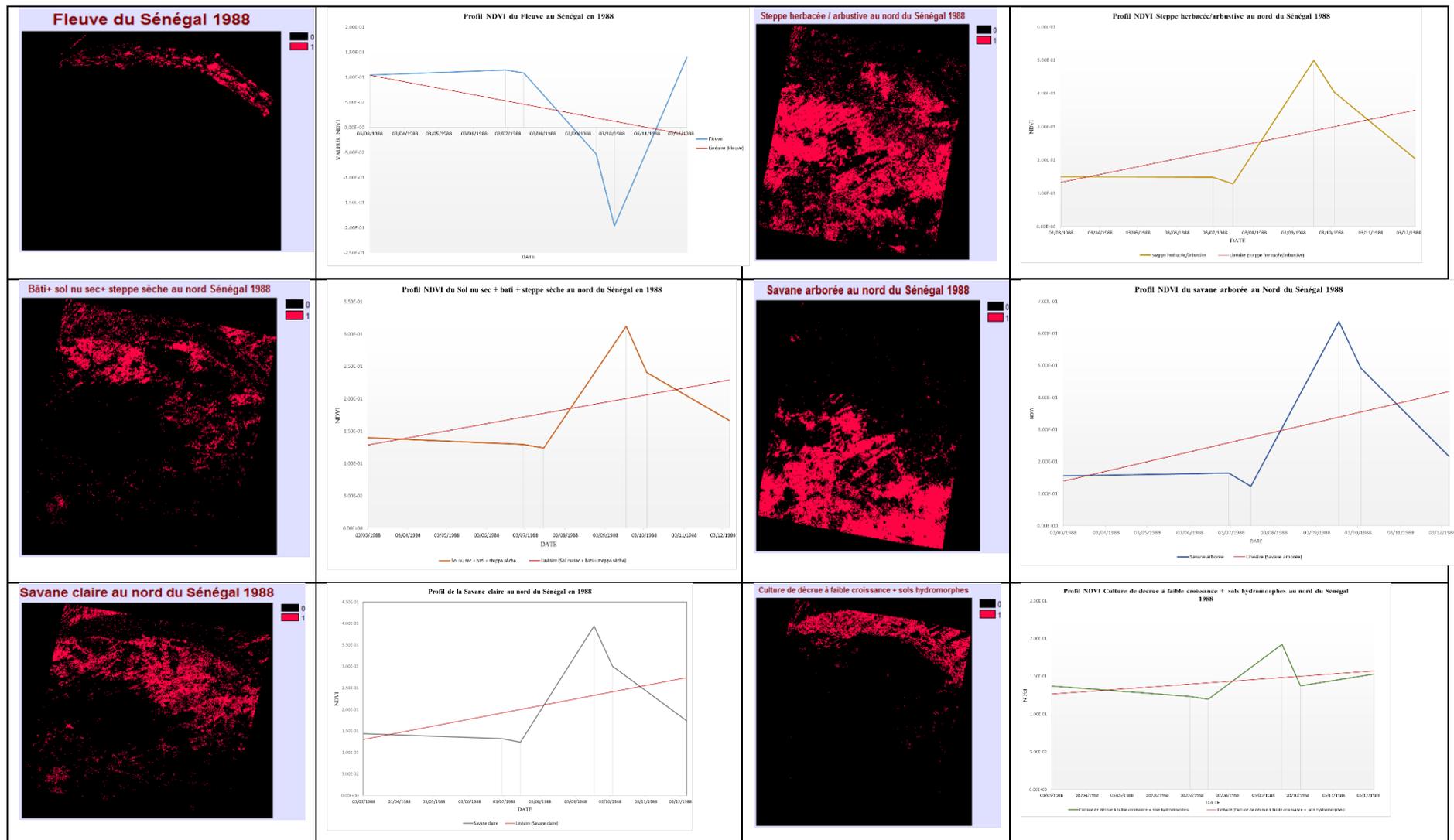


Figure 20 : Présentation de chaque masque de couverture du sol avec son profil NDVI au nord du Sénégal 1988

Une première lecture du profil affiché ci-dessus montre que les valeurs du NDVI montent progressivement en cohérence avec le gradient de pluies à partir du mois de juillet, pour atteindre un maximum en septembre. Les valeurs commencent à diminuer à partir du mois d'octobre avec la fin de la saison des pluies. La production végétale atteint donc sa phase optimale durant les mois d'août, de septembre et d'octobre. Ces variations peuvent avoir un état tardif ou précoce selon la saison des pluies d'une année à une autre.

Dans le nord du Sénégal, précisément dans le Ferlo, la couverture végétale se structure en gros en deux strates.

- Une strate herbacée avec quelques végétations ligneuses localisées principalement au nord et au nord-ouest du Ferlo
- Une strate arborée vers le sud et sud-est du Ferlo.

En saison sèche (novembre à juin) le NDVI est très faible, ne dépasse pas 0.2. Durant la saison des pluies, le NDVI de domaine de la savane arborée a atteint 0,7 dans le sud de Ferlo. On trouve aussi des valeurs faibles (ne dépassent pas 0.3) malgré la saison de pluies qui correspond à des surfaces bâties, du sol nu et des steppes sèches, dans le nord du Ferlo.

En effet cette végétation a été pâturée par le bétail pendant la saison sèche, et il ne reste qu'un paysage avec des steppes sèches avec quelques *Acacia senegal* ou des *Balanites aegyptiaca* qui témoignent de leur résistance à la sécheresse (Ndiaye Ousmane, et al., 2013). Cela explique que l'on trouve des valeurs faibles de NDVI durant la saison de la pluie.

Nous avons intégré les sols hydromorphes dans la classe de culture de décrue vu que la valeur maximale de NDVI est très faible.

Les résultats de reclassement pour chaque formation végétale montrent que la classe de la culture de décrue à faible croissance + sols hydro morphes présente un NDVI maximal de 0.19. Ceci explique qu'elle a une faible dynamique saisonnière par rapport à celle de la classe de savane arborée ou steppe herbacée qui comportent une dynamique saisonnière plus élevée avec un maximum en mois de septembre respectivement de 0.63 et 0.5.

I-I-2 Profil NDVI dans le Ferlo au cours de la saison 2014/2015

Dans cette section on va afficher le profil de NDVI du Ferlo en 2014-2015 suivi par un reclassement comme dans la section précédente. Ensuite les résultats obtenus seront comparés avec ceux de 1988.

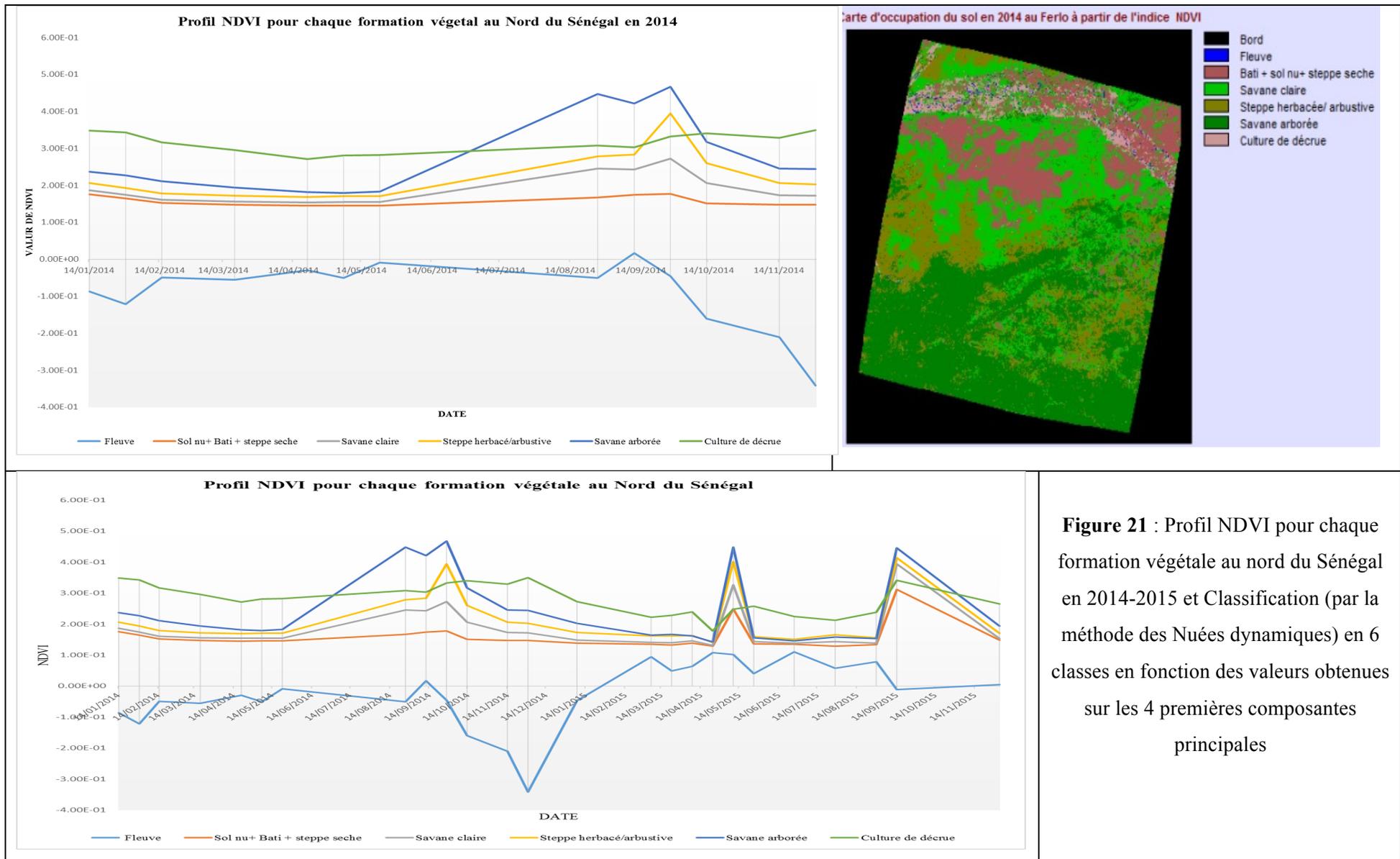


Figure 21 : Profil NDVI pour chaque formation végétale au nord du Sénégal en 2014-2015 et Classification (par la méthode des Nuées dynamiques) en 6 classes en fonction des valeurs obtenues sur les 4 premières composantes principales

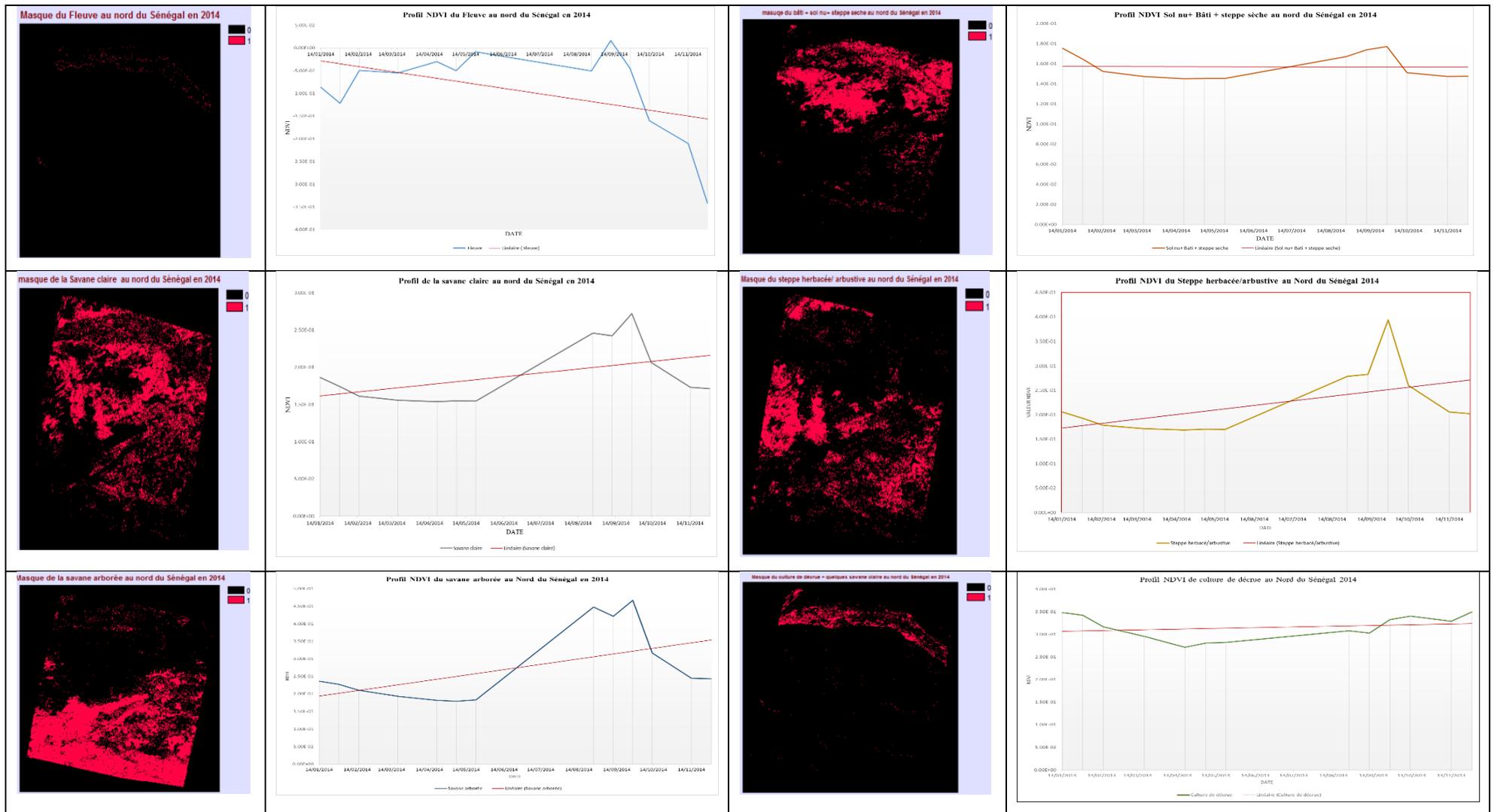


Figure 22 : Présentation de chaque masque de couverture du sol avec son profil NDVI au nord du Sénégal 2014

L'analyse des profils de NDVI montre que la saison 2014 a débuté à partir du mois de juin, un pic a été atteint pendant le mois de septembre qui explique la phase optimale de la production végétale.

Par contre, en 2015, on voit un état précoce de la saison des pluies qui est révélé par la présence d'un pic de NDVI pendant le mois de mai.

La classe du bâti et sol nu présente des valeurs NDVI faible sur toute l'année que ce soit en saison sèche ou saison des pluies qui ne dépasse pas 0.2.

Le domaine de la savane arborée, présente un pic entre le mois d'août et septembre. La classe de steppe herbacée révèle aussi une valeur maximale de NDVI assez importante au mois de septembre, qui montre l'apparition d'un tapis végétal composé d'espèces herbacées/arbustives moyennement dense pendant la saison des pluies.

Les valeurs NDVI de la culture de décrue montrent la présence d'une certaine activité chlorophyllienne pendant la saison sèche de l'année 2014.

Dans cette partie, notre analyse a porté sur le comportement et la formation phénologique de la végétation au nord du Sénégal. Il est important de voir comment chaque type de couverture du sol a évolué au cours de la période 1988 (une année marqueur de la période de sécheresse au Sénégal) et 2014 (bonne année pluviométrique), en examinant le profil d'évolution du NDVI. La comparaison de ces deux années révèle deux résultats différents : d'une part, une évolution du NDVI dépendante des apports pluviométriques, et d'autre part la présence des autres facteurs perturbateurs de l'écosystème.

Malgré l'amélioration des conditions pluviométriques au Sénégal en 2014, les valeurs maximales de l'indice NDVI pour la savane arborée et le steppe herbacée/arbustive ont connu une diminution entre 1988 et 2014. Ils sont passé respectivement de 0.63 et 0.49 en 1988 à 0.44 et 0.27 en 2014 ce qui témoigne d'une baisse de la production optimale végétale de ces deux strates durant cette période.

I-2 Analyse de calcul de l'indice de végétation NDVI au centre du Sénégal

I-2-1 Profil de NDVI au centre du Sénégal dans la saison 1988-1989

Dans cette section nous avons reproduit la même méthode que celle choisie précédemment pour afficher le profil de l'indice NDVI au centre du Sénégal.

Nous allons afficher ci-dessous le profil de l'indice NDVI selon 6 formations végétales ainsi que les masques de chaque occupation du sol. :

- 1- Fleuve : une partie du fleuve de Gambie affiche dans cette zone d'étude
- 2- Bâti+ sol nu sec+ savane claire

- 3- Savane arborée
- 4- Savane boisée
- 5- Culture non irriguée : les majeures cultures qui se trouve dans cette zone d'étude c'est l'arachide et le mil.
- 6- Nuage : Dans le traitement de calcul de NDVI on a pris quelques images avec peu de nuage, on trouve que le nuage persiste et apparait sur le profil de NDVI de cette zone d'étude. Il s'agit du nuage de la date 19/09/88 :

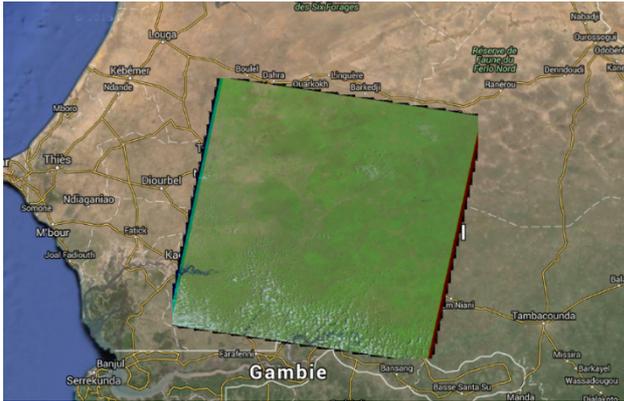


Figure 23 : présentation d'une image satellite de Landsat 5 avec nuage

La classe du Bâti+ sol nu sec + savane claire ça va du sol nu jusqu'au savane claire, c'est-à-dire on peut trouver quelques formations steppiques dans cette classe mais il est difficile de distinguer ces steppes des savanes claires, car le signal se comporte +/- de la même manière.

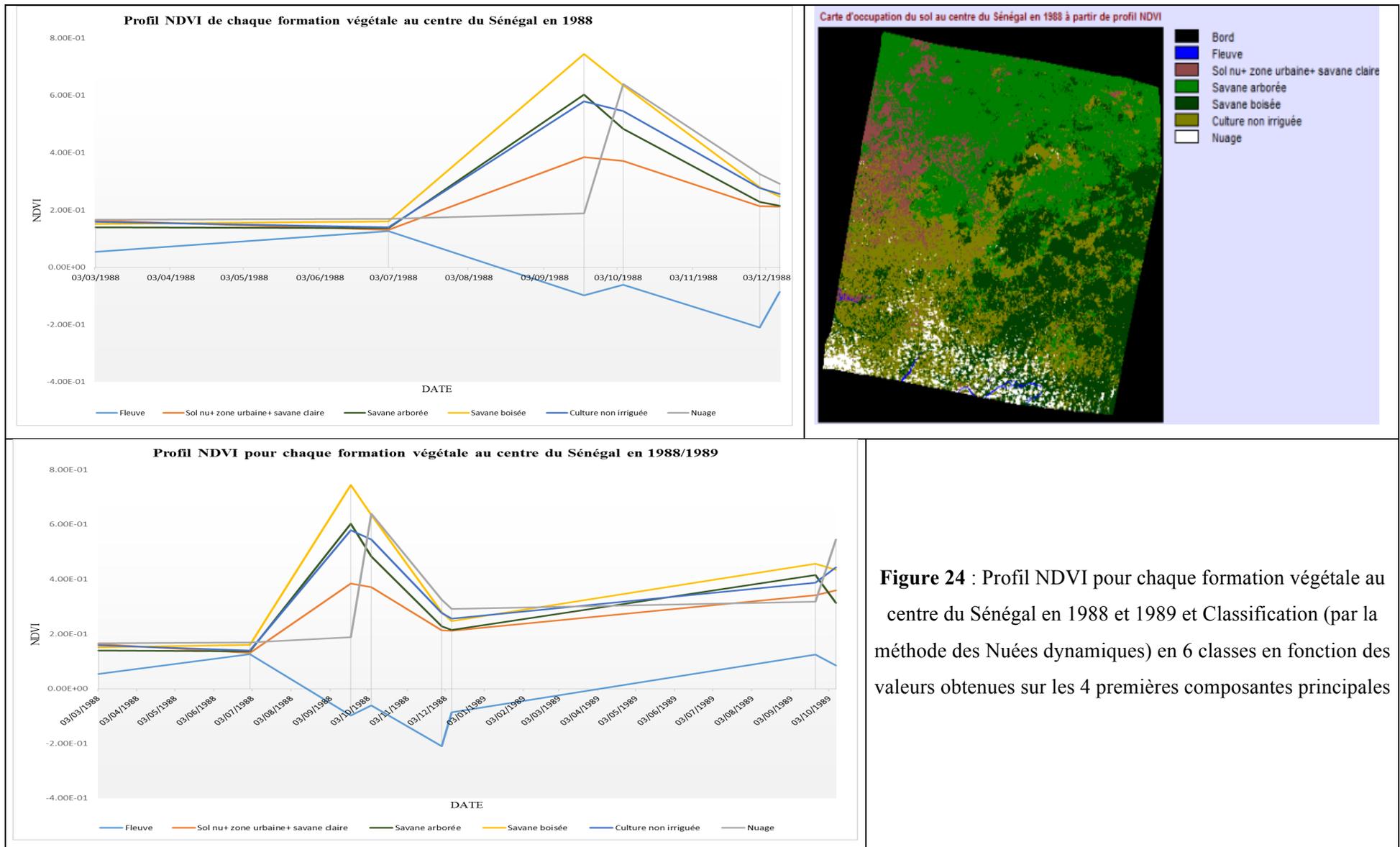


Figure 24 : Profil NDVI pour chaque formation végétale au centre du Sénégal en 1988 et 1989 et Classification (par la méthode des Nuées dynamiques) en 6 classes en fonction des valeurs obtenues sur les 4 premières composantes principales

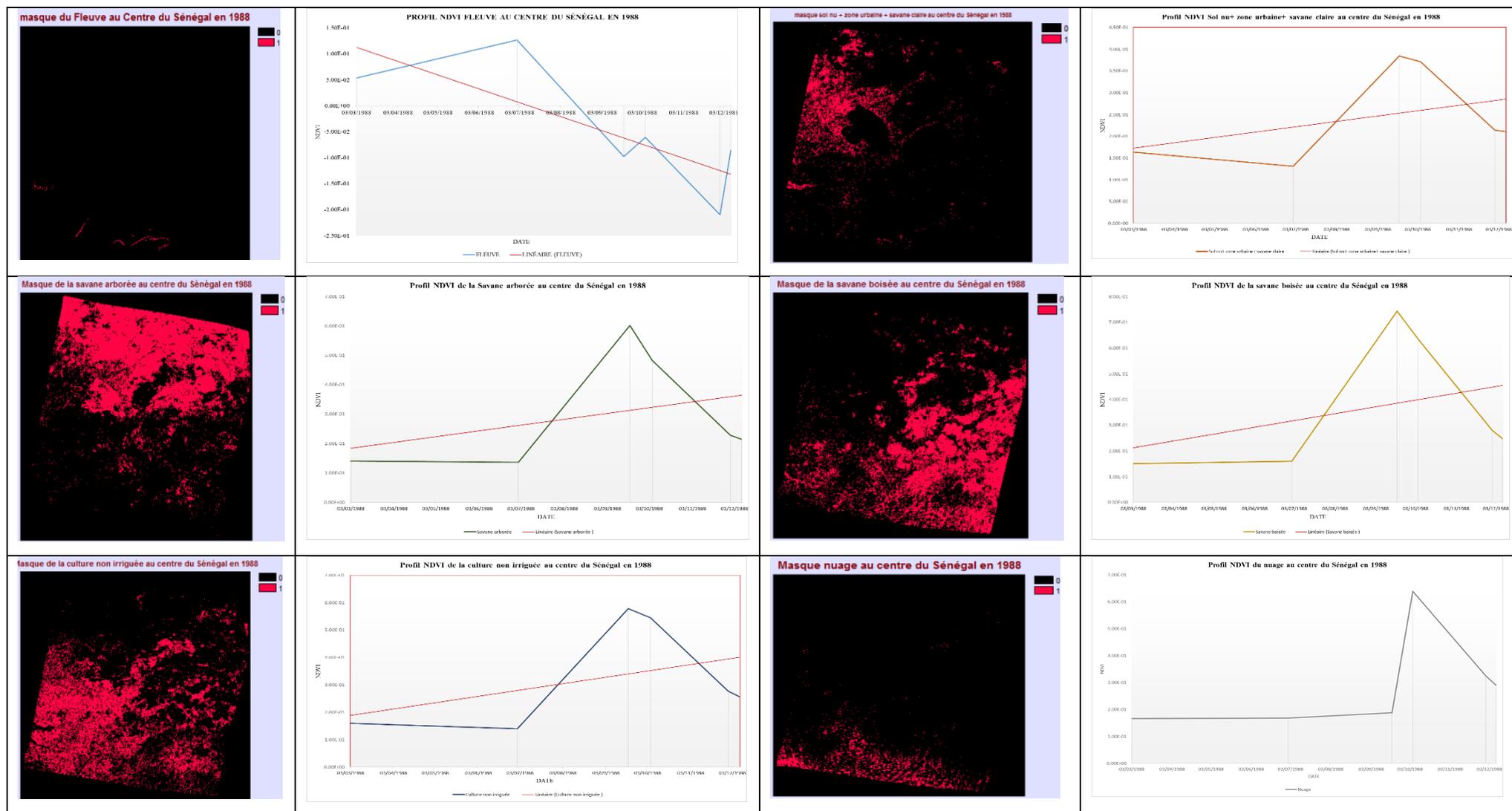


Figure 25 : Présentation de chaque masque de couverture du sol avec son profil NDVI au centre du Sénégal en 1988

L'analyse du profil de l'indice NDVI au centre du Sénégal en 1988 évoque les mêmes résultats trouvés dans le Ferlo par exemple, on note que les valeurs du NDVI présentent une valeur maximale entre le mois de septembre et octobre ce qui explique que la production végétale atteint sa phase optimale durant ces deux mois.

I-2-2 Profil NDVI au centre du Sénégal dans la saison 2014/2015

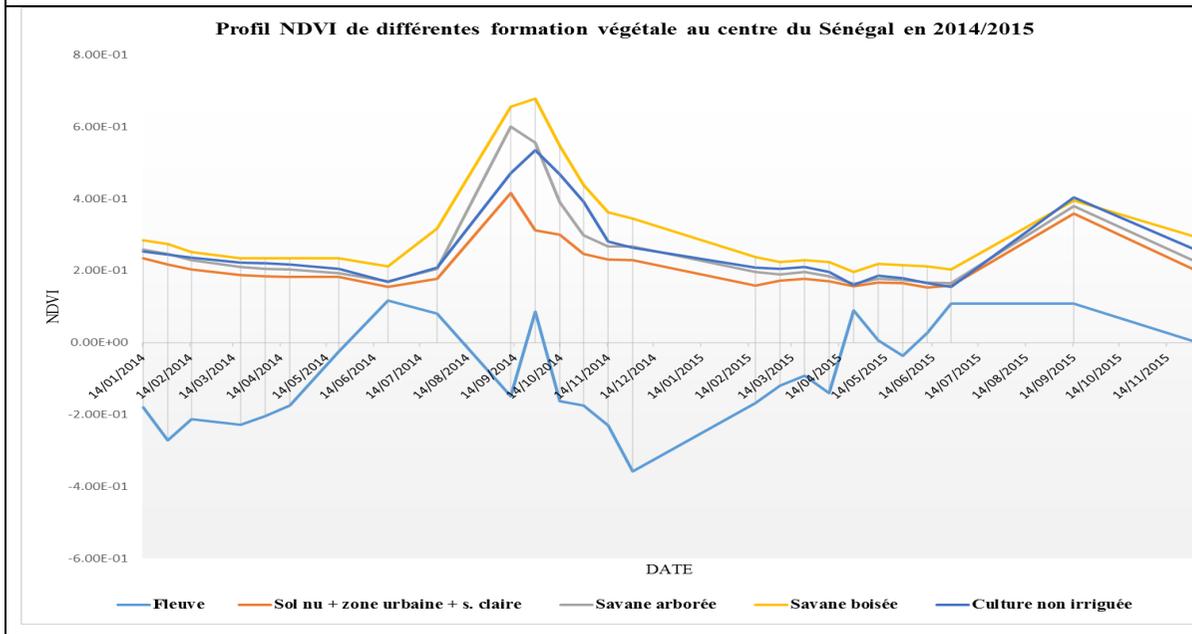
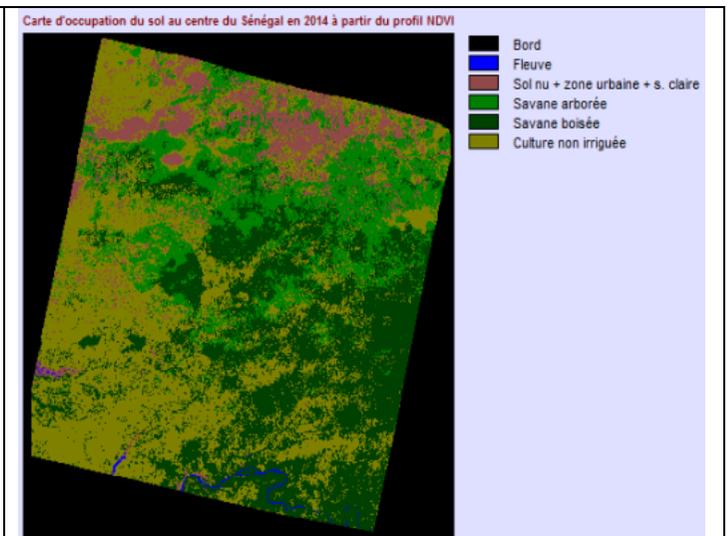
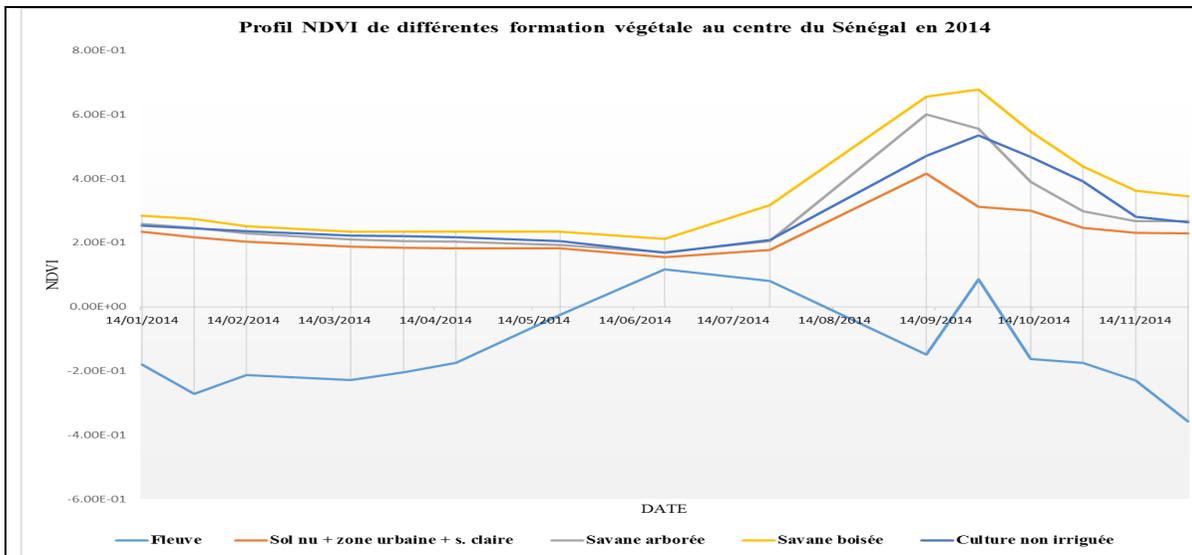


Figure 26 : Profil NDVI pour chaque formation végétale au centre du Sénégal en 2014 et 2015 et classification (par la méthode des Nuées dynamiques) en 5 classes en fonction des valeurs obtenues sur les 4 premières composantes principales

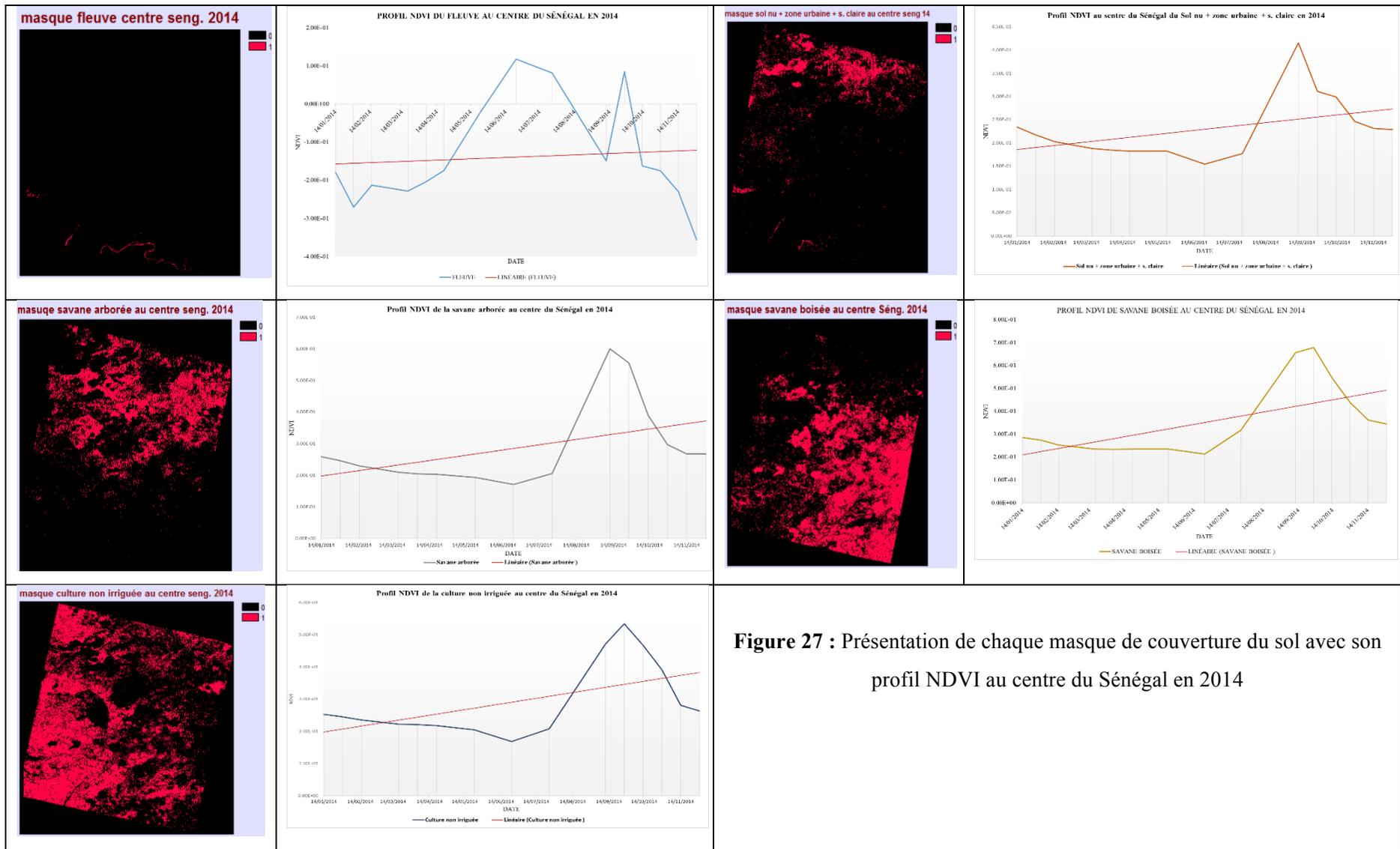


Figure 27 : Présentation de chaque masque de couverture du sol avec son profil NDVI au centre du Sénégal en 2014

En saison sèche (novembre à juin) les NDVI pour la savane boisée, savane arborée et culture non irriguée présentent des valeurs assez importantes, c'est-à-dire qu'il y a encore une certaine activité chlorophyllienne, alors que dans le Ferlo le NDVI est marqué par des valeurs particulièrement faibles en saison sèche.

En comparant la carte d'occupation du sol (qui est déduite à partir des profils NDVI) ainsi que les profils NDVI en 1988 avec ceux de 2014, on remarque d'une part une progression des surfaces de culture non irriguées et d'autre part une régression de la savane boisée.

I-3 Conclusion de section 1 de la deuxième partie.

L'analyse du profil de l'indice NDVI au centre-nord du Sénégal montre une cohérence et une corrélation positive entre le rythme de fluctuation saisonnière de l'activité phénologique de végétation et de la pluviosité. La production optimale de végétation coïncide avec les valeurs maximales de NDVI, entre le mois d'Août et septembre. Les valeurs commencent à baisser à partir du mois d'octobre c'est-à-dire à la fin de la saison des pluies.

De nombreux travaux ont prouvé cette corrélation qui existe entre l'indice NDVI et les précipitations. Parmi ceux-ci, on peut noter Camberlin et al, 2006.

On a remarqué aussi une saisonnalité et un rythme respecté de fluctuation saisonnière de l'activité de la flore.

En comparant les résultats trouvés dans la zone du Ferlo avec ceux du bassin arachidier, on constate que le gradient bioclimatique est respecté, c'est-à-dire plus on est au sud, plus les valeurs de NDVI sont fortes, ce qui correspond aux domaines de savane boisée et du bassin arachidier ; et plus on est au nord, plus les valeurs de NDVI sont faibles dans le domaine de pseudo steppe. On peut noter aussi une caractéristique fondamentale du fonctionnement du système au Ferlo : il s'agit d'une forte variabilité mensuelle et interannuelle de la production végétale, même s'il existe un gradient bioclimatique sud-est nord-ouest.

La situation de la vallée du fleuve, montre aussi une activité faible de la végétation sur toute l'année accentué par une chute de l'indice NDVI notamment pendant le mois d'octobre et ce qui s'explique la présence d'une inondation ou des crues. L'eau peut envahir rapidement les zones environnantes.

II- Caractéristiques de la couverture du sol au nord-centre du Sénégal

Deux concepts vont être traités : l'occupation du sol (land cover) et l'utilisation du sol (land use).

L'occupation du sol évoque la couverture naturelle du sol, c'est-à-dire le taux de couverture naturelle d'une région ou une zone par les forêts, les savanes arborées, les zones humides, etc. Elle peut être déterminée par l'analyse de l'imagerie satellitaire¹³.

¹³ <http://oceanservice.noaa.gov/facts/lclu.html>

L'étude de l'occupation du sol est fondamentale pour comprendre la transformation environnementale. L'utilisation du sol montre l'impact anthropique sur une zone, c'est-à-dire, qu'elle décrit comment les sociétés humaines utilisent le paysage (land scape) que ce soit pour le développement, la conservation de la ressource, ou l'utilisation agricole, etc.

À partir de la carte de changement ainsi qu'à partir des études bibliographiques faite antérieurement sur la même zone d'étude.

Deux images satellites Landsat TM (1988 et 2014) sont à la base de notre analyse de la dynamique de l'occupation des sols dans la zone d'étude. Les deux dates retenues pour la scène 204-49 (zone de Ferlo et vallée du fleuve) sont 27/09/2014 et 19/09/1988, et pour la scène 204-50 (centre du Sénégal ou bassin arachidier) sont 13/10/14 et 05/10/88. Ces dates coïncident avec la période où la végétation atteint sa phase optimale de croissance (voir résultats NDVI). L'intervalle du temps qui sépare les deux dates est de 27 ans, ce qui nous permet de détecter bien les évolutions des unités paysagères.

Deux méthodes complémentaires sont utilisées pour déterminer l'occupation du sol dans la zone d'étude :

- Distinguer les différents types de couvert à partir de leur réflectance spectrale (méthode radiométrique), ceci va nous permettre de distinguer le sol nu, les zones d'habitations, l'eau et la végétation.
- Déterminer les différentes formations végétales qui se trouvent dans la classe de végétation. Pour ce faire, on va se baser sur les résultats des profil NDVI et de l'occupation du sol qu'on a élaboré dans la partie précédente ainsi que sur les compositions floristiques occupant la zone d'étude.

On a eu recours aussi à la couverture de photographie aérienne disponible sur Google Earth pour atténuer les limites d'interprétation liées à la résolution spatiale des images Landsat.

L'étude de l'évolution de l'occupation du sol va être basée sur une superposition des cartes d'occupation du sol de 88 et 2014 qui va nous permettre de déterminer la carte de changement. Trois matrices vont être utilisées pour traduire l'évolution des différentes classes entre les deux périodes, il s'agit de matrices de « progression », « régression » et « stabilité » de couvert végétal.

II-1 Caractéristiques de la couverture du sol au nord du Sénégal

Nous avons retenu 6 classes d'occupation du sol dans ce travail. Une septième classe a été prise en compte, elle correspond aux nuages.

D'abord nous avons effectué 3 classes : une classe pour l'eau, une autre pour le sol nu + zone d'habitation et la dernière pour la végétation. Dans la classe de végétation nous avons créé, après plusieurs reclassifications, 3 autres classes, pour identifier les principales formations végétales qui se trouvent au nord du Sénégal.

Tableau 7 : les différentes classes de l'occupation du sol retenues au nord du Sénégal

	Les classes d'occupation du sol retenues
1	Fleuve
2	Sol nu +Bâti + steppe sèche
3	Savane claire+ pseudo steppe arbustive
4	Steppe herbacée/ arbustive
5	Savane arborée
6	Culture irriguée

Sur cette carte de Ferlo, nous n'avons pas pris en compte les cultures non irriguées comme catégorie, car elles ne sont pas très nombreuses, en plus, elles peuvent être confondu avec la classe de steppe ou autre classe.

Dans la réalisation de la cartographie de l'occupation du sol, nous allons prendre l'exemple la date 1988 et expliquer les démarches de traitement faites. La même méthode a été reproduit pour les autres images. Les différents types de traitement ont été effectués avec le logiciel de traitement d'images *Terrset*.

Dans un premier temps, nous avons créé un masque bord à partir du canaux TM4 (proche infrarouge). Après nous avons effectué une classification non supervisée avec l'algorithme des nuées dynamique (Kmeans), en utilisant le masque bord et en demandant 12 classes.

L'étape suivante consiste en une étude de courbes radiométriques de ces 12 classes créées, ceci nous permet d'interpréter la nature de chaque classe et d'identifier le type d'occupation du sol. Pour faciliter notre interprétation, nous avons comparé cette première classification avec la composition colorée obtenue en associant les canaux visible (2, 3) et infra rouge (4), cette comparaison nous a aidé à distinguer visuellement les endroits où la végétation est présente.

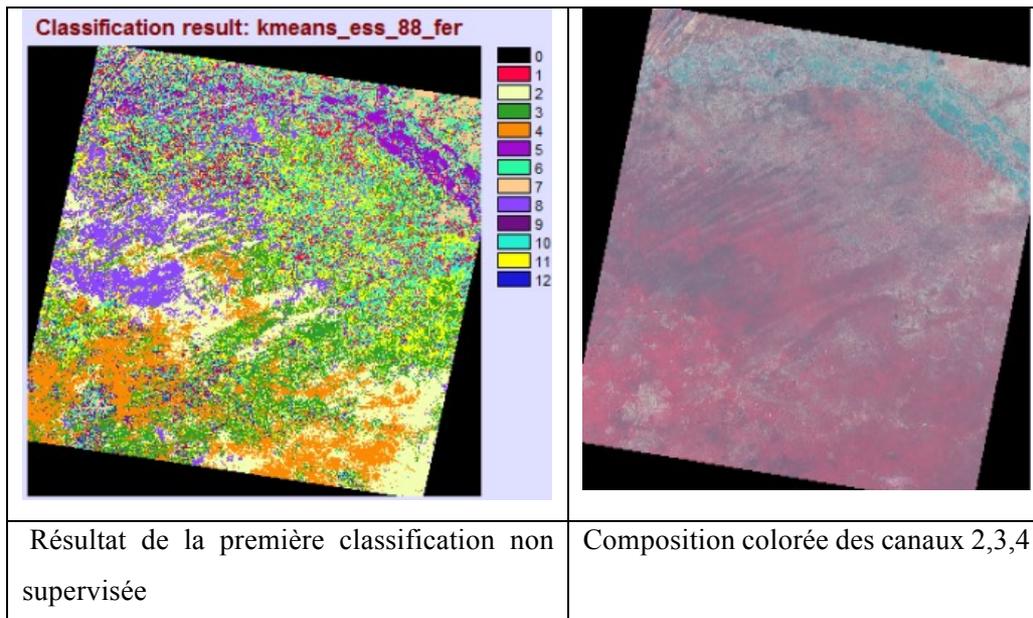


Figure 28 : classification kmeans de sous scène Ferlo (nord du Sénégal) en 1988 et composition colorée

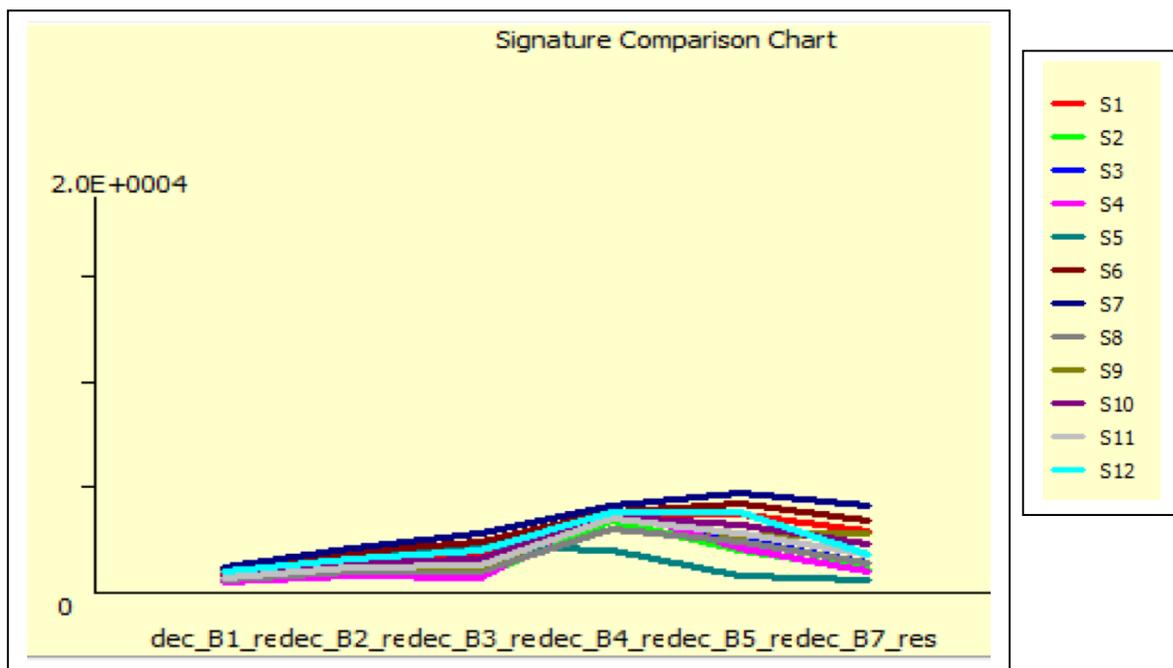


Figure 29 : Courbes radiométriques des 12 classes de la classification en nuées dynamiques de la sous scène Ferlo (nord du Sénégal).

- Les classes 1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 12 présentent un pic de luminance dans le proche infrarouge (TM4), s'interprètent comme des végétations.

- La courbe radiométrique de la classe 5, décroissant du visible à l'infrarouge caractérise l'eau de la vallée du Sénégal.
- Les classes 6 et 7, ont un pic moyen en infrarouge moyen (MIR) TM5, et n'ont pas un pic en TM4 (PIR) mais ne présentent pas non plus une diminution de luminance du visible vers le PIR, et ce qui caractérise le sol nu et les zones urbaines.

Nous procédons ensuite à une première reclassification en regroupant les classes correspondantes en une seule classe, ce qui nous donne une première carte avec 3 classes. Après, nous avons créé trois images binaires, correspondant aux trois classes, il s'agit des « masques »

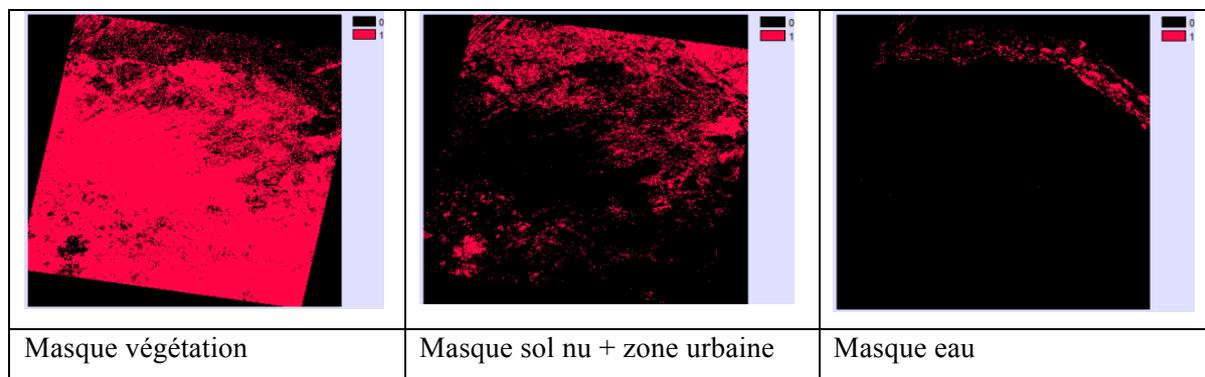


Figure 30 : trois masques pour les trois classes.

Nous appliquons à ce stade, la classification non dirigée par emboîtement, afin de vérifier et de corriger la cartographie de l'occupation du sol. Pour ce faire, on commence par l'application d'une analyse en composantes principales (A.C.P.) au sein des masques sur les six canaux. À l'aide de l'étude des courbes radiométriques, on peut vérifier si l'ensemble des pixels appartient ou pas à leurs classes principales, et on réaffecte ceux qui ont été assimilés dans une autre classe.

À l'issue de cette analyse de correction et de vérification, on regroupe toutes les classes retenues dans une image qui fera l'objet de la carte d'occupation du sol.

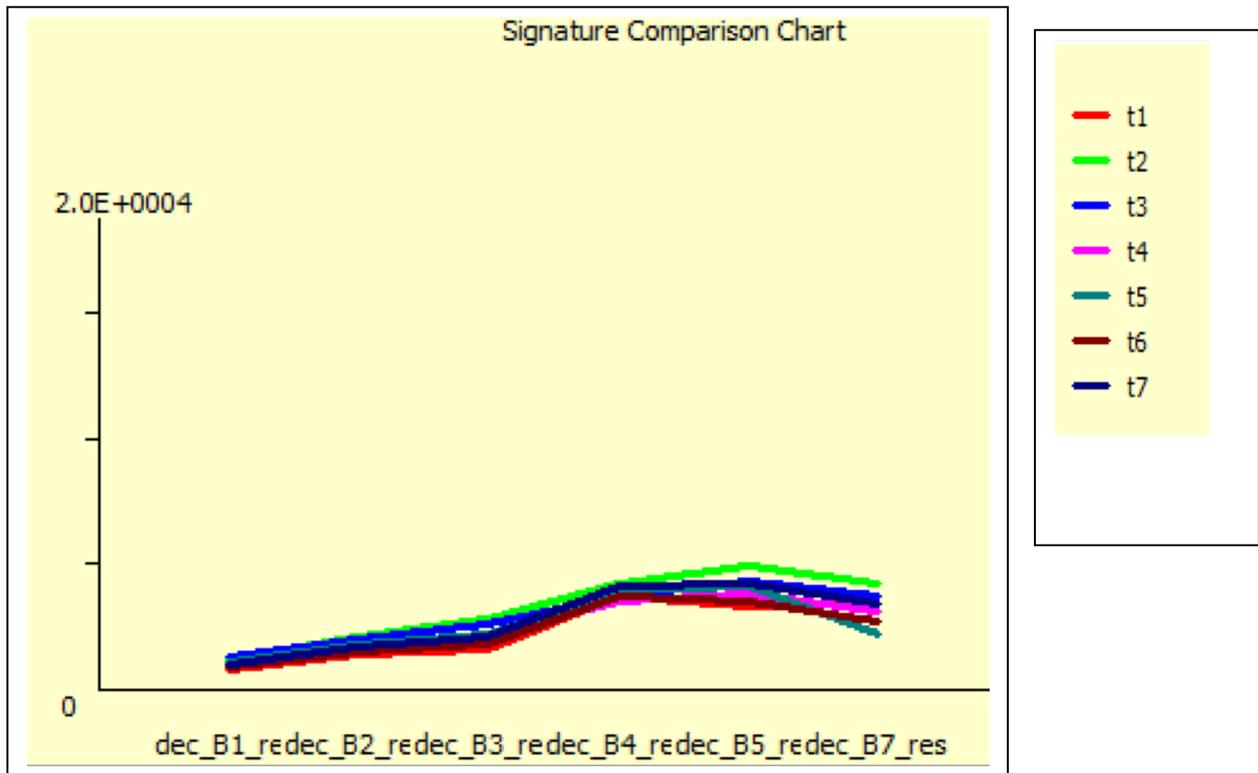


Figure 31 : Vérification du masque Sol nu + bâti (Courbes radiométriques de la classification non dirigée sur l'ACP)

Nous remarquons que la classe 5 présente un pic modeste sur TM4 ; au regard de sa signature spectrale, ces pixels seront reclassés en végétation.

Le reste des classes présente des signatures spectrales similaires correspondantes au sol nu + zone urbaine.

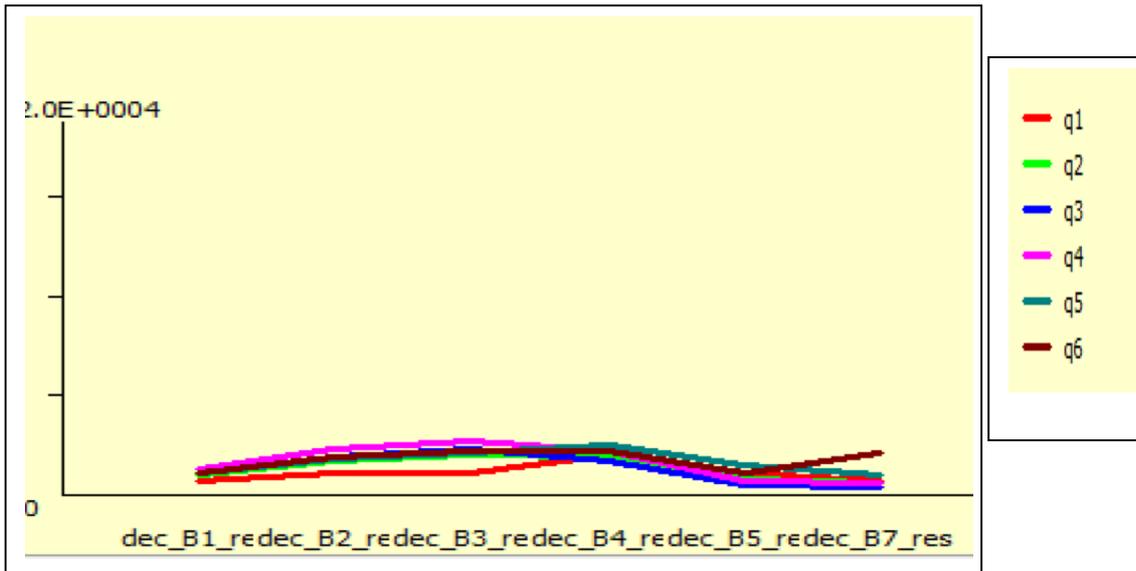


Figure 32 : Vérification du masque eau, Courbes radiométriques de la classification non dirigée sur l'ACP (eau).

Nous constatons que les classes 1, 5 et 6 présentent un pic faible en TM4, cela signifie qu'une partie de végétation a été affectée à la classe d'eau, donc, on va réaffecter ces classes aux cultures irriguées. Les classes (2, 3, 4) présentent une réponse spectrale faible allant du visible et PIR et MIR, qui caractérisent bien la classe d'eau.

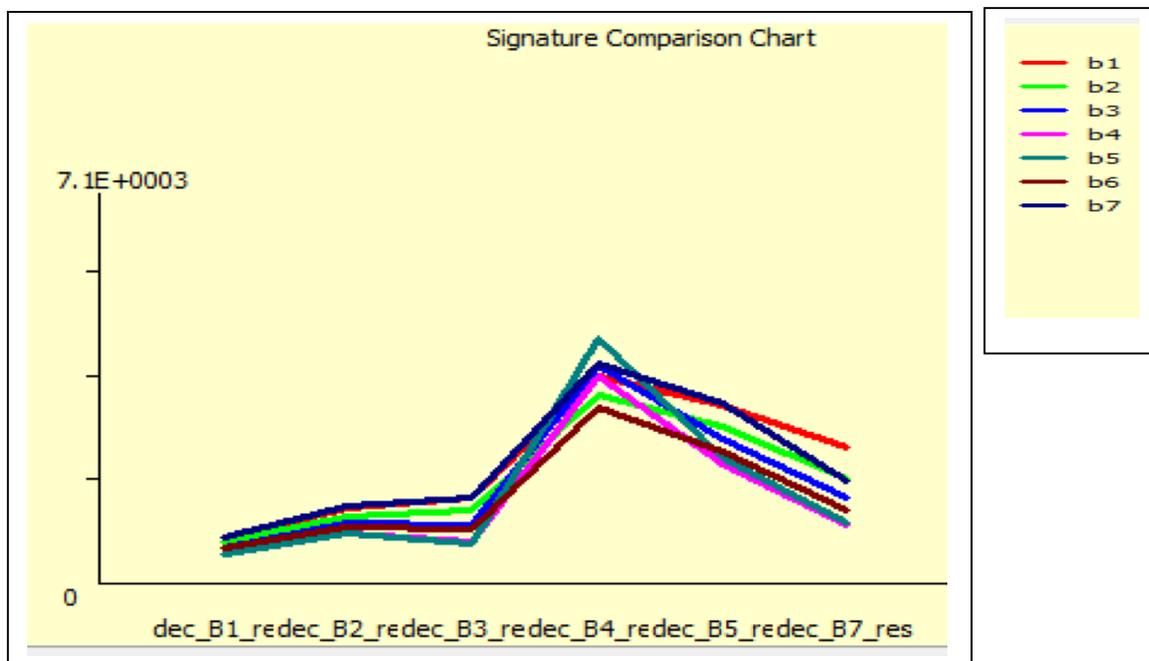
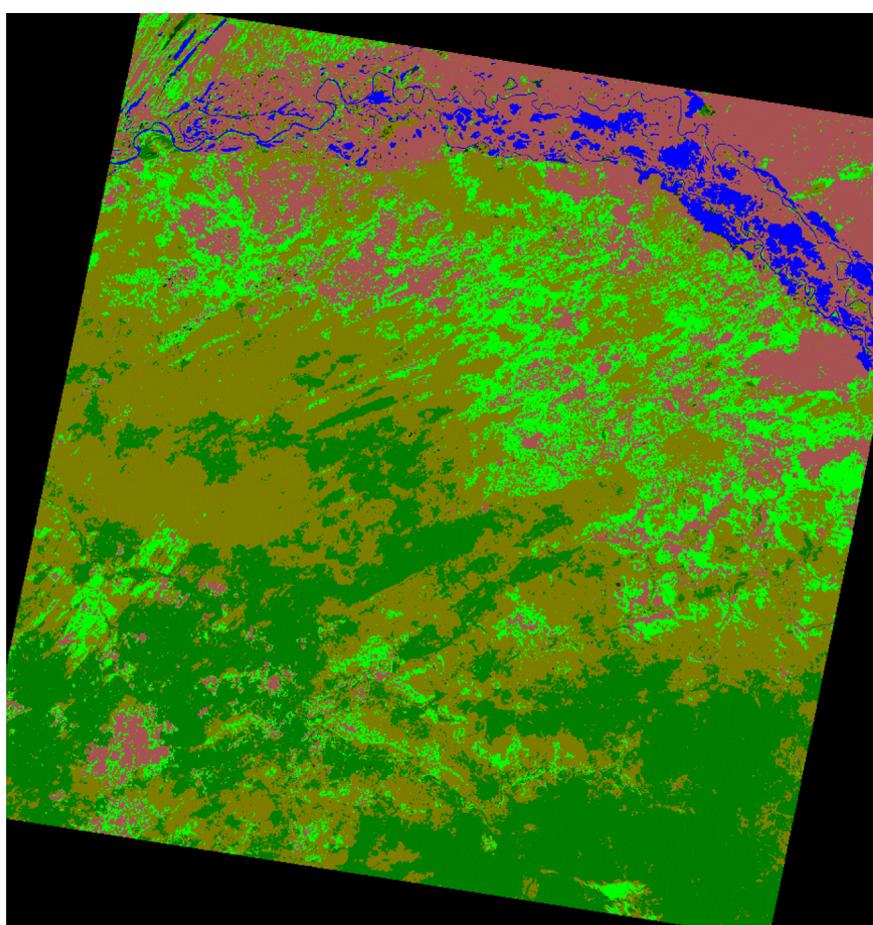


Figure 33 : Vérification du masque végétation : Courbes radiométriques de la classification non dirigée sur l'ACP (Végétation)

La vérification du masque végétation montre bien une homogénéité des résultats de classifications. En se basant sur les résultats des profils NDVI trouvés précédemment, on a reclassé le masque végétation en plusieurs strates qui constituent les principales formations végétales de Ferlo : Savane claire+ pseudo steppe arbustive, steppe herbacée/ arbustive, savane arborée, culture irriguée. L'ensemble des images du Ferlo de 2014 et celles au centre du Sénégal de 1988 et 2014 ont été analysées de la même manière. Donc dans les sections suivantes nous n'afficherons que les principales cartes d'occupation du sol.

Carte d'occupation du sol au Ferlo en 1988



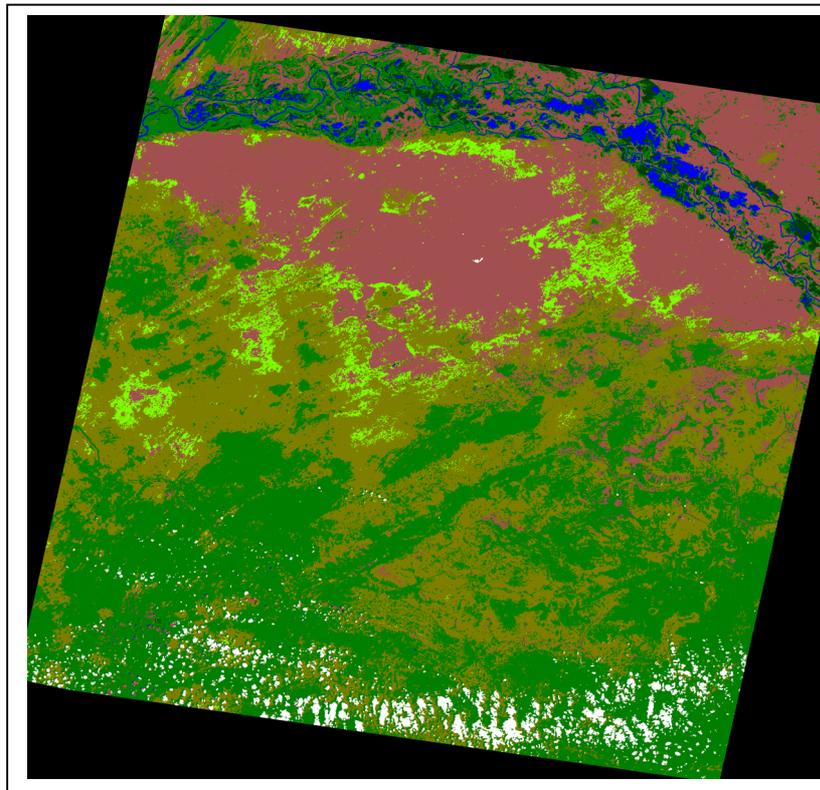
Formation	
	Bord
	Fleuve
	Sol nu + steppe sèche
	Savane claire + pseudo steppe arbustive
	Steppe herbacée/arbustive
	Savane arborée
	Culture irriguée

Source :

- Image Landsat 5 1988
- Cartographie Ziadi, 2016



Carte d'occupation du sol au Ferlo en 2014

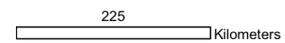


Formation	
	Bord
	Fleuve
	Sol nu + steppe sèche
	Savane claire+ pseudo steppe arbustive
	Steppe herbacée/arbustive
	Savane arborée
	Culture irriguée
	Nuage

Source :

- Image Landsat 5 1988

- Cartographie Ziadi, 2016



II-1-1 Analyse de la carte de l'occupation du sol du Ferlo

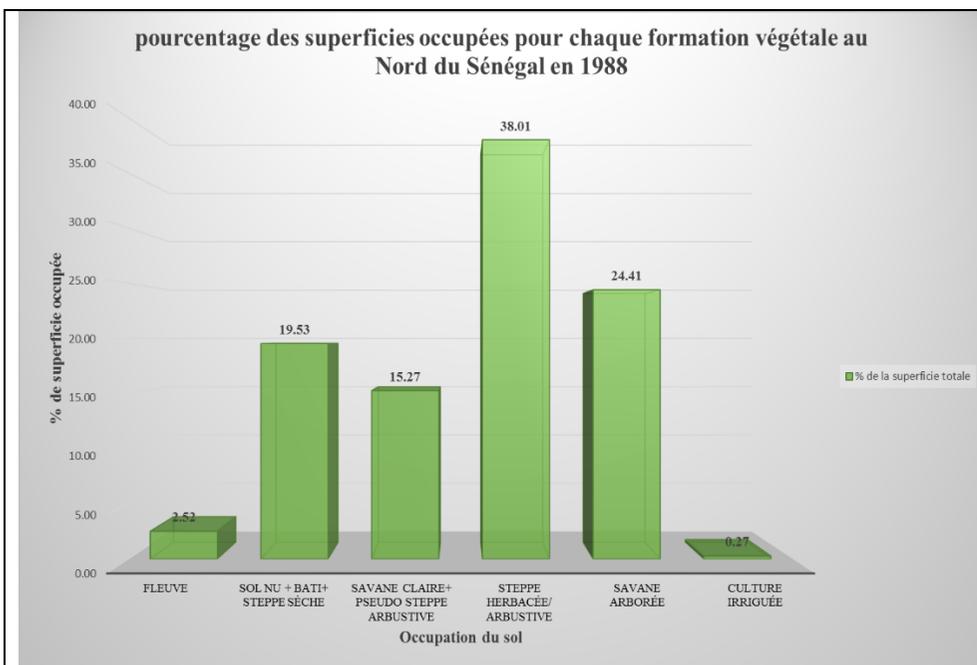


Figure 34 : Pourcentage de superficie occupée pour chaque formation végétale au Ferlo en 1988

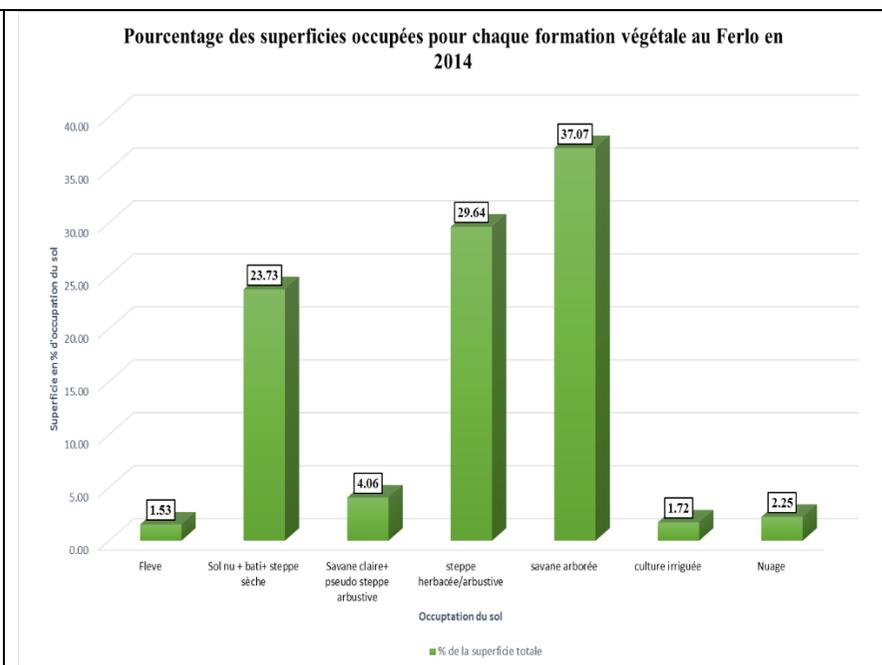


Figure 35 : Pourcentage de superficie occupée pour chaque formation végétale au Ferlo en 2014

Bien que l'année 1988 fasse partie de la période de la grande sécheresse au Sénégal (de 1973 jusqu'au 1995), les résultats de la carte d'occupation du sol de 1988, montrent la présence d'un paysage fortement marqué par la végétation, qui constitue la principale ressource et la base de la pratique de l'élevage transhumant dans le Ferlo.

Le contexte de 2014 est bien différent à celui de 1988. En effet, l'année 2014 se caractérise par une amélioration nette de pluviosité par rapport à l'année de 1988, et une augmentation de la population rurale du Ferlo. Entre 2002-2012 la population du Ferlo a connu une croissance moyenne de 25%, elle est passée de 1565 en 2002 à 2086.673 en 2012 (voir annexe 2).

Ces deux phénomènes ont un impact important dans l'évolution de l'occupation du sol au Ferlo. La carte d'occupation du sol de 2014 est marquée par une baisse des superficies des différentes formations végétales (de 78% en 1988 à 72% en 2014) au profit des sols nus (principalement sols nus sableux) qui occupent désormais à peu près 24% de la surface cartographiée en 2014 alors qu'elle n'était que de 20 % en 1988.

La classe de savane claire + pseudo steppe arbustive a connu une forte baisse entre ces deux périodes (elle est passé de 15% en 1988 à 4%), on peut formuler l'hypothèse que cette baisse est le résultat de grands déficits pluviométriques pendant la période de sécheresse.

La savane arborée, est devenue la classe dominante dans le Ferlo, elle est passé de 24.41% en 1988 à 37%, cette augmentation pourrait être expliquée par l'amélioration de la pluviosité à partir des années 1995.

Sur la zone de la vallée du fleuve, la surface de la culture irriguée a témoigné d'une augmentation nette en 2014 par rapport à celle de 1988, elle est passée de 0.27% en 1988 à presque 2%. Cet accroissement est dû aux politiques d'aménagements hydro-agricoles.

La surface de steppe herbacé/arbustive a connu un recul important durant 27 ans, elle est passé de 38% en 1988 à 30%. Ce constat traduit parfaitement la pression pastorale sur la zone du Ferlo.

En gros, nous remarquons deux grandes strates qui composent le Ferlo et se corrént avec le gradient pluviométrique : la première correspond à des formations steppiques et pseudo-steppiques ouvertes s'étende au sud du Ferlo ; la deuxième est le domaine de la savane arborée, entre le sud du Ferlo et le nord du bassin arachidier.

La classe du sol nu qui se trouve au nord du Ferlo et sud de la vallée du fleuve, est un espace à couverture végétale très faible voire nulle correspondant à une structure pédologique sableuse peu propice à la végétation.

On note aussi la présence des dunes : on trouve des dunes à faible pente, des bourrelets et des modelés à forte pente. Généralement, on les trouve au nord du Ferlo et à côté de la vallée fossile (au sud de Ferlo). Les conditions édaphiques de ces dunes ne favorisent pas la croissance de végétation. Donc on trouvera en haut du bourrelet comme en haut de chaque dune, une végétation un peu plus rase, alors que des espèces de types arbustes ou arbres vont plutôt être en bas de la pente.

Vers l'est du Ferlo, on a une réserve sylvopastorale et une réserve de faune où l'on trouve des types d'espèces ligneuses et très peu d'installations humaines.

La qualité du sol dans le Ferlo a un impact sur la nature d'occupation du sol.

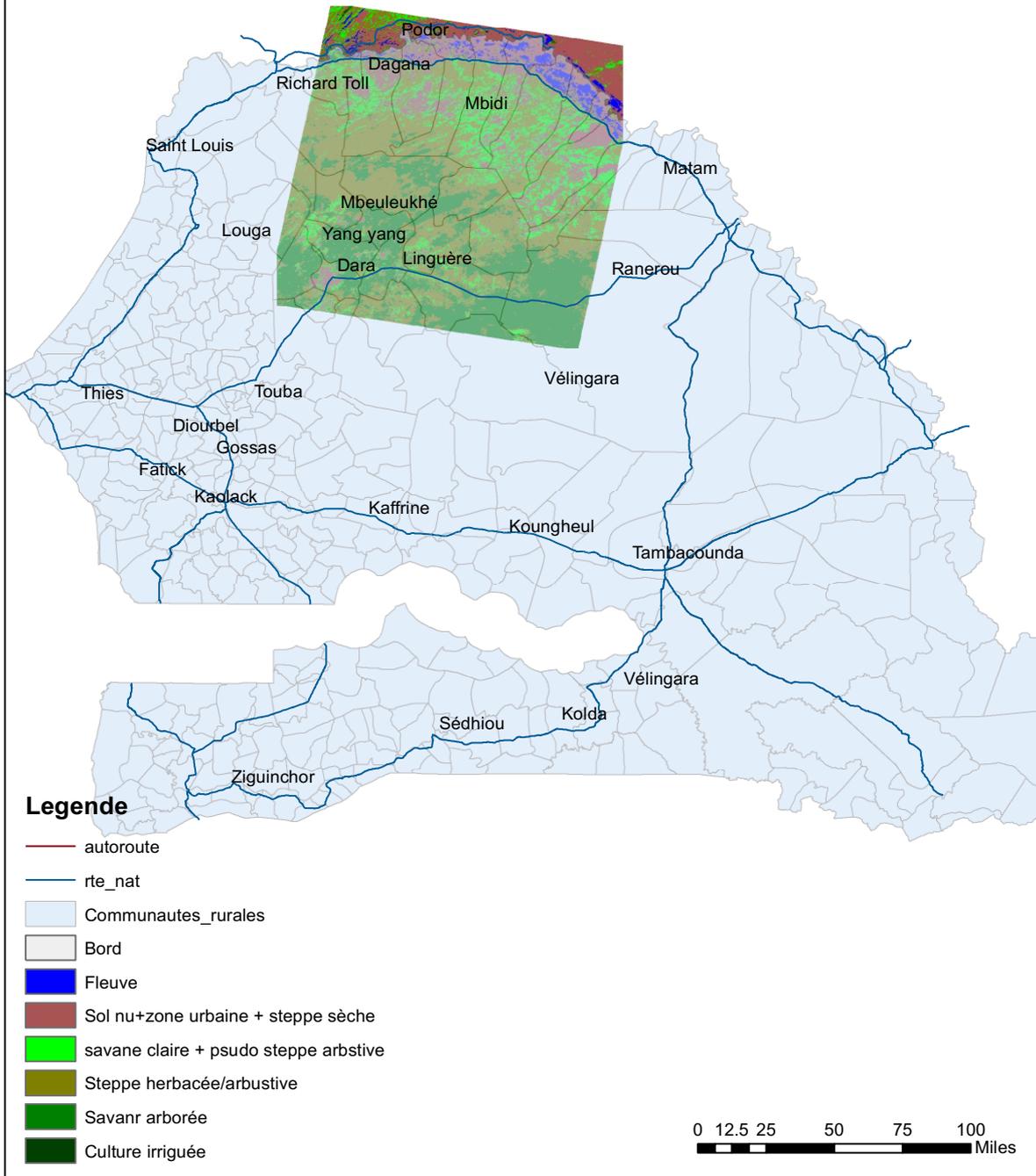
La nature du sol au sud du Ferlo (argileuse) favorise la rétention de l'eau et le développement des mares, qui vont être exploitées par l'élevage transhumant.

La pédologie globale du Ferlo est peu évoluée et sensible à l'érosion ; ce constat est accentué par la pression pastorale surtout au nord du Ferlo.

Nous présentons ci-dessous la superposition de la carte d'occupation du sol sur la carte du Sénégal, afin de se situer sur l'espace et de faciliter la compréhension de l'évolution du sol au nord du Sénégal.

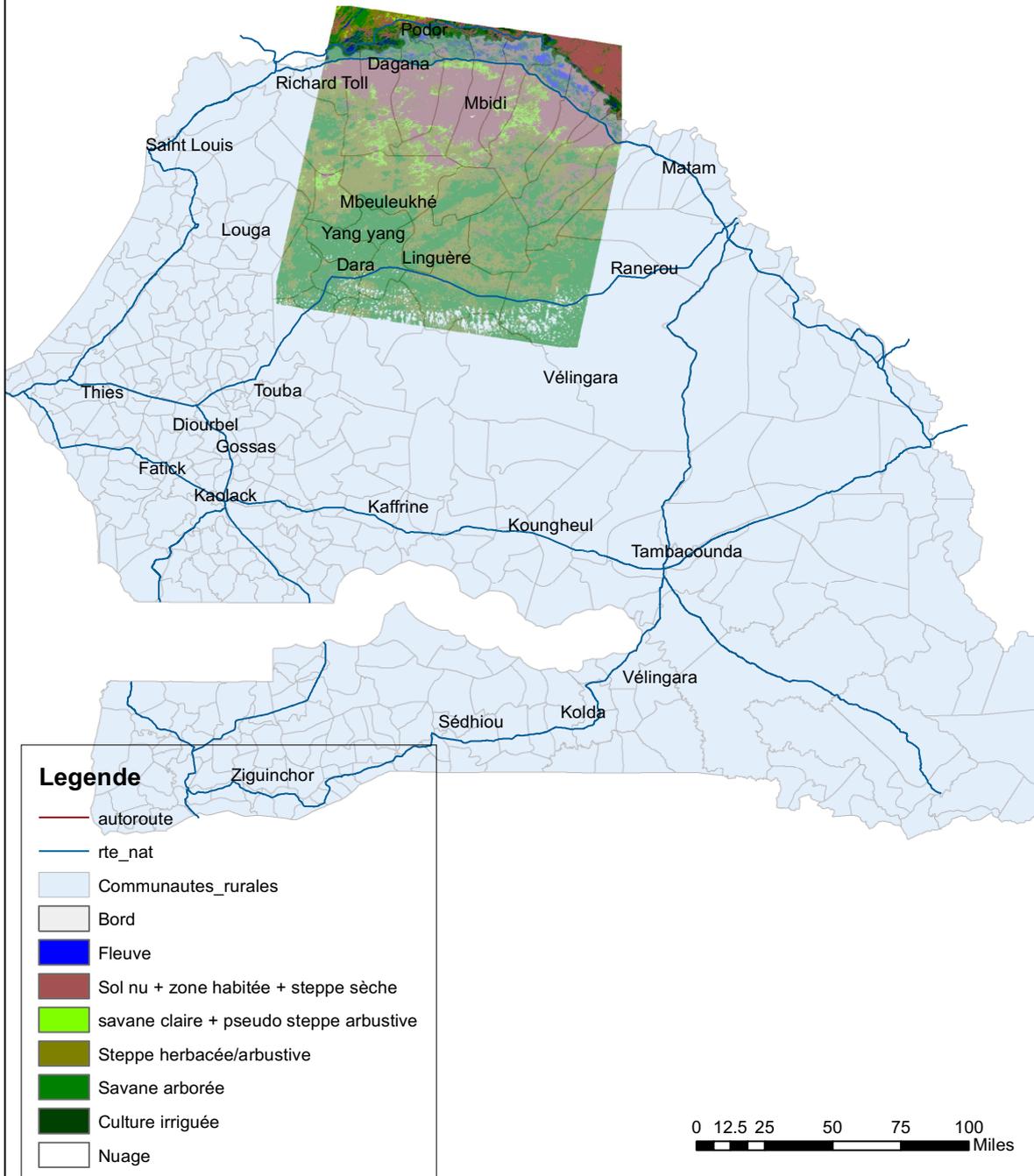


Superposition de la carte d'occupation du sol au Ferlo en 1988 sur la carte du Sénégal





Superposition de la carte d'occupation du sol au Ferlo en 2014 sur la carte du Sénégal



II-2 Caractéristique de la couverture du sol au centre du Sénégal

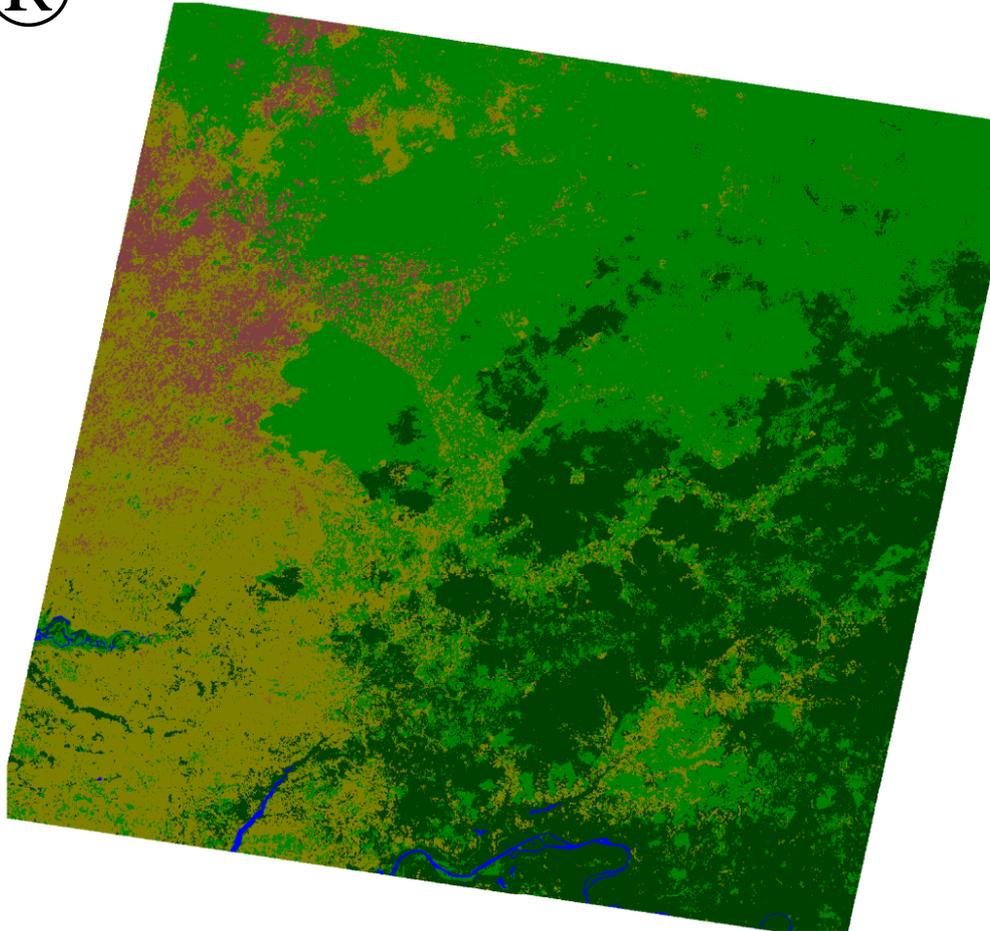
Les catégories de l'occupation du sol au centre du Sénégal sont bien différentes de celles du Ferlo, nous sommes passé d'un domaine steppique et herbacée à un domaine marqué par la présence des savanes arborées et la culture non irriguée au centre du Sénégal. Cette transition paysagère est due au gradient bioclimatique où la pluviosité est plus importante au sud qu'au nord.

Nous avons retenu cinq classes d'occupation du sol. Pour le traitement des images nous avons suivi exactement la même méthode citée dans le cas du nord du Sénégal. Donc dans cette section nous allons présenter la carte d'occupation du sol.

	Les classes d'occupation du sol retenus
1	Fleuve
2	Sol nu + zone habitée
3	Savane arborée
4	Savane boisée
5	Culture non irriguée

Carte d'occupation du sol au centre du Sénégal en 1988

Ⓜ



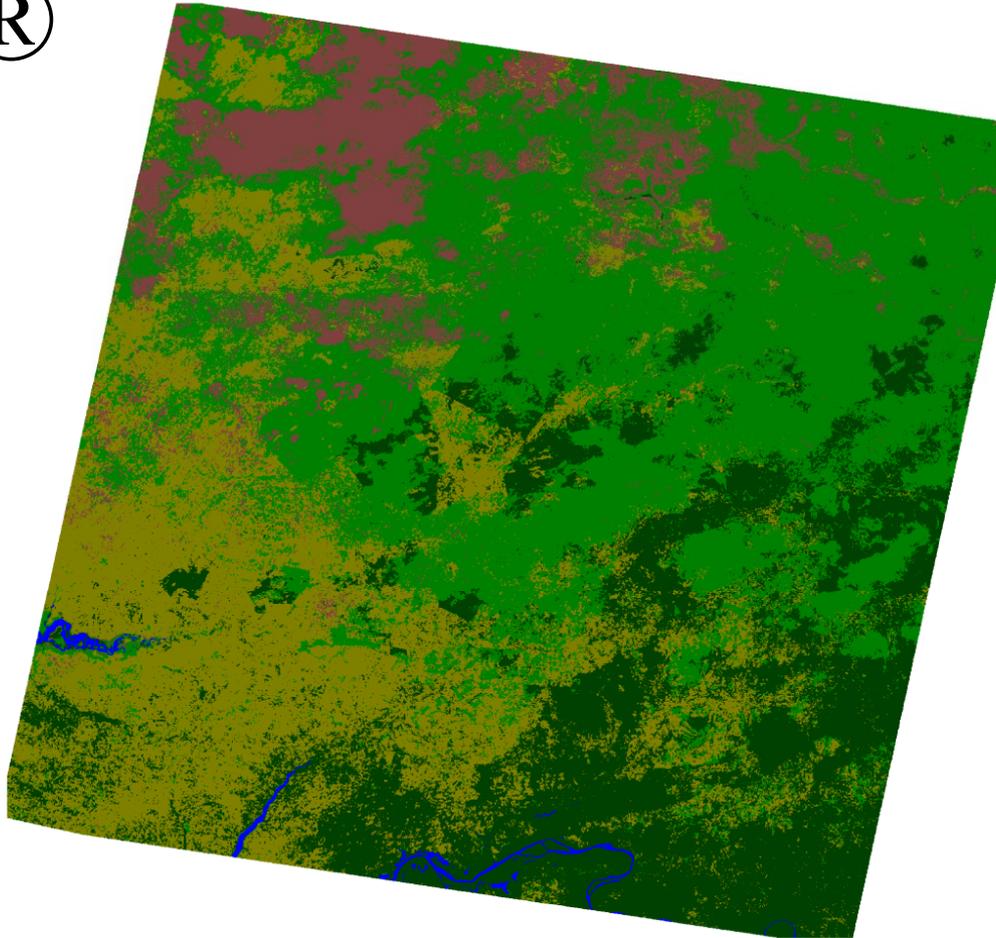
Formation végétale

-  Bord
-  Fleuve
-  Sol nu + zone urbaine
-  Savane arborée
-  Savane boisée
-  Culture non irriguée

Source:
- Image Landsat 5 1988
- Cartographie : Ziadi, 2016
0 5 10 20 Miles
+++++

Carte d'occupation du sol au centre du Sénégal en 2014

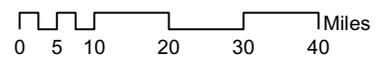
®



Formation végétale

	Bord
	Fleuve
	Sol nu + zone urbaine
	Savanr arborée
	Savane boisée
	Culture non irriguée

Source:
- Image Landsat 8 2014
- Cartographie : Ziadi, 2016



II-2-1 Analyse de la carte d'occupation du sol au Centre du Sénégal

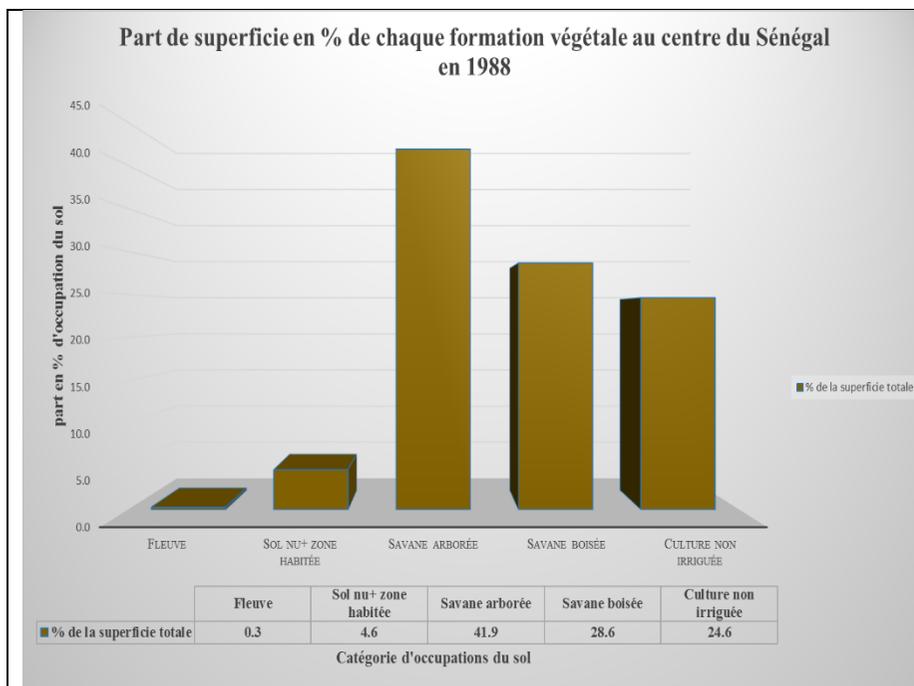


Figure 36 : part de superficie en pourcentage de chaque formation végétale au centre du Sénégal en 1988

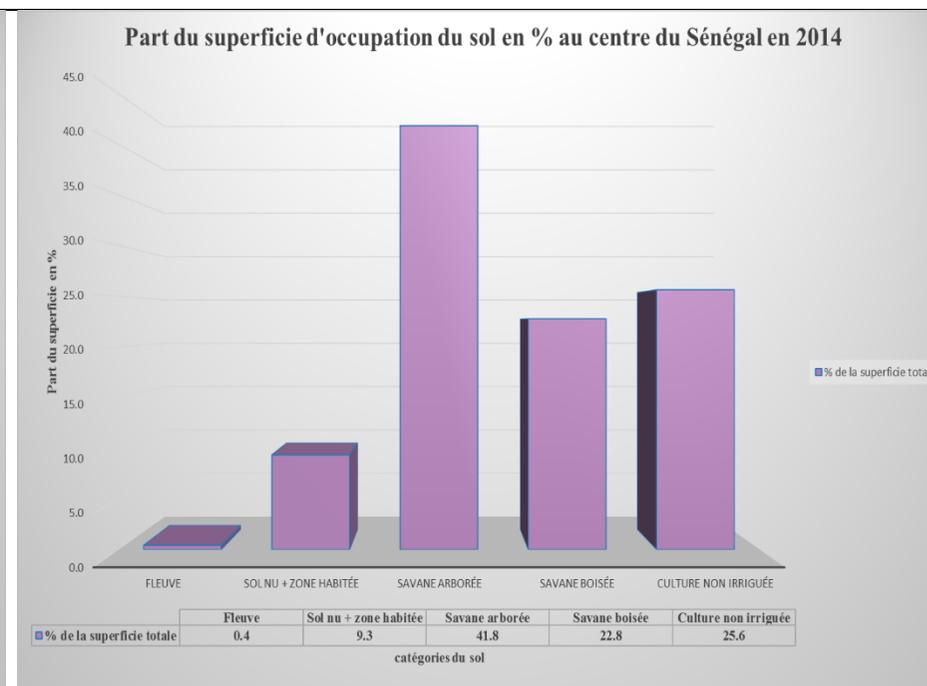


Figure 37 : Superficie en pourcentage de chaque formation végétale au centre du Sénégal en 2014

La carte d'occupation du sol ainsi que la part de superficie de chaque formation végétale au centre du Sénégal, montrent une forte présence de la couverture végétale par rapport au Ferlo.

La savane arborée constitue la classe végétale dominante que ce soit en 1988 ou en 2014. Elle a connu une baisse par rapport à l'année 1988, surtout dans la partie nord du bassin arachidier, que l'on voit clairement sur la carte. Cette baisse profitée à la culture d'arachide, à l'extension des sols nus et des zones habités.

La surface de la savane boisée a connu aussi un recul par rapport à 1988, elle est passée de 28.6% en 1988 à 22.8% en 2014. La culture pluviale, généralement la culture d'arachide et de mil, qui est localisée principalement au sud-est a évolué par rapport à l'année 1988. Cette extension (principalement vers le nord et vers l'Est) peut être expliquée par le fait que l'agriculture pluviale est dévoreuse d'espace et nécessite un déboisement important, ce qui engendre une disparition de quelques strates ligneuses. Cette avancée de la culture pluviale a entraîné des conflits entre les pasteurs et les agriculteurs où ces derniers ont étendu leurs cultures sur des endroits utilisés l'élevage transhumant.

En effet l'usage agricole dans cette zone d'étude revient aux choix des politiques agricoles héritées de la colonisation, qui se base sur la production d'une culture de spéculation et commerciale (principalement la culture d'arachide) pour l'exportation (Bocar DIAGANA et al. 2008. Fall A.,2014). Cette zone qu'on appelle le bassin arachidier a été choisie à l'époque coloniale pour sa bonne pluviosité et pour la qualité du sol qui est propice à la culture « *les sols sont ferrugineux tropicaux peu lessivés appelés « sols dior » ... Dans le sud du Bassin arachidier, ils sont ferrugineux tropicaux lessivés ou sols beiges avec une texture sableuse et un lessivage de l'argile* » (CSE 2007).

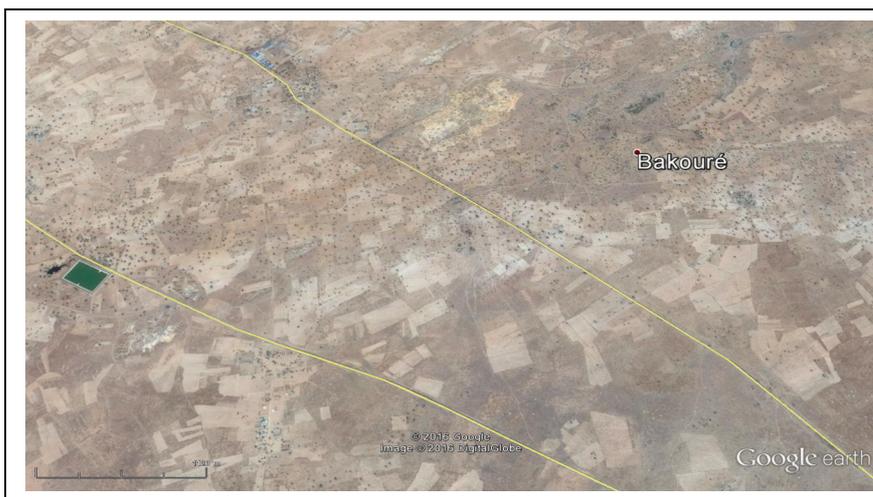
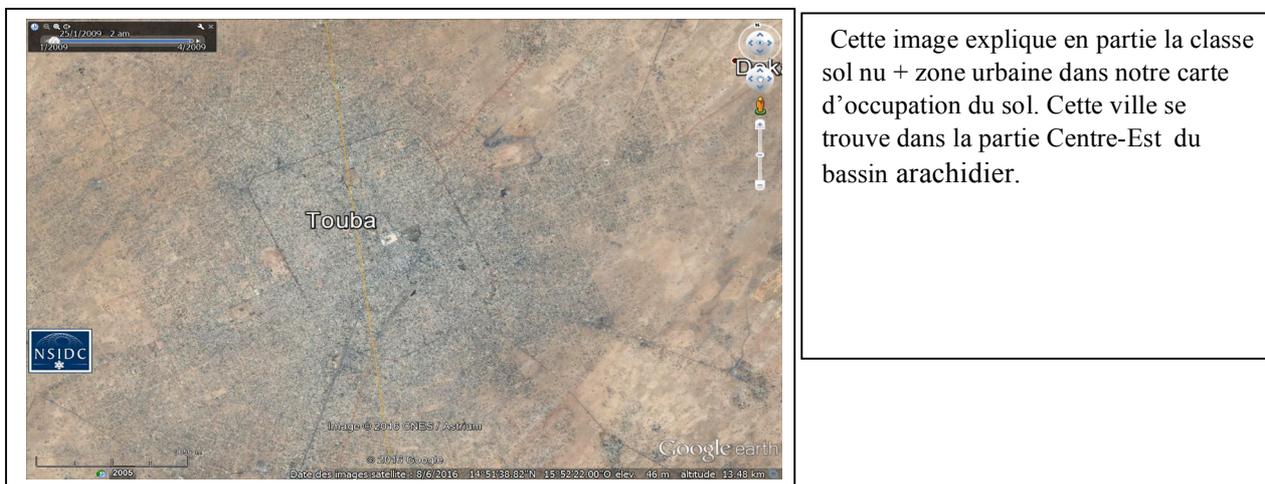


Figure 38 : paysage de la pratique agricole dans la partie Est du bassin arachidier. Village Bakouré, situé à l'Est du Touba

Source : Google Earth, 2016

La classe du sol nu + zone habitée a connu une augmentation en matière de superficie (la surface est passé de 4.6% en 1988 à 9.3% en 2014). On peut formuler l'hypothèse que cette augmentation est due à l'accroissement démographique, et à l'appauvrissement des sols par une perte de ses éléments minéraux et organiques à cause d'une pratique agricole excessive et à cause d'une pratique monoculturelle.



Cette image explique en partie la classe sol nu + zone urbaine dans notre carte d'occupation du sol. Cette ville se trouve dans la partie Centre-Est du bassin arachidier.

Source : Google Earth, 2016

Figure 39 : image de la ville de Touba

Dans le bassin arachidier, l'élevage transhumant est moins représenté que dans le Ferlo. Plusieurs issues ont été mises en place dans cette zone pour assurer la cohabitation entre les agriculteurs et les pasteurs, on note par exemple l'idée du ranch de Dolly dont la vocation a été d'attirer et de focaliser une partie de troupeau sur un axe majeure de transhumance. Le but c'est de stabiliser l'élevage et canaliser la transhumance dans des endroits bien définis. « *La création du ranch répondait à un double objectif : promouvoir l'élevage de ruminants domestiques dans le souci de réguler l'approvisionnement en viande de la ville de Dakar et des autres grands centres urbains du pays, d'une part, et favoriser la préservation de la diversité biologique dans la zone, par ailleurs.* » (NDIAYE M., 2013)

Le Ranch de Dolly est un domaine qui couvre une superficie de 87500 ha, « *il fait frontière avec les trois régions de Fatick (département de Gossas), de Kaffrine (département de Kaffrine) et de Louga (département de Linguère)* ». (Dorly Castañeda, 2005).

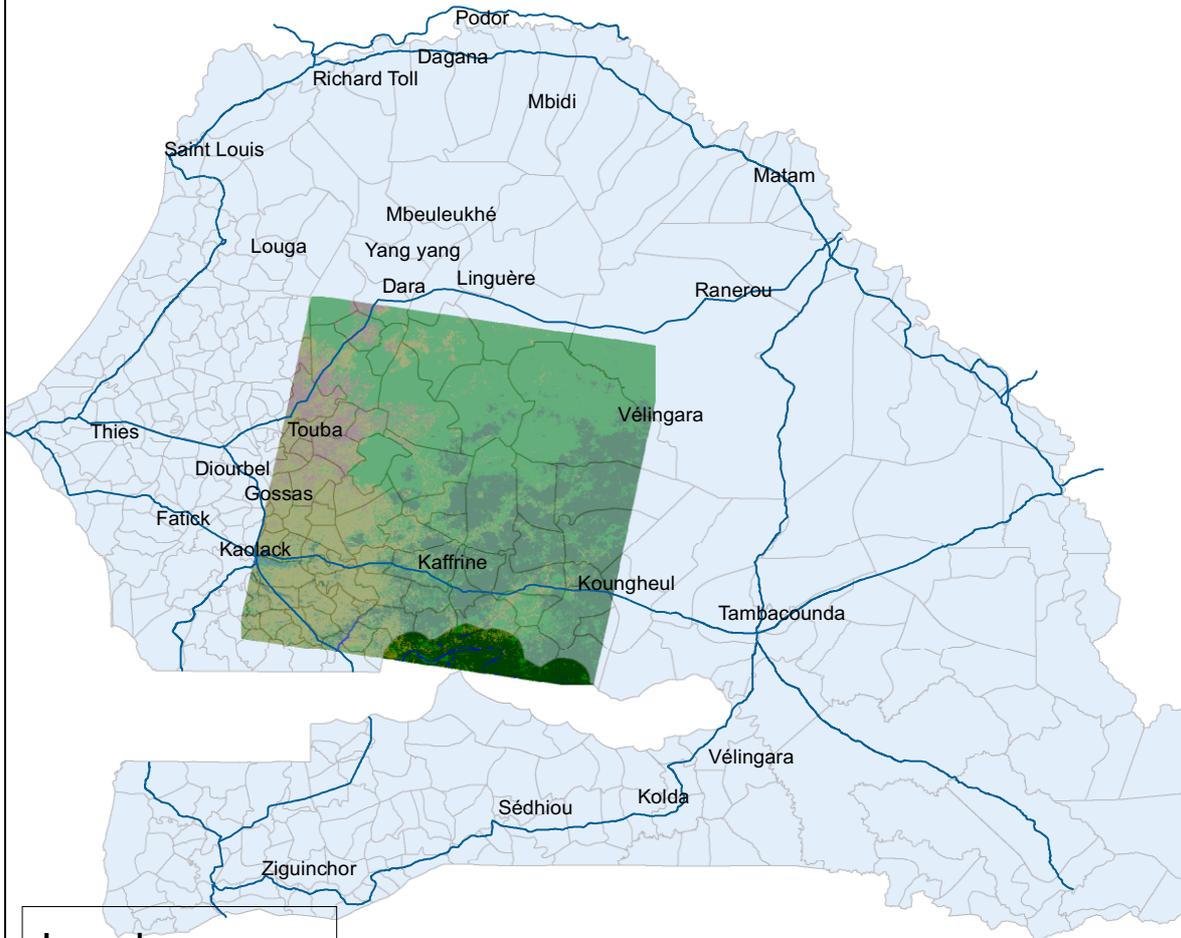


Source : Google Earth, 2016

Figure 40 : Localisation du domaine Ranch de Doli

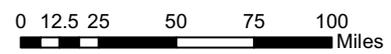


Superposition de la carte d'occupation du sol au Centre en 1988 sur la carte du Sénégal



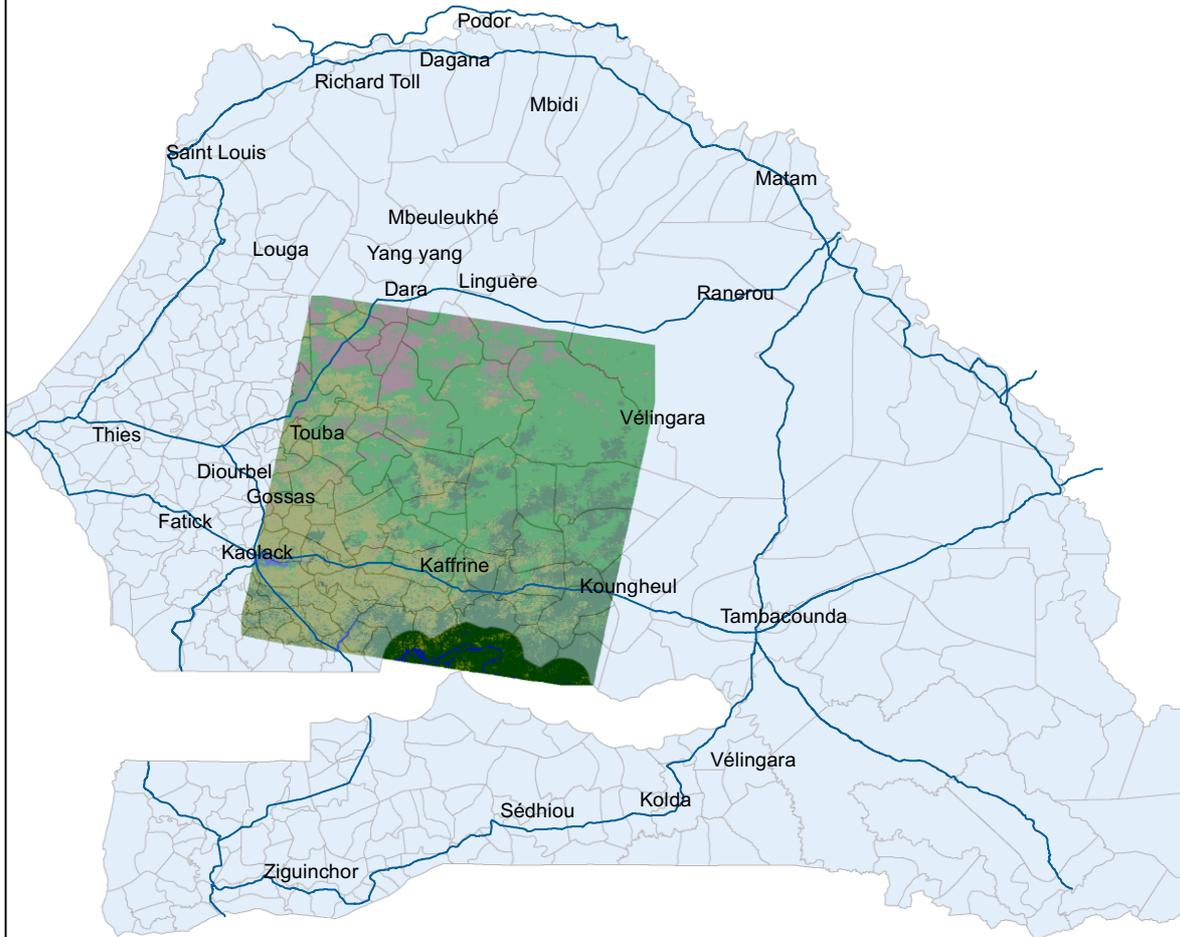
Legende

-  autoroute
-  rte_nat
-  Communautes_rurales
-  Bord
-  Fleuve
-  Sol nu + zone habitée
-  Savane arborée
-  Savane boisée
-  Culture pluviale



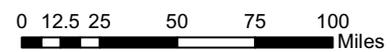


Superposition de la carte d'occupation du sol au Centre en 2014 sur la carte du Sénégal



Legende

-  autoroute
-  rte_nat
-  Communautés_rurales
-  Bord
-  Fleuve
-  Sol nu + zone habitée
-  Savane arborée
-  Savane boisée
-  Culture pluviale



II-3 Conclusion de la section 2 de deuxième partie

D'une manière générale, on remarque que la région du Ferlo ainsi que le bassin arachidier ne dépendent pas seulement des conditions pluviométriques. En effet, la progression des surfaces de culture pluviale observée dans le bassin arachidier ainsi que la régression de la strate herbacée dans le Ferlo montrent la présence d'autres dimensions qui peuvent expliquer ce changement et cette atténuation de couvert végétal, à savoir, l'action anthropique dans le milieu naturel, qui engendre un état complexe et impacte la corrélation entre la pluviométrie et la production végétale dans la zone d'étude.

Un état de dégradation des terres a été observé au nord du Ferlo à cause de la variation climatique et la pratique de l'élevage extensif. Celles-ci provoquent un appauvrissement et une dénudation du sol, entraînant, par la suite, l'érosion. En effet lorsque le domaine de steppe herbacé atteint sa phase de croissance optimale pendant les mois d'août et septembre, il commence à disparaître à partir du mois d'octobre et novembre sous la pression de l'élevage,

On note aussi que l'appauvrissement et la dégradation des terres a impacté le bassin arachidier, à cause de l'exploitation excessive du sol et la monotonie de la culture, entraînant par la suite une progression sur des autres surfaces.

Ce dynamique illustre bien l'empreinte anthropo-systémique qui a participé au changement écosystémique.

Chapitre 2 : Cartographie des changements dans l'occupation du sol au nord centre du Sénégal

I Cartographie des changements dans l'occupation du sol au nord du Sénégal

La carte du changement d'occupation du sol c'est la dernière étape de traitement des images, elle permet de montrer les dynamiques spatiales établies durant presque 30 ans. L'objectif majeur dans cette section est de préciser et de localiser les changements les plus importants mesurés dans notre zone d'étude.

Nous avons fait deux cartes de changements pour chaque zone d'étude : une carte de progression et une carte de régression. Afin de pouvoir faire ces deux cartes nous avons commencé par un recodage de classes qui nous permet de croiser les images par simple addition (Mering C. et al., 2008).

Nous avons multiplié la carte de 1988 par 10 avant de l'additionner avec celle de 2014. Cette addition produit 67 codes qui correspondent aux changements établis.

12 classes ont été retenues pour chaque carte (de progression et de régression) qui décrivent les majeurs changements intervenus dans la zone d'étude.

Tableau 8 : Les classes retenues pour les cartes de progressions et de régressions

Classes retenues pour la carte de progression		Classes retenues pour la carte de régression	
1	Progression du Sol nu+ Bâti + steppe	1	Régression du fleuve
2	Progression Savane claire + pseudo steppe arbustive	2	Régression du Sol nu+ Bâti + steppe
3	Progression steppe herbacée/arbustive	3	Régression Savane claire + pseudo steppe arbustive
4	Progression savane arborée	4	Régression steppe herbacée/arbustive
5	Progression culture irriguée	5	Régression savane arborée
6	Stabilité Fleuve	6	Régression culture irriguée
7	Stabilité sol nu + bâti+ steppe sèche	7	Stabilité Fleuve
8	Stabilité savane claire + pseudo steppe arbustive	8	Stabilité sol nu + bâti+ steppe sèche
9	Stabilité steppe herbacée/arbustive	9	Stabilité savane claire + pseudo steppe arbustive
10	Stabilité savane arborée	10	Stabilité steppe herbacée/arbustive
11	Stabilité culture irriguée	11	Stabilité savane arborée
12	Nuage	12	Stabilité culture irriguée
13	Autre	13	Autre

Nous présentons 3 figures, une montre la progression d'occupation du sol (voir annexe 6), l'autre montre la régression (voir annexe 6) et le troisième c'est une figure récapitulative de la progression, régressions et la stabilité de chaque formation végétale (Fig. 54).

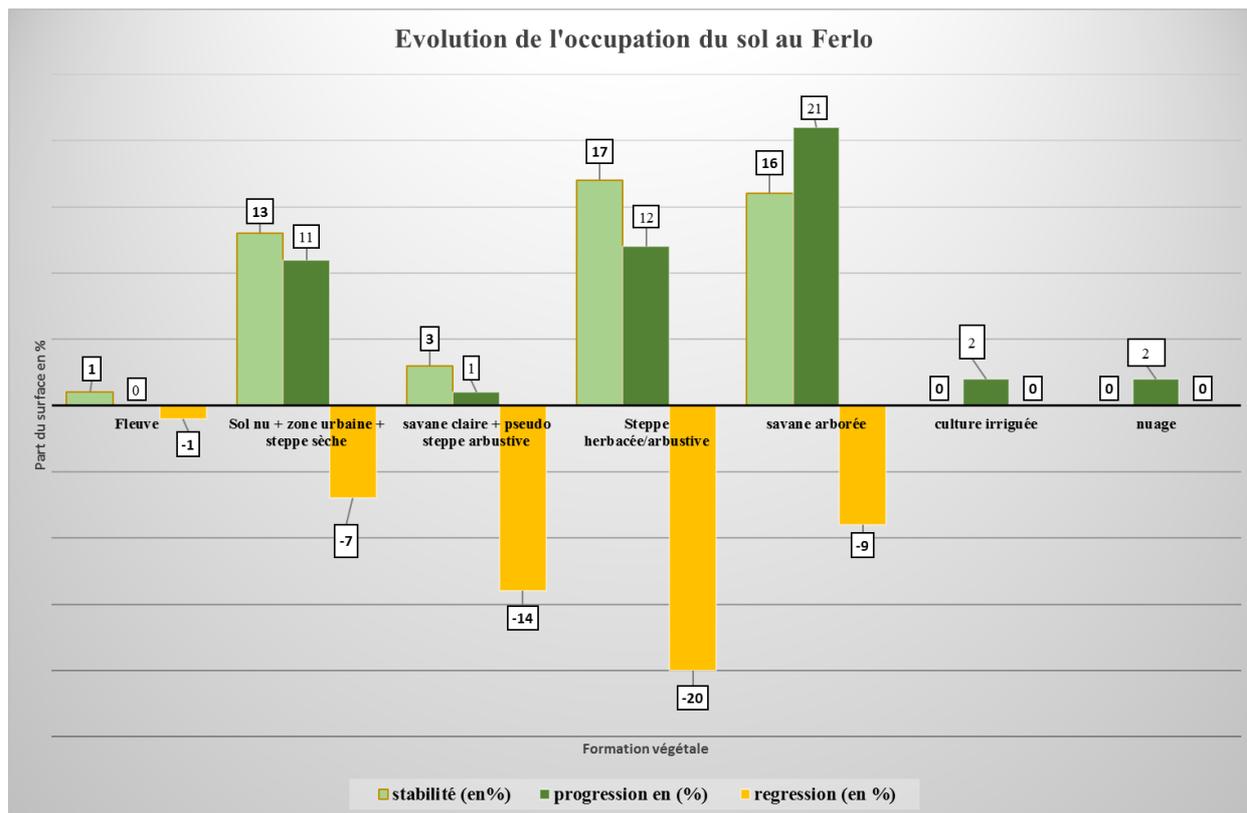


Figure 41 : Évolution de l'occupation du sol dans le Ferlo entre 1988 et 2014

Les résultats d'évolution d'occupation du sol entre 1988 et 2014 ont montré la présence de plusieurs changements de nature diverses et qui ont touché, d'une façon hétérogène, presque toutes les formations végétales. Les principales conclusions qu'on peut maintenir de ces changements sont :

- Classe du sol nu+ zone habitée + steppe sèche

Une progression assez importante de 11% de la surface totale de la classe du sol nu, a été faite au détriment aussi bien sur la savane claire+ pseudo steppe arbustive que de la steppe herbacée/arbustive dans la partie nord du Ferlo. Une sorte de régression du sol nu a été produite au profit de la savane arborée au sud du Ferlo et au profit de la culture de décrue au niveau de la vallée du fleuve. On note aussi qu'une partie du sol nu est restée stable durant 30 ans.

Savane claire + pseudo steppe arbustive :

La variation la plus marquante qui touche cette classe c'est la régression de la superficie consacrée à la savane claire et pseudo steppe arbustive (régression de 14% de la superficie totale). Cette disparition végétale est due aux plusieurs facteurs tel que les facteurs naturels (le résultat de la grande sécheresse) et les facteurs anthropiques (surpâturage).

- **Steppe herbacée/arbustive**

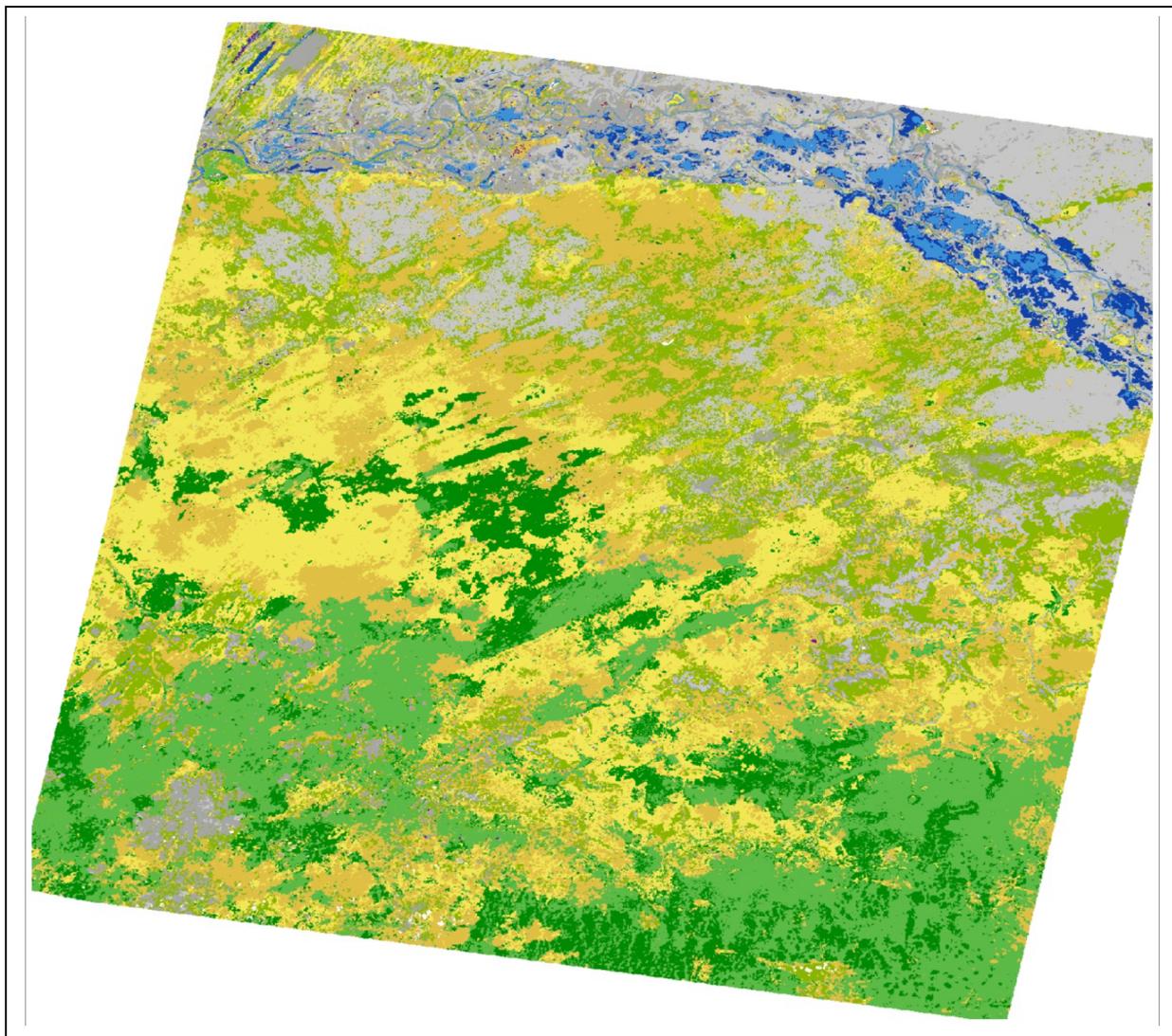
Les mutations retenues dans cette classe nous amènent à voir un nouveau paysage de la zone d'étude. Une régression spectaculaire de la savane herbacée (représente 20% de la surface totale) est due aux changements climatiques et à la pression pastorale. Cette régression a été quand même récompensée dans divers secteurs.

- **Savane arborée**

La classe de la savane arborée a témoigné principalement une stabilité de surface (16%) et une progression de 21% de la surface totale.

- **Culture de décrue**

Un autre fait marquant de la figure ci-dessus c'est la progression des cultures irriguées. Cette progression est le résultat des politiques d'aménagement hydraulique et de développement de l'irrigation dans la vallée du fleuve du Sénégal.

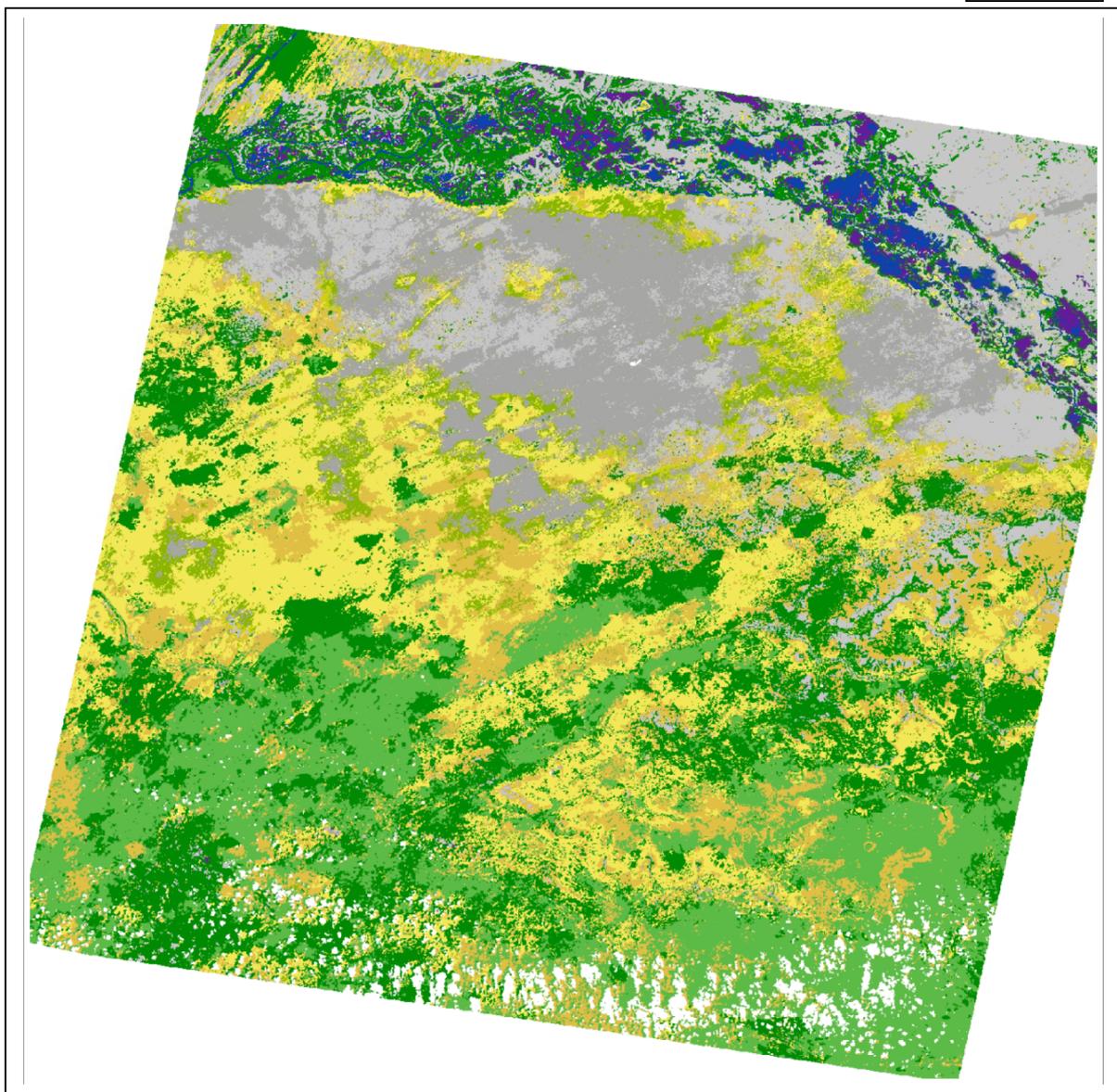


Legende

-  Bord
-  Regression fleuve
-  regression sol nu + zone habitée+ steppe sèche
-  regression savane claire + pseudo steppe arbustive
-  regression steppe herbacée/arbustive
-  Regression savane arborée
-  Régression culture irriguée

-  Stabilité fleuve
-  Stabilité sol nu + zone habitée+steppe sèche
-  Stabilité savane claire+pseudo steppe arbustive
-  Stabilité steppe herbacée/arbustive
-  Stabilité savane arborée
-  Stabilité culture irriguée
-  Autre

Carte de Progression des différentes catégories d'occupation du sol au nord du Sénégal entre 1988 et 2014



Legende

-  Progression sol nu + zone habitée+steppe sèche
-  Progression savane claire + pseudo steppe arbustive
-  Progression steppe herbacée/arbustive
-  Progression savane arborée
-  Progression culture irriguée
-  Fleuve

-  Stabilité sol nu + zone habitée+ steppe sèche
-  Stabilité savane claire+ pseudo steppe arbustive
-  Stabilité steppe herbacée/arbustive
-  Stabilité savane arborée
-  Stabilité culture irriguée
-  Nuage
-  Autre

II- Cartographie des changements dans l'occupation du sol au centre du Sénégal

Pour faire la carte de changement au centre du Sénégal, nous avons suivi les mêmes démarches effectuées à la carte du Ferlo. Pour ce faire nous avons fait deux cartes : une carte de progression et une autre de régression (voir annexe7). 10 classes ont été retenues décrivant les majeures évolutions d'occupation du sol au centre du Sénégal.

Tableau 9 : Classes retenues pour la carte de changement au centre du Sénégal

	Classes retenues pour la carte de progression au centre du Sénégal
1	Progression fleuve
2	Progression sol nu + bâti
3	Progression savane arborée
4	Progression savane Boisée
5	Progression Culture non irriguée
6	Fleuve
7	Stabilité sol nu + bâti
8	Stabilité savane arborée
9	Stabilité savane boisée
10	Stabilité culture non irriguée
11	Autre

	Classes retenues pour la carte de régression au centre du Sénégal
1	Régression sol nu + bâti
2	Régression savane arborée
3	Régression savane Boisée
4	Régression Culture non irriguée
5	Fleuve
6	Stabilité sol nu + bâti
7	Stabilité savane arborée
8	Stabilité savane boisée
9	Stabilité culture non irriguée
10	Autre

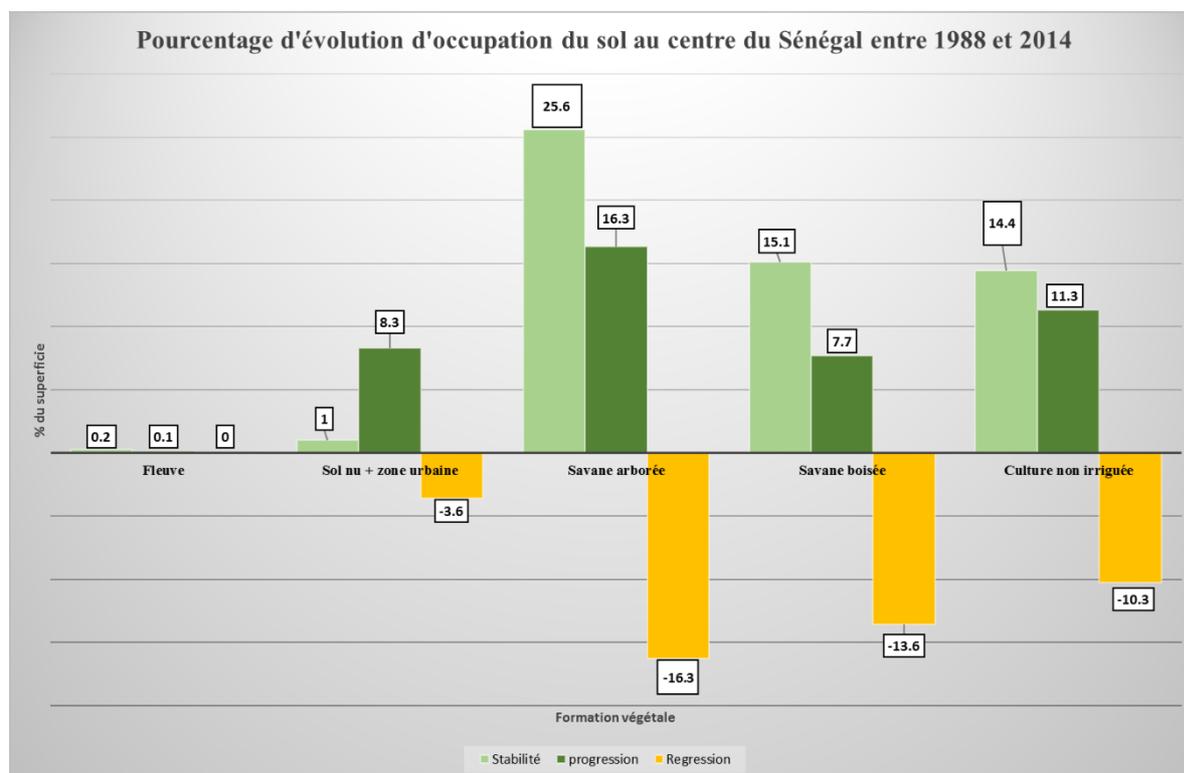


Figure 42 : Évolution de l'occupation du sol au centre du Sénégal entre 1988 et 2014

Entre 1988 et 2014, plusieurs conversions et transformations ont été établis, nous allons notamment étudier les majeurs changements, à savoir :

- La progression du sol nu
- La régression et la progression de la savane arborée
- L'extension des cultures pluviales
- La régression de la savane boisée

La classe du sol nu et zones habitées

Nous remarquons selon les figures ci-dessus que le sol nu a fortement progressé surtout dans la partie nord-Ouest du bassin arachidier, cette extension s'effectue en lien avec la croissance démographique et entraînant une surexploitation du sol pour la pratique agricole, ce qui a engendré un épuisement et parfois un abandon des terres par les agriculteurs, d'autre part, le défrichement du sol et le déboisement de la savane arborée explique ainsi ce phénomène. Cette situation peut entraîner une dégradation irréversible des terres qui sont devenues de plus en plus du sable stérile et une menace pour l'équilibre écosystémique.

La savane arborée

La savane arborée a connu une régression surtout vers le nord du bassin arachidier, mais ce recul a été compensé par sa progression dans d'autres zones. Cette régression de la strate arborée s'est faite au profit de l'extension des surfaces cultivées et des sols nus.

La culture pluviale

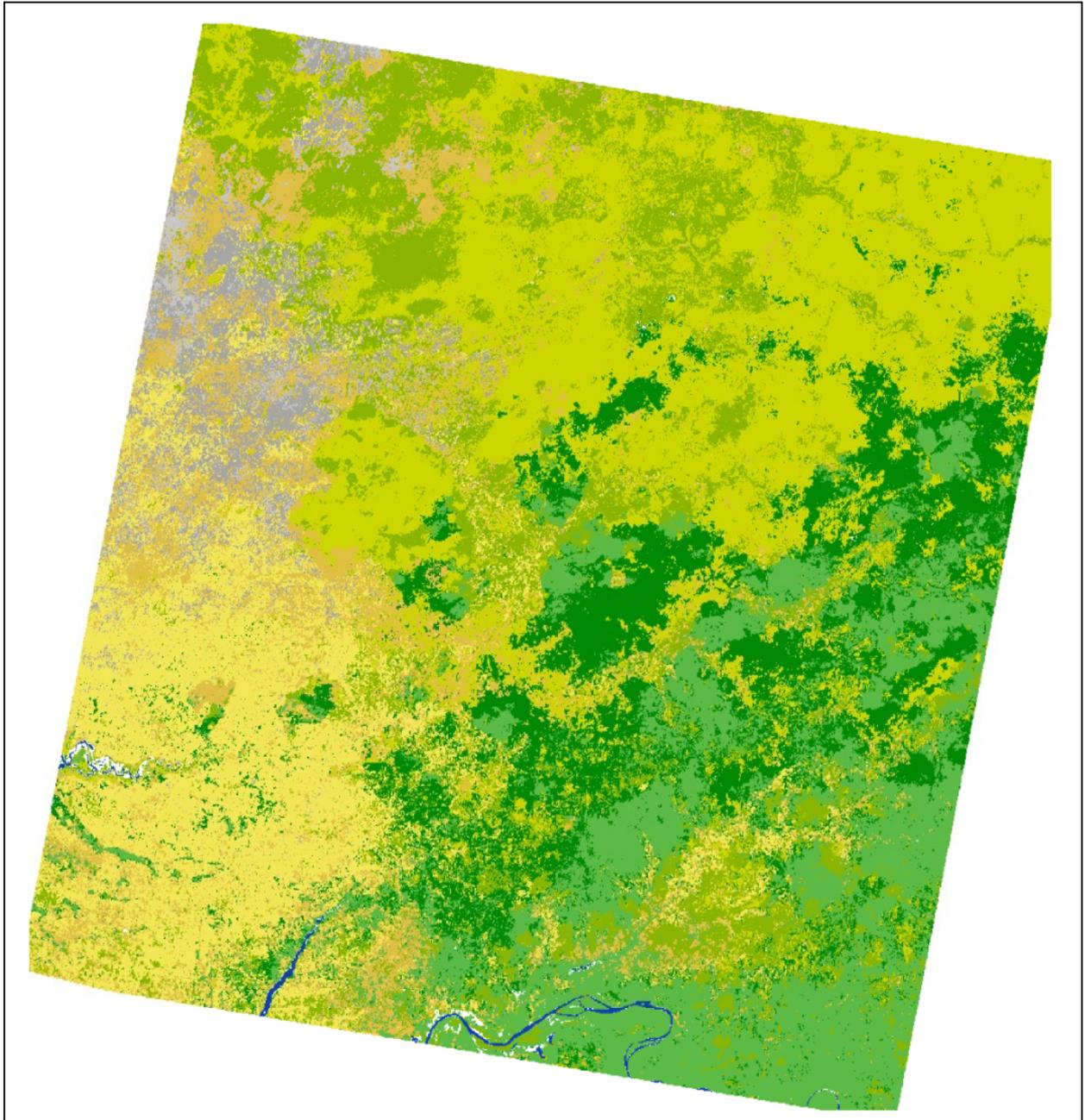
La culture pluviale a connu dans le même temps, une progression et une régression.

L'extension de culture pluviale présente 11% de la surface totale, a été établi principalement au détriment de la savane arborée et la savane boisée. Sa régression peut être expliquée par l'appauvrissement du sol entraînant un abandon des espaces cultivés.

La savane boisée

Malgré l'amélioration de la pluviosité dans cette zone d'étude, la strate de la savane boisée a connu une régression. Ce phénomène justifie bien que la conversion et la dynamique spatiale ne dépendent pas seulement des conditions pluviométriques mais aussi des facteurs humains qui jouent un rôle primordial dans la transformation paysagère.

Carte de régression des différentes catégories d'occupation du sol au centre du Sénégal entre 1988 et 2014

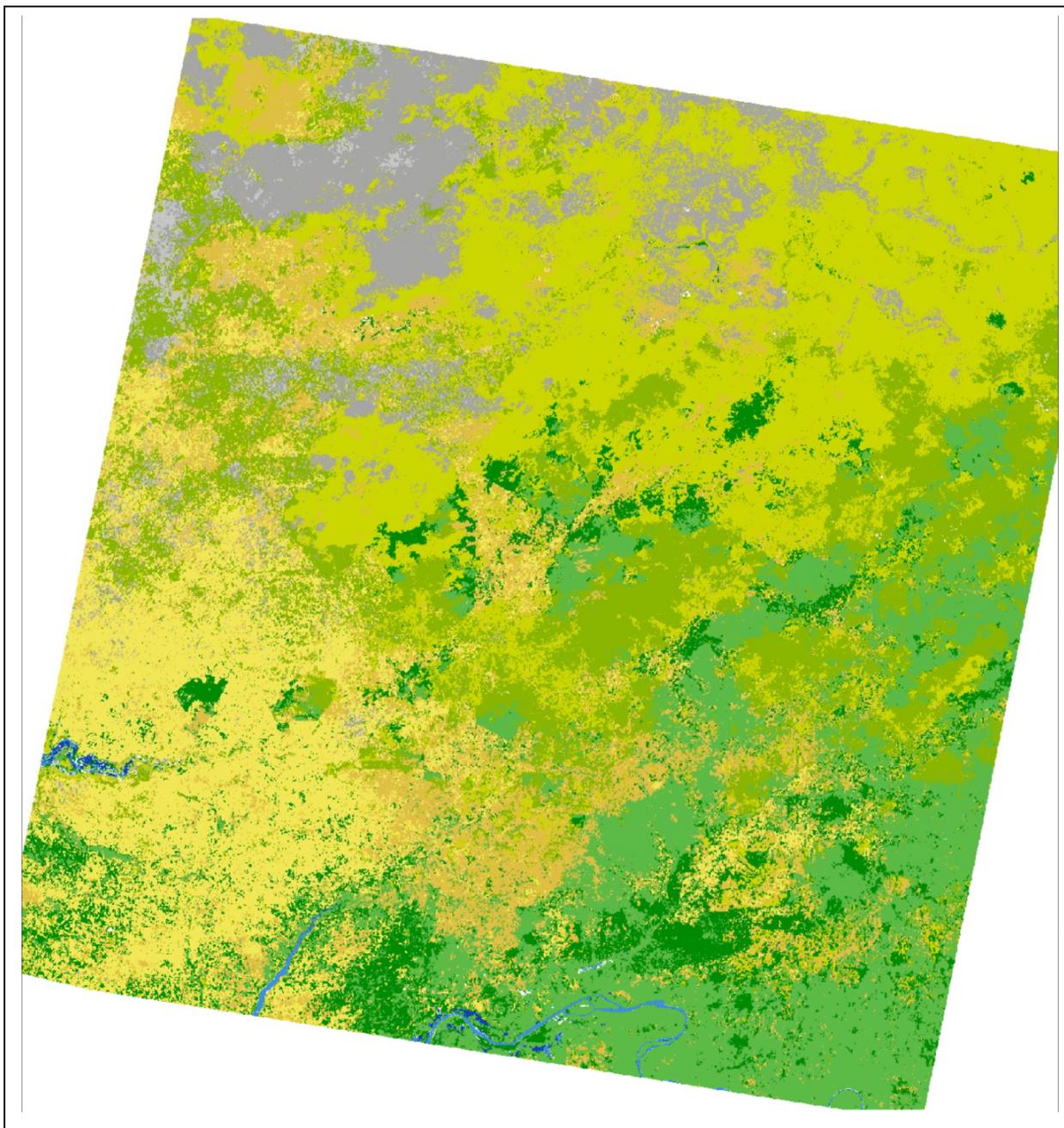


Legende

-  Regression sol nu + zone habitée
-  Regression savane arborée
-  Regression savane boisée
-  Regression culture pluviale
-  Fleuve

-  Stabilité sol nu + zone habitée
-  Stabilité savane arborée
-  Stabilité savane boisée
-  Stabilité culture pluviale
-  Autre

Carte de progression des différentes catégories d'occupation du sol au centre du Sénégal entre 1988 et 2014



Legende

-  Progression fleuve
-  Progression sol nu + zone habitée
-  Progression savane arborée
-  Progression savane boisée
-  Progression culture pluviale

-  Fleuve
-  Stabilité sol nu + zone habitée
-  Stabilité savane arborée
-  Stabilité savane boisée
-  Stabilité culture pluviale
-  Autre

CONCLUSION GENERALE

La structure spatiale de la végétation au centre-nord du Sénégal, a connu des changements importants durant ces trois décennies.

Le changement de paysage au nord-centre du Sénégal est le résultat non pas seulement des variations climatiques mais aussi de l'intervention de l'homme.

Malgré le retour des années pluvieuses, le nord du Ferlo, reste tributaire d'une dégradation des terres et dénudation des dunes.

L'agriculture dans le bassin arachidier est pratiquée essentiellement par les Wolofs¹⁴. Elle n'arrête pas à s'étendre sur des nouvelles surfaces, que ce soit sur des espaces consacrés aux éleveurs ou sur une partie de la savane arborée et boisée. Cette extension des cultures pluviale a contribué fortement aux dégradations des sols qui sont devenus de plus en plus sensible à l'érosion.

Dans le Ferlo, le tapis herbacé désormais insuffisant pour les bétails à cause de surpâturage, amenant les pasteurs de changer leurs axes de mobilités vers le sud. Cependant ce circuit devient de plus en plus compliqué.

Le système pastoral du Ferlo évolue dans des conditions climatiques difficiles et sous l'influence de plusieurs transformations établies par la société rurale. On note ainsi que l'élevage transhumant a été en quelque sorte négligé et marginalisé par le pouvoir publique qui s'intéresse à l'amélioration des conditions écologiques dans le Ferlo et à la sécurité alimentaire mais au détriment de système pastoral.

« Déjà, lors de l'introduction des premières cultures de rente au Sénégal par les autorités coloniales aucune mesure n'a été prise contre les impacts négatifs que celles-ci allaient jouer sur le développement de l'élevage au Sénégal. C'est l'importance accordée à cette spéculation et à son développement sur le territoire national qui a contribué au retard de la mise en œuvre d'une véritable politique d'élevage. »

(Fall, 2014). Ce constat se manifeste aussi dans les différentes politiques d'aménagement sur la région du Ferlo tel que : l'aménagement hydraulique de la vallée du fleuve qui a enclavé le nord du Ferlo et gêne l'accès des troupeaux au fleuve et donc une réduction des espaces de pâturage, la politique foncière entravant fortement la mobilité, la gestion de la faune à l'est du Ferlo qui a été faite au détriment de la mobilité et de l'alimentation du bétail. Cette situation a engendré une exclusion de l'élevage transhumant d'une partie de territoire, aggravée par la succession des années de sécheresse et l'accroissement démographique, renforçant par la suite la vulnérabilité et la marginalisation de l'activité de l'élevage.

« L'équilibre qui existait entre l'élevage et l'environnement est bousculé et il est possible que l'élevage devienne dégradant dans un contexte où la délimitation de l'aire protégée n'a pas été orientée par les dynamiques d'occupation des sols à l'œuvre dans la région. Le programme de conservation devient ici source de pression environnementale. » (Harchies, 2007). Plusieurs autres facteurs contribuent à cette dégradation à savoir : La péjoration pluviométrique, le tarissement des nappes phréatiques qui a des

¹⁴ Les Wolofs sont traditionnellement des cultivateurs sédentaires qui produisent l'essentiel de l'arachide du pays

conséquences négatives sur l'ensablement des mares. Cette situation a affecté éventuellement les parcours traditionnels des éleveurs transhumants qui ont connu des grands mouvements vers le sud (par exemple à Tambacounda) et ont pris des nouveaux couloirs de transhumance dans le but de trouver des points d'eau. Cette mobilité a engendré une pression sur des points d'eau par les bétails et un piétinement du sol, à cause de l'effectif élevé des animaux autour des forages, ceci a contribué à la destruction des quelques surfaces des couverts végétales et a engendré des conflits entre les pasteurs et les agriculteurs. (SARR, 2009).

Dans ce travail de recherche, nous avons mis l'hypothèse que la période de grande sécheresse au Sénégal a contribué une dégradation du couvert végétale et de l'environnement, cependant, le résultat qu'on a trouvé par le traitement des images satellites ainsi que le calcul de l'indice NDVI, nous montre un état d'évolution et de changement de l'environnement et du couvert végétal, mais pas une dégradation de l'environnement.

D'ailleurs, Dans le Ferlo l'effectif de cheptel a témoigné une augmentation entre 2003 et 2011, (voir annexe 4) il est passé de 6.8 millions en 2003 à 8 millions, donc une croissance de 18% (GERES, 2013). Ce résultat montre que l'hypothèse de dégradation de l'environnement n'est pas facile à soutenir, mais par contre on peut affirmer la présence des différents changements de l'environnement et de couvert végétal.

Bibliographie

- Bonn F. et al, 1993 : Précis de télédétection, volume 1 Principe et méthode ; presse de l'université Québec/ AUPELF
- BILLEN L., 2014 : Des jardins féminins à l'ombre de la Grande Muraille Verte Une étude comparée des jardins polyvalents villageoise De Widou-Thiengoly, Mbar Toubab, Suer et Tessékéré (Louga, Sénégal). Mémoire de M1, Réalisé à l'UMR 5600 de l'ENS de Lyon et à l'UMI 3189 du CNRS, soutenu le 27/06/2014.
- CSE (Centre de Suivi Ecologique) et al. 2007 : Caractérisation des systèmes de production agricole au senegal. Document de synthèse.
http://ntiposoft.com/domaine_200/pdf/caractspasenegal.pdf
- CALOZ R., COLLET C. (2001) : « Précis de télédétection volume3 Traitement numériques d'images de télédétection » presse de l'université du Québec agence universitaire de la francophonie.
- CARRIERE M.1996 : Impact des systèmes d'élevage pastoraux sur l'environnement en Afrique et en Asie tropicale et subtropicale aride et subaride. Scientific Environmental Monitoring Group Universität des SaarlandesInstitut für Biogeographie SAARBRÜCKEN Allemagne, Juin 1996.
- CAMBERLIN P., MARTINY N., RICHARD Y., PHILIPPON N., 2006 : Compared regimes of NDVI and rainfall in semi-arid regions of Africa, International Journal of Remote Sensing, 27 (23) : 5201-5223.
- CESARO J.D., MAGRIN G., NINOT O., 2010. Atlas de l'élevage au Sénégal, commerce et territoire. Publication du projet de recherche ATP Icare, CIRAD, PRODIG.
- CASTANEDA D., 2005 : Les organisations d'éleveurs et de pasteurs au Sénégal Approche socio-politique. L'édition du présent ouvrage a été réalisée grâce à l'appui du Service de Coopération et d'Action Culturelle de l'Ambassade de France à Dakar.
- CSE (Centre de suivi écologique) ,2006 : Projet de valorisation des espèces pour une utilisation durable des ressources sauvages. Atlas sur les ressources sauvage au Sénégal. Dakar Février 2006.
- CESARO J. D., 2009: Mobilité pastorale et accès aux marchés: Le cas des éleveurs du forage de Niassanté. Mémoire de MASTER I Carthagéo ; Université paris 1, UFR DE GEOGRAPHIE, Soutenance: 15 juillet 2009 session de septembre.
- CHANDER, G., MARKHA, B.L., & HELDER, D.L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote Sensing of Environment, 113, 893-903.
- DIDAY E., 1971. Une nouvelle méthode de classification automatique et reconnaissance des formes : la méthode des nuées dynamiques, Revue de statistiques appliquées, 19 (2) : 19-33.

- DENDONCKER M., NGOM D., VINCKE C., 2015 : Trees dynamics (1955-2012) and their uses in the Senegal's Ferlo region: insights from a historical vegetation database, local knowledge and field inventories » 1 Université catholique de Louvain, Earth and Life Institute, Croix du Sud, 2 - L7.05.09, 1348, Louvain-la-Neuve, Belgium, 2 Université Assane Seck, de Ziguinchor, Département, d'agroforesterie, BP 523, Néma, Senegal ; BOIS ET FORÊTS DES TROPIQUES , 2 0 1 5 , N ° 3 2 6 .
- DIA D., 2009. Les territoires de l'élevage laitier à l'épreuve des dynamiques politiques et économiques : éléments pour une géographie du lait au Sénégal. Thèse de doctorat de 3e cycle en Géographie, Dakar, Université Cheikh Anta Diop, 336 p.
- DIAGANA B. et al. 2008 : Agriculture durable et réduction de la pauvreté dans le bassin arachidier au Sénégal : Résultat du Modèle Analyse Tradeoffs (TOA). Institut sénégalais de recherche agricoles. ISRA réflexion et perspectives-volume 6 n°5.
- DASYLVA S. et COSANDEY C.,2009 « L'exploitation de la Nappe des Sables Quaternaires pour l'alimentation en eau potable de Dakar : une offre compromise par l'insuffisance de la recharge pluviométrique », Géocarrefour [En ligne], vol. 80/4 | 2005, mis en ligne le 01 juin 2009, consulté le 31 mai 2016. URL : <http://geocarrefour.revues.org/1385>.
- FALL A. 2014 : Le Ferlo sénégalais : Approche géographique de la vulnérabilité des anthroposystèmes sahéliens, THESE, Présentée pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Paris 13 Sorbonne Paris Cité, Discipline : Géographie, Le 24 Octobre 2014.
- GIRARD M.C. et COLLETTE M. 2010 « Traitement des données de télédétection, environnement et ressources naturelles» 2^e édition, Dunod, paris 2010.
- GUÉRIN C. : Production d'indicateurs paysagers sur des territoires agricoles fondés sur l'inversion de réflectances d'images satellite, Mémoire de Master 1ère année Génie de l'environnement , Institut EGID, Université Michel de Montaigne – Bordeaux 3, INRA Avignon, UMR EMMAH.
- GOVAERTS B. et al. 2010 :The normalized difference vegetation index (NDVI) GreenSeeker TM handheld sensor: Toward the integrated evaluation of crop management Part A: Concepts and case studies. Mexico, D.F.; CIMMYT.
- GERES Sénégal (Groupe Énergies Renouvelables, Environnement et Solidarités), Le Centre de Suivi Ecologique (CSE), Le Pôle Pastoralisme et Zones Sèches (PPZS),2013 : Atlas des vulnérabilités territoriales du Ferlo face aux changements climatiques. ; Clim Terr, Dakar 2013.

- HARCHIES M., Aurélie Binot et Wolff E., 2007 « Impacts mutuels de la conservation et de l'élevage transhumants sur l'occupation des sols et les ressources environnementales », Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Hors-série 4 | novembre 2007, mis en ligne le 11 septembre 2007, consulté le 14 mars 2016. URL : <http://vertigo.revues.org/808> ; DOI : 10.4000/vertigo.808.
- HELLENDROFF B., 2012 : Changement climatique et conflits agro-pastoraux au Sahel, Note d'Analyse du GRIP, 2 octobre 2012, Bruxelles. URL : <http://www.grip.org/fr/node/546>.
- IRONSJ.,2011 : « The Landsat 7 Handbook is out of date. » NASA Official , 2011 http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/data_prod/prog_sect11_3.html.
- KOUTOUDIO S., 2005 : Diagnostic des ressources naturelles et leur gestion dans la communauté rurale de Vélingara Ferlo. Université Cheikh Anta DIOP de Dakar - Maitrise 2005. <http://www.memoireonline.com/07/09/2378/Diagnostic-des-ressources-naturelles-et-leur-gestion-dans-la-communaute-rurale-de-Velingara-Ferlo.html>.
- LAVORINI D.,2010: Analyse rétrospective par télédétection de l'évolution du dépérissement des Sapins pectinés (abies alba) sur le Mont Ventoux. Mémoire de travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'ESGT ; 30 juin 2010.
- MORINEAU A. ,2004 : L'analyse des données par la pratique, DEENOV <http://www.deenov.com/Data/Sites/1/docs/classification-tutoriel.pdf> .
- MERINGC. et al., 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, Editions scientifiques GB, 2008, 8 (2), pp.93-118. <Halshs-00388170>.
- MAGRIN M.,2008 :Dynamiques territoriales et place de l'élevage au Sénégal. Documents de travail Icare, Icare Working Papers ; Cirad, Département Environnement et Sociétés, juillet 2008 Campus international de Baillarguet 34 398 Montpellier Cedex 5, France.
- MAGRIN G, NINOT O, CESARO J.D., 2011 : « L'élevage pastoral au Sénégal entre pression spatiale et mutation commerciale», UMR PRODIG /CIRAD, UMR Tétis, CNRS, Université Paris 1, @ppemonde 103 (2011.3) <http://mappemonde.mgm.fr/num31/articles/art11304.html>.
- MOUNDJOA C., 2008 : Etude de l'utilisation des applications des technologies de l'information et de la communication par les éleveurs de l'unité pastorale de Theil au sene. Thèse, université cheikh Anta Diop de Dakar école inter - états des sciences et médecine vétérinaires (E.I.S.M.V.). <Http://www.beep.ird.fr/collect/eismv/index/assoc/TD08-44.dir/TD08-44.pdf>.

- MAYAUX P. et al. ; 2003 : « A LAND COVER MAP OF AFRICA CARTE DE L'OCCUPATION DU SOL DE L'AFRIQUE ». Luxembourg: Office for Official publications of the European Communities, 2003 ; ISBN 92-894-5370-2.
- NICHOLSON, S. E., TUCKER C. J., and BA M. B., «Desertification, Drought, and Surface Vegetation: An Example from the West African Sahel » *Department of Meteorology, The Florida State University, Tallahassee, Florida. +NASA, Laboratory for Terrestrial Physics, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland. Current affiliation: National Oceanic and Atmospheric Administration- National Environmental Satellite, Data and Information Service, Washington, D.C. Corresponding author address: Prof. S. E. Nicholson, Department of Meteorology, The Florida State University, Tallahassee, FL 32306-3034. In final form 6 February 1998. ©1998 American Meteorological Society ; Bulletin of the American Meteorological Society.
- NDAO M., 2012 « Dynamiques et gestion environnementales de 1970 à 2010 des zones humides au Senegal : etude de l'occupation du sol par teledetection des Niayes avec Djiddah Thiaroye Kao (a Dakar), Mboro (a Thies et Saint-Louis)» thèse Géographie. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2012. Français. <NNT : 2012TOU20018>. <tel-00718050>HAL Id: tel-00718050 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00718050> Submitted on 16 Jul 2012.
- NDIAYE O., DIALLO A., SAGNAM. B. et GUISSÉ A. 2014, « Diversité floristique des peuplements ligneux du Ferlo, Sénégal », Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Volume13 Numéro 3 | décembre 2013, mis en ligne le 24 janvier 2014, consulté le 10 octobre 2014. URL : <http://vertigo.revues.org/14352> ; DOI : 10.4000/vertigo.14352.
- NDIAYE M. 2013 : Ranch de Dolly, 45 ans, délabré, 87 500 ha, 3337 habitants... » publié par enquête + <http://www.enquetepius.com/content/ranch-de-dolly-45-ans> [d%C3%A9labr%C3%A9-87-500-ha-3337-habitants-macky-sall-en-visite-chez-un-grand](http://www.enquetepius.com/content/ranch-de-dolly-45-ans)
- NINOT O. « Elevage et territoire dans le « Ferlo », zone pastorale du nord du Sénégal » CNRS, UMR PRODIG, Janvier 2008.
- OUMAR Sy,« Rôle de la mare dans la gestion des systèmes pastoraux sahéliens du Ferlo (Sénégal) », Cybergeog : European Journal of Geography [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 440, mis en ligne le 17 mars 2009, consulté le 06 avril 2016. URL : <http://cybergeog.revues.org/22057> ; DOI : 10.4000/cybergeog.22057, Éditeur : CNRS-UMR, Géographie-cités 8504, <http://cybergeog.revues.org>, <http://www.revues.org>, Document accessible en ligne sur : <http://cybergeog.revues.org/22057>, Document généré automatiquement le 06 avril 2016. © CNRS-UMR Géographie-cités 8504.

- ONU (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture), 2012 : La transhumance transfrontalière en Afrique de l'Ouest, Proposition de plan d'action, Juin 2012.
- PIERRE R., 2014 : Mesurer La résilience des ménages ruraux sénégalais : Trajectoires et seuils de moyens d'existence. Université Lille 1 - Laboratoire CLERSE, Bureau 19D EDSSESAM Bât. SH1 59655 Villeneuve d'Ascq cedex Cité Scientifique.
- SARR M.2009: Evolution récente du climat et de la végétation au Sénégal (Cas du bassin versant du Ferlo). Thèse en cotutelle Soutenue le 4 décembre 2009 à 14h30 à l'Université Jean Moulin Lyon 3.
- SARR M., 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 : European Journal of Geography [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 472, mis en ligne le 07 octobre 2009, consulté le 27 avril 2016.
- THE YALE CENTER FOR EARTH OBSERVATION, 2013 :Converting Digital Numbers to Top of Atmosphere (ToA) Reflectance ; 2013. <http://www.yale.edu/ceo> ; http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/data_prod/prog_sect11_3.html .
- UNICEF, Practicia fondation 2009 « Etude de faisabilité des forages manuels, identification des zones potentiellement Favorables » République du senegal.

Liens visités :

- <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- <http://www.usgs.gov/>
- <http://glcf.umd.edu/>
- <http://glovis.usgs.gov/>
- <https://support.google.com/earth/answer/176147?hl=fr>
- <http://www.gouv.sn/Le-climat.html>
- <http://oceanservice.noaa.gov/facts/lclu.html>
- <http://videotheque.cnrs.fr/doc=4668>
- http://www.memoireonline.com/01/08/871/m_maintenance-amenagements-hydroagricoles-delta-fleuve-senegal-perimetre-boundoum4.html
- <http://lodel.irevues.inist.fr/pollution-atmospherique/index.php?id=5320>
- <http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/dossiers-pays/senegal/presentation-du-senegal/article/geographie-et-histoire-110755>
- <http://www.notre-planete.info/actualites/4157-causes-deforestation-Senegal>

- <http://www.fao.org/agriculture/seed/cropcalendar/searchbycountry.do>
- http://www.planete-senegal.com/senegal/agriculture_senegal.php
- Cours en ligne, Université Paris 1 :
<http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/vegetation/indices/qques-indices/indices-simples.html>

Tables des matières

<i>INTRODUCTION GÉNÉRALE ET OBJECTIFS</i>	1
<i>Partie I : Données et Méthodologie</i>	9
<i>I- Données</i>	10
<i>I-1 Acquisition des images satellites Landsat TM</i>	10
<i>I-1-1 Images satellites utilisées</i>	10
<i>I-1-2 Les bandes spectrales des capteurs Landsat TM utilisées</i>	11
<i>I-2 Les critères de choix d'images satellites</i>	12
<i>I.2.1 Conversion des images compte numérique CN en luminance apparente</i>	14
<i>I.2.2 Transformation réduisant les effets de l'atmosphère et du relief : conversion de la luminance en réflectance au-dessus de l'atmosphère (TOA)</i>	15
<i>I.2.3 Résultats de la correction atmosphérique et calcul de NDVI</i>	16
<i>I-3 Photographies aériennes et images à hautes résolutions spatiale</i>	18
<i>II- Méthode et outils</i>	19
<i>II-1 Correction géométrique et ré-échantillonnage</i>	21
<i>II-3 La composition colorée</i>	21
<i>II-4 Classification par nuées dynamiques</i>	22
<i>II-5 Réponses spectrales des quelques surfaces naturelles</i>	23
<i>II-6 Analyse de composantes principales ACP</i> :	24
<i>II-7 Le système d'information géographique (SIG)</i>	24
<i>Partie II Résultats : Mesures de l'évolution de l'occupation du sol et de caractéristique spatiale</i>	25

<i>Chapitre I : Analyse des changements d'occupation du sol dans la zone d'étude</i>	25
<i>I- Analyse de calcul de l'indice de végétation NDVI au nord-centre du Sénégal</i>	26
<i>I-1 Analyse de calcul de l'indice de végétation NDVI au nord du Sénégal</i>	26
<i>I-1-1 Profil de NDVI dans le Ferlo (nord du Sénégal) au cours de la saison 1988 /1989</i>	27
<i>I-1-2 Profil NDVI dans le Ferlo au cours de la saison 2014/2015</i>	33
<i>I-2 Analyse de calcul de l'indice de végétation NDVI au centre du Sénégal</i>	36
<i>I-2-1 Profil de NDVI au centre du Sénégal dans la saison 1988-1989</i>	36
<i>I-2-2 Profil NDVI au centre du Sénégal dans la saison 2014/2015</i>	40
<i>I-3 Conclusion de section 1 de la deuxième partie</i>	43
<i>II- Caractéristiques de la couverture du sol au nord-centre du Sénégal</i>	43
<i>II-1 Caractéristiques de la couverture du sol au nord du Sénégal</i>	44
<i>II-1-1 Analyse de la carte de l'occupation du sol du Ferlo</i>	51
<i>II-2 Caractéristique de la couverture du sol au centre du Sénégal</i>	57
<i>II-2-1 Analyse de la carte d'occupation du sol au Centre du Sénégal</i>	60
<i>II-3 Conclusion de la section 2 de deuxième partie</i>	66
<i>Chapitre 2 :Cartographie des changements dans l'occupation du sol au nord centre du Sénégal</i>	66
<i>I Cartographie des changements dans l'occupation du sol au nord du Sénégal</i>	66
<i>II Cartographie des changements dans l'occupation du sol au centre du Sénégal</i>	72
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	76
<i>Bibliographie</i>	78
<i>Annexes</i>	89

Table des figures

<i>FIGURE 2: PAYSAGE DE L'UNITE PASTORALE DE THIEL AU SUD DE FERLO</i>	3
<i>FIGURE 3 : PRESENTATION DE L'UNITE PASTORALE DE THIEL</i>	4

FIGURE 4 : PRESENTATION D'UNE STRATE HERBACEE DENSE AU FERLO	4
FIGURE 5 : PHYSIONOMIE DE QUELQUES RELEVES DU FERLO (PHOTOS : NINOT O., 2009).....	5
FIGURE 6 : PRESENTATION DE QUELQUES MARES AU SUD DE FERLO (CLICHE NINOT O., 2009).....	6
FIGURE 7 : PAYSAGE MONTRE UN ETAT D'HERBE RASE (CLICHE NINOT O., 2009).....	6
FIGURE 8 : IMAGE DU SOL " DECAPE " AU NORD DU FERLO (PHOTO : NINOT O., 2009).....	7
FIGURE 9 : DEMARCHE METHODOLOGIQUE GENERALE DE CE TRAVAIL DU MEMOIRE	9
FIGURE 10 : REPRESENTATION SIMPLIFIEE DES ETAPES DE CONVERSION DES IMAGES DE COMPTE NUMERIQUE EN REFLECTANCE HAUT DE L'ATMOSPHERE.....	13
FIGURE 11 : SCHEMA DU PRINCIPE DE LA TELEDETECTION ET DU CHEMINEMENT DES RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES.....	14
FIGURE 12A : CALCUL DU NDVI BAS DE L'ATMOSPHERE AU NORD DU SENEGAL LE 05/08/1988.....	17
(IMAGE ISSUS DE LA SCENE LANDSAT 5 EN MODE REFLECTANCE)	17
FIGURE 12B : NDVI HAUT DE L'ATMOSPHERE AU NORD DU SENEGAL LE 05/08/1988.....	17
(IMAGE ISSUS DE LA SCENE LANDSAT 5 EN MODE LUMINANCE).....	17
FIGURE 12 C : CALCUL DE DIFFERENCE DE NDVI HAUT DE L'ATMOSPHERE ET BAS DE L'ATMOSPHERE....	18
FIGURE 13 : EXEMPLE D'UNE IMAGE DE PHOTOGRAPHIE AERIENNE POUR LA ZONE DE LINGUERE SITUE ENTRE LE SUD DE FERLO ET LE NORD DU BASSIN ARACHIDIER.....	19
FIGURE 14 : SCHEMA RECAPITULATIF DU TRAITEMENT D'IMAGES POUR LA REALISATION DES CARTES D'OCCUPATION DU SOL	20
FIGURE 26 A, B, C, D : COMPOSITIONS COLOREES (CC) DU FERLO ET DU CENTRE DU SENEGAL R=BANDE PIR V=BANDE ROUGE ET B=BANDE VERTE	22
FIGURE 16 : COURBES DE REFLECTANCE DE LA VEGETATION ET DU SOL	23
FIGURE 17 : DELIMITATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	25
FIGURE 18 : POURCENTAGE DE VARIANCE D'ACP ET CARTOGRAPHIE DE LA COUVERTURE VEGETALE SELON LA COMPOSANTE 1	26
FIGURE 19 : PROFIL NDVI POUR CHAQUE FORMATION VEGETALE AU NORD DU SENEGAL EN 1988 ET CLASSIFICATION (PAR LA METHODE DES NUEES DYNAMIQUES) EN 6 CLASSES EN FONCTION DES VALEURS OBTENUES SUR LES 4 PREMIERES COMPOSANTES PRINCIPALES.....	31
FIGURE 20 : PRESENTATION DE CHAQUE MASQUE DE COUVERTURE DU SOL AVEC SON PROFIL NDVI AU NORD DU SENEGAL 1988	32
FIGURE 21 : PROFIL NDVI POUR CHAQUE FORMATION VEGETALE AU NORD DU SENEGAL EN 2014-2015 ET CLASSIFICATION (PAR LA METHODE DES NUEES DYNAMIQUES) EN 6 CLASSES EN FONCTION DES VALEURS OBTENUES SUR LES 4 PREMIERES COMPOSANTES PRINCIPALES.....	34
FIGURE 22 : PRESENTATION DE CHAQUE MASQUE DE COUVERTURE DU SOL AVEC SON PROFIL NDVI AU NORD DU SENEGAL 2014	35
FIGURE 23 : PRESENTATION D'UNE IMAGE SATELLITE DE LANDSAT 5 AVEC NUAGE.....	37

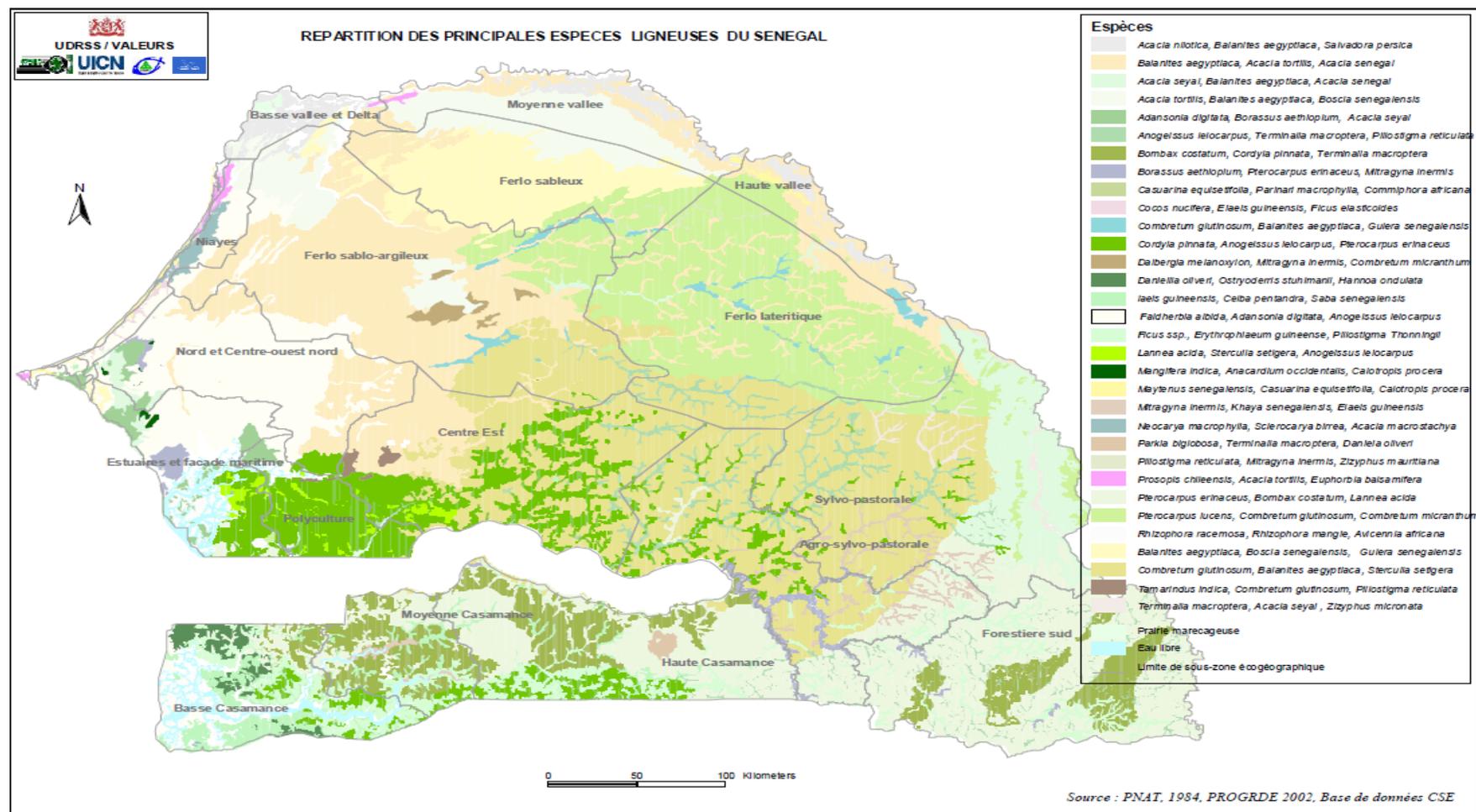
FIGURE 24 : PROFIL NDVI POUR CHAQUE FORMATION VEGETALE AU CENTRE DU SENEGAL EN 1988 ET 1989 ET CLASSIFICATION (PAR LA METHODE DES NUEES DYNAMIQUES) EN 6 CLASSES EN FONCTION DES VALEURS OBTENUES SUR LES 4 PREMIERES COMPOSANTES PRINCIPALES.....	38
FIGURE 25 : PRESENTATION DE CHAQUE MASQUE DE COUVERTURE DU SOL AVEC SON PROFIL NDVI AU CENTRE DU SENEGAL EN 1988.....	39
FIGURE 26 : PROFIL NDVI POUR CHAQUE FORMATION VEGETALE AU CENTRE DU SENEGAL EN 2014 ET 2015 ET CLASSIFICATION (PAR LA METHODE DES NUEES DYNAMIQUES) EN 5 CLASSES EN FONCTION DES VALEURS OBTENUES SUR LES 4 PREMIERES COMPOSANTES PRINCIPALES.....	41
FIGURE 27 : PRESENTATION DE CHAQUE MASQUE DE COUVERTURE DU SOL AVEC SON PROFIL NDVI AU CENTRE DU SENEGAL EN 2014.....	42
FIGURE 28 : CLASSIFICATION KMEANS DE SOUS SCENE FERLO (NORD DU SENEGAL) EN 1988 ET COMPOSITION COLOREE.....	46
FIGURE 29 : COURBES RADIOMETRIQUES DES 12 CLASSES DE LA CLASSIFICATION EN NUEES DYNAMIQUES DE LA SOUS SCENE FERLO (NORD DU SENEGAL).....	46
FIGURE 31 : VERIFICATION DU MASQUE SOL NU + BATI (COURBES RADIOMETRIQUES DE LA CLASSIFICATION NON DIRIGEE SUR L'ACP).....	48
FIGURE 32 : VERIFICATION DU MASQUE EAU, COURBES RADIOMETRIQUES DE LA CLASSIFICATION NON DIRIGEE SUR L'ACP (EAU).....	49
FIGURE 33 : VERIFICATION DU MASQUE VEGETATION : COURBES RADIOMETRIQUES DE LA CLASSIFICATION NON DIRIGEE SUR L'ACP (VEGETATION).....	49
FIGURE 34 : POURCENTAGE DE SUPERFICIE OCCUPEE POUR CHAQUE FORMATION VEGETALE AU FERLO EN 1988.....	52
FIGURE 35 : POURCENTAGE DE SUPERFICIE OCCUPEE POUR CHAQUE FORMATION VEGETALE AU FERLO EN 2014.....	52
FIGURE 36 : PART DE SUPERFICIE EN POURCENTAGE DE CHAQUE FORMATION VEGETALE AU CENTRE DU SENEGAL EN 1988.....	60
FIGURE 37 : SUPERFICIE EN POURCENTAGE DE CHAQUE FORMATION VEGETALE AU CENTRE DU SENEGAL EN 2014.....	60
FIGURE 38 : PAYSAGE DE LA PRATIQUE AGRICOLE DANS LA PARTIE EST DU BASSIN ARACHIDIER.	61
VILLAGE BAKOURE, SITUE A L'EST DU TOUBA.....	61
FIGURE 39 : IMAGE DE LA VILLE DE DAHARA.....	62
FIGURE 40 : LOCALISATION DU DOMAINE RANCH DE DOLI.....	63
FIGURE 41 : EVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL DANS LE FERLO ENTRE 1988 ET 2014.....	68
FIGURE 42 : EVOLUTION DE L'OCCUPATION DU SOL AU CENTRE DU SENEGAL ENTRE 1988 ET 2014.....	72

Liste des tableaux

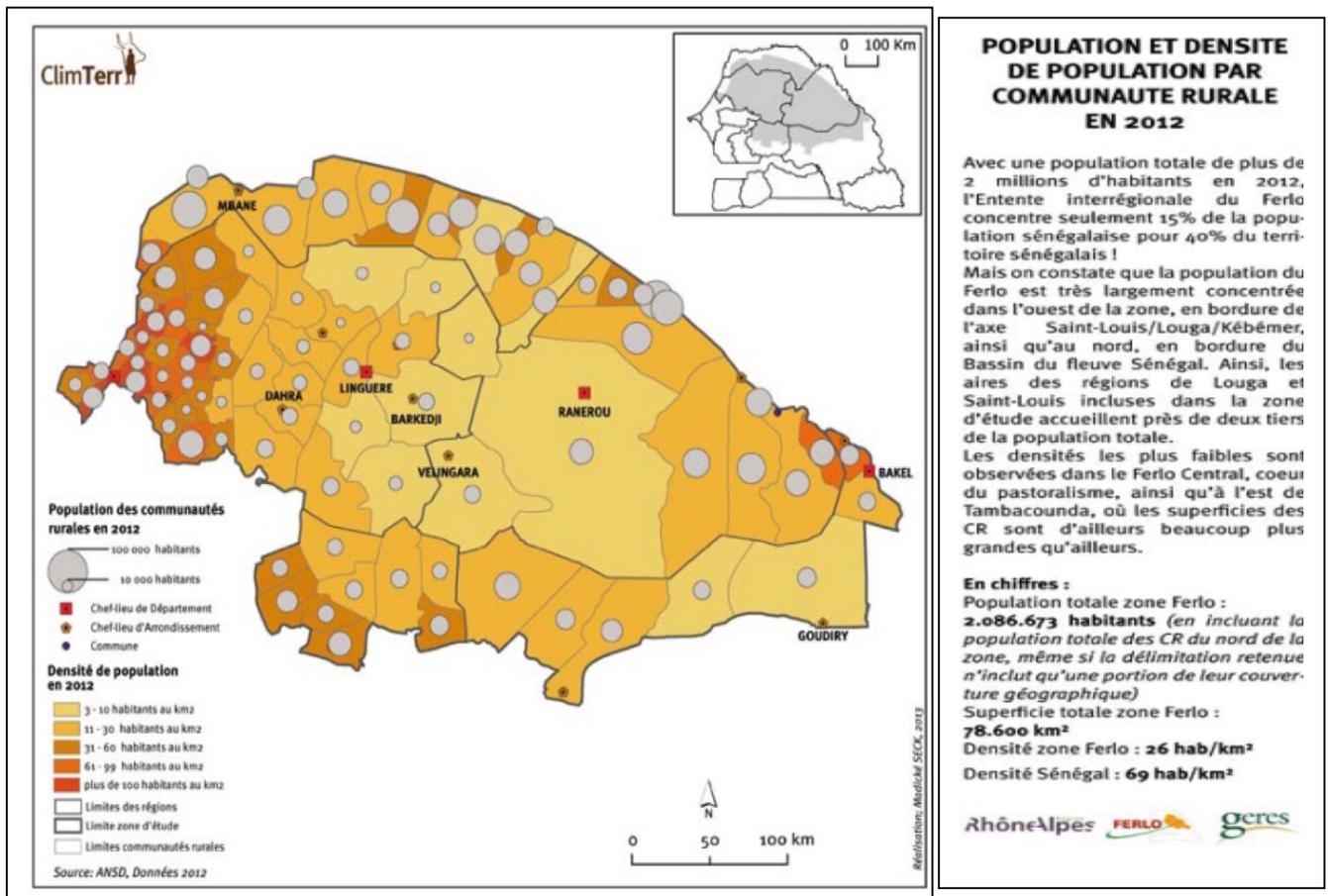
TABLEAU 1 : LISTES DES IMAGES UTILISEES AU NORD DU SENEGAL :	10
TABLEAU 2 : LISTES DES IMAGES UTILISEES AU CENTRE DU SENEGAL :	11
TABLEAU 3 : FENETRES SPECTRALES DES CAPTEURS LANDSAT TM 4 ET 5 UTILISES DANS L'ETUDE :	12
TABLEAU 4 : FENETRES SPECTRALES DES CAPTEURS LANDSAT TM 8 UTILISES DANS L'ETUDE :	12
TABLEAU 5 : TABLEAU RECAPITULATIF DE DEFINITION DE LA LUMINANCE ET REFLECTANCE	16
TABLEAU 6 : DEFINITION DES DIFFERENTES FORMATIONS VEGETALES.	29
TABLEAU 7 : LES DIFFERENTES CLASSES DE L'OCCUPATION DU SOL RETENUES AU NORD DU SENEGAL....	45
TABLEAU 8 : LES CLASSES RETENUES POUR LES CARTES DE PROGRESSIONS ET DE REGRESSIONS	67
TABLEAU 9 : CLASSES RETENUES POUR LA CARTE DE CHANGEMENT AU CENTRE DU SENEGAL	72

Annexes

Annexel :

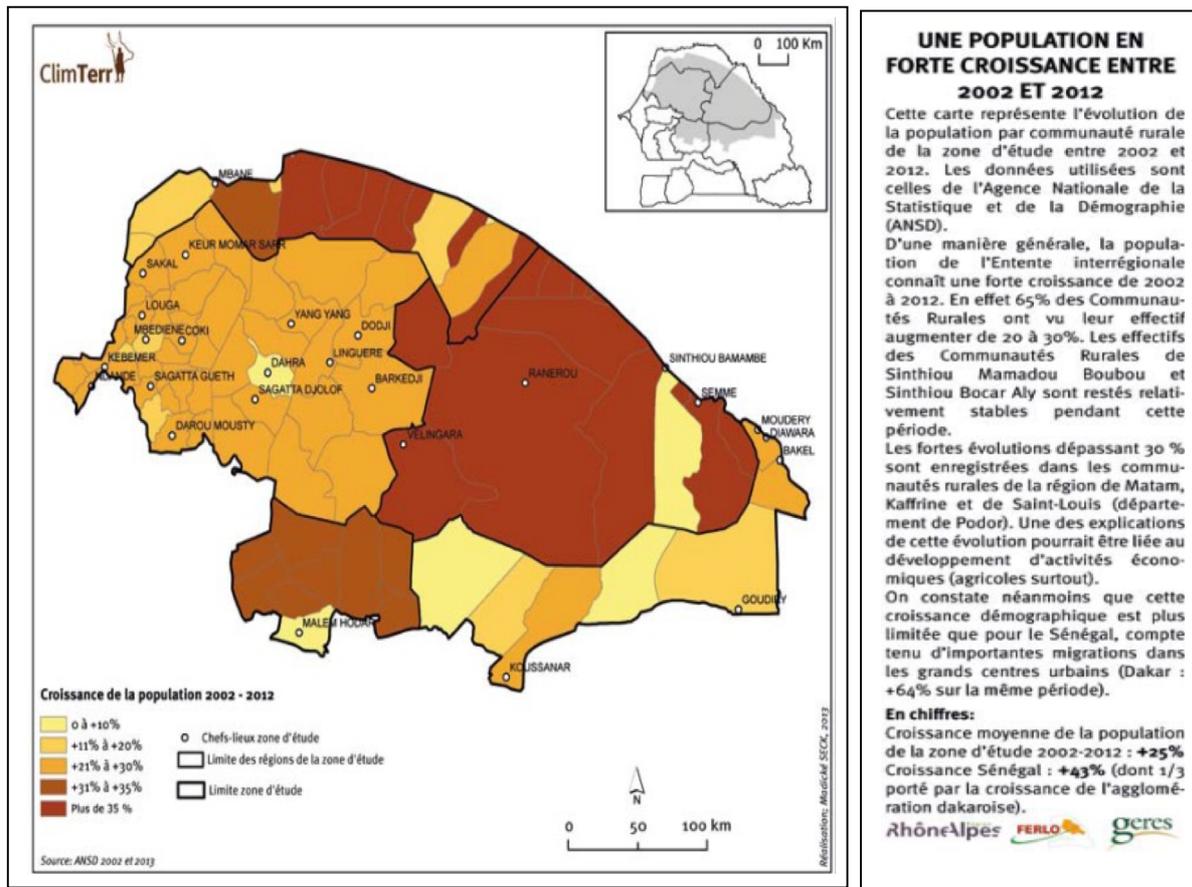


Annexe 2 Population et densité de population par communauté rurale en 2012



Source : GERES et Aal., 2013

Évolution population 2002-2012 :

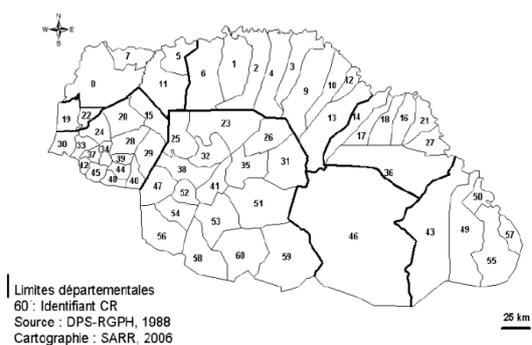


Source : GERES et Aal., 2013

Caractéristiques démographiques au Ferlo

Id.	Nom	Sup. (km ²)	Pop. 1988	Densité 1988 Hts/km ²	Pop. 2001	Densité 2001 Hts/km ²	Id.	Nom	Sup. (km ²)	Pop. 1988	Densité 1988 Hts/km ²	Pop. 2001	Densité 2001 Hts/km ²
1	Ndiayène	1387	13392	9,7	15816	11,4	32	Mberneukhé	693	3909	5,6	5328	7,7
2	Guede	1453	22079	15,2	16763	11,5	33	Ngeune Sarr	287	7109	24,8	6691	23,3
3	Dodel	1074	15273	14,2	14837	13,8	34	Niomré	219	9986	45,6	9079	41,5
4	Gamadji Sarré	1426	13896	9,7	13705	9,6	35	Dodji	957	5321	5,6	7064	7,4
5	Gae	690	13989	20,3	15535	22,5	36	Ogo	2860	25639	9	30510	10,7
6	Fanaye	1859	12390	6,7	13298	7,2	37	Nguidile	169	12114	71,8	10724	63,5
7	Rosso Sénégal	602	17308	28,7	24489	40,7	38	Kambe	873	7219	8,3	10866	12,4
8	Ross-Béthio	2538	33383	13,1	39007	15,4	39	Pete Ouarack	165	2824	17,1	2599	15,8
9	Aéra Lao	1902	19102	10	21555	11,3	40	Thiamène	293	10000	34,1	9613	32,8
10	Madina Ndiatbe	876	13828	15,8	15426	17,6	41	Ouarkhokh	634	9374	14,8	13125	20,7
11	Mbane	1506	18574	12,3	26091	17,3	42	Ke1 Gueye	116	6640	57,3	5975	51,5
12	Mboumba	333	9809	29,4	12426	37,3	43	Kanel	3857	21688	5,6	29325	7,6
13	Pete	1939	13571	7	12786	6,6	44	Coki	233	12191	52,4	10935	46,9
14	Galoya	867	13707	15,8	17989	20,7	45	Mbediène	258	8869	34,3	8100	31,4
15	Syer	777	3799	4,9	3272	4,2	46	Ranérou	10564	10224	1	16074	1,5
16	Thilogne	652	15317	23,5	17888	27,4	47	Bomal	813	6479	8	8914	11
17	Oréfondé	573	7537	13,2	9045	15,8	48	Ndiagne	211	10048	47,7	9633	45,7
18	Agnam Civo1	683	10270	15,1	10423	15,3	49	Sinthiou B.	2263	22204	9,8	30805	13,6
19	Gaudon	540	29568	54,7	34683	64,2	50	Orkadière	439	19058	43,4	24231	55,2
20	Keur M. Sarr	817	13090	16	12097	14,8	51	Barkedji	2059	9245	4,5	13338	6,5
21	Bokidiave	610	26049	42,7	34431	56,4	52	Dahra	395	22378	56,7	16425	41,6
22	Mpal	275	12134	44,1	14610	53,1	53	Thiargny	1155	4941	4,3	7815	6,8
23	Téssékéré	1767	3198	1,8	4179	2,4	54	Sagatta	639	8657	13,5	12502	19,6
24	Sakal	484	14653	30,3	13196	27,3	55	Semme	1768	15625	8,8	21176	12
25	Mboma	942	4470	4,7	6665	7,1	56	Dealy	1228	10103	8,2	15483	12,6
26	Labgar	938	3342	3,6	4505	4,8	57	Bokiladji	426	13351	31,4	16737	39,3
27	Nabadji	594	21747	36,6	30348	51,1	58	Gassane	1274	10838	8,5	17281	13,6
28	Nguer Malal	555	12341	22,2	11928	21,5	59	Vélingara	2495	5869	2,3	9111	3,7
29	Gaude	703	3901	5,5	3340	4,8	60	Thiel	1598	5435	3,4	8188	5,1
30	Léona	425	14286	33,6	12168	28,6							
31	Louguéré Th.	1385	2551	1,8	3555	2,6		TOTAL	70113	745892	10,6	873703	12,5

Source : SARR M., 2009



Annexe 3 :

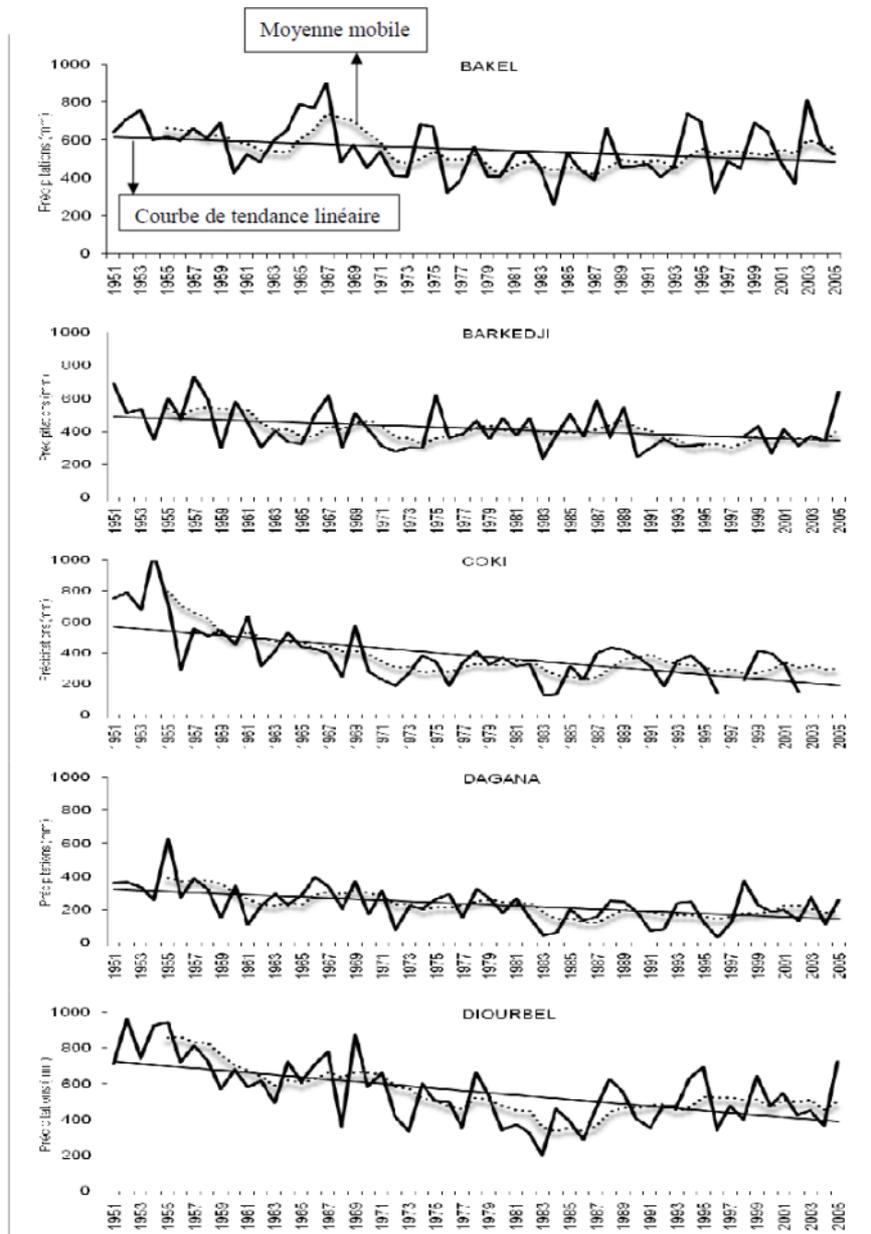


Figure 1 : Variations interannuelles de la pluie au Ferlo, courbe de tendance linéaire et moyenne mobile calculée sur 5 ans (1951-2005) (Sarr M. A., 2008)

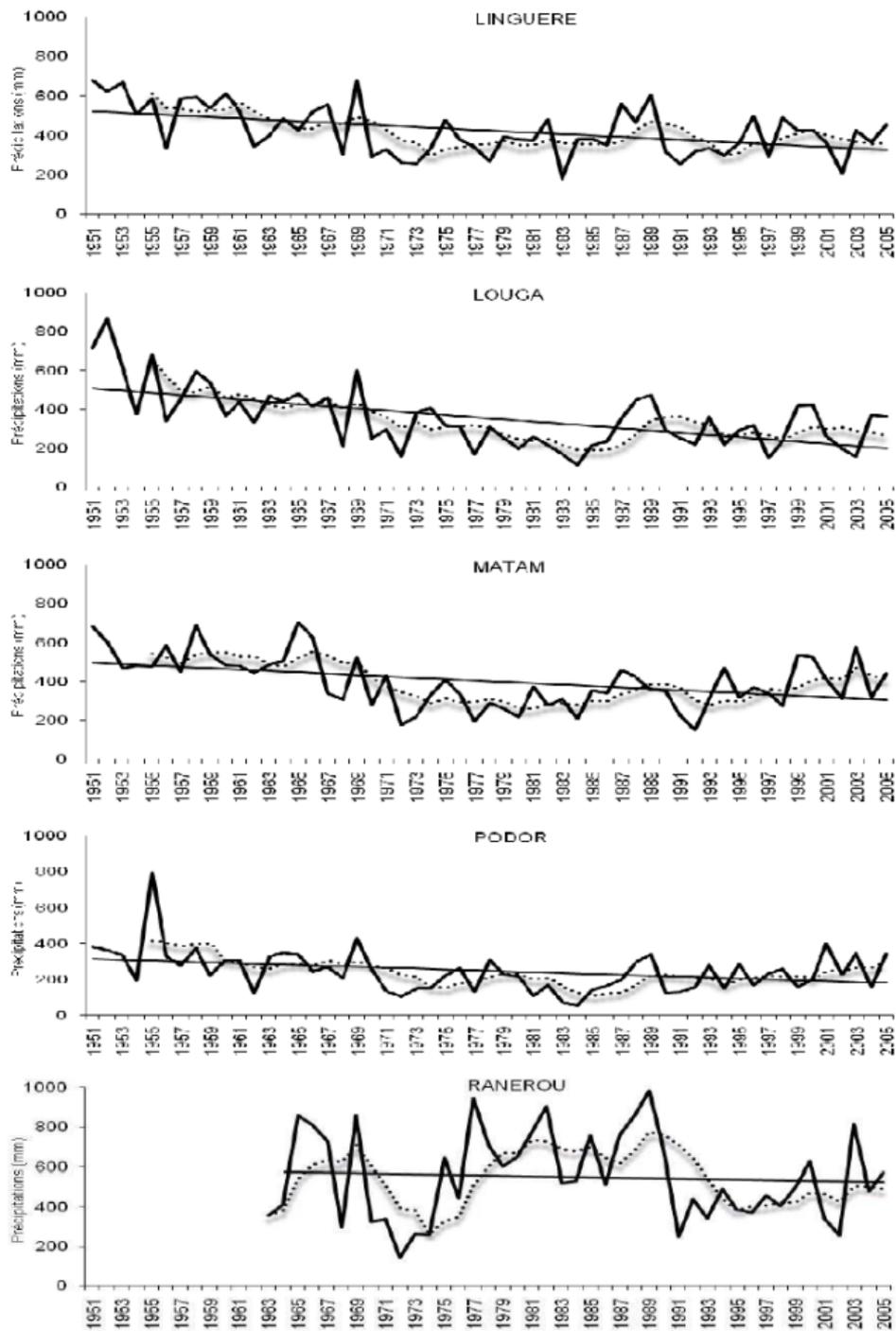


Figure 2 : Variations interannuelles de la pluie au Ferlo, courbe de tendance linéaire et moyenne mobile calculée sur 5 ans (1951-2005) (Sarr M. A., 2008)

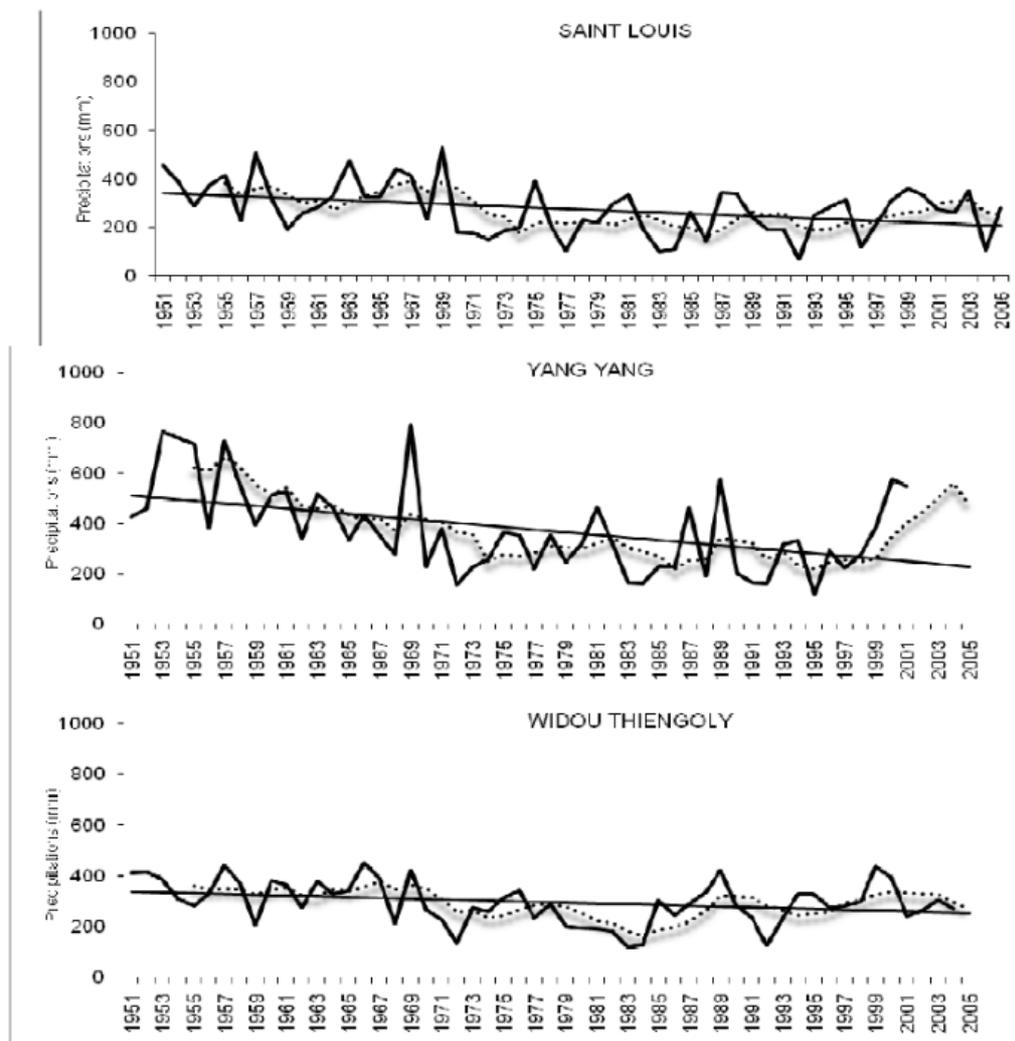
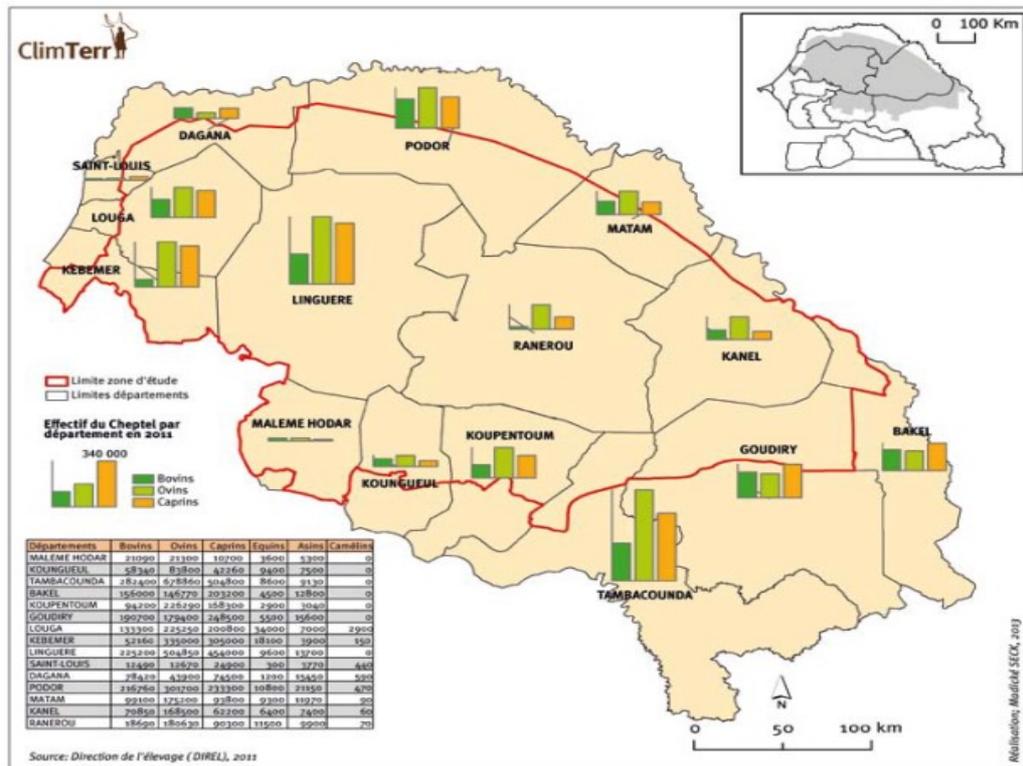


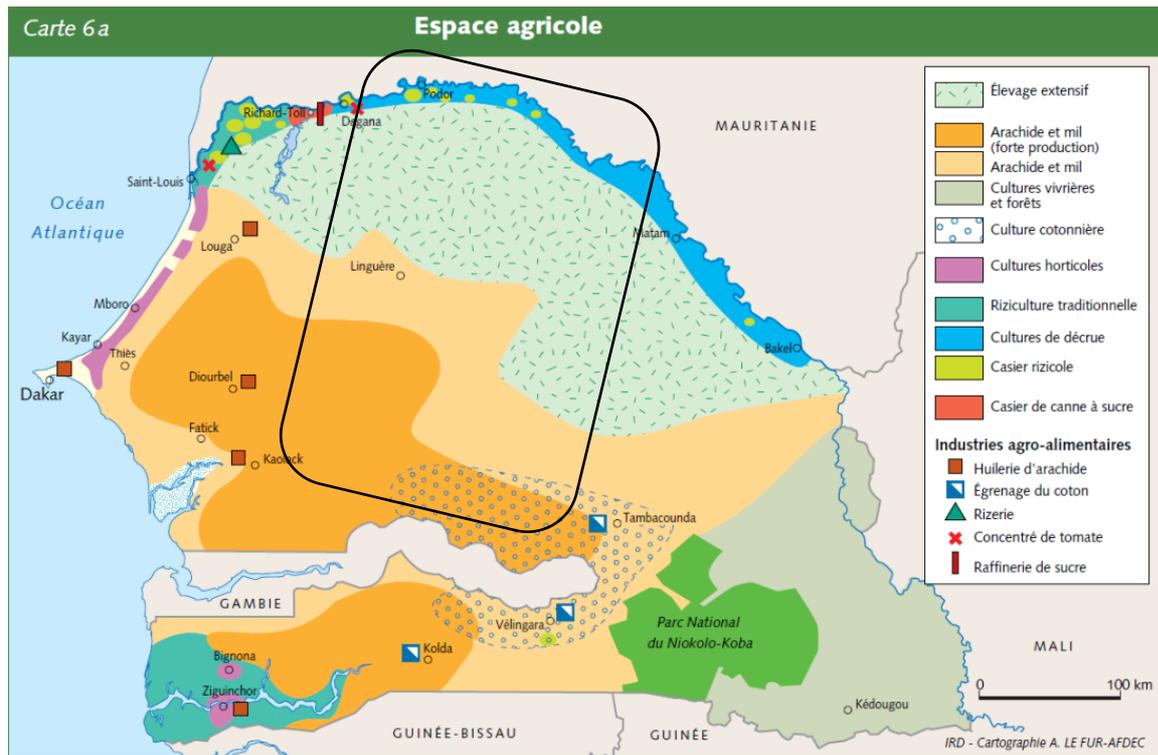
Figure 3 : Variations interannuelles de la pluie au Ferlo, courbe de tendance linéaire et moyenne mobile calculée sur 5 ans (1951-2005) (Sarr M. A., 2008)

Annexe 4 : Effectif du cheptel par département en 2011



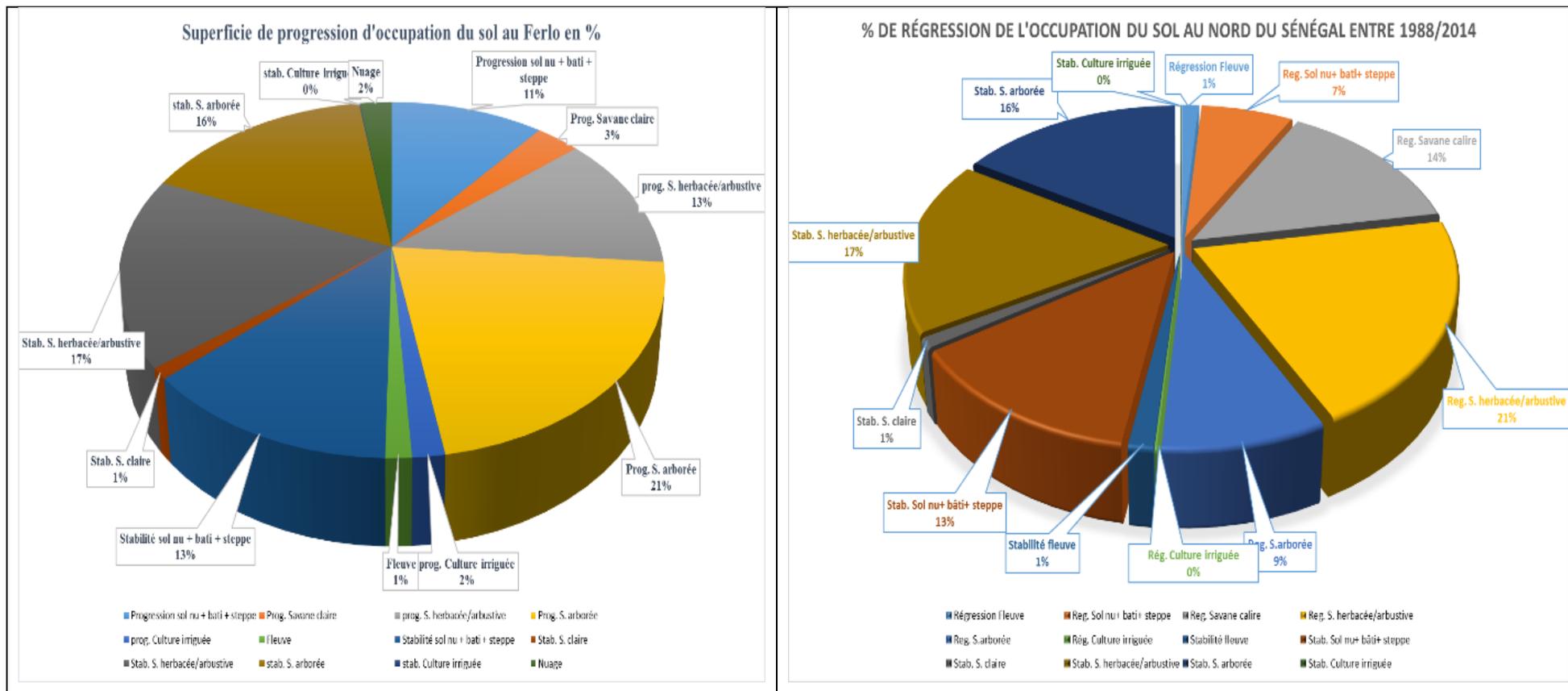
Source : GERES, 2013

Annexe 5 : Carte d'occupation du sol au Sénégal



Source : http://www.cartographie.ird.fr/SenegalFIG/senegal_pdf/Espace_agricole.pdf

Annexe 6 : % des superficies de progression et de régressions d'occupation du sol au nord du Sénégal



Annexe 7 : pourcentage des superficies de progression et de régression d'occupation du sol au centre du Sénégal

