UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

ECOLE DOCTORALE: SCIENCES DE LA VIE DE LA SANTE ET DE L'ENVIRONNEMENT (ED-SEV)

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNQIES

Année : 2018 **N° d'ordre : 14**

THESE DE DOCTORAT

EN ECOLOGIE - AGROFORESTERIE

Spécialité : Ecologie

Présentée par :

Taibou BA

DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DES ECOSYSTEMES DU BASSIN VERSANT DU FERLO (NORD-SENEGAL)

Soutenue publiquement le 20 janvier 2018 devant le jury composé de :

Président : M. Amadou Abdoul SOW, Professeur titulaire, FLSH/UCAD

Rapporteurs : MM. Paul Marie NDIAYE, Chargé d'enseignement, FLSH/UCAD
Mathieu GUEYE, Maître de recherche, IFAN/UCAD
Daouda NGOM, Maître de conférences, UASZ

Examinateurs : MM. Jean Luc PEIRY, Professeur Titulaire, UMI 3189/CNRS
Sékouna DIATTA, Maître assistant, FST/UCAD

Directeur de thèse : MM. Léonard Elie AKPO, Professeur Titulaire, FST/UCAD
Aliou GUISSE, Professeur Titulaire, FST/UCAD

DEDICACES

Je dédie ce travail de thèse

A notre père et à notre mère, qui nous ont quittés. Que leurs âmes reposent en paix ;

A mon Maître, feu Professeur Léonard Elie AKPO, décédé ce 18 décembre 2017, après avoir dirigé, corrigé, validé et choisi les rapporteurs et les autres membres du jury de la thèse. Que son âme repose en paix ;

A mon épouse pour l'amour et tous les sacrifices consentis pour le bon déroulement de ce travail ;

A mes enfants Ndeye Fatou, Amadou Moctar et Papa Bécaye;

A tous mes frères et sœurs ;

A mes beaux parents

A tous mes amis ;

A tous mes collègues du Centre de Suivi Ecologique de Dakar ;

A tous mes condisciples et amis de l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar ;

A tous ceux qui me sont chers.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, Professeur Léonard Elie AKPO, qui a bien voulu accepter d'encadrer ce travail de recherche avec abnégation et professionnalisme. Par sa rigueur scientifique et son exigence, il a guidé mes premiers pas dans la recherche depuis le DEA jusqu'à cette thèse, dans un esprit toujours marqué par la simplicité et la clarté. En dépit de multiples sollicitations, il a toujours su ménager du temps pour m'orienter dans les travaux scientifiques. Nous ne trouvons pas les mots justes pour lui témoigner notre profonde gratitude et reconnaissance pour tout le travail accompli. Mon seul regret est ne pouvoir avoir le privilège d'être devant lui pour défendre ce travail de thèse.

Je remercie profondément Monsieur Aliou GUISSE qui a bien voulu, suite au rappel à Dieu du Professeur AKPO, de prendre la direction de la thèse jusqu'à sa finalisation.

Mes remerciements vont également à l'endroit de Messieurs Paul Marie NDIAYE, Mathieu GUEYE et Daouda NGOM, pour avoir accepté de lire ce travail et de faire partie du jury. Votre disponibilité, vos conseils et orientations ont été très précieux pour moi dans l'accomplissement de ce travail

Je remercie Monsieur Amadou Abdoul SOW, pour avoir bien voulu étudier ce travail et présider le jury de soutenance.

Je remercie également Messiers Jean Luc PEIRY et Sékouna DIATTA, pour le jugement apporté sur le travail de thèse et d'avoir bien voulu participer au jury de soutenance malgré leurs agendas souvent chargés.

J'exprime ma profonde gratitude et ma reconnaissance à :

- Monsieur Assize TOURE, Directeur Général du Centre de Suivi Ecologique (CSE), pour m'avoir toujours encouragé à poursuivre des études et qui a soutenu cette thèse sur tous les plans ;

- Monsieur Amadou Moctar DIEYE, Directeur technique du CSE, pour son soutien et sa compréhension.

Je remercie fraternellement mon épouse Fatoumata Bintou DIOP et mes trois enfants pour l'amour, la joie de vivre et le courage qu'ils ne cessent de m'apporter.

Je tiens enfin à remercier tout le personnel du CSE ainsi que tous mes amis et condisciples pour leur appui et encouragement.

A tous les autres que nous n'avons pu citer ici, qu'ils veuillent tous trouver dans ce travail de thèse, l'expression de notre profonde gratitude et sympathie.

Sommaire

LISTE DES FIGURES vi
LISTE DES TABLEAUX vii
LISTE DES PHOTOS viii
ABSTRACT xi
RESUME xii
INRODUCTION GENERALE 1
Partie I : CADRE DE L'ETUDE 3
Chapitre I : SYNHTESE BIBLIOGRAPHIQUE 3
1.1 CLIMAT 4
1.2 SOL 5
1.3 RESSOURCES EN EAU 5
1.4 RESSOURCES VEGETALES 6
1.5 L'ELEVAGE 7
1.6 AUTRES PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES 9
Chapitre II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE 11
2.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE ET ADMINISTRATIVE 11
2.2 CARACTERISTIQUES BIOPHYSIQUES 12
2.2.1 Le relief, les sols et la géologie 12
2.2.2 Le climat et les ressources en eau 13
2.2.3 Les ressources végétales et fauniques 14
2.3 MILIEU HUMAIN 15
2.3.1 La Démographie 15
2.3.2 Les systèmes de production 15
Chapitre III : MARERIEL ET METHODES 17
3.1 CARTOGRAPHIE DES ECOSYSTEMES 17
3.1.1 Méthode de la cartographie des écosystèmes 18
3.1.2 Méthode de la mesure de la végétation 20
3.1.3 Méthode de cartographie des changements 21
3.1.4 Méthode d'application des critères de la Liste Rouge des Ecosystèmes 23

Partie II : VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DES ECOSYSTEMES DU BASSIN VERSANT DU FERLO 34
INTRODUCTION 34
Chapitre I : OCCUPATION DU SOL ET ETAT DES ECOSYSTEMES DU BASSIN VERSANT DU FERLO EN 1965 ET 2015 36
1.1 LES UNITES D'OCCUPATION DU SOL 36
1.2 VARIATION SPATIIALE DES ECOSYSEMES 37
1.2.1 Les écosystèmes naturels du Bassin versant du Ferlo 39
1.2.2 Les écosystèmes artificialisés du Bassin versant du Ferlo 43
Chapitre II : VARIATION TEMPORELLE DES ECOSYSTEMES DU BASSIN VERSANT DU FERLO .. 46
2.1 LES ECOSYSTEMES NATURELS 46
2.2 LES ECOSYSTEMES ARTIFICIALISES 47
Chapitre III : DISCUSSION ET CONCLUSION 48
3.1 DISCUSSION 48
3.2 CONCLUSION 50
Partie III: DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELEE DES ECOSYSTEMES DU BASSIN VERSANT DU FERLO 51
INTRODUCTION 51
Chapitre I : EVOLUTION DE L'ESPACE 52
1.1 CHANGEMENTS INTERVENUS ENTRE 1965 ET 2015 52
1.2 BILAN DES MODIFICATIONS ENTRE 1965 ET 2015 53
1.3 BILAN DES CONVERSIONS 1965 ET 2015 53
1.4 CONCLUSION 55
Chapitre II : SCENARIS D'EVOLUTION DES ECOSYSTEMES DANS LE BASSIN VERSANT DU FERLO 57
2.1 CARACTERISTIQUES BIOTIQUES 58
2.2 CARACTERISTIQUES ABIOTIQUES 58
2.3 DYNAMIQUE ET REPARTITION SPATIALE DES ECOSYSTEMES 59
2.4 PROCESSUS DE MENACES 61
2.5 ESSAI D'APPLICATION DES CRITERES 62
2.5.1 La forêt galerie 64
2.5.2 La savane boisée 67
2.5.3 La savane arborée 68
2.5.4 La savane arbustive à arborée 69

2.6 SYNTHESE DE L'APPLICATION DES CRITERES 71
Chapitre III : DISCUSSION ET CONCLUSION 73
3.1 DISCUSSION 73
3.1.1 Dynamique spatio-temporelle des écosystèmes 73
3.1.2 Application des critères de la Liste Rouge des écosystèmes menacés 75
3.2 CONCLUSION 76
Partie IV : DISCUSSION ET CONCLUSION GENERALES 77
Chapitre 1 : DISCUSSION GENERALE 77
1.1 LES ECOSYSTEMES DU BASSINN VERSANT DU FERLO (ETAT ET VARIATION SPATIO-TEMPORELLE) 77
1.2 DYANAMIQUE SPATIO-TEMPORELLES DES ECOSYSTEMES DU BASSIN VERSANT DU FERLO 77
1.3 DEVENIR DES ECOSYSTEMES DU BASSIN VERSANT DU FERLO SELON LES CRITERES DE LA LISTE ROUGE DES ECOSYSTEMES DE L'UICN 79
Chapitre 2 : CONCLUSION GENERALE ET PERPSPECTIVES 81
2.1 CONCLUSION GENERALE 81
2.2 PERSPECTIVES 81
ANNEXE 1*:* DEFINITION SOMMAIRE DES FORMATIONS VEGETALES CARTOGRAPHIEES xii
ANNEXE 2 *:* FICHE D'INVENTAIRE POUR LA VERIFICATION DE L'OCCUPATION DU SOL xiii
ANNEXE 3 : MATRICE DE TRANSITION ENTRE 1965 ET 2015 xv
ANNEXE 4 : VERSION 2 DES CRITERES POUR LA LISTE ROUGE DES ECOSYSTEMES (Keith et *al*, 2013) xvi
ANNEXE 5 : METHODE DE SUIVI DE LA VEGETATION PAR LE CSE xxi
ANNEXE 6 : ESPECES VEGETALES RECENCEES AU FERLO (CSE, 2013) xxv
RESUME xxviii

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Modèle numérique de terrain du Bassin versant du Ferlo (USGS, 2000) 3

Figure 2: Situation géographique du Bassin versant du Ferlo (Sénégal) 11

Figure 3: Répartition des sols dans le Bassin versant du Ferlo 12

Figure 4 : Répartition des sites de contrôle au sol au niveau des zones éco géographiques du Sénégal 17

Figure 5: Répartition des points de contrôle vérifiés sur le terrain 19

Figure 6: Représentation de la zone d'occurrence 24

Figure 7: Représentation de la zone d'occupation 25

Figure 8: Parcours contrastés de la dégradation environnementale ou biotique et leurs et leurs classifications de risque correspondantes d'après les critères C1, C2, D1, D2 (A) ou C3, D3 (B) : (a) dégradation au début largement répandue et relativement bénigne, qui augmente en sévérité, (b) la sévérité et l'étendue de la dégradation augmentent à des taux similaires, (c) dégradation localisée mais sévère, plus répandue par la suite (Keith et *al.,* 2013). 31

Figure 9: Occupation du sol du Bassin versant du Ferlo en 1965 36

Figure 10: Occupation du sol du Bassin versant du Ferlo en 2015 37

Figure 11: Les écosystèmes du Bassin versant du Ferlo en 1965 40

Figure 12: Les écosystèmes du Bassin versant du Ferlo en 2015 43

Figure 13: Bilan de la variation temporelle des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo entre 1965 et 2015 47

Figure 14: Changements dans l'occupation du sol du Bassin versant du Ferlo entre 1965 et 2015 52

Figure 15: Bilan des modifications des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo entre 1965 et 2015 53

Figure 16: Bilan des superficies converties des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo entre 1965 et 2015 54

Figure 17: Evolution des superficies des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo entre 1965 et 2015 59

Figure 18: Répartition spatiale des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo en a) 1965 et b) 2015 60

Figure 19: Mécanismes de l'effondrement des écosystèmes et symptômes du risque d'effondrement (Keith et al. 2013) 63

Figure 20: Structure des catégories de la Liste Rouge des Écosystèmes de l'UICN (Keith et al. 2013) 63

Figure 21: Distribution de la forêt galerie en 1965 et en 2015 dans le Bassin versant du Ferlo 64

Figure 22: Zone d'occurrence (rouge) et la zone d'occupation (jaune) de la forêt galerie 65

Figure 23: Zone d'occurrence (rouge) et la zone d'occupation (jaune) de la savane boisée 67

Figure 24: Zone d'occurrence (rouge) et la zone d'occupation (jaune) de la savane arborée... 69

Figure 25: Zone d'occurrence (rouge) et la zone d'occupation (jaune) de la savane arbustive à arborée 70

Figure 26: Statut des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo selon les critères e la Liste Rouge des Ecosystèmes 72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Liste des aires protégées du Bassin versant du Ferlo 14

Tableau 2: Données d'observation de la terre utilisées 17

Tableau 3: Exemple d'une matrice de transition (adapté de *Oloukoi, 2007*)..... 22

Tableau 4: Sous critères et seuils du critère A (Keith et *al., 2013*)..... 27

Tableau 5 : Sous critères et seuils du critère B (*Keith et al 2013*) 28

Tableau 6: Sous critères et seuils du critère C (Keith et al., 2013) 30

Tableau 7: Sous critères et seuils du critère D (Keith et al 2013)..... 32

Tableau 8: Sous critères et seuils du critère E (Keith et al 2013) 33

Tableau 9: Principaux écosystèmes du Sénégal (CSE, 2012)..... 35

Tableau 10: Classes et catégories d'occupation du Bassin versant du Ferlo 38

Tableau 11: Evolution des superficies de l'occupation du sol de du Bassin versant du Ferlo entre 1965 et 2015 46

Tableau 12: Répartition des superficies de l'occupation du sol du Bassin versant du Ferlo en 1965 et 2015 52

Tableau 13: Bilan des conversions des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo entre 1965 et 2015 54

Tableau 14: Evaluation des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo selon la version 2.0 des critères de la Liste Rouge des Ecosystèmes (Keith et al 2013)..... 71

Tableau 15: Matrice de transition entre 1965 et 2015 (les superficies sont en ha) xv

Tableau 16: Description des espèces végétales dans la partie Ferlo sableux sur le Bassin versant du Ferlo xxv

Tableau 17: Description des espèces végétales dans la partie Ferlo cuirassé sur le Bassin versant du Ferlo xxvi

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Forêt galerie relictuelle au niveau de la mare de Niakha (crédit photo : CSE, 2014) 39

Photo 2 : Savane boisée à Pt*erocarpus lucens* (crédit photo, CSE, 2014) 40

Photo 3: Savane arbustive à arborée au niveau du Ranch de Dolly (Crédit photo : CSE, 2015) 41

Photo 4 : Savane arbustive à Ndioum Gaint avec des traces de feux (crédit photo : CSE, 2015) 42

Photo 5 : Steppe arbustive à arborée à Labgar (crédit photo : CSE, 2014) 44

Photo 6 : Steppe arbustive à *Boscia senegalensis* à Tatki (crédit photo : CSE, 2014) 44

Photo 7 : Parc à *Sclerocarya birrea* à Touba Ndar FALL (crédit photo : CSE, 2014) 45

LISTE DES SIGLES ET ACCRONYMES

ARD : *Absolute rate of Decline*

BP : *Bofore present*

CADL : Centre d'Appui au Développement Local

CDB : Convention sur la Diversité Biologique

CNES : Centre National d'Etudes Spatiales

CSA : Comité Scientifique Africain

CSE : Centre de Suivi Ecologique

CR : Communauté rurale

DAPSA : Direction de l'Analyse et de la prévision des Statistiques Agricoles

DEA : Diplôme d'Etudes Approfondies

DPN : Direction des Parcs Nationaux

DSV : Direction des services vétérinaires

DT : Dégradation des terres

FAO : Organisation des nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

GDT : Gestion durable des terres

GPS : *Global Positioning System*

IEC : Information, Education, Communication

IPD : Institut Pasteur de Dakar

LADA : *Land Degradation Assessment in Dryland*

LCCS: *Land Cover Classification System*

LRE: Liste Rouge des Ecosystèmes

MEA: *Millennium Ecosystem Assessment*

OLAG : Office du lac de Guiers

PADAER : Programme d'Appui au Développement Agricole et à l'Entreprenariat Rural

PAFA-E : Projet d'Appui aux Filières Agricoles-Extension

PAN/LCD : Plan d'Action Nationale pour la Lutte contre la Désertification

PAPEL : Projet d'Appui à l'Elevage

PASA/LouMaKaf : Projet d'Appui à la Sécurité Alimentaire dans les régions de Louga, Matam et Kaffrine

PNAE : Plan National d'Action pour l'Environnement

PRAPS : Projet Régional d'Appui au Pastoralisme au Sahel

PRD : *Proportional Rate of Decline*

PREFERLO : Projet de remise en Eau du Ferlo

RNA : Régénération naturelle assistée

RSP : Réserve sylvo-pastorale

SCS : Site de contrôle au sol

SRTM : *Shuttle Radar Topography Mission*

SIG : Système d'information géographique

SPOT : Satellite pour l'Observation de la Terre
UBT : Unité Bétail Tropical
UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature
UP: Unité Pastorale
USGS: *United States Geological Survey*
UTM: *Universal Transverse Mercator*
WGS: *World Geodesic System*

Year: 2018

Title: Spatio-temporal Dynamic of the Ferlo Watershed Ecosystems (North-Senegal)

Author: **Taibou BA**

Nature: Memory of thesis

Option: Ecology

ABSTRACT

This study examined the dynamics of the Ferlo Watershed ecosystems between 1965 and 2015, over a period of 50 years, using remote sensing, geographic information systems and fieldwork. The main objective is to analyze the spatial and temporal dynamics of the ecosystems of the Ferlo catchment basin between 1965 and 2015 through the remote sensing and mapping method in order to evaluate the spatio-temporal mutations occurring in this medium and simulate the fate of these ecosystems by 2075. Analysis of the evolution of land use showed that 35% of the land remained in the original state (unchanged), 65% changes, and 7% converted. The modifications mainly concern areas of natural vegetation which have experienced a regressive evolution marked by a decrease in area of gallery forest, wooded savanna and wooded savanna, shrub savannah and steppe. Conversions affected mainly areas of natural vegetation. The growing areas have been extended mainly due to the conversion of areas of natural vegetation.

The results obtained indicate a regressive dynamic of the ecosystems of the Ferlo Watershed which has resulted in a modification of the structure of the landscape with a significant reduction in the quantity and quality of the vegetation cover. The application of the criteria of the List (Rodriguez and al., 2011) reports a disappearance towards the 2075 horizon, relics of gallery forest, wooded and wooded savannas, and an extension of crops zones.

Key words: ecosystem, remote sensing, evolution, transition matrix, Ferlo, Senegal.

Année : 2018

Titre : Dynamique Spatio-temporelle des Ecosystèmes du Bassin Versant du Ferlo (Nord-Sénégal)

Auteur : Taibou BA

Nature : Thèse de doctorat

Option : Ecologie

Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal)

RESUME

Cette étude a porté sur la dynamique des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo entre 1965 et 2015, soit sur une période de 50 ans, en utilisant la télédétection, les systèmes d'information géographique et les travaux de terrain. L'objectif principal est d'analyser la dynamique spatio-temporelle des écosystèmes du Bassin-versant du Ferlo entre 1965 et 2015 à travers la méthode de la télédétection et la cartographie afin d'évaluer les mutations spatio-temporelles intervenues au niveau de ce milieu et simuler le devenir de ces écosystèmes à l'horizon 2075. L'analyse de l'évolution de l'occupation du sol a montré que 35% des terres sont restées à l'état initial (sans changement), 65% ont subi des modifications, et 7% se sont converties. Les modifications concernent essentiellement les zones de végétation naturelle qui ont enregistré une évolution régressive marquée par une baisse de superficie de la forêt galerie, de la savane boisée et de la savane arborée, de la savane arbustive et de la steppe. Les conversions ont affecté principalement les zones de végétation naturelle. Les zones de culture ont connu une extension due principalement à la conversion des zones de végétation naturelle.

Les résultats obtenus indiquent une dynamique régressive des écosystèmes qui s'est traduite en une modification de la structure du paysage avec une réduction sensible de la quantité et de la qualité des couvertures végétales. L'application des critères de la Liste Rouge des écosystèmes (Rodriguez et Al, 2011) fait état d'une disparition vers l'horizon 2075, des reliques de forêt galerie, des savanes boisée et arborée, et d'une extension des zones agricoles.

Mots-clés : écosystème, télédétection, évolution, matrice de transition, Ferlo, Sénégal.

INRODUCTION GENERALE

Les dernières décennies sont fortement marquées par une dégradation de la biodiversité modifiant profondément les écosystèmes. 20 à 30% de la plupart des biomes terrestres évalués par le *Millennium Ecosystem Assessment* (2005a) ont été convertis à des usages humains.

Les ressources marines et côtières sont en danger, les forêts tropicales sont en train de disparaitre, les écosystèmes sahéliens s'appauvrissent…mais que faire ? Quel pourcentage de ces écosystèmes avons-nous déjà perdu ? Quel est le risque d'en perdre davantage ? Aussi fondamentales et importantes que sont ces questions pour la conservation de la biodiversité, la communauté mondiale n'a pas encore trouvé un moyen uniformisé d'y répondre. Cela signifie donc qu'il manque un système de référence pour promouvoir une gestion efficace des écosystèmes et assurer ainsi leur bonne santé, de plus en plus considérée comme crucial pour le bien-être humain, notamment pour la réduction des risques naturels et l'adaptation au changement climatique, comme cela a été souligné par l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (MEA, 2005) et l'Economie des écosystèmes et de la biodiversité (TEEB, 2010).

Bien que des politiques éclairées et efficaces puissent ralentir le processus de conversion des terres (Watson 2005), il n'existe pas de cadre permettant à la fois d'assurer le suivi de l'état des écosystèmes et identifier ceux ayant une forte probabilité de disparition ou de dégradation (Nicholson et *al.*, 2009).

La quête de solutions à la dégradation des écosystèmes passe d'abord par une meilleure compréhension du processus et surtout l'approfondissement de ses causes. Cela nécessite des outils efficaces d'identification et de suivi de ce phénomène utilisant des indicateurs ayant les capacités de révéler, après analyse dans un cadre consensuel et participatif, les changements et leurs causes affectant dans le temps et dans l'espace le milieu naturel et les populations. Dans le contexte d'un environnement dont les composantes sont interdépendantes, une approche intégrée d'investigation alliant, l'écologie, la télédétection et les travaux de terrain, devrait aider à comprendre les causes et le rythme de la dégradation des écosystèmes.

Ce travail a pour objectif d'étudier la dynamique des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo, et de procéder à des simulations sur le devenir de ces écosystèmes. De façon spécifique, il s'agit :

- d'identifier et de délimiter les différents écosystèmes du Bassin versant du Ferlo ;
- d'analyser la variation spatio-temporelle des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo sous l'effet combiné de la péjoration climatique et de l'action anthropique ;
- d'apprécier les modifications de ces écosystèmes aussi bien quantitativement que qualitativement et d'identifier ceux qui risquent de subir des changements réduisant leur capacité d'entretenir leur biote ;
- d'évaluer l'état des écosystèmes du Ferlo et de déterminer ceux pour lesquels la probabilité de perte, de dégradation ou de déclin fonctionnel est élevée.

La recherche que nous avons menée s'est fondée sur l'hypothèse suivante :

Les sécheresses récurrentes et l'intervention de l'homme au Sahel seraient à la base de la dégradation des écosystèmes, voire leur effondrement.

Pour vérifier ces hypothèses, nous allons poser un certain nombre de questions :

- Quel est l'état actuel des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo ?
- Quelle est la trajectoire suivie par les écosystèmes du Bassin versant du Ferlo sur une période de 50 ans (1965-2015)
- Quel est le statut et/ou le niveau de menace et devenir des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo ?

Le document est composé de quatre parties. La première présente le cadre de l'étude (synthèse bibliographique, zone d'étude, et les matériels et méthodes), la seconde met en évidence la variation spatiale et temporelle des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo. La troisième traite de la dynamique spatio-temporelle des écosystèmes du Bassin versant, la quatrième partie est consacrée à la discussion générale, suivie de la conclusion et des perspectives.

Partie I : CADRE DE L'ETUDE

Chapitre I : SYNHTESE BIBLIOGRAPHIQUE

Le Ferlo souvent appelé indistinctement et de manière confondue zone sylvo-pastorale ou encore « vallée du Ferlo » correspond à la zone sylvo-pastorale semi-aride du centre-nord du Sénégal. Il s'étend entre les latitudes 16°15 et 14°30 Nord et les longitudes 12°50 à 16° Ouest. Nombre de documents portant écrit sur cette zone prêtent au Ferlo des superficies qui varient de façon notoire : 56 269 km² (DEFCCS, 1999), 70 000 km² (CSE, 2002), 60 000 km² (Wane et *al.,* 2006), 25 000 à 30 000 km² (Thiam, 2008). Ces écarts de superficie montrent qu'il n'y a pas d'accord formel et de références sur les limites précises du Ferlo entre les chercheurs eux-mêmes et les pouvoirs publics. Toutefois, c'est la superficie de 70 000 km² qui revient le plus souvent.

Dans le cadre de cette recherche, nous avons choisi comme zone d'étude, le Bassin versant du Ferlo (43 669 km²) considéré comme un territoire relativement homogène de par ses caractéristiques hydrographiques, hydrologiques, géomorphologiques et écologiques. Cette délimitation du Bassin versant du Ferlo est dérivée de *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de l'USGS (figure 1).

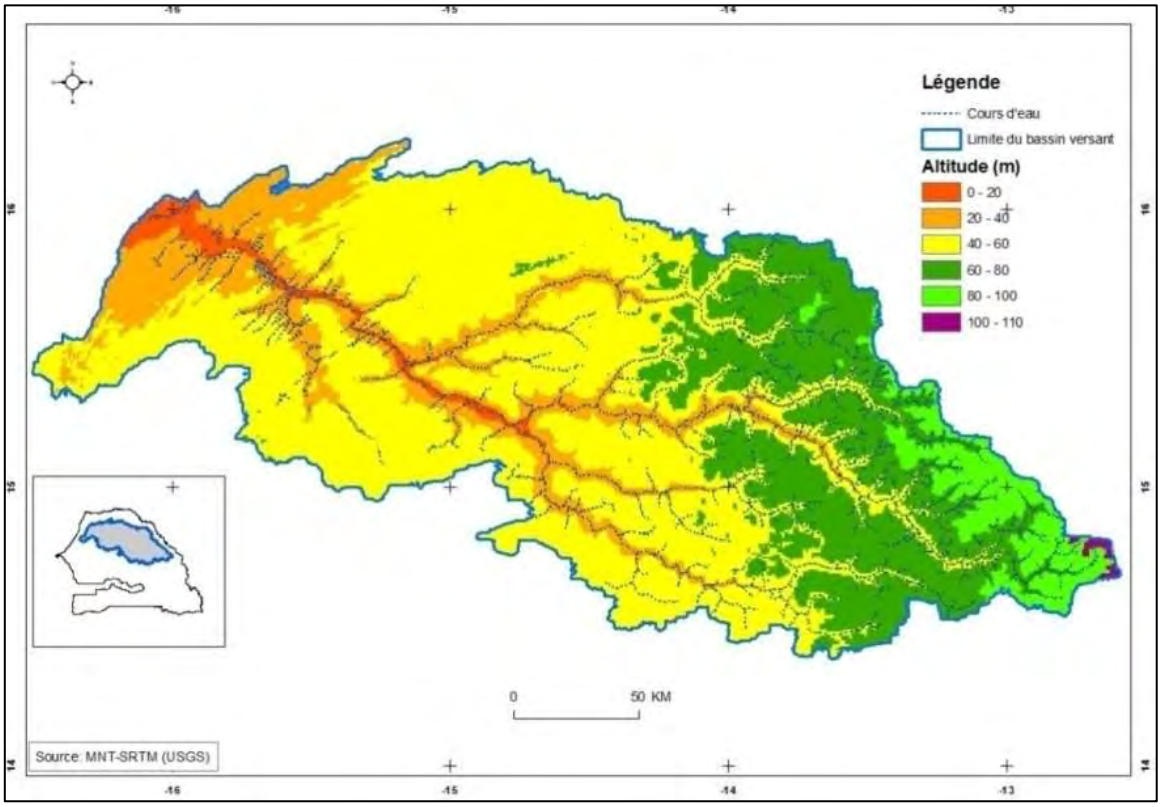


Figure 1: Modèle numérique de terrain du Bassin versant du Ferlo (USGS, 2000)

Cette région du Ferlo a fait l'objet de nombreuses études dans des domaines variés : Akpo, (1992) ; Akpo et *al*., (2000) ; Sagne (2002) ; Faye, (2005) ; Dièye, (1983) ; Ndione, (2002) ; Ndione, (2009) ; Niang, (2005) ; Sy (2010) ; Sarr, (2002) ; Broutin et Sokona,

(1992) ; Faye et *al.*, (2011) ; Diallo, (2008) ; Diop et *al.*, (2009) ; Diop Tarn-tir, (1989) ; Albergel et Dacosta , (1996) ; Sy, (2009) ; Wane et *al.*, (2011) ; Thiam, (2008); Guèye, (1999) ; (Diawara, 1984) ; Barral, (1982) ; Ndiaye, (2007) ; CSE, 1(991, 1992, 1996) ; CSE, (1987 à 2005) ; Sarr, (2009).

L'analyse des écrits sur le Ferlo permet de dégager plusieurs axes d'étude : le milieu physique de la zone, l'hydrographie et l'hydrogéologie, les ressources naturelles, l'élevage, les stratégies agropastorales, les systèmes de production ainsi que les paysages ruraux entre autres.

1.1 CLIMAT

L'une des thématiques les plus étudiées dans la zone est le climat notamment la variabilité pluviométrique. De nombreuses études (Hubert et *al.,* 1987, 1989 et 1998 ; Nicholson, 1993 ; Paturel et *al.,* 1997a et b ; Leroux, 1996 ; Toupet, 1996) sur l'évolution hydro-pluviométrique ont souligné l'extrême irrégularité de la pluviométrie dans la région du Sahel de manière générale, et elles ont mis en évidence la grande rupture climatique généralisée aux alentours de 1969-1970. La plupart de ces études se situent sur une échelle temporelle s'étalant du début des séries de mesure[1] jusqu'aux années 1990. Dans le Ferlo, le système de surveillance pour l'environnement mondial, a produit un document en 1987, faisant une analyse des données climatiques du Ferlo recueillies entre 1919 et 1985 par traitement statistique. Les résultats montrent une tendance à la baisse de la pluviométrie après 1949 mais nécessitent une interprétation prudente selon l'auteur. Dans la même lancée, Ndione (2002) faisant une étude similaire mais pour la période de 1951 à 2000, conclut dans son rapport à une dégradation des facteurs climatiques. Deux tendances se dégagent d'une part de 1951 à la fin des années 1960 où les valeurs sont supérieures à la normale et d'autre part du début des années 1970 à la fin des années 1990 où on note une péjoration de l'ensemble des paramètres climatiques étudiées. En effet, la dégradation climatique de l'observatoire ROSELT du Ferlo est lisible très nettement à travers l'analyse de la variabilité interannuelle de la pluviométrie grâce à l'indice pluviométrique de Nicholson, à l'écart moyen normalisé de la pluviométrie, à l'indice de saison de pluie, et à l'évolution de normales et des moyennes décennales. Tous ces indices montrent une persistance de la sécheresse avec ses différentes manifestations. La baisse de la pluviométrie est associée à une hausse constante et régulière de la température moyenne, de la vitesse du vent, et du déficit hydrique ; la tendance à la baisse de l'humidité relative est aussi importante. La conséquence immédiate de la péjoration climatique est que la zone est passée d'un environnement bioclimatique sec à humide à un environnement bioclimatique semi-aride et s'y est maintenu depuis 1971-1980.

Sarr (2008), à travers l'indice standardisé de précipitations des données pluviométriques enregistrées au niveau des stations de travail, déduit une situation majoritairement dominée par une sécheresse modérée et dans une moindre mesure une sécheresse forte.

[1] La station de Linguère a commencé à mesurer la pluviométrie à partir de 1934 (Le Borgne, 1988)

1.2 SOL

Plusieurs études ont abordé les sols du Ferlo : Maignien (1965) ; Leprun (1971); Bille (1977) ; Le Houerou (1989) ; CSE (2002). Ces études dégagent cinq grands ensembles de types de sol : les sols isohumiques, rouge brun subarides ; les sols ferrugineux tropicaux ; les régoslols (très peu évolués, constitués de regs) occupent toute la partie centrale de la région ; les lithosols, en revanche, sont situés dans le Ferlo oriental ; les sols hydromorphes comme leur nom l'indique recouvrent logiquement les anciennes terres des vallées fossiles du Ferlo. Sagne (2002) dans son rapport présentant les travaux du programme ROSELT/OSS, CSE portant sur la caractérisation du sol de l'Observatoire du Ferlo nous renseigne que les sols des divers sites de l'observatoire que sont Souilène, Widou Thiengoly et Linguère sont tous issus d'anciens ergs, donc des formations éoliennes reposant pour certaines sur des terrains du tertiaire et du quaternaire pour la grande majorité des autres sols de la zone. Il résulte de cette expertise que la dégradation du sol de l'observatoire du Ferlo est une réalité tangible qui trouve ses causes dans la péjoration des facteurs climatiques, le surpâturage, les feux de brousse.

1.3 RESSOURCES EN EAU

La mauvaise distribution de l'eau dans le temps et dans l'espace malgré sa présence en grande quantité et sous diverses formes d'une part, et d'autre part, l'importance de cette ressource pour la survie des activités du Ferlo, de l'élevage en l'occurrence expliquent en partie l'intérêt des chercheurs et décideurs à cette ressource. En effet le Bassin versant du Ferlo a une énorme potentialité hydrique qui dort dans son sous-sol. Le réseau hydrographique du Bassin versant du Ferlo est tributaire, d'une part de la configuration géologique et géomorphologique et d'autre part du régime et de la répartition de la pluviométrie. Ainsi, Diop (1984) fait l'inventaire des ressources en eau du Ferlo nord et observe leur évolution du point de vue quantitatif et les modifications écologiques qui peuvent en résulter. Il s'intéresse particulièrement aux eaux profondes avec leur exploitation par les ouvrages hydrauliques artificiels et les systèmes d'exhaure de plus en plus performants. Les ressources en eau sont assez diverses : les eaux de surfaces (le fleuve Sénégal, le lac de Guiers, les mares) ; les eaux souterraines provenant principalement de la nappe du maestrichtien. On note un nombre important de puits et de forages dans la zone. Le rôle structurant du forage a été bien mis en exergue. Diop et al.,(2009) reviennent sur les raisons qui ont suscité la création des forages à partir des années 1950 avec leurs effets structurants et conséquences sur l'organisation de l'espace. Ces auteurs estiment en outre que la dégradation de la strate ligneuse augmente à proximité des forages et que plus le forage est ancien, plus la réduction et la disparition des ligneux à proximité est sévère (Barral et *al.*, 1982). En 2001, le nombre total des ouvrages hydrauliques en zone sylvo-pastorale est environ de 169 (Anonyme, 2001). A proximité des forages, on note une auréole de désertification à cause des ligneux dispersés voire absents sur plusieurs centaines de mètres du fait de leurs utilisations multiples (combustibles, matériaux de construction, fourrage, etc.). Sy (2010) explique la vulnérabilité du développement de l'élevage dans le Ferlo par l'irrégularité de la disponibilité en eau, leur condition d'exploitation et d'aménagement. La variabilité spatio-temporelle des pluies en particulier et du climat sahélo-soudanien en général a des impacts sur le niveau de remplissage des mares qui jouent un grand rôle dans l'exploitation des parcours pastoraux. Globalement, les déficits notés au cours de ces 60 dernières années

montrent même une tendance à l'assèchement du Ferlo (indice d'aridité de sécheresse de 0,08 à 0,2 pour les stations de la région) et à l'appauvrissement de la diversité de sa production primaire. Albergel et Dacosta (1996), affirment que la maîtrise des eaux de surface est indissociable du développement économique et social. Pour ces auteurs, depuis quelques années, devant une certaine déception des performances économiques des grands périmètres irrigués, la petite et moyenne hydraulique devient la favorite des penseurs du développement rural. Les petits bassins des vallées fossiles au sud du fleuve Sénégal reposent essentiellement sur les sols qui sont très perméables. Du fait des pluies rares (pluviométrie annuelle entre 200 et 400 mm), aucun système d'observation des écoulements de surface n'y a été réalisé. De plus, l'importance des nappes souterraines suffit à la demande en eau d'une population très dispersée. Ainsi, l'aménagement de ce vaste territoire et les projets de sa remise en eau par le Sénégal devraient donc prendre en compte les écoulements locaux.

Si l'importance des forages dans la zone est chose certaine, celle accordée aux mares n'en demeure pas des moindres. Sy (2009) montre l'importance de la mare dans l'exploitation des potentialités d'un écosystème vulnérable et son rôle dans la prise en charge des conséquences des changements climatiques. Le Ferlo est le domaine de prédilection d'un élevage transhumant. Depuis quelques décennies, une tendance régressive des quantités de pluies dont dépend l'essentiel des activités productives (les pâturages et les ressources en eau notamment) y est notée. Les mares sont les lieux d'abreuvement des troupeaux durant la saison de pluie. La dynamique régressive d'une mare s'explique particulièrement par sa désaffection par le bétail, à côté de facteurs secondaires (sécheresse, ensablement, érosion éolienne et/ou hydrique, etc.). En effet, plus une mare est fréquentée par les animaux, plus elle se surcreuse, plus elle est durable. L'accessibilité et la gratuité de l'utilisation de son eau font de la mare un point d'eau très prisé par les populations locales. En saison des pluies, la mare, point d'abreuvement exclusif des animaux, demeure aussi la principale source d'alimentation de 79 % des populations (Sy, 2010). Malgré un maillage assez dense de la région en forages (un rayon de 15 km pour chaque forage), la mare continue d'être stratégique dans le système pastoral du Ferlo. Mais, la présence des mares n'est pas que bénéfice pour son milieu environnant. Ndione (2009) renseigne sur les gîtes larvaires pour les vecteurs (*Aedes vexans* et *Culex poicilipes*) de la fièvre de la vallée du Rift (FVR) qui prolifèrent autour des mares.

1.4 RESSOURCES VEGETALES

L'importance de l'élevage attribue aux ressources végétales une place non négligeable dans les recherches et études scientifiques dans la zone. L'étude de la végétation dans cette partie du Sénégal a débuté en 1940 par Trochain puis par Adams en 1953 (in Grosmaire, 1957). La cartographie des formations végétales a été faite en 1972 par Valenza et Diallo puis en 1985 par Tappan. Des prospections dans des zones plus réduites ont été menées par plusieurs auteurs parmi lesquels nous citons : Poupon (1980); Doyen (1983) et Diop (1987). En outre, on peut citer d'autres études telles celle de Bille (1977) qui, à Fété-Olé, au nord de la zone sylvo-pastorale, a recensé sur une parcelle de 25 hectares, lors du Programme Biologique International (PIB.), plus de 20 000 individus ligneux qui sont composés pour 97 % d'espèces de *Guiera senegalensis*, *Balanites aegyptiaca, Grewia bicolor, Commiphora africana, Boscia senegalensis, Acacia senegal.* Poupon (1980), dans ses travaux dans la partie septentrionale de la zone sylvopastorale, sur une surface d'un kilomètre carré

concernant la strate ligneuse, a recensé la prédominance *de Guiera senegalensis* (53 %), *Balanites aegyptiaca* (13 %), *Grewia bicolor* (10 %), *Commiphora africana* (10 %), *Acacia senegal* (7 %) et *Boscia senegalensis* (7 %). Sylla (1986) fait un état sur la situation des familles et des groupes végétaux. Selon lui, la flore est composée essentiellement d'herbacées dont 73 % de *Thérophyte*s alors que les 19 % des *Phanérophytes* sont des *Capparidacées* et des *Mimosacées* sans oublier l'existence rare de *Chaméphytes, d'Hémicryptophytes* et de *Géophytes*. Les travaux de Valenza et Diallo (1972) concernant les parcours naturels au nord du Sénégal distinguent sept types de formations végétales selon la nature du substrat. Diop (1989) fait le point sur l'évolution de ces ressources ligneuses, leur mode d'exploitation et dégage des perspectives de développement. Comme dans toutes les zones à vocation pastorale, les ressources ligneuses jouent un rôle important dans l'alimentation du cheptel et la satisfaction des besoins des populations du Ferlo. Ces ressources ligneuses connaissent depuis presque deux décennies, des modifications par suite des variations pluviométriques et des multiples interventions de l'homme. Faye et *al.,* (2011) ont observé le potentiel des données SCAT (ERS et ASCAT) pour la surveillance d'une zone sahélienne semi-aride, la vallée du Ferlo. Un suivi de la biomasse du Ferlo à partir de la télédétection radar (Faye, 2005) a révélé que la production primaire de cette zone n'est pas directement liée à la quantité de pluie annuelle. Des facteurs tels que la présence d'animaux ou d'insectes mais aussi les calamités naturelles peuvent affecter la production de biomasse. Niang (2005) soutient que, dans la communauté rurale de Ouarkhokh, les arbres épineux comme *Banalites aegytiaca, Acacia raddiana,* dominent. La strate herbacée regroupe près de 70% de la surface occupée par la flore. Dièye (1983) fait une étude quantitative et qualitative de la végétation du « Ferlo sablonneux ». Deux types de groupements de population végétale sont décrits : un groupement à *Combretum nigricans – Bombax costatum* qui correspond à une savane arborée localisée plus au sud de la région étudiée et des groupements végétaux à *Combretum glutinosum - Sclerocarya birrea* qui correspond à une steppe arbustive lâche colonisant les pentes de l'erg ancien et récent. La présence des ligneux semble davantage liée au facteur édaphique alors que la strate herbacée reste sensiblement la même du point de vue composition floristique.

1.5 L'ELEVAGE

Le Ferlo ou encore zone sylvo-pastorale fait partie des six régions éco-géographiques du Sénégal. Il est le lieu de prédilection de l'élevage qui, tout comme les parcours pastoraux ainsi que les marchés de bétail ont fait l'objet d'études. Les projets d'appui à l'élevage (PAPEL, PASA/LouMaKaf, PADAER, PAFA-E, PRAPS), interviennent dans la zone pour organiser la gestion des ressources naturelles à l'échelle des unités pastorales (UP), avec l'objectif affiché d'assurer le contrôle et la durabilité de cette activité. L'Unité Pastorale (UP) est un concept opérationnel de développement du sous-secteur de l'élevage au Sénégal. Il repose sur un morcellement du territoire exécuté autour de communautés socialement homogènes dans le but de conférer à celles-ci le privilège de l'exploitation de leur environnement direct (pâturages et points d'eau ; Kane et Dutrieux (1983). Wane (2011) soutient que la durabilité de l'élevage pastoral repose sur la diversité et la flexibilité des régimes de mobilité. Diawara (1984) nous fait part des différentes maladies qui ont affecté la population bovine durant cette période. Il s'agit de la peste bovine, la péripneumonie, du charbon bactérien, le charbon symptomatique, la pasteurellose bovine, la tuberculose entre autres. Ces maladies ont causé la baisse de

l'effectif du cheptel bovin dans les premières années concernées par l'étude ; qui s'est par la suite augmenté en rapport avec l'efficacité de ces méthodes de prophylaxie, bien qu'il y ait d'importants prélèvements durant la deuxième guerre pour le ravitaillement des troupes. Ce qui fait ressortir que la maladie était une des dominantes essentielles dans la vie du pasteur. Cependant, la peste bovine constituait la maladie la plus redoutée à cette époque. Il revient sur l'avènement des forages dans la zone. Pour lui, la présence des forages au Ferlo a non seulement entraîné une remise en cause des droits coutumiers, mais a aussi posé le problème de l'alimentation du bétail durant toute la saison sèche.

Pour l'ensemble de l'effectif bovin des parties limitrophes de la zone sylvo-pastorale d'avant l'avènement des forages, on notait une augmentation en nombre de 1912 à 1936, bien que dans certains endroits une baisse fut enregistrée comme dans le Djoloff où on avait 76 000 têtes en 1912 et 46 679 en 1936. Cependant, dans tous les cercles limitrophes de la zone sylvo-pastorale, la baisse puis stabilité de l'effectif bovin était remarquable durant la deuxième guerre mondiale ; laquelle baisse étant due à des prélèvements faits sur ce cheptel pour le ravitaillement des troupes.

La sécheresse enregistrée entre 1972-1973 a entraîné une baisse sensible de l'effectif du cheptel et par conséquent avait entraîné une modification de la composition du troupeau.

Sy (2009) aborde la transhumance transfrontalière qui est souvent source de conflits au Ferlo. Dans les zones fluviales, lacustres ou à forte activité agro-pastorale, la compétition pour l'accès aux ressources naturelles s'est accrue au cours des dernières années. Les heurts sont d'ailleurs fréquents, que ce soit entre différents acteurs d'une zone donnée, ou entre pasteurs transhumants et populations sédentaires, en dépit des dispositions prises par les pouvoirs publics. De surcroît, à la mobilité pastorale interne à la région s'ajoute la transhumance d'animaux venant de pays voisins. La surcharge pastorale qui en résulte aggrave les risques de conflit entre agriculteurs et transhumants étrangers, ainsi qu'entre pasteurs sénégalais et transhumants étrangers. Des textes législatifs réglementent pourtant l'entrée des animaux et leur déplacement sur le territoire sénégalais, mais ils sont mal appliqués, du fait notamment de la méconnaissance de ces textes ou du manque d'agents motivés. Les conflits transfrontaliers opposent des groupes pastoraux venant du Mali et de la Mauritanie, pays frontaliers du Sénégal, aux populations résidantes du Ferlo. Ils opposent aussi ces groupes pastoraux entre eux. De 1 bovin pour 100 ha au début du XX^{e} siècle, on est passé à 1 pour 24, puis 1 pour 9 ha, respectivement en 1975 et 1982. Parallèlement, les effectifs des petits ruminants doublaient pour chacune de ces périodes. Or des études expérimentales menées à Widou montrent que la charge normale devrait être de 1 UBT pour 10 ha (Diop, 2007). Les estimations faites dans les zones de forages étudiées confirment ces données et les diagnostics de pression croissante : l'ordre de grandeur de ces zones est d'environ 1 bovin pour 8,5ha.

Wane (2002), dans un article sur les marchés de bétail au Ferlo fait des observations sur les marchés de bétail de Dahra, Thieul, Rewane et Tatki (zone sylvopastorale du Sénégal). Il dévoile que les pasteurs du Ferlo s'y rendent de manière épisodique et limitée. Face aux incertitudes sur l'origine et la propriété du bétail, des règles tacites ont favorisé l'émergence d'acteurs devenus incontournables sur ces marchés (intermédiaires ou *téfankê*). Ils se substituent aux pasteurs en fournissant une garantie de signalement de leur qualité, sécurisent les conditions d'après-vente et assurent la fluidité des échanges. Quant aux pasteurs, essentiellement *price-taker* sur ces marchés, ils subissent la totalité des risques

commerciaux et de production. Les pasteurs du Ferlo utilisent principalement les marchés de bétail pour des motifs de consommation. Désireux de détenir des encaisses monétaires en vue de financer leurs dépenses de consommation courante (alimentation essentiellement), les pasteurs se rendent sur les marchés pour vendre des petits ruminants avec comme objectif, un nombre prédéterminé d'animaux à échanger.

Les pasteurs du Ferlo s'adressent aussi aux marchés de bétail pour des motifs de spéculation. Cette motivation intervient épisodiquement à l'occasion de certaines fêtes religieuses et de grands rassemblements confrériques. Des pics d'offres de bétail sont observables durant ces évènements. Diop et *al.*, (2009) font un focus sur la production laitière dans la zone sylvo-pastorale. Cette dernière connaît des variations interannuelles et intra-annuelles du fait que l'alimentation du cheptel est basée presque exclusivement sur les ressources naturelles. Les études menées à partir d'un dispositif de suivi dans les campements d'éleveurs et en station, et des données de la société Nestlé ont montré que la production laitière était fortement liée à la date de démarrage de la collecte, mais faiblement à la pluviométrie totale. Des enquêtes auprès de pasteurs (hommes et femmes) appartenant à différentes ethnies et résidant dans les différents sous-systèmes de production (Walo, Djoloff et Ferlo) ont indiqué que la durée de lactation, le nombre de vaches et les espèces animales ont constitué les principaux facteurs de variation de la production laitière. La production laitière en ZSP est en relation étroite avec la quantité d'eau que renferment les fourrages dans les pâturages naturels.

1.6 AUTRES PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

Sur un autre registre, le contexte d'incertitude qui s'est installé dans le Ferlo à cause des mauvaises conditions climatiques, d'une part et, d'autre part, l'avancée du front agricole font de plus en plus perdre à la zone son exclusivité pastorale. Thiam (2008), dans sa thèse sur les stratégies des exploitations agropastorales de Thieul (localité du Ferlo) rapporte que face à la rareté des ressources naturelles productives, ces populations se trouvent confrontées à une concurrence d'un genre nouveau : l'arrivée massive depuis le début des années 1990 de migrants agricoles.

Dans les exploitations de Thieul, la quête de moyens d'existence durable repose sur la diversification qui se mesure ici à travers trois dimensions : i) la diversification par les activités, ii) la diversification des ressources de production et iii) la diversification les innovations dans les systèmes de production. Ce travail met ainsi en exergue la diversité stratégique des comportements des exploitations agropastorales de Thieul face à un contexte d'incertitudes exacerbé sur les ressources naturelles productives.

Les terres agricoles sont, selon Thiam (2008), globalement jugées très importantes et qualitativement satisfaisantes. Leur importance se matérialise par le fait que la part des attributions de terres à usage agricole n'a cessé d'augmenter au détriment des zones pâturables. La ruée des pionniers agricoles et l'installation définitive des populations d'agropasteurs issues du Bassin arachidier expliquent ce phénomène. Ndiaye (2007) explique que la crise écologique qui sévit dans le Ferlo est due essentiellement à l'ampleur de la dégradation des terres agricoles liée à des pratiques culturales intenses favorisées par l'arrivée de colons mourides et de nouveaux paysans grâce à la remise en eau d'une partie du Bas-Ferlo ; de même que la concentration excessive du bétail dans un espace de plus en plus réduit autour des forages et de certaines mares. L'ambiguïté des règles de tenure

foncière demeure une source de conflits dans la Basse Vallée du Ferlo. Akpo (1992) a développé l'influence du couvert ligneux sur l'organisation spatiale, la structure spécifique et la productivité de la strate herbacée ; il a également traité les propriétés physico-chimiques du sol. Les difficultés d'accès à l'eau par le manque de couloirs de passage et la viabilité des parcours obligent à une plus grande mobilité pastorale pour minimiser les risques.

Chapitre II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

2.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE ET ADMINISTRATIVE

La vallée du Ferlo, située au nord du Sénégal entre les latitudes 14°30' et 16°10' nord et les longitudes 12°50' et 16°30' ouest, constitue le prolongement aval de la dépression occupée par le lac de Guiers au-delà de la digue en terre du village Keur Momar Sarr édifiée en 1957. A l'origine, le lac de Guiers faisait partie du réseau hydrographique du Ferlo. Il communiquait avec le fleuve Sénégal par l'intermédiaire d'un marigot sinueux : la Taoué. Dans ce milieu ouvert, crues et décrues de l'amont ou de l'aval engendraient le remplissage ou le déversement ; le mouvement des masses d'eaux (douces, saumâtres ou salées) était assujetti aux positions respectives des plans d'eau (fleuve, lac, vallée du Ferlo) et de l'ampleur de la pénétration des eaux océaniques dans le lit mineur du fleuve Sénégal. A l'échelle du millénaire Monteillet et *al.* (1981) (*in* Toguyni, 1986) situent la dernière incursion marine dans la vallée du Ferlo entre 1500 et 1800 ans B.P. soit, peu après le début de l'ère chrétienne. Au XX siècle, tous les auteurs se sont accordés pour positionner vers 1913, une importante remontée des eaux marines (HENRY, 1918 ; Hubert, 1921 ; Trochain, 1940 ; Grosmaire, 1957 et Brigaud, 1961) (*in* Toguyni, 1986).

La région du Ferlo s'étend sur une partie des régions administratives de Louga, Matam et Saint-Louis et couvre une superficie totale de 55 561 km², le Bassin versant occupant les 43 700 km² (Figure 2).

Figure 2: Situation géographique du Bassin versant du Ferlo (Sénégal)

2.2 CARACTERISTIQUES BIOPHYSIQUES

2.2.1 Le relief, les sols et la géologie

La géomorphologie du Bassin versant du Ferlo est surtout marquée par la présence de vastes plateaux dunaires entrecoupés par le réseau de la vallée du Ferlo et ses affluents. C'est un relief assez monotone. Les altitudes extrêmes sont de l'ordre de 50 m pour la limite supérieure et d'environ 10-15 m pour la limite inférieure au niveau des vastes plateaux (Diallo, 1995). Le plateau a été érodé par un ancien affluent du fleuve Sénégal, le Ferlo, qui a cessé de couler à la fin de la dernière période humide saharienne.

Les sols sont de type isohumique hydromorphes dans la vallée du Ferlo, sablo-argileux, gravillonnaires et à affleurements latéritiques (figure 3)

Sur la base du critère morpho-pédologique qui parait comme l'élément le plus déterminant de différenciation, le Ferlo se subdivise en trois sous zones (MEPN, 1999 *in* Ndiaye, 2007) à savoir :

- la sous zone du Ferlo nord sableux ;
- la sous zone du Ferlo est latéritique ;
- la sous zone du Ferlo sud sablo-argileux.

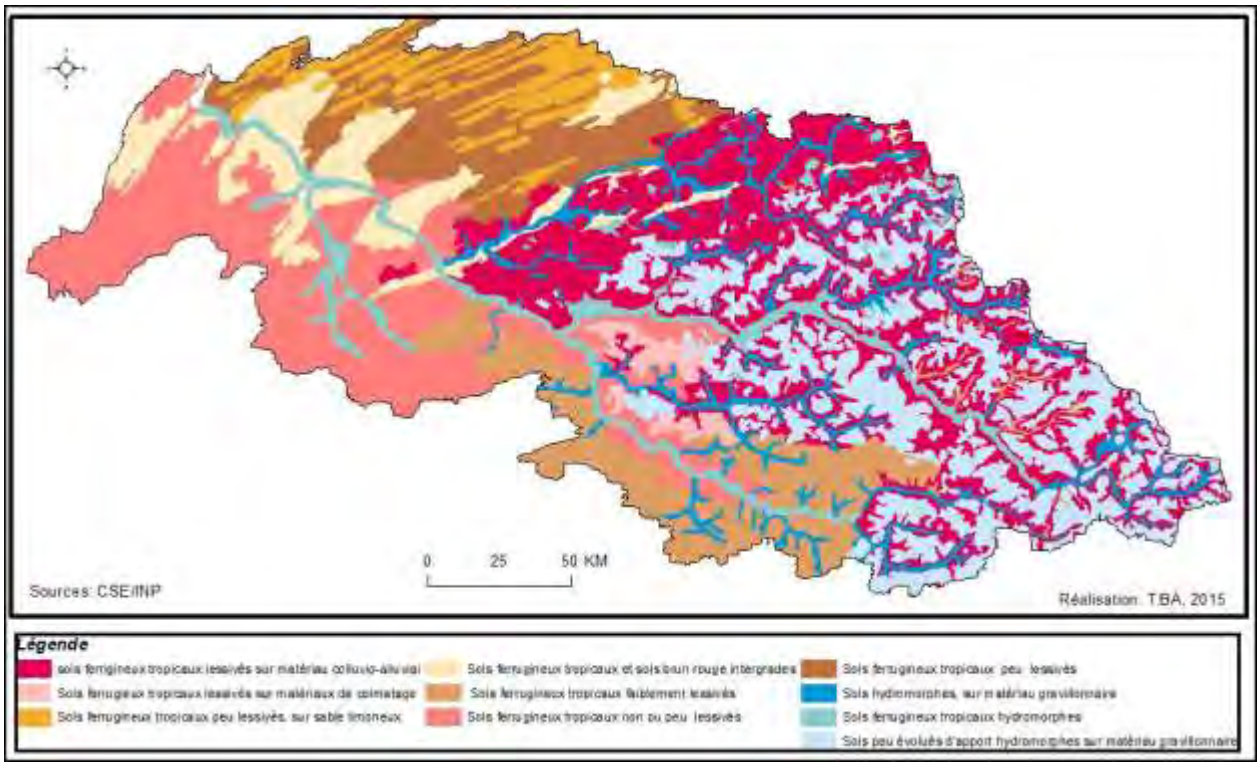


Figure 3: Répartition des sols dans le Bassin versant du Ferlo

La zone d'étude est située dans la partie occidentale du Bassin sénégalo-mauritanien. Ce Bassin s'est mis en place avec l'ouverture de l'Atlantique centrale au Jurassique. D'après les études antérieures (Ritz et Bellion, 1988 et Gladima-Sibi, 1997), il est d'âge Méso-Cénozoïque et repose sur un substratum d'âge Précambrien à Paléozoïque formé de granites et de roches métamorphiques.

2.2.2 Le climat et les ressources en eau

La région du Ferlo est soumise à un climat de type tropical sec. La durée des saisons est liée au mouvement du Front Intertropical (FIT) qui est la trace au sol de la ligne de contact entre l'air tropical humide maritime ou mousson venant du sud-ouest et les masses d'air continentales ou harmattan venant de l'Est et du Nord-est. Le tracé du FIT varie en fonction de l'activité des vents engendrés par les anticyclones des Açores centré sur l'Atlantique nord, de Sainte Hélène centré sur l'Atlantique sud, et Saharo libyen encore appelé haute pression du nord de l'Afrique

La saison des pluies a lieu de juin à octobre. Elle est caractérisée par de faibles précipitations (200 à 500 mm par an) avec un gradient nord-sud et une variabilité spatio-temporelle prononcée. Deux années sur trois, le mois d'août est le plus pluvieux de l'année. De faibles pluies, connues sous le nom de *Heug*, peuvent aussi être notées en saison sèche froide (Diop et *al.,* 2004).

La température moyenne annuelle est de 29,6 °C avec une amplitude moyenne annuelle de 7,6 °C. Le régime thermique se caractérise par une évolution bimodale, laissant apparaître deux températures maximales (mai et octobre) et deux minimales (janvier et août). La moyenne annuelle de l'humidité relative est de 47 % et elle est marquée par une évolution unimodale, avec un maximum intervenant au mois d'août (73 %) et un minimum au mois de février (29 %). La quantité d'eau mensuelle évaporée en zone sylvo-pastorale (station de Linguère) suit une variation bimodale similaire à celle de l'insolation et de la température. Elle est caractérisée par une hausse entre septembre et novembre, avec un maximum de 7,8 mm.j-1 (Diemé, 2003).

Du point de vue hydrologique, on note au Ferlo, la présence des nappes profondes appelées aquifères du Maestrichtien et de l'Éocène d'une part, et celles dites superficielles ou nappes du Continental terminal et du Quaternaire d'autre part (Michel, 1973). Les eaux superficielles de la région du Ferlo sont représentées par le lac de Guiers, une dépression naturelle peu profonde (2 à 3,5 m au nord et 1 à 1,5 m au sud couvrant 300 km² à son maximum d'extension) (Cogels et Gac, 1984). Il se prolonge dans la basse vallée du Ferlo et un réseau de points d'eau temporaires, constitue les mares de taille variable, aménagées ou naturelles localisées dans les bas-fonds des vallées. Si certaines ne sont en saison des pluies que des flaques d'eau de quelques dizaines de mètres carrés, d'autres peuvent s'étaler sur des hectares. La topographie de ces mares est en général très plate, et rares sont celles qui, même dans les années de bonne pluviométrie, présentent des fonds d'eau de plus de 1,50 m (Grosmaire, 1957).

Avant l'implantation des premiers forages au début des années 1950, les mares constituaient les seuls points d'abreuvement des populations et du cheptel pendant la saison des pluies. Les zones d'habitation étaient organisées, conditionnées même, autour d'une mare ou d'un système de mares. La richesse de la toponymie des populations locales (en majorité des Peuls) indique la diversité et la valeur pastorale de ces mares. Chacune d'elles porte un nom qui permet de la distinguer d'une autre et aussi de la caractériser selon son importance, la végétation qui l'entoure, les animaux particuliers qui la fréquentent, etc. Mais dès l'assèchement de ces mares, quelques semaines après les dernières pluies, la zone sylvo-pastorale se vide de sa population et de son cheptel (Barral, 1982).

Les déficits pluviométriques répétés ces dernières décennies n'ont pas épargné ces mares. Si certaines s'assèchent très tôt ou parfois n'ont pas d'eau, d'autres font l'objet de fréquentation par des populations avec leur troupeau qui ne respectent pas toujours les mesures de gestion pour une utilisation durable (Diop et *al*, 2004).

2.2.3 Les ressources végétales et fauniques

La végétation sahélienne apparait comme un ensemble de communautés complexes très variables dans le temps et dans l'espace. Leur évolution dépend étroitement des caractéristiques des précipitations dont la variabilité représente le facteur essentiel de la diversité floristique. (Akpo, Gaston, Grouzis, 1995).

La végétation du Ferlo se présente en fin de saison des pluies, à l'optimum de développement, sous la forme d'un tapis herbacé, plus ou moins continu, pouvant atteindre 50 cm à 1 m de hauteur, composé essentiellement d'espèces annuelles. Ce tapis est parsemé d'arbres et d'arbustes fréquemment épineux, ne formant jamais une strate continue (Akpo, 1992).

La strate herbacée du Bassin versant du Ferlo est principalement composée des espèces suivantes : *Schoenefeldia gracilis, Zornia glochidiata, Eragrostis tremula, Cassia obtusifolia, Cenchrus biflorus, Chloris prieurii, Dactylotenium aegyptium, Alysicarpus ovalifolius, Tephrosia purpurea, Pennisetum pedicellatum, Andropogon pseudapricus, Polycarpa linearifolia, , Schyzachyrium exile,* etc (CSE, 2013).

Les écosystèmes de la zone abritent des espèces ligneuses parmi lesquelles: *Acacia senegal, Guiera senegalensis, Balanites aegyptiaca, Combretum glutinosum, Faidherbia albida, Acacia raddiana, Boscia senegalensis, Ziziphus mauritiana, Pterocarpus lucens, Combretum nigricans, Mitragyna inermis, Grewia bicolor, Acacia adansonii, Adenium obesum.*

Le domaine classé est composé de 17 réserves sylvo-pastorales, 2 réserves de faune, 1 réserve de biosphère et 1 forêt classée (tableau 1) occupant une superficie de 21 570 km², soit presque la moitié de la superficie du Bassin versant du Ferlo. A cela, s'ajoute plus d'une cinquantaine d'unités pastorales mises en place par les projets et programmes nationaux de développement.

Tableau 1: Liste des aires protégées du Bassin versant du Ferlo

Nom	Statut	Superficie (ha)
Bouli Rewbé	Forêt classée	2324,29
Ferlo-Nord	Réserve de faune	451155,12
Ferlo-Sud	Réserve de faune	657496,96
Sagobé	Réserve Sylvo-pastorale	11983,31
Six forages	Réserve Sylvo-pastorale	377133,81
MPal-Meriguéne	Réserve Sylvo-pastorale	49111,90
LouguéréTioli	Réserve Sylvo-pastorale	188801,95
Kadar	Réserve Sylvo-pastorale	51689,36
Barkedji Dodji	Réserve Sylvo-pastorale	66284,76
Lambango	Réserve Sylvo-pastorale	5338,98
Boulal	Réserve Sylvo-pastorale	13537,65
Khogué	Réserve Sylvo-pastorale	17953,52
Déali	Réserve Sylvo-pastorale	12188,71

Nom	Statut	Superficie (ha)
Velingara	Réserve Sylvo-pastorale	47353,12
LindéSud	Réserve Sylvo-pastorale	21640,71
Yonoféré	Réserve Sylvo-pastorale	56655,71
Oldou Débokhol	Réserve Sylvo-pastorale	29932,18
Bem-Bem	Réserve Sylvo-pastorale	32131,73
Sab-Sabré	Réserve Sylvo-pastorale	61809,66
Doli	Réserve Sylvo-pastorale	2451,60
Total		**2156975,03**

La faune sauvage est très adaptée à l'écologie de la zone. Les mammifères sont représentés par divers groupes : les insectivores (hérissons), les Chiroptères (chauve-souris), les *Lagomorphes* (lièvres), les *Sciuromorphes* (écureuils), les Carnivores comme les Ratels (*Millivora*), le chat sauvage (*Felis libyca*), le chacal commun (*Canis aureus*), les *Myomorphes* ou rongeurs etc.

Cette zone est le domaine de la gazelle à front roux, des autruches à cou roux et des grandes outardes dont il n'en reste plus grand nombre surtout à cause du braconnage. Ce domaine est caractérisé par l'existence de zones amodiées à l'ouest du Lac de Guiers, de réserves sylvo-pastorales au centre et de deux grandes réserves de faune du Ferlo Nord et Sud à l'Est. Beaucoup d'espèces emblématiques y auraient vécu jusqu'à un passé récent : la gazelle dorcas, l'oryctérope, l'oryx algazelle, l'hippotrague, le guib harnaché, le lion, le léopard et même le buffle. Toutefois, les espèces les plus visibles sont maintenant le chacal, les hyènes, le singe rouge, le fennec et plusieurs petits carnivores. L"avifaune y est très riche avec la présence des gangas, les tourterelles, le francolin, la pintade, les grands et petits calaos, les innombrables petits oiseaux granivores et le gibier d'eau surtout vers le lac de Guiers et la rivière Ferlo (hérons, aigrettes, chevalier guignette, alouette, pélicans, spatule, oies, …). Pour les reptiles, il s'agit surtout de la tortue de terre, les varans du Nil et du désert (*Varanus niloticus, Varanus axanthematicus)*, les serpents et les lézards. Le cheptel (bovins, ovins, caprins et quelques dromadaires), la volaille, et les équins (chevaux et ânes) constituent les principaux animaux domestiques.

2.3 **MILIEU HUMAIN**

2.3.1 La Démographie

La population du Ferlo est estimée à 291 828 habitants en 1988, à 468 920 habitants en 2002 et à 603 204 habitants en 2013. La densité de la population de la zone sylvo-pastorale du Ferlo est très faible : 7 habitants au km² en 1988, 11 habitants au km² en 2002 et 13 habitants au km² en 2013. Dans cette zone, les systèmes de production, plus particulièrement le pastoralisme, déterminent la démographie sur le Bassin versant du Ferlo. Cette région compte plus d'éleveurs que toute autre région du pays.

2.3.2 Les systèmes de production

Les activités économiques dans la zone sont essentiellement structurées autour de l'élevage et subsidiairement de l'agriculture et du commerce.

2.3.2.1 L'élevage

Il est de type extensif et pastoral caractérisé par la mobilité et les conditions précaires des possibilités d'utilisation des pâturages naturels. Les peuhls vivent dans des campements regroupant 3 à 10 familles, souvent unies par des liens de parenté. Chaque famille dispose d'une concession particulière ; les cases sont disposées en cercle autour d'une cour, parfois délimitée par une palissade. (Pin-Diop, 2006). Autour du campement sont disposés les parcs, faits de branches d'arbustes épineux, où les troupeaux sont rassemblés pour la nuit. Le bétail est essentiellement constitué de zébus de race gobra, de moutons peul-peul et de chèvres sahéliennes. Les ânes et les chevaux sont utilisés comme moyen de transport (Le Houerou, 1988). Le bétail est géré en commun au sein du campement : partage des parcs de nuit, constitution de troupeaux de jour, gardiennage à la pâture.

La zone sylvo-pastorale est une zone à vocation essentiellement pastorale, la faiblesse et l'irrégularité des pluies (200-400 mm) y limitant les cultures sous pluie (pratiquées dans la zone jusqu'aux années 70). La zone compte de nombreuses réserves sylvo-pastorales. L'existence de forages permet une exploitation pastorale de la zone durant toute l'année. Du fait des effets conjugués de la faiblesse des précipitations et de la pression sur les ressources naturelles, le Ferlo a connu durant les dernières décennies une détérioration très nette de ses conditions écologiques. La zone comptait environ 15% du bétail national en UBT en 2013 et une moyenne de 17% sur la période 1997-2013. Le zébu Gobra, le mouton Peul-Peul et la chèvre du Sahel y sont les races les plus représentées.

Des programmes de création de points d'eau (puits, forages) ont permis de sédentariser les populations peulh généralement nomades. Malgré tout, la mobilité des troupeaux reste de rigueur dans les systèmes de production.

2.3.2.2L'agriculture

L'Agriculture dans cette zone est marquée par une dominance de l'élevage. Les cultures pratiquées sont l'arachide, le mil, le niébé et le maïs. Le maïs et l'arachide sont cultivés dans la partie sud de cette zone où la pluviométrie permet ces cultures avec des rendements acceptables. Les statistiques de la DAPSA montrent que les superficies cultivées dans le département de Linguère qui est le plus agricole de la zone sont passées de 62 496 ha en 1995 à 51 569 ha en 2013. Toutefois, les superficies de niébé ont connu une augmentation allant de 4025 ha en 1995 à 7213 ha en 2013. Les rendements sont faibles et très variables dans cette zone. L'agriculture y est donc caractérisée par les cultures de subsistance.

Chapitre III : MARERIEL ET METHODES

3.1 CARTOGRAPHIE DES ECOSYSTEMES

Pour la situation actuelle (2015), nous avons utilisé principalement des images satellitales Rapid Eye pour les besoins de la cartographie de l'occupation du sol avec cependant recours au besoin à d'autres types de données d'observation de la terre (tableau 2).

Pour la situation ancienne nous disposons de photographies aériennes CORONA (tableau 2) de la mission américaine de 1965 qui ont été déclassifiées et mises récemment à la disposition du Centre de Suivi Ecologique par *United States Geological Survey* (USGS). Les spécifications techniques de la mission CORONA ont été largement abordées par Tappan et *al.,* (2000).

Tableau 2: Données d'observation de la terre utilisées

TYPES	ECHELLE RESOLUTION	SOURCES	PROJECTION	DATE DE PRISE DE
Images satellitale Rapid Eye	5 m	Rapid Eye	UTM WGS 84	2013
Images satellitale ASTER	15 m	USGS	UTM WGS 84	2010
Images satellitale Spot	5 m	Spot XS +P	UTM WGS 84	2013
Images satellitale Landsat	20 m	Landsat ETM+	UTM WGS 84	2014-2015
Cartes topographiques	1/200 000	IGN/France	UTM WGS 84	2007
Photographie aérienne CORONA	5 m	Satellite militaire Corona (USGS)	UTM WGS 84	1965

Pour la végétation nous avons utilisé les données relatives à la production végétale à partir des sites de contrôle au sol (figure 4) mis en place par le Centre de Suivi Ecologique depuis 1987.

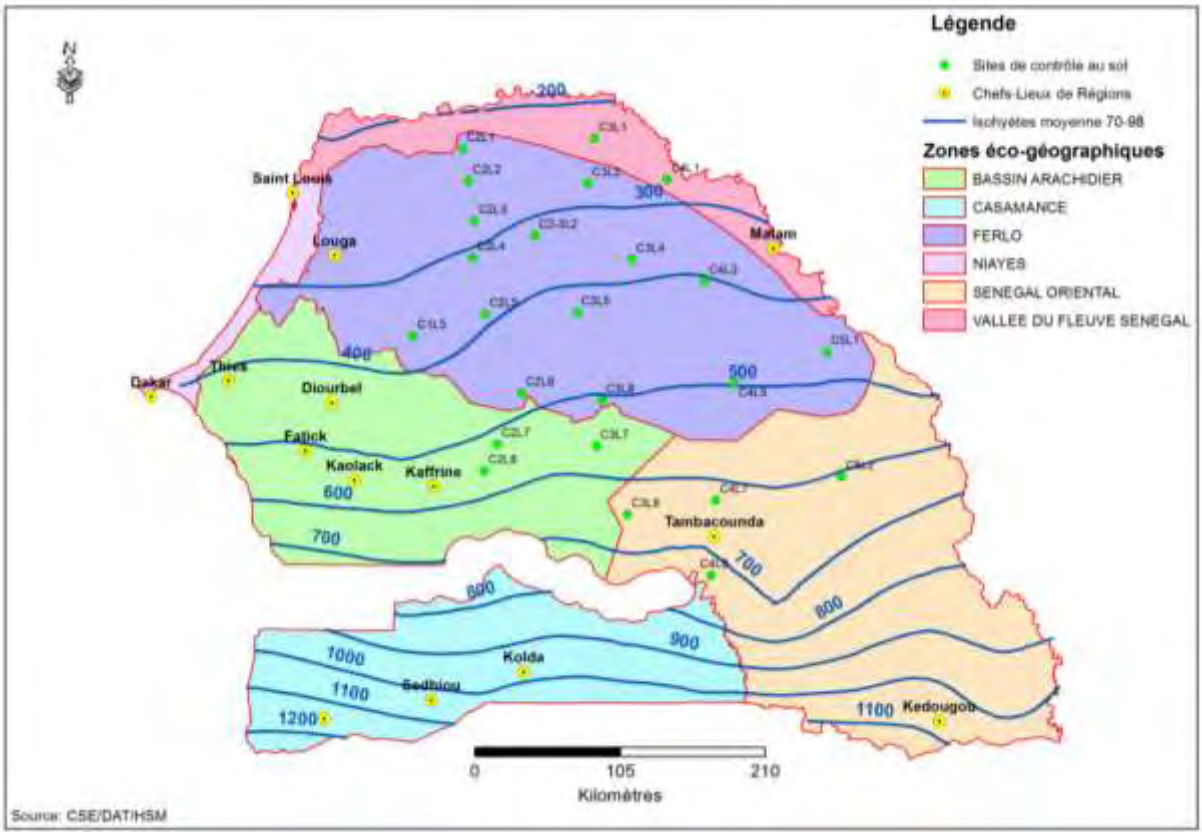


Figure 4 : Répartition des sites de contrôle au sol au niveau des zones éco géographiques du Sénégal

Ces données renseignent sur la quantité (production primaire) et la qualité (composition floristique) des fourrages disponibles au niveau des différentes zones éco-géographiques du Sénégal. Dans notre zone d'étude, nous avons recensé 13 sites qui font l'objet d'un inventaire chaque année depuis 1987. Ces informations nous ont permis d'apprécier la tendance générale de la végétation de 1987 à 2015 au niveau des différents écosystèmes du Bassin versant du Ferlo à travers l'estimation de la production herbacée et ligneuse selon les méthodes suivantes :

3.1.1 Méthode de la cartographie des écosystèmes

La méthode de la cartographie des écosystèmes utilisée dans cette étude est de type intégré s'appuyant sur la télédétection, le système d'information géographique, et les données de terrain (Ba, 2011). Ainsi les expériences suivantes ont été réalisées pour aboutir à la cartographie des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo.

3.1.1.1 Traitement des images

Les traitements suivants ont été appliqués à l'image :

- **l'assemblage des scènes** qui consiste à regrouper les différentes images et photographies qui couvrent la zone d'étude en une seule à travers la technique de la mosaïque ;

- **la rectification géométrique** qui consiste à ramener une prise de vue spatiale à une norme de coordonnées cartographiques. Dans le cas de cette étude, nous avons utilisé des images de référence tirées de la base de données du CSE pour effectuer un redressement « d'image à image ». Une attention particulière a été portée à la bonne répartition des points de contrôle à travers l'image. Ce redressement s'est fait selon la méthode de transformation polynomiale de premier ordre (OrdreI) qui correspond à une transformation linéaire qui modifie la position des points en X et/ou Y ; l'échelle en x et/ou y ; l'obliquité en x et/ou Y ; la rotation est de ce fait globale sur l'image ; c'est une transformation du type

  Xo = a0+a1x+a2y (1)
  Xo = b0+b1x+b2 (2)

  x et y : coordonnées originales (input)

  Xo et Yo : coordonnées rectifiées (output)

  L'image ainsi corrigée est dotée d'un système de coordonnées compatible avec celui des cartes topographiques et est directement exploitable sur le terrain. Pour rendre ces images conformes à la base de données, elles ont été projetées dans le système UTM et sur l'ellipsoïde WGS 84.

3.1.1.2 Interprétation des images et des photographies aériennes

Compte tenu de la diversité des thèmes à cartographier, de l'objectif final de l'étude (évolution de l'espace) et de l'échelle de sortie, nous avons procédé à une interprétation visuelle des images en nous appuyant sur la documentation (cartes, photographies aériennes, observations de terrain) et la signature spectrale des canaux de l'image pour délimiter les différentes classes d'occupation du sol. Cette photo-interprétation s'est faite

en se basant sur la physionomie de la végétation en utilisant la classification de Yangambi particulièrement adaptée à l'Afrique (Trochain*, 1957*). La définition des différentes formations végétales cartographiées figure dans l'annexe 1. Ensuite pour faciliter l'analyse les classes de végétation sont regroupées en 5 catégories que sont les zones de végétation naturelles, les zones de culture, les surfaces en eau, les zones artificialisées, et les zones nues.

Nous avons également procédé à la numérisation de certains éléments linéaires faisant partie de l'occupation du sol comme les voies de communications remarquables et les cours d'eau temporaires.

3.1.1.3 Travaux de terrain

Deux séjours de 10 jours chacun sur le terrain, respectivement du 01 au 10 octobre 2013 et du 05 au 15 mars 2015, ont permis de procéder à la vérification et à la validation des classes d'occupation du sol (fiche de terrain en annexe 2) de la carte actuelle établie à partir de l'image la plus récente (Rapid Eye de 2013). A cet effet des points de contrôle répartis et représentatifs de chaque classe d'occupation du sol ont été choisis et fait l'objet de vérification sur le terrain (figure 5). La confrontation de l'interprétation au bureau aux réalités de terrain, à partir du logiciel Erdas Imagine a donné en termes de précision de l'interprétation, un indice Kappa de 0,71. D'après Pontius (2000), une étude de l'occupation des terres peut être validée si l'indice de Kappa est compris entre 50 % et 75 %. Ces séjours sur le terrain ont permis de relever grâce au GPS (*Global Positioning System*) d'autres points de contrôle permettant d'affiner l'interprétation. Dans une seconde étape, nous avons interrogé les personnes ressources locales pour avoir une idée sur la dynamique de la zone d'étude.

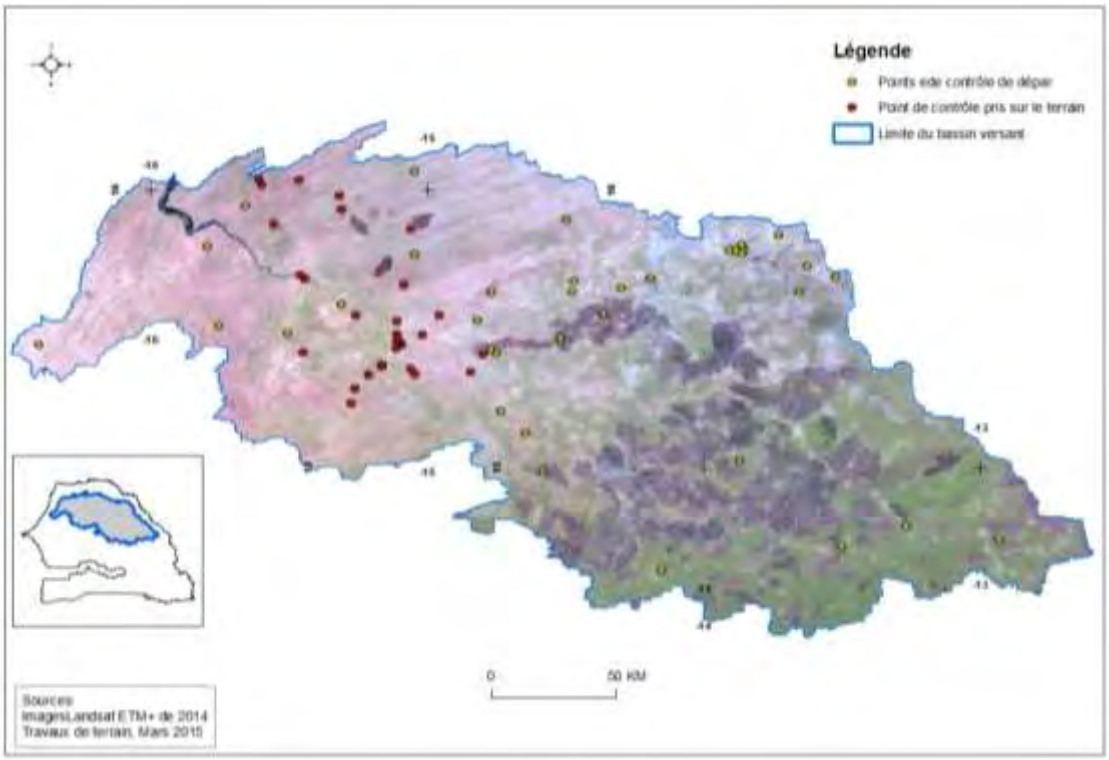


Figure 5: Répartition des points de contrôle vérifiés sur le terrain

3.1.2 Méthode de la mesure de la végétation

3.1.2.1 La production de biomasse herbacée (Diouf et *al.*, 1998)

Les mesures de biomasse épigée herbacée ont été faites pour chaque année à la fin de la saison de croissance végétale, vers mi-octobre. La technique de collecte utilisée est celle de la ligne d'échantillonnage stratifié, développée au Centre International Pour l'Elevage en Afrique (CIPEA) pour le suivi des écosystèmes pastoraux du Gourma malien (Diouf et *al.*, 1998). Sur un transect de 1000 m de long, la présence de quatre classes de densité (ou strates) est relevée. Cette étape nommée « stratification » consiste à noter mètre par mètre d'un côté de la ligne matérialisée par un ruban gradué, la fréquence des quatre classes (Tracol, 2004), chaque mètre étant coté par un niveau de production allant de 0 à 3 : la cote 0 correspondant au sol nu ; la cote 1, à une production relativement faible ; la cote 2, à une production moyenne ; et la cote 3, à une production relativement élevée. Parallèlement, 35 à 50 placettes d'un mètre carré sont choisies de manière aléatoire le long du transect en tenant compte de la variabilité des différentes strates. La biomasse présente dans chaque placette est coupée au ras du sol et pesée à l'aide d'une balance de précision. Après rééchantillonnage des différentes strates mises en tas séparés et mélangés, seuls trois échantillons d'environ 200 g de la matière fraîche de chaque site est ramenée en laboratoire et mise à l'étuve pendant 48 heures à 110°C en vue de l'obtention de la matière sèche. Le taux de matière sèche, obtenu en rapportant le poids sec de l'échantillon à son poids vert, est intégré dans les équations de calcul de la production herbacée. Pour une strate donnée, l'équation de calcul s'écrit sous la forme :

$$\mathbf{Ph = fr * pm * ms * 10} \qquad \mathbf{(3)}$$

Où Ph est la production herbacée par hectare de la strate, fr la fréquence relative, pm la moyenne des poids verts mesurés sur le terrain, ms le taux de matière sèche et 10 un facteur de conversion pour passer des g/m^2 aux kg/ha.

La somme des productions calculées pour les trois strates, faible, moyenne et élevée, donne la production herbacée du site correspondant.

3.1.2.2 La production de biomasse foliaire des espèces ligneuses (Diouf et *al.*, 1998)

L'échantillonnage de la production foliaire se fait de manière systématique à travers quatre placettes circulaires centrées sur les graduations 200, 400, 600 et 800 mètres sur le transect de mille mètres de long. La taille des placettes est définie en fonction de la densité du couvert végétal et varie en général entre 1 ha et 1/16 ha. Elle est généralement plus grande dans les formations ouvertes qui caractérisent le domaine sahélien type alors qu'elle est relativement réduite en domaine nord-soudanien ou soudanien où le couvert végétal est plus dense. A l'intérieur de ces placettes, les trois espèces les plus représentatives en nombre d'individus sont répertoriées. Pour chacune d'elle, dix branchettes sont défeuillées et la biomasse foliaire fraîche est pesée. Environ 200 g de cette masse foliaire sont mis à l'étuve pour le séchage, la détermination du poids sec équivalent aux dix branchettes et le calcul du taux de matière sèche.

La production primaire des ligneux d'un site donné, traduit la quantité de biomasse produite, y compris le bois, à l'hectare par les arbres et les arbustes de ce site. La

production primaire d'un individu (Pi) appartenant à une espèce donnée est obtenue grâce à une relation allométrique qui intègre sa circonférence. L'expression s'écrit :

$$\mathbf{Pi = a * Cb} \qquad \mathbf{(4)}$$

Avec a et b, deux constantes qui sont fonction de l'espèce considérée ; et C, la circonférence du tronc vivant.

Ainsi, la production primaire d'une espèce (Pe) dans les quatre placettes du site est donnée par la formule :

$$\mathbf{Pe = \sum Pi = \sum (a * Cb)} \qquad \mathbf{(5)}$$

L'expression de cette production primaire en production foliaire (Pf), soit sans le bois, utilisable par le bétail comme fourrage, se fait alors suivant la formule :

$$\mathbf{Pf = Pe * (Pve*Mse/Ps0) * f} \qquad \mathbf{(6)}$$

Avec Pve = Poids vert moyen de 10 branchettes de l'espèce, Mse = Taux de matière sèche calculé pour l'espèce, Ps0 = Poids sec moyen standard de 10 branchettes de l'espèce (Référence), f = fraction permettant d'avoir la production par hectare.

Finalement, la production foliaire d'un site est donnée par la somme de la production des trois espèces ligneuses inventoriées, et la production de biomasse totale par la somme de la production foliaire et de la production herbacée du même site.

3.1.3 Méthode de cartographie des changements

La méthode repose sur un croisement des deux couches d'occupation du sol des deux années (1965 et 2015) pour obtenir d'une part une matrice de transition permettant de quantifier les changements, et d'autre part la carte qui permet de localiser dans l'espace les changements.

Pour y arriver nous avons d'abord procédé au redressement et à la rectification des photographies aériennes en prenant comme référence les images Rapid Eye de 2013. Il importe de noter que, compte tenu des distorsions notées sur les photographies Corona, et la difficulté de retrouver des points de calages, nous n'avons pas procédé à la mosaïque de ces dernières pour obtenir une seule image comme ce fut le cas pour les images actuelles. L'option retenue a été d'interpréter ces photographies bande par bande.

Ainsi la couche de l'occupation du sol issue de l'interprétation des photographies corona est croisée à celle issue de l'année 2015 pour obtenir une couche (*shapefile* ou fichier de forme) résultante (classification croisée) et une matrice des changements (matrice de transition). La couche résultante fournit pour chaque année la classe dans l'année la plus ancienne ainsi que la classe dans l'année la plus récente. La matrice de transition (tableau 3) indique pour chaque classe la superficie pour l'année la plus ancienne qui est restée dans la même classe ou qui est passée dans une autre classe ; Cette méthodologie s'inspire de celle utilisée par Oloukoi et *al* (2007) dans le département des collines au Bénin. Ainsi l'analyse de la dynamique des écosystèmes a été faite à partir du calcul du taux moyen annuel d'expansion spatiale. L'une des formules appliquées pour mesurer la croissance des agrégats macroéconomiques entre deux périodes données (Bernier, 1992), a été utilisée. La variable considérée ici est la superficie (S). Ainsi, pour **S1** et **S2**, correspondant

respectivement à la superficie d'une catégorie d'occupation des terres en 1965 et en 2015, le taux d'expansion spatiale moyen annuel **T**, est évalué à partir de la formule suivante :

$$\mathbf{T = ((\ln S2 - \ln S1))/(t \ln e)\ x100} \quad (7)$$

Où : t est le nombre d'années d'évolution ;

ln le logarithme népérien ;
e la base des logarithmes népériens (e = 2,71828).

Tableau 3: Exemple d'une matrice de transition (adapté de *Oloukoi, 2007*)

Catégorie i au temps t0	Catégorie j au temps t1			Sommes Eit0 des lignes
	Catégorie 1 (j = 1)	Catégorie 2(j = 2)	Catégorie 3 (j = 3)	
Catégorie 1 (i = 1)	a(1,1)	a(1,2)	a(1,3)	Σ a (1, j), j = 1,n
Catégorie 2 (i = 2)	a(2,1)	a(2,2)	a(2,3)	Σ a (2, j), j = 1,n
Catégorie 3 (i = 3)	a(3,1)	a(3,2)	a(3,3)	Σ a (3, j), j = 1,n
Sommes Ejt1 des colonnes	Σ a (i, 1), i = 1, m (E1t1)	Σ a (i, 2), i = 1, m (E2t1)	Σ a (i, 3), i = 1, m (E3t1)	ΣΣ a (i.j), i = 1, m J = 1, n

Le nombre n de colonnes de la matrice représente le nombre de classes d'occupation du sol au temps t1. Le nombre m de lignes de la matrice correspond au nombre de classes d'occupation du sol au temps t0. De ce fait, il est à noter que m = n parce qu'au temps t1 il n'y a pas de nouvelles formes ou classes d'occupation du sol par rapport au temps t0.

La case a (i, j) de la matrice représente la superficie d'une classe i d'occupation du sol au temps t0, convertie à une catégorie j au temps t1. Les changements se font donc de la ligne i vers la colonne j.

Pour cette présente étude, les superficies ont été calculées à partir d'un tableau croisé des superficies des deux couches d'occupation du sol (1965 et 2015) en utilisant la commande *Tabulate area* qui se trouve de l'extension *Spatal Analyse Tools* de la boite à outils (*Arc Toolbox*) du logiciel ArcGis. La superficie, provenant du croisement de deux classes d'occupation du sol, a été reportée dans les cellules de la matrice. En référence au principe des automates cellulaires, nous considérons que les valeurs a (i, j) sont obtenues sur la base de l'addition de toutes les cellules élémentaires ayant passé de l'état i à l'état j.

Par ailleurs, pour faire ressortir les changements temporels, trois cas ont été distingués (Ba, 2011) :

- état initial : le mode d'occupation de l'espace est resté le même entre les deux années ;

- modification : le mode d'occupation de l'espace a changé d'une classe à l'autre, mais en restant dans la même catégorie (exemple : savane boisée qui devient steppe arborée) ;

- conversion : le mode d'occupation de l'espace d'une classe est passée à une autre classe dans une catégorie différente (exemple : Steppe arbustive qui devient culture).

Dans l'analyse de la matrice de transition, on considère par exemple que si i ou j = 1 correspond à la savane arbustive et si i ou j = 2 correspond à la savane arborée, alors la cellule a (2,1) représente la superficie de la savane arborée, qui a été modifiée en savane arbustive entre les dates t0 et t1.

Les cellules a (i, i) de la diagonale correspondent à la superficie des zones qui sont restées à l'état initial (le mode d'occupation de l'espace est resté le même entre les deux dates) entre les dates t0 et t1. La somme Eit0 = Σ a (i, j), j = 1,n de la ligne i représente la superficie totale de la classe i d'occupation du sol au temps t0. La somme Ejt1 = Σ a (i, j), i = 1,m de la colonne j représente la superficie totale de la classe j d'occupation du sol au temps t1.

Le facteur de conversion Ci de la catégorie i correspond à la somme des changements d'une classe i vers d'autres classes : Ci = (SLi – a (i, i) / SLi où SLi est la somme de la ligne i.

Les éléments qui sont en dehors de la diagonale représentent les changements d'occupation du sol qui peuvent être soit des modifications soit des conversions. Par conséquent, ce sont ces valeurs qui expliquent les changements de flux de matière organique observés dans le paysage.

3.1.4 Méthode d'application des critères de la Liste Rouge des Ecosystèmes

L'évaluation des écosystèmes selon les critères de la liste rouge de l'UICN doit se faire avec des données fiables, et quantifiables, mais aussi avec des informations pouvant aider à la caractérisation biophysique de l'écosystème.

Nous avons utilisé les résultats issus de la cartographie diachronique des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo. Il s'agit de :

- la couche d'occupation du sol du Bassin versant du Ferlo en 1965 obtenue à partir de l'interprétation des photographies aériennes Corona de la mission américaine ;
- la couches d'occupation du sol du Bassin versant du Ferlo en 2015 issue de l'interprétation des images satellitales Rapid Eye de 2013, validée sur le terrain en 2015 ;
- les statistiques issues des deux produits et de leur croisement (tableaux 5, 6 et 7).

Nous avons également utilisé les informations relatives à la caractérisation biophysique et au processus d'évolution des écosystèmes ciblés.

La méthode utilisée dans ce chapitre est celle décrite dans les lignes directrices pour l'application des critères et catégories de la Liste Rouge des Écosystèmes de l'UICN (*L.M. Bland et al., 2016*).

3.1.4.1 Définition des termes

Les termes utilisés sont définis dans le guide de l'UICN ; les détails sont à l'annexe 4 du document.

- **Ecosystème**

Les écosystèmes représentent des ensembles d'organismes et de leur environnement physique associé au sein d'une aire géographique (*Tansley, 1935*). Ils sont composés de quatre éléments essentiels : un complexe biotique, un environnement abiotique, les interactions mutuelles entre et au sein de ces complexes et un espace physique dans lequel ils opèrent (*Pickett et Cadenasso,* 1995). Un écosystème est donc un complexe fait d'organismes vivants, de leurs environnements physiques associés et des interactions au

sein et entre ces deux complexes, cela contenu dans un espace délimité. Il s'agit de l'unité écologique fondamentale en laquelle peut se réduire, sur le plan tant structural que fonctionnel, tout système biologique complexe dans un milieu donné. Bien que le concept d'écosystème puisse s'appliquer à toutes les échelles, il est nécessaire de fixer une échelle d'étude pour définir ces quatre éléments dont la définition et la description dépendent de cette échelle. Ainsi, il peut correspondre à de grands ensembles naturels (un océan, une forêt, une écorégion …) mais également à des zones très réduites (une flaque d'eau, une haie, un fossé, etc.). La dimension temporelle est aussi importante, un écosystème peut se développer, persister et changer au cours des temps, pouvant apparaitre stable comme fluctuant selon la période considérée. Pour décrire un écosystème, il faut impérativement et explicitement identifier le biotope caractéristique et les processus clés qui le distinguent d'autres écosystèmes, ainsi que déterminer les variations naturelles de ses propriétés biotiques et abiotiques.

- **Localité**

Une localité est définie comme une zone particulière du point de vue écologique et géographique dans laquelle un seul phénomène menaçant peut affecter rapidement l'ensemble de l'écosystème présent. L'étendue de la localité dépend de la superficie couverte par le phénomène menaçant et peut inclure tout ou partie de l'écosystème. Lorsqu'un écosystème est affecté par plusieurs phénomènes menaçants, la localité est définie en tenant compte de la menace plausible la plus grave.

- **Zone d'occurrence**

La zone d'occurrence (EOO, *Extend Of Occurrence*) est la superficie en km² du plus petit polygone convexe (dont aucun angle ne dépasse 180°) pouvant renfermer tous les sites connus ou suspectés de l'écosystème, au moment de son évaluation (figure 6). Cette mesure peut exclure certains sites formant une discontinuité ou disjonction dans la répartition globale.

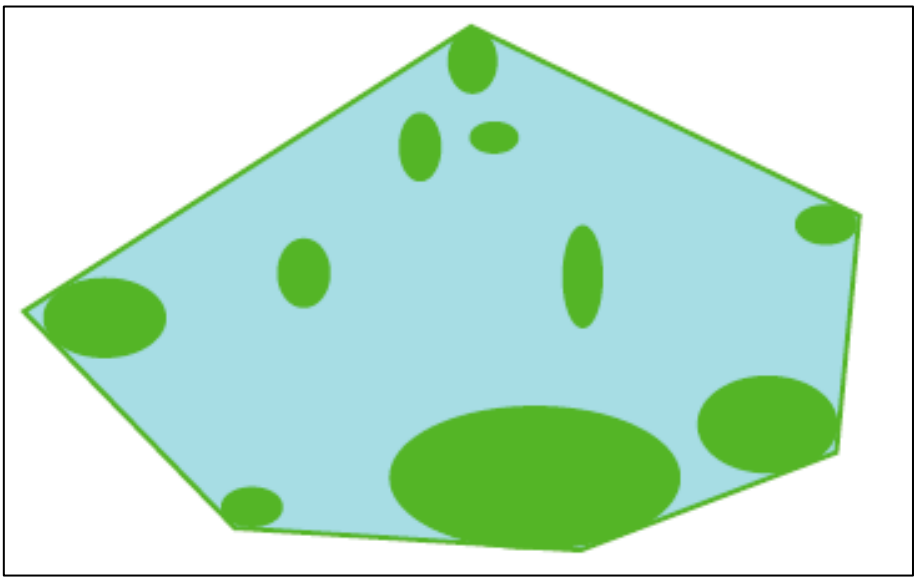


Figure 6: Représentation de la zone d'occurrence

- **Zone d'occupation**

La zone d'occupation (AOO, *Area Of Occupancy*) est la surface occupée par un écosystème, au sein de son aire d'occurrence (figure 7). Cette mesure montre qu'un écosystème n'occupe généralement pas l'ensemble de son aire d'occurrence, qui peut être en grande partie inoccupée. Cette aire d'occupation est estimée en comptabilisant le nombre de mailles de 10x10 km où est présent l'écosystème, à l'exception de celles dont le recouvrement par l'écosystème est inférieur à 1% (i.e. 1 km²).

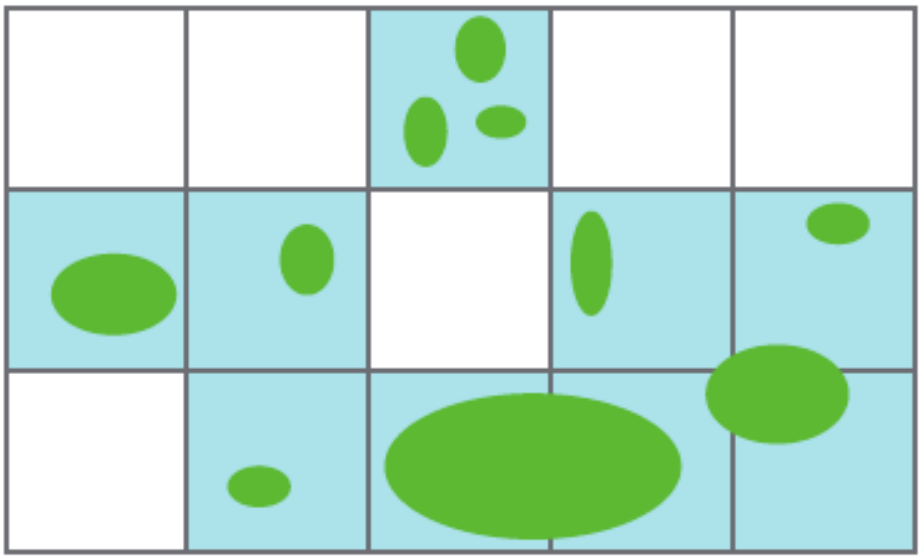


Figure 7: Représentation de la zone d'occupation

- **Effondrement (CO) ou disparition**

À la différence des espèces, les écosystèmes ne disparaissent pas ; ils se transforment plutôt en de nouveaux écosystèmes avec un biote caractéristique et des mécanismes d'organisation différents (Hobbs et *al.*, 2006 ; Keith et *al.*, 2015 ; Keith et *al.*, 2013).

Un écosystème est donc effondré lorsqu'il est quasiment certain que ses traits biotiques et abiotiques caractéristiques ont disparu dans toutes les occurrences et que le biote indigène caractéristique ne peut plus perdurer. L'effondrement peut survenir lorsque la plupart des composants du biote indigène caractéristiques disparaissent du système ou lorsque les composants fonctionnels (le biote qui joue un rôle fondamental dans l'organisation de l'écosystème) sont considérablement réduits et perdent leur capacité à recruter.

- **Sévérité relative**

La sévérité relative entre en compte pour les critères C et D. Elle correspond au ratio entre les changements observés sur le biotope ; par la modification d'un facteur environnemental ou d'une perturbation des interactions biotiques ; et le maximum de ces changements que pourrait tolérer l'écosystème, au-delà duquel il disparaitrait. Elle s'exprime en %, et est mise en relation avec l'étendue concernée par ces changements pour l'attribution d'une catégorie.

- **En Danger Critique (CR)**

Un écosystème est en danger critique lorsque les meilleures preuves disponibles indiquent que l'écosystème satisfait un des critères A-E pour la catégorie En Danger Critique. Ces écosystèmes présentent un risque d'effondrement extrêmement élevé.

- **En Danger (EN)**

Un écosystème est en danger lorsque les meilleures preuves disponibles indiquent que l'écosystème satisfait un des critères A-E pour la catégorie En Danger. Ces écosystèmes présentent un risque d'effondrement très élevé.

- **Vulnérable (VU)**

Un écosystème est vulnérable lorsque la meilleure évidence disponible indique que l'écosystème satisfait un des critères A-E pour la catégorie Vulnérable. Ces écosystèmes présentent un risque d'effondrement élevé.

- **Quasi menacé (NT)**

Un écosystème est quasi menacé lorsqu'il est évalué en fonction des critères sans atteindre les statuts En Danger Critique, En Danger ou Vulnérable au moment de l'évaluation, mais dont les valeurs restent proches des seuils requis. Il est probable qu'il appartienne à ces catégories sur le court terme.

- **Préoccupation mineure (LC)**

Un écosystème est une préoccupation mineure lorsqu'il est évalué en fonction des critères sans atteindre les statuts En Danger Critique, En Danger, Vulnérable ou Quasi Menacé. Les écosystèmes largement répandus ou peu dégradés appartiennent à cette catégorie.

- **Données insuffisantes (DD)**

Un écosystème appartient à la catégorie Données Insuffisantes lorsque l'information disponible ne permet pas d'évaluer de façon directe ou indirecte le risque d'effondrement que présente l'écosystème en fonction du déclin de sa distribution, des perturbations de ses fonctions écologiques et de la dégradation de son environnement physique. Il ne s'agit pas d'une catégorie de menace et cela n'implique aucun niveau de risque d'effondrement. L'appartenance à cette catégorie indique que la situation de ces écosystèmes a été considérée, mais qu'il faut plus d'information pour pouvoir déterminer leur statut de risque.

- **Non Évalué (NE)**

Un écosystème appartient à la catégorie Non Évalué (NE) lorsqu'il n'a pas encore été évalué en fonction des critères.

3.1.4.2 Critères et seuils

Le classement dans les catégories d'écosystèmes menacés s'opère sur la base de cinq critères (annexe 4) d'évaluation faisant intervenir des facteurs quantitatifs (distribution spatiale) et qualitatifs (perturbations des interactions biotiques ou abiotiques). Il suffit qu'au moins un des critères soit validé pour qu'un écosystème soit classé dans une

catégorie. Si l'un ou l'autre des critères ne peut difficilement être renseigné, l'évaluation peut toujours se baser sur les autres critères disponibles. En pratique, l'examen de tous les critères n'est pas systématique, en particulier lorsque certains d'entre eux sont peu utilisables compte tenu des données disponibles.

Critère A : Réduction de la distribution spatiale

Un écosystème peut être classifié conformément au critère A s'il est conforme aux seuils d'un des quatre sous-critères (A1, A2a, A2b, A3), quantifiés en tant que déclins de la distribution spatiale sur les périodes d'évaluation suivantes (tableau 4) :

Tableau 4: Sous critères et seuils du critère A (Keith et *al., 2013*)

Sous critères	Période de temps	CR	EN	VU
A1	Passé (sur les 50 dernières années)	≥80%	≥50%	≥30%
A2a	Futur (sur les 50 prochaines années)	≥80%	≥50%	≥30%
A2b	Toute période de 50 ans comprenant le passé le présent et le futur	≥80%	≥50%	≥30%
A3	Historique : Depuis 1750	≥90%	≥70%	≥50%

Pour appliquer le critère A, au moins deux estimations comparables de la distribution de l'écosystème à des moments différents sont requises. Pour cette étude, il s'est agi des données relatives à la cartographie des écosystèmes en 1965 et 2015. L'évaluation s'est faite selon le modèle statistique basé sur le taux absolu de déclin (*ARD*) et le taux proportionnel de déclin (*PRD*), calculé respectivement à partir du taux absolu de déclin par an (TAD) et du taux proportionnel de déclin par an (TPD), selon les formules suivantes (Keith et *al.*, 2013).

$$\mathbf{TAD = - ((S2-S1)/ (S2-S1))/S1*100 \quad (8)}$$

$$\mathbf{TPD = \ 100*[1-EXP ((LN (S2-S1)/ (T2-T1))] \quad (9)}$$

S1 = Superficie (km²) des écosystèmes en 1965 et S2 = Superficie (km²) des écosystèmes en 2015

T1 = année 1965 et T2 = année 2015

Critère B : Distribution géographique restreinte

Ce critère permet d'identifier les écosystèmes dont la distribution est tellement limitée qu'ils risquent de s'effondrer à cause de la convergence d'évènements ou des processus menaçant (Rodriguez et *al.*, 2015). Le critère B inclut aussi une estimation de l'habitat occupé par le biote indigène, qui est positivement lié à la viabilité de la population indépendamment de l'exposition à des évènements catastrophiques. Un écosystème peut être inscrit dans une catégorie de menace conformément au critère B s'il satisfait les seuils pour au moins un de trois sous-critères (B1, B2 et B3) qui portent sur diverses formes de déclin de la distribution géographique selon les spécifications suivantes (tableau 5) :

Tableau 5 : Sous critères et seuils du critère B (*Keith et al 2013*)

Sous-critères Mesure de la distribution géographique	CR	EN	VU
B1 : L'étendue du plus petit polygone convexe (km²) englobant toutes les occurrences (zone d'occurrence, EOO) : **ET** au moins un des cas de figure suivants (a-c) : **(a)** Un déclin continu observé ou déduit **SOIT** dans : i. une mesure de l'étendue spatiale adaptée à l'écosystème ; **OÙ** ii. une mesure de la qualité environnementale adaptée au biote caractéristique de l'écosystème ; **OÙ** iii une mesure de la perturbation des interactions biotiques adaptée au biote caractéristique de l'écosystème.	≤2 000	≤20 000	≤50 000
(b) Des processus menaçants observés ou d qui risquent d'entraîner des déclins continus dans la distribution géographique, dans la qualité environnementale ou dans les interactions biotiques sur les 20 prochaines années.	1 localité	≤ 5 localités	≤10 localités
(c) Les écosystèmes existent sur :			
B2 : Le nombre de mailles de 10 x 10 km occupées (zone d'occupation, AOO) : **ET** au moins un des cas de figure a-c mentionnés ci-dessus (même sous-critère que pour B1) ;	≤ 2	≤ 20	≤ 50
B3 : Un nombre très limité de localités (en général moins de 5) **ET** Exposé aux impacts des activités humaines ou à des événements stochastiques sur une période très courte et dans un avenir incertain, étant ainsi susceptible de s'effondrer ou de se trouver bientôt en Danger critique. (B3 ne peut mener qu'à la catégorie « Vulnérable », VU).			VU

La distribution géographique d'un écosystème est évaluée conformément au critère B au moyen de deux indicateurs standardisés : la zone d'occurrence (EOO) et la zone d'occupation (Gaston et Fuller 2009 ; Keith et *al.,* 2013). De plus, l'évaluation en fonction du critère B requiert une évaluation qualitative afin de déterminer si des déclins continus de l'étendue spatiale, de la qualité de l'environnement ou des perturbations croissantes des interactions biotiques sont en train de se produire ou se produiront probablement en raison des menaces. Enfin, l'évaluation requiert une estimation du nombre de localités où l'écosystème subsiste. C'est pourquoi une carte précise de la distribution actuelle de l'écosystème, des informations sur l'orientation des tendances actuelles et une compréhension des menaces qui agissent sur l'écosystème sont nécessaires (*Keith et al., 2013*). EOO (sous-critère B1) mesure la capacité des risques de se répandre sur une zone

contiguë qui comprend toutes les occurrences à l'aide du plus petit polygone convexe. En revanche, AOO (sous-critère B2) mesure la capacité des risques de se répandre entre les parcelles occupées en comptant les cellules de la grille occupée (Keith et *al.*, 2013).

Critère C : Dégradation de l'environnement

Le modèle de risque de la LRE définit deux critères pour évaluer les déclins de la fonction et des processus des écosystèmes. Deux critères sont requis pour évaluer la dégradation abiotique (environnementale) et biotique, étant donné que les causes, effets et mécanismes du déclin fonctionnel diffèrent essentiellement l'un de l'autre (Keith et *al.*, 2013). La dégradation abiotique consiste en la détérioration des caractéristiques physiques et non vivantes qui jouent un rôle essentiel dans les processus écologiques ou dans la distribution du type d'écosystème. La dégradation abiotique réduit la capacité d'un écosystème de maintenir son biote caractéristique.

L'évaluation du critère C se fait par la prise en compte du plus important phénomène de dégradation de l'environnement abiotique, compromettant sa capacité à maintenir ses caractéristiques biotiques d'origine et changeant la répartition des niches écologiques spécifiques pour chaque espèce ou groupe d'espèces présentes. Elle exclue donc tout mécanisme de dégradation biotique. Cette dégradation s'exprime selon deux variables, l'étendue concernée de l'écosystème et la sévérité relative du phénomène.

Un écosystème peut être inscrit dans une catégorie de menace d'après le critère C s'il satisfait au minimum les seuils d'un des quatre sous-critères (C1, C2a, C2b ou C3) qui expriment des niveaux différents de dégradation environnementale sur les périodes d'évaluation suivantes (tableau 6) :

Afin d'évaluer le critère C, il est nécessaire de sélectionner les variables abiotiques adaptées qui représentent les traits caractéristiques du type d'écosystème. Ce choix repose sur un nombre de considérations dont :

- des preuves plausibles des relations de cause à effet entre le processus de dégradation environnementale et la perte du biote indigène caractéristique ;
- des variables pertinentes caractéristiques de l'écosystème et de ses menaces ;
- le choix de la variable abiotique devant reposer sur l'écologique de l'écosystème ;
- l"estimation de l'étendue de la dégradation abiotique.

Le concept clé pour évaluer les déclins fonctionnels dans les variables biotiques ou abiotiques est la sévérité relative. La sévérité relative est essentielle pour comparer les risques encourus par des écosystèmes qui subissent de différents types de dégradation. La sévérité relative décrit le changement proportionnel observé dans une variable environnementale graduée entre deux valeurs : le premier décrivant l'état initial de l'écosystème (0 %), le deuxième décrivant l'état d'effondrement (100 %). Si un type d'écosystème subit une dégradation dont la sévérité relative est de 50 % sur la période d'évaluation, cela veut dire que l'écosystème s'est transformé et se trouve à mi-chemin vers l'état d'effondrement. Les informations sur la sévérité relative peuvent être combinées avec des informations sur la proportion de l'écosystème affecté (étendue) afin de déterminer la catégorie de risque correspondante d'après le critère C. Les évaluateurs peuvent estimer l'étendue de la dégradation qui dépasse le seuil de sévérité ou estimer la

sévérité moyenne de la dégradation dans toute la distribution de l'écosystème (100 % de l'étendue)

Tableau 6: Sous critères et seuils du critère C (Keith et al., 2013)

Sous critères	Période de temps	Gravité relative			
		Etendue (%)	≥80	≥50	≥30
C1	Les 50 dernières années en fonction des changements dans une variable abiotique qui affectent, à gravité relative, une fraction de l'étendue de l'écosystème, tel que l'indique-le tableau suivant :	≥80	CR	EN	VU
		≥50			
		≥30			
C2	**C2a**. Les 50 prochaines années, fonction des changements dans une variable abiotique qui affectent, à gravité relative, une fraction de l'étendue de l'écosystème, tel que l'indique-le tableau suivant : **OU** **C2b**. n'importe quelle période de 50 ans, y compris le passé, le présent et l'avenir, fonction des changements dans une variable abiotique qui affectent, à gravité relative, une fraction de l'étendue de l'écosystème, tel que l'indique le tableau suivant :	Etendue (%)	≥80	≥50	≥30
		≥80	CR	EN	CR
		≥50	EN	VU	
		≥30	VU		
C3	Depuis 1750, en fonction des changements dans une variable abiotique qui affectent, à gravité relative, une fraction de l'étendue de l'écosystème, tel que l'indique le tableau suivant :	Etendue (%)	≥90	≥70	≥50
		≥90	CR	EN	CR
		≥70	EN	VU	
		≥50	VU		

Les écosystèmes sont inscrits dans la catégorie CR lorsque le changement environnemental est à la fois extrêmement sévère (plus de 80 % de sévérité relative) et très extensif (plus de 80 % de la distribution). Les écosystèmes sont admissibles à des catégories de menace inférieures s'ils subissent des dégradations très sévères mais localisées, ou des dégradations moins sévères mais extensives (Figure 8). Les écosystèmes qui ne parviennent pas à satisfaire les seuils pour la catégorie Vulnérable peuvent être classifiés dans la catégorie Quasi Menacé. Par exemple, un écosystème qui subit un déclin de plus de 80 % dans sa qualité environnementale sur 20-30 % de sa distribution, ou un déclin de plus de 30 % sur 70-80 % de sa distribution peut être admissible à la catégorie Quasi Menacé.

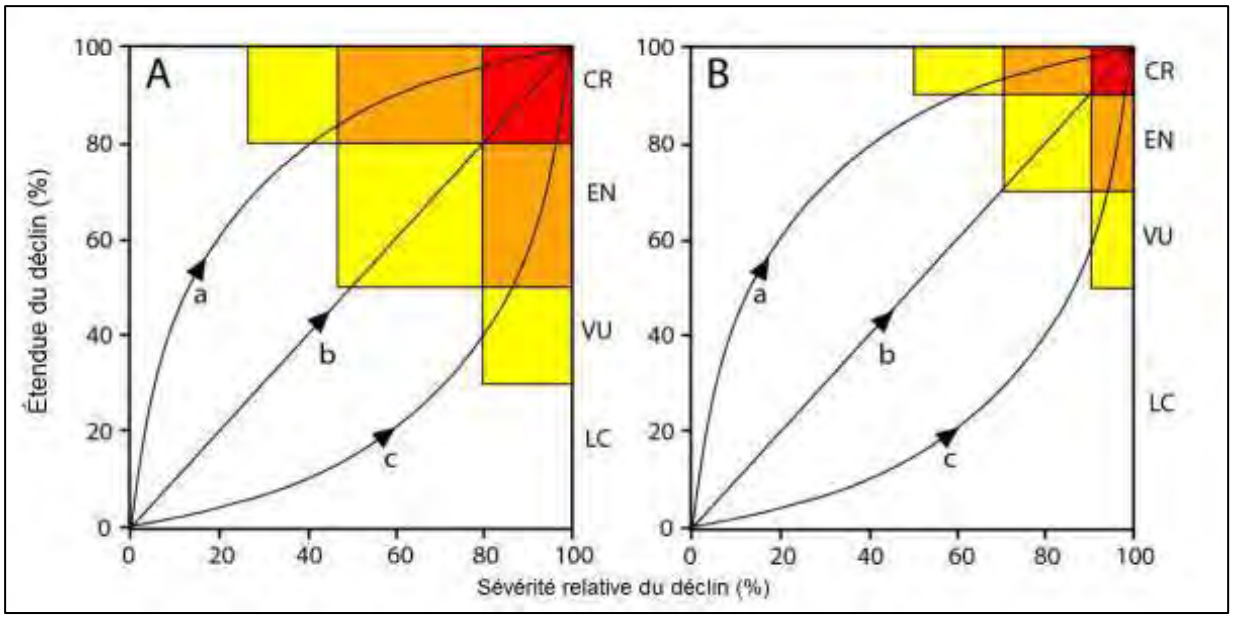


Figure 8: Parcours contrastés de la dégradation environnementale ou biotique et leurs et leurs classifications de risque correspondantes d'après les critères C1, C2, D1, D2 (A) ou C3, D3 (B) : (a) dégradation au début largement répandue et relativement bénigne, qui augmente en sévérité, (b) la sévérité et l'étendue de la dégradation augmentent à des taux similaires, (c) dégradation localisée mais sévère, plus répandue par la suite (Keith et *al.,* 2013).

Critère D : Perturbation des processus et interactions biotiques

La subsistance du biote à l'intérieur d'un écosystème dépend de multiples processus et interactions, y compris les processus concurrentiels, prédateurs, facilitateurs, mutualistes, trophiques et pathogènes, les liens mobiles (par exemple, les migrations saisonnières) et l'invasion d'espèces.

Les interactions qui sont ici prises en compte sont les relations basiques telles que la compétition trophique, la relation proie-prédateur, l'effet de mutualisation ou de facilitation ou encore de la diffusion de pathogènes dans l'écosystème. Cela inclut aussi les interactions entre les organismes et leur environnement physique, la fragmentation des habitats, les migrations, invasions et exploitation par l'Homme. Ces interactions doivent être essentielles pour la résilience des écosystèmes et leur capacité à s'adapter à des changements environnementaux tout en maintenant leur fonctionnement biotique initial. La perturbation de ces interactions et ses conséquences sont une des 5 plus importantes menaces pour la biodiversité, l'introduction d'espèces en étant la seconde après la destruction des habitats (SEPANSO, 2003).

Un écosystème peut être inscrit d'après le critère D s'il satisfait les seuils pour au moins un des quatre sous-critères (D1, D2, D2b ou D3), qui expriment de différents degrés de perturbation biotique sur les périodes d'évaluation suivantes (tableau 7) :

Tableau 7: Sous critères et seuils du critère D (Keith et al 2013)

Sous critères	Période de temps	Gravité relative			
D1	Les 50 dernières années en fonction des changements dans une variable biotique qui affectent, à gravité relative, une fraction de l'étendue de l'écosystème, tel que l'indique le tableau suivant :	Etendue (%)	≥80	≥50	≥30
		≥80	CR	EN	VU
		≥50	EN	VU	
		≥30	VU		
D2	**D2a**. Les 50 prochaines années, en fonction des changements dans une variable biotique qui affectent, à gravité relative, une fraction de l'étendue de l'écosystème, tel que l'indique le tableau suivant : **OÙ** **D2b**. n'importe quelle période de 50 ans, y compris le passé, le présent et l'avenir, en fonction des changements dans une variable biotique qui affectent, à gravité relative, une fraction de l'étendue de l'écosystème, tel que l'indique le tableau suivant :	Etendue (%)	≥80	≥50	≥30
		≥80	CR	EN	CR
		≥50	EN	VU	
		≥30	VU		
D3	Des perturbations dans les processus ou interactions biotiques depuis 1750 en fonction des changements dans une variable biotique qui affectent, à gravité relative, une fraction de l'étendue de l'écosystème, tel que l'indique le tableau suivant :	Etendue (%)	≥90	≥70	≥50
		≥90	CR	EN	CR
		≥70	EN	VU	
		≥50	VU		

L'évaluation du critère D doit répondre aux mêmes exigences que celles du critère C, sauf que, cette fois-ci, des variables biotiques adaptées sont utilisées. Un large ensemble de variables est potentiellement utile pour quantifier les processus biotiques et les déclins fonctionnels associés. Elle inclut les changements dans la richesse, composition et dominance des espèces ; l'abondance relative des types fonctionnels d'espèces, guildes ou espèces exotiques ; les données quant à l'interaction de la diversité, les changements dans l'identité et la fréquence des mouvements des espèces ; les données quant à la diversité de la niche et la diversité structurale. Pour tout cela, il faut alors documenter :(i) la sélection de la variable biotique par rapport au modèle conceptuel de la dynamique de l'écosystème ; (ii) la détermination d'un seuil borné d'effondrement pour la variable biotique ; (iii) le calcul de la sévérité relative ; (iv) l'estimation de l'étendue perturbation ; (v) les hypothèses et analyses de sensibilité adaptées (quant à la définition de l'effondrement et la forme supposée du déclin) ; (vi) les catégories finales de risque et les limites plausibles. Il est conseillé de montrer la variation temporelle de la dégradation dans une graphique qui dépeigne les variations de la variable sur la durée et qui inclue toute interpolation ou extrapolation permettant l'ajustement aux périodes d'évaluation pertinentes.

Critère E : Analyse de risque quantitative (modélisation)

Les modèles de simulation des dynamiques des écosystèmes peuvent permettre d'établir directement la probabilité d'effondrement de celui-ci, à l'échéance de 50 ans, comme les autres critères. Ces simulations peuvent se présenter sous de nombreuses formes, mais exploitent l'ensemble des interactions, synergies et mécanismes pouvant engendrer un effondrement de l'écosystème, en distinction donc du risque direct établi par chacun des autres critères. Ce critère, même si les données sont assez abondantes pour l'évaluation des autres critères, peut servir de trame de référence pour l'attribution du statut global. Il est cependant rarement évalué, car il existe très peu de modèles de ce genre.

Le critère E sert deux objectifs. Premièrement, il peut être utilisé pour inscrire un type d'écosystème au moyen de l'implémentation de modèles qui intègrent plusieurs mécanismes de déclin et leurs interactions à l'évaluation de risque (telle qu'elle décrite ci-dessus). Deuxièmement, il fournit un ancrage à l'évaluation de risque et un cadre englobant pour les autres critères, de même que son analogue dans les critères Liste Rouge pour les espèces. Le critère E spécifie le niveau de risque qui correspond à chaque catégorie de menace en définissant la probabilité d'effondrement et la période d'évaluation pour les types d'écosystème En Danger Critique (CR), En Danger (EN) et Vulnérable (VU).

Un écosystème peut être inscrit d'après le critère E s'il satisfait les seuils correspondants, une analyse quantitative qui estime que la probabilité d'effondrement est (tableau 8):

Tableau 8: Sous critères et seuils du critère E (Keith et al 2013)

CR	**≥ 50% dans les 50 prochaines années**
EN	**≥ 20% dans les 50 prochaines années**
VU	**≥ 10% dans les 100 prochaines années**

Partie II : VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DES ECOSYSTEMES DU BASSIN VERSANT DU FERLO

INTRODUCTION

Plusieurs définitions ont été données à la notion d'écosystème. La quasi-totalité des définitions prend en compte les facteurs biotiques et abiotiques ainsi que les interactions entre les composantes biotiques d'une part, entre les paramètres abiotiques d'autre part et enfin entre les paramètres biotiques et abiotiques. Cependant, tout écosystème varie dans l'espace et dans le temps et est en plus, contenu dans un système plus vaste pouvant être considéré comme un écosystème. Ainsi, l'évaluation des écosystèmes est toujours complexe. C'est pourquoi, il est nécessaire de circonscrire l'écosystème à l'échelle spatio-temporelle et de définir un ou plusieurs paramètres caractéristiques biotiques ou abiotiques, capables de décrire sa structure ou son fonctionnement. Il faut donc adopter une démarche qui se focalise á la fois sur la structure et le fonctionnement de l'écosystème. Suivant une classification basée sur les facteurs abiotiques, on distingue les écosystèmes terrestres et les écosystèmes aquatiques. En Afrique de l'Ouest, d'autres considérations d'ordre biogéographiques ont permis de distinguer des zones éco-géographiques au Sénégal. Au Mali, il existe des zones appelées zones agro-écologiques qui sont des entités géographiques homogènes au point de vue de la géologie, de la géomorphologie, du sol et de la végétation (4e rapport CDB) et qui sont regroupées en 4 grandes zones bioclimatiques en fonction des conditions écologiques et climatiques. Ces zones bioclimatiques constituent des entités homogènes définies par la combinaison des régimes d'humidité, de température du sol et la longueur de la saison agricole. Il s'agit des zones : saharienne (Ecosystèmes désertiques), sahélienne (écosystème semi-aride et aride) ; soudanienne (écosystèmes de savanes) et guinéenne (écosystèmes forestier). Le Togo présente cinq principaux domaines phytogéographiques dénommés zones écologiques ou éco floristiques. En Mauritanie, il existe plutôt des zones éco climatiques. Quelle que soit la dénomination, les zones écologiques ou écoclimatiques ou écorégions sont généralement définies sur la base des caractéristiques biogéographiques et/ou phytogéographiques. Cependant, l'échelle de ces zones peut se révéler très grande pour un travail d'évaluation. C'est pourquoi, la classification des écosystèmes en fonction de l'occupation/utilisation du sol serait l'approche la plus pratique pour définir les unités d'évaluation des écosystèmes terrestres et de certains écosystèmes aquatiques. Par contre pour d'autres écosystèmes aquatiques, la délimitation des unités d'évaluation se fera sur la base de facteurs abiotiques (Rodriguez et *al.*, 2011).

En se référant au critère d'occupation/utilisation du sol, on peut distinguer des écosystèmes agricoles, des écosystèmes pastoraux, des écosystèmes forestiers (en relation avec l'activité d'exploitation forestière), des écosystèmes piscicoles etc.). Cela comporte une limite relative dû au fait que l'impact des perturbations apportées par les activités humaines ne serait pas suffisamment bien prise en compte. En effet, selon la Convention sur la Diversité Biologique, les activités humaines ont la propriété d'éliminer ou de baisser significativement la diversité des organismes vivants (un critère fondamental pour l'existence d'un écosystème), donc de diminuer les relations d'interdépendance harmonieuses entre organismes vivants (un autre critère essentiel pour l'existence d'un

écosystème), par la modification des caractéristiques de l'environnement inorganique (climat, sol, eau).

Au Sénégal, on distingue ainsi globalement :

- les écosystèmes sahéliens ; les écosystèmes soudaniens ; les écosystèmes sub-guinéens ; les écosystèmes fluvio-lacustres ; les écosystèmes marins et côtiers ;
- les écosystèmes de montagne.

Ces écosystèmes sont classés en écosystèmes terrestres et écosystèmes aquatiques (écosystèmes naturels), auxquels nous ajoutons les écosystèmes artificialisées (anthropisés) qui correspondent à des milieux fortement modifiés par les facteurs indirects comme la sécheresse mais également et surtout par les activités humaines.

Ensuite, ces trois grands ensembles sont subdivisés comme suit (tableau 9) :

Tableau 9: Principaux écosystèmes du Sénégal (CSE, 2012)

Grand ensembles d'Ecosystèmes	Catégories	Ecosystèmes
Aquatiques	**Ecosystèmes marins et côtiers**	la mer
		le littoral/plage
	Ecosystèmes à vasière	les vasières nues
		les vasières herbeuses
		les vasières à mangrove
	Ecosystèmes fluviaux	les fleuves
		les rivières
	Ecosystèmes fluviomarins	Les estuaires
		Les deltas
	Ecosystèmes lacustres	Lacs
		Les lagunes
		Les marigots
		Les cuvettes
		Les mares
Terrestres	**Ecosystèmes de forêts**	Forêt dense
		Forêt claire
		Forêt galerie
	Ecosystèmes de savanes	Savane boisée
		Savane arborée
		Savane arbustive
		Savane herbeuse
	Ecosystèmes de steppes	Steppe arborée
		Steppe arbustive
		Steppe herbacée
Artificialisés (Cultivés)	**Les parcs**	Le parc à *Cordyla pinnata*
		Le parc à *Adansonia digitata*
		Le parc à *Faidherbia albida*
		Le parc à *Borassus aethiopium*
		Le parc à *Vitellerai paradoxa*
	Cultures	Culture pluviale/jachère
		Culture maraichère, Culture irriguée, Culture sous pluie
	Les plantations	Plantation forestières

Chapitre I : OCCUPATION DU SOL ET ETAT DES ECOSYSTEMES DU BASSIN VERSANT DU FERLO EN 1965 ET 2015

1.1 LES UNITES D'OCCUPATION DU SOL

La cartographie de l'occupation/utilisation du sol du Bassin versant du Ferlo en 1965 et en 2015 a permis d'identifier dix-sept classes composées de la forêt galerie relictuelle, des savanes, des steppes, des zones de culture, des établissements humains, des sols nus et surfaces en eau.

En 1965, la végétation naturelle représentait plus de 80% de la superficie totale du Bassin avec une prédominance de la savane répartie presque partout à l'exception des parties nord (kébemer) et centre-ouest (Linguère-Dahra) dominées par les zones de culture pluviale/jachère (figure 9). La steppe est globalement localisée au centre -ouest mais également avec au nord (quelques poches) tandis que les forêts galeries occupent le lit des différentes vallées. Les surfaces en eau sont seulement permanentes au niveau du prolongement du Lac de Guiers alors que partout ailleurs, elles sont représentées par les chapelets de mares temporaires. Les autres unités d'occupations relatives aux établissements humains et aux zones nues occupent une proportion faible (figure 9).

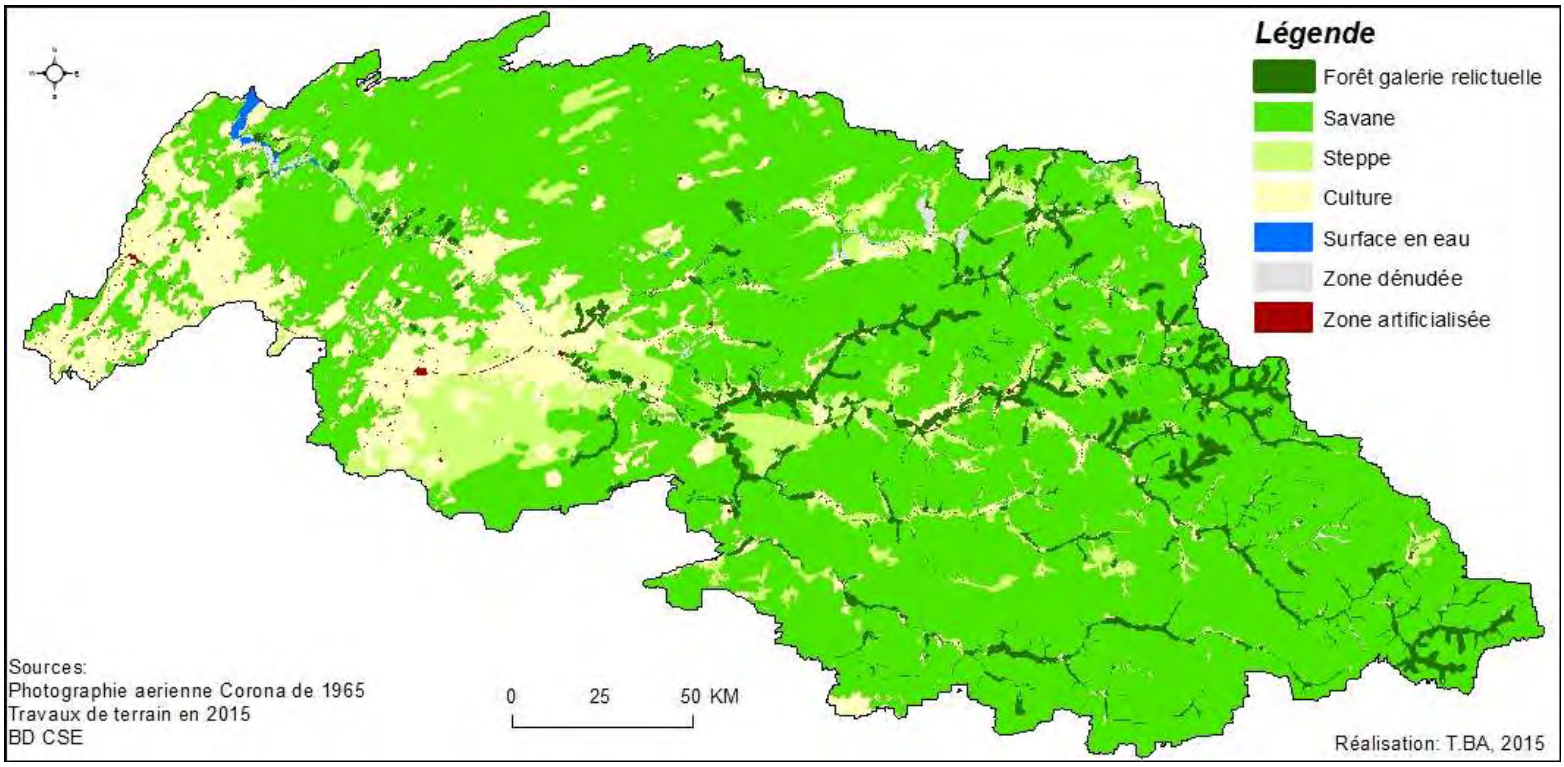


Figure 9: Occupation du sol du Bassin versant du Ferlo en 1965

Actuellement, on note un recul des zones de savane qui n'occupent que la moitié du bassin et sont localisées principalement vers le sud et sud-est et un peu au centre (figure 10). La partie nord du Bassin est globalement steppique tandis que le front agricole continue de gagner l'ouest de la zone de même que le centre-ouest où l'on note une mosaïque de zone de culture et de steppe. Les forêts galeries ont également régressé en nombre et en superficie du fait de la pratique de la culture dans ces bas-fonds entrainant leur évolution régressive, soit vers les steppes, soit vers des zones complètement dénudées

(figure 10). Viennent ensuite les trois autres unités d'occupation du sol qui affichent une augmentation de leur superficie mais toujours dans des proportions très faible.

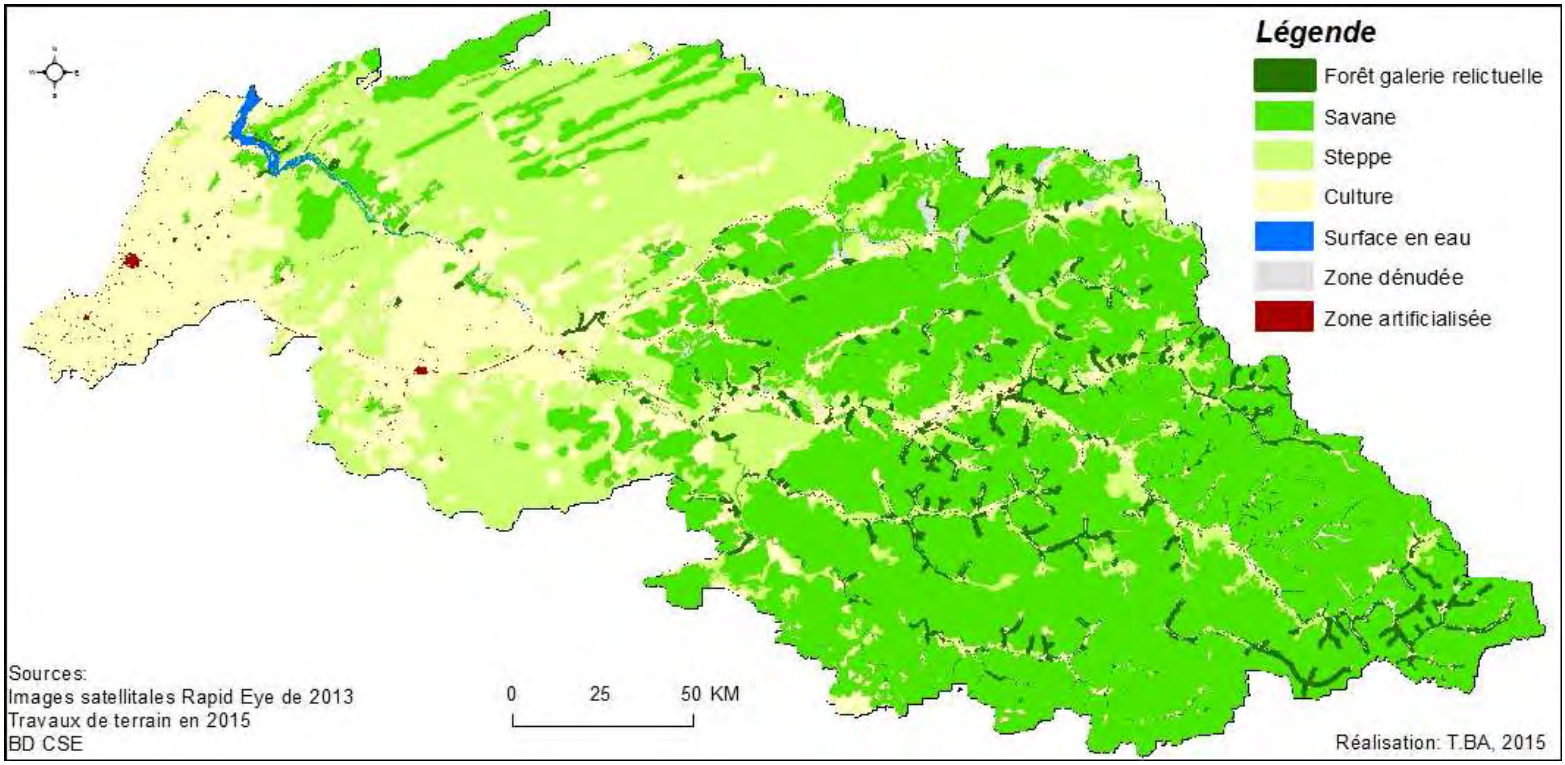


Figure 10: Occupation du sol du Bassin versant du Ferlo en 2015

1.2 VARIATION SPATIIALE DES ECOSYSEMES

La variation spatiale de la végétation a permis de repérer :

- dans la savane, 4 classes que sont la savane boisée, la savane arborée, la savane arbustive à arborée et la savane arbustive ;
- dans la steppe, 2 classes que sont la steppe arbustive à arborée et la steppe arbustive.

Pour faciliter l'analyse, les classes d'occupation du sol sont regroupées en 5 catégories (végétation naturelle, zone de culture, surface en eau, zone artificialisée et zone dénudée).

Nous distinguons ainsi au niveau du Bassin versant, les écosystèmes naturels des écosystèmes artificialisés.

Nous entendons par écosystèmes naturels les écosystèmes ne présentant pas de traces de modification humaine remarquables et non des écosystèmes naturels à l'état pur n'ayant subi aucune perturbation humaine.

Les écosystèmes artificialisés correspondent d'une part, à des milieux naturels fortement modifiés par les activités humaines principalement pour des activités agricoles ou d'exploitation forestière, et d'autre part, aux zones de steppes qui sont issues de la dégradation progressive des écosystèmes de savane.

La cartographie a fait ressortir les écosystèmes naturels suivants : forêts galerie relictuelle, savane boisée, savane arborée, savane arbustive à arborée, la savane arbustive, et les écosystèmes fluvio-lacustres constitués par le prolongement du lac de Guiers et les chapelets de mares.

Les écosystèmes artificialisés sont constitués de la steppe arbustive à arboré, de la steppe arbustive, des zones de culture pluviale ou irrigué et des plantations forestières.

Les écosystèmes naturels occupent la plus grande partie du Bassin versant avec cependant une tendance régressive entre 1965 ou ils représentaient 78% de la superficie totale et actuellement ou ils représentent 52% de la zone (tableau 10).

Les écosystèmes artificialisés affichent par contre une extension de leur superficie passant de 21% en 1965 à 46% actuellement, soit une augmentation de plus de 20% (tableu10).

Tableau 10: Classes et catégories d'occupation du Bassin versant du Ferlo

Libelle	Superficie (1965)		Superficie (2015)	
	HA	%	HA	%
Forêt galerie	95866.70	2.19	34808.83	0.80
Savane boisée	12158.30	0.28	5363.82	0.12
Savane arborée	1214230.47	27.80	38105.44	0.87
Savane arbustive à arborée	1686882.19	38.62	1386706.00	31.73
Savane arbustive	395212.01	9.05	832039.84	19.04
Steppe arbustive à arborée	239214.80	5.48	946875.98	21.66
Steppe arbustive	136631.93	3.13	257777.12	5.90
Végétation naturelle	**3780196.40**	**86.54**	**3501677.04**	**80.11**
Culture pluviale	532561.25	12.19	776426.49	17.76
Culture irriguée	702.86	0.02	764.71	0.02
Plantation	7530.76	0.17	27969.72	0.64
Zone de culture	**540794.86**	**12.38**	**805160.92**	**18.42**
Eau permanente	6092.80	0.14	11260.72	0.26
Eau temporaire	532.94	0.01	1003.67	0.02
Mare	993.67	0.02	1302.70	0.03
Surface en eau	**7619.41**	**0.17**	**13567.09**	**0.31**
Habitat	7112.64	0.16	7773.21	0.18
Route	1314.19	0.03	1637.96	0.04
Zone artificialisée	**8426.83**	**0.19**	**9411.17**	**0.22**
Sol nu	20828.99	0.48	30408.91	0.70
Sol nu inondable	10184.26	0.23	10725.03	0.25
Zone dénudée	**31013.25**	**0.71**	**41133.94**	**0.94**

1.2.1 Les écosystèmes naturels du Bassin versant du Ferlo

- **la forêt galerie relictuelle** localisée au niveau des dépressions empruntées jadis par la vallée fossile du Ferlo et ses affluents et dans d'autres dépressions ou les conditions édaphiques (sol argileux) et les possibilités d'inondation temporaire expliquent sa présence (figure 11). Les espèces ligneuses dominantes sont *Acacia nilotica* (photo 1)avec les variétés *tomentosa* dans les parties avec une lame d'eau plus importante (comme la mare de Niakha) et la variété *adansonii* dans les bas-fonds, *Mitragyna inermis*, *Acacia seyal, Anogeissus leiocarpus.* On y trouve également de façon fréquente d'autres espèces ligneuses comme *Balanites aegyptiaca, Acacia seyal, Combretum glutinosum, Guiera senegalensis et Piliostigma reticulatum.* Les espèces ligneuses comme *Sclerocarya birrea, Dalbergia melanoxylon*, et *Sterteculia setigera,* se rencontrent rarement dans ces forêts galerie ; ce qui explique d'ailleurs leur inscription dans la liste rouge des espèces menacées de l'UICN. Le recouvrement ligneux dépasse généralement 30% atteignant parfois même 50 à 60%, la hauteur excède le plus souvent aussi 7 mètres (seuil FAO).

Photo 1 : Forêt galerie relictuelle au niveau de la mare de Niakha (crédit photo : CSE, 2014)

Les principales espèces herbacées sont *Zornia glochidiata*, *Dactyloctenium aegyptium, Schoenefeldia gracilis*, *Polycarpaea linearifolia, Pennisetum pedicellatum,* mais aussi *Cassia occidentalis* sur les rebords. Le sol est généralement hydromorphe avec une texture variable allant du limon sableux au limon argileux en profondeur. Ces formations de vallée ont connu une évolution régressive passant de 95 866 ha, soit 2, 2 % de la zone d'étude à 34 808 ha, soit 0,8 % du Bassin versant (tableau 10).

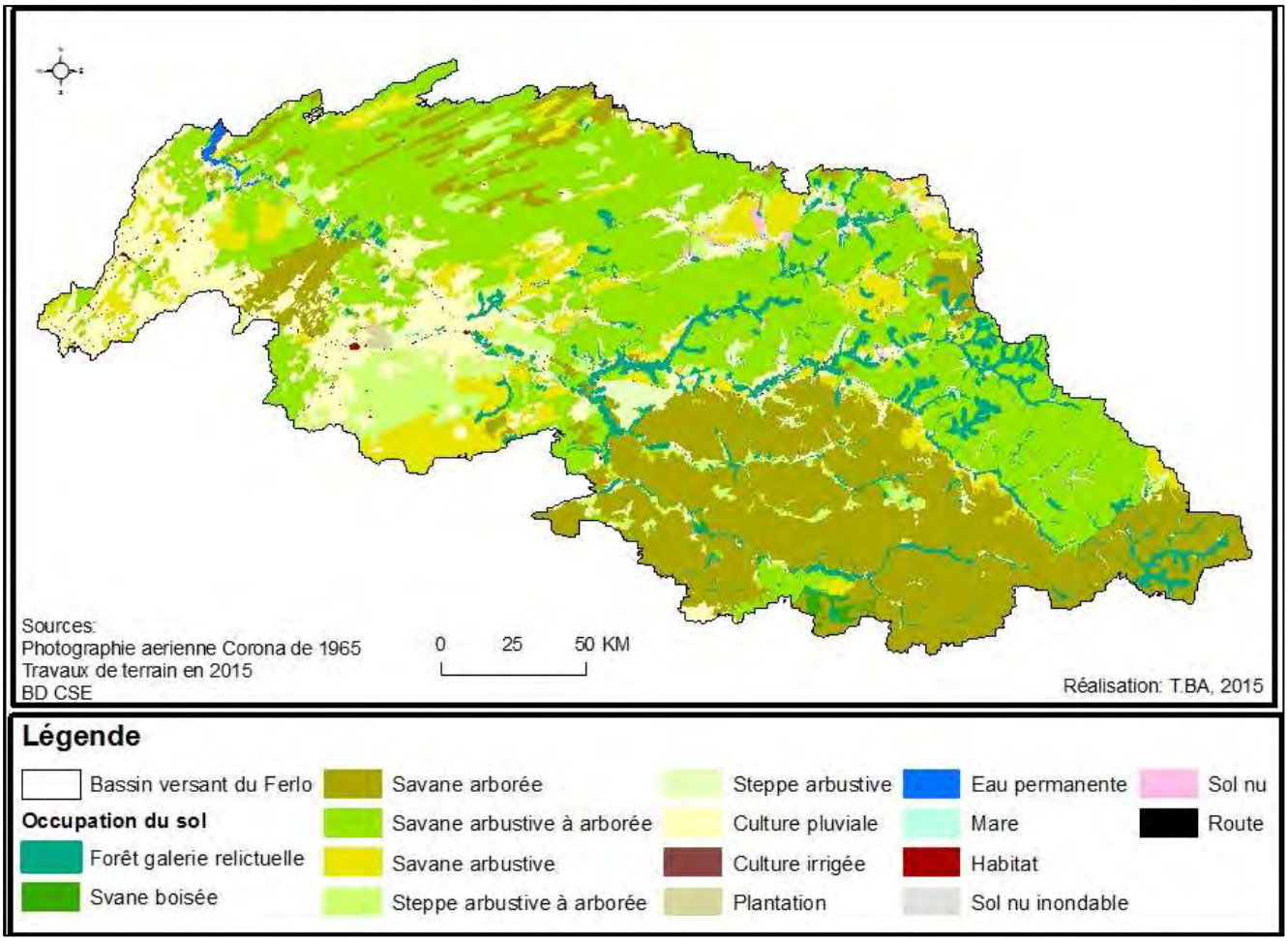


Figure 11: Les écosystèmes du Bassin versant du Ferlo en 1965

- **la savane boisée** occupe une faible superficie, de l'ordre de 0,1% de la superficie du Bassin versant avec des espèces soudano-sahéliennes comme *Pterocarpus lucens* (photo 2) et *Acacia seyal*. Le sol est type ferrugineux tropical. Elle est juste localisée au nord-est et au sud-est (figure11).

Photo 2 : Savane boisée à P*terocarpus lucens* (crédit photo, CSE, 2014)

- **la savane arborée** très représentative en 1965, avec une superficie de 1 214 230 ha, soit 28 % de la zone, se localisait au sud et à l'extrême sud-est du Bassin (figure 11). Elle se caractérise par la présence d'espèces ligneuses comme *Balanites aegyptiaca, Grewia bicolor, Guiera senegalensis, Combretum glutinosum, Acacia tortilis, Commiphora africana, Combretum micranthum, Boscia senegalensis, Pterocarpus lucens* , et des espèces herbacées comme *Zornia glochidiata, Fimbristylis exilis, Schoenefeldia gracilis, Pennisetum pedicellatum, Eragrostis tremula, Andropogon pseudapricus, Dactylotenium aegyptium, Polycarpaea linearifolia,* , etc. Actuellement elle est relativement faible en termes de superficie (38 105 ha) représentant environ 1% du Bassin versant. Elle est plus au moins dispersée dans la zone d'étude, surtout à l'intérieur des aires protégées et dans les bas-fonds et vallées.
- **la savane arbustive à arborée** qui constituait en 1965 l'écosystème la plus représentative de la zone d'étude de la zone d'étude avec une superficie de 1 686 882 ha soit 39% du Bassin versant (tableau 10)). Elle était principalement localisée au nord, au centre et à l'est du Bassin versant en 1965 (figure11). On y rencontre les espèces ligneuses comme *Guiera senegalensis, Combretum glutinosum, Grewia bicolor, Commiphora africana, Boscia senegalensis, Adenium obesum, Acacia senegal, Pterocarpus lucens, Combretum micranthum, Balanites aegyptiaca.* Les principales espèces herbacées sont *Spermacoce stachydea, Andropogon pseudapricus, Andropogon amplectens, Tephrosia purpurea, Schoenefeldia gracilis, Zornia glochidiata, Finbristylis exilis, Cassia mimosoides*. Les sols sont généralement ferrugineux tropicaux ou des lithosols. Cet écosystème toujours plus répandu dans la zone d'étude, affiche actuellement une évolution régressive et se localise principalement au sud et sud-est du bassin versant (figure12).

Photo 3: Savane arbustive à arborée au niveau du Ranch de Dolly (Crédit photo : CSE, 2015)

- **la savane arbustive** représentait moins de 10% de la superficie du Bassin versant avec une répartition dispersée (figures 11). Elle représente actuellement 19% de la superficie du Bassin versant (tableau 10) et constitue le deuxième écosystème le plus

représentatif dans la zone d'étude. Elle est localisée principalement au centre, nord et nord-est du bassin (figure 12). La végétation ligneuse est composée en grande partie de *Balanites aegyptiaca, Calotropis procera et Combretum glutinosum.* Les espèces herbacées présentes sont généralement *Aristida adscensionis, Chloris prieurii, Eragrostis ciliaris, Eragrostis tremula, Dactylotenium aegyptium, Schoenefeldia gracilis, Zornia glochidiata.*

Photo 4 : Savane arbustive à Ndioum Gaint avec des traces de feux (crédit photo : CSE, 2015)

- **les écosystèmes fluvio-lacustres** avec :
    - les surfaces en eau permanente localisées au niveau de la basse vallée du Ferlo (figures 11 et 12). Elle occupe une superficie très faible de la zone (0,2%). Le peuplement ligneux est composé des espèces suivantes : *Mitragyna inermis, Acacia senegal, Boscia senegalensis, Guiera senegalensis, Combretum glutinosum.* On y trouve des espèces herbacées comme *Schoenefeldia gracilis, Pennicetum pedicellatum, Zornia glochidiata, Dactyloctenium aegyptium,* etc ;
    - les chapelets de mares temporaires tout au long du bas-fond laissé par la vallée fossile du Ferlo. Leur superficie est négligeable (0,02%) comparée à l'étendue de la zone d'étude. L'échelle de la cartographie ne nous a pas permise de répertorier toutes les mares du fait de la taille très petite de la plupart d'entre elles. Les espèces ligneuses rencontrées autour de ces points d'eau sont *Mitragyna inermis, Guiera senegalensis, Ziziphus mauritiana, Anogeissus leiocarpus, Combretum glutinosum et Boscia senegalensis. Les espèces herbacées les plus fréquemment rencontrées sont Schoenifeldia gracilis, Zornia glochidiata, Dactyloctenium aegyptium, Pennisetum pedicellatum, etc.*

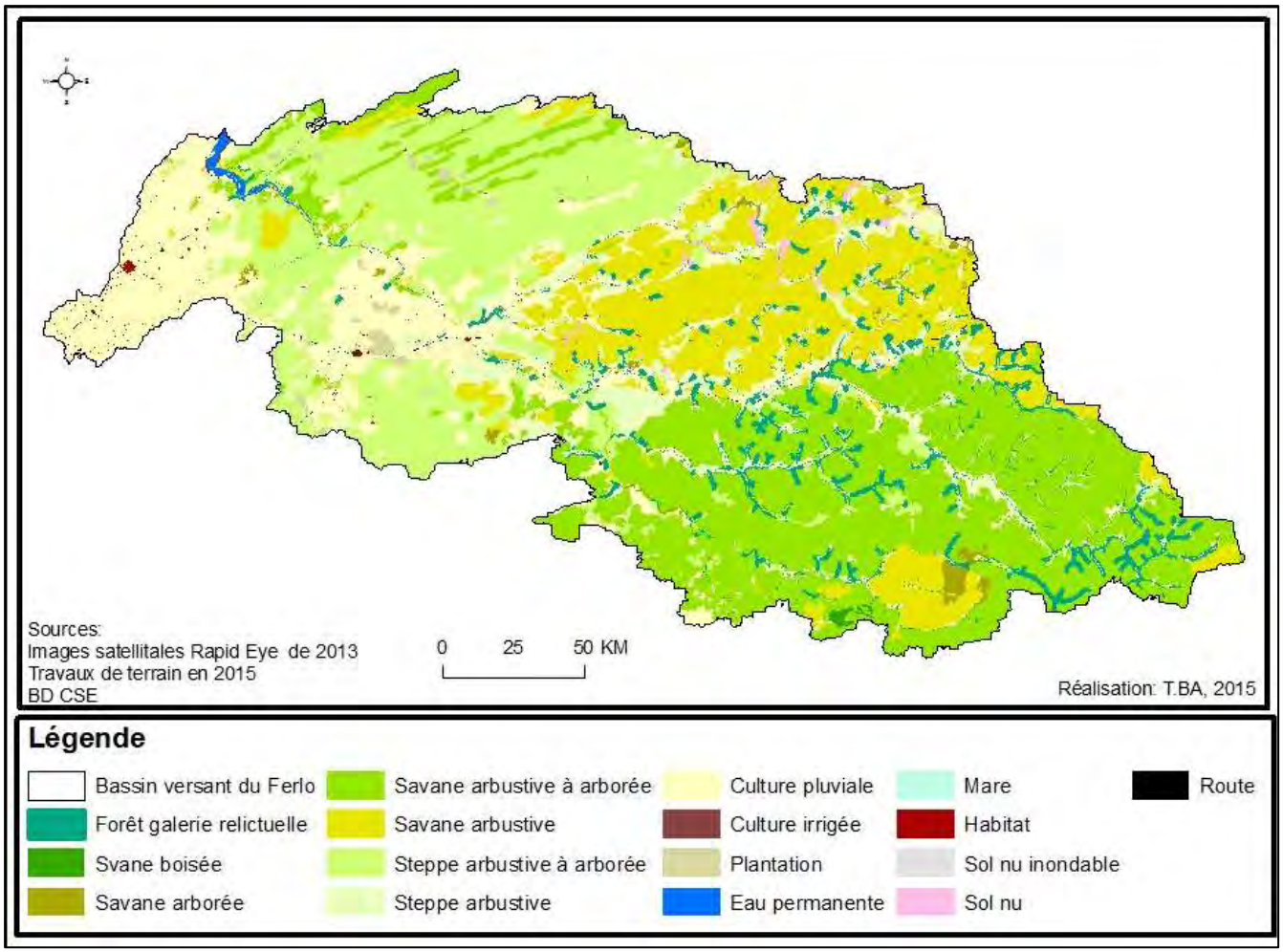


Figure 12: Les écosystèmes du Bassin versant du Ferlo en 2015

1.2.2 Les écosystèmes artificialisés du Bassin versant du Ferlo

- **la steppe arbustive à arborée,** dispersée dans la zone d'étude en 1965, occupait une proportion de 5% (tableau 10 et figure 11). Elle est actuellement **localisée** au nord à l'intérieur de la steppe arbustive, mais également à l'ouest et aux environs des reliques de forêts galerie vers le sud du Bassin (figure 12). Elle occupe 21% de la superficie de la zone d'étude. On y trouve des espèces ligneuses et herbacées diverses parmi lesquelles on peut citer *Balanites aegyptiaca*, *Faidherbia albida, Ziziphus mauritiana, Calotropis procera, Zornia glochidiata et Schoenefeldia gracilis*.

Photo 5 : Steppe arbustive à arborée à Labgar (crédit photo : CSE, 2014)

- **la steppe arbustive** à recouvrement faible, localisée principalement au nord, représente 5% de la superficie actuelle du Bassin versant (figure 12 et tableau 10)). Les espèces ligneuses dominantes sont *Acacia senegal*, *Guiera senegalensis*, *Balanites aegyptiaca*, *Ziziphus mauritiana, Calotropis procera* et *Combretum glutinosum*. Le tapis herbacé est constitué de quelques Cypéracées et de Graminées.

Photo 6 : Steppe arbustive à *Boscia senegalensis* à Tatki (crédit photo : CSE, 2014*)*

- **Les zones de culture** au sein desquelles on distingue :
    - les zones de culture pluviale/jachère qui constituent la portion la plus importante de ce type d'écosystème ont connu une extension de superficie passant de 12% en 1965 à 17% actuellement. Elles sont localisées essentiellement à l'ouest et au centre du Bassin versant, mais également et surtout actuellement, le long des bas-fonds de la vallée fossile du Ferlo (figure 12). Les spéculations les plus fréquentes sont le sorgho, le maïs, mais aussi les légumes.
    - les cultures irriguées très faibles dans la zone, se limitent principalement au niveau de la basse vallée du Ferlo ;
    - les plantations forestières, négligeables vers les années 1965 sont actuellement les résultats des campagnes de reboisement auxquelles on ajoute les plantations de gommier et celle de la Grande Muraille verte, mais également quelques parcelles horticoles et maraîchères exploitées par les populations locales.

Photo 7 : Parc à *Sclerocarya birrea* à Touba Ndar FALL (crédit photo : CSE, 2014)

Chapitre II : VARIATION TEMPORELLE DES ECOSYSTEMES DU BASSIN VERSANT DU FERLO

Les écosystèmes du Bassin versant du Ferlo ont enregistré entre 1965 et 2015 des perturbations se traduisant par une évolution régressive de la plupart des écosystèmes naturelles (tableau 11) qui se sont soit modifiés, soit convertis en écosystèmes artificialisés.

Tableau 11: Evolution des superficies de l'occupation du sol de du Bassin versant du Ferlo entre 1965 et 2015

Libelle	2015(ha)	2015 (%)	1965 (ha)	1965 (%)	2015-1965 (ha)	2015-1965 (%)
Forêt galerie	34808,83	0,80	95866,70	2,19	-61057,87	-1,40
Savane boisée	5363,82	0,12	12158,30	0,28	-6794,49	-0,16
Savane arborée	38105,44	0,87	1214230,47	27,80	-1176125,03	-26,93
Savane arbustive à arborée	1386706,00	31,73	1686882,19	38,62	-300176,18	-6,89
Savane arbustive	832039,84	19,04	395212,01	9,05	436827,83	9,99
Steppe arbustive à arborée	946875,98	21,66	239214,80	5,48	707661,18	16,19
Steppe arbustive	257777,12	5,90	136631,93	3,13	121145,19	2,77
Culture pluviale	776426,49	17,76	532561,25	12,19	243865,24	5,57
Culture irriguée	764,71	0,02	702,86	0,02	61,86	0,00
Plantation	27969,72	0,64	7530,76	0,17	20438,96	0,47
Eau permanente	11260,72	0,26	6092,80	0,14	5167,92	0,12
Eau temporaire	1003,67	0,02	532,94	0,01	470,73	0,01
Mare	1302,70	0,03	993,67	0,02	309,03	0,01
Habitat	7773,21	0,18	7112,64	0,16	660,58	0,02
Route	1637,96	0,04	1314,19	0,03	323,76	0,01
Sol nu	30408,91	0,70	20828,99	0,48	9579,93	0,22
Sol nu inondable	10725,03	0,25	10184,26	0,23	540,77	0,01

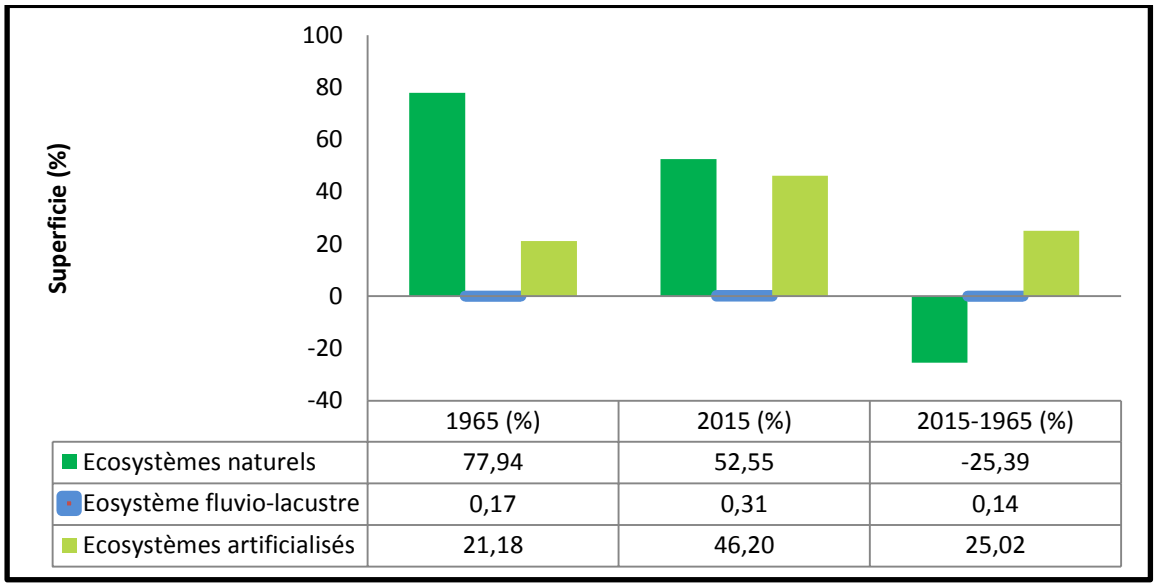
2.1 LES ECOSYSTEMES NATURELS

La forêt galerie déjà faible par rapport à la superficie totale du bassin versant, a subi entre 1965 et 2015, une perte de superficie de l'ordre de 1,4% du fait principalement de l'utilisation de ces bas-fonds pour des pratiques d'agriculture. La savane arborée a enregistré une perte considérable de superficie de l'ordre de 27% (tableau 11). La savane boisée, de même que la savane arbustive à arborée affichent également une baisse de superficie entre ces deux dates. La savane arbustive a connu une évolution progressive de l'ordre de 10 % entre 1965 et 2015 et ceci au détriment de la savane arborée du fait de l'action anthropique relative à l'élevage et à l'agriculture.

2.2 LES ECOSYSTEMES ARTIFICIALISES

Entre 1965 et 2015 les écosystèmes de steppe ont globalement affiché une augmentation de superficie au détriment des écosystèmes naturels de savane. La steppe arbustive à arborée est passée de 5% en 1965 à environ 22% en 2015 (tableau11), soit une progression de l'ordre de 17% ; il en est de même de la steppe arbustive qui affiche une évolution positive de l'ordre de 3%. Durant cette période on note également une extension des zones agricoles due principalement à la pratique de la culture pluviale de cette zone à vocation pastorale.

Globalement les écosystèmes naturels du Bassin versant du Ferlo ont enregistré durant ces 50 ans (1965-2015) une perte de superficie. Cette dégradation se traduit par leur artificialisation avec d'une part, une évolution régressive des zones de savane en zones de steppe, et d'autre part, une conversion de ces écosystèmes naturels en zones de culture (figure 13).



	1965 (%)	2015 (%)	2015-1965 (%)
Ecosystèmes naturels	77,94	52,55	-25,39
Eosystème fluvio-lacustre	0,17	0,31	0,14
Ecosystèmes artificialisés	21,18	46,20	25,02

Figure 13: Bilan de la variation temporelle des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo entre 1965 et 2015

Chapitre III : DISCUSSION ET CONCLUSION

3.1 DISCUSSION

L'exploitation des résultats obtenus révèle que les écosystèmes du Bassin versant du Ferlo restent dominés par les formations naturelles représentées principalement par les savanes arbustives et/ou arborées et quelques reliques de forêts galeries. Les écosystèmes artificialisés composées des steppes et des zones de culture représentent un peu moins de la moitié de la superficie du Bassin.

Les formations comprennent en fonction du gradient pluviométrique, des steppes arbustives et/ou arborée au nord, des savanes arbustives et/ou arborées au centre-est, au sud et au sud-est. Les reliques de forêt galeries localisées dans les bas-fonds sont négligeables et sont le plus souvent remplacées par des zones de culture.

Le Ferlo sableux est marqué, sur le plan physionomique, par une végétation de type pseudo-steppe arbustive à *Acacia tortilis* et *Balanites aegyptiaca*, fortement affectée par l'homme. Suivant les sols et la topographie, des espèces telles que *Acacia senegal*, *Combretum glutinosum* apparaissent, pouvant même prédominer. Les graminées les plus communes sont *Cenchrus biflorus*, *Schœnefeldia gracilis* et *Dactyloctenium aegyptium*. En saison des pluies, les dépressions collectent les eaux de ruissellement et forment des mares temporaires autour desquelles s'organise la vie pastorale. En saison sèche par contre, l'activité est polarisée par les forages qui restent les seuls points d'eau ; cette polarisation, très souvent mal gérée, a conduit à une forte dégradation de la végétation sur un rayon de 3 à 5 km autour des dits forages.

Le Ferlo latéritique est caractérisé par une strate ligneuse relativement dense, dominée par *Pterocarpus lucens*, souvent rencontré en formations assez pures. Selon la topographie et le type de sol, d'autres espèces comme *Acacia seyal*, *Combretum micranthum*, *Combretum nigricans*, … lui sont associées. La strate inférieure, moins consistante qu'au Nord, est dominée par *Loudetia togœnsis* sur les sols gravillonnaires.

Les arbustes comme *Calotropis procera* se multiplient de façon frappante à proximité des forages et dans les dépressions, tandis que les formations d'*Acacia senegal* enregistrent de fortes mortalités et que *Dalbergia melanoxylon*, *Sclerocarya birrea* et *Grewia bicolor* deviennent de plus en plus rares

Les principaux facteurs naturels impactant négativement ce Bassin versant et globalement le Ferlo, sont l'érosion éolienne et hydrique. Ils ont entrainé et continue d'entrainer la régression de la diversité des espèces des écosystèmes de savane et de steppe, et la dégradation des galeries forestières. Au niveau des vallées, l'érosion surtout hydrique a modifié le profil des berges et talwegs par les processus de colmatage et de ravinement.

L'action anthropique reste cependant prépondérante dans ce processus de dégradation de ces écosystèmes avec les coupes abusives et clandestines, l'émondage. Les espèces à grande valeur commerciale comme *Acacia senegal*, du fait de sa gomme arabique, font l'objet d'une surexploitation. Il en est de même pour les espèces réputées à cause de la qualité de leur bois pour la chauffe comme *Combretum glutinosum*, *Pterocarpus lucens* et *Grewia bicolor*. Les feux de brousse sont aussi très fréquents et détruisent de grande superficie, surtout en fin de saison des pluies marquée par la densité du tapis herbacé. Pratiquement l'ouest du Bassin versant du Ferlo est dominé par les zones de culture principalement

pluviale entrainant le défrichement de vaste superficie, la perte progressive des reliques de galeries forestières et l'accélération du processus de formation des dépôts sédimentaires dans les vallées.

Ces résultats viennent confirmer les travaux antérieurs relatifs à la dégradation des écosystèmes sahéliens à partir des années 1950 marquant le début de la mise en place de la politique d'hydraulique pastorale avec l'implantation des forages entrainant la concentration de milieux de têtes de bétail dans un rayon réduit. Ce qui a eu des impacts importants sur le couvert végétal avec une perte progressive de la diversité floristique de la partie méridionale vers la partie septentrionale confirmée par Ndiaye et *al., (2013)*.

Cette tendance à la baisse de la richesse spécifique et de la diversité biologique de la flore est observée en 2000. Diouf (2001) a révélé suite à une étude de la dynamique du peuplement des ligneux dans le forage de Thiel que le nombre de taxons a diminué d'environ 50% entre 1970 et 2000. Et ce sont les *Combrétaceae*, les *Anacardiaceae*, les *Bombaceae* et les *Rubiaceae* qui sont les familles les plus affectées par cette disparition de taxons.

Récemment, *Ndiaye et al.,* (2013) ont confirmé cette régression de la biodiversité du Ferlo qu'ils expliquent en dehors des facteurs climatiques, par l'avancée du front agricole et la pratique de l'élevage surtout dans la partie méridionale.

Si dans le sud du Ferlo, les deux espèces végétales que sont *Balanites aegyptiaca* et *Combretum glutinosum* semblent plus ou moins être épargnées du processus de dégradation, dans sa partie nord, on note une homogénéisation presque totale de l'espèce *Balanites aegyptiaca* avec des perturbations moindres de l'espèce *Calotropis procera* (espèce végétale caractéristique des écosystèmes dégradés). A cela s'ajoute une diminution progressive de l'étendue de la végétation naturelle au bénéfice d'un front agricole qui ne cesse de gagner du terrain (Ba, 2001).

Cependant, la végétation de l'écosystème sahélien dispose d'une grande capacité de régénération. En effet, selon Gillet (1988) a écrit que les parcours sahéliens sont adaptés depuis des millénaires à des variations de grande amplitude de la pluviométrie interannuelle. Ils régressent à la suite d'une série d'années sèches mais rattrapent rapidement le terrain perdu à la suite d'années plus arrosées, montrant leur puissance de régénération.

La faune du Ferlo n'est pas non plus épargnée par cette fragmentation des habitats due principalement à la péjoration climatique, mais également et surtout au braconnage, à la coupe des arbres et aux feux de brousse. Domaine jadis des éléphants, des girafes, des hippotragues, des gazelles, des lions, des léopards, des guépards, des autruches, des phacochères, la faune est réduite actuellement à la présence de l'hyène rayée (*Hyaena hyaena*), le phacochère (*phacochoerus aethiopicus*), la gazelle à front roux (*Gazella rufifrons*), le porc-épic (*Hystrix hastata*), le chacal (*Canis aureus*), le singe rouge (*Erythrocebus patas*), l'oryctérope (*Orycteropus afer*), la civette (*civeta civata*), le ratel (*Mellivora capensis*). L'avifaune est représentée par la pintade commune (*Numedea meleagris*), l'autruche à cou rouge (*Struthio camelus*), le francolin (*Francolinus bicalcaratus*), le vanneau (*Vanellus spinosus*), le corbeau pie (*Corvus albus*), le pigeon de Guinée (*Columba guinea*), la tourterelle maillée (*Oena capensis*), la tourterelle du Cap (*Oena capensis*), le petit calao à bec noir (*Tockus nasutus*), le petit calao à bec rouge (*Tockus erythrorhyncus*), etc ; (DPN, 2011).

3.2 CONCLUSION

L'étude a permis d'identifier, de délimiter et quantifier les écosystèmes du Bassin versant du Ferlo en 1965 et en 2015, qui sont de deux types : i) les écosystèmes naturels dominés par les savanes avec cependant une variation spatiale à l'intérieur de cet habitat ; ii) les écosystèmes artificialisés composés des steppes à dominante arbustive et les zones de culture. Bien qu'étant dans une zone-sylvo-pastorale, les écosystèmes anthropisés constitués par les zones de cultures représentent actuellement une proportion importante dans la zone d'étude, de l'ordre de 18 % alors qu'elles représentaient en 1965, 12% du Bassin versant.

Cette zone continue de subir une réduction de son potentiel, de sa productivité et de sa diversité floristique qui régresse du nord vers le sud (Ndiaye et *al.,* 2013) Elle se caractérise par une forte mortalité de certaines espèces végétales comme *Dalbergia melanoxylon* et la rareté voire la rareté des espèces ligneuse comme *Sclerocarya birrea, Grevia bicolor, Sterteculia setigera, mais aussi des herbacées comme Justicia niokolo kobae et Digitaria aristulata.*

Les facteurs anthropiques sont prépondérants dans ce processus de dégradation des écosystèmes du Bassin. A cela, s'ajoute la sécheresse et la topographie de la zone occasionnant une forte érosion hydrique et éolienne.

Malgré la présence de 17 réserves sylvo-pastorales, d'une réserve de Biosphère, de 2 réserves de faune et d'une forêt classée, cette zone affiche des formes de dégradation et des pressions variées. Une avancée du front agricole est aussi à signaler.

La création récente de la Réserve de Biosphère du Ferlo avec quatre noyaux centraux situés dans les deux réserves de faune du Ferlo nord et du Ferlo sud, peut néanmoins susciter un espoir pour une régénération de la végétation et le retour de la faune. Cette option n'est cependant valable que si tous les principes de gestion d'une réserve de biosphère sont appliqués et suivis. Il en de même des réalisations de la Grande Muraille Verte.

Partie III: DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELEE DES ECOSYSTEMES DU BASSIN VERSANT DU FERLO

INTRODUCTION

Le Sénégal subit depuis plusieurs décennies, une baisse des précipitations et des pressions de plus en plus importantes sur les ressources naturelles (CSE, 2003). Les effets combinés de la croissance démographique et les perturbations climatiques ont entrainé la dégradation des terres. Dans le pays, les paysages les plus dégradés ont été identifiés dans la zone sylvo-pastorale caractérisée par le surpâturage, et le Bassin arachidier dans le centre, en raison des pratiques culturales (CSE, 2003).

La région naturelle du Ferlo est actuellement sous une forte emprise de l'homme. Le Bassin versant du Ferlo, cadre de notre étude, en constitue une parfaite illustration. Cette zone à vocation pastorale se singularise par la fragilité de ses ressources se traduisant par une grande sensibilité des composantes du milieu aux facteurs de déséquilibre que sont la sécheresse et l'action anthropique. Si la sécheresse est un phénomène naturel difficilement maîtrisable, il devient cependant urgent de mettre en place des stratégies d'atténuation des effets négatifs des actions anthropiques qui menacent ces écosystèmes. Cela doit passer par une meilleure connaissance de la dynamique et la répartition spatiale de ces écosystèmes. A cet effet le suivi et la quantification de la dynamique des écosystèmes dans cette zone s'avère nécessaire pour attirer l'attention sur ces paysages très sensibles aux effets anthropiques.

Beaucoup d'auteurs ont abordé la dynamique des ressources naturelles au Ferlo, soit à partir d'inventaire floristique, soit à partir de la cartographie de l'occupation à l'échelle d'un sous territoire. Les travaux s'intéressant à la dynamique au Ferlo ont utilisé le plus souvent une période de moins de 15 ans. A notre connaissance, un travail de recherche utilisant les données d'observation de la terre à l'échelle de tout le bassin versant du Ferlo pour l'étude de la dynamique des écosystèmes sur une période de 50 ans, n'a pas jusqu'à présent été fait.

L'objectif principal de ce chapitre est d'analyser la dynamique spatio-temporelle des écosystèmes du Bassin-versant du Ferlo entre 1965 et 2015.

L'hypothèse repose sur : les sécheresses récurrentes et l'exploitation irrationnelles des ressources naturelles seraient à la base de la dégradation des écosystèmes sahéliens.

Chapitre 1 : EVOLUTION DE L'ESPACE

1.1 CHANGEMENTS INTERVENUS ENTRE 1965 ET 2015

Entre 1965 et 2015, les modes d'occupation de l'espace du Bassin versant du Ferlo ont connu de grands bouleversements (figure 14). Durant cette période, 35% des superficies sont restés en l'état initial et 65% des terres du Bassin ont subi des changements (tableau 12) qui se sont manifestés plus par des modifications (58%) surtout au niveau de la végétation naturelle, que par des conversions (7%).

Tableau 12: Répartition des superficies de l'occupation du sol du Bassin versant du Ferlo en 1965 et 2015

Période	Superficies sans changement (état initial)		Superficies modifiées		Superficies converties		TOTAL (ha)
	(ha)	% (Zone)	(ha)	% (Zone)	(ha)	% (Zone)	
1965 et 2015	1 517 750,30	34,70	2 534 014,53	57,95	320 782,04	7,34	**4372546,88**

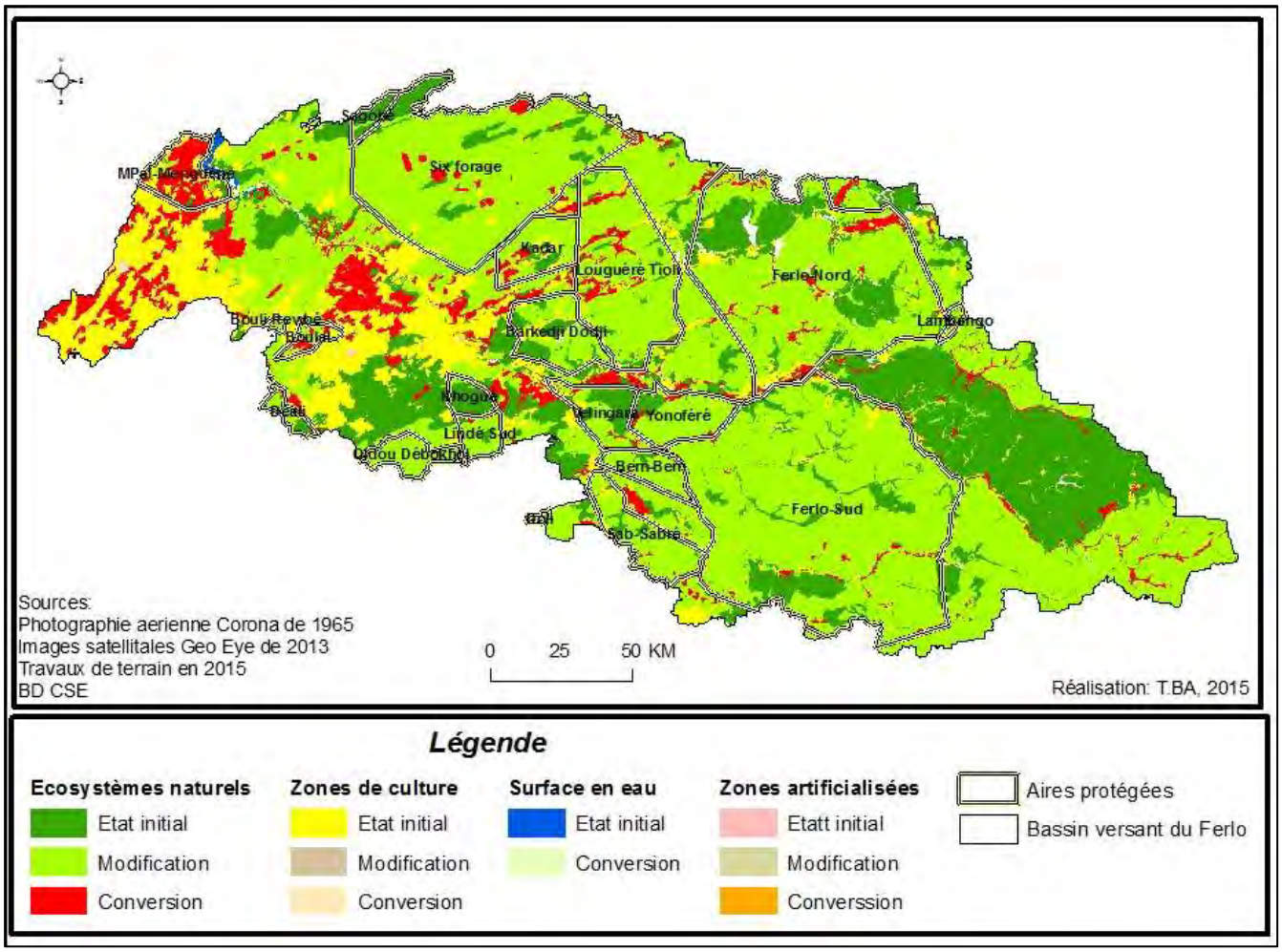


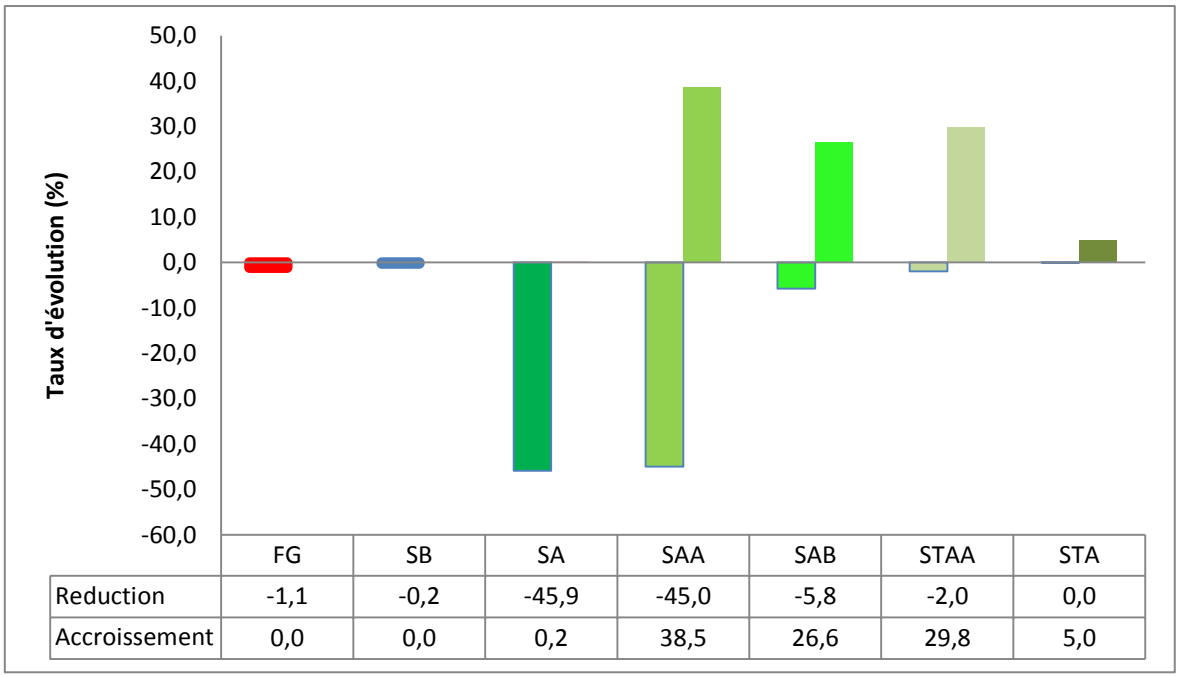
Figure 14: Changements dans l'occupation du sol du Bassin versant du Ferlo entre 1965 et 2015

Les écosystèmes naturels ont connu une évolution régressive matérialisée d'abord par la perte de presque 2/3 de la superficie de la forêt galerie au profit de la savane arborée et/ou arbustive et de la steppe, et ensuite par les dégradations de la savane arborée en faveur de la savane arbustive et/ou arbustive à arborée et des steppes (voir matrice de

transition en annexe 3). La plupart des zones qui sont restés en l'état initial sont localisées dans les zones protégées, mais aussi au sud-est du Bassin, dans les départements de Ranérou et de Kanel.

1.2 BILAN DES MODIFICATIONS ENTRE 1965 ET 2015

Le bilan dans les zones de végétation (figure 15) montre que les superficies de la savane sont les plus modifiées avec une évolution régressive importante de la savane arborée de l'ordre de 27% au profit de celles de la savane arbustive, de la savane arbustive à arborée et des steppes. La savane arbustive et les steppes affichent un bilan positif avec une dominance des steppes qui enregistrent globalement une augmentation de superficie de l'ordre de 19%. Les autres modifications relatives aux autres catégories sont négligeables, de l'ordre de moins 1%.



	FG	SB	SA	SAA	SAB	STAA	STA
Reduction	-1,1	-0,2	-45,9	-45,0	-5,8	-2,0	0,0
Accroissement	0,0	0,0	0,2	38,5	26,6	29,8	5,0

Figure 15: Bilan des modifications des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo entre 1965 et 2015

.Avec :

Forêt galerie : FG
Savane boisée : SB
Savane arborée : SA
Savane arbustive à arborée : SAA
Savane arbustive : SAB
Steppe arbustive à arborée : STAA
Steppe arbustive : STA
Cultures : CUL

1.3 BILAN DES CONVERSIONS 1965 ET 2015

L'essentiel des conversions (tableau 13) a affecté les zones de végétation naturelle selon une proportion de 7% par rapport à la superficie totale du Bassin versant. Cette conversion s'est principalement faite au profit des zones de cultures selon une proportion de 95% par rapport à la superficie totale de la catégorie. Les conversions au niveau des autres catégories se sont faites selon des proportions négligeables, n'atteignant pas 1% de la zone d'étude (tableau 13).

Dans les zones de cultures, les conversions se sont faites pour près de 92% vers les zones de végétation naturelle et 6% vers les zones artificialisées par rapport à la superficie totale de cette catégorie (tableau 13).

Tableau 13: Bilan des conversions des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo entre 1965 et 2015

	Catégories en 1965		Catégories en 2015	Superficie (ha)	% /Sup.BV	%/Sup.catégorie
	Végétation naturelle	→	Zones de culture	279338,04	6,39	94,60
	Végétation naturelle	→	Zones artificialisées	408,99	0,01	0,14
	Végétation naturelle	→	Zones nues	14723,53	0,34	4,99
	Végétation naturelle	→	Surfaces en eau	817,97	0,02	0,28
	Total			**294470,55**	**6,74**	**100**
	Zones de culture	→	Végétation naturelle	18131,75	0,41	91,72
	Zones de culture	→	Zones nues	340,82	0,01	1,72
	Zones de culture	→	Zones artificialisées	1226,96	0,03	6,21
	Zones de culture	→	Surfaces en eau	68,16	0,00	0,34
	Total			**19699,53**	**0,45**	**100**
	Zones nues	→	Végétation naturelle	749,81	0,02	13,10
	Zones nues	→	Zones de culture	272,66	0,01	4,76
	Zones nues	→	Surfaces en eau	4635,18	0,11	80,95
	Zones nues		Zones artificialisées	68,16	0,00	1,19
	Total	→		**1022,47**	**0,47**	**100**
	Zones nues		Végétation naturelle	414,16	0,20	
	Total	→		**414,16**	**0,20**	**100**

Le bilan des conversions par catégorie n'est largement positif que pour les zones de culture (figure 16) Il est cependant de 6 % au niveau de la végétation naturelle, 5%au niveau des zones dénudées, et moins de 2% pour les surfaces en eau.

Le bilan négatif de la catégorie végétation naturelle traduit la tendance à la dégradation de la végétation surtout ligneuse de cette zone.

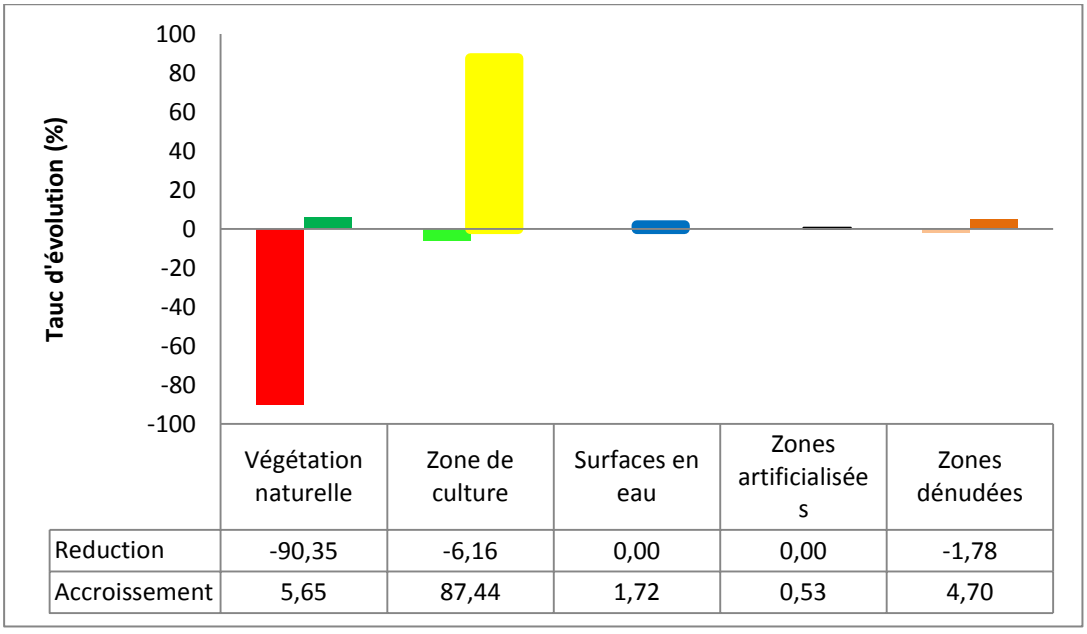


Figure 16: Bilan des superficies converties des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo entre 1965 et 2015

1.4 **CONCLUSION**

L'exploitation et l'analyse de la cartographie diachronique des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo, fait état d'une régression des écosystèmes naturels avec des tendances négatives si des mesures d'atténuation ne sont pas prises

Globalement la dégradation des écosystèmes du Ferlo traduite par cette cartographie diachronique est perceptible sur le terrain à partir des états suivants :

- la réduction et la fragilisation du couvert végétal dues à la sécheresse et à l'action anthropique (coupes abusives, feux de brousse) ;
- la rareté de certaines essences ligneuses comme *Mitragyna inermis*, *Grewia bicolor*, *Cordyla pinnata*, *Piliostigma reticulatum*, *Sterculia setigera* ;
- l'ensablement et l'envasement des mares ;
- la presque disparition d'espèces herbacées comme *Eragrostis pilosa* et *Crotalaria retusa* à cause du surpâturage ;
- les modifications adaptatives du milieu dominé globalement, par des formations arbustives à *Balanites aegyptiaca*, *Pterocarpus lucens* et *Guiera senegalensis* ;
- la perte de la biodiversité animale et végétale ;
- La fragilisation des aires protégées du fait des empiétements ;
- la détérioration visible des terres par la compaction et l'érosion surtout hydrique mais également éolienne à certains endroits.

Toutes ces pratiques s'expliquent par la pauvreté qui limite l'accès aux intrants, les politiques en matière d'hydraulique rurale (forage) qui favorise la forte concentration des troupeaux dans la zone, le manque d'IEC (information-éducation-communication) sur les bonnes pratiques, la faiblesse des moyens des services techniques censés veiller sur l'application des textes. Il s'y ajoute la topographie de la zone et l'intensité des pluies.

Les feux de brousse ont pour principales causes directes la négligence des jeunes bergers et la pratique du brûlis qui est souvent pratiquée pour nettoyer les champs ou pour augmenter la production de gomme à *Acacia senegal*.

Le compactage résulte de la forte concentration des troupeaux dans la zone du fait de la présence de forage et de mares. Les troupeaux de dromadaires jouent un rôle particulièrement important dans ce phénomène.

L'érosion hydrique (ravinement, érosion en nappe) est la conséquence de la déforestation, combinée à l'accélération du ruissellement et à la pratique du labour dans le sens de la pente. La déforestation est due surtout à la pauvreté et au manque de moyens des services techniques. Quant à l'accélération du ruissellement, elle s'explique par la topographie et l'intensité des pluies, mais elle est aggravée par le déboisement.

La baisse de fertilité est le résultat de longues années d'exploitations sans apport conséquent de fertilisants. Cela s'explique par la pauvreté et par les changements intervenus dans les politiques agricoles (suppression de certaines subventions).

L'ensablement et l'envasement des mares sont causés par le déboisement important dans le Bassin versant et l'accélération du ruissellement. Les causes indirectes sont la pauvreté, la topographie et le manque d'éducation et de sensibilisation.

Malgré cette situation, des mesures sont prises même si elles sont pour l'instant assez localisées, pour développer des actions dites de gestion durable des écosystèmes en vue de valoriser la terre et d'en diminuer les effets néfastes dus à la dégradation. Parmi ces bonnes pratiques, on peut citer la pratique de l'agroforesterie, la RNA (régénération naturelle) avec la conservation et la protection de *Acacia senegal,* mais également d'autres espèces fruitières forestières comme le *Ziziphus mauritiana* dans quelques champs. Nous avons également noté dans la zone des efforts de conservation d'arbres dans les champs d'où la création et l'existence de parcs arborés à *Faiderbia albida*, et *Sclerocarya birrea* associé au *Combretum glutinosum.*

Chapitre II : SCENARIS D'EVOLUTION DES ECOSYSTEMES DANS LE BASSIN VERSANT DU FERLO

Durant ces 50 dernières années, tous les écosystèmes mondiaux sont confrontés à des perturbations importantes qui constituent des menaces sur plusieurs espèces. La perte de biodiversité devient ainsi une préoccupation majeure dans le monde, et sa préservation mobilise aussi bien les chercheurs que les décideurs politiques et la société civile. Malgré tous ces efforts, l'érosion de la biodiversité continue d'affecter l'environnement biophysique et les conditions de vie des populations du monde, induisant ainsi une modification de la composition floristique, de la structure de la végétation et une diminution de la disponibilité des ressources biologiques. Cela signifie donc qu'il n'existe pas encore un cadre harmonisé et éprouvé scientifiquement permettant, une gestion durable des écosystèmes, d'identifier et d'anticiper sur ceux qui affichent des possibilités de dégradation ou d'effondrement. La mise en place de ce dispositif nécessite d'abord une meilleure compréhension non seulement de la quantité et de la répartition spatiale des écosystèmes mais également et surtout l'identification des causes de leur dégradation. Cela nécessite donc des outils efficaces d'identification et de suivi de ce phénomène utilisant des indicateurs capables de ressortir de façon spatio-temporelle les changements et leurs causes qui affectent les écosystèmes. A cet effet, le concept de Liste Rouge des Ecosystèmes proposés par la Commission de Gestion des Ecosystèmes (CGE) de l'UICN essaie d'apporter une solution à ce processus à partir d'une boite à outils comprenant un certain nombre de critères standards d'évaluation des écosystèmes.

Le processus à l'origine du développement des critères de la Liste Rouge des Écosystèmes a été lancé avec la résolution 4.020 lors du quatrième Congrès Mondial de la Nature en 2008. Il a été par la suite été consolidé par la Résolution 5.055, adoptée par le cinquième Congrès Mondial de la Nature en 2012. Ce processus a abouti à l'adoption des Critères et Catégories de la Liste Rouge des Écosystèmes de l'UICN en mai 2014. Cette initiative découle d'un constat au niveau mondial relatif à la Liste Rouge des Espèces Menacées de l'UICN qui constitue l'inventaire mondial le plus complet et le plus fiable de l'état de conservation global des espèces végétales et animales. Elle s'appuie sur une série de critères précis pour évaluer le risque d'extinction, validée par concertation d'experts, et se fonde sur une base scientifique des espèces concernées. Elle a pour vocation de mobiliser l'attention du public et des responsables politiques sur l'urgence et l'étendue des problèmes de conservation de ces espèces, ainsi qu'à inciter la communauté internationale à agir en vue de limiter le taux d'extinction. Cependant, ce dispositif reconnu par la communauté scientifique mondiale souffre d'une lenteur de sa réalisation qui n'arrange pas compte tenu de l'urgence de la situation. En effet, malgré tous les efforts, en 2010, le statut de seulement 47 978 des 1 740 330 espèces connues dans le monde a été évalué pour une possible inclusion dans la Liste Rouge de l'UICN (IUCN 2010a), compte non tenu de la nécessité de régulièrement réévaluer ces espèces. De plus, des listes rouges des écosystèmes pourraient indiquer des zones dans lesquelles des extirpations risquent de se produire suite à la dette d'extinction, conséquence de la perte et du morcellement des habitats (Terborgh 1974 ; Terborgh et al. 1997 ; Tilman et *al.*, 1994), car un déclin de l'étendue et l'état d'un écosystème peut précéder la perte des espèces qu'il contient (Rodriguez et *al*, 2011).

Les fondements de la Liste Rouge des Écosystèmes de l'UICN reposent sur les Critères et Catégories de la Liste Rouge des Écosystèmes de l'UICN, cinq critères et huit catégories qui fournissent une méthode cohérente pour évaluer le risque d'effondrement des écosystèmes. Les huit catégories de risque sont : Effondré (CO), En Danger Critique (CR), En Danger (EN), Vulnérable (VU), Quasi Menacé (NT), Non Concerné (LC), Données insuffisantes (DD) et Non Évalué (NE).

L'objectif est d'appliquer ces critères de la Liste Rouge aux écosystèmes du Bassin versant du Ferlo pour, non seulement évaluer leur devenir, mais aussi pour contribuer à cette réflexion scientifique dans le cadre de la dynamique des écosystèmes.

2.1 CARACTERISTIQUES BIOTIQUES

La végétation du Bassin versant du Ferlo se présente en fin de saison des pluies, à l'optimum de développement, sous la forme d'un tapis herbacé, plus ou moins continu, pouvant atteindre 50 cm à 1 m de hauteur. Il est composé essentiellement d'espèces annuelles. Ce tapis est parsemé d'arbres et d'arbustes fréquemment épineux, ne formant jamais une strate continue. (Akpo, 1992). Les écosystèmes naturels de la zone abritent des espèces ligneuses et herbacées diverses parmi lesquelles on peut citer *Acacia senegal, Guiera senegalensis, Balanites aegyptiaca, Combretum glutinosum, Faidherbia albida, Ziziphus mauritiana, Pterocarpus lucens, Combretum nigricans, Mitragyna inermis, Grewia bicilor, Tamarindus indic*a. Le tapis herbacé est constitué de quelques Cypéracées et de graminées. Les différents écosystèmes présents sont la forêt galerie relictuelle, les savanes et les steppes.

L'avifaune est très riche surtout en période de reproduction coïncidant avec la saison des pluies (septembre-octobre). Les Amphibiens sont représentés par les genres Rana et Bufo et les reptiles par les varans (*Varanus niloticus*, *Varanus axanthematicus*), les serpents et les lézards. Le cheptel (bovins, ovins, caprins et quelques dromadaires), la volaille, et les équins (chevaux et ânes) constituent les principaux animaux domestiques.

2.2 CARACTERISTIQUES ABIOTIQUES

Le Ferlo fait partie du Bassin sénégalo-mauritanien composé de roches sédimentaires d'âge secondaire, recouvertes de sédiments éoliens plus récents, d'alluvions et par endroit d'une croûte latéritique. L'altitude dépasse rarement 50 m sauf au niveau des accumulations dunaires importantes. Le substrat géologique est presque entièrement constitué de formations gréso-argileuses du Continental terminal, formations épaisses de plus de 100 m. Le Continental terminal est recouvert par les sables du Quaternaire qui donnent des formations sableuses dunaires (Seno) larges de 1 à 5 m. Ces dunes rouges forment des cordons dunaires asymétriques (tulle) hauts de 10 à 30 m et les parties basses du Ferlo sont des dépressions longitudinales à sols sablo argileux grisâtres localement calcareux et sols hydromorphes engorgés d'eau temporairement.

Au niveau des forêts galerie, le sol est généralement hydromorphe avec une texture variable allant du limon sableux au limon argileux en profondeur. Ces formations de vallée occupent une superficie de 32 125 ha soit 0,7 % de la zone d'étude. La savane boisée est juste localisée au nord-est et au sud-est avec un sol de type ferrugineux tropical. La savane arbustive et arborée est principalement localisée au sud et sud-est du Bassin versant entre les isohyètes 400 et 600 mm de pluies selon la normale pluviométrique

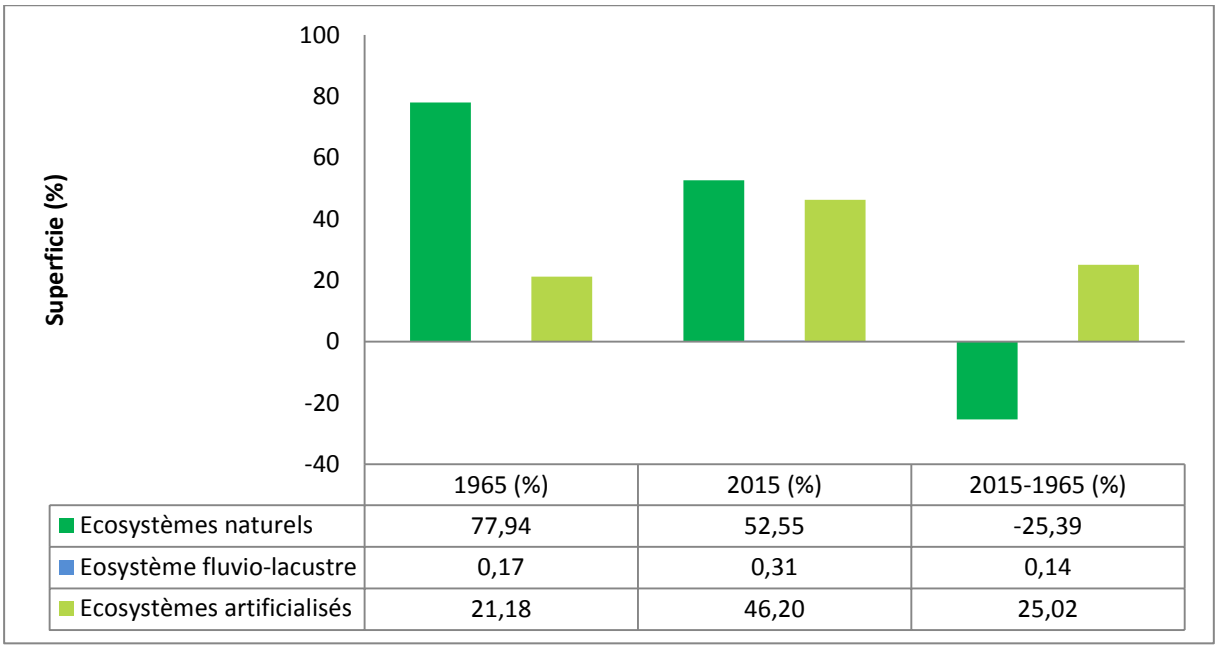
1961-1990. Les sols de la savane arbustive à arborée sont généralement ferrugineux tropicaux ou des lithosols.

Le réseau hydrographique est représenté par un chapelet de mares temporaires disposées dans le trajet de la vallée fossile du Ferlo et remplies temporairement par les eaux de pluies de juillet à décembre avec cependant par endroit certaines mares dont la durée d'ennoiement peut se poursuivre jusqu'en février.

La région du Ferlo est soumise à un climat de type tropical sec. La durée des saisons est liée au mouvement du Front Intertropical (FIT), qui est la trace au sol de la ligne de contact entre l'air tropical humide maritime ou mousson venant du sud-ouest et les masses d'air continentales ou harmattan venant de l'est et du nord-est. Le tracé du FIT varie en fonction de l'activité des vents engendrés par les anticyclones que sont l'anticyclone des Açores centré sur l'Atlantique nord, l'anticyclone de Sainte Hélène centré sur l'Atlantique sud et l'anticyclone Saharo libyen encore appelé haute pression du nord de l'Afrique.

2.3 DYNAMIQUE ET REPARTITION SPATIALE DES ECOSYSTEMES

La région naturelle du Ferlo est sous une forte emprise de l'homme. Le Bassin versant du Ferlo qui représente sa plus grande partie, constitue une parfaite illustration. Domaine jadis de la savane arborée, où les Andropogonneae vivaces s'entrelaçaient avec les graminées annuelles, l'écosystème de Bassin versant du Ferlo est réduit présentement à une steppe arbustive à arborée et/ou savane arbustive à arborée. Les écosystèmes naturels ont enregistré durant ces 50 dernières année une dégradation notoire se traduisant d'une part, par une modification des savanes en zones de steppe, et d'autre part, une conversion de ces écosystèmes en zones artificialisées ou dénudées (figure 17). Cela témoigne d'un processus de dégradation très avancé qui apparaît dans un cadre spatio-temporel négativement influencé par les facteurs anthropiques et climatiques.



	1965 (%)	2015 (%)	2015-1965 (%)
Ecosystèmes naturels	77,94	52,55	-25,39
Eosystème fluvio-lacustre	0,17	0,31	0,14
Ecosystèmes artificialisés	21,18	46,20	25,02

Figure 17: Evolution des superficies des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo entre 1965 et 2015

La répartition spatiale de la végétation au niveau du Bassin versant du Ferlo varie selon le type de sol et en fonction du gradient climatique. La partie nord se caractérise par des écosystèmes de steppe tandis que la zone sud est occupée par les savanes généralement arbustive ou arborée. D'une façon globale la steppe arbustive est présente au niveau des sols sableux alors qu'au niveau de la partie latéritique une strate ligneuse plus sou moins dense est présente. Les fonds de vallée sont occupés par les reliques des forêts galerie (figure 18).

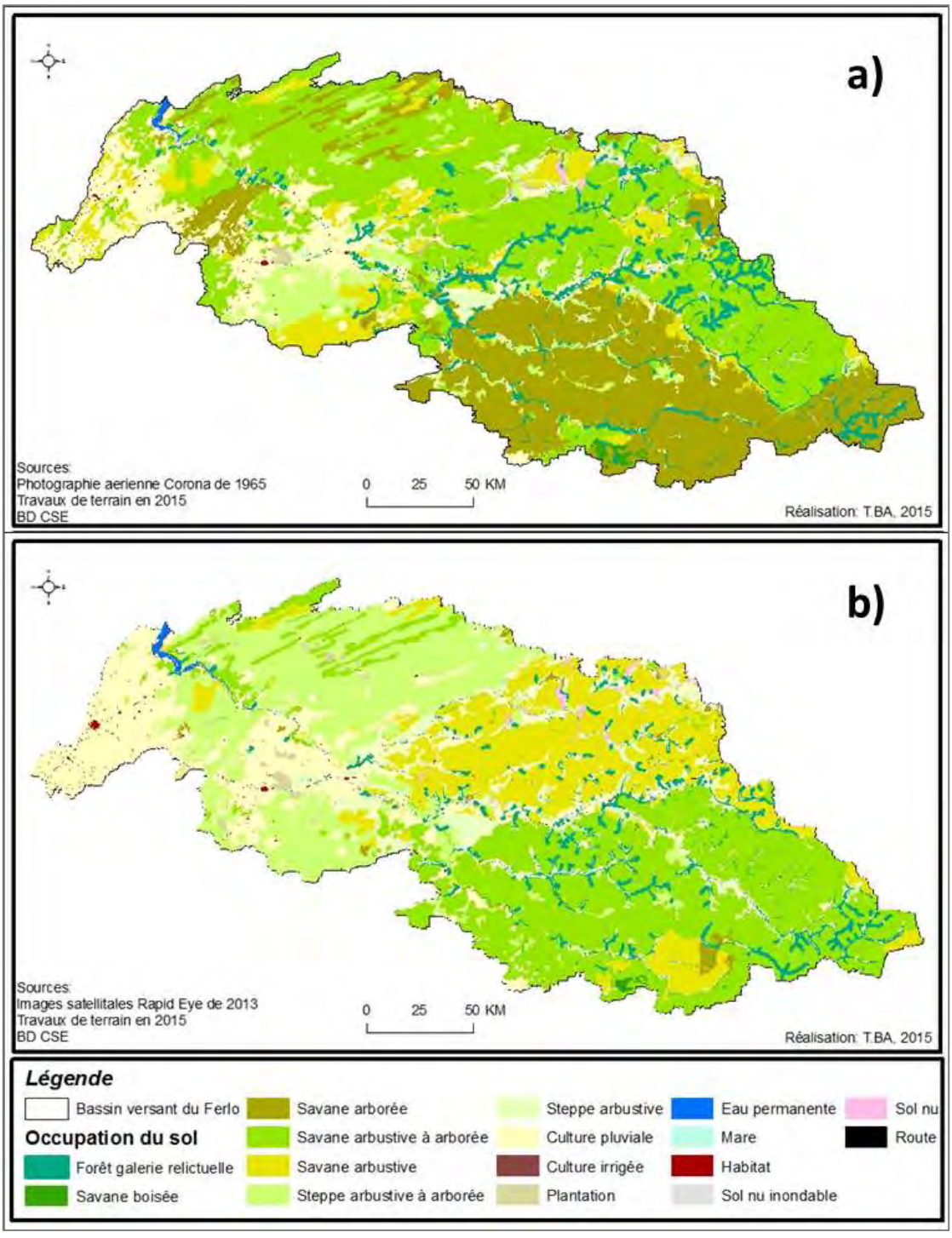


Figure 18: Répartition spatiale des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo en a) 1965 et b) 2015

2.4 PROCESSUS DE MENACES

L'exploitation des résultats obtenus à partir de la revue bibliographique, la cartographie diachronique, et les travaux de terrain, montre au niveau du Bassin versant du Ferlo, des types de dégradation, des pressions, des impacts et des réponses variées avec globalement un appauvrissement des écosystèmes dû principalement aux actions anthropiques. La régression de la diversité des espèces fourragères est le processus naturel le plus important dans les pâturages. L'érosion (hydrique et éolienne) a un impact négatif réel sur la végétation. Les espèces ligneuses et herbacées du Ferlo subissent l'impact des actions anthropiques. Les peuplements d'*Acacia senegal* font l'objet d'une saignée importante du fait de la valeur économique de sa gomme. D'autres espèces notamment *Combretum glutinosum*, *Grewia bicolor* et de *Pterocarpus lucens* souffrent des coupes clandestines à cause de leur bois de chauffe de grande qualité. Le cycle des feux de brousse constitue également un élément important de la dynamique des pâturages au Ferlo. En effet, ce territoire est caractérisé par un tapis herbacé dense en fin de saison hivernale et donc des feux fréquents.

Au niveau des galeries forestières, l'érosion hydrique est l'un des processus naturels le plus important. A cela, s'ajoutent les coupes clandestines de bois et les feux de brousse.

Dans les vallées, le processus naturel est l'érosion hydrique affectant les profils des vallées (fossiles le plus souvent) modifiant donc les berges et les talwegs par des processus de ravinement et de de colmatage. La pratique de la culture dans ces vallées favorise l'accélération des dépôts sédimentaires.

Les processus naturels importants constatés au niveau des mares sont l'assèchement précoce, l'ensablement et l'érosion hydrique. Les principaux impacts humains sont les surcharges des points d'eau dues à la taille des troupeaux, les coupes des arbres tout autour des mares, les feux de brousse et la perturbation de la faune sauvage par le bruit et les odeurs.

Au niveau de la faune, la péjoration climatique des trente dernières années a fortement entamé les effectifs. La faune de la zone est influencée par les biotopes où existent les mares qui étaient colonisées par plusieurs espèces d'oiseaux paléarctiques qui y nidifiaient surtout. Le Ferlo servait jadis de zone de repli en hivernage de la faune se déplaçant de la Réserve de Biosphère du Niokolo Koba vers le Nord (Réserve de Faune du Ferlo). Ces migrations étaient observées pendant la saison des pluies et se poursuivaient jusqu'à la fin de celles-ci. Pour les mammifères, le cas le plus probant pour la zone est certainement le mouvement séculaire connu et observé entre les zones trop humides du Parc National de Niokolo Koba en saison des pluies et les zones moins humides du Ferlo. Les impacts de l'action de l'homme sur cette faune s'observent à travers le braconnage, les feux de brousse, les coupes abusives des arbres (habitats de la faune). L'action anthropique est également à l'origine de la forte diminution de la migration de la faune de l'est du Sénégal vers le Ferlo, du fait : i)de l'élevage extensif pratiqué par les bergers qui n'hésitent pas à tuer les animaux carnivores pour protéger leur bétail ou à tuer les animaux herbivores pour se nourrir ; ii) l'intrusion dans les milieux sauvages de puits et forages entraînant ainsi une concentration du bétail et un surpâturage sur des dizaines de kilomètres carrés ; iii)l'assèchement rapide des mares qui aboutit à une concentration du bétail autour des points d'eau restants ; iv) l' implantation de nouveaux villages qui morcelle ainsi le milieu

naturel et les habitats destinés aux migrations ; la perturbation de la quiétude de la faune ; etc.

2.5 ESSAI D'APPLICATION DES CRITERES

Il importe de noter qu'au début de toute évaluation, tous les types d'écosystème sont considérés comme Non Evalués (NE) pour tous les critères. L'étape suivante consiste à déterminer s'il existe ou non des données adaptées à l'application des critères, ce qui requiert des recherches de données dans la littérature scientifique, rapports inédits, opinion des experts, comptes rendus historiques, cartes passées et présentes, images satellites ou n'importe quelle autre source de données pertinentes. Si le conseiller décide de ne pas appliquer un critère, le résultat de l'évaluation de risque pour ce critère demeure Non Évalué. Si un effort de recherche raisonnable indique que les données pertinentes ne sont pas disponibles pour réaliser l'évaluation au regard d'un critère, le résultat de l'évaluation de risque pour ce critère est Données Insuffisantes (DD). La différence entre Non Évalué et Données Insuffisantes est que la mention Non Évalué implique qu'aucune tentative n'a été menée pour obtenir les données pertinentes et évaluer l'écosystème en fonction de ce critère. Si une tentative acceptable a été menée, mais les données ne sont pas disponibles ou sont insuffisantes, la catégorie Données Insuffisantes doit être utilisée.

Notre étude a ciblé au niveau du Bassin versant du Ferlo, les écosystèmes qui affichent une évolution régressive à l'issue de l'étude de la dynamique traitée dans le chapitre III de ce document. Il s'agit de : i) la forêt galerie ; ii) la savane boisée ; iii) la savane arborée ; iv) la savane arbustive à arborée. Les autres écosystèmes qui affichent une évolution progressive d'après les résultats de la cartographie diachronique traitée au chapitre III, bien que non évalués seront versés dans la catégorie LC (Préoccupation mineure), tenant compte des pressions surtout anthropiques dont ils sont victimes.

Cette évaluation se fait selon la figure 19 ci-dessous qui résume de façon globale les différentes étapes et mécanisme du processus.

Figure 19: Mécanismes de l'effondrement des écosystèmes et symptômes du risque d'effondrement (Keith et al. 2013)

La structuration des catégories découlant de l'application des critères est décrite dans la figure 20 partant du niveau initial, sans menace vers l'effondrement de l'écosystème.

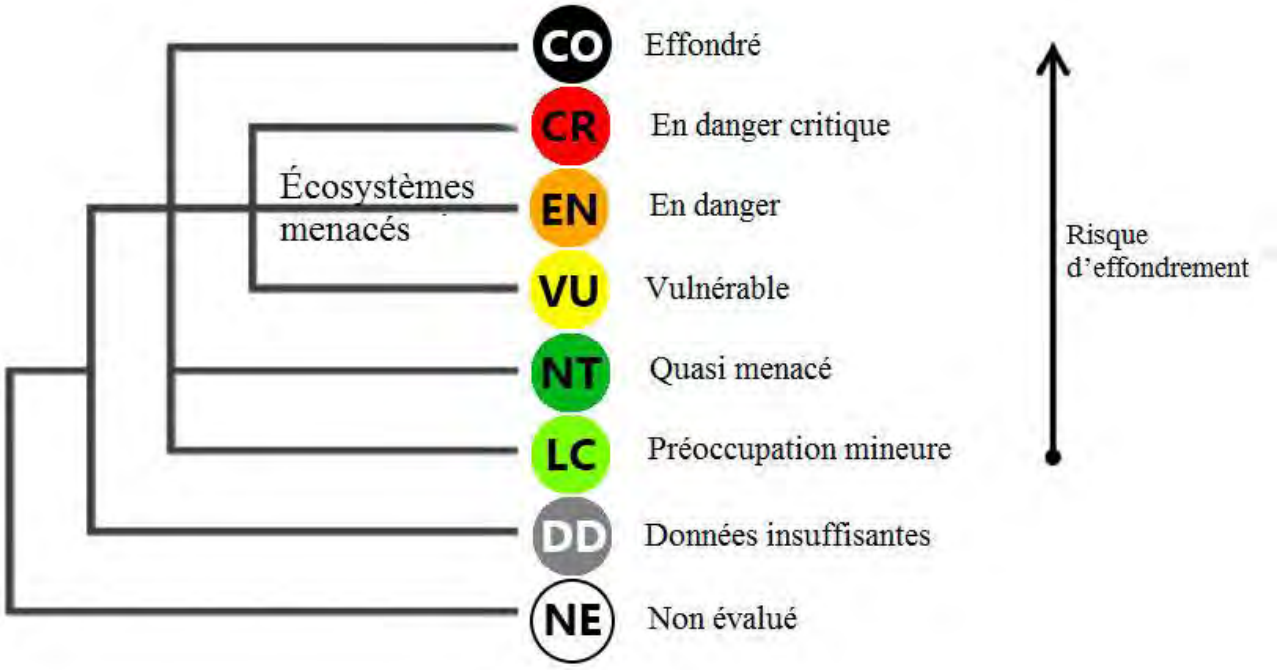


Figure 20: Structure des catégories de la Liste Rouge des Écosystèmes de l'UICN (Keith et al. 2013)

2.5.1 La forêt galerie

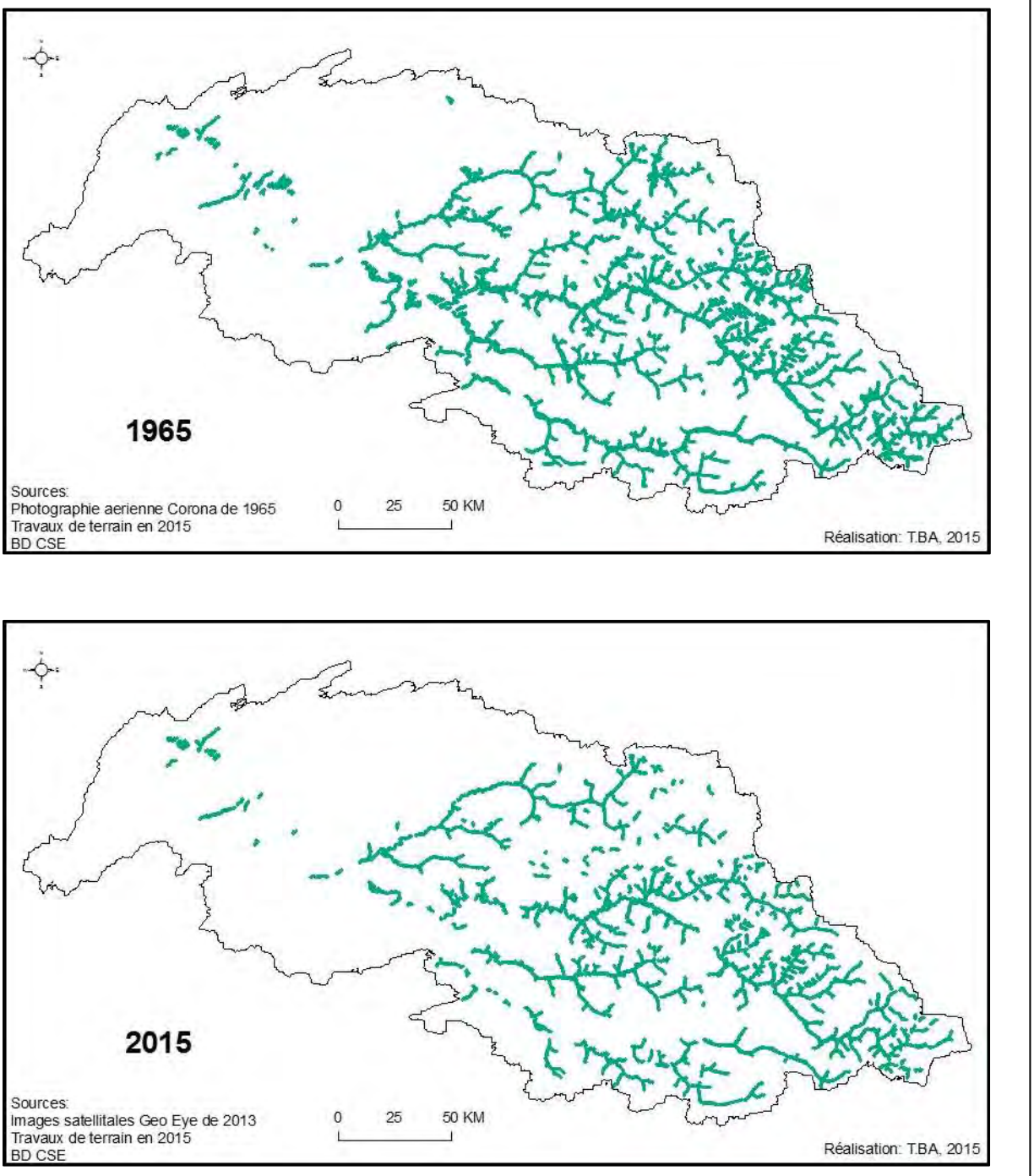


Figure 21: Distribution de la forêt galerie en 1965 et en 2015 dans le Bassin versant du Ferlo

Critère A : Réduction de la distribution spatiale

A1 : La cartographie diachronique de l'occupation du sol sur un intervalle de 50 ans montre une évolution régressive de l'écosystème qui passe de 958, 6 km² en 1965 à 348 km² en 2015b (figure 21), soit une perte annuelle linéaire de 12,2km² et un taux proportionnel de déclin annuel de 2%. Sur cette période de 50 ans, le taux de déclin absolu (TDA) égal ici aux taux de déclin proportionnel, est de 64% selon le modèle de *Keith et al*, 2013. L'écosystème est donc catégorisé **EN** (EN Danger) selon le critère A1.

A2 : Toujours partant de cette cartographie diachronique, traduisant cette évolution régressive de l'écosystème de l'ordre de 12,2 km² par an, la projection sur une période de 50 à partir de 2015 aboutit à un déclin absolu de plus de 100% (175%). En se basant sur la version 2.0 des critères d'évaluation, et le taux de déclin estimé à plus de 100 %, l'écosystème est classé dans la catégorie **CO** (Effondrement).

A3 : Fautes de données datant des années 1750, le statut de l'écosystème est donc **DD** selon A3.

Critère B : Distribution géographique restreinte

B1 : La cartographie de l'occupation du sol de la zone d'étude en 2015 montre que la forêt galerie occupe une superficie de 348 km² ; l'aire du plus petit polygone convexe (zone d'occurrence) l'englobant est estimée à 35 169 km² (figure 22) donc inférieure à 50 000 km². Cela, combiné au processus de dégradation continue de l'écosystème constatée, notamment la baisse de son étendue entre 1965 et 2015 (voir Critère A2), confère à cet écosystème le statut de Vulnérable (VU) selon les sous critères B1a et B1c.

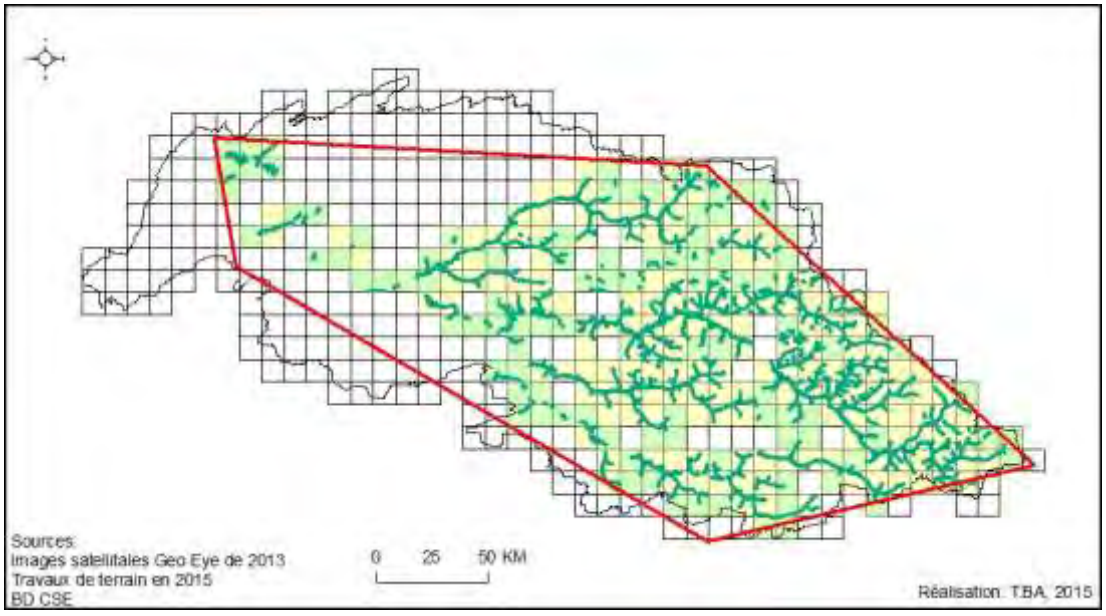


Figure 22: Zone d'occurrence (rouge) et la zone d'occupation (jaune) de la forêt galerie

B2 : Si nous superposons une maille (grille) de 10 X10 km sur la forêt galerie (Figure 22), nous constatons que cet écosystème est présent au niveau de 261 grilles sur les 510 de la zone d'étude. Parmi ces 261 grilles, 98 (en vert) contiennent moins de 1 km²de la superficie de l'écosystème. Minimisant les mailles qui contiennent des superficies très

faibles (< 1 km²) dont la contribution à la dissémination du risque est négligeable, la zone d'occupation(*AOO*) est estimée à 163 mailles (en jaune). Cette *AOO* dépasse le seuil qui permet la classification de l'écosystème dans une catégorie de menace conformément à B2. L'écosystème ne satisfaisant pas à ce sous critère, il est classé dans la catégorie globale de menace **LC** (Préoccupation Mineure).

B3 : L'écosystème se trouvant globalement le long de la vallée fossile du Ferlo et des dépressions humides, donc dans moins de 5 localités. Compte tenu de la pression anthropique relative à la coupe de bois et à la pratique de l'agriculture entrainant une érosion continue de cette formation, il est aussi classé dans la catégorie **VU**, d'après le sous critère B3.

Critère C : Dégradation de l'environnement

La combinaison du pourcentage de sévérité et la valeur de l'étendue de l'écosystème devrait permettre de l'évaluer par l'application du sous critère C2b. Le pourcentage de sévérité peut se calculer à partir des données climatiques, notamment la valeur de la pluviométrie de l'année 1965, celle de 2015, et la valeur du minimum critique pour les forêts galerie en zone sahélienne.

Sur les 50 années d'analyse (1965-2015) de la pluviométrie au niveau des stations se trouvant dans ou tout près de la zone d'étude (Linguère, Matam, Ranérou, Louga, Bakel, Goudiry) on compte plus d'années à anomalies pluviométriques négatives (la pluviométrie reste inférieure à la normale) que positives. Ceci témoigne de la sévérité et de l'intensité de sécheresse récente comme partout ailleurs au Sahel (CSE, 2005). En effet, les déficits ont nettement pris le pas sur les excédents qui sont devenus épisodiques. Mais cela ne suffit pas pour déduire la valeur du minimum critique permettant d'évaluer l'écosystème à partir du critère C. Le statut affecté est alors DD (manque de données).

Ici il est également possible d'utiliser les informations sur les différents scenarii climatiques et d'évaluer l'écosystème en fonction de ces derniers.

Critère D : Perturbation des processus et interactions biotiques

Parmi, les perturbations pouvant affecter l'équilibre biotique de l'écosystème, figurent les feux de brousse qui sont une pratique utilisée dans la zone par les agriculteurs et qui est néfaste à la végétation naturelle. Les superficies brûlées dans la zone d'étude sont connues mais ne sont pas suffisantes pour évaluer l'écosystème selon le sous critère D2b. Il existe également des faits attestant de la diminution de la densité des arbres et de la richesse en espèces dans cet écosystème. Malheureusement, il n'existe pas suffisamment de données disponibles spécifiquement pour les forêts galerie du Bassin versant du Ferlo pour tirer des conclusions fiables sur les changements dans la densité des arbres et la richesse en espèces dans cet écosystème. Le statut de l'écosystème selon le critère D est donc DD **(données manquantes)**.

Critère E : Analyse de risque quantitatif

Aucune analyse quantitative n'a été réalisée pour évaluer le risque d'effondrement des écosystèmes des forêts galeries du Bassin versant du Ferlo. Le statut de l'écosystème est donc **DD** selon le critère E.

2.5.2 La savane boisée

Critère A :

A1 : La cartographie diachronique de l'occupation du sol sur un intervalle de 50 ans montre une évolution régressive de l'écosystème qui passe de 121,5 km² en 1965 à 53,6 km² en 2015, soit une perte annuelle linéaire de 1,3km² et un taux proportionnel de déclin annuel de 1,6%. Sur cette période de 50 ans, le taux de déclin absolu de même que le taux de déclin proportionnel est de 56% selon le modèle de *Keith et al*, 2013. L'écosystème est donc catégorisé **EN** (EN Danger) selon le critère A1.

A2 : Toujours partant de cette cartographie diachronique, traduisant cette évolution régressive de l'écosystème de l'ordre de 1,36 km² par an, la projection sur une période de 50 à partir de 2015 aboutit à un déclin absolu de plus de 100% (126%). En se basant sur la version 2.0 des critères d'évaluation, et le taux de déclin estimé à plus de 100 %, l'écosystème est classé dans la catégorie **CO** (Effondrement).

A3 : Fautes de données datant des années 1750, le statut de l'écosystème est donc **DD** selon A3.

Critère B :

B1 : L'aire du plus petit polygone convexe (zone d'occurrence) englobant cet écosystème obtenu à partir de la cartographie des images Rapid Eye de 2013 est estimée à 1578 km² (figure 23) donc inférieure à 20 000 km². Cela, combiné au processus de continu de la baisse de son étendu entre 1965 et 2015 (voir Critère A2), confère à cet écosystème le statut de **CR** (En Danger Critique) selon les sous critères B1.

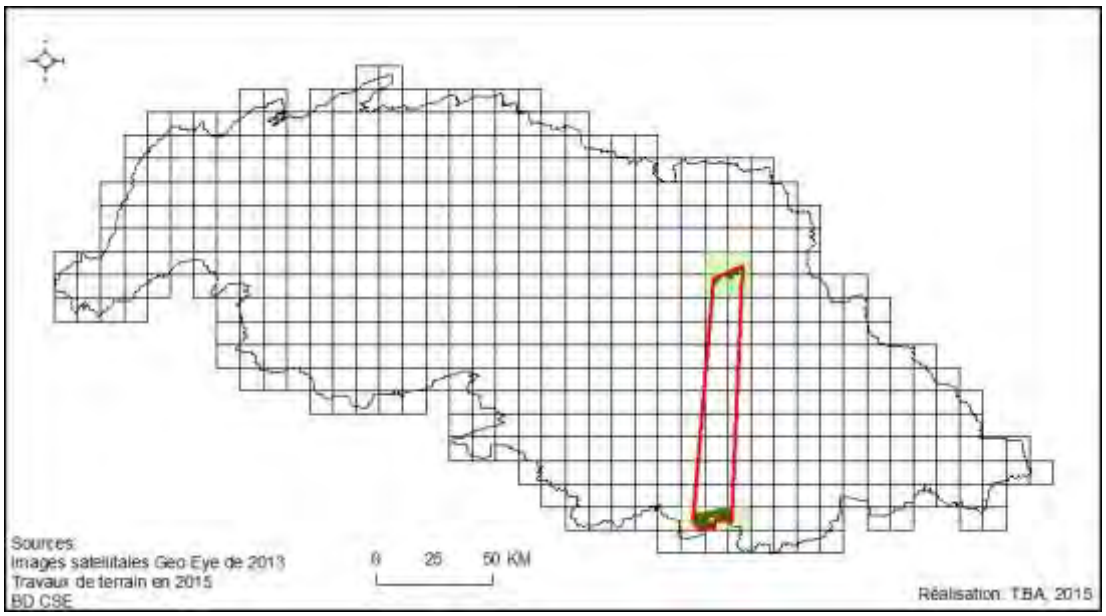


Figure 23: Zone d'occurrence (rouge) et la zone d'occupation (jaune) de la savane boisée

B2 : La savane boisée cartographiée à partir des images satellitales de 2013, occupe 7 mailles de 10 km x 10 km. Parmi ces dernières, 2 seules contiennent plus de 1km² de superficie de la savane. Le statut de l'écosystème est alors **CR** selon le critère B2.

B3 : La cartographie diachronique et les travaux de terrain de 2015, permettent de conclure à une probable disparition de l'écosystème, mais d'après la figure 23, on peut

déduire que l'écosystème existe sur moins de cinq localités (que l'on peut considérer ici comme des sous-ensembles regroupant ce type d'écosystème). En plus, si l'on se réfère au critère A, il apparait que l'écosystème risque de disparaître, et donc il peut être rangé dans la catégorie **VU** suivant le critère B3b.

Critère C :

Le même raisonnement développé pour la forêt galerie conduit au statut de **DD** selon le critère C pour cet écosystème.

Critère D : Le statut de l'écosystème selon le critère D est donc DD (données manquantes).

Critère E :

Aucune analyse quantitative n'a été réalisée pour évaluer le risque d'effondrement des écosystèmes de la savane boisée du Bassin versant du Ferlo. Le statut de l'écosystème est donc **DD** selon le critère E.

2.5.3 La savane arborée

Critère A :

A1 : Les superficies de la savane arborée sont passées de 12 142 km² en 1965 à 381 km² en 2015, soit une perte annuelle linéaire de 235 km² et un taux proportionnel de déclin annuel de 6,7%. Le taux de déclin absolu, comme le taux de déclin proportionnel est de 97% selon le modèle de *Keith et al*. L'écosystème est donc catégorisé **CR** (EN Danger Critique) selon le critère A1.

A2 : En se basant sur perte de superficie de l'écosystème de l'ordre de 235 km² par an, la projection sur une période de 50 à partir de 2015 aboutit à un déclin absolu de plus de 100%, classant la savane arborée dans la catégorie **CO** (Effondrement).

A3 : Il n'existe pas suffisamment de données historiques sur la zone d'étude pour pouvoir évaluer les différents écosystèmes depuis les années 1750. Les données spatiales les plus anciennes couvrant la zone, remontent aux années 60. Le statut de l'écosystème est donc DD selon A3.

Critère B :

B1 : L'aire du plus petit polygone convexe (zone d'occurrence) englobant cet écosystème obtenu à partir de la cartographie des images Géo Eye de 2013 est estimée à 41 688 km² (figure 24) donc supérieure à 20 000 km² et inférieure à 50 000 km². Cela, combiné au processus de continu de la baisse de son étendu entre 1965 et 2015 (voir Critère A2), confère à cet écosystème le statut de **VU** (Vulnérable) selon les sous critères B1.

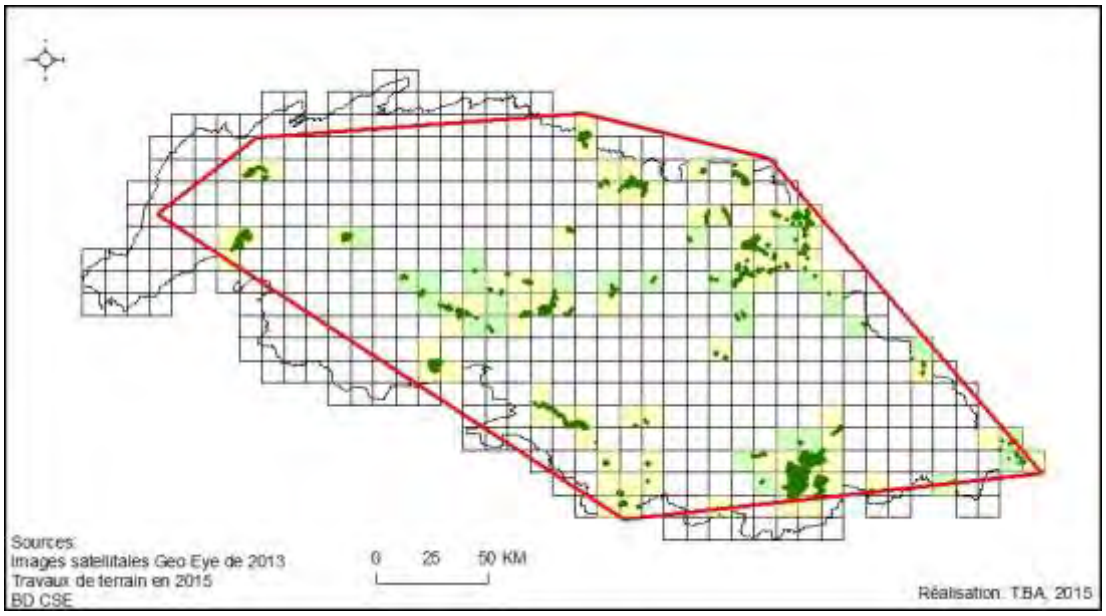


Figure 24: Zone d'occurrence (rouge) et la zone d'occupation (jaune) de la savane arborée

B2 : La savane arborée cartographiée à partir des images satellitales de 2013, occupe 105 mailles de 10 km x 10 km dont 77 contiennent plus de 1km² de superficie. Cette zone d'occupation dépasse le seuil permettant la classification de l'écosystème dans une catégorie de menace conformément à B2. Son statut est alors **LC** (Préoccupation mineure).

B3 : La cartographie diachronique et les travaux de terrain de 2015, permettent de conclure à un probable effondrement de l'écosystème, mais d'après la figure 24, on peut déduire que l'écosystème existe sur plus de 5 localités En plus, si l'on se réfère au critère A, il apparait que l'écosystème risque de disparaître, et donc il peut être rangé dans la catégorie **NT** (Quasi Menacé) suivant le critère B3b.

Critère C :

Le même raisonnement développé pour la forêt galerie nous conduit au statut de **DD** selon le critère C pour cet écosystème.

Critère D :

Le statut de l'écosystème selon le critère D est donc DD (données manquantes).

Critère E :

Aucune analyse quantitative n'a été réalisée pour évaluer le risque d'effondrement des écosystèmes de la savane arborée du Bassin versant du Ferlo. Le statut de l'écosystème est donc **DD** selon le critère E.

2.5.4 La savane arbustive à arborée

Critère A :

A1 : L'écosystème passe de 16869 km² en 1965 à 13 867 km² en 2015, soit une perte annuelle linéaire de 60 km² et un taux proportionnel de déclin annuel de 0,4%. Sur cette période de 50 ans, le taux de déclin absolu comme le taux de déclin proportionnel est de

18%, donc inférieur à 30%. Selon le modèle de *Keith et al*, l'écosystème est donc catégorisé **LC** (Préoccupation mineure) selon le critère A1.

A2 : Toujours partant de cette cartographie diachronique, traduisant cette évolution régressive de l'écosystème de l'ordre de 60 km² par an, la projection sur une période de 50 à partir de 2015 aboutit à un déclin absolu de 21%. L'écosystème est également classé dans la catégorie **LC.**

A3 : Faute de données datant des années 1750, le statut de l'écosystème est donc **DD** selon A3.

Critère B :

B1 : L'aire du plus petit polygone convexe (zone d'occurrence) englobant cet écosystème, obtenue à partir de la cartographie des images Géo Eye de 2013 est estimée à 35 169 km² (figure 31) donc inférieur à 50 000 km². Ce résultat confère à cet écosystème le statut de **VU** selon les sous critères B1.

B2 : La savane boisée cartographiée à partir des images satellitales de 2013, occupe 302 mailles (figure 31) de 10 km x 10 km dont presque toutes contiennent plus de 1km² de superficie. Cette zone d'occupation dépasse le seuil permettant la classification de l'écosystème dans une catégorie de menace conformément à B2. Son statut est alors **LC** (Préoccupation mineure).

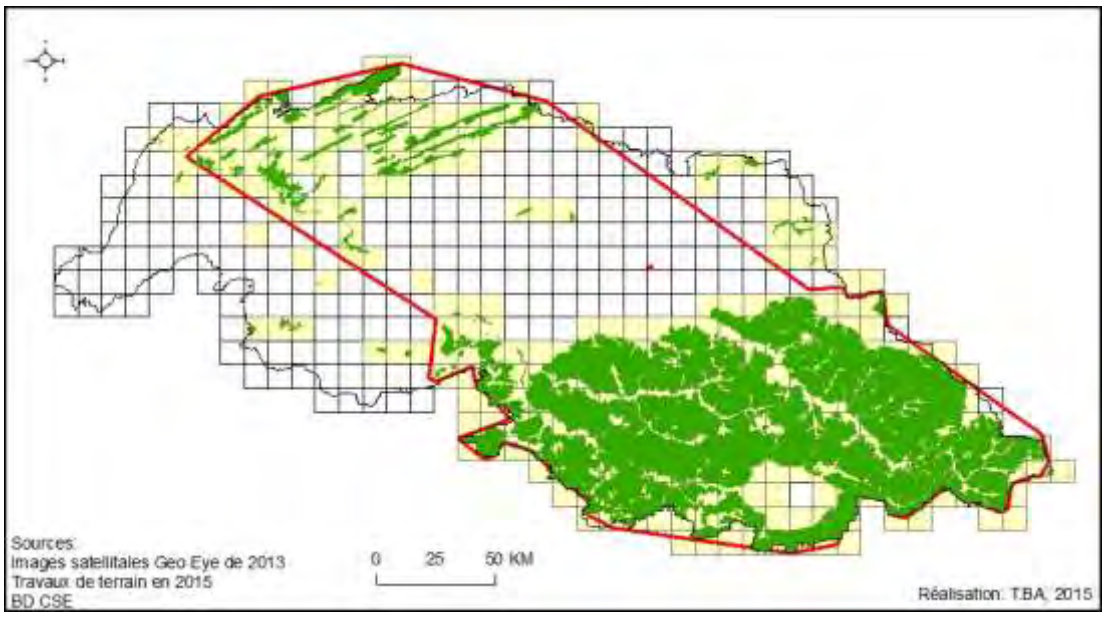


Figure 25: Zone d'occurrence (rouge) et la zone d'occupation (jaune) de la savane arbustive à arborée

B3 : La cartographie diachronique et les travaux de terrain de 2015, ont montré une évolution régressive de l'écosystème mais d'après la figure 25, on peut déduire que l'écosystème n'existe principalement que sur deux localités. En plus, du fait des coupes abusives, des feux de brousse et la pratique de la culture, cet écosystème pourrait continuer à se dégrader davantage si aucune mesure n'est prise. Il peut être rangé dans la catégorie **VU** suivant les sous critère B3 a et b.

Critère C :

Le même raisonnement développé partout ailleurs nous conduit au statut de **DD** selon le critère C pour cet écosystème.

Critère D :

Le statut de l'écosystème selon le critère D est donc DD du fait de manque de données.

Critère E :

Aucune analyse quantitative n'a été réalisée pour évaluer le risque d'effondrement des écosystèmes de la savane arbustive à arborée du Bassin versant du Ferlo. Le statut de l'écosystème est donc **DD** selon le critère E.

2.6 SYNTHESE DE L'APPLICATION DES CRITERES

Il est ressorti de cette évaluation (tableau 14 et figure 26) que la forêt galerie du Bassin versant du Ferlo qui est actuellement à un état relictuel, risque de disparaitre durant les 50 prochaines années si aucune mesure de restauration n'est mise en œuvre. Ce même risque d'effondrement concerne également la savane boisée et la savane arborée. La savane arbustive à arborée se trouve en état de vulnérabilité (VU) selon le sous critère B1, du fait principalement de sa localisation limitée et des pressions surtout humaines qui s'y exercent.

La savane arbustive, la steppe arbustive et la steppe arbustive à arborée, bien que non évaluées du fait de leur évolution progressive, peuvent être classées dans la catégorie LC (Préoccupation Mineure) pour inciter à leur gestion durable.

Tableau 14: Evaluation des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo selon la version 2.0 des critères de la Liste Rouge des Ecosystèmes (Keith et al 2013)

	A			B			C			D			E	
Ecosystème	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E	CUMUL
Forêt galerie	EN	CO	DD	VU	LC	VU	DD	DD	DD	DD	DD	DD	DD	**CO**
Savane boisée	EN	CO	DD	CR	CR	VU	DD	DD	DD	DD	DD	DD	DD	**CO**
Savane arborée	CR	CO	DD	VU	LC	NT	DD	DD	DD	DD	DD	DD	DD	**CO**
Savane arbustive à arborée	LC	LC	DD	VU	LC	VU	DD	DD	DD	DD	DD	DD	DD	**VU**
Savane arbustive	LC	LC	LC	LC	LC	LC	DD	DD	DD	DD	DD	DD	DD	**LC**
Steppe arbustive à arborée	LC	LC	LC	LC	LC	LC	DD	DD	DD	DD	DD	DD	DD	**LC**
Steppe arbustive	LC	LC	LC	LC	LC	LC	DD	DD	DD	DD	DD	DD	DD	**LC**

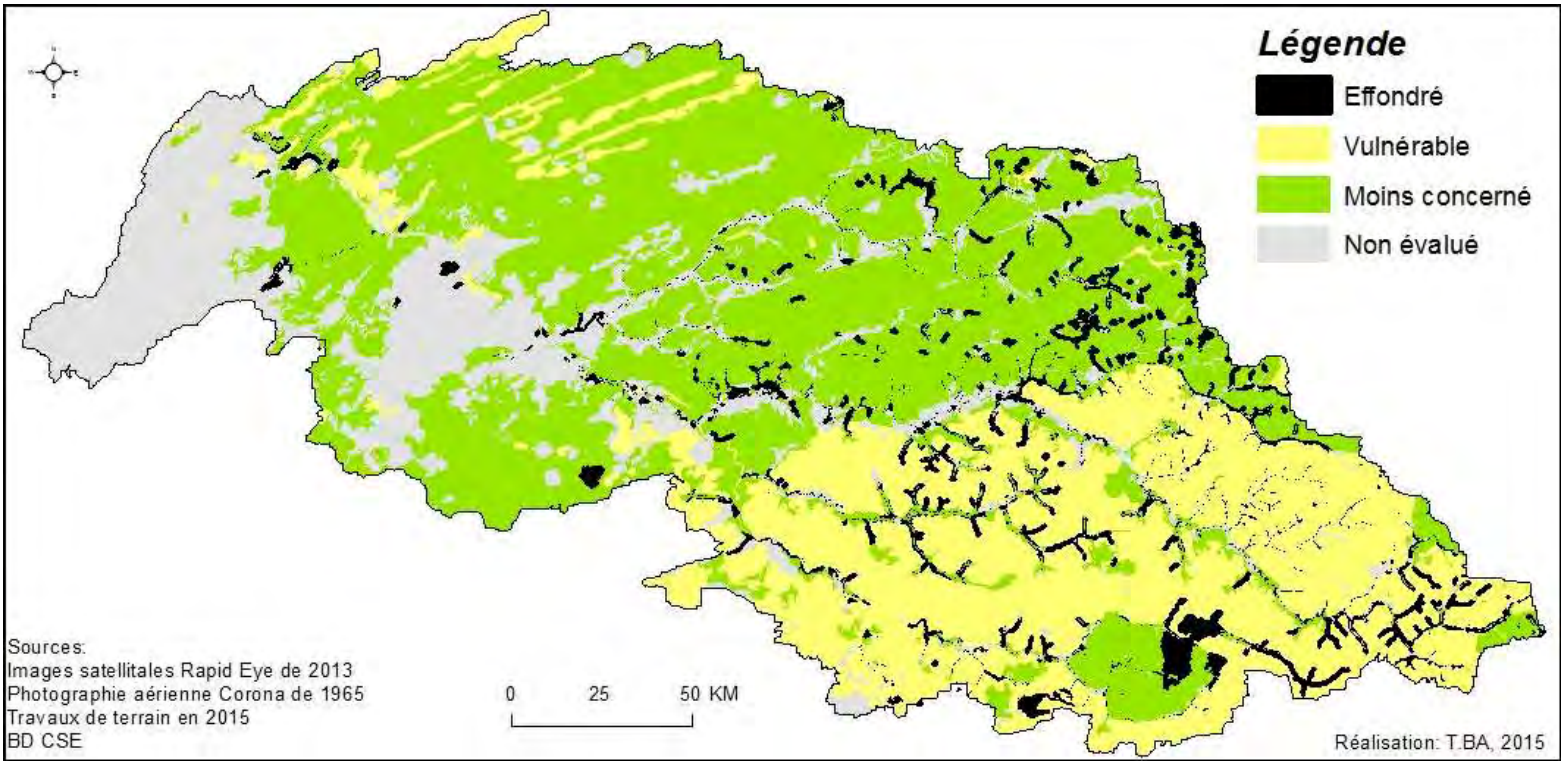


Figure 26: Statut des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo selon les critères de la Liste Rouge des Ecosystèmes

Chapitre III : DISCUSSION ET CONCLUSION

3.1 DISCUSSION

3.1.1 Dynamique spatio-temporelle des écosystèmes

L'analyse des résultats obtenus à partir de cette cartographie diachronique des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo, montre globalement une dégradation des écosystèmes naturels avec des tendances négatives si des mesures d'atténuation ne sont pas prises.

Ce phénomène est très inquiétant pour une zone dont l'économie est basée principalement sur l'exploitation de la végétation qui fournit le pâturage naturel pour l'alimentation du bétail et qui permet aux populations rurales de subvenir à leurs besoins par l'exploitation de divers produits ligneux et non ligneux (Akpo, 1990).

Cette évolution régressive de la végétation a commencé dès les années 1950 avec la construction de la digue de Nieti-Yone en 1951, puis celle de Keur Momar Sarr en 1956, faisant du lac de Guiers un réservoir d'eau douce presque permanent et asséchant progressivement le Ndiael, puis le Ferlo (Niang, 2011). A cela s'ajoute avec l'implantation dans les parcours naturels, de nombreux forages augmentant ainsi la charge animale et provoquant des auréoles de dégradation perceptibles sur un rayon de 5 km autour de chaque forage. Les nombreux aménagements hydro-agricoles dans la vallée et autour du Lac de Guiers ainsi que la réouverture de la digue de Keur Momar Sarr ont également beaucoup contribué à la dégradation de ce milieu du fait de la migration, puis la sédentarisation des éleveurs qui ne fréquentaient que temporairement cette zone.

Le bilan positif des conversions niveau des écosystèmes naturels traduit le fait que, malgré l'évolution régressive de cette catégorie, on note une faible régénération de la végétation dans quelques endroits comme les alentours de l'aire protégée de Younouféré traduisant cette remontée biologique localisée au Sahel dont Boudet (1977) avait fait cas. Le bilan positif au niveau des surfaces en eau est dû principalement à la réouverture de la digue de Keur Momar Sarr en 1988 après 32 ans de fermeture, depuis sa construction en 1956. Ce même état de fait est constaté au niveau des zones dénudées traduisant cette dégradation des écosystèmes du Bassin

Ces résultats viennent aussi confirmer les travaux de Ndong et *al* (2015) qui ont noté une évolution régressive du peuplement ligneux du Ferlo avec une très forte proportion d'espèces de faible hauteur et circonférence. De même Ba, (2011) et Diarra (2015) avaientt abouti aux mêmes résultats, respectivement sur la dynamique de l'occupation du sol des communes de Barkedji et Tessékéré. Le même constat est fait par Ndiaye et *al,* (2014) qui note également une diversité floristique plus importante au Ferlo méridional qu'au Ferlo septentrional.

En dehors des zones attenantes aux zones de peuplement sédentaire (proximité de la vallée du fleuve Sénégal) soumise à la pâture permanente et ancestrale, la végétation a connu un état relativement stable avant les années 1950, même si le diagnostic systématique de l'état du couvert était difficile (Benoît, 1988). C'est à partir des années 1950 que la végétation sahélienne va connaître des transformations importantes. Globalement de 1950 à nos jours, le couvert végétal sahélien a connu une baisse de

densité attribuable aux pratiques pastorales (feu de brousse), aux rongeurs et aux conditions climatiques sèches. Poupon (1977) a estimé qu'entre 1972 et 1976, 60% des arbres ont été détruits par la sécheresse à Pété Olé ? situé dans l'écosystème sahélien. On note par exemple une rareté des espèces végétales feuillues telles que *Sclerocarya birrea*.. Dans cette partie qui est la plus importante de l'écosystème sahélien, les transformations ont affecté autant la densité que la richesse spécifique. L'analyse de tous ces paramètres montre une réduction entre 1950 et 1990. Cette dégradation végétale est si importante qu'alors il était très difficile à une personne de pénétrer à pied ces formations végétales avant les années 1950, aujourd'hui, les parcourir en automobile ne présente aucune contrainte. La détérioration du couvert végétal se manifeste plus au sommet des dunes plus que dans les dépressions inter-dunaires (Benoît, 1988). On peut observer cependant dans les zones anciennement soumises à la pression humaine, c'est-à-dire la zone contiguë à la vallée du fleuve Sénégal, que la richesse spécifique a moins évolué que la densité végétale. En effet, on observe, au cours de la décennie 1980, le même éventail d'espèces végétales que dans la décennie 1950, alors que la densité végétale a baissé (Benoît, 1988). Les variations pluviométriques interannuelles expliquent largement les fluctuations de la phénologie des ligneux. Cependant, lors des années les plus arrosées, l'effet attendu est minimisé par la présence des prédateurs du feuillage ou des fleurs selon Poupon, (1980).

Une étude sur le suivi de la production primaire du Ferlo de 1981 à 1984 avait conclu à une chute qualitative et quantitative (perte du potentiel grenier) et attiré l'attention de l'opinion sur le changement de la composition floristique et l'apparition d'espèces non graminéennes (*Zornia glochidiata*, *Cassia occidentalis*, *Tribulus terrestris*), peu ou pas appétées par le bétail (Niasse, 1987 cité dans Sy, 2006). L'idée d'une dégradation des parcours sahéliens est par la suite soutenue par Boudet (1990). Sy (2006) a observé en 2005, qu'il n'existait plus que quelques reliques de zones à *Zornia glochidiata* au nord de la latitude de Tessékéré.

De façon générale, on note, jusque dans les années 1980, une tendance à une uniformisation de la diversité paysagère dans l'écosystème sahélien. Alors que dans la décennie 1950, en allant de la vallée du fleuve du Sénégal au nord à l'intérieur du Sénégal, vers le sud de la zone sahélienne, la distinction était nette entre les différentes unités paysagères, au milieu de la décennie 1980, la tendance était à l'homogénéisation de ces faciès paysagers de l'écosystème sahélien (Benoît, 1988 ; Diouf, 2001). En outre, une tendance au rajeunissement de la végétation sahélienne après les épisodes secs a été observée. Poupon (1980) et Diouf (2001) ont mis en évidence la formidable capacité de régénération de la flore sahélienne ; ce qui concorde avec l'étude de Boudet (1977) dans le Gourma malien. Les espèces suivantes *Boscia senegalensis* et *Guiera senegalensis* et *Balanites aegyptiac*a se sont illustrées dans cette forte résilience (Poupon, 1980).

Actuellement, cette zone jadis de la savane arborée dense avec des espèces comme *Cordyla pinnata*, *Combretum micranthum*, *Parkia biglosoba, Guiera senegalensis, Piliostigma reticulatum, etc,* est colonisée principalement par *Balanites aegyptiaca* et *Combretum glutinosum, Boscia senegalensis et Calotropis procera,* qui semblent plus adaptées aux conditions écologiques actuelles.

3.1.2 Application des critères de la Liste Rouge des écosystèmes menacés

L'essai d'application des critères de la Liste Rouge des Ecosystèmes sur ceux du Bassin versant du Ferlo a permis de documenter entièrement deux critères que sont la réduction de la distribution spatiale (critère A) et la distribution géographique restreinte (critère B). Les trois autres critères (C, D et E) n'ont pas été utilisés du fait de manque de données et d'informations. Mais compte tenu du fait que le résultat final de l'évaluation d'un écosystème s'obtient en faisant le cumul des différentes catégories, nous sommes parvenus à évaluer les écosystèmes qui sont caractérisés par une diminution de superficie et de de distribution spatiale entre 1965 et 2015.

Ces résultats sont conformes aux différents travaux traitant de la condition et tendances des écosystèmes du Ferlo, mais nous estimons que les résultats pourraient être plus exhaustifs si d'une part, nous disposions de données anciennes surtout sur les paramètres abiotiques, et d'autre part si les critères et leurs seuils avaient tenu en compte ce manque de données historiques surtout en Afrique, mais également d'autres paramètres accessibles et pouvant démontrer la dégradation d'un milieu naturel.

Ainsi l'application du critère A ne pose pas de problème. Cependant même si la réduction de la répartition spatiale d'un écosystème peut être un bon indicateur de sa vulnérabilité, il est important de préciser la nature de cette réduction car la baisse de superficie d'un écosystème peut être d'origine naturelle ou anthropique. A cet effet, classer comme menacé un écosystème dont la durée de vie est naturellement très courte pourrait ne pas être tout à fait conforme. Il serait ainsi pertinent d'ajouter à ce critère l'aspect anthropique. En outre, il se pose un problème relatif au seuil de 30 % qui semble élevé pour que l'écosystème soit classé dans une catégorie menacée. Est-ce qu'une perte de 25 % de la distribution ou des fonctions écologiques sur une période de 50 ans (dans le passé, l'avenir ou sur une période incluant les deux) ne reflète pas une menace sérieuse pour l'écosystème. Pour cela, seuil devrait être revu à la baisse jusqu'à 20 %. La projection sur 50 ans devrait aussi prendre en compte la résilience de certains écosystèmes. Le sous critère A3 sera difficile à appliquer au Sénégal et globalement en Afrique du fait de la quasi inexistence de données sur les 200 ans passés. Nous proposons de raccourcir cette période.

Le critère B semble ne pas poser de problème du point de vue application, mais exige néanmoins la cartographie de tout l'écosystème concerné ainsi que sa superficie et ses différentes localités ; ce qui peut poser un problème pour un évaluateur qui veut juste connaître le statut d'une zone particulière d'un écosystème.

Les critères C et D posent un problème relatif aux seuils qui ont été définis. En effet, suivant la taille de l'écosystème, les valeurs absolues des différents seuils peuvent être significatives ou non. Ainsi des valeurs relatives devraient être définies pour les différents seuils des critères C et D plutôt que des valeurs absolues ; ceci permettrait de prendre en compte la variation de la taille des écosystèmes en fonction des différents pays.

Le critère E est relatif aux données quantitatives sur les espèces comme par exemple l'évolution de la dynamique des espèces.

L'évaluation des écosystèmes devrait aussi s'appuyer aussi sur la dynamique des espèces principales (caractéristiques, clés de voute, indicatrices) et des critères devraient être

définis en se basant sur l'évaluation des espèces. En plus de la distribution et des critères portant sur les espèces, la fragmentation et aussi la résilience des écosystèmes devraient également être prises en compte.

3.2 CONCLUSION

Situé au nord du Sénégal entre les latitudes 14°30' et 16°10' nord et les longitudes 12°50' et 16°30' ouest, le Bassin versant du Ferlo a subi durant ces 50 dernières années des changements dans les modes d'occupation des terres, qui se sont traduites concrètement par une modification de la structure du paysage avec un déclin sensible de la quantité et de la qualité du couvert végétal. La dynamique des écosystèmes se traduit par une régression de la végétation naturelle de 3 780 196 ha en 1965 à 3 501 677 ha en 2015. L'espace agricole occupe actuellement 805 161 ha, alors qu'en 1965 elle s'étendait sur 540 794,86 ha.

L'analyse de l'évolution de l'occupation du sol a montré que 35% des terres sont restées à l'état initial (sans changement), 65% ont subi des modifications, et 7% se sont converties. Les modifications concernent essentiellement les zones de végétation naturelle qui ont enregistré une évolution régressive marquée par une baisse de superficie de la forêt galerie, de la savane boisée et de la savane arborée, au bénéfice de la savane arbustive et de la steppe. Les conversions ont affecté principalement les zones de végétation naturelle selon une proportion de 6,7% par rapport à la superficie totale du Bassin versant et cela au bénéfice des zones de culture. Cet accroissement progressif des superficies agricoles dans une zone à vocation pastorale soulève des inquiétudes à long terme.

Sur la base des critères de la Liste Rouges des écosystèmes de l'UICN (Rodriguez et *al*, 2010), les 4 écosystèmes naturels du Bassin versant du Ferlo étudiés, sont menacés mais à des degrés différents. La forêt galerie relictuelle et la savane boisée sont en danger avec des taux de déclin absolu, respectif de 64%, 56% entre 1965 et 2015. La savane arborée, avec un taux absolu de déclin de 97% sur les 50 dernières années est en danger critique. La savane arborée à arbustive affiche au cours des 50 dernières années, un taux de déclin absolu de 18%. La projection sur une période de 50 ans à partir de 2015 atteste d'un état d'effondrement de la forêt galerie, de la savane boisée et de la savane arborée. La savane arbustive à arboré, avec un taux de déclin de 21% est classé dans la catégorie des écosystèmes vulnérables.

La zone identifiée au départ comme un milieu dégradé du fait de pressions directes (anthropiques) et indirectes comme la sécheresse, la topographie, la nature du sol, semble se confirmer à la lumière des résultats obtenus. Les facteurs anthropiques sont prépondérants dans ce processus de dégradation avec des pratiques non conformes à une gestion durables des ressources naturelles.

L'intégration actuelle de bonnes pratiques comme l'agroforesterie et la RNA, l'initiative Grande Muraille Verte, la création de multiples unités pastorales de la part des projets et programmes nationaux de développement, et la création récente de la Réserve de Biosphère du Ferlo, de même que le projet de remise en eau du Ferlo (PREFERLO) de l'Office du lac de Guiers (OLAG), pourraient réduire cette évolution régressive. Cela ne pourra cependant se faire qu'avec l'accompagnement de bonnes politiques d'information, de communication et de sensibilisation à l'endroit des populations de cette zone.

Partie IV : DISCUSSION ET CONCLUSION GENERALES

Chapitre 1 : DISCUSSION GENERALE

Les travaux de recherches que nous avons menés dans le Bassin versant du Ferlo, avaient globalement pour objectifs d'éclairer trois questions principales : i) quels sont les écosystèmes présents au niveau du Bassin versant du Ferlo et quelle est leur variabilité spatiale et temporelle ? ii) quelle est la dynamique spatio-temporelle de ces écosystèmes et quels sont ceux qui risquent de subir des changements réduisant leur capacité d'entretenir leur biote ? iii) Quel est le devenir des écosystèmes du Ferlo selon les critères de la Liste Rouge des Ecosystèmes de l'UICN, et quel est le niveau de pertinence de ces critères dans le contexte du Sénégal et de l'Afrique ?

1.1 LES ECOSYSTEMES DU BASSINN VERSANT DU FERLO (ETAT ET VARIATION SPATIO-TEMPORELLE)

La cartographie de l'occupation de la zone d'étude en 2015 et en 1965 a fait ressortir des écosystèmes naturels composés de la forêt galerie relictuelle et des savanes, ainsi que des écosystèmes artificialisés représentés par les steppes, les zones de culture pluviale et les plantations forestières. La combinaison de ces résultats avec la revue bibliographique et les travaux de terrain montre sur le plan de l'état de la végétation du Bassin versant du Ferlo des types de dégradation, des pressions, des impacts et des réponses variées. Ces résultats montrent que l'occupation du sol du Bassin versant du Ferlo est actuellement le domaine de la savane à dominante arbustive et des steppes avec une diversité floristique qui démunie du nord vers le sud. Ces résultats obtenus à partir de la physionomie de la végétation viennent compléter et confirmer les nombreux travaux dans la zone qui ont attesté de la dégradation des écosystèmes du Ferlo accompagnée par la baisse de la richesse floristique (Diouf, 2011 ; Ba, 2011 ; Ndiaye *al*, 2013 ; Diarra, 2015). Les espèces ligneuses présentes sont dominées par celles qui sont plus résistantes aux conditions actuelles du milieu et aux aléas climatiques (Bakhoum, 2013). Les espèces ligneuses les plus représentées sont *Balanites aegyptiaca, Acacia raddiana, Boscia senegalensis Leptadenia hastata, Acacia senegal, Adansonia digitatata,* les *Combretacées, etc.* Au niveau de cette zone également le front agricole est en train de progresser à partir de l'ouest avec des empiètements au niveau des aires protégées ; cet état de fait est inquiétant donas une zone vouée au pastoralisme.

1.2 DYANAMIQUE SPATIO-TEMPORELLES DES ECOSYSTEMES DU BASSIN VERSANT DU FERLO

L'analyse de la cartographie diachronique des écosystèmes du Ferlo entre 1965 et 2015 a montré une évolution régressive des écosystèmes naturels traduisant cette dégradation continue des ressources du Ferlo constatés depuis quelques décennies. Parallèlement à cette perte de surface de la végétation naturelle, le front agricole continue d'avancer passant de 540 795 ha en 1965 à 805 160 ha en 2015 provoquant même une discussion sur les limite des zones éco géographiques du Ferlo et du Bassin arachidier.

Cette dégradation des ressources du Ferlo ne date pas d'aujourd'hui, elle a débuté vers les années 50 et s'est accentuée vers les années 70 avec l'avènement de la sécheresse. Pour

mieux clarifier tout cela il faut distinguer le Ferlo avant l'implantation des forages, du Ferlo avec la politique d'hydraulique pastorale de l'Etat du Sénégal.

Il faut d'abord signaler que le développement des aménagements hydro-agricoles dans la vallée du Fleuve Sénégal a d'abord poussé les éleveurs vers le Ferlo ne disposant plus d'espaces pour le bétail. L'une des études les plus complètes sur l'évolution du Ferlo a été réalisée par Barral (1982). Cette zone n'était fréquentée que 4 à 5 mois par les pasteurs Peul transhumants durant l'hivernage. Le mouvement du bétail se faisait d'une part entre la vallée du Fleuve Sénégal en saison sèche à cause de ces pâturages de décrue et de l'eau, d'autre part la vallée du Ferlo ou des puits et permettaient une présence quasi permanente des pasteurs avec une faible densité animale. La végétation était abondante de même que la faune. Avant la première guerre mondiale le Ferlo comptait 30 000 bovins, 100 000 petits ruminants avec une densité de 1,5 UBT/km² (une UBT est un bovin adulte pesant 250 kg). La découverte de l'aquifère du maestrichtien en 1938 a permis l'installation des forages à partir 1950. Au lendemain de la seconde guerre mondiale, l'administration coloniale créa des réserves sylvo-pastorales dans lesquelles la culture de l'arachide et l'exploitation forestière (bois) furent interdites. Ces réserves ont grandement contribué à assurer la sauvegarde des ressources pastorales du Ferlo.

De 1950 à nos jours, plus de 100 forages ont été creusés bouleversant profondément les pratiques pastorales en sédentarisant certains éleveurs et en limitant le déplacement d'autres. La pauvreté en phosphore de l'eau des forages, l'abandon progressif de la cure salée, la décomposition de certains rongeurs et oiseaux dans les abreuvoirs et château d'eau ont favorisé l'apparition d'une nouvelle maladie appelée botulisme ou maladie des forages qui fait beaucoup de ravages chez les bovins. Les forages deviennent des lieux de polarisation des campements avec d'intenses activités de commerce. Aujourd'hui, le Ferlo polarise près de 2/3 du cheptel national. Les Peul du Walo cultivaient le sorgho de décrue dans la vallée du Fleuve Sénégal et utilisaient en saison sèche les pâturages inondables de cette même vallée (*Echinochloa stagina* et *Cypéracées* pour les bovins tandis que les petits ruminants utilisaient en plus les pâturages aériens de *Faidherbia albida*, *Acacia seyal*, *Ziziphus mauritania*...). Durant l'hivernage, ils se regroupaient pour transhumer sur les pâturages sur sol sableux (Seno) et argileux (Baldiol) du Ferlo Septentrional. Chaque groupe de transhumants avait sa mare d'hivernage (weydou) et son campement (Rumano) formé de ménage (Galle). Ils possédaient peu de bovins mais beaucoup de petits ruminants. Chaque campement de saison des pluies était entouré d'une zone réservée appelée *Hurum* dans laquelle était pratiquée la culture du mil pluvial. Les Peul du Dieri cultivaient le mil pluvial au Ferlo et transhumaient entre le J*ejeegol* et le Ferlo puis la zone du Djoloff pour terminer dans la zone des cures salées du Lac de Guiers. En saison sèche, les animaux s'abreuvaient au Fleuve Ferlo ou dans des marigots et ne pacageaient pas dans la vallée qui était réservée aux Peul de la vallée du Fleuve Sénégal. Ces différentes dernières pratiques sont à l'origine actuellement des auréoles de dégradation d'un rayon d'environ 5 km autour des forages.

Les résultats de nos travaux sur cette dynamique de la végétation du Ferlo basée sur la télédétection et utilisant la classification de Yangambi, viennent compléter les nombreux travaux actuels basés plus sur la diversité floristique à partir d'inventaire. Ces travaux ont aussi aidé à mieux comprendre l'occupation du sol du Ferlo des années 1965 servant de référence pour les études antérieures.

1.3 DEVENIR DES ECOSYSTEMES DU BASSIN VERSANT DU FERLO SELON LES CRITERES DE LA LISTE ROUGE DES ECOSYSTEMES DE L'UICN

La Liste Rouge des Ecosystèmes en cours de développement par l'UICN est cadre uniformisé d'évaluation de l'état des écosystèmes cernant aussi bien leurs caractéristiques que les menaces qui pèsent sur ces derniers. C'est un processus qui permet de combiner à la fois la répartition géographique de l'écosystème, l'environnement abiotique, les relations entre les espèces d'un biotope, mais également l'évolution spatio-temporelle sur de courtes ou longues périodes.

L'application des critères de la Liste Rouge des Ecosystèmes dans le Bassin versant du Ferlo est pour nous, un prétexte pour tester la pertinence de ces critères dans le contexte du Sahel et de l'Afrique en général. Avant cet essai, la seule tentative au Sénégal est l'œuvre de Keith et *al*, (2013) sur l'écosystème des forêts de gonakiers de la vallée du Sénégal avec des résultats pour les critères A et B, et D (modélisation hydrologique).

Au vu des résultats obtenus, il est apparu que les critères A et B sont pertinents dans notre contexte tandis que les critères C, D et E nécessitent d'avoir non seulement des informations très anciennes difficiles à obtenir dans notre région, mais aussi de mieux maîtriser les modèles climatiques et hydrologiques.

Les résultats obtenus sont conformes aux hypothèses émises par plusieurs auteurs sur le devenir des écosystèmes sahéliens (Ba, 2011, Diarra, 2015) si aucune action de conservation et/ou de restauration n'est prise. Cependant il faudrait pousser la réflexion pour essayer d'adapter certains de ces critères par rapport au contexte.

La définition des écosystèmes a été faite en fonction du biotope afin de distinguer les écosystèmes terrestres des écosystèmes aquatiques. Ensuite, l'occupation, l'utilisation du sol et d'autres considérations biophysiques ont incité à subdiviser ces deux grands ensembles en différents types d'écosystèmes (tableau 9). Il ressort de cette classification, que dans le cas des écosystèmes terrestres par exemple, le concept d'écosystème renvoie au type de végétation. Cette correspondance est pertinente car la structure végétale n'est que le reflet de l'agencement spatial des espèces végétales dont la dynamique est étroitement liée à celle des espèces animales et vice versa. Cependant, en plus de plus de la structure végétale, l'évaluation de l'écosystème devrait aussi prendre en compte le fonctionnement qui renvoie forcément à la fois aux espèces végétales et animales et aussi aux interactions

Nous pensons qu'il faut trouver les paramètres biotiques et/ou abiotiques adéquats pour décrire la structure et le fonctionnement des écosystèmes. Il s'agit donc d'adopter une démarche qui se focalise à la fois sur la structure et le fonctionnement même si l'étude de la structure vise souvent à comprendre le fonctionnement de l'écosystème.

Les essais d'évaluation effectués au niveau national sur la base des informations cartographiques montrent que l'utilisation de la dynamique des formations végétales en termes de distribution mais aussi de densité des espèces végétales peuvent renseigner sur l'état de l'écosystème. Seulement, le constat est que ces types de données sont insuffisants et qu'il importe de les combiner avec d'autres informations relatives par exemple aux services écosystémiques, aux espèces clés, qu'elles soient végétales ou animales.

Cependant, il faut souligner aussi que l'évaluation ne peut que se fonder sur l'information disponible qui porte généralement plus sur la structure et la dynamique des formations végétales.

Le choix des fonctions écologiques (processus naturels, physiques, biologiques et chimiques qui permettent le fonctionnement et le maintien des écosystèmes) comme l'un des critères sur lesquels peut se fonder le travail d'évaluation semble pertinent. Les processus écologiques désignent les mécanismes qui évoluent dans un écosystème, c'est à dire des phénomènes organisés et ordonnés qui s'enchainent et qui lient les organismes et leur environnement : production, décomposition, cycle des éléments nutritifs, perturbations et évolution de la succession des espèces, apports énergétiques et interactions entre les organismes au sein d'un écosystème. Seulement, dans le cas de la densité des espèces ligneuses, il serait important de prendre en considération la composition floristique dont l'évolution dans un sens ou dans l'autre peut ne pas ressortir dans l'indice de densité puisque la densité des espèces végétales peut augmenter alors que la composition floristique a beaucoup changé. Cette considération nous amène à penser à l'indice de diversité qui pourrait être aussi un bon indicateur. Et dans le cas d'une évaluation locale, le degré de dégradation à travers des indices peut être beaucoup plus pertinent que le déclin relatif à l'aire de distribution.

Nous estimons également qu'il est important de prendre en compte dans l'évaluation, la résilience qui est la capacité d'un écosystème à retrouver un fonctionnement normal après avoir subi une perturbation importante. Et donc sur une période de temps appropriée, un écosystème résilient peut retrouver sa structure et ses fonctions écologiques. Cette résilience pose le problème du rôle déterminant que jouent certaines espèces appelées espèces clés et soulève la question liée à la projection dans le futur.

Chapitre 2 : CONCLUSION GENERALE ET PERPSPECTIVES

2.1 CONCLUSION GENERALE

Le Bassin versant du Ferlo qui est limité au nord par la vallée du Fleuve Sénégal et au sud par la zone éco-géographique du Bassin arachidier, a subi durant ces 50 dernières années, des changements dans les modes d'occupation de l'espace, qui se sont traduites concrètement par une évolution régressive des écosystèmes. La dynamique de l'occupation du sol se traduit par une régression de la végétation naturelle de 3 780 196 ha en 1965 à 3 501677 ha en 2015. L'espace agricole occupe actuellement 805 160 ha, alors qu'en 1965 elle s'étendait sur 540 795 ha.

L'analyse de l'évolution de l'occupation du sol a montré que 35% des terres sont restées à l'état initial (sans changement), 58% ont subi des modifications, et 7% se sont converties. Les modifications concernent essentiellement les écosystèmes naturels qui ont enregistré une évolution régressive marquée par une baisse de superficie de la forêt galerie et des savanes, boisée et arborée au bénéfice de la savane arbustive et des steppes Les conversions ont affecté principalement aussi les zones de végétation naturelle selon une proportion de 6% par rapport à la superficie totale du Bassin versant, et cela au bénéfice des zones de culture. Cet accroissement progressif des superficies agricoles dans une zone à vocation pastorale soulève des inquiétudes à long terme.

L'évaluation des écosystèmes du Bassin versant selon les critères de la Liste Rouge des Ecosystèmes de l'UICN a révélé un risque d'effondrement de la forêt galerie, de la savane boisée et de la savane arborée. La savane arbustive à arborée se trouve dans un état de vulnérabilité. Quant aux autres écosystèmes (la savane arbustive et les steppes), ils sont classés dans la catégorie Préoccupation mineure, même s'ils affichent globalement une évolution progressive.

Au total, la zone identifiée au départ comme une zone dégradée du fait de pressions directes (anthropiques) et indirectes comme la sécheresse, la topographie, la nature du sol, semble se confirmer à la lumière des résultats obtenus. Les facteurs anthropiques sont prépondérants dans ce processus de dégradation avec des pratiques non conformes à une gestion durables des ressources naturelles. On peut citer entre autres : l'exploitation à outrance de l'espace pastoral, l'agriculture sous pluie extensive sur brûlis, l'exploitation irrationnelle des ressources forestières.

2.2 PERSPECTIVES

Cette étude sur la dynamique des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo en 1965 et 2015, a mis en évidence la dynamique régressive de ces derniers avec un accroissement progressif des zones de culture qui soulève des inquiétudes à long terme. C'est pourquoi un suivi de cette dynamique doit être fait.

Il subsiste cependant un certain nombre de questions qu'il serait nécessaire de répondre dans les travaux ultérieurs.

La première porte sur un inventaire détaillé dans tout le Bassin versant du Ferlo afin de mieux intégrer l'aspect qualitatif.

La deuxième fait référence à des travaux relatifs à une adaptation des critères de la Liste Rouge de l'UICN, notamment la possibilité d'appliquer aux écosystèmes sahéliens les critères C, D et E. Il serait également intéressant d'étudier la possibilité d'introduire dans ces critères d'autres paramètres comme la résilience, la présence d'espèces invasives. De même, pour une meilleure précision des résultats, l'application des critères pourrait se faire par secteur dans le bassin versant en fonction du type de sol.

Enfin, cette étude devrait être menée dans les autres zones éco géographiques du Sénégal pour dresser la liste Rouge des écosystèmes du Sénégal.

.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1) **Alberjet J ; Dacosta H. ;** 1996. Les écoulements non pérennes sur les petits bassins du Sénégal. In : CHEVALLIER PIERRE (ED.), POUYAUD BERNARD (ED.). L'hydrologie tropicale : géosciences et outil pour le développement : mélanges à la mémoire de Jean Rodier. Wallingford : AISH, (238), 139-156.

2) **Akpo L E., Grouzis., Michel P., 2000.** Valeur pastorale des herbages en région soudanienne : le cas des parcours sahéliens du nord-Sénégal. ORSTOM, vol. 18, n° 1, pp 1-8.

3) **Akpo L.E., Gaston A., Crouzis M.;** 1995. Structure spécifique d'une végétation sahélienne. Cas de Wiidou Thiengoli (Ferlo, Sénégal). Bulletin du Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 4e sér., 17, 1995 Section B, Adansonia, n° 1-2 : 39-52.

4) **Akpo L. E.;** 1992. Influence du couvert ligneux sur la structure et le fonctionnement de la strate herbacée en milieu sahélien (Souilène, Frelo, Sénégal): Les déterminants écologiques. Doctorat de 3°cycle de Biologie Végétale.183p.

5) **Akpo L. E.**; 1990. Dynamique des systèmes écologiques sahéliens: structure spécifique, productivité et qualité des herbages le forage de Widou thiengoly. DEA en Biologie Végétale, Option Ecologie, FST-UCAD, 65 p.

6) **Anonyme,** 2011. Les origines de la vie Sciences et Vie Junior, dossier hors série, octobbre

7) **Ba T.;** 2011. Dynamique de l'occupation du sol dans la Communauté Rurale de Barkédji au Ferlo, (Nord-Sénagal). Mémoire de DEA. 38 p.

8) **Barral H.;** 1982. Le Ferlo des forages : gestion ancienne et actuelle de l'espace pastoral. Etude de géographie humaine. Dakar, Sénégal, Orstom, 85 p.

9) **Benoît M.**; 1988. La dune de Gonkol : dégradation d'un biotope ou histoire d'un paysage ?

10) **Bernier. B.**; 1992. Introduction à la macroéconomie. Dunod, Paris, 217 p.

11) **Bille J. C.**, 1977.- Etude de la productivité primaire nette d'un écosysterne sahélien. Tr. et DO~. O.R.S.T.O.M., n.65: 82 p.

12) **Bland L.M., Keith D.A., Miller R.M., Murray N.J., Rodríguez J.P;** 2016). Lignes directrices pour l'application des critères et catégories de la Liste Rouge des Écosystèmes de l'UICN : Version 1.0. Gland, Suisse: IUCN. ix + 114pp. Originalement publié en tant que Guidelines for the application of IUCN Red List of Ecosystems Categories and Criteria, Version 1.0 (Gland, Suisse: UICN, 2016) CIRAD, (2007).Elevage et territoire dans le « Ferlo », zone pastorale du nord du Sénégal, Rapport de mission, 48p.

13) **Boudet, Gabriel ;** 1990. Peut-on améliorer la gestion de parcours sahéliens ? Sécheresse, ,vol.1, n°1, p.55-60.

14) **Boudet ;** 1977. Desertification ou remontée biologique Au Sahel. Travaux de l'O.R.S.T.O.M., sér. Biol., vol. XII, no 4, 1977 : 293300

15) **Boudet G;** 1970. Paturages naturels de Haute et Moyenne Casamance. Etude agrostologique No. 27. 239 pp. et 1 carte au 1:200 000e.

16) **Broutin C, Sokona K;** 1992. La production d'huile de sump dans la zone sylvo-pastorale du nord du Sénegal- Environnement et développement du Tiers Monde, 39p

17) **Cogels X., Gac J.Y;** 1984. La chloronité des eaux du lac de Guiers (Sénégal). Bilan quantitatif, qualitatif et perspectives. In : le lac de Guiers – Problématique d'environnement et de développement. Dakar, Sénégal, UCAD/ISE, pp 41-58.

18) **CSE; 2012.** Cadre conceptuel pour l'élaboration d'une méthode d'évaluation des écosystèmes. Rapport du Groupe de travail sur le processus d'élaboration de la Liste Rouge des Ecosystèm**es du Sénégal,** 4p.

19) **CSE;** 2013. Suivi annuel de la production végétale au Sénégal. Rapport 2013.20p.

20) **CSE;** 2011. Réalisation des états de référence des observatoires (DNSE) au Sénégal : Observatoire du Ferlo, Rapport scientifique.45p.

21) **CSE;** 2009. Evaluation Locale de la Dégradation des Terres : Rapport GAA de Barkedji, Projet LADA. 41p

22) **CSE;** 2005. La Surveillance Environnementale dans l'Observatoire ROSELT/OSS du Ferlo :Rapport scientifique .96p.

23) **CSE;** 2003a. L'Evaluation de la dégradation des terres au Sénégal : Projet FAO, *Land Degradation Assessment* (LADA) : Rapport préliminaire.59p.

24) **CSE;** 2003b. Utilisation des technologies modernes telles que la télédétection et les systèmes d'information géographiques pour la localisation des zones affectées par la sécheresse, Rapport .

25) **CSE/ROSELT/OSS.,** 2002**.** Caractérisation des sols de l'Observatoire du Ferlo (Sénégal).

26) **CSE;** 2002. La Surveillance Environnementale dans l'Observatoire ROSELT/OSS du Ferlo :Volet socio-économique.Rapport thématique .37p.

27) CSE., 1987 à 2005. Suivi de la production végétale : Situation des parcours naturels. Production végétale. Cartes au 1/2 500 000.

28) **CSE., 1**996a. Carte des densités de population par communauté rurale, République du Sénégal..

29) **CSE.,** 1996b. L'imagerie NOAA/AVHRR dans la veille environnementale. Rapport technique. 57p.

30) **CSE.,** 1996c. Rapport sur le suivi de la production végétale, N°97/02.

31) **CSE.,** 1992. Estimation des effectifs du bétail par vol systématique de reconnaissance dans la moitié Nord du Sénégal. Rapport de campagne 1992. Doc. N. T. 92, 9 p.

32) CSE., 1991. Etude de la distribution spatiale et des mouvements de bétail par enquêtes aériennes, 1989 – 1990, 21 p.

33) **DEFCCS**, 1999. Rapport d'activités, République du Sénégal, 300 p..

34) **Diallo MD, Chotte JL, Guissé A, Sall SD** (2008). Influence de la litière foliaire de cinq espèces végétales tropicales sur la croissance du mil (Pennisetum glaucum (L.) R. Br.) et du maïs (Zea mays L.). Sécheresse ; 19 (3) : 207-10.

35) **Diallo, A;** 1968. Pâturages naturels du Ferlo-Sud. Etude agrostologique No. 13. IEMVT-LNERV. 180 p. et 1 carte au 1:200 000e

36) **Diawara,** 1984. Evolution de l'Elevage des Bovins dans la Zone Sylvo-Pastorale du Sénégal (1911-1980). Thèse de Doctorat vétérinaire, 143p

37) **Di Gregorio A., Jansen L.J.M.;** 2000. Land Cover Classification System: Classification Concepts and User Manual, FAO, Rome.

38) **Dieme G;** 2003. Dynamique des ressources en eau dans la zone sylvopastorale : cas des mares de la communauté rurale de Thieul (Sud Ferlo). Mémoire maîtrise géographie, Dakar, Sénégal, UCAD, 109 p.

39) **Dieye K;** 1983. Systèmes de production d'élevage au Sénégal dans la région de Ferlo : synthèse de fin d'études d'une équipe de recherches pluridisciplinaire. Maisons-Alfort : GERDAT-IEMVT, 172 p. ISBN 2-85985-080-5

40) **Diop, A.T., M Dieme; A Ickowicz; J.C Nzimulinda,** 2009**.** Production laitièrer dans la zone sylvo-pastorale du Sénégal :étude des facteurs de variation et mode de gestion par les populations locales. Revue d"élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux 62 (1):39

41) **Diop A.T; Daiw O.T; Dieme I; Toure I; SY O; Dieme G;** 2004. Mares de la zone sylvopastorale du Sénégal : tendances évolutives et rôle dans les stratégies de production des populations pastorales. Revue Elev. Méd. Vét. Pays trop., 57 (1-2) : pp 77-85.

42) **Diop, A.T.,** 1989**.** Les ressources ligneuses de la zone sylvo-pastorale du Sénégal : évolution, gestion et perspectives de développement, Communication présentée à l'atelier tenu 3 l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar sur « Forêt, Environnement et Développement », du 22 au 26 mai 1989. 14p

43) **Diop;** 1984. Inventaire et suivi des ressources en eau du Ferlo Nord .- Dakar Hann : LNERV ; mémoire de confirmation - Réf. no 71/Agrosto ; 38 p.

44) **Diouf A;** 2001. Analyse diachronique de l'occupation du sol et de l'exploitation des pâturages dans l'unité pastorale de Thieul (Ferlo). Rapport de stage PPZS. 65 p.

45) **Diouf J. C;** 2001. Dynamique du peuplement ligneux dans l'aire du forage de Thieul (Ferlo- Sud, Sud, Sénégal). Mémoire de diplôme d'études approfondies de Biologie végétale. 39 p.

46) **Diouf A., Sall M., Wélé A., Dramé M.,** 1998. Méthode d'échantillonnage de la production primaire sur le terrain. Centre de suivi écologique de Dakar. 9 page**s.**

47) **Doyen A,** 1983.Inventaire de la mangrove à usage multiple en Basse Casamance et au Saloum. République du Sénégal (Rhizophora racemosa, biomasse, stratégiemondiale de la conservation.45-56. INRA, Colloque de l'INRA, Paris 19

48) **DPN;** 2011. Formulaire de proposition de la Réserve de Biosphère du Ferlo. 65p

49) **Faye G. ;** 2005. Suivi de la biomasse à partir de la télédétection radar (Ferlo au Sénégal). Mémoire DEA. 57 p.

50) **Faye G; P.L. Frison; Wade S; Ndione J.A; Beye A.C; Rudant J.P.** 2011. Étude de la saisonnalité des mesures des diffusiomètres scat : apport au suivi de la végétation au sahel, cas du Ferlo au Sénégal. *Rev Télédétection*, vol. 10, n° 1, pp. 23-31.

51) **Faye M., 2001.** La gestion communautaire des ressources pastorales du Ferlo sénégalais : l'expérience du projet d'appui à l'élevage . Elevage et gestion des parcours au Sahel, implications pour le développement, E. Tielkes, E. Schlecht et P. Hiernaux (Editeurs), Allemagne, Stuttgart, pp. 165-72.

52) **Gladima S. A.S; 1997.** Utilisation des méthodes géophysiques pour la caractérisation de la nappe maastrichtienne du Sénégal. Contribution à la connaissance de la stratigraphie et de la structure du Bassin sénégalo-mauritanien. Thèse doctorat troisième cycle, UCAD, 136 p.

53) **Guèye S;** 1999. Étude de l'évolution de la région du lac de Guiers : apports de la télédétection au suivi du milieu, Mémoire de Maîtrise, Section de géographie, UFR de Lettres et Sciences Humaines, Université Gaston Berger de Saint Louis.114p

54) **Grosmaire,** 1957. Eléments de politique sylvopastorale au Sahel Sénégalais. Saint-Louis, Sénégal, service des Eaux et Forêts, 18 fascicules, 1093 p.

55) **Hobbs, R.J., Arico, S., Aronson, J., Baron, J.S., Bridgewater, P., Cramer, V.A., Epstein,P.R., Ewel, J.J., Klink, C.A., Lugo, A.E., Norton, D., Ojima, D., Richardson, D.M., Sanderson, E.W., Valladares, F., Vilà, M., Zamora, R. and Zobel, M. (2006). '**Novel ecosystems: theoretical and management aspects of the new ecological world order'. Global Ecology and Biogeography 15:1–7.

56) **Hubert P., Carbonnel J.P**. 1989.- Approches statistiques de l'étude des séries pluviométriques de longue durée de l'Afrique de l'Ouest: lOl- 114, in "Les hommes face aux sécheresses, Nordeste brésilien, Sahel africain", B. Bret (coord.), EST-IHfAL: 422 p
*

57) **Keith, D.A., Rodríguez, J.P., Brooks, T.M., Burgman, M.A., Barrow, E.G., Bland, L., Comer, P.J., Franklin, J., Link, J., McCarthy, M.A., Miller, R.M., Murray, N.J., Nel, J., Nicholson, E., Oliveira-Miranda, M.A., Regan, T.J., Rodríguez-Clark, K.M., Rouget, M. and Spalding, M.D**. (2015). 'The IUCN Red List of Ecosystems: Motivations, Challenges, and Applications'. Conservation Letters 8:214–226.

58) **Keith D. A., Rodríguez, J. P., Rodríguez-Clark, K. M., Nicholson E., Aapala, K., Alonso, A., Asmussen, M., Bachman, S, Basset, A., Barrow, E. G., Benson, J. S., Bishop, M. J., Bonifacio, R., Brooks, T. M., Burgman, M. A., Comer, P., Comín, F. A., Essl, F., Don Faber-Langendoen, D., Fairweather, P. G., Holdaway, R. J, Jennings, M., Kingsford, R. T., Lester, R. E., Mac Nally, R.,, McCarthy, M. A., Moat, J., Oliveira-Miranda, M. A., Pisanu P., Poulin, B., Regan, T. J., Riecken U, Spalding, M. D., Zambrano Martínez, S;** 2013. Scientific foundations for an IUCN Red List of Ecosystems. PLoS ONE 8(5), e62111.

59) **Keith D. A., Orscheg C., Simpson C. C., Clarke P. J., Hughes L., Kennelly S. J., Major R. E., Soderquist T. R., Wilson A. L. & Bedward M;** 2012. Estimation of the decline in distribution of an ecosystem (Criterion A).Absolute and proportional rate of decline

60) **Keith D, Rodriguez J-P, Rodriguez-Clark K.M, Aapala K, Alonso A, Asmussen M, Basset A, Barrow E, Benson J.S, Brooks T.M, Burgman M.A, Comer P, Comin F.A, Essl F, Faber- Langendoen D, Jennings M, Kingsford R.T, Mar Nally R, Mc Carthy M.A, Nicholson E, Poulin B,Riecken Uwe, Spalding M.D;** 2011. Scientific foundations for an IUCN Red List of Ecosystems' – Supporting E-material, 86p.

61) **Leborgne J**., 1988. La pluviométrie au Sénégal et en Gambie, Ed. ORSTOM, 96p.

62) **Le Houérou H.-N.**, 1989.- The grazing land ecosystems of the African Sahel. Springer-Verlag Eco-logical Studies Berlin n° 75, 282 p.

63) **Leprun J.C**. 1973.- Nouvelles observations sur les formations dunaires sableuses fixées du Ferlo nord occidental (Sénégal). Ass. Sénégal. Et. Quatern. Ouest afr., Bull.. Liaison, Sénégal, 31: 69-78

64) **Leroux M.**, 1996. La dynamique de la grande sécheresse sahélienne / Dynamics of the Great Sahelian Drought. In: Revue de géographie de Lyon, 70 3-4. Sahel, la grande secheresse. pp. 223-232.

65) **Loum M;** 2004. Biodiversité dans la zone écogéographique du Ferlo

66) **Maignien R**; 1965. Carte pédologique du Sénégal au 1/1 000 000 – Notice explicative. ORSTOM-Dakar.

67) **MICHEL, P**. (1973). Les bassins des fleuves Sénégal et de la Gambie (étude géomorphologique). Thèse d'Etat Mémoire I.R.D., N°63, 752 p.

68) **Millennium Ecosystem Assessment;** 2005. *Ecosytem and human well-being:Synthesis. Island Press. Washington D.C*

69) **Monteillet J;** 1967. Contribution à l'étude géologique du Luthétien de la région de Louga. Mém. du diplôme d'Etudes Supérieures de Géologie, Université de Dakar, 53 p.

70) **Ndiaye L;** 2007. Etude hydrochimique de la nappe du Paléocène/ Eocène dans la communauté rurale de Ouarkhokh (Linguère - Ferlo). Mémoire DEA de Géologie, UCAD, 57p.

71) **Ndiaye M;** 2007. Systémes de production et mutations des paysages ruraux dans la basse vallée du Ferlo au Sénégal.Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaaux III.318p

72) **Ndiaye O, Diallo Aly, Sagna M Ba, Guissé A;** 2013. « Diversité floristique des peuplements ligneux du Ferlo, Sénégal », VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Volume 13 Numéro 3 | décembre 2013, mis en ligne le 24 janvier 2014, consulté le 07 novembre 2016. URL : http://vertigo.revues.org/14352 ; DOI : 10.4000/vertigo.14352

73) **Ndione J.A;** 2009. Contribution à la mise en place d'un système d'alerte précoce dans la gestion du risque d'épidémies de la Fièvre de la vallée du Rift au Sénégal.T du Ferlo

(Sénégal). Communication au colloque inyternationale en évaluation environnementale, Niamey. Communication oroale.

74) **Ndione J.A;** 2002. Bilan climatique de l'observatoire ROSELT du Ferlo (Sénégal). Rapport de consultation. 28p

75) **Niang A**., 2011. Aménagement du lac de Guiers de 1824 à l'Avènement des grands barrages du Fleuve Sénégal. Climat et Développement N°12, Décembre 2011.

76) approche globale et perspectives de la télédétection et des systèmes d'information géographique. Thèse doct. 3e cycle. Départent de Géographie. UCAD/ORSTOM. 352 p + annexes.

77) **Niang K** ., 2009.- L'arbre dans les parcours communautaires du Ferlo-Nord (Sénégal) Mémoire. de DEA, FST, 69p.

78) **Nicholson E., Keith D. A., Wilcove D.S;** 2009. Assessing the threat status of ecological communities. Conservation Biology 23:259-274.

79) **Nicholson S E.,Palao I;** 1993.A re-evaluation of rainfall variabilityin the Sahel.Part I : Characterisricsof rainfall fluctuation.Int.J.Climo.,13,371-389.

80) **Oloukoi J, Mama V. J, Agbo F.B;** 2006. Modélisation de la dynamique de l'occupation des Terres dans le Département des Collines au Bénin. Télédétection, 2006, vol. 6, n° 4, p. 305-323.

81) **PATUREL J. E., SERVAT E., DELATTRE M. O., LUBES N. H**., 1997a. Variabilite climatique et analyse de series pluviometriques de longue duree en Afrique de l'Ouest et centrale non sahelienne. CR acad. Sc. Paris, 325, Serie Iia, 779-782 pp.

82) **PATUREL J. E., SERVAT E., DELATTRE M. O., LUBES N. H**., 1997b. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part two: an integrated regional approach. J. Hydro. 191, 16-36 pp.

83) **Pickett S.T.A., Cadenasso M.L;** 1995. Landscape ecology: spatial heterogeneity in ecological systems. Science 269:331–334

84) **Pontius R.G. Jr;** 2000. Quantification error versus location in comparison of categorical maps. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 66, n° 8, p. 1011-1016

85) **Poupon H**; 1977. Evolution d'un peuplement d'Acacia senegal (L.) Willd dans une savane sahélienne au Sénégal de 1972 à 1976. Cah. O.R.S.T.O.M., sér ; Biol, vol. XII, n°4, pp : 283-291.81

86) **Poupon H;** 1980. Structure et dynamique de la strate ligneuse d'une steppe sahélienne au nord du Sénégal. Cah. Travaux et Documents de l'O.R.S.T.O.M., n° 115, 351p.

87) **Raphaëlle Pin-Diop**, 2006. Spatialisation du risque de transmission de Fièvre de la Vallée du Rift en milieu agropastoral sahélien du Sénégal septentrional. Sciences du Vivant [q-bio]. Université d'Orléans, 2006. Français. ⟨tel-00090785⟩

88) **Ritz M., Bellion Y;** 1988. Structure of the southern Sénegalo-Mauritanien basin, West Africa, from geoelitrical studies. Tecnophysics, 235-240 ORSTOM., 148 p.

89) **Rodriguez J.P; Kate David**; **Kathryn M. R-Clark**; **Murray. Nicholas** J; **Nicholson**. E; **Tracey J.R**; **Miller R.M.**; **Barrow E.G**; **Bland Lucie. M**; **Boe B.K**; **Brooks T. M**.; **Miranda M. A. O; Spalding M; Wit P**; 2015. Guide pratique pour la mise en application des critères de la Liste Rouge des Écosystème. Phil. Trans. R. Soc. B 370: 20140003. http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2014.0003

90) **Rodriguez J.P ; Kathryn M, Rodriguez C ; Baillie J.E. M ; Neville A ; Benson J ; Boucher T ; Brown C ; Burguess N.D ; Collen B ; Jennings M ; Keith D.A ; Nocholson E ; Revenga C ;Reyers B ;Rouget M ; Smith T ; Spalding M ; Taber A ; Walpole M ;Zager I ; Zaming T;** 2011. Elaboration des Critères de l'UICN pour la Liste Rouge des Ecosystèmes Menacés. Conservation Biology, Volume 25 (2011): 21-29.

91) **PIN-DIOP R,** 2006. Spatialisation du Risque de Transmission de la Fièvre de la Vallée du Rift en milieu agro-pastoral sahélien du Sénégal septentrional. Thèse de doctorat, 228 p.

92) **Sagne M;** 2002. Caractérisation des sols de l'observatoire du Ferlo (Sénégal). Rapport technique de Consultation, CSE, 39 p.

93) **Sarr M.A;** 2008. Caractérisation de la dynamique de la végétation en Afrique de l'Ouest : comparaison des indices NDVI de MSG-SEVIRI, SPOT-VEGETATION et NOAA-AVHRR (exemple du Ferlo, Sénégal): HAL Id: halshs-00260971 https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00260971

94) **Sarr M.A;** 2009. Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat », Cybergeo : European Journal of Geography [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 472, mis en ligne le 07 octobre 2009.

95) **Sarr M.A;** 2009. Évolution récente du climat et de la végétation au Sénégal (cas du Ferlo), thèse de doctorat, Université Jean Moulin Lyon 3, LCRE UMR 5600 CNRS, 410 p.

96) **SARR M. A**., 2002. L'évolution des aménagements hydro-agricoles dans le delta du fleuve Sénégal : une réponse au déficit pluviométrique récent. Mémoire de DEA. Université Jean Moulin Lyon 3, CRGA LCRE, 78 p.

97) **Sepanso;** 2003. Les invasions d'espèces – Sud- Ouest nature, Revue trimestrielle de la SEPANSO n°120-121, 56p.

98) **Sy O;** 2009. « Rôle de la mare dans la gestion des systèmes pastoraux sahéliens du Ferlo (Sénégal) », Cybergeo : European Journal of Geography [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 440, mis en ligne le 17 mars 2009, consulté le 18 septembre 2017. URL : http://cybergeo.revues.org/22057.

99) **Sy O; 2010.** Aménagements Hydrauliques et Vulnérabilité de l'élevage Transhumant au Ferlo (Sénégal). Sustentabilidade em Debat**e, 60 p.**

100) **Sy O; 2006.** Problématiques de la dynamique et de l'aménagement de la zone fluvio-lacustre et de l'espace ferlien du Sénégal. Thèse de doctorat d'Université, 387 p.

101) **Sylla D;** 2015. Dynamique de l'occupation du sol dans la Communauté Rurale de Tessékéré au Ferlo, (Nord-Sénégal). Mémoire de Master. 38 p

102) **Sylla C**., 1986. Comportement de divers ligneux en plantation dans la zone sahelienne : le cas de MBIDI. Ecologie forestiere. Memoire de Confirmation, CNRF, DK, 80 p.

103) **Tansley A.G;** 1935. 'The use and abuse of vegetational concepts and terms'. Ecology 16:284–**307.**

104) **Tappan G.G., Hadj A; Wood E. and Lietzow R.W;** 2000. Use of Argon, Corona, and Landsat imagery to assess 30 years of land resource changes in Western Senegal. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 66, N° 6 : 727 - 735. American Society for Photogrammetry and remote Sensing

105) **Tappan G;** 1985. Végétation et utilisation des Terres au Sénégal, 140p. Cartographie et Télédétection des Ressources du Sénégal.

106) **TEEB,** 2010. L'économie des écosystèmes et de la biodiversité : intégration de l'économie de la nature. Une synthèse de l'approche, des conclusions et des recommandations de la TEEB.

107) **Terborgh J. T, Lopez L, Tello J, Yu D, and Bruni A. R.;** 1997. Transitory states in relaxing ecosystems of land bridge islands. Pages 256-274 in W. F. Laurance and R. O. Bierregaard Jr., editors. Tropical forest remnants: ecology, management, and conservation of fragmented communities. University of Chicago Press, Chicago

108) **Terborgh J.T;** 1974. Faunal equilibria and the design of wildlife preserves. Pages 369-380 in F. Golley and E. Medina, editors. Tropical ecological systems: trends in terrestrial and aquatic research. Springer-Verlag, New York.

109) **Thiam A, Ndiaye O, Sagna.M.B, Diallo A, Galop D;** 2015. Caracterisation de la vegetation ligneuse sahelienne du Senegal: cas du Ferlo. International Journal of Biological and Chemical Sciences, International Formulae Group (IFG), 9 (6), pp.2582-2594. <10.4314/ijbcs.v9i6.6>. <hal-01326067>

110) **Thiam,** 2008. Stratégies des Exploitations Agropastorales de Thieul (Ferlo-Sénégal) dans un contexte d'incertitude sur les ressources naturelles productives. Thèse de doctorat à l'Institut National Polytechnique de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse. 394p

111) **Tilman D., May R.M., Lehman C.L., Nowak. M. A;** 1994. Habitat destruction and the extinction debt. Nature 371:65-66.

112) **Toupet C**., 1996. La crise sahélienne. Revue Géographique de Lyon, vol. 70, n° 3 – 4, 181 – 186 pp.

113) **Toguyeni O;** 1986. Essai de prospection par sondages électriques appliqués à l'étude d'aquifères du Sénégal soumis à des invasions marines actuelles ou récentes (Ferlo, Tanma, Nianing). Mém. d'Ingénieur Géologue, IST/FST, Univ. de Dakar (SEN),105 p.

114) **Tracol Y.,** 2004. Étude des variations interannuelles de la production herbacée des pâturages sahéliens : exemple du Gourma Malien. Thèse de doctorat en écologie des systèmes continentaux. 270 pages.

115) **Trochain J;** 1940. Contribution a l'étude de la végétation du Senegal. Mem. de l'IFAN, Paris. 433 p.

116) **Valenza J., Diallo A.K;** 1972. Etude des paturages naturels du nord Senegal. Etude agrostologique. No. 34. 1EMVT-LNERV. 311 p. et 3 cartes au 1:200 000e. .

117) **Valenza J;** 1977. Etude des pStürages naturels'du Ferlo' Boundou. Etude agrostologique. No. 50. IEMVT-LNERV. 119p.'et une carte au 1:200 000e.

118) **Wane A, Touré I. Sène B.**, 2011 : «Intégration d'indicateurs biophysiques et de marché pour anticiper les crises alimentaires au Sahel : une approche par l'économétrie des séries temporelles» communication acceptée à l'atelier de Formation Systèmes d'information et outils de pilotage du secteur élevage dans les pays du Sud Postures et méthodes, Montpellier du 11 au 13 juillet 2011.

119) **Wane A., Ancey V., Grosdidier B**., 2006. Les unités pastorales du Sahel sénégalais, outils de gestion de l'élevage et des espaces pastoraux. Développement durable et territoires [En ligne], Dossier 8 | 2006, mis en ligne le 04 janvier 2013, consulté le 19 septembre 2017. URL : http://developpementdurable.revues.org/3292 .

120) **Watson, R. T;** 2005. Turning science into policy: challenges and experiences from the science-policy interface. Philosophical Transactions of The Royal Society B-Biological Sciences360:471-477.

121) **Yangambi;** 1956. Accord interafricain sur la définition des types de végétation de l'Afrique tropicale. Bull. Inst. Et. Centrafri., Nouv. Sér. pp. 55-93.

ANNEXE 1*:* DEFINITION SOMMAIRE DES FORMATIONS VEGETALES CARTOGRAPHIEES

Sols nus :	Sols dénudés, sans couvert herbacé, avec une densité ligneuse inférieure à 10 pieds/hectare.
Forêt :	Etendue de terre recouverte par une végétation ligneuse dont les cimes sont plus ou moins jointives ; les arbres ont au moins 8 mètres et peuvent se constituer en plusieurs strates. Le tapis herbacé peut aussi être présent ou non.
Forêt galerie :	Formation forestière qui colonise les berges des cours d'eau dans les zones de savane, steppe et prairie.
Savane arbustive :	Formation dominée par des arbustes à troncs indifférenciés et dont le couvert est inférieur à 20%. Le tapis herbacé est presque continu. Densité moyenne 200 pieds/ha.
Savane arborée :	Formation composée en majorité d'arbres supérieurs à 5 m dont le recouvrement ne dépasse pas 25%. Densité moyenne 50 pieds/ha Le tapis herbacé est presque continu.
Savane boisée :	Formation composée en majorité d'arbres supérieurs à 5 m dont le recouvrement est compris entre 25 et 50%. Densité moyenne 200 pieds/ha.
Savane herbeuse:	Savane graminéenne, sans arbre et arbuste.
Steppe arbustive :	Formation constituée d'arbustes dispersés. Densité inférieure à 10 pieds/ha. Tapis herbacé discontinu.
Steppe arborée :	Formation constituée d'arbres et d'arbustes dispersés. Densité inférieure à 10 pieds/ha. Tapis herbacé discontinu.
Vallée :	Espace immédiat situé de part et d'autre du lit d'un cours d'eau.
Cuvette :	Dépression fermée de tout cotés.
Bas-fond :	Basse partie d'une dépression.

ANNEXE 2 *:* FICHE D'INVENTAIRE POUR LA VERIFICATION DE L'OCCUPATION DU SOL

Date :	Localité :	
N° du site :	Lat :	Lon :
Photo N°:	UTM X :	Y :

MORPHOLOGIE- TOPOGRAPHIE

Plateau –Vallée – Cuvette – Bas-fond	O	Pente : nulle – faible – modérée - forte
Versant : haut – milieu - bas	O	Erosion : Hydrique - en nappe –en rigole- en ravine- Eolienne-
Dune – Interdune – Plaine	O	Drainage : Avec – Sans
Butte- Colline-pénéplaine		
		Autres :

SOL

Sableux -: Argileux -Sablo-argileux - Argilo-sableux -limoneux

Cuirasse : indurée – démantelée - gravillonnaire

Ferrallitique – Hydromorphe - Halomorphe

Autres :

CATEGORIES D'OCCUPATION

Végétation naturelle terrestre	O	Mangroves	
Champs- jachère - Reboisement - Verger	O	Rizière – Cultures irriguées	
Sol nu – Tanne	O	Aménagements – Infrastructures - Mines	
Eau : temporaire - permanente	O	Autres :	

ASPECTS DE LA VEGETATION

Couvert arbustif épars	<4%	O	Couvert arboré épars		<4%
Couvert arbustif clairsemé	4-15%	O	Couvert arboré clairsemé		4-15%
Couvert arbustif ouvert	15-40%	O	Couvert arboré	ouvert	15-40%

Couvert arbustif fermé > 40% O Couvert arboré 40-65%

Couvert herbacé : continu - discontinu Couvert arboré fermé >65%

Autres :

REPARTITION ET ASPECT SPATIAUX

Continus – Discontinus – en Plaques- Dispersés

HAUTEUR MOYENNE Strate principale ESPECES DOMINANTES

< 1 m O Ligneuses :..... .....

1 – 3 m O .....

3 – 5 m O Feuilles: caduque – mi-caduque – persistante - mi-persistante

5 – 7 m O Herbacées:.....

7 – 14 m O .....

> 14 m

UTILISATION et INFRASTRUCTURE

Cultures : Vivrières – Rente - Maraîchères

Pâturages - Arboriculture - Exploitation bois – Fermes - Extraction minière - Parcs Nationaux – Industries –Artisanat – Décharge publique – Habitations bâties – Habitations non bâties- Zone péri-urbaine – villages –Hameaux - Campements - Aérodrome – Zone portuaire – Gare routière – Gare ferroviaire -.Centre commercial –Marché - Hôpital – Mosquées - Eglise.

REMARQUES:.....
.....
.....
.....
.....

ANNEXE 3 : MATRICE DE TRANSITION ENTRE 1965 ET 2015

Tableau 15: Matrice de transition entre 1965 et 2015 (les superficies sont en ha)

	Ep	Et	M	Sb	Sa	Sab	Sta	Fg	Cp	Sni	Sn	Hb	2 Pl	Saa	Ci	Staa	R	
Ep	5930,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5930,31
Et	5930,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5930,31
M	0,00	0,00	886,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	886,14
Sb	0,00	0,00	0,00	5112,34	0,00	2522,09	0,00	0,00	477,15	0,00	0,00	0,00	0,00	3612,72	0,00	136,33	0,00	11860,62
Sa	68,16	0,00	136,33	0,00	34900,21	117720,06	4498,86	0,00	17245,61	204,49	613,48	0,00	681,64	943941,71	0,00	94612,30	0,00	1214622,86
Sab	0,00	68,16	68,16	0,00	0,00	154733,37	49487,41	0,00	90454,26	0,00	681,64	136,33	613,48	204,49	0,00	95771,09	0,00	392218,42
Sta	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	131352,95	0,00	5725,82	0,00	886,14	0,00	0,00	0,00	0,00	136,33	0,00	138101,24
Fg	0,00	0,00	68,16	0,00	1908,61	4635,18	8179,74	35854,52	22562,44	4362,53	2999,24	0,00	68,16	11247,14	0,00	2862,91	0,00	94748,63
Cp	68,16	0,00	0,00	0,00	0,00	1431,45	1908,61	68,16	515527,96	340,82	0,00	1226,96	681,64	3271,90	204,49	11451,63	0,00	536181,80
Sni	4294,36	340,82	0,00	0,00	0,00	749,81	0,00	0,00	68,16	4021,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9474,86
Sn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	204,49	0,00	19835,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	68,16	20108,52
Hb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5793,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5793,98
Pl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7770,75	0,00	0,00	0,00	0,00	7770,75
Saa	204,49	0,00	204,49	0,00	1976,77	546338,30	28015,60	68,16	120719,29	204,49	2453,92	272,66	15064,35	413213,08	0,00	559698,54	0,00	1688434,16
Ci	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	749,81	0,00	0,00	749,81
Staa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34968,38	0,00	2590,25	0,00	2317,59	0,00	3135,57	14655,36	0,00	180772,20	0,00	238439,35
R	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1295,13	1295,13
	16495,80	408,99	1363,29	5112,34	38785,59	828130,26	258411,54	35990,85	775575,45	9134,04	29787,88	7429,93	28015,60	1390146,40	954,30	945441,33	1363,29	4372546,88

Ep = Eau permanente ; Sb = Savane boisée Sta = Steppe arbustive ; Sni = Sol nu inondable ; Pl = Plantation ;

Et = Eau temporaire ; Sa = Savane arborée Fg = Forêt galerie ; Sn = Sol nu ; Ci = Culture irriguée

M = Mare ; Sab = Savane arbustive Cp = Culture/Jachères ; Hb = Habitat ; R = Route

Saa = Savane arbustive à arborée ; Staa =Steppe arbustive à arborée

ANNEXE 4 : VERSION 2 DES CRITERES POUR LA LISTE ROUGE DES ECOSYSTEMES (Keith et *al*, 2013)

Tous les critères sont calculés, projetés ou déduits, depuis des données réelles.

A : Réduction de la distribution spatiale

1/ Une réduction de l'étendu de l'écosystème :

≥ 80%	**Critically endangered**
≥ 50%	**Endangered**
≥ 30%	**Vulnerable**

Sur les 50 dernières années

OU

2/ Une future réduction de l'étendu de l'écosystème :

≥ 80%	**Critically endangered**
≥ 50%	**Endangered**
≥ 30%	**Vulnerable**

Pour

a/ *Les 50 prochaines années*

b/ *Toute période de 50 ans comprenant le présent et se projetant dans l'avenir*

OU

3/ Une réduction de l'étendu de l'écosystème :

≥ 90%	**Critically endangered**
≥ 70%	**Endangered**
≥ 50%	**Vulnerable**

Depuis 1750

B : Etendu restreinte, telle :

1/ L'aire du plus petit polygone convexe englobant l'écosystème est estimée à : (Extend of occurrence, EOO)

≤ 2,000 km2	**Critically endangered**
≤ 20,000 km2	**Endangered**
≤ 50,000 km2	**Vulnerable**

Et

a/ un déclin continu

- *De l'étendu*
- *De la qualité environnementale*
- *Des interactions biotiques (entre espèces et entre espèce et milieu)*

b/ Menaces pouvant engendrer le déclin sur les 20 prochaines années

- *De l'étendu*
- *De la qualité environnementale*
- *Des interactions biotiques (entre espèces et entre espèce et milieu)*

c/ L'écosystème n'existe qu'à

- *Un seul endroit* *si EOO ≤ 2,000 km2*
- *5 ou moins* *si EOO ≤ 20,000 km2*
- *10 ou moins* *si EOO ≤ 50,000 km2*

OU

2/ Le nombre de maille de 10x10 km occupées est estimé à

(Area of occupancy, AOO)

≤ 2	**Critically endangered**
≤ 20	**Endangered**
≤ 50	**Vulnerable**

Et

a/ un déclin continu

- *De l'étendu*
- *De la qualité environnementale*
- *Des interactions biotiques (entre espèces et entre espèce et milieu)*

b/ Menaces pouvant engendrer le déclin sur les 20 prochaines années

- *De l'étendu*
- *De la qualité environnementale*
- *Des interactions biotiques (entre espèces et entre espèce et milieu)*

c/ L'écosystème n'existe qu'à

- *Un seul endroit* *si AOO ≤ 2 mailles*
- *5 ou moins* *si AOO ≤ 20 mailles*
- *10 ou moins* *si AOO ≤ 50 mailles*

OU

3/ Moins de 5 localités * **Vulnerable**

Et

a/ Pouvant montrer une très rapide réaction aux effets d'activités humaines ou d'une réaction en chaine dans un avenir proche

b/ Dont il est possible que l'écosystème disparaisse ou devienne en Danger Critique (CR) de disparition dans un avenir proche.

Le terme localité correspond à la zone géographique distincte qui pourrait être affectée par une seule menace. Une localité peut donc contenir une ou plusieurs des unités écosystémiques définies.

C : **Dégradation d'un élément de l'environnement abiotique réduisant la qualité de l'habitat** :

1/ Un changement d'une variable environnementale :

≥ 80% de l'étendue ET ≥ 80% Sévérité relative Critically endangered

≥ 50% de l'étendue ET ≥ 80% Sévérité relative Endangered

≥ 80% de l'étendue ET ≥ 50% Sévérité relative Endangered

≥ 50% de l'étendue ET ≥ 50% Sévérité relative Vulnerable

≥ 80% de l'étendue ET ≥ 30% Sévérité relative Vulnerable

≥ 30% de l'étendue ET ≥ 80% Sévérité relative Vulnerable

Sur les 50 dernières années

OU

2/ Un changement d'une variable environnementale :

≥ 80% de l'étendue ET ≥ 80% Sévérité relative **Critically Endangered**

≥ 50% de l'étendue ET ≥ 80% Sévérité relative **Endangered**

≥ 80% de l'étendue ET ≥ 50% Sévérité relative **Endangered**

≥ 50% de l'étendue ET ≥ 50% Sévérité relative **Vulnerable**

≥ 80% de l'étendue ET ≥ 30% Sévérité relative **Vulnerable**

≥ 30% de l'étendue ET ≥ 80% Sévérité relative **Vulnerable**

Pour

a/ Les 50 prochaines années

b/ Toute période de 50 ans comprenant le présent et se projetant dans l'avenir

OU

3/ Un changement d'une variable environnementale de

≥ 90% de l'étendue ET ≥ 90% Sévérité relative **Critically endangered**

≥ 70% de l'étendue ET ≥ 90% Sévérité relative **Endangered**

≥ 90% de l'étendue ET ≥ 70% Sévérité relative **Endangered**

≥ 70% de l'étendue ET ≥ 70% Sévérité relative **Vulnerable**

≥ 90% de l'étendue ET ≥ 50% Sévérité relative **Vulnerable**

≥ 50% de l'étendue ET ≥ 90% Sévérité relative **Vulnerable**

Depuis 1750

D : **Perturbation des interactions responsables de l'équilibre biotique de l'écosystème :**

1/ Des perturbations des interactions biotiques nuisibles aux caractéristiques de l'écosystème :

≥ 80% de l'étendue ET ≥ 80% Sévérité relative Critically endangered

≥ 50% de l'étendue ET ≥ 80% Sévérité relative Endangered

≥ 80% de l'étendue ET ≥ 50% Sévérité relative Endangered

≥ 50% de l'étendue ET ≥ 50% Sévérité relative Vulnerable

≥ 80% de l'étendue ET ≥ 30% Sévérité relative Vulnerable

≥ 30% de l'étendue ET ≥ 80% Sévérité relative Vulnerable

Sur les 50 dernières années

OU

2/ Des perturbations des interactions biotiques nuisibles aux caractéristiques de l'écosystème

≥ 80% de l'étendue ET ≥ 80% Sévérité relative **Critically endangered**

≥ 50% de l'étendue ET ≥ 80% Sévérité relative **Endangered**

≥ 80% de l'étendue ET ≥ 50% Sévérité relative **Endangered**

≥ 50% de l'étendue ET ≥ 50% Sévérité relative **Vulnerable**

≥ 80% de l'étendue ET ≥ 30% Sévérité relative **Vulnerable**

≥ 30% de l'étendue ET ≥ 80% Sévérité relative **Vulnerable**

Pour

a/ Les 50 prochaines années

b/ Toute période de 50 ans comprenant le présent et se projetant dans l'avenir

OU

3/ Des perturbations des interactions biotiques nuisibles aux caractéristiques de l'écosystème

≥ 90% de l'étendue ET ≥ 90% Sévérité relative **Critically endangered**

≥ 70% de l'étendue ET ≥ 90% Sévérité relative **Endangered**

≥ 90% de l'étendue ET ≥ 70% Sévérité relative **Endangered**

≥ 70% de l'étendue ET ≥ 70% Sévérité relative **Vulnerable**

≥ 90% de l'étendue ET ≥ 50% Sévérité relative **Vulnerable**

≥ 50% de l'étendue ET ≥ 90% Sévérité relative **Vulnerable**

Depuis 1750

E: Estimation du risqué de disparition par analyse quantitative (modélisation)

≥ 50% dans les 50 prochaines années	Critically endangered
≥ 20% dans les 50 prochaines années	Endangered
≥ 10% dans les 100 prochaines années	Vulnerable

ANNEXE 5 : METHODE DE SUIVI DE LA VEGETATION PAR LE CSE

A. Méthodes d'acquisition des données

La carte de production végétale qui est le produit final de la campagne de biomasse, résulte de la combinaison de différents niveaux d'acquisition et de traitement des données:

- un niveau satellitale qui permet d'extraire l'Indice de Végétation par la Différence Normalisée (NDVI) des canaux rouge et proche infrarouge de l'imagerie en 2012;
- celui du terrain qui permet de mesurer directement la production herbacée et ligneuse au niveau des sites de contrôle au sol (SCS) mis en place sur l'ensemble de la zone d'étude;
- et un niveau traitement des données collectées sur le terrain et de détermination de la corrélation entre le NDVI et la production totale.

1. Le niveau satellitale

Les images de type S10 du satellite SPOT-VEGETATION ont été intégrées du 1 mai au 31 octobre 2012 pour obtenir le NDVI durant la saison de croissance. L'utilisation des données SPOT-VEGETATION permet en partie une économie de temps sur certaines étapes du traitement d'image préalablement appliquées sur la série NOAA/AVHRR.

L'Indice de Végétation par la Différence Normalisée (NDVI) en question est calculé à partir des pourcentages de réflectance dans le proche infrarouge et dans le rouge. La formule s'écrit sous la forme :

$$NDVI = \frac{(\text{proche infrarouge} - \text{rouge})}{(\text{proche infrarouge} + \text{rouge})}$$

-l'intégration du NDVI correspond à la moyenne pondérée des indices de végétation décadaires en fonction de la période de croissance considérée. L'équation utilisée étant de la forme:

$(\sum_{i=1}^{t} NDVI_i * X_i)/P$

$NDVI_i$ = indice de végétation de la décade

X_i = nombre d'images utilisées pour la synthèse décadaire

P = nombre de jours de la période d'intégration.

L'indice de végétation exprime l'activité chlorophyllienne des végétaux. Les capteurs montés à bord du satellite SPOT enregistrent dans différents canaux les réponses spectrales de la végétation. Les informations électromagnétiques reçues sont relatives à l'absorption et à la réflexion de l'énergie lumineuse du soleil. La chlorophylle absorbe fortement l'énergie émise dans le spectre du visible surtout dans les longueurs d'onde 610-680 nm correspondant au rouge (R) et enregistrée par la bande 2 du satellite. Les parois des cellules végétales réfléchissent fortement l'énergie lumineuse dans les longueurs d'onde comprises entre 790et 890 nm, correspondant au proche infrarouge (PIR) et enregistrée par la bande 3 de ce satellite.

2. Le niveau terrain

Les cartes d'indice de végétation ne montrant l'évolution de la croissance végétale que de manière qualitative, le contrôle au sol s'avère indispensable. Cette opération permet de valider l'information satellitale en quantifiant la production végétale par une mesure directe sur le terrain. A cet effet, 36 sites de contrôle au sol (SCS) de 9 km² de superficie, répartis dans les différentes zones éco-climatiques du pays sont mis en place.

2.1. La mesure de la production herbacée

Elle se fait selon la méthode de la ligne d'échantillonnage stratifiée. Sur un transect de 1 km de long, une stratification est effectuée selon différents niveaux de production de la strate herbacée. Chaque mètre carré est coté par un niveau de production allant de 0 à 3:

- la cote 0 correspond au sol nu,
- la cote 1 correspond à une production relativement faible sur le SCS,
- la cote 2 correspond à une production moyenne sur le SCS,
- la cote 3 correspond à une production relativement élevée sur le SCS.

Ensuite, des placeaux d'un mètre carré sont coupés au hasard sur la ligne. Une partie de la matière verte prélevée sur ces placeaux est transportée à l'étuve après un rééchantillonnage effectué pour chaque niveau de production, afin d'obtenir le taux de matière sèche. La production obtenue est pondérée par la fréquence relative de chaque strate.

2.2. La mesure de la production ligneuse

La biomasse foliaire est mesurée par la méthode de l'aire circulaire. Quatre placettes distantes de 200 m sur le transect sont systématiquement inventoriées. La taille de la placette est fonction de la densité des arbres et varie en général entre 1 ha et 1/16 ha. Les paramètres suivants sont relevés sur chaque sujet situé dans la placette:

- le nom de l'espèce,
- la hauteur,
- la largeur et la longueur de la couronne,
- la circonférence du tronc,
- les états, phrénologique et physiologique,
- et les marques de taille.

La production de chaque individu est obtenue à partir de la circonférence du tronc grâce à des relations allométriques (du type $a*C^b$) établies par le CIPEA au Mali.

a = constante fonction de l'espèce;

C = circonférence en cm;

b = constante fonction de l'espèce.

Cette production est calibrée chaque année à l'aide de branchettes prélevées sur les espèces les plus fréquentes.

3. Traitement des données de terrain et calibrage

Cette étape comprend plusieurs opérations:

- exploitation préliminaire des fiches de terrain;
- calcul des taux de matière sèche après étuvage des échantillons;
- calculs pondéraux pour obtenir la production totale (production herbacée + production foliaire des arbres) en kg ms/ha pour chaque SCS;
- détermination de la composition floristique en indiquant les six (6) espèces dominantes;
- régression entre l'indice de végétation et la biomasse totale;
- utilisation de l'équation de la droite de régression pour calibrer la carte de production végétale.

B. Note explicative de la carte de production végétale

L'exécution des différents niveaux de traitement des données aboutit à la réalisation de la carte de production végétale. La composition colorée (allant du gris pour les valeurs les plus faibles au violet pour les valeurs les plus fortes) permet de déterminer en kg ms/ha, la classe de production à laquelle appartient une zone de pâturage donnée (cf. légende de la carte). L'échelle de reproduction relativement petite de la carte (1:2.500.000), mais avec les nouveaux outils du SIG, il devient possible de faire des extractions ciblées sur des zones de terroirs comportant un intérêt particulier.

ANNEXE 6 : ESPECES VEGETALES RECENCEES AU FERLO (CSE, 2013)

Tableau 16: Description des espèces végétales dans la partie Ferlo sableux sur le Bassin versant du Ferlo

Ligneux	*Balanites aegytiaca :*	feuillage vert pendant et à la fin de la saison sèche. Une floraison sans époque fixe et très peu exigeant au sol (H. J. Von Maydell; 1990). Le feuillage apparait en fin de saison des pluies, vers le mois octobre, avec souvent, deux générations de feuilles qui chevauchent (Poupon 1979). La phase reproductive démarre pratiquement avec la feuillaison et peut se poursuivre sur 10 à 12 mois. Le rythme phénologique affecté par la sécheresse (Poupon ; 1979) (Fournier ; 1995). La feuillaison démarre en pleine saison sèche avec souvent une reprise de la formation foliaire alors que la chute des anciennes feuilles n'est pas encore terminée (Poupon, 1980). La floraison s'étale de novembre à mars (Fournier, 1995)
	Boscia senegalensis :	sols très secs, rocheux, argileux, pierreux ou latéritiques (H. J. Von Maydell; 1990). Le feuillage permanent, non épineux (Fournier ; 1995)
	Acacia radiana :	Il est fréquent dans les zones les plus sèches le long des cours d'eau temporaires, sur des sols à la fois légers et bien drainés comme les Ferrugineux tropicaux. Le debut de la feuillaison a souvent lieu avant l'arrivée des premières pluies (Fournier; 1995). Son maximum de feuillaison en octobre et ne se défeuille pas totalement en saison sèche
	Sclerocarya birrea :	La floraison a lieu durant la saison sèche lorsque les arbres sont dépourvus de feuilles
	Calotropis procera :	Floraison pendant toute la saison sèche (H. J. Von Maydell; 1990) sur des sols fortement dégradés
	Combretum glutinosum :	Il perd ses feuilles quelques mois pendant la saison sèche. La floraison a lieu en saison sèche après les feux de brousse auxquels il résiste très bien. Une fois établi quelque part, il forme facilement des peuplements denses. Il est particulièrement résistant à l'aridité, survivant là où des graminées ne pourraient le faire, et repousse très vite après les feux. Il est souvent grégaire sur les sols sableux et dégradés.
	Acacia senegal :	Espèce très résistante au sec (Von Maydell; 1990) préfère sols sableux comme rouge-brun et ferrugineux tropicaux. Cette espèce fleurit avant et pendant la saison des pluies de mai à août et une seule fois en début de saison des pluies avec une seconde floraison possible en janvier-février au Ferlo (Poupon, 1980; Fournier; 1995).
	Guiera senegalensis :	Sur des sols sableux dans des endroits secs, le feuillage reste longtemps pendant la saison sèche (H. J. Von Maydell; 1990)
	Schoenefeldia gracilis :	Espèce annuelle
	Zornia glochidiata:	est une bonne plante fixatrice des sols, Plante herbacée annuelle à tiges érigées ou décombantes. Les plantes de Zornia glochidiata fanent après la saison des pluies et se désintègrent rapidement. Elle est retrouvée autour des points d'eau dans le Ferlo
	Cenchrus biflorus:	persiste jusqu'à la fin de la saison sèche, graminée annuelle, généralement sur des sols

herbacées		sableux secs et dans des zones cultivées
	Aristida adscensionis :	espèce annuelle, floraison entre Février et Juin
	Dactyloctenium aegyptium :	espèce annuelle, sur sol sableux. Elle fleurit en Août dans le Sahel
	Eragrostis tremula:	espèce annuelle, avec une floraison qui commence quelques jours après les premières pluies. La phase végétative dure 19-35 jours et il y a peu de croissance végétative après le démarrage de la floraison.

Tableau 17: Description des espèces végétales dans la partie Ferlo cuirassé sur le Bassin versant du Ferlo

Ligneux	*Combretum glutinosum :*	elle perd ses feuilles quelques mois pendant la saison sèche. La floraison a lieu en saison sèche après les feux de brousse auxquels il résiste très bien. Une fois établi quelque part, il forme facilement des peuplements denses. Il est particulièrement résistant à l'aridité, survivant là où des graminées ne pourraient le faire, et repousse très vite après les feux. Il est souvent grégaire sur les sols sableux et dégradés.
	Commiphora africana :	véritable détecteur d'humidité. Sensible à l'arrivée du premier souffle d'humidité, c'est à dire le renversement du sens des vents. Ses feuilles ne peuvent vivre qu'en air humide : elles sont très sensibles à la sécheresse et dès la fin de la saison des pluies elles se déssèchent. Elle résiste à la saison sèche en déformant ses branches (Clanet et Gillet, 1980).
	Combretum nigricans :	Sur sols argileux, latéritiques (Von Maydell)
	Dalbergia melanoxylon :	Les semis forment un système racinaire étendu, qui leur permet de survivre durant la longue saison sèche et en cas de feu. Les arbres perdent leurs feuilles durant la saison sèche, et la nouvelle pousse commence au début de la saison des pluies.
	Acacia seyal :	Sur des sols argileux, elle supporte aussi bien les inondations que les sécheresses périodiques. Se rencontre près des mares et des bas-fonds (Von Maydell))
	Zizyphus mauritiana:	supporte les grandes chaleurs et la sécheresse. Sur des sols temporairement inondés. Floraison de Octobre à Janvier (Von Maydell, 1990 ; Fournier, 1995). Fructification dès la 4ème année. Plein de rendement dès les 10 à 12 ème années (Von Maydell).
	Eragrostis tremula :	espèce annuelle, avec une floraison qui commence quelques jours après les premières pluies. La phase végétative dure 19-35 jours et il y a peu de croissance végétative après le démarrage floraison.
	Schoenefeldia gracilis :	Herbe annuelle

Herbacées		
	Andropogon pseudapricus :	graminée annuelle ou vivace ; pousse sur des sols latéritiques superficiels, sableux ou graveleux
	Spermacoce stachydea :	est une espèce annuelle. Elle se multiplie par graines. Elle est très rare sur les sols argileux humides. La germination a lieu dès les premières pluies du mois de mai et se prolonge jusqu'en juin
	Schizachyrium :	Exilé
	Pennisetum pedicellatum :	herbacée annuelle
	Zornia glochidiata :	légumineuses non pérennes, là où Zornia domine dans les pâturages loin des points d'abreuvement, la disponibilité en eau est faible. La végétation y démarre tardivement.
	Loudetia togoensis :	graminée annuelle, sur des sols argileux

Année : 2017

Titre : Dynamique Spatio-temporelle des Ecosystèmes du Bassin Versant du Ferlo (Nord-Sénégal)

Auteur : Taibou BA

Nature : Thèse de doctorat

Option : Ecologie

Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal)

RESUME

Cette étude a porté sur la dynamique des écosystèmes du Bassin versant du Ferlo entre 1965 et 2015, soit sur une période de 50 ans, en utilisant la télédétection, les systèmes d'information géographique et les travaux de terrain. L'objectif principal est d'analyser la dynamique spatio-temporelle des écosystèmes du Bassin-versant du Ferlo entre 1965 et 2015 à travers la méthode de la télédétection et la cartographie afin d'évaluer les mutations spatio-temporelles intervenues au niveau de ce milieu et simuler le devenir de ces écosystèmes à l'horizon 2075. L'analyse de l'évolution de l'occupation du sol a montré que 35% des terres sont restées à l'état initial (sans changement), 65% ont subi des modifications, et 7% se sont converties. Les modifications concernent essentiellement les zones de végétation naturelle qui ont enregistré une évolution régressive marquée par une baisse de superficie de la forêt galerie, de la savane boisée et de la savane arborée, de la savane arbustive et de la steppe. Les conversions ont affecté principalement les zones de végétation naturelle. Les zones de culture ont connu une extension due principalement à la conversion des zones de végétation naturelle.

Les résultats obtenus indiquent une dynamique régressive des écosystèmes qui s'est traduite en une modification de la structure du paysage avec une réduction sensible de la quantité et de la qualité des couvertures végétales .L'application des critères de la Liste Rouge des écosystèmes (Rodriguez et Al, 2011) fait état d'une disparition vers l'horizon 2075, des reliques de forêt galerie, des savanes boisée et arborée, et d'une extension des zones agricoles.

Mots-clés : écosystème, télédétection, évolution, matrice de transition, Ferlo, Sénégal.