



Pour l'obtention du diplôme de Docteur en Géographie et
Aménagement de l'Université Jean Moulin Lyon 3 (FRANCE)

et

Pour l'obtention du diplôme de Docteur en Géographie de
l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (SÉNÉGAL)

MAMADOU ADAMA SARR

ÉVOLUTION RÉCENTE DU CLIMAT ET DE LA VÉGÉTATION AU SÉNÉGAL

(CAS DU BASSIN VERSANT DU FERLO)

Thèse en cotutelle

Soutenue le 4 décembre 2009 à 14h30

à l'Université Jean Moulin Lyon 3

sous la direction des Professeurs

MARCEL LEROUX † - JACQUES COMBY (Université Jean Moulin Lyon 3)

MAMADOU MOUSTAPHA SALL (Université Cheikh Anta Diop)

Jury

LÉCA DEBIAGGI	Maître de Conférences, Université Lyon 3	Examinatrice
MICHEL MIETTON	Professeur, Université Lyon 3	Examineur
PAUL NDIAYE	Maître-assistant, Université CAD	Rapporteur
JEAN PIERRE VIGNEAU	Professeur, Université Paris X	Rapporteur
BERNARD LACAZE	Ingénieur de recherche, CNRS Paris 7	Examineur
MAMADOU MOUSTAPHA SALL	Professeur, Université CAD, Dakar	Co-directeur
JACQUES COMBY	Professeur, Université Lyon 3	Directeur

À

- Mon grand père feu El Hadji Moussa SARR, qui nous a quittés durant mes premiers pas dans la recherche. L'aboutissement de ce travail est dû en grande partie au goût à la recherche perpétuelle du savoir que tu as su m'inculquer très tôt ;
- Mon père et ma mère ; je ne me lasserai jamais de les remercier. Je suis fier d'être votre fils ;
- Mon épouse, Madame SARR Danielle KHAIRALLAH, qui a su être patiente, compréhensive et surtout m'apporter son amour dans les moments de doute, et par la même occasion à ma belle mère Madame Najat KHAIRALLAH qui n'a cessé de m'encourager ;
- Mes oncles Massamba SARR et Amadou Lamine SARR qui m'ont encouragé à entamer des travaux de recherche et m'ont soutenu dans les bons moments, mais surtout dans les périodes difficiles afin d'aller jusqu'au bout et de finaliser la thèse. Je vous dédicace ma thèse.

Bref à toute ma famille

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
REMERCIEMENTS	3
GLOSSAIRE DES ABRÉVIATIONS	5
RÉSUMÉ	7
SUMMARY	9
INTRODUCTION GÉNÉRALE ET OBJECTIFS SCIENTIFIQUES	11
PARTIE 1: LE FERLO ; UNE DENSITÉ FAIBLE DE LA POPULATION MAIS UNE FORTE PRESSION SUR UN MILIEU FRAGILE	20
CHAPITRE 1 : UN ÉCOSYSTÈME FRAGILE SOUS FORTE PRESSION	21
CHAPITRE 2 : LES TRAITS GÉNÉRAUX DE LA CIRCULATION MOYENNE TROPICALE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET DANS LE BASSIN VERSANT DU FERLO : CONSÉQUENCES SUR LES PRÉCIPITATIONS	69
PARTIE 2 : ÉVOLUTION CLIMATIQUE RÉCENTE	92
CHAPITRE 3 : LES DONNÉES : SOURCES ET LIMITES	93
CHAPITRE 4 : LES PRÉCIPITATIONS DANS LE BASSIN VERSANT DU FERLO : UN NOUVEAU TOURNANT ?	105
CHAPITRE 5 : ÉVOLUTION DES FACTEURS ET DES CONDITIONS THERMIQUES : UNE TENDANCE CONTRASTÉE	177
CHAPITRE 6 : ÉVOLUTION DE L'ÉVAPORATION ET DE L'HUMIDITÉ RELATIVE : UN TOURNANT DANS L'ÉVOLUTION CLIMATIQUE CONFIRMÉ	213
PARTIE 3 : ÉVOLUTION DE LA VÉGÉTATION	237
CHAPITRE 7 : ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION VÉGÉTALE A PARTIR DES IMAGES NDVI DE NOAA-AVHRR	238
CHAPITRE 8 : UNE PROGRESSION SENSIBLE DE LA SAVANE ARBUSTIVE A ARBORÉE LIÉE À LA RÉDUCTION DE LA MOBILITÉ PASTORALE	268
CHAPITRE 9 : L'UTILISATION DE MSG POUR UN MEILLEUR SUIVI DE LA PRODUCTION VÉGÉTALE EN AFRIQUE OCCIDENTALE	292
CONCLUSION GÉNÉRALE	304
ANNEXES	314
BIBLIOGRAPHIE	359
LISTE DES FIGURES	376
LISTE DES TABLEAUX	381
LISTE DES PHOTOGRAPHIES	383
TABLE DES MATIÈRES	384

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à rendre un grand hommage à monsieur le Professeur Émérite feu Marcel Leroux pour m'avoir incité à me lancer dans cette aventure en intégrant l'équipe du Laboratoire de Climatologie Risques Environnement (LCRE) qu'il dirigeait. A travers ce grand chercheur qui suscite toute mon estime par l'œuvre qu'il a accomplie, je retiendrais parmi ces nombreuses qualités l'esprit critique et l'importance de la pédagogie dans le travail d'un chercheur. Je vous remercie de m'avoir mis sur la bonne route.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à monsieur le Professeur des Universités Jacques Comby, Directeur du LCRE, d'avoir accepté d'assurer la continuité de la codirection à la suite du décès du Professeur Leroux. Je veux dire au Professeur Comby «*DIARAADIEUF*» pour les nombreuses séances de travail qu'il m'a accordées durant toutes ces années au point que certains le prenaient pour mon codirecteur avant même la disparition du Professeur Leroux. Merci également pour les encouragements, le soutien et la confiance à mon égard, notamment en me confiant mes premières charges d'enseignement à l'Université Jean Moulin Lyon 3. Les qualités humaines, les relations sociales et la modestie qui caractérisent votre personne m'ont aidé à surmonter beaucoup d'obstacles au cours de ces années que j'ai passées à vos côtés.

Ma reconnaissance s'adresse au Professeur Mamadou Moustapha Sall d'avoir bien voulu codiriger ce travail de recherche et faire partie du jury en dépit de son importante charge professionnelle.

A monsieur Paul Ndiaye, rapporteur de la thèse, qui n'a jamais cessé de réitérer ses encouragements, son soutien discret sur mon travail. Votre disponibilité au cours des différents stages doctoraux sur le terrain a été d'une grande utilité à la concrétisation de cette thèse.

Je remercie également monsieur le Professeur Vigneau, pour qui j'ai une grande estime, d'avoir accepté d'évaluer ce travail en tant que rapporteur.

A monsieur Bernard Lacaze, qui, malgré un agenda prenant, a accepté à plusieurs reprises, de m'ouvrir les portes de son laboratoire à Paris pour des journées de traitement et d'analyse d'images satellites. Je n'oublierai jamais les séances de travail, même les dimanches et les samedis, soit à Paris, soit à Lyon mais également la formation dans la discipline de la télédétection que vous avez su m'apporter. «*DIARAADIEUF*» également.

Je tiens à exprimer ma gratitude à monsieur le Professeur des Universités Michel Mietton, qui m'a toujours considéré comme son propre doctorant, pour toutes ses remarques constructives et ses encouragements répétés.

A Madame Léca Debiaggi d'avoir accepté de juger mon travail, pour qui j'ai une reconnaissance et une estime pour toute l'aide qu'elle m'a accordée durant toute ces années, surtout dans le domaine de la télédétection et des SIG.

A monsieur le Maître de Conférences Luc Bartélemy pour ses nombreuses lectures qui ont permis d'améliorer la qualité du manuscrit.

L'aboutissement de ce travail a nécessité en amont un travail de terrain considérable avec un encadrement composé de personnes efficaces et compétentes. Si la thèse est souvent présentée comme un exercice solitaire, je n'aurai cependant jamais pu l'achever sans le soutien de toutes ces personnes et de toutes ces structures au Sénégal. Une très grande reconnaissance à tout le personnel administratif, scientifique et logistique du Centre de Suivi Ecologique, sans exception. Mes pensées vont surtout à mon encadrant monsieur Jacques André Ndione pour son soutien inestimable durant toutes ces années et son esprit critique à chaque entretien ; je ne saurais te remercier par ces quelques paroles. Mais également à l'équipe de Veille Environnementale (Gora Bèye, Alioune Diouf, Moussa Dramé), à l'équipe de GRN et Evaluation Environnementale (Magatte Ba, Moussa Sall, Abdoulaye Faye), à l'équipe du Département Géomatique (Ousmane Bocoum, Taibou Ba, Déthié S. Ndiaye, Souleymane Diop, Almamy Wade, Abdoulaye Wéllé, Samba Ndao, Malick Diagne), à monsieur Alioune Touré, informaticien et enfin Dieynaba et Penda Sarr stagiaires au CSE. Je remercie aussi monsieur Amadou Moctar Niang (ancien Directeur Général), monsieur Assize Touré (Directeur Général) et monsieur Aboubacar Camara (Chargé de la formation) qui ont eu à m'accorder le stage doctoral. Je remercie messieurs Kane et Massaly de la Direction Nationale de la Météorologie du Sénégal qui m'ont facilité l'accès aux données. Mes pensées vont également à Ibrahima Niang de la Direction de l'Élevage du Ministère de l'élevage du Sénégal et aux chercheurs du CIRAD pour ne citer que Amadou Tamsir Diop et Ibra Touré.

Merci également au Professeur Pierre Camberlin, Directeur adjoint du Centre de Recherches en Climatologie à l'Université de Dijon, qui a eu l'amabilité d'encadrer en partie mes travaux sur le plan statistique. Par la même occasion, je n'oublie pas le Professeur Jean Pierre Laborde (Université Sophia Antipolis de Nice) et Pierre Hubert (École Nationale Supérieure des Mines de Paris) qui ont accepté, en dépit de leurs charges universitaires, de me rencontrer.

Merci également à Kristell Michel, Olivier Chaire (UMR 5600) et André Paillet (Université de Savoie) qui m'ont tant apporté lors de mes traitements d'images satellites ainsi qu'aux travaux cartographiques. Je suis sensible au soutien et à la disponibilité sans faille de Linda Chourfi (secrétaire du CRGA), Marie-Christine Michel (secrétaire à l'UMR 5600), Chantal Gérard (Bibliothécaire CNRS), Eric Petit (Service d'édition de Lyon III).

Je remercie également tous les membres du LCRE (Florent Renard, Stéphane Aubert, Alexis Pommier, Leïla Amraoui, Didier Soto, Rémy Feidangamo, Luc Morel, Isabelle Kane, Mohamed Garayane, Mohamed Bouzidi, Emmanuel Thimonier, Nicolas Ferrand) pour leur encouragement et leur soutien.

Je ne saurais finir sans dire «*DIARAADIEUF*» à mes amis (monsieur et madame Bocoum, monsieur et madame Samb, Serigne Touba Touré, Isabelle Bouchard, Sonia Daoudi, Fatou Thiam, Abdou Sylla, Pape Diene Diouf, etc...) et également tous ceux qui se trouvent au Sénégal, qui n'ont cessé de m'encourager.

Que tous ceux qui m'ont aidé et soutenu dans la réalisation de cette œuvre, trouvent ici l'expression de ma très profonde gratitude. Mes pensées vont également à tous les chercheurs rencontrés dans les colloques auxquels j'ai eu la chance de participer.

GLOSSAIRE DES ABRÉVIATIONS

AA : Agglutinations Anticycloniques
ACCA : Adaptation aux Changements Climatiques en Afrique de l'ouest
AMMA : African Monsoon Multidisciplinary Analysis
AMP : Anticyclone Mobile Polaire
APRHN : Agence de Promotion du Réseau Hydrographique National
ARVI : Indice de végétation normalisé et corrigé des effets atmosphériques
ASECNA : Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et Madagascar
BME : Bulletin Météorologique Européen
BPI : Basses Pressions Intertropicales
BPIT : Basses Pressions Intertropicales
CEFFEVA : Comité d'Études sur les Femmes, la Famille et l'Environnement en Afrique
CSE : Centre de Suivi Écologique
CILSS : Comité Inter-états de Lutte contre la Sècheresse au Sahel
CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le développement
CNRS : Centre National de Recherche Scientifique
CRCTA : Centre de Recherche de Climatologie Tropicale Africaine
CSS : Compagnie Sucrière Sénégalaise
DE : Direction de l'Élevage
DEFCCS : Direction des Eaux et Forêts, Chasse et Conservation des Sols
DNM : Direction de la Météorologie Nationale
DPS : Direction des Prévisions et des Statistiques du Sénégal
EM : Équateur Météorologique
EMI : Équateur Météorologique Incliné
EMV : Équateur Météorologique Vertical
ERTS : Earth Resources Technological Satellite
ESA : Agence Spatiale Européenne
ETM+ : Enhanced Thematic Mapper Plus
EUMETSAT : Organisation Européenne pour l'Exploitation des Satellites Météorologiques
FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations
ICCARE : Identification et Conséquences d'une Variabilité du Climat en Afrique de l'ouest
IEMVT : Institut d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des pays Tropicaux
IFAN : Institut Fondamental d'Afrique Noire
ISIG : Imagerie et Systèmes d'Information Géographique
ISRA : Institut Sénégalais des Recherches Agricoles
IRCL : InfraRouge de Courte Longueur d'onde
IRD : Institut de Recherche pour le Développement
FIT : Front InterTropicale
J.E.A : Jet d'Est Africain
J.E.T : Jet d'Est Tropical
GATE : GARP Atlantic Tropical Experiment
GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GDR-MSG-ATR : Groupe de Recherche Météosat Seconde Génération Acquisition à Temps Réel
GTZ : Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (Coopération technique allemande)
HPT : Hautes Pressions Tropicales
HRPT : High Resolution Picture Transmission

HRV : High Resolution Visible
HRVIR : Haute Résolution Visible et Infrarouge
HRG : Haute Résolution Géométrique
HRS : Haute Résolution Stéréoscopique
LCCS : Land Cover Classification System
MDRH : Ministère du Développement Rural et de l'Hydraulique
MSG : Météosat Seconde Génération
MSS : MultiSpectral Scanner
NASA-GIMMS : Global Inventory Modeling and Mapping Studies de la NASA
NDVI : Normalized Differential Vegetation Index
NOAA-AVHRR : National Oceanic and Atmospheric Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer
OMM : Organisation Météorologique Mondiale
OMVG : Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie
OMVS : Organisation pour la mise en Valeur du fleuve Sénégal
PAPEL : Projet d'Appui à l'Élevage
PIR : Proche InfraRouge
PIV : Périmètres Irrigués Villageois
PMIP : Paleoclimate Modelling Intercomparison Project
PPZS : Pôle Pastorale Zones Sèches
PRODIG : Pôle de Recherche sur l'Organisation et la Diffusion de l'Information Géographique
PVI : Indice de Végétation Perpendiculaire
RGPH : Recensements Généraux de la Population et de l'Habitat
ROSELT/OSS : Réseau d'Observatoires de Surveillance Écologique à Long Terme de l'Observatoire du Sahara et du Sahel
SEVIRI : Spinning Enhanced Visible and Infra Red Imager
SPOT : Système pour l'Observation de la Terre
SAED : Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du delta du fleuve Sénégal et de la Falémé
SAVI : Indice de Végétation ajusté au sol
SDE : Société Des Eaux du Sénégal
SMT : Système Mondial de Transmission des données
TSAVI : Transformed Soil Adjusted Vegetation Index issu du SAVI
TM : Thematic Mapper
TVI : Indice de Végétation Transformé
ZIC : Zone Intertropicale de Convergence
UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture
UP : Unités Pastorales
UTM : Transverse Universelle de Mercator
VITO : Vlaamse Instelling Voor Technologisch
VPI : Vegetation Productivity Indicator
WCP-Water : World Climate Program-Water
WGS : World Geodetic System
WAMEX : West African Monsoon EXperiment
ZIC : Zone de Convergence Intertropicale

RÉSUMÉ

Comprendre l'évolution et la variabilité récentes du climat dans les régions arides et semi-arides est une nécessité pour anticiper ce que pourraient en être les conséquences sur les milieux et sur les sociétés de ces régions, et ainsi définir des stratégies politiques d'adaptation durables. Pour répondre à cet objectif, nous avons articulé notre travail de recherche en trois parties.

La **première partie** présente le cadre géographique par une description détaillée du milieu physique et des différents systèmes d'occupation du sol. Cette description met en évidence un écosystème fragile, sous forte pression due aux activités qui s'y pratiquent très sensibles aux évolutions et variabilités climatiques et notamment à celles des précipitations. Elle résume également le cadre climatique moyen en mettant l'accent sur les mécanismes généraux de la circulation générale de l'Afrique de l'Ouest dont fait partie le domaine d'étude. L'analyse rappelle les conditions dynamiques moyennes globales du domaine climatique tropical qui, en relation avec les facteurs régionaux et locaux, déterminent les composantes moyennes du temps dans le domaine d'étude et ses marges.

La **deuxième partie** s'intéresse à l'analyse de la variabilité spatio-temporelle du climat durant la période 1951-2005 en mettant l'accent plus sur la pluviométrie que sur les autres paramètres climatiques (la température, l'évaporation, l'humidité relative et l'insolation). Elle souligne d'abord les contraintes physiques et méthodologiques qui s'imposent à l'analyse statistique des paramètres et justifie aussi les modèles retenus pour l'exploitation des données. L'analyse des résultats de la pluviométrie montre une forte variabilité, mais également une quasi stationnarité de la fin des années 1970 jusqu'au milieu des années 1980, et depuis une hausse des volumes annuels précipités dans l'ensemble du domaine d'étude. Comparée à l'évolution d'autres paramètres climatiques (insolation, températures, évaporation et humidité relative), le milieu des années 1980 et le début des années 1990 apparaît comme une période de «rupture» de tendance justifiant l'interrogation sur la persistance ou non de la tendance sèche du climat sahélien dans sa globalité.

La **troisième partie** s'ouvre par l'analyse de l'évolution de la production végétale à pas de temps différents sur la base d'une série d'images de synthèse NDVI (Normalized Differential Vegetation Index) de NOAA-AVHRR sur la période 1981-2005. L'évaluation de l'évolution interannuelle et intra-annuelle de la production végétale en relation avec les précipitations dans le domaine d'étude montre dans l'ensemble une assez forte corrélation. En revanche, les actions

anthropiques, dans le cadre d'exécution de politiques d'aménagements, perturbent cette étroite relation. Cette situation est mise en évidence par les résultats obtenus dans l'analyse de la cartographie des changements de l'occupation du sol entre les années 1990 et 2002. L'étude, fondée sur le traitement des images TM (Thematic Mapper) et ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) de Landsat en appui des relevés de terrains, confirme l'action de l'homme dans l'avancée de la savane arbustive à arborée. Après en avoir défini les caractéristiques, l'outil de suivi de la végétation du capteur SEVIRI du satellite MSG est proposé. La validation de ce nouveau produit est faite sur la base d'une étude comparative avec ceux de SPOT-VEGETATION et NOAA-AVHRR, fréquemment utilisés dans le monde scientifique.

Après un rappel des résultats essentiels de la recherche, la conclusion générale insiste sur la recherche de solutions aux problèmes d'eau nécessaire pour une agriculture performante et pour une mobilité réduite de l'activité pastorale. Ceci passe par la multiplication d'études sur la variabilité climatique, surtout à l'échelle locale. La conclusion générale montre également la nécessité d'une approche multicapteurs pour le suivi de la végétation.

Enfin, pour apporter plus de précisions à la compréhension de la thèse, il est porté en annexes des éléments de caractéristiques des satellites ainsi que des capteurs utilisés et une étude de validation croisée sur les techniques d'interpolation spatiale.

SUMMARY

Understand the evolution and the recent variability of the climate in the arid and semi-arid regions is a necessity in order to anticipate what could be the consequences on the environments and on the societies of those regions, and thus define the strategic politics of sustainable development. To reach that goal, we have organised our research in three parts.

The first part treats of the geographical plan through a detailed description of the physical environment and of the different systems of the ground occupation. This description put in evidence a fragile ecosystem under high pressure due to the activities which are employed here. The description summarizes also the middle climate frame by accentuating on the general mechanisms of the general circulation of West Africa which is part of the study zone. The analysis constitutes a recall of the dynamic average global conditions of the climatic tropical field which, in relation with local and regional factors, determines the average components of time in the study field and its margins.

The second part concerns the analysis of the spatiotemporal variability on the period going from 1951 until 2005 by putting the accent more on the recorded rainfall than on other climatic parameters such as temperature, evaporation, relative humidity and insolation. But it underlines first the physical and methodological constraints which are compulsory for the statistic analysis of the parameters and justify also the models retained for the use of the database. The analysis of the recorded rainfall results show a high variability, but also a quasi stationarity from the end of the years 1970 and that until the middle of the 1980's, and since an increase of the annual precipitation volumes on the totality of the study field. Compared to the evolution of other parameters (insolation, temperatures, evaporation and relative humidity), the middle of the 1980's and the beginning of the years 1990's appear like a period of trend "break up" justifying the questioning on the persistence or not of the dry trend of the Sahel climate in its totality.

The third part starts by the analysis of the evolution of the vegetal production different time scale on the basis of a serie of synthesis images NDVI (Normalized Differential Vegetation Index) of NOAA-AVHRR on the period going from 1981 until 2005. The evaluation of the inter-annual and intra-annual evolution of the vegetal production in relation with the precipitations in

the study field demonstrates a good correlation. On the other hand, the anthropic actions, within the framework of execution of the politics of planning disturb this close relation. This situation is put in evidence by the results obtained in the analysis of the cartography of the ground occupation changes between 1990 and 2002. The study conceived on the treatment of the images TM (Thematic Mapper) and ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) of Landsat in support of the statements of grounds; confirms the human action in the expansion from the bush savannah to arborous. After defining the characteristics, the follow up tool of the vegetation of the sensor SEVIRI of the satellite MSG is proposed. The corroboration of this new product is done on the basis of a comparative study with those of SPOT-VEGETATION and NOAA-AVHRR, frequently used in the scientific field.

After a recall of the essential results of the research, the general conclusion insists on the exploration of solutions for water problems, important for a performing agriculture and a reduced mobility of the pastoral activity. And that passes through the multiplication of studies on the climatic variability, mostly on local scale. The general conclusion shows also the necessity of an approach of multi-sensors for the vegetation follow up.

Finally, in order to bring more precisions for the comprehension of the thesis, you will find in the appendix elements concerning the characteristics of satellites as well as the sensors used and a study of cross validation on the techniques of spatial interpolation.

INTRODUCTION GÉNÉRALE ET OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Étudier et maîtriser l'évolution récente du climat dans les régions arides et semi-arides est une priorité dans les grandes orientations du développement des pays comme le Sénégal. Depuis trois décennies, un intérêt soutenu se manifeste pour l'étude du climat et de sa variabilité dans la zone intertropicale en raison des impacts «irréversibles» que celle-ci engendre.

Les variations du temps et du climat constituent un phénomène contraignant à l'application de politiques efficaces de développement, surtout dans la bande sahélienne qui présente une sensibilité accrue aux situations extrêmes (inondations, «vagues de froid», sécheresses, etc...) en raison de la structure économique, sociale et démographique des pays sahéliens. A ce propos, dès l'année 1976, dans le numéro spécial de la *Météorologie* de septembre, l'ancien directeur de l'exploitation de la météorologie à la direction de l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et Madagascar (ASECNA), déclarait que *«pour se développer, les pays africains sont condamnés à faire d'importants investissements dans le domaine de l'exploitation des ressources naturelles, de la production alimentaire, des moyens de communication et de la promotion sociale. La rentabilité de ces investissements requiert une bonne connaissance du milieu naturel pour lequel le temps et le climat ont une influence considérable. Autant dire que la météorologie est l'un des instruments indispensables au développement de l'Afrique»* in Sagna P. (2005). Cette connaissance suppose l'intervention de nombreux programmes de recherches et d'études en quête d'informations ou tout simplement de données pour la compréhension des phénomènes météorologiques et climatiques. Beaucoup ont abordé la problématique à une échelle large soit sur l'ensemble du Sahel, ou en partie (Ouest, Centre, Est). Les études localisées sont plus rares. L'une des plus récentes, à grande échelle, se trouve être *«African Monsoon Multidisciplinary Analysis»* (AMMA)¹.

¹ L'objectif d'AMMA est d'améliorer la connaissance et la compréhension de la mousson d'Afrique de l'Ouest et de sa variabilité de l'échelle journalière à l'échelle annuelle.

En dehors des éléments qui régissent la circulation atmosphérique générale, les facteurs locaux ont toute leur importance dans la détermination et la singularisation du climat de la région. Le climat se caractérise par *«le résultat d'un apport allogène et la réponse du substratum : l'apport étant fourni par des conditions générales : cosmiques, planétaires et dynamiques (flux-discontinuités-perturbations), tandis que la réponse provient des conditions chorologiques : topographie, nature et couvert du substratum, hydrographie...»* (Leroux M., 1983). Ajoutons que les facteurs chorologiques sont responsables des particularités qui résultent de l'utilisation variable qui est faite par les milieux des apports plus ou moins lointains. Ainsi, la maîtrise du climat et de son évolution passe aussi par des études régionales voire locales, à échelle fine, contrairement à la plupart des études climatiques réalisées sur l'espace sahélien. La détermination de plus en plus précise des conditions climatiques locales participe à l'enrichissement des connaissances traduisant les nuances climatiques qui doivent être prises en compte au niveau global. Nous avons choisi le bassin versant du Ferlo (pour des raisons évoquées dans la problématique) dans le Nord du Sénégal pour analyser l'évolution récente du climat et la réponse de la végétation. L'évolution du climat est centrée essentiellement sur l'analyse des données stationnelles de la pluviométrie (elle est l'élément climatique qui varie le plus dans le temps et dans l'espace et qui définit les saisons sèches et pluvieuses selon Samba-Kimbata M. J., 1993) et d'autres paramètres climatiques qui y sont mesurés. L'analyse de l'évolution de la couverture végétale grâce à l'apport exclusif de la télédétection essaie de déterminer les niveaux de rapport entre ces deux composantes environnementales.

La caractérisation et la compréhension de l'évolution récente du climat et de la végétation à l'échelle du bassin versant permettent de disposer de données précises détaillées, mais aussi d'observer des états de surface que l'analyse globale à l'échelle du continent ne saurait mettre en évidence. Le sujet de ces recherches tourne autour de *«l'évolution du climat et de son impact sur la végétation»*. Le terme évolution climatique apparaît comme un changement graduel des éléments du temps à travers les âges. *«Elle aboutit, lorsque la série temporelle est très longue, à des grands changements par rapport aux conditions qui prévalaient au départ. C'est ainsi que nous savons aujourd'hui que le climat a beaucoup changé dans le passé et des périodes de refroidissement généralisé au niveau de la planète ont*

été précédées ou suivies par des périodes de réchauffement. L'évolution fait partie intégrante de la dynamique même du climat et ce dernier est en perpétuelle modification. Nous le caractérisons qu'à un moment précis de son évolution qui devient unique dans le temps» (Sagna P., 2005).

UN CONTEXTE SCIENTIFIQUE FAVORABLE

La vulnérabilité croissante des pays en voie de développement face aux conséquences des changements actuels dans l'évolution du climat, liée à une variabilité plus accentuée au cours des dernières décennies, favorise l'intervention de programmes de recherches internationaux et nationaux, de plus en plus nombreux, depuis le début de la grande sécheresse sahélienne des années 1970. La plupart de ces programmes interviennent depuis la compréhension des causes de la variabilité climatique (*African Monsoon Multidisciplinary Analysis*, AMMA) jusqu'aux stratégies régionales d'*Adaptation aux Changements Climatiques en Afrique de l'ouest* (ACCA²). Ce contexte scientifique favorable et actuel a guidé mes travaux de recherches, et ce, depuis un Master de géographie à l'Université de Savoie sur la question de la variabilité pluviométrique au Sénégal, pour tenter d'apporter ma contribution à la réalisation des problèmes auxquels le Sahel en général et le Sénégal en particulier continuent de faire face. Ce contexte se traduit également par :

- La participation au programme *Réseau d'Observatoires de Surveillance Ecologique à Long Terme de l'Observatoire du Sahara et du Sahel* (ROSELT/OSS³). Ce programme repose sur la capitalisation, l'exploitation et la diffusion de la masse considérable d'informations existantes en Afrique pour fournir aux acteurs du développement des outils d'aide à la prise de décisions.

² Le programme ACCA vise à renforcer la capacité des populations et organisations africaines à s'adapter aux changements climatiques par la recherche et le renforcement des capacités. Il est issu d'un projet conjoint du Centre de Recherches pour le Développement International (CRDI), organisme canadien, et du Department for International Development du Royaume Uni.

³ Créé depuis 1992, ROSELT vise à valoriser les observations et les recherches menées dans un assez grand nombre de sites représentatifs de la zone et à faire de ces sites des lieux privilégiés pour l'étude des interactions environnement / développement dans cette vaste partie du continent africain, particulièrement exposée aux menaces sérieuses du déséquilibre environnemental.

- La participation au programme du *Groupe De Recherche Météosat Seconde Génération Acquisition à Temps Réel* (GDR-MSG-ATR) qui regroupe des unités de recherche autour de l'utilisation d'une source de données qu'est le satellite MSG.
- La participation au pôle environnement du *Centre de Suivi Ecologique* (CSE) qui traite entre autres des problématiques de suivi de la biomasse, des feux de brousse, des écosystèmes pastoraux et de la campagne agricole sur le territoire sénégalais.

Ces différentes collaborations évoquées ont été doublement bénéfiques dans la réalisation de la thèse, en commençant par une formation dans les domaines de la géomatique (Système d'Informations Géographiques et Télédétection) pour aboutir à quelques réalisations en terme de publications. Les rencontres faites dans le cadre des partenariats ont été également autant d'occasions de présenter les résultats et d'améliorer les méthodes et les outils mis en œuvre dans ce travail.

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Depuis quelques années, la question de l'évolution du climat et de sa variabilité suscite un intérêt prioritaire au sein des sociétés et des Etats sahéliens. La maîtrise des impacts de la variabilité climatique, notamment des fluctuations pluviométriques sur l'environnement ne cessera de constituer un enjeu de société majeur qui mobilise tous les acteurs du développement compte tenu de l'étroite relation de la pluie avec les secteurs économiques (agriculture, pastoralisme) et sociaux (santé, sécurité alimentaire, alimentation en eau potable) des pays situés au sud du Sahara. Les grandes sécheresses passées (années 1970 et 1980) ont causé de véritables problèmes environnementaux (déplacements de personnes, famine, abandon de l'agriculture, mort de bétail) dont les séquelles restent encore visibles. Au regard de ce constat, l'objectif principal de cette thèse est d'apporter des connaissances précises sur l'évolution récente du climat, mais aussi sur son impact sur le comportement évolutif du couvert végétal, principale ressource d'un pastoralisme dominant dans le domaine de l'étude. La relation qui semble être évidente de la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie sur

l'évolution de la végétation, par exemple la répartition zonale traduisant une corrélation entre le gradient pluviométrique et le gradient végétal (forêt, savane, steppe), nous ont amené à nous poser des questions sur l'existence d'autres facteurs qui pourraient reléguer ce rapport direct au second plan.

Cependant, l'évaluation des conséquences de la variabilité climatique est rendue délicate par le manque considérable de mesures d'observations adéquates avec un recul temporel significatif. A cette situation, s'ajoutent une mauvaise collecte des données quantitatives et qualitatives existantes, et leurs traitements en utilisant parfois des outils et des méthodes pas toujours adéquats, en raison de la complexité des systèmes. Aujourd'hui, la priorité consiste en une maîtrise de la compréhension des phénomènes de la variabilité climatique et végétale passant par une densification des réseaux de mesure qui facilite les conditions de prévision et la surveillance à long terme des détections des variations importantes. Ceci devrait commencer par des études sectorielles à petite échelle pour maîtriser les particularités climatiques et environnementales des zones sahéliennes, ce qui donneraient plus d'informations détaillées. C'est pourquoi nous avons choisi de travailler à échelle fine (bassin versant du Ferlo, moins de 50 000 km² de superficie).

Le bassin versant du Ferlo est une zone où le développement économique et social est très fortement lié à l'exploitation et à la valorisation des ressources naturelles, avec une production végétale naturelle et une agriculture étroitement tributaires de la pluviométrie. Il fait partie des rares zones qui comptabilisent un réseau de mesure (13 postes) laissant possible la réalisation d'une analyse des paramètres climatiques. Il bénéficie aussi d'une couverture continue relativement bonne en images satellitales depuis le début des années 1980 ce qui permet d'avoir recours à la télédétection, un outil très efficace pour la cartographie et la surveillance de l'environnement.

Le bassin versant du Ferlo fait partie d'un territoire qui a fait l'objet de très nombreuses études à tous les niveaux (Ba A., 1984 ; Ba C., 1986 ; Barral H., 1982 ; Barral H. et *al.*, 1983 ; Baudet G., 1974, 1981 ; Akpo L. E., 1992 ; Akpo L. E. et *al.*, 2000 ; Barreto S. et *al.*, 1964 ; Bille J. C., 1974 ; CSE, 1991, 1992, 1996 ; CSE, 1987 à 2005 ; Diop A. T., 1982, 1992, 2001 ; Dir. de l'élevage, 1996 ; Lake A. et *al.*, 2003 ; Ndione J. A., 2002 ; Ndione J. A.,

et *al.*, 2002 ; Mietton M., 2006 ; Touré O., 1990 ; Univ. de Dakar, 2000 ; Valentin C., 1981 ; Valenza J. et *al.*, 1972). Les résultats de ces études ont permis de cerner les caractéristiques dynamiques tant au plan humain qu'au niveau physique de la zone d'étude. Ainsi, notre étude s'inscrit dans la continuité de ces travaux et a pour ambition d'apporter des éléments précis de connaissances sur les manifestations de la variabilité du climat et de la dynamique de la végétation au cours de la période 1951-2005, pour tenter de fournir des outils d'aide à la prise de décision.

Pour cela, les objectifs de la thèse sont :

- Améliorer les connaissances sur la variabilité climatique et la dynamique de la végétation actuelles sur la période de 1951 à 2005 ;
- Proposer l'utilisation de méthodes statistiques et cartographiques simples pour la quantification de ces phénomènes ;
- Proposer de nouveaux outils pour le suivi à temps réel de la végétation, ou d'autres phénomènes liés à l'environnement,
- Utiliser ces connaissances pour répondre aux questions de stratégies régionales d'adaptation aux changements climatiques dans le bassin versant du Ferlo, une question qui préoccupe les acteurs (pasteurs, agriculteurs, décideurs publics).

Pour répondre à ces principaux objectifs, une démarche générale et méthodologique de recherche a été retenue.

LE DÉROULEMENT DES RECHERCHES

Les recherches ont tout d'abord commencé par la constitution d'un corpus scientifique avec une synthèse bibliographique des études consacrées à la région. Cet état des lieux au plan documentaire a été doublé par la réalisation d'une base de données (climat et végétation) rendue possible par les réseaux des partenariats. Le traitement de l'information recueillie a été exécuté avec la collaboration de plusieurs laboratoires spécialisés du Sénégal et de France. Les résultats obtenus ont été validés sur le terrain. La **figure 1** résume les principales étapes de toute la réalisation de ce travail de recherche.

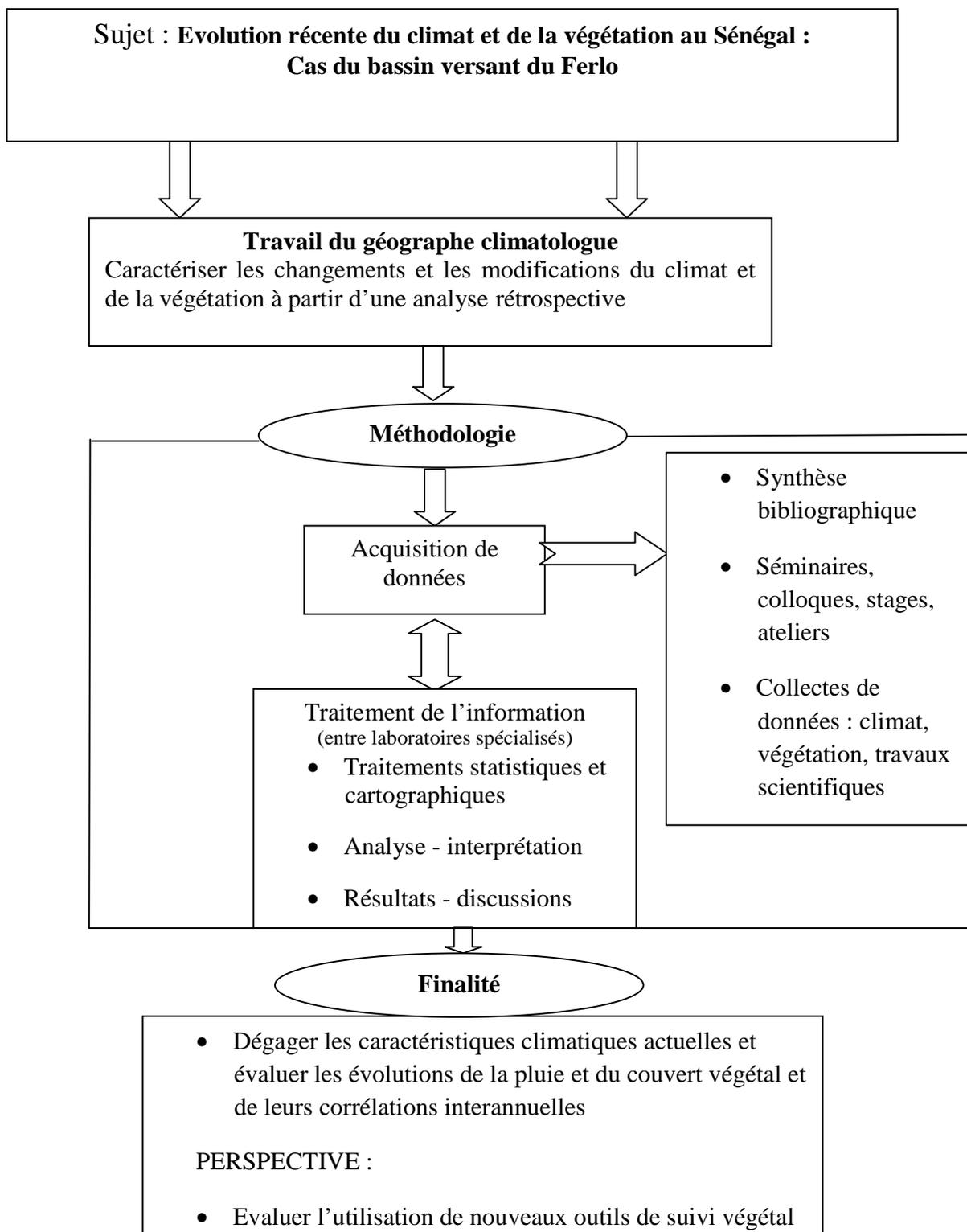


Figure 1 : Démarche méthodologique générale de ce travail de thèse

La recherche documentaire et la réalisation d'une base de données

Au cours de nos travaux de recherches, plusieurs sources ont été visitées. Cette première étape a conduit à de nombreux déplacements :

- Centre de Recherches de Climatologie Tropicale Africaine (CRCTA) du département de Géographie de l'Université Cheikh Anta Diop (UCAD) de Dakar ;
- Institut Fondamental d'Afrique Noire à Dakar (IFAN) ;
- Centres documentaires de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) de Dakar et de Montpellier ;
- Bibliothèques universitaires de l'UCAD et de Gaston Berger de Saint-Louis ;
- Centre de Suivi Ecologique du Sénégal (CSE) ;
- Direction de l'Aménagement du Territoire du Sénégal ;
- à la Direction de l'élevage du Sénégal ;
- Centre de Recherche de Climatologie de l'université de Bourgogne à Dijon ;
- Direction de la Météorologie Nationale du Sénégal ;
- Centre de prévision de l'ASECNA à Dakar-Yoff ;
- Pôle de Recherche sur l'Organisation et la Diffusion de l'Information Géographie (PRODIG) et au Laboratoire Dynamiques Sociales et Reconstitutions des Espaces (LADYSS) et aussi au pôle Images de l'Université Diderot, Paris 7 ;
- Recours également à la base de données MSG, SPOT et NOAA.

Le traitement statistique et cartographique des données utilisées dans ces recherches s'est aussi fait, en collaboration avec plusieurs laboratoires qui ont apporté aux recherches des compétences spécifiques :

- au CRGA de l'Université Jean Moulin Lyon III, sous la tutelle de Léca de Biaggi et de Olivier Chaire (télédétection et SIG) ;
- au pôle Imagerie et Systèmes d'Information Géographique (ISIG) de l'UMR 5600 «Environnement, Ville, Société» du CNRS, sous la tutelle notamment de Kristell Mitchell (télédétection, cartographie) ;
- au CRC de l'Université de Dijon, sous la tutelle de Pierre Camberlin (notamment pour les travaux en analyses composantes principales) ;

- au pôle Images de Paris 7, sous la tutelle de Bernard Lacaze (travaux de télédétections et formation en outils de traitement) ;
- au CSE à Dakar, sous la tutelle de Magatte Ba et de Jacques A. Ndione (enquêtes de terrain, géomatique, SIG, acquisition de données, etc.) ;
- à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, sous la tutelle de Pierre Hubert (les échanges se sont fait uniquement par internet sur les traitements statistiques, en particulier le test de stationnarité).

Les visites sur le terrain

Au cours de ces années de recherches, les trois déplacements sur le terrain ont permis de rendre compte des changements du milieu physique et des rapports étroits entre ce dernier et les activités socio-économiques qui restent intrinsèquement conditionnées par le climat. Le domaine d'étude est un milieu que j'ai commencé à appréhender dès mes premiers séjours de vacances scolaires dans le département de Linguère, suivis des sorties d'étude au cours de ma formation universitaire à l'Université Gaston Berger qui se trouve à Saint-Louis du Sénégal.

Ce travail s'articule autour de trois parties décrivant d'une manière générale d'abord les différents systèmes d'occupation du sol et les conditions dynamiques moyennes du domaine climatique tropical. Cette première partie, qui souligne la fragilité du milieu, met en évidence la sensibilité de ce territoire aux fluctuations climatiques et en particulier celles de la pluviométrie. La seconde partie est consacrée pour l'essentiel à l'évolution spatio-temporelle de la pluviométrie et climatique sur la période 1951-2005. Elle fait apparaître plusieurs tendances significatives qui montrent la nécessité d'un suivi climatique constant sur la région pour appuyer les prises d'aide à la décision des différentes politiques d'aménagement et de développement. Une tentative d'évolution du comportement climatique globale est proposée, mais elle est rendue difficile par la faible quantité de données disponibles. La dernière partie concerne l'évolution de la production végétale, à pas de temps différents, sur la base d'une série d'images satellites. Elle met l'accent sur l'outil imagerie qui est devenu indispensable dans le suivi du couvert végétal, mais également sur l'action de l'homme dans la lutte contre la disparition de la savane arbuste à arborée par une réduction de la mobilité pastorale.

**PARTIE 1: LE FERLO ; UNE DENSITÉ FAIBLE DE LA
POPULATION MAIS UNE FORTE PRESSION SUR UN
MILIEU FRAGILE**

CHAPITRE 1 : UN ÉCOSYSTÈME FRAGILE SOUS FORTE PRESSION

CHAPITRE 2 : LES CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DU CLIMAT

CHAPITRE 1 : UN ÉCOSYSTÈME FRAGILE SOUS FORTE PRESSION

Les planificateurs des pouvoirs publics ont scindé le territoire sénégalais en six zones écogéographiques (**figure 1.1**) relativement homogènes, en fonction de leurs caractéristiques biophysiques et socio-économiques dans un but de planification, et pour pouvoir répondre aux problèmes environnementaux relatifs à chaque zone. Parmi celles-ci, on trouve la zone sylvo-pastorale que certains appellent d'ailleurs tout simplement le Ferlo, domaine dans lequel se trouve le bassin versant du Ferlo.

Globalement le Ferlo se situe au cœur du domaine sahélien sénégalais. Il s'étend approximativement des latitudes 16°15 à 14°30 Nord et des longitudes 12°50 à 16° Ouest. D'une superficie qui varie notablement selon les auteurs soit de 56 269 km² (DEFCCS, 1999) soit environ 28 % du territoire national à 70 000 km² (CSE, ROSELT/OSS, 2002) ou 60 000 km² (Wane A. et *al.*, 2006), le Ferlo constitue cependant l'une des zones écogéographiques du Sénégal les plus vastes. Il est «à cheval» aujourd'hui entre les limites administratives des régions de Saint-Louis, de Louga et de Matam, cette dernière nouvellement créée comme onzième région administrative du Sénégal.

A l'origine, le Ferlo est une rivière et non une zone sylvo-pastorale. Ce cours d'eau prend naissance vers 15° Nord, 13° Ouest à l'ouest de Bakel, dans les versants occidentaux des collines qui bordent la vallée du Sénégal (Roberty, 1952 *in* CSE, 2002). Aujourd'hui, le terme fait également référence à une zone écogéographique dont les limites spatiales font débat parmi les spécialistes, et ce en raison de la progression vers le sud de quelques indicateurs caractérisant ce milieu parmi lesquels l'élevage. 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 et les pouvoirs publics. Le désaccord existe entre les pastoralistes qui pensent que le Ferlo est l'espace exclusif de l'élevage et de ses aires de mobilité saisonnière et d'autres, notamment les pouvoirs publics qui restent sur un schéma statique de planification territoriale administrative (**figure 1.1**). Devant ce manque d'uniformité, et au risque d'ajouter à la confusion, nous retiendrons comme limites de l'espace étudié les contours du bassin versant

du Ferlo. Ces limites s'appuient sur des particularités physiques, géomorphologiques et climatiques relativement homogènes. Ce choix repose sur la définition d'une entité géographique naturelle «le bassin versant» et non sur une délimitation administrative artificielle pour une approche environnementale ou sur une autre délimitation d'origine scientifique sans doute plus justifiable, mais très instable selon les auteurs. En outre, même si les limites de la zone d'étude (**figure 1.2**) peuvent être discutées, elles permettent de bien différencier la zone étudiée parmi les autres espaces «naturels» limitrophes (**figure 1.1**) :

1. la vallée du fleuve Sénégal (zone inondable) au nord et nord-est d'une part,
2. les régions dunaires de l'ouest,
3. le bassin arachidier au sud.

Le bassin versant du Ferlo se situe précisément et immédiatement au sud de la vallée du fleuve Sénégal. Il est délimité au sud par le bassin arachidier et le Sénégal oriental, deux autres zones écogéographiques (**figure 1.1**) menacées par la mobilité de l'activité pastorale et des Peuls, une population essentiellement nomade. En effet les Peuls⁴ ont été constamment refoulés par les cultivateurs d'arachide, notamment les agriculteurs Wolofs⁵, depuis le milieu du XX^e siècle. De nos jours, grâce à la diminution de la mobilité pastorale et à la volonté de vie commune qui s'est manifestée entre pasteurs peuls et agriculteurs wolofs pour la plupart, les conflits deviennent rares. Le dernier exemple de cette compréhension mutuelle remonte à l'année 2005, quand des hectares de terres, en majorité de pâturages, allaient être offerts par les pouvoirs publics à l'ancien khalife général (guide suprême) des Mourides⁶ pour des besoins de cultures vivrières. Ce dernier les a refusés pour éviter d'éventuels conflits entre agriculteurs mourides et pasteurs peuls.

La démographie du bassin versant du Ferlo est avant tout liée aux systèmes de production et plus particulièrement au pastoralisme. Cette région rassemble plus d'éleveurs que toute autre région du pays. Les systèmes de production bâtis sur l'agriculture et la

⁴ Peul : L'élevage extensif au Sénégal est pratiqué en écrasante majorité par les Peul. Ils représentent avec les Wolofs, les Sérères, les Toucouleurs, les Diolas, les Mandingues l'une des principales ethnies de la population nationale du Sénégal.

⁵ Les Wolofs sont des grands exploitants agricoles des régions de Louga et de Diourbel.

⁶ Les Mourides représentent l'une des plus grandes confréries de l'islam au Sénégal.

foresterie (cueillette) y sont également représentés. La pratique de ces trois activités traduit l'hétérogénéité de la géographie physique qui offre diverses potentialités. Selon les auteurs, la zone sylvo-pastorale dans laquelle s'inscrit le bassin versant du Ferlo, est subdivisée en zones justifiées par les caractéristiques écologiques en rapport avec les «*potentialités et les contraintes de l'élevage*» (Touré O., 1990). Pour d'autres la sectorisation est fondée sur la base de «*typologie socio-économique permettant de déterminer les modes d'exploitation et les modalités de mise en valeur du milieu*» (Diallo A. K., 1984). La zone Nord apparaît à vocation pastorale à grande mobilité ; le Centre (de transition) à vocation agropastorale ; l'Ouest (complexe lac de Guiers / Bas Ferlo et sa périphérie Est) à vocation agricole sous pluie, maraîchage et élevage des petits ruminants ; l'Est à vocation agro-sylvo-pastorale et enfin au Sud se pratique l'agropastoralisme où l'intégration agriculture-élevage semble plus réelle contrairement à l'Est où l'agriculture vient en appoint (ISRA, 1996).

La zone sylvo-pastorale, en général, et le bassin versant du Ferlo en particulier présentent donc un caractère particulier par rapport au reste du territoire national. Cette particularité est justifiée par ses caractéristiques physiques, humaines et ses systèmes d'occupation des sols.

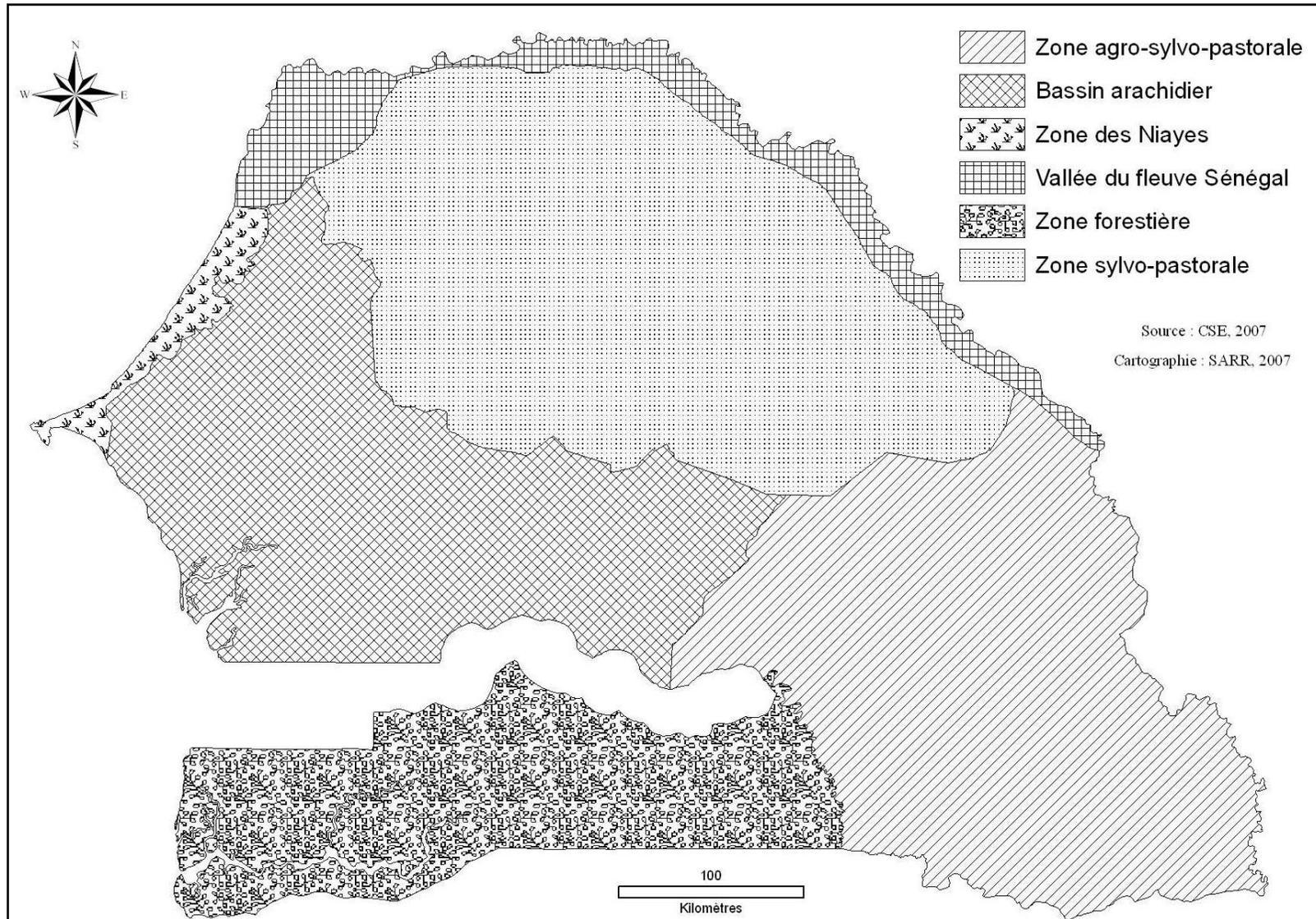


Figure 1. 1 : Les zones écogéographiques du Sénégal

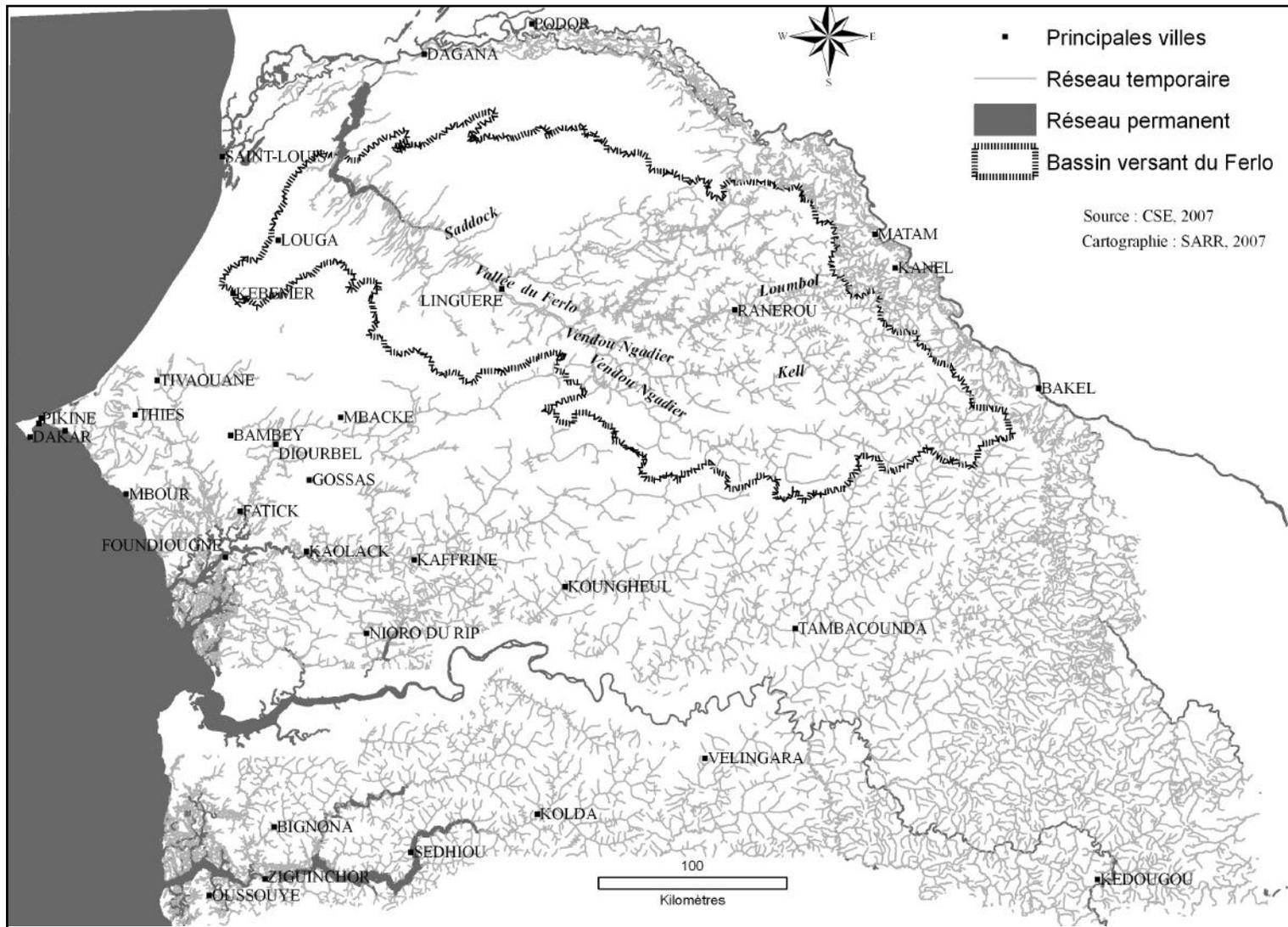


Figure 1. 2 : Le bassin versant du Ferlo

1. ENTRE TERRAINS SABLEUX ET PLATEAUX DE CUIRASSES FERRUGINEUSES

Comme la majeure partie du Sénégal, tout le bassin versant du Ferlo appartient au grand bassin sédimentaire, des ères Secondaire et Tertiaire, souvent appelé le bassin sédimentaire sénégal-mauritanien (**figure 1.3**). Ce grand bassin est composé en surface de sédiments de roches tertiaires et quaternaires reposant sur un matériel allant du Pré-Cambrien au Dévonien (au milieu du Paléozoïque). A partir de l'Eocène supérieur, un environnement continental s'installe progressivement sur le bassin entraînant une forte altération des sédiments marins du Miocène. La séquence sédimentaire altérée qui en résulte est plus connue sous le nom de Continental terminal et recouvre la majeure partie du bassin. Cette formation du Continental terminal est remarquable dans le Ferlo où son épaisseur atteint parfois 130 m (CSE/ROSELT, 2002).

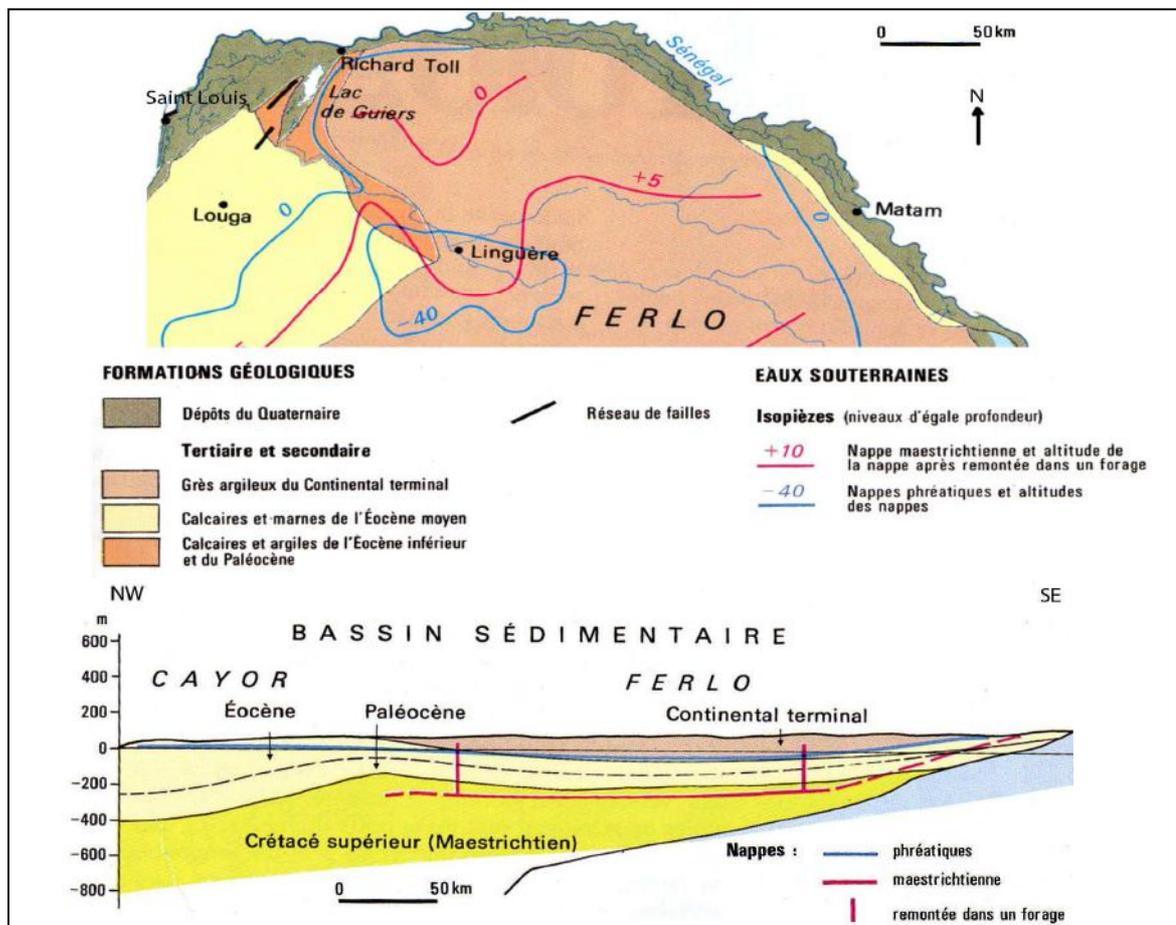


Figure 1.3 : Carte et coupe hydrogéologiques du bassin versant du Ferlo
Source : Atlas du Sénégal, 1980

Le Continental terminal est très largement présent au Sénégal en affleurement, souvent sous une cuirasse ferrugineuse ou sous des formations quaternaires dans le bassin versant du Ferlo (Maignien R., 1965). Ce dernier est caractérisé par un ensemble de plateaux sableux très monotones ; ces plateaux d'altitude moyenne de 40 m environ, qui s'élèvent sensiblement dans sa partie orientale jusqu'à 80–100 m, entrecoupés de quelques marigots fossilisés (Michel P. et Sall M., 1980 ; Michel P., 1984) sont également de constitution essentiellement gréseuse, des grès argileux du Continental terminal. La morphogenèse de ces formations sablo-gréseuses linéaires permet de distinguer les ergs principaux (Michel P., 1973).

L'erg ancien ou Anté-Inchirien, vers 40 000 ans BP au cours d'une période aride, a couvert le Ferlo dans sa partie septentrionale. Le modelé présente une succession d'ondulations à sommet aplani, plus ou moins arasées et émoussées.

Le système ogolien des dunes rouges orientées NE – SW s'est formé pendant l'aride ogolien (entre 20 000 et 14 000 avant notre ère) dans le Kayor et dans le Djolof (**figure 1.4**). Au cours des fluctuations climatiques du Quaternaire, la cuirasse ferrugineuse a été détruite presque en totalité et a été reconstituée à partir des éléments démantelés en cuirasse de nappes parfois affleurantes ou sub-affleurantes (Le Houerou H. N., 1989). Vers 7500 ans BP, les dunes ogoliennes ont été localement remaniées en petites dunes barkhanoïdes d'orientation NNE-SSW (Akpo L. E., 1992). Les caractéristiques morphodynamiques du bassin versant du Ferlo présentent quelques situations marquées par un aplanissement progressif du modelé et le colmatage des espaces interdunaires par des dépôts de sables argileux dûs, d'une part, à l'action du ruissellement et, d'autre part, tout simplement aux glissements fréquents sur les flancs dunaires. Ce dispositif, bien entendu, est favorisé par la vitesse des vents et par l'absence de végétation. Dans la partie NW du bassin versant Ferlo, en période de sécheresse, les dunes ne sont plus protégées par la végétation qui pourrait les fixer : l'érosion éolienne y joue alors un rôle très important.

D'une manière générale, le Ferlo présente donc une succession de dunes, sous des formes et des niveaux d'évolution très variés. Leur allure générale s'aplanit progressivement du nord vers le sud (en rapport avec le degré d'évolution des sols) pour se terminer par une topographie quasi-plane laissant transparaître les affleurements rocheux de la cuirasse à Linguère (Ferlo ferrugineux) (CSE/ROSELT, 2002).

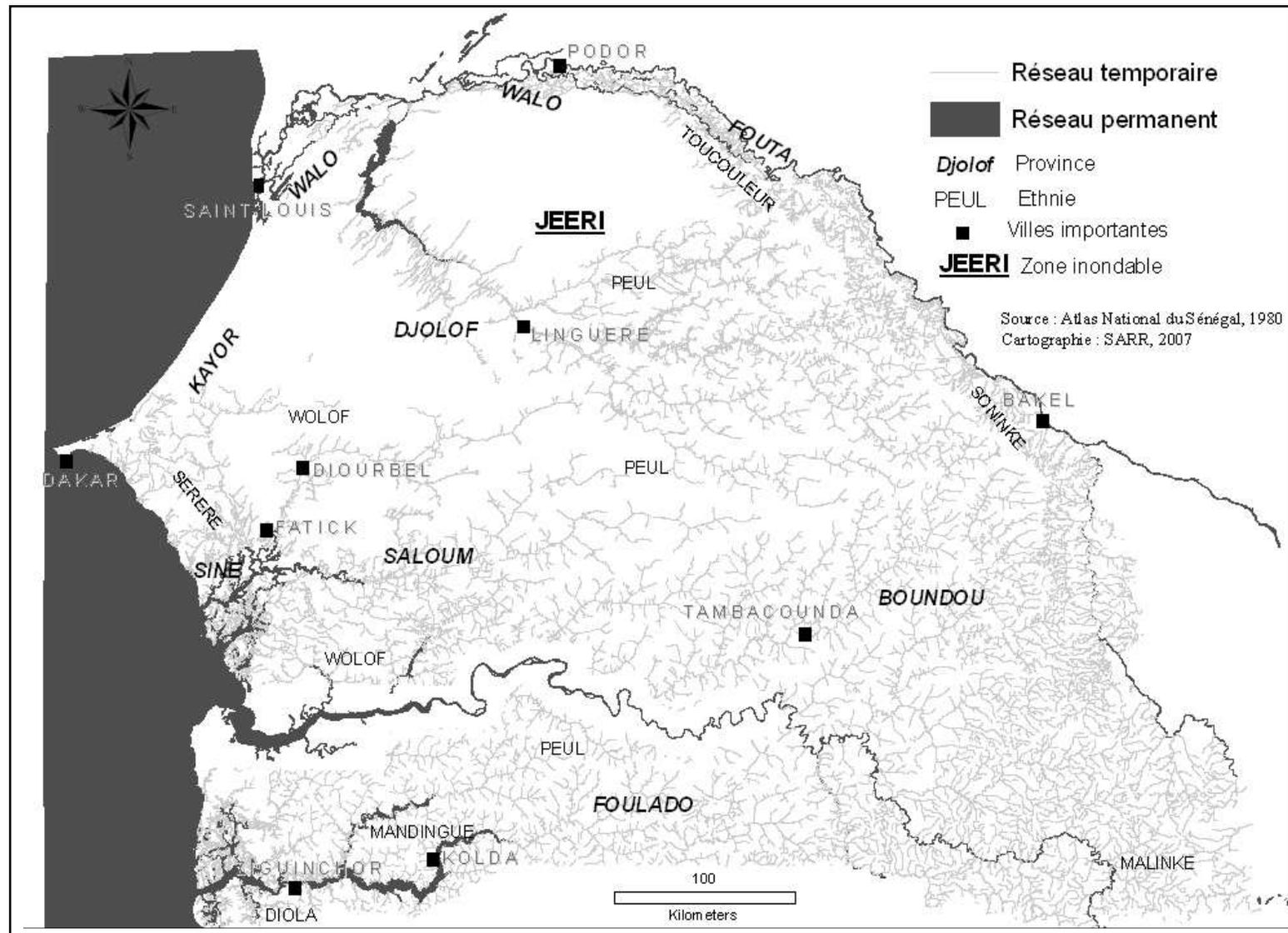


Figure 1. 4 : Localisation des anciennes provinces et répartition globale des ethnies sur le territoire national

La formation des cuirasses remonterait à la fin du Tertiaire et au début du Quaternaire. Ces cuirasses recouvrent la topographie plane des vastes plateaux tabulaires que l'on retrouve jusqu'au centre et sud-est du pays, et elles reposent généralement sur les grès du Continental terminal. Le plateau du Ferlo oriental se termine par une petite cuesta au-dessus des bordures de la vallée du Sénégal et des plaines de la basse vallée.

La topographie du bassin versant, dominée majoritairement par ces grands espaces plats, domaine de prédilection de l'activité pastorale, reste influencée par la pluviométrie qui conditionne d'une part la production végétale dont dépend le bétail et d'autre part le remplissage des nappes et des marres.

2. LES RESSOURCES EN EAU TRIBUTAIRES D'UNE PLUVIOMÉTRIE ALÉATOIRE

La question de l'eau dans ces milieux a toujours préoccupé les populations locales ainsi que les décideurs politiques. Le problème de l'exploitation et de la gestion des ressources hydriques dans ce milieu semi-aride est un paramètre qui trouve bien évidemment sa place dans notre questionnement général. Ce dernier reste fortement lié à la variabilité pluviométrique qui a des influences directes (nappes superficielles et mares) ou indirectes (nappes profondes) sur la dynamique de la couverture végétale. Les réserves d'eau accessibles aux systèmes racinaires et le niveau d'humidité des sols sont des indicateurs essentiels. C'est pourquoi un état des lieux de ces ressources s'impose.

2.1. Les eaux souterraines : une source d'espoir d'accès difficile

Sur le plan hydrogéologique, la zone d'étude est caractérisée par les eaux souterraines de deux nappes différentes (**figure 1.3**) :

- 1- la nappe phréatique du Continental terminal qui se trouve dans les calcaires de l'Eocène concerne la presque totalité du bassin versant du Ferlo. Sa profondeur est évaluée entre 30 et 100 m dans sa partie occidentale. Le niveau moyen de la nappe se situe vers 40 m sous la surface (Michel P. et Sall M., 1980)
- 2- la nappe maestrichtienne quant à elle reste localisée dans le Crétacé supérieur. Elle joue un rôle très important dans l'hydrogéologie du bassin versant du Ferlo même si ses eaux se trouvent entre 100 et 350 m de profondeur. Disponible

seulement sur une partie du bassin couvrant une superficie totale d'environ 150 km² (ACC-GRIZA-LAT, 1983), cette nappe sert à l'alimentation en eau, par les forages à exhaure mécanique de ce vaste ensemble sylvo-pastoral dont le problème principal a été, pendant longtemps, la disponibilité de l'eau en quantités suffisantes et permanentes (Mbaye M., 1991). Notons également que les roches magasins sont surtout les grès et les sables du Maestrichtien. L'alimentation de la nappe s'effectue aussi par les crues du fleuve Sénégal et elle est en partie fossile.

Comme indiqué plus haut, le bassin versant du Ferlo a une énorme potentialité hydrique qui dort dans ses sous-sols. Les conditions climatiques sont caractérisées par une précarité des pluies qui limite ou exclut toute alimentation directe des nappes par la pluie. La seule source d'alimentation conséquente des nappes est le fleuve Sénégal et ses affluents. L'eau abondante des nappes n'est pas facile d'accès même si des efforts ont été entrepris dans le cadre de la politique de l'hydraulique pastorale des années 1950. Cette situation encourage les habitants de la région à s'accrocher essentiellement à un régime pluviométrique, qui est très irrégulier.

2.2. Les eaux de surface, un potentiel aléatoire pour une gestion difficile

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. Ce réseau englobe les eaux du fleuve Sénégal, les eaux méridionales du lac de Guiers, la partie amont du bassin versant du Ferlo et ses mares temporaires. La description des caractères moyens et généraux des unités composant le système hydrographique facilite la compréhension du fonctionnement de ce dernier.

2.2.1. Le fleuve Sénégal

Le fleuve Sénégal, long de 1770 km, a un bassin versant de 330 000 km² dont 60 000 km² se trouvent en territoire national sénégalais. De Matam à Richard Toll soit environ 480 km, le débit du fleuve dépend surtout de la pluviométrie dans le haut bassin. Son débit interannuel moyen à Bakel est estimé à 732 m³ par seconde (Dione O., 1996). Dans sa partie aval, le système est composé de deux dépressions majeures : le lac de Guiers en rive gauche

sénégalaise et le lac R'kiz en rive droite mauritanienne. Le fleuve, dans sa vallée, a toujours été le lieu principal d'abreuvement du bétail et continue de l'être pour les animaux situés à proximité. Avec l'implantation d'ouvrages hydrauliques de types forages mécaniques dans le Ferlo, l'attrance des éleveurs avec leur bétail vers le fleuve, même en saison sèche, a considérablement diminué. Selon Barral H., (1992) seuls 3 % des éleveurs ont maintenu cette pratique.

2.2.2. Le lac de Guiers

Il s'est constitué dans une vaste dépression naturelle, peu profonde, (2 à 3,5 m au nord et 1 à 1,5 m au sud) de 50 km de long. Avec un plan d'eau de 650 millions de mètres cubes d'eau douce (Rép. du Sénégal, 2000), le lac est un plan d'eau alimenté par le fleuve Sénégal, via le canal de la Taouey long de 17 km. Le canal de la Taouey est à l'origine un marigot rectifié depuis 1974 dans le but de favoriser le remplissage du lac de Guiers (**figure 1.5**).

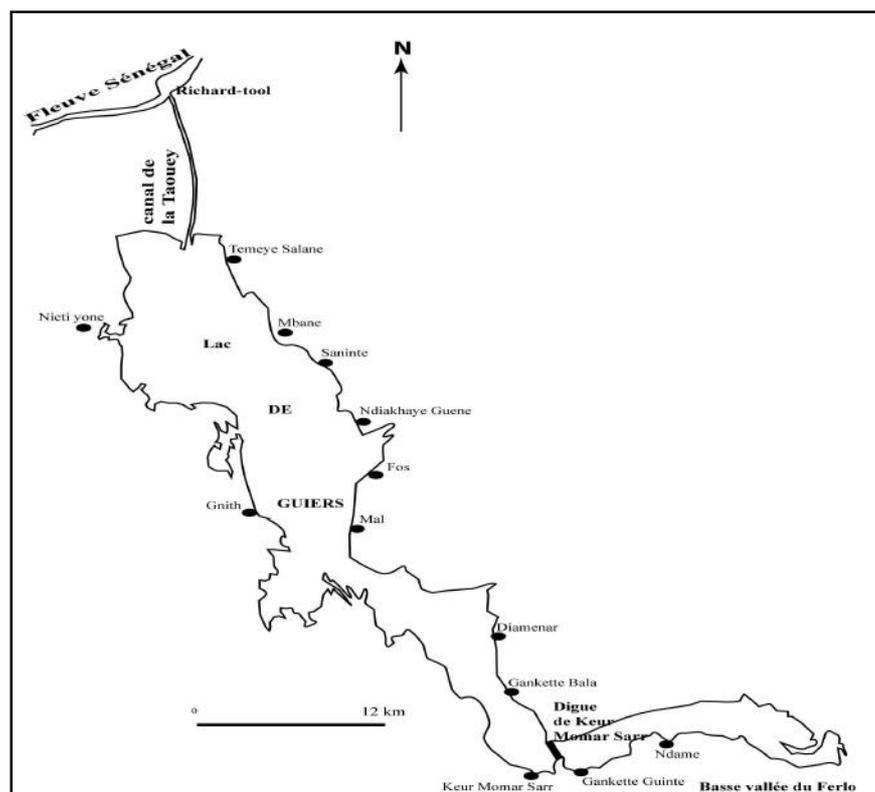


Figure 1. 5 : Localisation des sites du Lac de Guiers, du Canal de la Taouey et de la digue de Keur Momar Sarr

En période de crue, la présence de deux barrages à Richard Toll assure le remplissage du lac et la digue de Keur Momar Sarr bloque l'écoulement de l'eau dans la vallée du Ferlo (Diop, 1984). Les caractéristiques d'exploitation et de ravitaillement des eaux du lac, étudiées par Cogels F. X. et Gac J. Y., (1983) sur 6 ans, montrent que l'alimentation du lac est assurée à 80 % par la crue annuelle du fleuve, 11 % par les précipitations, et le reste par les rejets du système d'irrigation sans oublier une possible alimentation par les nappes (**figure 1.6**). Les pertes sont surtout dues à l'évaporation (79 %), au pompage pour les besoins en eau de la CSS (Compagnie Sucrière Sénégalaise, 19 %) et de la SONEES devenue SDE (Société Des Eaux du Sénégal) qui exploite l'eau douce pour l'approvisionnement de la ville de Dakar (Cogels F. X. et Gac J. Y., 1983). Cette étude des eaux du lac pourrait actuellement connaître quelques évolutions significatives surtout en terme d'exploitation car elle se situe dans une séquence climatique très difficile après la sécheresse des années 1970-1980. La quantité d'eau du lac utilisée par le bétail est insignifiante à cause des risques de maladie pour le cheptel et des conditions d'accès à l'eau souvent très difficiles à cause des contours boueux de la zone.

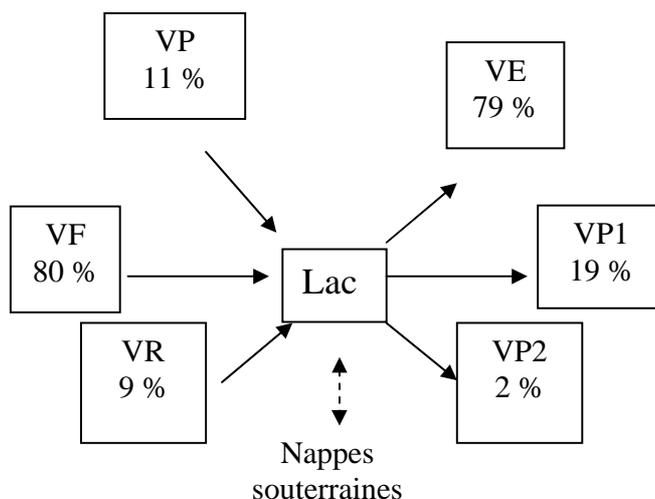


Figure 1. 6 : Bilan hydrologique du lac de Guiers (1976 à 1981) selon Cogels F. X. et Gac J. Y., (1983)

VP = Volume d'eau apporté par les précipitations

VF = Volume apporté par le fleuve

VR = Volume d'eau apporté par les rejets d'irrigation

VP1 = Volume d'eau pompé par la C.S.S (Compagnie Sucrière Sénégalaise)

VE = Volume évaporé

VP2 = Volume d'eau pompé par la SONEES devenue SDE (Société Des Eaux)

2.2.3. La basse vallée du Ferlo

La basse vallée du Ferlo est une dépression séparée du lac de Guiers par la digue de Keur Momar Sarr depuis 1956 (Grosmaire P., 1957). Avant la construction de cette digue qui entre dans le cadre de plusieurs aménagements et travaux hydrauliques des pouvoirs publics, les conditions d'approvisionnement des terres de la vallée du Ferlo dépendaient de l'importance des crues annuelles du fleuve Sénégal. Selon Michel P., (1973), les eaux du Sénégal ayant rempli le lac de Guiers remontaient dans la vallée du Bounoum (basse vallée du Ferlo) plus ou moins vers l'amont. A la fin du siècle dernier, les fortes crues auraient largement dépassé Yang Yang (confirmées par celles de 1936). D'après les recherches de Audiger (1957) *in* Sall A., (1995), les eaux se sont arrêtées entre Mbeuleukhé et Mbéyene au cours des années suivantes. Les aménagements de 1957 à Keur Momar Sarr ont contribué à arrêter les inondations de la vallée du Ferlo avec pour but d'augmenter la réserve d'eau du lac de Guiers servant à l'irrigation des casiers rizicoles de Richard Toll (**figure 1.5**) (Sarr M. A., 2002) et à l'approvisionnement de la ville de Dakar. Les anciens chenaux sont jalonnés par des mares temporaires qui tarissaient le plus souvent en début de la saison sèche à cause de l'infiltration et de la forte évaporation.

Les aménagements effectués sur le fleuve Sénégal avec la construction des barrages de Diama (situé à 23 km de la ville de Saint-Louis) en aval et de Manantali (situé sur la rivière du Bafing, composante principale du fleuve Sénégal) en amont respectivement en 1985 et en 1988 ont permis une reconfiguration du réseau hydrographique de la vallée du Ferlo. L'inondation en eaux douces et pérennes de la basse vallée du Ferlo par le canal de la Taouey et le lac de Guiers (**figures 1.2 et 1.5**) est rendue possible grâce à un important volume d'eau en amont de Diama. Les eaux de la basse vallée permettent d'améliorer les conditions de l'activité pastorale, mais il est également constaté que cette ressource est différemment utilisée par les deux principales ethnies qui habitent la zone⁷. A l'est de cette région de la basse vallée du Ferlo et au sud du lac de Guiers, on trouve la haute vallée du Ferlo (**figures 1.2 et 1.5**). Son

⁷ Selon une enquête effectuée par Diop et al. (2002), l'ensemble des Peuls interrogés utilisent l'eau de la vallée pour divers besoins : 78 % pour l'abreuvement de leur cheptel, 13 % pour le ménage et 9 % pour la boisson. L'avantage de cette utilisation est lié au fait qu'elle est gratuite et moins pénible. Les animaux s'y abreuvent et parfois sans parcourir de très longues distances. Quant aux Wolofs, 94 % des enquêtés utilisent l'eau pour le ménage. C'est d'ailleurs pour cela qu'ils pensent que l'avantage de la présence de l'eau est « qu'elle constitue un secours lorsque leur forage tombe en panne ». Cependant tous les Wolofs interrogés pensent que la remise en eau évite de creuser des céanes (petites mares sauvages) pendant la saison sèche.

alimentation dépend exclusivement des précipitations tombées en saison des pluies. Cette région est caractérisée par de multiples mares temporaires, mais aussi de bassins de rétention qui ont été aménagés au cours de ces dernières années. La prolifération des plans d'eau relance le débat sur l'amélioration des précipitations au cours de ces dernières années, mais aussi sur les capacités des acteurs à faire face aux changements climatiques récents.

2.2.4. Les mares temporaires devenues stratégiques en raison de leurs usages diversifiés

La plupart des mares temporaires, naturelles ou aménagées, dans le bassin versant du Ferlo enregistrent des activités sociétales régies par l'alternance de la saison des pluies et de la saison sèche. Lavigne Delville P. et *al.*, (1998) classent les mares en trois types selon leur localisation et leur mode d'alimentation :

- 1- mare sur lit mineur,
- 2- mare sur lit majeur,
- 3- mare recevant des écoulements de versant.

Les aménagements assurent aux mares un remplissage suffisant pour être à certains endroits des lieux de polarisation d'activités diverses. En fonction de la lame d'eau tombée, les mares, surtout aménagées, assurent l'approvisionnement du bétail et de la population jusqu'au milieu de la saison sèche (**photos 1.1 à 1.4**). Selon Lebel T. et Redelsperger J-L., (2007), une grande partie du Sahel est caractérisée par une forte hausse du ruissellement qui se traduit dans ce paysage bien souvent endoréique par l'apparition de mares plus nombreuses et durant plus longtemps. Le nombre de mares dans notre domaine d'étude est estimé à plus au moins 363 (**figure 1.7**) ; un volume qu'il faut prendre avec précaution en raison de la durée de vie variable, de 2 à 9 mois, de ces mares. Les trois-quarts sont répartis entre le Ferlo Centre et le Ferlo Oriental, même si le Ferlo Occidental n'en est pas dépourvu.

Ces deux dernières décennies, l'État, dans un souci d'atténuer sérieusement les mouvements de transhumance et pour lutter contre le manque d'eau, a transformé les plus grandes mares en bassins de rétention ou en mares aménagées. Au cours de nos différents entretiens avec les autorités compétentes à Linguère⁸ suivies de visites des points d'eau, nous avons noté le succès de ces aménagements, même si quelques problèmes restent encore à

⁸ Monsieur DIOUF, chef du service départemental du développement rural et Monsieur THIARE, chef du service départemental de l'hydraulique à Linguère en 2006

régler. Pour les populations, ces nouveaux aménagements permettent une disponibilité de l'eau durant presque toute l'année pour les besoins domestiques et l'abreuvement du bétail. Cependant, les effets des ravinelements aux abords des mares (**photo 1.3**), la pollution mais surtout la forte évaporation continuent de créer des obstacles au bon fonctionnement des mares. Dans la localité de Linguère et ses environs, les bassins de Pitarky, Moguéré, Koumbouk, ceux de Mbaye et de Diourdy font partie de ces réalisations.



Photo 1. 1 : Bassins de rétention de Mboguééré



Photo 1. 2 : Mares aménagées de Diourdy



Photo 1. 3 : Mares aménagées de Pitarky



Photo 1. 4 : Mares aménagées de Mbaye

Ces mares, faisant partie des nombreux aménagements récents de la part des pouvoirs publics, subviennent aux besoins en eau du bétail et de la population locale même pendant la saison sèche. Elles ont contribué à la diminution significative des grands mouvements de transhumance.

Clichés Sarr, 2006.

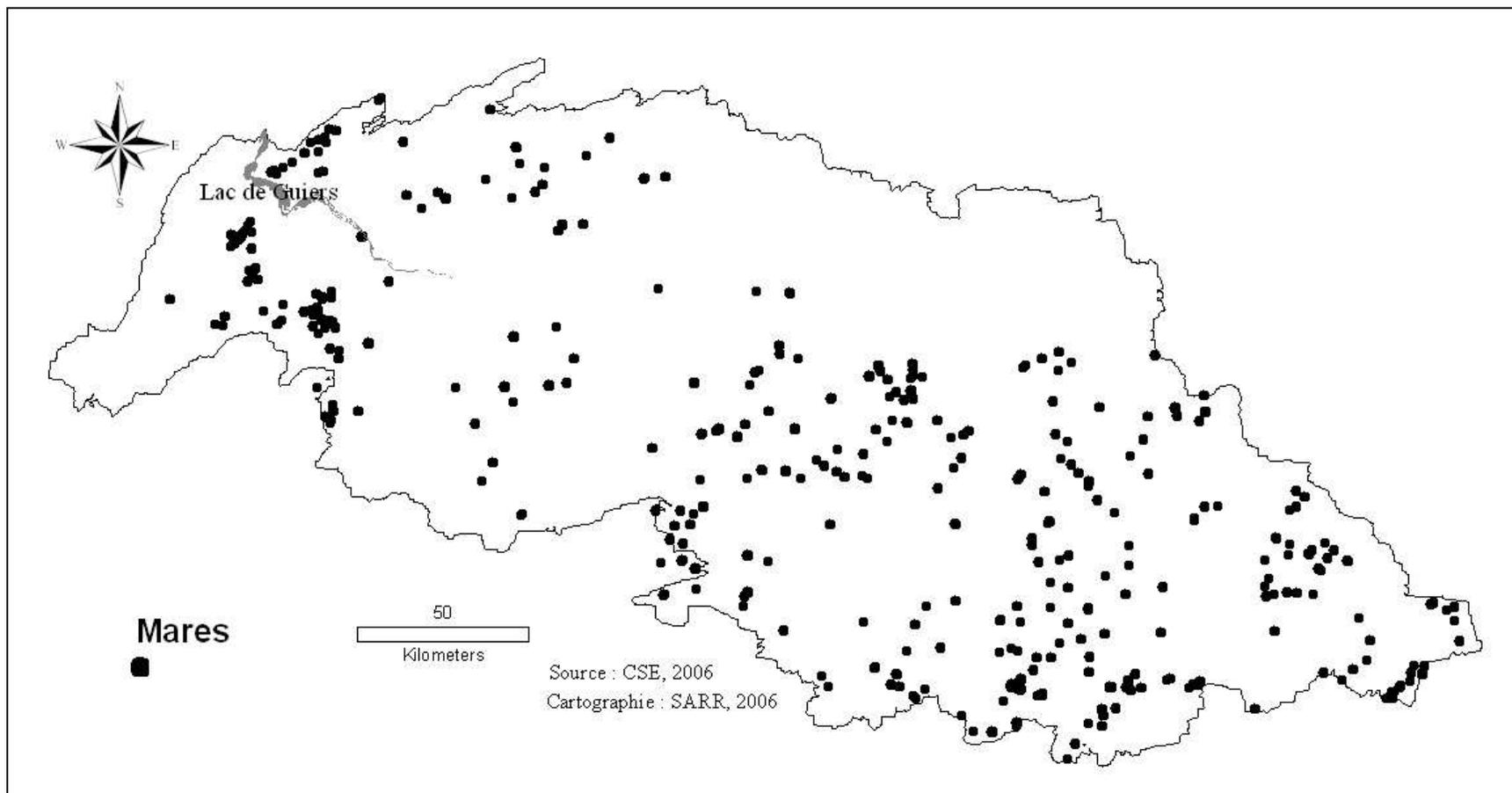


Figure 1. 7 : Répartition des principales mares (aménagées et non aménagées) dans le bassin versant du Ferlo

Au cours des décennies 1990 et 2000, les pluies, essentiellement de la saison des pluies, ont visiblement contribué à la multiplication de mares naturelles et au remplissage des bassins de rétention. La prolifération de ces plans d'eau, en sus de la contribution des aménagements réalisés, est un indicateur potentiel de l'amélioration de la pluviosité (voir chapitre 4). Dans la zone de Linguère et ses environs, les bassins de rétention peuvent avoir de l'eau pendant presque toute l'année (entretien avec M. Thiaré⁹). Selon M. Thiaré, cette nouvelle donne favorise la ruée vers ces points d'eau au détriment des forages mécaniques où le consommateur doit s'acquitter d'une redevance financière. Ce constat est plus perceptible au cours de la saison des pluies car les Peuls doivent payer pour faire boire leur troupeau au forage, 100F CFA¹⁰ par tête de bovin et 50F CFA par tête de petit ruminant (moutons, chèvres) dans la zone de Barkédji par exemple. Cette disposition est réglemantée par *l'arrêté ministériel n°5180 MDRH* du 13 Mai 1985 qui porte tarification de l'eau des forages pastoraux et vise au fonctionnement normal des forages par la responsabilisation des usagers. Ainsi l'arrêté stipule :

- Tous les usagers des forages pastoraux énumérés à l'article 1^{er} de l'arrêté sont tenus de participer à leur coût de production sur la base de prix fixés en fonction de l'animal.
- Les usagers des forages pastoraux sont distingués selon qu'ils sont résidents ou non résidents.

La non gratuité de l'eau des forages, dont l'objectif est de responsabiliser les utilisateurs conduit une catégorie de la population très pauvre à s'alimenter dans les eaux insalubres des mares (**photos 1.4**). Cette contrainte provoque inévitablement l'apparition de maladies infectieuses. Il faut noter également que les mares et leurs alentours sont devenus des lieux d'activités diverses. Entre autres, l'aquaculture, le maraîchage et l'agriculture par irrigation y sont pratiqués (**photos 1.5**). Parallèlement, l'ensablement des mares aménagées dû à l'érosion ainsi que les effets néfastes du ravinement facilité par l'érosion hydrique et le piétinement du sol par le bétail continuent de poser des problèmes majeurs (**photos 1.3 et 1.5**).

⁹ Directeur du service départemental de l'hydraulique à Linguère en 2006

¹⁰ CFA : unité monétaire de la zone CDEAO ; Communauté Des Etats d'Afrique de l'Ouest
100 F CFA correspondent à 1 FF qui est égale à 15 centimes d'euros



Photo 1. 5 : Ces clichés montrent l'état de nombreux ravins aux abords du bassin Pitarky, ainsi qu'une activité maraîchère pratiquée et irriguée par les eaux de la mare de Diourdy et enfin un jeune éleveur peul qui boit dans les eaux de la mare de Mboguéré.

Clichés A. Sarr, 2006.

Ainsi, 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 (Sy O., 2009). Le potentiel hydrique (eaux de surface et souterraines) de toute la région du bassin versant du Ferlo reste fortement lié à la variabilité des précipitations. Même s'il existe des réserves d'eau significatives dans les sous sols d'une part et d'autre part de l'eau disponible dans certaines mares presque toute l'année, des précipitations bien réparties dans le temps et dans l'espace restent l'élément déterminant pour une meilleure vie socio-économique de la région. La maîtrise et la gestion de l'eau nécessitent des politiques d'aménagements efficaces pour pallier les pluies variables et improbables qui participent au processus de formation des différents types de sol de la région.

3. LE FERLO, ENTRE SOLS BRUNS SUBARIDES ET SOLS FERRUGINEUX

Les études sur les sols du bassin versant du Ferlo sont nombreuses, celles notamment de Maignien R., (1965), Leprun J. C., (1971), Bille J. C., (1977), Le Houerou H. N., (1989), CSE, ROSELT/OSS (2002) permettent de distinguer cinq grands ensembles de types de sol :

1. les sols isohumiques, rouge brun subarides,
2. les sols ferrugineux tropicaux,

Ces deux types de sols sont localisés dans les parties septentrionales et occidentales du Ferlo. Le sud du Ferlo est lui aussi en partie recouvert de sols ferrugineux tropicaux :

3. les régosols occupent toute la partie centrale de la région,
4. les lithosols, par contre, sont situés dans le Ferlo oriental,
5. les sols hydromorphes comme leur nom l'indique recouvrent logiquement les anciennes terres des vallées fossiles du Ferlo (**figure 1.8**).

Les sols rouge-brun subarides du Ferlo septentrional et occidental se caractérisent par une pauvreté en matière organique et une faible fertilité chimique. Ils se composent essentiellement de sables (entre 80 et 85 %) et d'argiles en surface (35 %). Ces sols rouge-brun subarides couvrent les dunes fossiles du Quaternaire et sont appelés sols «*diors*».

Les sols ferrugineux tropicaux du Ferlo occidental et méridional ont une texture de type sableux à sablo-argileux. Ces sols, peu lessivés, de couleur rouge ou ocre sont également caractérisés par une pauvreté en éléments organiques. Ils proviennent des grès du Continental terminal. On les trouve dans un environnement végétal un peu plus favorable avec une teneur en azote, en phosphore et en matière organique nettement plus élevés (CSE/ROSELT/OSS, 2002). Il y a donc une amélioration des caractéristiques physico-chimiques du sol et donc de sa fertilité. Cette amélioration de la fertilité reste quand même très faible.

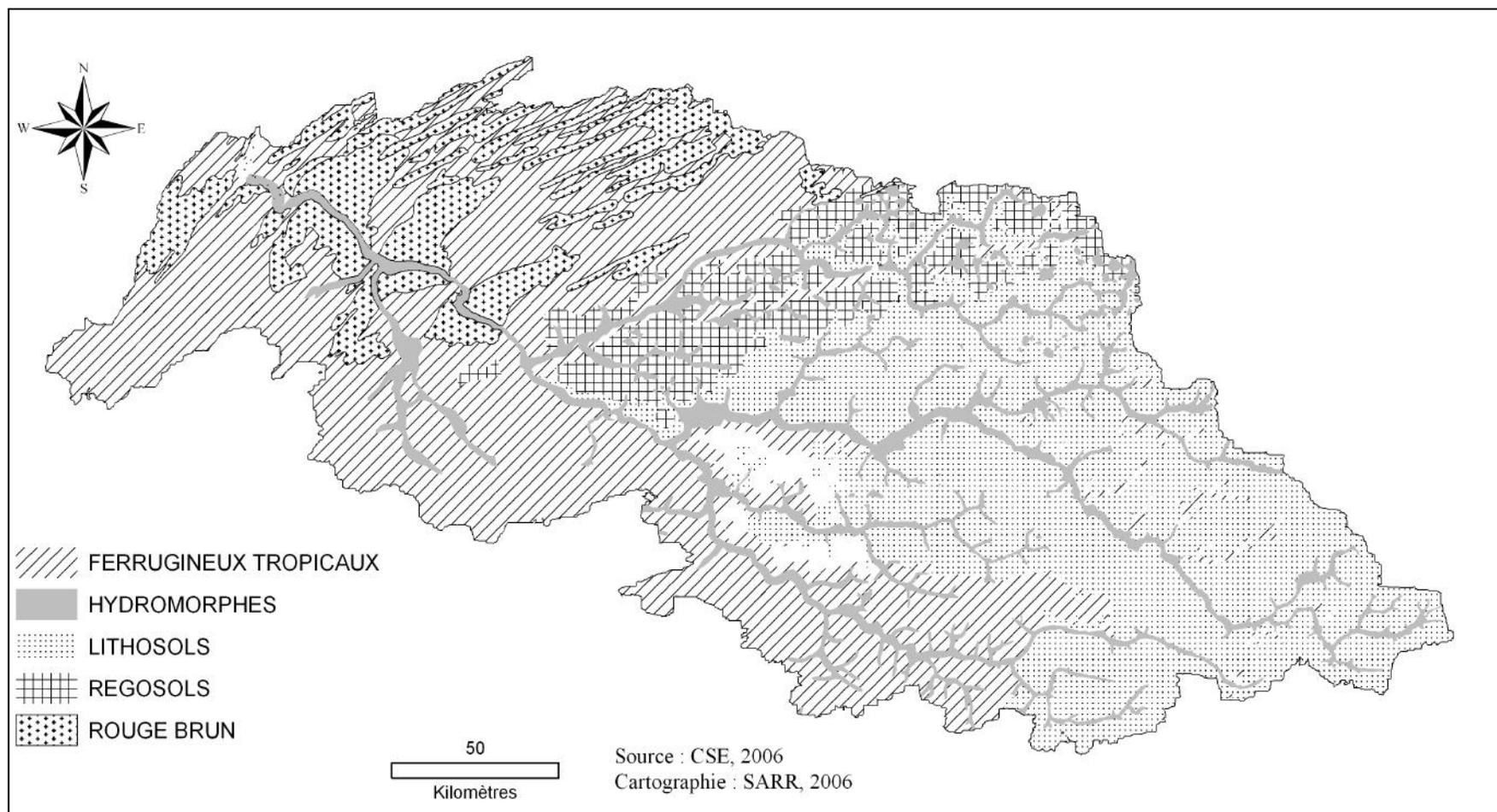


Figure 1. 8 : Les principaux types de sols du bassin versant du Ferlo

Les lithosols sur affleurement rocheux couvrent presque tout l'est du Ferlo. Ils sont très peu épais et limités en profondeur par la cuirasse continue dont les fragments peu altérés constituent l'essentiel du profil. Selon Boulet R., (1968), les lithosols sont des sols minéraux bruts d'érosion non climatique qui englobent les affleurements de roches inaltérées dures.

Les régosols du Ferlo, sont très peu profonds, peu évolués et ne présentent donc pas d'horizons diversifiés. Ils occupent en général le bas des pentes en association avec les lithosols.

Les lithosols et les régosols sont caractérisés par l'affleurement de la cuirasse et une dissémination des produits de démantèlement de cette cuirasse sur toute l'étendue des unités (ROSELT/OSS, 2002).

Les sols hydromorphes de la vallée alluviale du Ferlo et de ses anciens affluents, présentent des caractéristiques texturales variables allant du limon sableux au limon argileux en profondeur. Comparés aux autres types de sols, les sols hydromorphes ont évidemment une meilleure teneur en matière organique ce qui les rend fertiles. Ils sont visibles sur les pentes et le long des vallées du Ferlo et sont favorables aux cultures maraîchères qui sont pratiquées dans les bas-fonds.

La typologie des sols présents dans la région du bassin versant du Ferlo se retrouve dans la langue *Alpular* (langue parlée par les peuls) par le biais de quelques concepts traduisant cette distinction. Les Peuls se retrouvent dans cette typologie et distinguent quatre types d'ensembles morphopédologiques (Sy O., 2003) :

- le *seeno* sur sols minéraux bruts plus ou moins évolués ;
- le *balejol* sur sols ferrugineux tropicaux lessivés ou non, situés dans des couloirs interdunaires ;
- le *caadngol* sur sols argilo-sableux à argileux des vallées fossiles ;
- le *sangre*, sur sols cuirassés du Centre-est et de l'Est.

Les différents types de sols présents dans la zone d'étude sont très sensibles aux effets de l'érosion éolienne et hydrique à cause de leur texture sableuse, mais aussi de la maigre couverture végétale. Aujourd'hui, cette situation est aggravée par un surpâturage des parcours naturels au nord et à l'est et les mauvaises pratiques agricoles à l'ouest. Les facteurs d'une dégradation physique des sols cités précédemment s'accompagnant de pertes progressives en éléments minéraux et en matière organique sont mis en évidence par différentes études pédologiques consacrées à la zone sylvo-pastorale. Ainsi, à l'exception de la plaine alluviale, les sols sont relativement pauvres dans tout le bassin versant du Ferlo à cause également d'une pluviométrie variable dans le temps et dans l'espace ce qui limite considérablement la production

végétale. Le déficit pluviométrique au cours des années 1970 et 1980 a contribué d'une façon significative à la détérioration des sols. La conjugaison de la pluie et des sols participe à la cartographie des formations végétales sur le domaine d'étude.

4. LES PRINCIPALES FORMATIONS VÉGÉTALES, CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCOSYSTÈME SAHÉLIEN DU FERLO

L'absence de reliefs et le développement limité du réseau hydrographique donnent aux facteurs climatiques et notamment aux précipitations un rôle prépondérant dans la répartition des paysages végétaux du Sénégal (N'diaye P., 1980). Ainsi, le bassin versant du Ferlo n'échappe pas à une évolution de la végétation selon un gradient pluviométrique NW/SE expliquant une disposition zonale des domaines phytogéographiques, interrompus par quelques formations azonales dans la vallée du Ferlo. Les grands types de végétation influencés par le climat, qui joue un rôle essentiel dans la composition et la structure floristique, mais aussi par les grandes formations édaphiques, se présentent au Ferlo sous forme de pseudo-steppes arbustives et de savanes arbustives (**figure 1.9**).

La composition floristique de la zone sylvo-pastorale a fait l'objet d'études sectorielles nombreuses. Même si ces études exposées ne sont pas récentes, elles permettent néanmoins de comptabiliser les espèces dominantes. Parmi ces études, en faisant référence notamment à celle de Fété-Olé, au nord de la zone sylvo-pastorale, on recense dans une parcelle de 25 hectares, lors du Programme Biologique International¹¹ (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* (Bille J. C., 1977).

Poupon H., (1980), dans ses travaux dans la partie septentrionale de la zone sylvo-pastorale, sur une surface de 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 C., (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 Thérophytes alors que les 19 % des Phanérophytes sont des Capparidacées et des Mimosacées sans oublier l'existence rare de

¹¹ Dès 1969, l'étude globale d'un écosystème sahélien a été entreprise dans le Nord du Sénégal (le village de Fété-Olé est la station d'étude). Les travaux effectués dans le cadre du PIB (jusqu'en 1973), puis poursuivis au sein dans la section d'Écologie Végétale de l'ORSTOM, devaient permettre d'évaluer la production primaire nette de la région.

Chaméphytes, d'Hémicryptophytes et de Géophytes. Les travaux de Valenza J. et Diallo A. K., (1972) concernant les parcours naturels au nord du Sénégal distinguent sept types de formations végétales selon la nature du substrat. A l'optimum de son développement, c'est-à-dire à la fin de la saison des pluies, la végétation est composée d'un tapis herbacé, plus ou moins continu, pouvant atteindre 50 cm à 1 m de hauteur (Akpo L. E., 1992) mais aussi de ligneux à dominante arbustive. La strate herbacée est en majorité constituée d'espèces annuelles (surtout de graminées) tandis que la strate ligneuse est formée d'arbres et d'arbustes fréquemment épineux, ne formant jamais une strate continue même au sud où il est plus dense. La prédominance des espèces annuelles est l'un des facteurs explicatifs de l'évolution de la biomasse à l'échelle de la saison végétative, particulièrement, entre les mois d'août et de septembre. Ce point sera expliqué davantage dans la troisième partie de la thèse (voir chap.7).

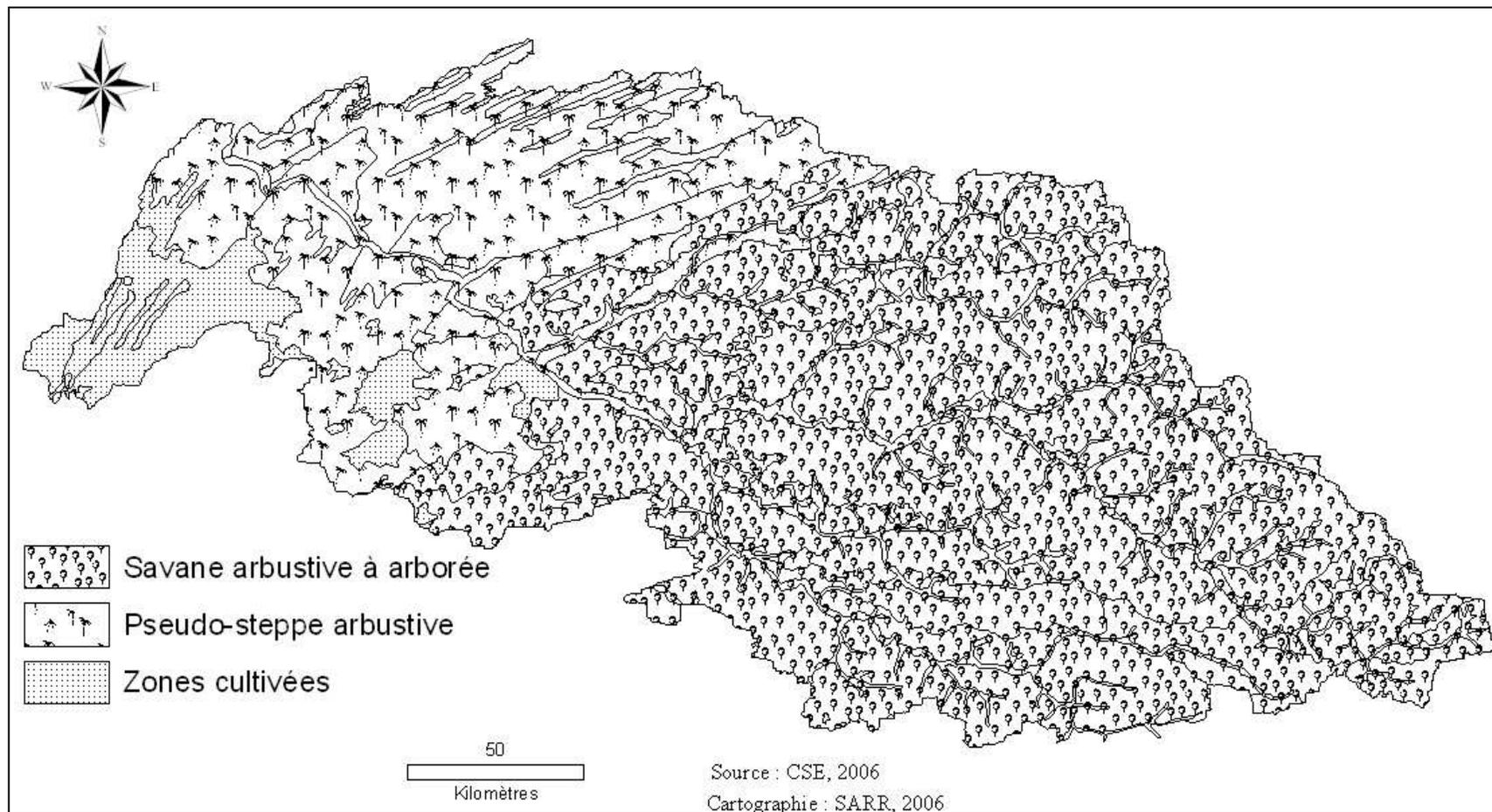


Figure 1. 9 : Les principales formations végétales du bassin versant du Ferlo

Les espèces végétales recensées dans le bassin versant du Ferlo caractérisent les régions sahéliennes, mais elles sont aussi visibles à certains endroits dans les régions soudaniennes du pays. En effet, les espèces peuvent être énumérées en fonction du type de substrat d'où une relation évidente entre l'espèce végétale et le sol sur lequel elle pousse.

Le «*seeno*» ou sols «*dior*» est le terrain de prédilection des espèces comme le *Combretum glutinosum* ou «*rat*», le *Guiera senegalensis* ou «*nguer*», le *Ziziphus mauritania* ou «*sidème*» et le *Sterculia setigera*.

Le «*badiol*» constitue le site approprié de quelques espèces comme l'*Acacia senegal* ou «*verek*» qui donne la gomme arabique, l'*Acacia seyal* «*sourour*», les *Balanites aegyptiaca* ou «*soump*» et l'*Adansonia digitata* ou «*baobab*» et toujours le *Combretum glutinosum*. Les observations de terrain effectuées en 2005 et en 2006 ont également permis de noter la présence de *Pterocarpus lucens*, *Pterocarpus erinacens*, *Boscia senegalensis*.

Le «*sanghré*» ou savane arbustive est caractérisé essentiellement par *Guiera senegalensis*, *Boscia senegalensis* et *Sterculia setigera*.

En résumé, la végétation du Ferlo est scindée en une strate arborée et arborescente, en une strate des arbrisseaux et buissons et en dernier lieu en une strate herbacée. La strate ligneuse (des arbres, des arbrisseaux et des buissons), également abondante, est composée d'espèces telles que le *Combretum glutinosum*, le *Prosopis africana*, le *Tamarindus indica*, la famille des *Acacia*, les *Balanites aegyptiaca* aux fruits oléagineux, l'*Adansonia digitata*, le *Guiera senegalensis*, le *Ziziphus mauritania*, etc... L'essentiel de la strate herbacée est constituée de *Cenchrus biflorus*, *Dactyloctenium aegyptium*, *Aristida mutabilis*, *Schoenefeldia gracilis* et *Zornia glochidiata*.

Les paysages du Ferlo sont globalement ceux de la savane arbustive à arborée, au sud et à l'est, et de la pseudo-steppe au nord et à l'ouest, mais aussi des sols complètement nus en saison sèche. Ces paysages évoluent et dépendent de l'alternance de la saison des pluies et de la saison sèche mais également des pratiques anthropiques. Le milieu humain est caractérisé par une faible densité, mais il exerce une forte pression sur le milieu physique.

5. LA DÉMOGRAPHIE AU FERLO : UNE POPULATION JEUNE ET HÉTÉROGÈNE

La zone sylvo-pastorale se trouve à cheval entre Saint-Louis, Matam et Louga, sur trois régions administratives du Sénégal septentrional. L'étude des caractéristiques générales de la démographie à l'échelle des communautés rurales n'est pas évidente dans cette zone même si des recensements et des prévisions récents de la population ont été faits par les pouvoirs publics. De multiples études sectorielles sur la démographie de la zone sylvo-pastorale ont été réalisées dans le cadre d'études de projets tels que ROSELT/OSS (depuis 1992), PPZS (lancé depuis 2001), PAPEL (depuis 1992), effectuées sur cette même zone. La plupart de ces études se sont concentrées dans le Ferlo Sud et Sud-ouest, c'est-à-dire dans le département de Linguère et celui de Louga. Les données dans le Nord et dans l'Est sont moins riches et peu fréquentes. Outre ces rapports, l'analyse s'appuiera également sur des données récentes obtenues dans le cadre des enquêtes socio-économiques réalisées par le programme ROSELT au Ferlo surtout dans le département de Linguère.

Les différents recensements de la population ont eu lieu dans des situations difficiles à cause de l'extrême mobilité des populations locales. D'autres paramètres sociaux et culturels constituent également un frein pour l'obtention de données fiables sur la population. Ainsi en fonction des motivations de chaque chef de famille, les chiffres avancés sont interprétés, soit positivement, en espérant avoir une aide financière des pouvoirs publics, soit négativement, pour fuir d'éventuels contrôles fiscaux. En outre, un argument sociologique de nature superstitieuse incite les chefs de famille à ne jamais compter les membres de leurs familles sous peine de les voir décroître. Cependant ces données recueillies permettent de définir les caractéristiques générales d'une population jeune, à majorité Peul.

Selon les recensements généraux de la population et de l'habitat (RGPH) de 1988 et des estimations de la population en 2001 effectués par l'Etat sénégalais dans 60 communautés rurales réparties sur huit départements (Dagana, Saint-Louis, Podor, Ranérou, Kanel, Matam, Louga et Linguère) (**figure 1.10, Tableau 1.1**), la population de la zone sylvo-pastorale est estimée aujourd'hui à 500 000 habitants.

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

Population 1988 : RGPH en 1988

Population 2001 : Estimations de 2001, *DPSI* Division des enquêtes démographiques et sociales

Tableau 1.1 : Caractéristiques démographiques de la zone sylvo-pastorale. RGPH, 1988

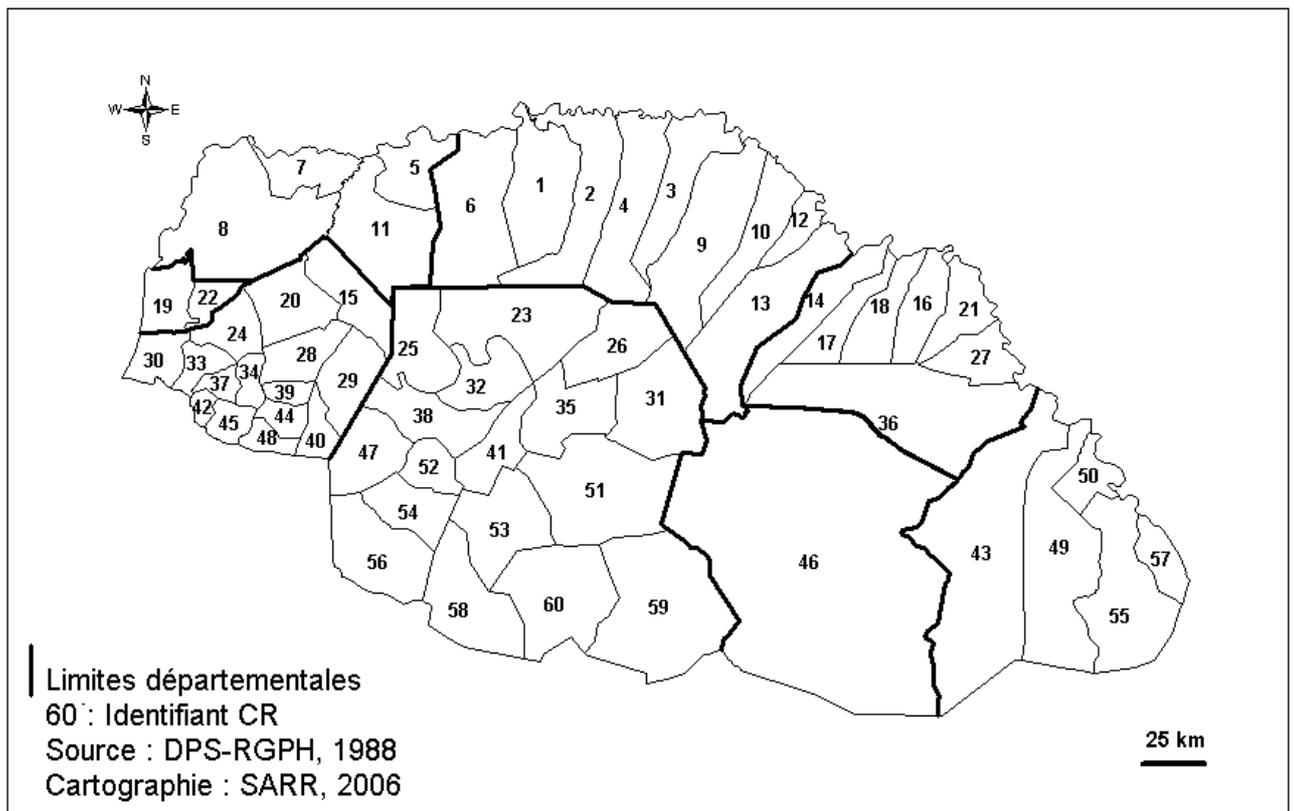


Figure 1. 10 : Localisation et identifiant des communautés rurales au nord du Sénégal

Selon le recensement officiel de 1988, la répartition spatiale des habitants par communauté rurale dans la zone sylvopastorale (**figure 1.11**), montre un très faible peuplement. 43 communautés rurales, soit plus de la moitié, comptent chacune moins de 14 500 habitants avec quelques disparités locales. Le Centre et le Sud de la région étudiée sont les moins peuplés et comptent entre 2 500 et 6 500 habitants. On trouve 3 198 habitants à Téssékéré, 2 551 à Louguéré Thioly en guise d'exemple. Ensuite, on distingue le Nord et une partie du Sud mais aussi à l'Ouest où on comptabilise 30 communautés rurales regroupées dans une classe allant de 6 500 à 14 500 habitants. Kel Gueye et Leona enregistrent respectivement 6 640 et 14 200 habitants. Les secteurs les plus peuplés sont l'Est et l'extrême Nord-Ouest de la région nord du Sénégal avec un total allant jusqu'à 33 383 habitants à Ross Béthio.

Cette faiblesse démographique s'explique par diverses vagues d'émigration qui ont touché la région plus d'autres. Les vagues migratoires constituent un phénomène important à prendre en considération. Les migrations à destination de l'Europe, de l'Amérique et de l'Afrique de l'Ouest (Côte d'Ivoire) sont fréquentes surtout en milieu Toucouleurs et ce depuis très longtemps. La grande sécheresse des années 1970 et ses conséquences ont contribué au

phénomène d'exode rural. Cette situation pousse les jeunes actifs à chercher du travail dans les centres urbains pour pallier les conséquences des aléas climatiques qui amènent la famine dans la zone.

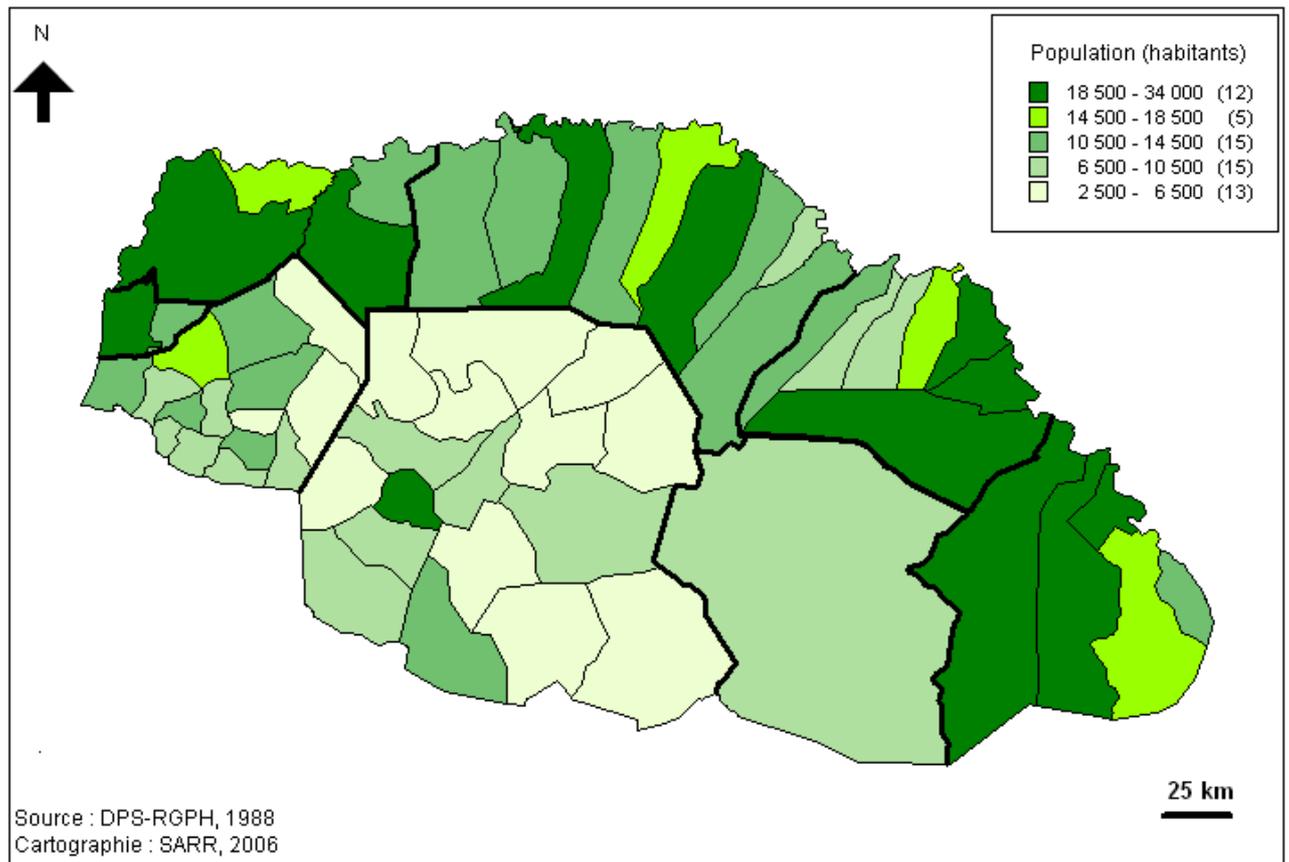


Figure 1. 11 : Répartition de la population au nord du Sénégal selon le recensement de 1988

Nous constatons dans la répartition des densités des différentes communautés rurales de la zone sylvo-pastorale une très faible concentration humaine même si cette réalité cache quelques disparités locales (**figure 1.12**). La zone sylvo-pastorale fait également partie des zones faiblement peuplées avec souvent moins de 8 habitants/km² en 1995 (PAPEL, 1992 in CSE, 2002 ; Touré et *al.*, 1997). La presque totalité de la zone, soit près de 75% des communautés rurales, enregistre une densité de moins de 30 habitants/km² parmi lesquelles 25 communautés rurales ont moins de 10 habitants/km². Les secteurs les moins densément peuplés sont Ranérou, Louguéré Thioly et Téssékéré avec moins de 2 habitants/km² en moyenne. La moyenne nationale se situe vers les 35 habitants/km². En outre, on enregistre entre 30 et 60 habitants/km² à l'extrême Est, dans les communautés rurales de Bokidiave, Nabadji, Orkadière et Bokiladji et à l'ouest dans les communautés rurales comme Mpal, Léona, Dahra, Coki. Cependant la

communauté rurale de Nguidile localisée à l'ouest représente le plus fort taux de densité dans le Ferlo avec près de 72 habitants/km².

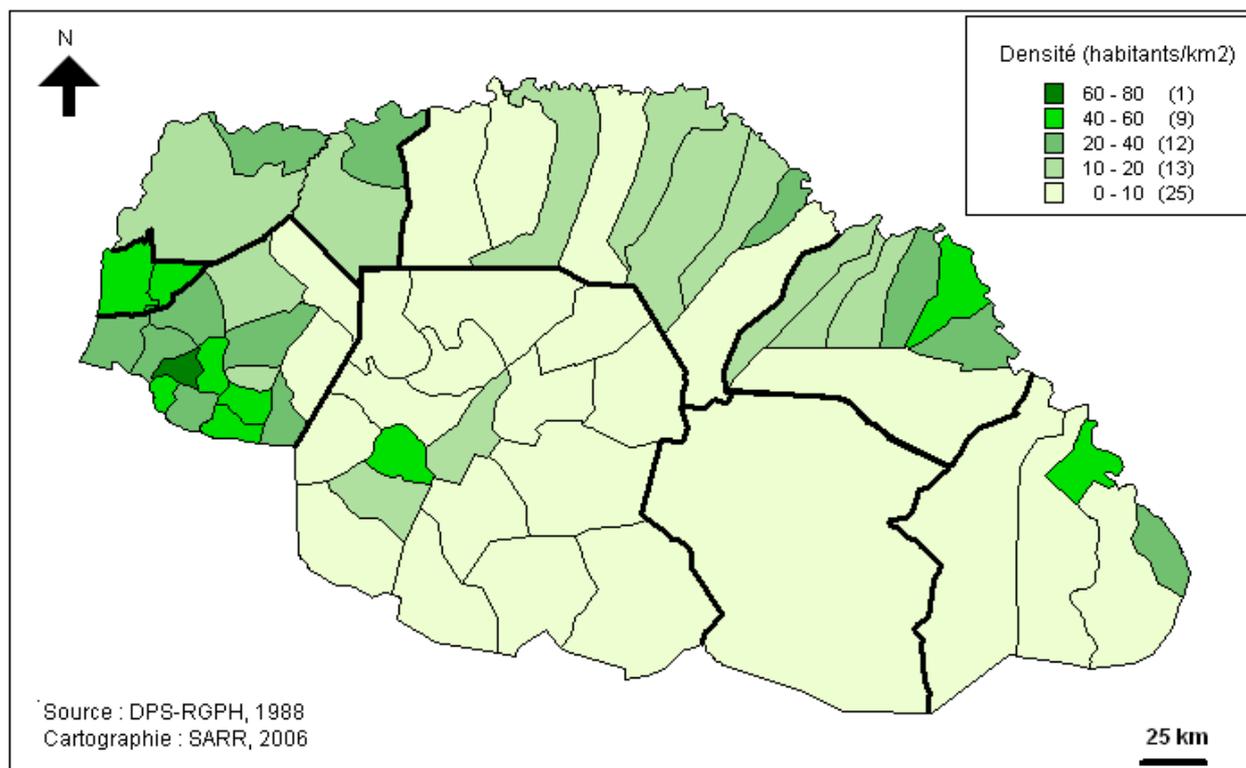


Figure 1. 12 : Répartition de la densité (habitants/km²) au nord du Sénégal

Selon les estimations de la Direction des Prévisions et des Statistiques du Sénégal (DPS), la population dans le Nord du Sénégal, celle du bassin versant du Ferlo y compris, a connu un accroissement de 1988 à 2001 (**figure 1.13**). En effet, l'ensemble des communautés rurales des départements de Ranérou, Matam et Dagana ont enregistré une croissance significative de leurs populations. Les départements de Linguère et de Ranérou enregistrent les taux d'accroissement les plus importants, suivis du département de Matam (**figure 1.13**). Seule la communauté rurale de Dahra passe de 22 378 habitants en 1988 à 16 425 habitants en 2001 avec un taux négatif de 26,60 %. En revanche, le département de Louga, avec toutes ses communautés rurales, connaît une évolution décroissante de sa population. Les *maxima* ont été enregistrés à Gande, moins 14,38 %, à Léona avec moins 14,83 %, mais aussi à Syer avec moins 13,87 %. Dans le département de Podor, quatre communautés rurales enregistrent une croissance négative de la population entre 1988 et 2001. C'est le cas de Guédé, de Gamadji Sarre, de Pété avec respectivement moins 24,38 %, 1,37 % et 5,78 %.

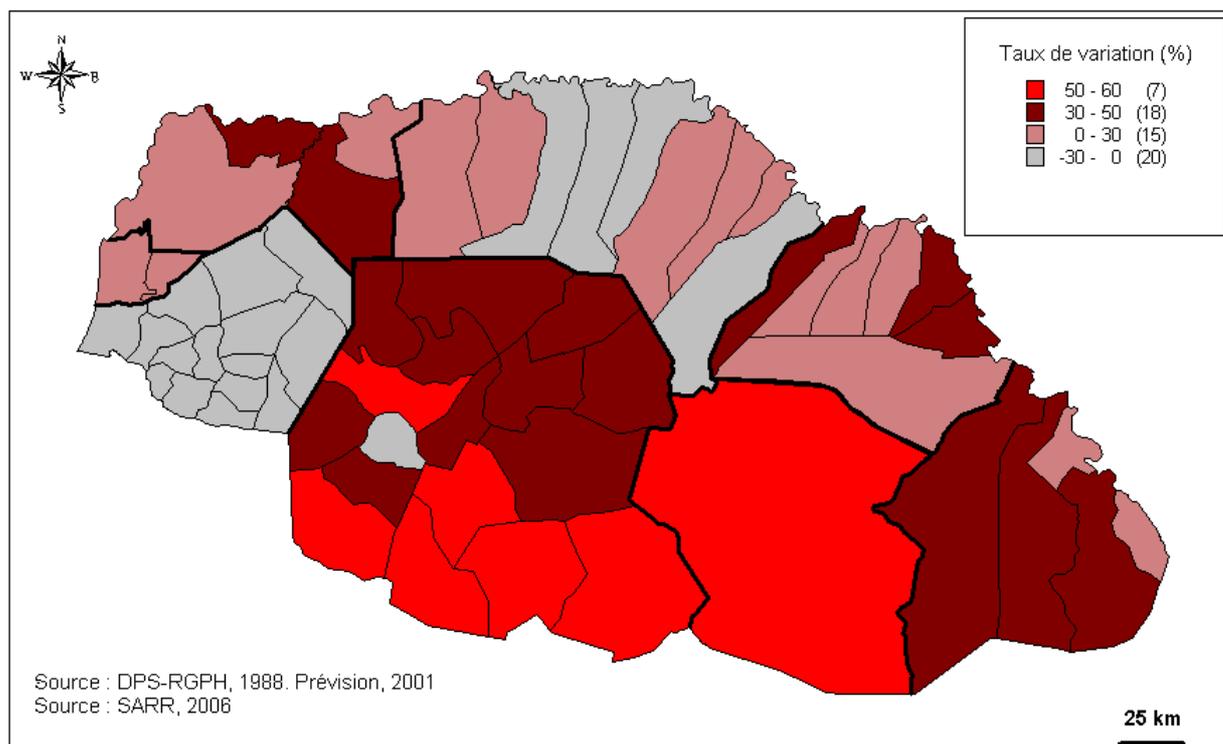


Figure 1. 13 :  volution de la population au nord du Sénégal entre 1988 et 2001

La composition ethnique de la population du Ferlo fait état d'une majorité de Peuls suivis des Wolofs. Les Toucouleurs¹², les Sarakolés, les Maures et dernirement les Sérères commencent à prendre place dans la composition de cette population du Ferlo. D'après les résultats du diagnostic (CEFFEVA 3, 1999 in CSE, 2002) réalisés dans le département de Linguère, les Peuls représentent 90 % de la population totale, les Wolofs constituent 8 %, et les autres ethnies ne font que 2 %. La population du département de Linguère, à l'instar de toute la région nord du Sénégal, est essentiellement constituée de jeunes de moins de 20 ans. Les caractéristiques ethniques de la région de Matam sont sensiblement similaires à celles des autres régions de la zone sylvo-pastorale, c'est-à-dire que les Peuls occupent la première place avec 88 %, suivis des Sarakolés (6,7 %). Les Wolofs ne sont que 3,9 %. Les Maures et les Sérères ne représentent respectivement que 0,8 % et 0,1 % de la population.

En résumé, l'évolution de la population du domaine d'étude entre 1988 et 2001 montre globalement un accroissement des secteurs Est, Sud, Nord mais également une diminution constatée surtout au Sud-ouest correspondant au département de Louga.

¹² Les Toucouleurs comme les Peuls sont souvent regroupés dans le groupe AL PULAR, un des grands groupes ethniques de l'Afrique de l'Ouest grâce à une forte ressemblance au niveau du dialecte parlé.

Comme un peu partout au Sénégal, la religion est présente et c'est près de 94 %¹³ de la population qui adhèrent à la religion musulmane. Il faut ajouter que la répartition spatiale de la population est fortement influencée par des caractères socio-démographiques comme l'ethnie, la religion, le mariage. La répartition des différentes ethnies dans la région constitue un indicateur pour mieux comprendre la territorialisation des stratégies d'occupation de l'espace. On constate une forte corrélation entre la stratégie d'occupation et l'ethnie résidente.

6. LES STRATÉGIES D'OCCUPATION DE L'ESPACE ET LEUR DYNAMIQUE

L'organisation des systèmes d'exploitation est caractérisée par un ensemble de facteurs dont les plus importants sont des pratiques sociales, économiques et culturelles des populations en association avec les potentialités dynamiques offertes par le milieu. Dans le bassin versant du Ferlo, les systèmes de production traditionnels combinent les trois activités essentielles que sont l'agriculture, la cueillette et l'élevage.

6.1. L'agriculture, une activité partagée entre ethnies

L'agriculture est une activité importante dans le bassin versant du Ferlo. Elle est pratiquée essentiellement par les Wolofs et les Sérères, mais aussi par les Peuls et les Toucouleurs. Pratiquée sous pluie et en décrue, l'agriculture fut naguère plus orientée vers l'autoconsommation ce qui favorisa un commerce de troc d'une partie de la récolte si le besoin se faisait sentir. L'extension de l'activité agricole dans le bassin versant du Ferlo surtout dans sa partie sud et sud-ouest est liée à la progression du front agricole à la suite du déclin progressif de l'ancien bassin arachidier des régions historiques du Baol, du Sine, du Saloum et du Kayor (**figure 1.4**). La venue des paysans arachidiers dans la région de Barkédji remonte au début des années 1930 (Santoir C., 1983). On trouve également dans cette région des populations agricoles du Baol profond à la conquête de terres plus fertiles. Les travaux de Lake L. A. et Touré O., (1984) montrent que, de 1954 à 1979, la culture de l'arachide s'est implantée dans la haute vallée du Ferlo (Linguère et environs) en grignotant les parcours pastoraux des Peuls «désarmés par

¹³ Selon le rapport du gouvernement du Sénégal (2001) dans le site internet de ce dernier, la population compte également 5% de chrétiens et 1% de religions traditionnelles.

leur dispersion géographique, leur segmentation sociale et le caractère évanescent de l'occupation de l'espace (par l'élevage)».

Limité au nord par la vallée et le Delta du fleuve Sénégal, le bassin versant du Ferlo, a subi dans les parties septentrionales et occidentales des influences liées aux grands aménagements hydro-agricoles de la Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du delta du fleuve Sénégal et de la Falémé (SAED). L'attraction réelle due aux activités rizicoles dans le delta et à l'établissement de périmètres irrigués villageois (PIV) a entraîné la marginalisation des activités pastorales et a freiné les mouvements et les déplacements de populations du *Jeeri* (partie non inondable de la vallée) vers le *Walo* (partie inondable). Cette situation est la conséquence d'activités agro-pastorales qui sont favorisées par l'ouverture d'une série de forages mécanisés dans les années 1950.

La réalisation de forages mécanisés apparaît au premier abord comme l'événement majeur de l'histoire contemporaine de toute la zone sylvo-pastorale. La mise en service des forages à exhaure mécanique a radicalement modifié les conditions d'occupation et d'utilisation de l'espace en permettant à toute une population jadis saisonnière de s'y installer de façon relativement permanente. Dupire M., (1957) et Barral H., (1982) montrent le déclin progressif des grandes transhumances saisonnières dans ce nouveau contexte d'aménagements hydrauliques. Les paysages périphériques ainsi que l'intérieur de la zone du Ferlo sont perpétuellement menacés par une progression de l'agriculture (essentiellement de colons Mourides avec les Daaras¹⁴).

L'agriculture sous pluie a toujours existé en complément de l'activité dominante qu'est le pastoralisme même s'il ne faut pas minimiser le rôle de la cueillette, très secondaire, mais qui fait partie du dynamisme économique de la région.

6.2. La cueillette : un secteur d'activité délaissé en milieu Ferlo

La cueillette est une activité très ancienne dans cette partie du Sénégal. Elle nécessite peu d'investissements financiers si on la compare à l'agriculture par exemple. Les produits de la cueillette exploités à l'échelon national concernent principalement les fruits, la gomme, les résines, les gousses, les feuilles et les écorces. Parmi les fruits les plus exploités au Sénégal, on

¹⁴ Les Daaras sont des écoles où des guides religieux enseignent le coran et ses principes aux enfants ou aux adolescents.

retrouve les *nété*¹⁵ (*Parkia biglobosa*), le *madd*¹⁶ (*Saba senegalensis*), le *ditakh*¹⁷ (*Detarium senegalens*), le *bouy*¹⁸ (*Adansonia digitata*), le *néw*¹⁹ (*Neocarya macrophylla*), le *tool*²⁰ (*Landolphia heudelotii*), le *sidem*²¹ (*Ziziphus mauritiana*), le *soump*²² (*Balanites aegyptiaca*), le *dakhaar*²³ (*Tamarindus indica*). Dans sa thèse, Kane I. C., (2005) montre que 18,8 % des besoins alimentaires et élémentaires des paysans en milieu sud-soudanien sénégalais proviennent de la cueillette végétale. Dans le bassin versant du Ferlo, l'activité de la cueillette concerne essentiellement l'exploitation de la gomme arabique. Elle est obtenue par la saignée du gommier (*Acacia senegal*). L'essentiel de la production vient des régions de Louga, de Saint Louis et de Matam. Aujourd'hui, même si la cueillette de la gomme arabique ne mobilise pas beaucoup d'actifs, elle fait intervenir de plus en plus de programmes de développement pour son exportation et sa commercialisation. Un séjour sur le terrain a permis de visiter des périmètres de cueillette gérés par un projet sous le financement de la République Islamique d'Arabie Saoudite en collaboration avec la FAO²⁴. A ce propos, on constate que la production de cette plantation a connu une reprise au cours des deux dernières décennies (**tableau 1.2**). Cette situation est fortement influencée par l'amélioration des précipitations enregistrées à partir des années 1990 qui a d'ailleurs eu des répercussions sur l'organisation du système pastoral (voir chapitre 4).

¹⁵ Appellation dans la langue Wolof ; l'une des langues nationales du Sénégal

¹⁶ Id.

¹⁷ Id.

¹⁸ Id.

¹⁹ Id.

²⁰ Id.

²¹ Id.

²² Id.

²³ Id.

²⁴ FAO : The Food and Agriculture Organization of the United Nations ou L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Elle a pour vocation de promouvoir l'agriculture, la nutrition, la foresterie, la pêche et le développement rural, et de faciliter l'éradication de la faim dans le monde.

Années	prod. g. arab.	Années	prod. g. arab.	Années	prod. g. arab.
1941	3 801	1963	1 768	1985	144
1942	nd	1964	1 698	1986	466
1943	2 044	1965	2 654	1987	507
1944	1 556	1966	2 116	1988	275
1945	nd	1967	5 875	1989	318
1946	2 595	1968	5 012	1990	340
1947	2 210	1969	5 545	1991	209
1948	2 743	1970	6 991	1992	nd
1949	1 537	1971	10 872	1993	900
1950	915	1972	1 551	1994	nd
1951	1 340	1973	3 170	1995	484 045
1952	1 502	1974	1 120	1996	254 553
1953	1 633	1975	582	1997	119 536
1954	2 211	1976	1 120	1998	111 703
1955	2 581	1977	804	1999	75 995
1956	1 939	1978	804	2000	128 225
1957	3 430	1979	698	2001	166 927
1958	2 848	1980	661	2002	52 365
1959	1 763	1981	493	2003	40 554
1960	1 049	1982	693,1	2004	86 194
1961	1 053	1983	544	2005	nd
1962	1 428	1984	122	2006	nd

Tableau 1. 2 : Évolution des productions (prod.) contrôlées de gomme (g.) arabique (arab.) du Sénégal de 1914 à 2004 (en tonnes). nd : non disponibles

6.3. Le système pastoral : la marque identitaire du domaine d'étude

Le pastoralisme reste le mode d'exploitation de l'espace qui, de loin, domine dans toute la zone sylvo-pastorale en général, même si l'agriculture connaît quelques avancées spatiales surtout au cours de ces dernières années. Le système pastoral de la région a connu quelques périodes significatives au cours de son évolution qui méritent d'être évoquées. Les systèmes de déplacement des troupeaux faisaient partie du schéma général qui caractérisait la transhumance au nord du Sénégal c'est-à-dire *Jeeri / Walo / Jeeri*²⁵ (**figure 1.4**). Ces déplacements dépendent exclusivement de l'alternance des saisons. En effet, pendant la saison sèche, les troupeaux partent à la recherche de pâturages frais et de points d'eau dans le *Walo*. En revanche, lors de la tombée des premières pluies, ils reviennent vers le *Jeeri* pour camper plus près des mares alimentées par les précipitations.

²⁵ Walo : zone de crue du fleuve sénégal (figure 1.4) - Jeeri : zone non inondable (figure 1.4)

Cette stratégie permet une bonne gestion des ressources naturelles car selon Barral H., (1982), cette exploitation alternée des parcours de dunes en hivernage et de zones en décrue pendant la saison sèche assure au bétail des pâturages verts et un «abreuvement» quotidien pendant presque toute l'année. Elle assure également une bonne politique de structuration de l'espace. Touré O., (1994) parle d'une organisation de l'espace pastoral en «*leydi*» correspondant à des terroirs agro-pastoraux sous le contrôle de différents groupes humains intervenant dans la zone. Chaque communauté de pasteurs jouit de droits propriétaires sur les ressources disponibles dans l'espace de son «*leydi*». Dans la partie *Jeeri*, la structuration traditionnelle de l'espace se fonde sur la distinction entre les zones dites «*jeys*», allusion faite aux meilleures terres de parcours faisant l'objet d'une appropriation stricte et les zones dites «*laddle*» qui ne sont appropriées par personne et correspondent à l'espace interstitiel entre les différents «*jeys*» (Grosmaire P., 1957). Chaque «*jeys*» se subdivise en plusieurs «*hurum*» ou secteurs qui forment autant de terroirs rattachés aux campements d'hivernage appelés «*rumaare*». Le *hurum* désigne à la fois l'espace sur lequel s'exercent l'autorité du campement et les règles qui régissent l'exploitation des ressources qui y sont disponibles (Sall A., 1995). Les *hurum* appartenant à une même zone sont contigus, réalisant ainsi un maillage dont la densité est telle que la totalité de l'espace «utile» se trouve accaparée (Barral B., 1982). Ce système permettait la protection des cultures puisqu'il délimitait une zone interdite au bétail. Notons au passage que l'agriculture vivrière à petite échelle et l'élevage ont toujours été étroitement associés en milieu peul.

Les conditions d'occupation et d'utilisation de l'espace ont connu quelques évolutions. La législation foncière traditionnelle était fondée sur le patrimoine foncier familial. Le droit d'accès à la terre était, en effet, ouvert aux familles et non aux individus. Chaque groupe familial gérait collectivement ses terres sous l'autorité du patriarche et en assurait la transmission. La terre appartient au lignage qui le premier s'est installé sur le territoire (Touré O., 1990). Les bénéficiaires exercent un droit de jouissance de père en fils sans pouvoir cependant aliéner la terre. En milieu peul, comme c'est le cas dans beaucoup d'autres ethnies sénégalaises, la terre appartient aux usagers.

La nouvelle loi de 1964 sur la réforme foncière a substitué aux droits fonciers traditionnels familiaux la propriété éminente de l'Etat. Dès lors, la gestion des terres du domaine national en milieu rural relève de l'autorité des conseils ruraux qui sont créés par le pouvoir politique. L'application de cette loi pose des problèmes dans un milieu où les ressources naturelles sont les critères déterminants permettant la délimitation de la zone. La promulgation de cette loi a entraîné un bouleversement de l'ensemble de l'espace pastoral désormais fractionné et réinséré dans le maillage des communautés rurales dont les responsables sont chargés, entre

autres, de contrôler les mouvements du bétail et de déterminer les modalités d'accès aux ressources en eau et en pâturage (Ba C., 1986). En outre, l'attribution du rôle de conseillers ruraux à un groupe social peut conduire à un favoritisme ethnique ou être perçu comme tel. Ce fut le cas avec les Wolofs qui furent les premiers conseillers ruraux après l'indépendance du pays. Ils attribuaient les meilleures terres de pâturage et de décrue à leurs parents wolofs. Cette situation provoquait régulièrement des conflits inter-ethniques.

Parallèlement à cette problématique foncière, la dynamique du système pastoral au Ferlo est intrinsèquement liée au projet de l'hydraulique pastorale des années 1950 jusqu'aux années 1990 qui s'est traduite par l'ouverture de forages mécaniques (**figure 1.14**). Pour Barral H., (1982), 35 forages profonds (80–322 m) et 33 puits-forages alimentés par l'aquifère maestrichtien sont recensés. L'ouverture de ces forages entre 1950 et 1980 a également profondément changé les conditions d'occupation et d'utilisation de l'espace du Ferlo. La première conséquence de ce changement se traduit par un abandon progressif des schémas anciens classiques de transhumance *Jeeri / Walo / Jeeri* au profit d'une sédentarisation relative. De 1950 à 1980, le taux de transhumants est passé de 60 à 13 % et il y a eu une augmentation du cheptel de 20 % (Akpo L. E., 1990). Cette politique de diminution significative de la transhumance au profit d'une tentative de sédentarisation «effective» implique une organisation de la gestion de l'espace ainsi que des ressources naturelles. L'affluence aux sources d'eau dépend de la saison. En saison sèche, les campements s'installent dans un rayon de 5 à 10 km des forages et les mouvements ne sont plus en direction du lac de Guiers ou vers le fleuve. En saison des pluies, comme déjà constaté dans l'étude des mares, les forages sont moins fréquentés car les mouvements se font entre les campements, les pâturages et les mares (gratuité de l'eau). La mobilité existe donc toujours mais au lieu d'être unidirectionnelle et périodique, elle est devenue anarchique. On passe à un micro-nomadisme de faible amplitude à la place d'une véritable sédentarisation (Barral H., et al., 1983). Le Ferlo oriental a connu aussi quelques déséquilibres du système pastoral traditionnel à cause des nombreux forages favorisant la diminution surtout des grandes transhumances en saison sèche. La décroissance de la mobilité pastorale a été fortement influencée par des projets actuels d'aménagements de l'espace pastoral tels que celui des Unités Pastorales (U.P.). Une Unité Pastorale est constituée de «l'espace et de l'ensemble des ressources polarisées par un forage pastoral» (Faye B., 2001). Il s'agit, pour un ensemble de localités, de se partager un même espace pastoral voire agricole et d'exploiter les mêmes points d'eau compte tenu de leurs intérêts économiques et leurs liens historiques et de voisinage (Wane A., et al., 2006). Ainsi, les U.P. apparaissent comme un changement organisationnel prônant une

modernisation de l'élevage extensif qui est fondée essentiellement sur une limitation de la mobilité pastorale.

La fréquentation importante du bétail autour des points d'eau engendre des problèmes. Ainsi, quelques impacts environnementaux liés à l'activité pastorale subsistent aux alentours des points d'eau en particulier autour des forages. Le piétinement du sol par la surcharge d'animaux à proximité des forages (points de concentration de troupeaux) engendre la disparition pure et simple du couvert végétal ce qui entraîne la destruction des horizons de surface favorisant l'érosion éolienne. Ce phénomène est très perceptible aux environs de tous les forages que nous avons visités dans le Ferlo (**photos 1.6 à 1.7**). Outre la fragilité du milieu physique, quelques autres facteurs participent à la situation d'instabilité sociale et économique.

La grande sécheresse sahélienne des années 1970 et 1980 a fortement contribué aux déséquilibres du système pastoral traditionnel. L'important déficit pluviométrique de la région nord du Sénégal a entraîné la disparition presque totale de pâturages pour le bétail. Cette situation a nécessité l'ouverture de nouveaux couloirs de transhumance. La population pastorale connaît de grands mouvements qui descendent en direction du sud vers les régions de Diourbel, Kaolack et surtout de Tambacounda. Lors des différentes crises par exemple celles de 1972-1973, ou de 1983, des pertes considérables de bétail ont été enregistrées parce que les producteurs ont adopté une attitude d'attentisme espérant l'amélioration des conditions climatiques ou le départ d'une partie des troupeaux. Selon les déclarations des pasteurs, les troupeaux bovins auraient été décimés aux trois-quarts et parfois même plus (Touré O., 1990). La construction de la digue de Keur Momar Sarr et sa fermeture aussitôt après pour empêcher l'eau de continuer à alimenter la vallée du Ferlo, dans le but d'améliorer la réserve du plan d'eau du lac, ont bouleversé la gestion de l'espace de la basse vallée du Ferlo (Sall A., 1995). Ainsi plusieurs familles émigrèrent de la zone du lac vers le Ferlo oriental et méridional.

Les aménagements hydro-agricoles et les cultures de décrue ainsi que la remise en eau de la basse vallée du Ferlo ont participé aux bouleversements des situations de l'occupation et de l'utilisation de l'espace. Dans cette évolution perpétuelle de l'occupation du sol, l'élevage reste dominant. Il est actuellement le secteur d'activité qui concentre plus d'actifs grâce aux potentialités offertes par le milieu, sur lesquelles est basé l'ensemble des traits socio-économiques régissant l'organisation du système pastoral.



Photo 1. 6 : Les alentours du forage de Dodji



Photo 1. 7 : Forages mécaniques de Barkédji et alentours. Ces clichés montrent une disparition complète de la couverture végétale due au piétinement par le bétail.

Clichés A. Sarr le 02/2006

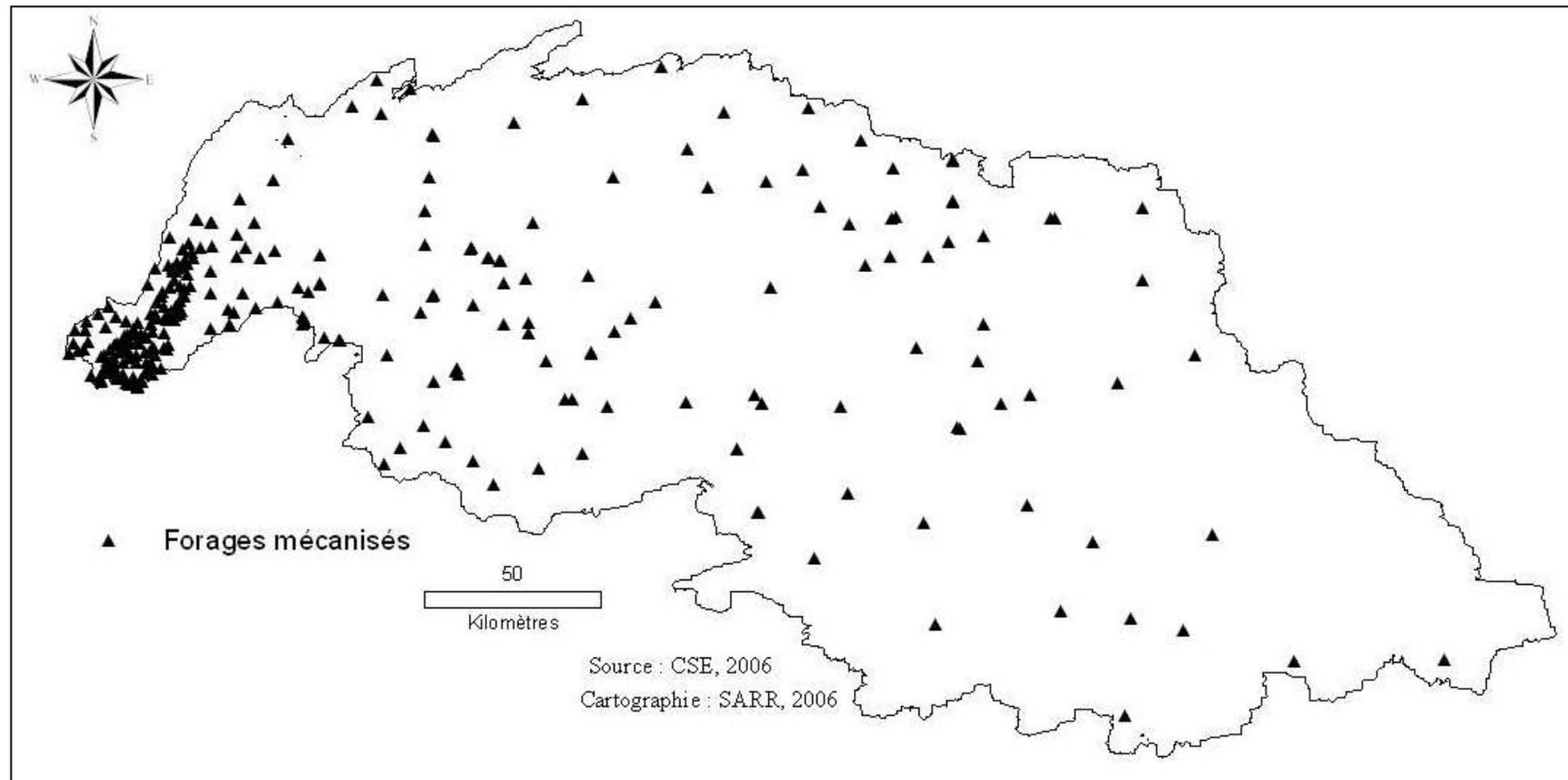


Figure 1. 14 : Répartition des forages mécanisés dans le bassin versant du Ferlo

6.3.1. L'organisation socio-économique du système pastoral

Le système pastoral revêt une importance capitale dans l'économie sénégalaise comme dans celle de la plupart des pays sahéliens. La contribution de l'élevage à l'économie nationale ne se limite pas à la seule production alimentaire. Elle prend en compte les cuirs, les peaux, le fumier et la traction animale. Tous ces produits dérivés de l'élevage constituent des apports non négligeables dans la sécurité alimentaire des populations et dans la lutte contre la pauvreté (DRE, 2006).

L'élevage est une source d'identité de la population Peul. La presque totalité de son temps de travail est consacrée à cette activité. Le caractère socio-culturel de l'élevage domine sur l'aspect économique puisqu'il détermine le statut social de l'éleveur. Le chef de ménage «*diom-galle*» est responsable du troupeau et il prend toutes les décisions concernant la conduite et la gestion de ce dernier. L'élevage s'organise autour de trois conditions essentielles : le troupeau, l'espace pastoral et la mobilité.

- Le troupeau

Les différentes études consacrées à la répartition et à l'évolution du cheptel sénégalais permettent d'avoir une meilleure compréhension du phénomène. Ainsi l'Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des pays Tropicaux (IEMVT) (Valenza J., et Diallo A. K., 1972 et IEMVT et *al.*, 1989), le Centre de Suivi Ecologique (CSE, 1987 à 1996), la Direction de l'Élevage (DE) (1994 à 2005) avec des méthodes différentes suivent la dynamique de l'activité pastorale. Les statistiques générales sur le cheptel émanent au Sénégal de deux sources, la Direction de l'Élevage et le CSE. Les données de la Direction de l'Elevage s'appuient sur le recensement du cheptel de 1961. Les données, depuis lors, sont actualisées par des taux de correction fondés, à l'origine, sur des renseignements obtenus grâce aux campagnes de vaccination, et, depuis 1993, sur une hypothèse de croît numérique constant d'une année à l'autre (MDRH, 1992 *in* : Ecossén, 2000). La DE comptabilise et recense plus de variétés que le CSE et les données fournies sont spatialisées en rapport avec les départements se situant dans la domaine d'étude. De ce fait, nous avons préféré étudier les données de la DE plutôt que celles du CSE et ce, même s'il faut les prendre avec prudence, car elles ne restent que des estimations du cheptel avec des méthodes d'acquisition de données qui sont comme on l'a vu d'une représentativité discutable.

L'évolution du cheptel sénégalais connaît une amélioration tant au niveau de la qualité que de la quantité, et ce, depuis la dernière grande sécheresse sahélienne des années 1970 (**figure 1.15**). L'évolution des effectifs des bovins, caprins et ovins a été croissante de 1994 à 2001. Mais à partir de 2001, la tendance devient décroissante jusqu'en 2005, année où on enregistre une molle amélioration par rapport aux années 2002, 2003 et 2004. Pour la volaille, on remarque une tendance générale positive dans tous les départements depuis l'année 1994 (**tableau 1.3**). Nous précisons que pour des raisons d'échelle comparative, nous avons préféré ne pas représenter les effectifs de la volaille dans les départements. L'élevage des caprins et des ovins a connu une nette amélioration de 1989 à 1992. Selon Ba (1986), cette croissance est aussi due à un taux de croissance estimé officiellement à 8 % alors que celui des bovins est resté à 4 %.

Départ.	Types	Années											
		1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Louga	Bovins	129460	131340	134620	135970	136650	137333	140099	143618	125141	126000	128260	128900
	Caprins	150540	154290	160000	166400	172224	178252	180398	185793	162647	165515	172825	175400
	Ovins	174280	177430	184500	191500	198203	205140	207192	213396	186818	189827	195386	197340
	Volaille	431510	439800	416860	493060	557158	629588	650994	673128	696014	707800	724416	743000
Linguère	Bovins	218460	221700	227240	229510	230658	231811	236479	242419	211232	196760	199728	205700
	Caprins	363650	372700	384000	399000	412965	427419	432566	445502	390001	341461	353290	371000
	Ovins	417090	424620	441540	458000	474030	490621	495530	510368	446802	385958	397765	415700
	Volaille	323600	322000	279370	369360	417377	471636	487671	504252	521397	530225	535481	546200
Dagana	Bovins	82770	83980	86080	86940	87375	87812	89580	91830	80016	71198	72398	73500
	Caprins	70110	71860	75000	78000	80730	83556	84562	87091	76241	58777	61642	63500
	Ovins	41670	42420	44110	45790	47393	49051	49542	51026	44670	35426	36618	37600
	Volaille	610340	635020	596920	677980	766117	865713	895147	925582	957052	756977	773902	793200
Podor	Bovins	200280	203180	208260	210340	211392	212449	216727	222171	193588	194917	197646	200800
	Caprins	175020	179380	182000	189280	195905	202761	205203	211340	185011	188273	192038	197800
	Ovins	224320	228370	237470	246400	255024	263950	266591	274573	240376	244247	251086	258000
	Volaille	324510	322990	309120	369170	417162	471393	487421	503993	521129	529952	538685	552200
Matam	Bovins	144410	146500	150160	151660	152418	153180	156265	160190	139582	156462	160060	171800
	Caprins	131780	135060	140000	145600	150696	155970	157849	162569	142845	200781	207205	214000
	Ovins	336210	342280	355920	369400	382329	395711	399670	411637	359777	433611	446620	459900
	Volaille	466690	478200	452290	533390	602731	681086	704243	728187	752945	765694	781007	846400

Sources : Direction de l'Élevage, PAPEL, 2006.

Tableau 1. 3 : Effectifs du bétail par espèce et par département

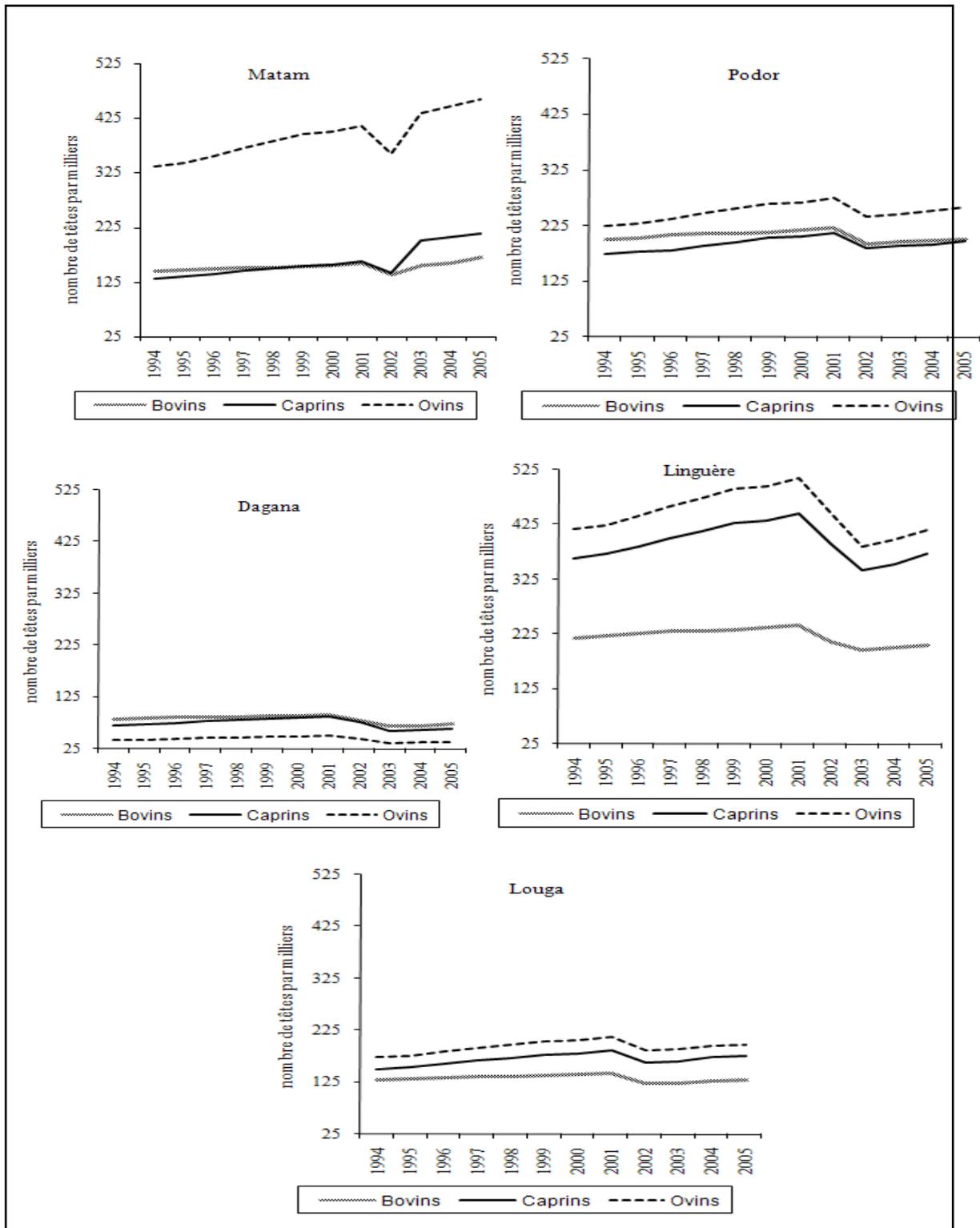


Figure 1. 15 : Évolution des effectifs du cheptel par espèce et par département
Sources : Direction de l'Élevage, PAPEL, 2006.

La composition du troupeau dans le Ferlo reste dominée par les ovins (85 %), suivis des bovins (10 %) et enfin des caprins (5 %). Les bovins sont composés de vaches (70 %), de bœufs (10 %) et de veaux estimés à 20 %.

Les principales espèces et races animales qui peuplent la zone sont représentées par :

- les bovins avec la race zébu-gobra, animal de beau format, adapté à la zone sahélienne ;
- les ovins avec les races toubaber ou touabir (mouton du Sahel) et *peul-peul* (mouton du maure) qui reste dominante par rapport à la première. Il y a également le *waralé* ou (*warabé* pour certains) qui est le résultat du croisement entre les deux races précitées ;
- les caprins avec la chèvre du Sahel ;
- les équidés composés de chevaux et d'ânes sont aussi présents dans la zone.

L'élevage des chameaux dont la majorité venait de la Mauritanie est perturbé par les malheureux évènements sénégal-mauritaniens d'avril 1989²⁶.

En outre, le *décret n° 80-320* du 11 mars 1986 régleme l'élevage, l'introduction, la transhumance et l'utilisation des camélidés au Sénégal, et vise la protection des écosystèmes fragiles du bassin versant du Ferlo et du bassin arachidier contre l'invasion des transhumants maures propriétaires de camélidés. Les dispositions du décret précisent que l'élevage, la détention et l'utilisation de camélidés ne sont autorisés que dans la partie du territoire située au nord de la route Potou-Louga, Dahra-Linguère-Ranérou-Ourossogui-Matam, comprenant en totalité les départements de Louga, Linguère, Ranérou et Matam (correspondant presque à l'étendu de la zone sylvo-pastorale). L'application de ce décret pose énormément de problèmes car même si l'ampleur des mouvements a diminué à cause des incidents de 1989, on observe toujours des transhumants maures au-delà de cette limite.

L'activité pastorale assure une identité sociale, culturelle et économique. Le bétail joue en milieu peul un rôle prépondérant sur le plan économique et social. La fonction économique fait de l'animal une richesse matérielle, un capital et un moyen de production qui a ses caractéristiques physiques et économiques propres, qu'il faut acquérir et entretenir, et dans lequel s'incorpore un travail. Sa valeur d'usage en fait un bien de consommation permettant de satisfaire de multiples besoins : lait et multiples dérivés (caillé, beurre, fromage, etc.), viande (mais en des circonstances précises), peau (fondement de tout un artisanat), fumier (engrais et cuisine), cornes (Ba, 1986).

²⁶ Un incident mineur entre éleveur mauritanien et paysan sénégalais avait dégénéré en 1989 en un conflit entre la Mauritanie et le Sénégal. Dans la foulée des événements, des milliers de Négros-Mauritaniens étaient reconduits vers l'autre rive, tandis que des ressortissants mauritaniens ont été rapatriés vers leurs pays d'origine.

Les bases sociologiques de la société Peul sont tournées, d'une façon ou d'une autre, vers le bétail. Le troupeau est un moyen de «reproduction sociale» dans la mesure où il fournit la monnaie d'échange dans les relations matrimoniales et amicales et entre pour une large part dans les cérémonies familiales, religieuses et politiques (Sall, 1995).

Les relations multi-natures entre le bétail et le berger Peul sont intrinsèquement liées depuis la nuit des temps. Il est, en effet, difficile d'imaginer une vie normale du Peul «sans ses vaches» dans ce contexte précis de ruralité.

6.3.2. La problématique foncière de l'espace pastoral

Le décret n°64- 573 du 30 Juillet 1964 précisant les conditions d'application de la loi n°646 du 17 Juin 1964 relative au domaine national fixe dans les détails les règles d'occupation et d'appropriation du domaine national. Le pastoralisme n'est pas considéré comme une forme de mise en valeur, par conséquent, le foncier pastoral se rétrécit du fait de son affectation à des fins agricoles.

En milieu peul, l'espace pastoral, qui s'étend en général à perte de vue, a toujours été une condition *sine qua non* de l'existence. L'espace pastoral peul doit être caractérisé par les trois facteurs essentiels que sont : l'habitat, les pâturages et les points d'eau. Il existe bien évidemment une corrélation entre ces facteurs au niveau de l'organisation spatiale car l'habitat est souvent déterminé par des points d'eau et/ou par des pâturages et inversement.

L'habitat est constitué de campements dispersés par rapport à une certaine logique dans tout l'espace pastoral. La principale ressource naturelle du bétail, les pâturages restent quand même foncièrement dépendants d'une forte variabilité pluviométrique intra annuelle et interannuelle, d'une érosion hydrique et des feux de brousse assez fréquents dans la région. Ceci favorise une mobilité plus importante qui consomme le maximum d'espace pour les besoins du bétail. Les feux de brousse (**photo 1.8**) dévastent chaque année des milliers d'hectares même si les superficies brûlées connaissent chaque année une diminution. Selon la Direction des Eaux et Forêts, Chasse et Conservation des Sols (DEFCCS), les feux de brousse passent de 3100 000 hectares en 1975/1976, soit 15,7 % du territoire national à 167 861 hectares de terres brûlées en 2004/2005, soit 0,8 % du territoire avec quelques variations entre ces deux périodes. Il faut dire que depuis quelques années des moyens importants ont été mis en œuvre contre les feux surtout dans les domaines de la prévention ainsi que l'aptitude à réagir vite sans oublier la politique de responsabilisation des populations locales.



Photo 1. 8 : Les impacts des feux de brousse d'origine indéterminée sur le tapis herbacé sur l'axe Mbeuleukhé-Widou Thiengoly deux jours avant notre arrivée sur zone.
Clichés A. Sarr 02/2006

En somme, il faut reconnaître que les pâturages dans le bassin versant du Ferlo posent énormément de problèmes aux éleveurs peuls car la plupart disparaissent rapidement. Les travaux de Valenza J. et Diallo A. K., (1973) et DAT (1986) en disent davantage sur les caractères aléatoires et diversifiés des pâturages.

L'eau dans le bassin versant du Ferlo est aussi importante que les pâturages. Ces dernières années ont été marquées par de multiples projets d'hydraulique pastorale, des aménagements des mares et par la remise en eau de la zone de la basse vallée du Ferlo. Les points d'eau sont de nos jours bien répartis dans la région, ce qui réduit favorablement les mouvements de mobilité pastorale de grande envergure. Dans le Ferlo central, aux alentours du département de Linguère, nous avons pu visiter certaines mares, puits et forages (**tableau 1.4**) lors de notre dernier séjour dans la zone (novembre 2007). La possibilité d'y trouver assez d'eau au-delà de l'hivernage pour le bétail et pour les populations reste tributaire de l'intensité et de la durée des précipitations. En revanche, les puits et les forages assurent un approvisionnement en eau durant toute l'année.

Même si des choses restent à faire dans le cadre de la politique hydraulique, il faut reconnaître que des efforts très importants ont été mis en œuvre pour pallier la grande variabilité pluviométrique à laquelle le milieu est soumis et qui a longtemps déterminé la politique de gestion de l'espace.

Id.°	X-coord.	Y-coord.	Villages	Infrastructures
1	510811	1690976	Niaka	mare naturelle
2	500018	1694337	Moguere	mare aménagée
3	455276	1733784	Mboynane	lit sec de la basse vallée du Ferlo
4	485268	1702123	Peterki	mare aménagée
5	474720	1700800	Ouarkhohk	forage
6	472524	1701109	Tally	mare aménagée de Mbaye
7	489723	1700158	Ndiorni	mare aménagée
8	476705	1702218	Thilla	puits de campement
9	476540	1702340	Thilla	puits de Diane
10	469088	1698296	Ngaraff	puits
11	468350	1699538	Carriere	mare aménagée
12	471817	1701161	Mbaye tally	puits
13	470599	1704546	Tiebe coly	puits
14	477461	1707711	Diambal	puits
15	479363	1710245	Doundodji	forage
16	479825	1710614	Doundodji	puits
17	484033	1706203	Gayenne	puits
18	485029	1706550	Ballel cisse	puits
19	485455	1706587	Ballel cisse	forage
20	486215	1707042	Diangonjol	puits
21	488343	1700263	Medina diali	puits
22	486679	1700457	Mbadiene Guenene	puits
23	477249	1695174	Goree thiong	puits
24	477249	1692860	Goree waly	contre puits
25	474819	1700636	Ouarkhohk	puits
26	463847	1690409	Ndiakhaye	puits

Source : CSE, 2006.

Tableau 1. 4 : Liste des points d'eau visités

6.3.3. La mobilité pastorale au Ferlo

Il reste une pratique importante dans l'élevage extensif en milieu peul. La mobilité pastorale, qui ne sera pas détaillée dans cette étude, s'effectue sous différentes formes qui prennent différents trajets ou schémas selon diverses causes. Les précipitations influencent directement le phénomène de la mobilité pastorale par le remplissage des mares. La disponibilité en eau «gratuite» des mares dès les premières pluies reste l'élément déclencheur. Les mares jouent un rôle essentiel dans la détermination et la structuration des axes de transhumance, mais aussi des lieux de stationnement (Sy O., 2009).

Le domaine sylvo-pastoral en général et le bassin versant du Ferlo en particulier offrent beaucoup d'atouts physiques et humains. Ces atouts physiques (topographie plane, espace pastoral vaste, etc...) et humains (populations-pasteurs) décrits dans le chapitre 1 doublés d'un ensemble de politiques d'aménagement de l'espace pastoral et agricole permettent aujourd'hui à toute cette zone du nord du Sénégal de jouer un rôle essentiel dans l'économie du pays.

Cependant, l'évolution de ce milieu est sans cesse fragilisée par une variabilité climatique marquée par une forte irrégularité de la pluviométrie aux échelles interannuelle et intra annuelle. Tandis que les causes de cette variabilité climatique continuent d'être étudiées par les climatologues, nous allons camper les éléments de la circulation atmosphérique Ouest africaine (chapitre 2), qui fait partie de la circulation atmosphérique générale, avant de passer à l'analyse de l'évolution récente du climat (chapitre 4).

CHAPITRE 2 : LES TRAITS GÉNÉRAUX DE LA CIRCULATION MOYENNE TROPICALE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET DANS LE BASSIN VERSANT DU FERLO : CONSÉQUENCES SUR LES PRÉCIPITATIONS

La présentation de la structure aérologique de l'espace tropical permet de déterminer l'organisation des différents flux tropicaux de surface et de basses couches, ceux des couches moyennes et supérieures et les principales inversions et discontinuités qui interviennent dans la production du temps (notamment la pluviogenèse) et caractérisent les conditions climatiques du domaine d'étude. L'analyse des mécanismes généraux de la circulation tropicale est abordée selon l'approche de Marcel Leroux reposant sur la théorie des anticyclones mobiles polaires (ou AMP, M. Leroux, 1983, 1986a, 1992). Il n'est pas question ici d'en faire un exposé exhaustif (les écrits sur le sujet sont nombreux et connus), mais d'en extraire les éléments essentiels nécessaires à la compréhension des facteurs qui conditionnent les conditions climatiques du Ferlo.

1. LES MÉCANISMES GÉNÉRAUX DE LA CIRCULATION TROPICALE

1.1. Introduction : les échanges méridiens, cadre général

Les mécanismes généraux de la circulation tropicale font partie intégrante de la circulation atmosphérique générale d'échelle planétaire. Ainsi, il n'existe pas de rupture entre la circulation générale des régions tempérées et celle des régions tropicales. Les mécanismes de la circulation générale sont fortement déterminés par le rayonnement solaire et le transfert d'énergie vers la terre, qui en dépend. Ce transfert est rendu inégal selon les régions, en raison de leur localisation sur la planète et des conditions géographiques qui les caractérisent. En raison essentiellement de la forme de la planète on peut distinguer des régions avec un bilan radiatif moyen constamment négatif (les pôles) et des régions avec un bilan radiatif moyen constamment positif, les régions tropicales.

On trouve encore deux pôles froids et une région chaude qui sont à l'origine des échanges méridiens (d'énergie, d'air, de chaleur) entre les pôles et l'équateur selon deux schémas de circulation répartis dans chaque hémisphère météorologique et globalement symétrique.

L'équateur météorologique (ou EM), l'appellation utilisée par Leroux M., (1992), ou selon d'autres auteurs le Front Intertropicale de Convergence (FIT) inscrit dans la zone intertropicale de convergence (ZIC), constituent l'axe de symétrie de la circulation générale. Il n'y a pas de rupture dans la circulation troposphérique : elle s'effectue dans chaque hémisphère météorologique sans interruption, mais avec des modalités variables (Leroux M., 1983). Ces échanges se traduisent par des mouvements perpétuels matérialisés dans le déplacement de masses d'air froid des régions polaires vers les basses latitudes «à travers les moyennes latitudes», et de flux d'air chaud des régions tropicales vers les hautes latitudes. Les moyennes latitudes constituent, ainsi, un lieu de rencontre et d'affrontement privilégié entre les masses d'air issues des pôles et l'air provenant des tropiques.

Le moteur de ces échanges, selon M. Leroux (*op cité*, 1983), se trouve dans les basses couches de l'atmosphère et réside dans les AMP.

1.2. Écoulement en masse de l'air froid des hautes et moyennes latitudes vers les basses latitudes et constitution des Agglutinations Anticycloniques

Dans les basses couches, la circulation polaire et tempérée est commandée par des anticyclones mobiles polaires (AMP) qui exportent le froid et provoquent en retour un mouvement compensatoire d'air chaud (en valeur relative ou absolue) vers les hautes latitudes (Leroux M., *op cité*). Les anticyclones mobiles polaires sont décrits comme de puissantes masses d'air froid, provenant des pôles suite à un renforcement des hautes pressions polaires lié à un déficit énergétique considérable résultant du mouvement zénithal du soleil (**figure 2.1**). Leroux M., (1983) parle d'un refroidissement dû au déficit énergétique qui provoque un tassement d'air dans les régions polaires, et qui élève la pression et engendre la formation de «dômes anticycloniques» momentanés. La non permanence de ces dômes, aussi bien à l'échelle synoptique qu'à l'échelle des moyennes (statistiques) et l'expulsion des AMP, s'expliquent par la divergence de l'air liée à la subsidence permanente qui accroît la pression et à l'effet de la force centrifuge associée à la rotation de la terre autour de son axe. D'une taille de l'ordre de 2000 à 3000 kilomètres de diamètre en moyenne et de forme lenticulaire avec une épaisseur de 1500 à 2000 mètres environ (**figure 2.1**), les AMP se forment de manière continue, soit tout au long de l'année, dans les régions de l'Antarctique et de l'Arctique.

Ces masses d'air froid quittent les hautes pressions polaires en direction des basses pressions intertropicales, et alimentent la circulation tropicale. En raison de leur puissance, les AMP pénètrent profondément dans la zone tropicale, notamment pendant la période hivernale, parfois jusqu'à l'équateur météorologique. Ainsi, l'air qu'ils transportent, alimente la circulation tropicale et conditionne le dynamisme des alizés et de la mousson. Le concept AMP décrit en lui-même ses principales caractéristiques que Sagna P., (2005) résume ainsi : *c'est ainsi que des pôles partent des masses d'air froid qui se dirigent vers les moyennes latitudes. Elles ont donc une origine polaire (P). Leur déplacement leur confère leur caractère mobile (M). Ces masses d'air, froid dans l'absolu au départ et relativement homogènes, ont, par rapport à l'air chaud, un caractère anticyclonique (A).* D'ailleurs, très visibles sur les cartes synoptiques (**figure 2.1**), leurs pressions restent toujours supérieures à 1015 hPa.

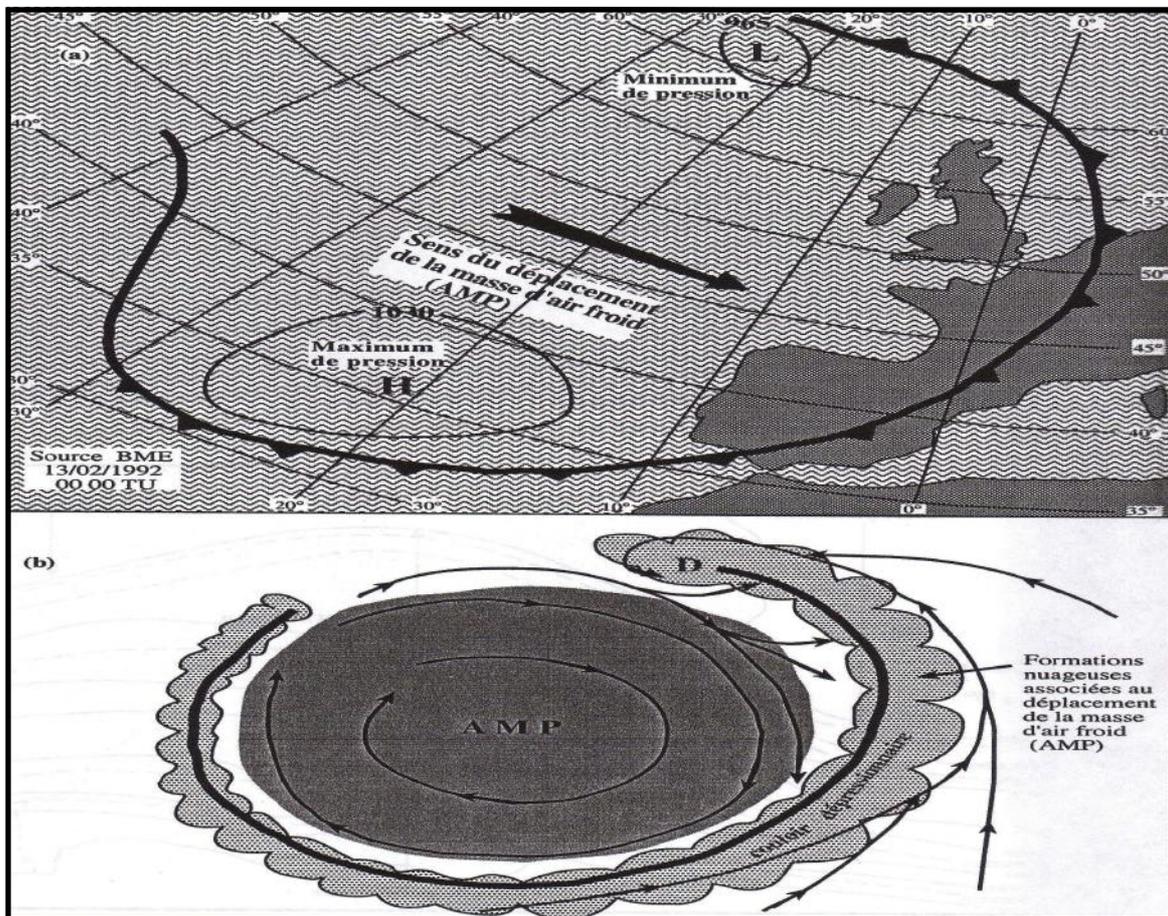


Figure 2. 1 : Identification d'une masse d'air froid (AMP) à partir d'un BME²⁷ (a) et analyse de la circulation et des formations nuageuses associées (b), Leroux (1996) Sagna (2005)

²⁷ Bulletin Météorologique Européen

On rappellera, sans le développer au regard de notre sujet, que les anticyclones mobiles polaires, vastes lentilles d'air dense, sont les principaux responsables dans les hautes et moyennes latitudes des variations de pression, de direction et de vitesse du vent, de température, d'humidité, de nébulosité et de pluviosité, et donc de la variation perpétuelle du temps, comme de la variabilité du climat, à toutes les échelles de durée (Leroux M., 1983, 1986, 1993a). Ces variations influencent directement la circulation tropicale grâce notamment à la formation des Agglutinations Anticycloniques (Leroux. M, 1996 et Comby. J., 1996), *véritables zones-tampons, entre la circulation tropicale et la circulation tempérée* (Leroux M., 2000), formées et alimentées perpétuellement par les AMP.

Les agglutinations anticycloniques (ou AA) naissent des interférences rencontrées par les AMP au cours de leur déplacement dans les régions tempérées. L'origine de ces interférences diverses est principalement associée aux conditions géographiques dont en particulier les obstacles formés par les reliefs. Les agglutinations anticycloniques sont en effet une des conséquences majeures de l'emboîtement et de la fusion entre les cellules anticycloniques mobiles dont la vitesse de déplacement varie en fonction de leur caractéristique propre et des ralentissements, voire de l'arrêt ponctuel de leur déplacement lors de la rencontre d'un obstacle orographique (chaîne de montagne) ou aérologique, (autres masses d'air), (Leroux M., 1996 ; Comby J., 1992 et 1996 ; Nouaceur Z., 1999). *«Lorsque les AMP sont freinés ou temporairement bloqués dans leurs translations, la succession quasi ininterrompue des éjections aux pôles conduit à une agglutination des cellules dans les secteurs de ralentissement et, ainsi, à la formation de vastes systèmes anticycloniques pelliculaires qui peuvent s'étendre indifféremment sur des surfaces océaniques ou continentales»* (Leroux M., 1996 ; Comby J., 1998). Lorsque les conditions nécessaires à leur formation sont permanentes les régions qu'elles occupent sont statistiquement (soit de manière quasi-permanente) constamment anticycloniques. C'est le cas pour les différentes cellules océaniques de basses couches connues sous les noms d'anticyclone des Açores, d'anticyclone de Sainte-Hélène, d'anticyclone des Mascareignes, d'anticyclone des îles Hawaï et d'anticyclone de l'île de Pâques (Leroux M., *op cité*). Leur origine est associée pour l'essentiel aux barrières orographiques qui contraignent leur déplacement et à la présence d'un substrat océanique caractérisé par de faibles variations thermiques saisonnières favorisant la stabilité anticyclonique. Ce sont ces AA et leurs alimentations dépendantes de la fréquence des AMP et de leur puissance, qui entretiennent la vie des alizés en zone tropicale et forment *«la strate des basses couches des hautes pressions intertropicales»*.

Dans le domaine climatique qui nous intéresse, le principal centre d'action anticyclonique de l'hémisphère Nord est l'agglutination anticyclonique des Açores. Son origine est associée à la présence de la barrière orographique constituée par les Atlas marocains et Tellien, les cantabriques, les Pyrénées et l'arc alpin et dans une moindre mesure la *meseta* ibérique et le Massif Central. Cette barrière n'est pas totalement hermétique avec le détroit de Gibraltar, les percées intra-montagneuses canalisant les flux de nord (cerzio, tramontane, mistral, bora, etc.) et la courbure des Alpes du nord qui permet l'évacuation de l'air anticyclonique en direction de l'Europe orientale. Ce manque d'étanchéité explique que l'agglutination des Açores est, en moyenne, moins puissante que celle de l'île de Pâques ou de Hawaï. Cependant cette relative faiblesse orographique est pour partie compensée par la convergence des trajectoires atlantiques ou scandinaves des AMP qui quittent le pôle et dont la direction empruntée vers l'Europe de l'ouest est scindée en deux trajectoires par le Groenland (Comby J., 1998). Dans l'hémisphère Sud, on trouve l'agglutination anticyclonique de Sainte-Hélène née de l'impact du relief sud-africain (Grand escarpement) sur la circulation des masses d'air froid. Cette agglutination et son alimentation ont une forte influence sur le flux de mousson qui circule en été sur le Ferlo.

1.3. Dynamique de la circulation des flux sur l'ouest africain

La région tropicale de l'Afrique de l'Ouest, dans laquelle s'intègre notre territoire d'étude (bassin versant du Ferlo), est délimitée précisément dans les basses et moyennes couches par des centres d'action. Il s'agit des hautes pressions tropicales (ou HPT) de l'hémisphère météorologique Nord celles de l'hémisphère météorologique Sud. Ces deux ceintures des hautes pressions se rejoignent en altitude et forment ainsi le sommet des hautes pressions tropicales, le tout encadrant les basses pressions intertropicales (Sagna P., 2005). Les H.P.T. s'organisent selon une structure permanente en «V renversé» (Leroux M., 1983). La zone tropicale est donc encadrée par les agglutinations anticycloniques²⁸ nord et sud, entre lesquelles s'étire le couloir dépressionnaire zonal des basses pressions intertropicales (BPIT), occupé par l'équateur météorologique (EM), axe de symétrie de la circulation générale vers lequel se réalise la confluence des transports effectués par les AMP boréaux et austraux (Leroux M., 2000).

Les hautes pressions tropicales sont formées par l'air subsident issu des jets d'ouest des couches supérieures (Leroux M., 1983). En surface, elles s'individualisent en AA, qui elles-

²⁸ Les Agglutinations Anticycloniques se forment dans les régions des Açores, de Sainte-Hélène, toute l'année sur le nord de l'Afrique entre l'Algérie et la Libye de manière plus saisonnière (cellule saharo-libyenne).

mêmes alimentent les flux matérialisés en Afrique de l'Ouest sous forme d'alizés et de mousson. La distinction fondamentale entre ces deux flux concerne leurs trajectoires : l'un, l'alizé, est à dominante Est et ne traverse pas l'équateur géographique, l'autre, la mousson, qui franchit par contre l'équateur géographique est à forte composante Ouest (Leroux M., 1983).

Les basses pressions intertropicales constituent l'espace compris entre les cellules des HPT c'est-à-dire, d'après l'expression de Leroux M., (1983), l'espace coiffé par le «V renversé». Les BPI n'intéressent donc que les basses et moyennes couches au-delà desquelles elles sont surmontées par l'air anticyclonique qu'elles contribuent, à des degrés divers, à engendrer. L'ensemble de cette structure migre en fonction des saisons qui conditionnent l'intensité de la circulation méridienne dans chaque hémisphère. En hiver, les régions polaires de l'hémisphère Nord, considérablement refroidies, accusent un déficit énergétique créant selon l'expression de Leroux M., (1983), de «*puissantes coulées d'air froid*» dirigées vers le sud. Dans le même temps, l'hémisphère sud, en situation d'été, connaît une circulation moins dynamique liée à des AMP moins puissants. Le dynamisme accru de la circulation de l'hémisphère Nord entraîne ainsi une migration vers le Sud de l'ensemble de la structure et donc des HPT. En été boréal, le schéma s'inverse. La situation en été s'oppose donc dans ses grandes lignes à celle de l'hiver. Selon Leroux M., (1983), la terre étant alors en position d'aphélie (4 juillet), l'hiver austral est plus rigoureux que l'hiver boréal qui correspond à la situation de périhélie (3 janvier). Ainsi, des masses d'air froid des régions polaires sud, plus puissantes, décalent vers le Nord l'ensemble des centres d'action (HPT) et des discontinuités (équateur météorologique dans ses différentes formes, voire paragraphe 3)

Ainsi la circulation tropicale au dessus de notre zone d'étude connaît des variations saisonnières. Ces modifications dans la circulation des flux et les migrations de la structure verticale au dessus de la région contribuent à mettre en opposition deux situations ; celle de janvier (hiver boréal, été austral) sous l'influence des alizés et celle de juillet (hiver austral, été boréal) marquée par l'influence de la mousson (**figures 2.2, 2.3**).

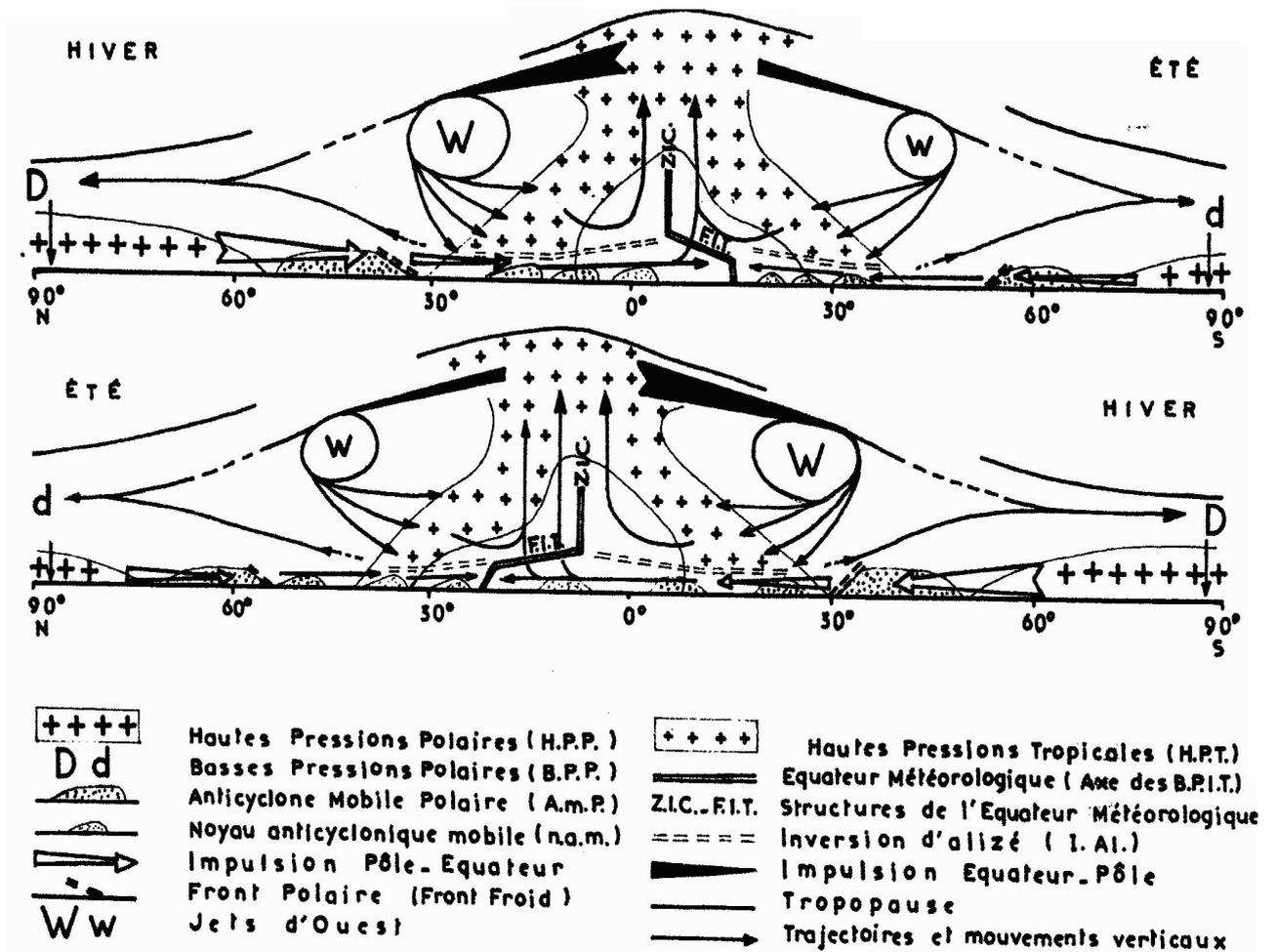


Figure 2. 2 : Structure verticale moyenne de la troposphère tropicale, schémas saisonniers (Leroux, 1983) déterminant les positions moyennes des deux structures de l'équateur météorologique. La structure FIT porte maintenant le nom d'équateur météorologique incliné (EMI) et la zone intertropicale de convergence celui d'équateur météorologique vertical (EMV) (Leroux M., 1992).

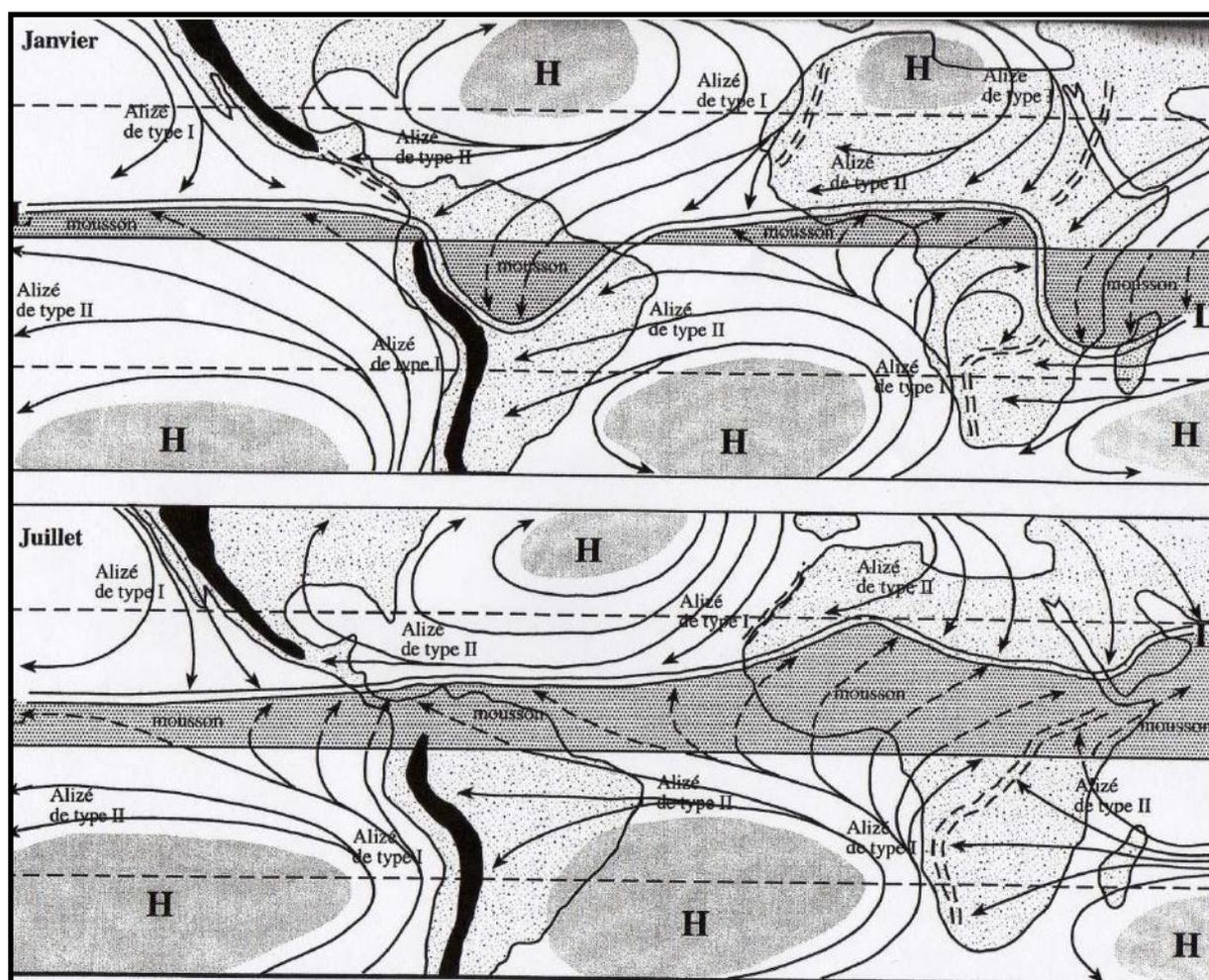


Figure 2. 3 : Champ de vent moyen en surface en janvier et en juillet sur l'espace atlantique (adapté de Leroux M., par Sagna P., 2005)

2. LES FLUX DE LA CIRCULATION TROPICALE

Comme précédemment indiqué, on recense dans la zone tropicale deux types de circulation de flux.

2.1. Les circulations d'alizé

L'alizé est un flux issu d'une cellule de hautes pressions qui peut être constituée par un AMP ou par une agglutination anticyclonique. Sur les océans la circulation d'alizé est organisée en unité bien individualisée qui ne concerne que les basses couches, entièrement comprise dans le même hémisphère géographique (Leroux M., 2000). D'autres appellations comme «*trade-winds*» ou «*esterlies*» sont aussi utilisées pour le désigner. La structure verticale de l'alizé est souvent stratifiée et se caractérise par une inversion thermique due à la superposition d'une

couche d'air d'origine polaire dans les basses couches et d'une couche d'air chaud qui la surmonte. L'importance de l'inversion est fonction du réchauffement de l'air polaire dans les basses couches, de la qualité des flux qui le surmonte et de la puissance de la subsidence qui déterminent la stabilité ou l'instabilité du flux. Ses caractéristiques aérologiques et dynamiques dépendent de la proximité des centres émetteurs que sont les agglutinations anticycloniques ou les AMP, de l'importance des échanges méridiens qui contribuent à l'accélération, mais également des saisons qui les conditionnent. La vitesse des alizés est généralement plus rapide en hiver qu'en été dans le domaine d'étude, en raison de la plus forte puissance et fréquence des AMP.

A l'échelle moyenne, on observe autant d'alizés que d'agglutinations anticycloniques permanentes ou saisonnières, circulations séparées (en surface) par des discontinuités d'alizés (D.al). Ces discontinuités d'alizés sont souvent confondues avec des reliefs, notamment lorsque les reliefs sont méridiens comme les Rocheuses, les Andes, ou les reliefs de l'Afrique orientale (Leroux M., 1996). Sur l'Afrique de l'Ouest, la discontinuité d'alizés bloquée sur une courte distance par l'Atlas devient ensuite libre de fluctuer à proximité du littoral, ou occasionnellement de s'enfoncer plus avant sur le continent (Leroux M., 2000), en fonction de la puissance respective des alizés qui en entrant en contact lui donne naissance (alizés maritime et continental).

Les conditions dynamiques des circulations des flux changent suivant leur parcours. Dans les basses couches sur l'océan (alizé maritime), on distingue l'alizé maritime de type I de faible épaisseur et relativement frais et stable, sur la façade est de l'agglutination (Leroux M., (1974) (**figure 2.3**), et l'alizé maritime de type II, plus épais et plus instable en raison de son réchauffement par tropicalisation et de son humidification au cours de son parcours océanique vers les Antilles. Il s'écoule sur la façade méridionale et occidentale de l'agglutination. L'alizé de type I est pour partie à l'origine des déserts côtiers tropicaux. Par contre, le long parcours océanique de l'alizé de type II qui lui permet de s'enrichir en vapeur d'eau, fait de lui un élément favorable à des précipitations relativement importantes sur les façades orientales des continents, (**figure 2.3**). A l'intérieur des terres, on trouve les alizés continentaux, plus épais et instables, chauds et peu humides en raison de leur parcours continental.

En Afrique de l'Ouest et particulièrement au Sénégal (**figure 2.4**), on distingue deux types d'alizés essentiels qui peuvent survoler le continent.

1. L'alizé maritime de type I issu de la face orientale de la cellule des Açores qui devient un alizé maritime continentalisé d'origine maritime dont le parcours sur le continent a fini par altérer les caractéristiques originelles (réchauffement et diminution de l'humidité relative du flux).

2. L'alizé continental dont la trajectoire emprunte une bonne partie du continent africain désertique de l'hémisphère Nord. Il est issu des AMP qui circulent sur la Méditerranée et de l'agglutination saharo-méditerranéenne. L'air polaire pénètre sur l'Afrique à l'Est de l'espace téllien (obstacle orographique) par la Tunisie et la Libye, puis traverse sous forme de flux le Sahara en direction des côtes atlantiques. Il est connu sous le nom de «Harmattan».

2.1.1. L'alizé maritime au Sénégal

De direction nord à nord-ouest, l'alizé maritime est un flux issu de l'agglutination anticyclonique des Açores (**figure 2.4B**). Il est le plus prégnant dans la région compte tenu de l'extension des surfaces maritimes et de la permanence des agglutinations anticycloniques océaniques car il couvre toute la côte de l'Afrique septentrionale, depuis le sud marocain jusqu'au delà de Dakar en janvier, tout en englobant l'archipel du Cap-Vert. Il est généralement humide, frais et marqué par une faible amplitude diurne. L'alizé souffle sur les régions littorales, mais lorsqu'il pénètre sur le continent, il perd une grande partie de ses caractéristiques originelles. Il devient alors un flux sec de direction nord à nord-est évoluant ainsi d'un alizé maritime à un alizé maritime continentalisé, d'origine océanique et de trajectoire continentale.

2.1.2. L'alizé continental ou Harmattan

L'alizé continental correspond le plus souvent à la branche méridionale des flux de l'agglutination anticyclonique «saharo-méditerranéenne». Son parcours sur la partie la plus sèche et chaude de l'Afrique septentrionale modifie ses caractères d'origine (air polaire). En se tropicalisant il acquiert très rapidement de nouveaux caractères liés en grande partie à la nature du substratum parcouru. Ainsi, il devient instable et l'inversion est repoussée en altitude. Il est marqué par une amplitude thermique diurne en forte croissance, un déficit de saturation en augmentation et une faible subsidence. Sa tropicalisation réduit fortement la possibilité de

précipitations (**figure 2.4A**). De direction nord-est à est, l'alizé continental provoque sur son passage de fortes valeurs de l'évaporation.

2.2. Le flux de mousson

La mousson est un flux d'alizé qui s'intègre dans la circulation d'un autre hémisphère géographique après avoir quitté son hémisphère d'origine. Leroux M., (1983) parle de la confusion qui existe autour du terme de mousson selon son utilisation au singulier ou au pluriel. A titre d'exemple, le terme est souvent utilisé pour désigner une saison : il traduit ainsi son origine étymologique puisque le vocable arabe «*mausim*» signifie effectivement saison ; une masse d'air «qui apporte la pluie», tel est son sens en Inde, et en Afrique, où l'on parle des «pluies de mousson», processus de transfert de l'humidité océanique en direction du continent. Selon Leroux, sa qualification est avant tout liée à son origine mécanique, soit un changement d'hémisphère géographique se traduisant par un changement de direction qui lui confère le nom de Mousson.

La mousson en Afrique de l'Ouest trouve son origine dans une forte déclivité transéquatoriale de pression opposant la cellule des hautes pressions de Sainte-Hélène à la dépression saharienne estivale de basse couche.

La mousson s'inscrit dans un mouvement transéquatorial des alizés de l'hémisphère Sud. Sur toute l'Afrique de l'Ouest, ce transfert est régi par une translation d'ensemble de l'équateur météorologique vers le nord, impulsée par l'attraction des dépressions thermiques sahariennes, et par une plus grande puissance des noyaux anticycloniques de l'hémisphère sud issus de l'agglutination de Sainte-Hélène, en hiver austral.

A partir du mois de mars, la migration d'ensemble du système équatorial ou intertropical, mais aussi des flux alizéens issus de l'hémisphère Sud s'amorce. Dans leur progression vers l'hémisphère Nord, les alizés du sud qui traversent l'équateur géographique subissent une inversion sous l'effet de la force de Coriolis. Les flux d'alizés acquièrent alors une nouvelle trajectoire sud-ouest / nord-est qui matérialise le flux de mousson et permet le transfert de l'humidité océanique vers le continent. La mousson est le principal apport en précipitations en Afrique de l'Ouest, et elle reste très active dans sa couverture de juin à octobre sur le nord du Sénégal et particulièrement sur le domaine d'étude (**figure 2.4C**). En se réchauffant et en se desséchant en fin de parcours, la mousson est moins apte à provoquer des pluies à partir d'octobre.

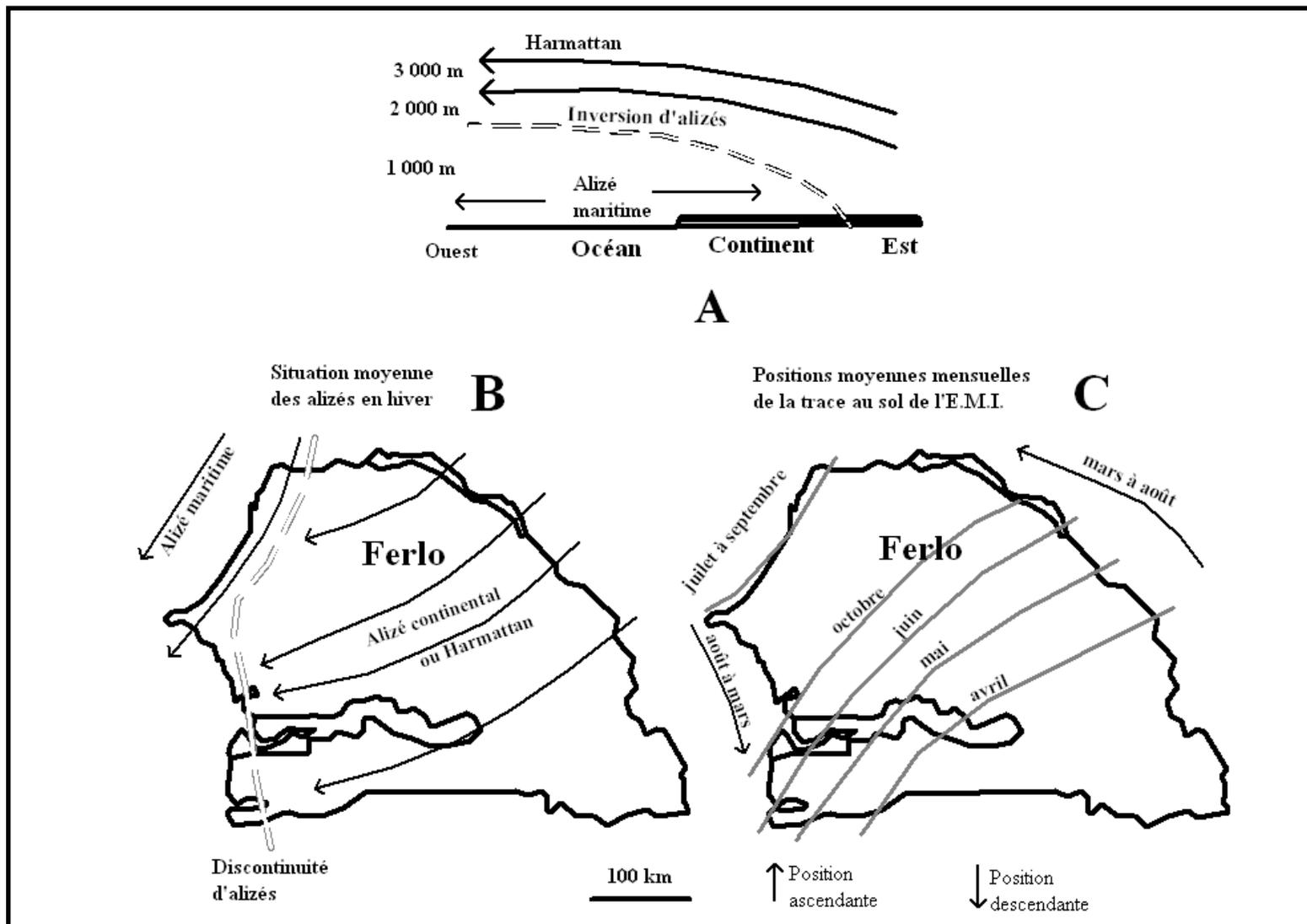


Figure 2. 4 : Les flux et discontinuités au Sénégal selon Leroux M., (1980)

3. LES DISCONTINUITÉS SUR L'AFRIQUE DE L'OUEST

La **figure 2.5** (Leroux M., 1983, 1992, 2005) fait apparaître les discontinuités présentes dans la structure verticale de la troposphère tropicale. En partant de la limite septentrionale du domaine tropical, on trouve l'axe des Hautes Pressions Tropicales, la Discontinuité d'alizés qui se prolonge en altitude par l'Inversion d'alizé et l'équateur météorologique (Leroux M., 1983). Parmi ces principales discontinuités, l'équateur météorologique, que nous allons étudier, est la discontinuité la plus importante dans la circulation tropicale puisqu'elle conditionne dans une large mesure les précipitations.

3.1. L'Équateur Météorologique (EM)

La rencontre des flux d'alizé et de mousson se traduit par la formation de discontinuités. Elles représentent une rupture de la circulation méridienne (Leroux M., 1983 ; Sagna P., 1988) qui se matérialise par l'équateur météorologique.

S'inscrivant dans l'axe des basses pressions intertropicales, c'est-à-dire la ligne qui relie tous les *minima* de la chaîne dépressionnaire intertropicale qui entoure la terre, l'équateur météorologique limite la circulation soit des alizés soit d'un alizé et d'une mousson.

L'équateur météorologique est vertical dans les couches moyennes, il représente une structure «planétaire». «*Il est le prolongement au dessus des continents de la structure océanique*» (Leroux, M., *op. cité*). Cette structure se déplace lentement au cours de l'année dans une bande zonale d'amplitude réduite. Ainsi, sa position, sa migration annuelle et ses caractères sont presque totalement indépendants des conditions de surface (notamment thermiques), et sa dynamique relève de la circulation générale.

Dans les basses couches de la troposphère, la structure de l'EM n'est plus verticale mais inclinée. Elle surmonte une circulation de mousson peu épaisse. La migration annuelle de sa trace au sol est ici fortement conditionnée par les conditions de surface. Elle est en particulier très dépendante du comportement thermique du substratum. Ainsi, elle est ample et rapide lorsque le substratum est entièrement continental (c'est le cas dans notre domaine d'étude) ou bien «tronquée» et arrêtée par le comportement thermique d'un substratum de type océanique, forêt et/ou océan.

En Afrique, selon l'altitude, l'équateur météorologique possède donc deux structures (équateur météorologique vertical et équateur météorologique incliné) du fait de l'impact thermique du substratum dans les basses couches. L'EMI est aussi connu sous le nom de front intertropical ou FIT. L'EMV est désigné également sous l'appellation de zone intertropicale de convergence (ZIC), même si selon Leroux M., (*op cité*) elle est souvent aussi attribuée indifféremment aux deux structures de l'EM. Pour Sagna P., (2005) la notion de F.I.T. n'est donc rien d'autre qu'une partie de l'Equateur Météorologique. Il est défini sur la base d'études régionales et s'applique uniquement à l'Afrique Occidentale et Centrale. Pour éviter les restrictions, notamment spatiales, liées à l'utilisation de la notion de F.I.T. et les confusions avec les termes de «front de mousson», «front d'alizé», «front équatorial», «front austral». Nous ne retiendrons ici que la notion d'équateur météorologique qui relève de l'échelle planétaire.

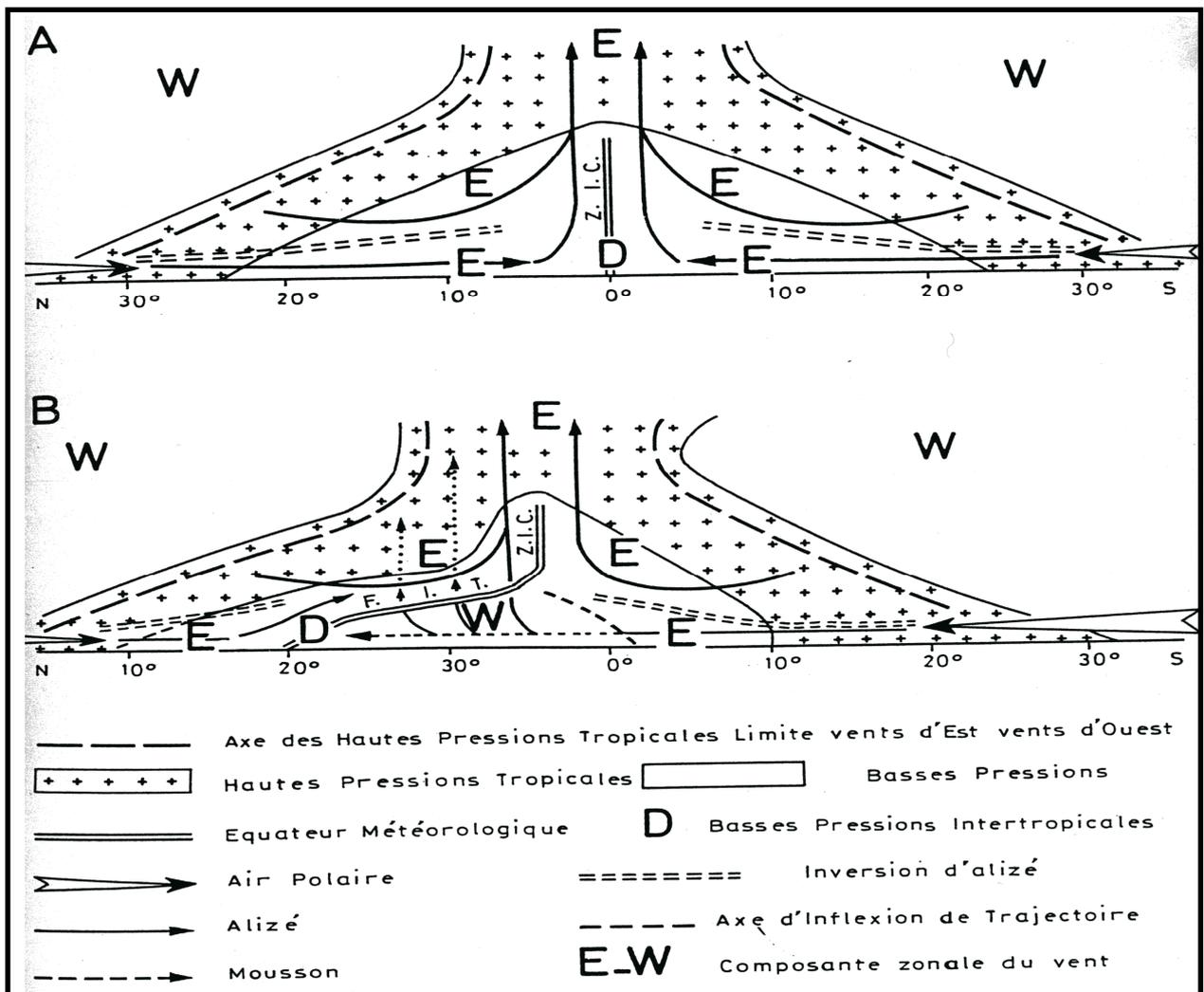


Figure 2. 5 : Coupe de la troposphère sur l'Afrique de l'Ouest en août le long du Méridien 0° (d'après Sagna, 1988 adaptée de Leroux, 1970, 1972, 1973)

3.1.1. La structure inclinée de l'Équateur Météorologique (EMI)

L'EMI (ref. **figure 2.2**) reste très sensible aux influences des conditions de surface qui déterminent la migration annuelle de sa trace au sol (**figure 2.6**). Il représente la limite septentrionale du contact entre les alizés boréaux et la mousson. La structure EMI est stérilisante et non favorable à la pluviogénèse en raison de l'alizé continental, l'Harmattan, qui surmonte la mousson. Le cisaillement des vents et les contrastes hygrométriques entre le flux d'est (Harmattan) chaud et sec et la mousson à composante ouest, chaude et humide, ne favorisent pas l'ascendance de l'air nécessaire à la manifestation de la saturation par refroidissement de l'air en altitude. En revanche, lorsqu'un facteur allogène pénètre dans la structure EMI, la stérilisation peut s'annihiler momentanément pour provoquer des pluies. Selon Leroux M., (1996), ces pluies trouvent leur origine dans des lignes de grains (**figure 2.7**), issues des pulsations de l'alizé. L'origine de ce facteur allogène est souvent attribuée aux noyaux de vents d'est, au J.E.A. (Jet d'Est Africain) ou au J.E.T. (Jet d'Est Tropical).

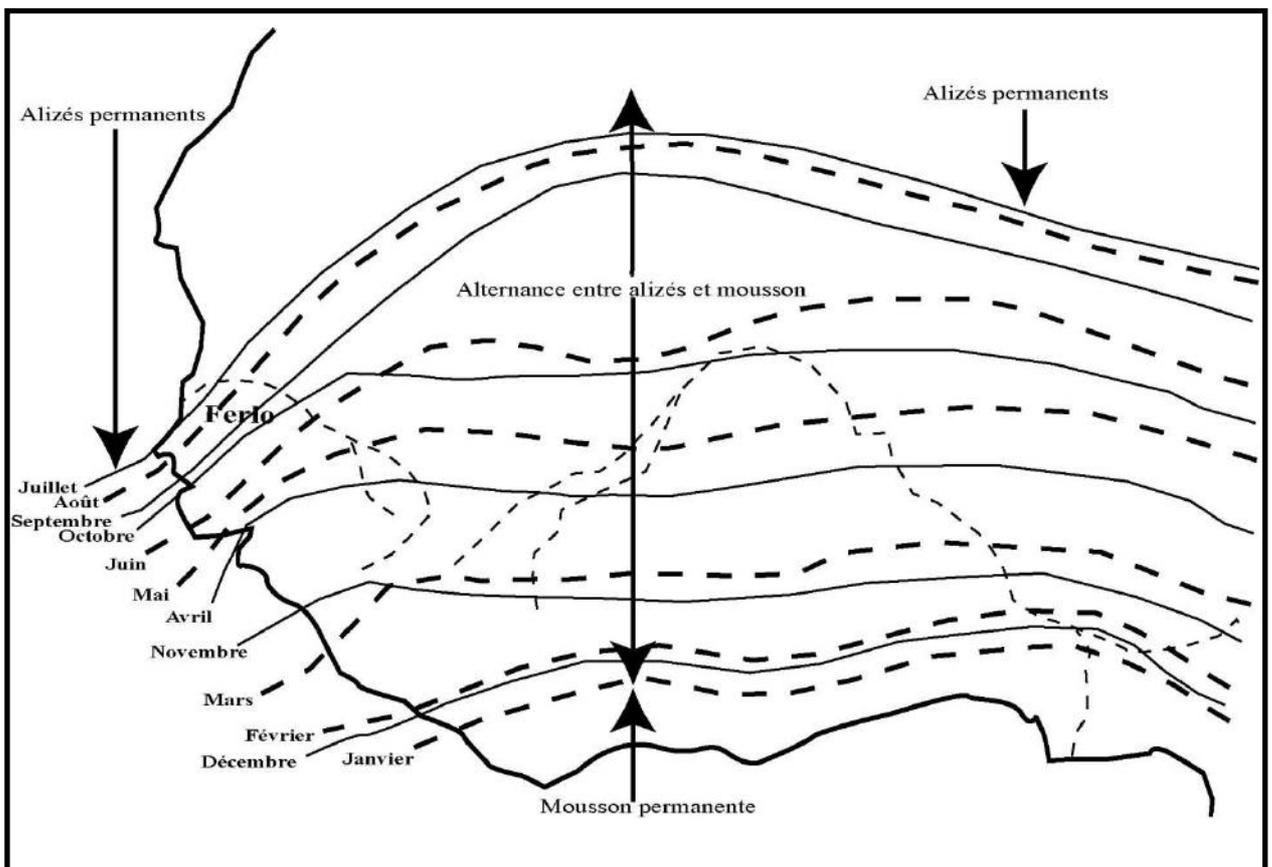


Figure 2. 6 : Migrations de l'Équateur Météorologique (marqué par les traits continus et discontinus) en surface en Afrique de l'ouest et sur la région du Ferlo (Leroux, M., 1983).

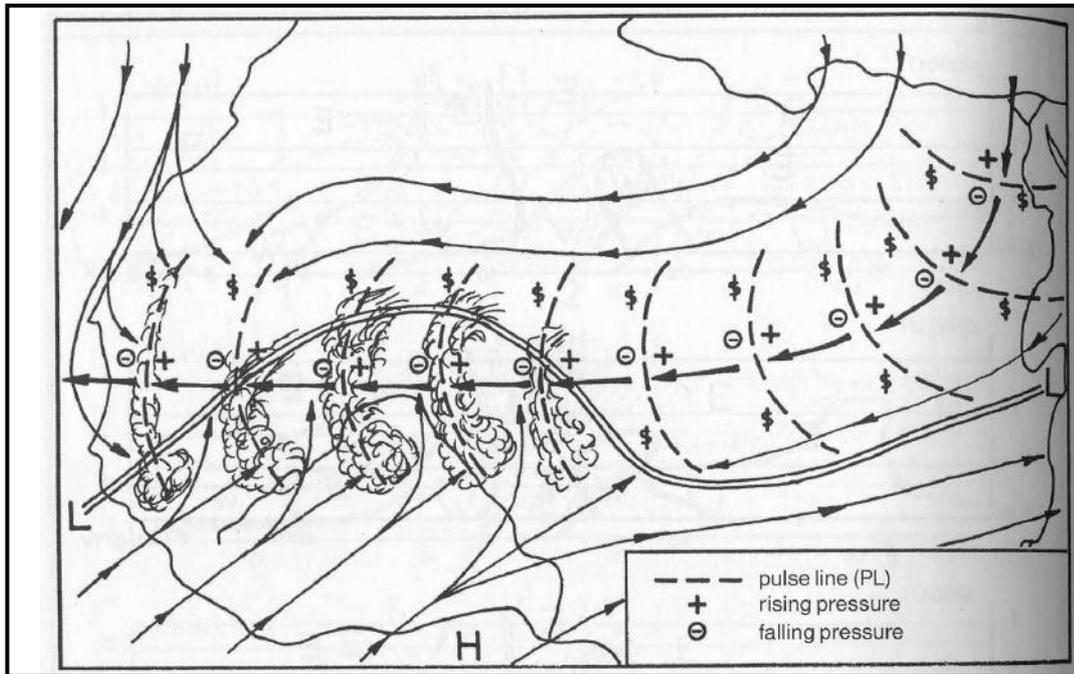


Figure 2. 7 : La migration d'une ligne de grains sur l'Afrique de l'Ouest durant l'été de l'hémisphère Nord et associée aux lithométéores (Leroux M., 2001)

3.1.2. La structure verticale de l'Équateur Météorologique

Sur le continent, substratum qui nous intéresse, l'équateur météorologique ne subsiste que dans les couches moyennes et représente l'axe de confluence entre la strate supérieure de l'alizé austral et l'alizé boréal. La structure de l'EMV se déplace lentement au cours de l'année dans une bande zonale d'amplitude réduite (5 à 10° nord et sud en moyenne). Sa position, sa migration annuelle, et ses caractères sont quasi-indépendants des conditions de surface, sa dynamique relevant de la circulation générale (Leroux, M., 1996). Au contraire de l'EMI, l'EMV est l'axe de formations nuageuses denses. Les pluies issues de cette structure sont généralement abondantes, de caractère continu, peu orageuses dans l'ensemble, mais avec des foyers d'activité plus intense.

Les conditions structurales de la troposphère au niveau de l'Afrique de l'Ouest sont ainsi intimement liées aux échanges méridiens. D'après Leroux M., (1996), ces conditions structurales se résument en trois facteurs que nous associons aux mécanismes de la troposphère tropicale :

- les agglutinations anticycloniques et les flux de surface qui en sont issus ;
- les discontinuités dont l'équateur météorologique est la plus importante avec sa double structure, EMI qui forme sa trace au sol et EMV dans les couches moyennes ;

- les noyaux des vents forts en altitude, représentés dans les couches moyennes par les Jets d'Est Africain nord, au-dessus de l'EMI, le Jet d'Est Africain sud qui surplombe l'inversion d'alizé, et le Jet d'Est Tropical, dans les couches supérieures en aplomb de l'EMV.

Il en résulte que l'analyse des mécanismes de la circulation générale troposphérique permet de comprendre et de caractériser le cadre aérologique tropical. La compréhension de ces phénomènes, surtout en basses couches, détermine les aptitudes pluviogènes de tout l'Ouest de l'Afrique.

4. LA PLUVIOGENÈSE DANS L'OUEST DE L'AFRIQUE

Les précipitations, dont l'importance climatique est primordiale, sont un paramètre très aléatoire dans le temps et dans l'espace. C'est l'élément climatique le mieux étudié dans la région tropicale depuis les premières mesures ainsi que les situations qui lui sont associées. La pluviogenèse exige en effet la réunion simultanée de trois conditions impératives qui sont (Leroux M., 2000) :

- l'existence d'un potentiel précipitable, et de son renouvellement rapide,
- le déclenchement d'un mouvement vertical ascendant,
- la présence d'une structure aérologique qui n'interdit pas les ascendances.

Ainsi, les précipitations en Afrique de l'Ouest en général, et au Sénégal en particulier, se répartissent selon les variations saisonnières, entre la saison non pluvieuse (ou saison sèche) et la saison pluvieuse (ou hivernage).

4.1. La saison sèche

Au Sénégal, la saison sèche correspond à l'hiver boréal. Le renforcement des agglutinations anticycloniques et des hautes pressions tropicales de l'hémisphère Nord est à l'origine d'une migration plus sensible des anticyclones mobiles polaires vers le sud. Plus les anticyclones mobiles polaires deviennent puissants et étendus sur l'Atlantique Nord, plus ils alimentent (de façon régulière) les AA des Açores et saharo-libyenne qui engendrent une forte circulation d'alizés sur l'Afrique de l'Ouest. Sur la frange littorale, prédominent l'alizé maritime et l'alizé maritime continentalisé. Plus à l'est, une discontinuité d'alizé est matérialisée par la rencontre de l'alizé maritime et/ou alizé maritime continentalisé avec l'Harmattan qui vient surmonter la strate inférieure de l'alizé. L'Harmattan plus chaud et instable passe au dessus de

l'alizé maritime constituant ainsi une structure verticale en deux strates marquées par une inversion d'alizé, très stérilisante (cisaillement et assèchement en raison des qualités de l'Harmattan). Toute velléité de développement nuageux est pratiquement annihilée, car seule la strate inférieure de l'alizé maritime est humide et l'ascendance est rendue impossible. Cette humidité est déposée sous forme de rosée (Dione, 1996) et se matérialise aussi par des brouillards nocturnes.

Les précipitations dans le Ferlo en cette saison sont donc rendues très difficiles. La puissance des anticyclones de l'hémisphère nord et des agglutinations qui en découlent réduisent sur le continent la déclivité transéquatoriale de pression entre les deux hémisphères (l'anticyclone de Sainte-Hélène est parallèlement moins puissant en été austral) (**figure 2.8**). La trace au sol de l'EM est repoussée vers le sud et le flux de mousson ne peut pas atteindre le Sahel. Ainsi le Ferlo, en fonction de la discontinuité d'alizés de l'Ouest africain (rencontre entre l'alizé continental Harmattan et l'alizé d'origine maritime) est soit sous l'influence directe de l'Harmattan, chaud et sec et peu favorable au développement des pluies, soit sous l'influence de l'alizé maritime mais avec une structure verticale stratifiée (Harmattan surmontant l'alizé d'origine maritime), très stérilisante (**figure 2.8**).

Au cours de cette saison non pluvieuse, le domaine d'étude peut néanmoins enregistrer des phénomènes pluvieux, moins importants qu'en hivernage ; les précipitations se produisent souvent de décembre à février. Selon Sagna P., (2005), la fin de la saison sèche intervient en mars-avril sur les stations méridionales du Sénégal.

4.2. La saison des pluies

La saison pluvieuse ou hivernage correspond à l'été boréal et à l'hiver austral. L'agglutination anticyclonique de Sainte-Hélène est renforcée par des anticyclones mobiles polaires plus puissants, issus de l'Antarctique, et migre vers le nord. Ainsi, l'AA de Sainte-Hélène, devenue elle aussi plus puissante, la dépression saharienne de basse couche se creusant avec la chaleur estivale, la trace au sol de l'équateur météorologique inclinée migre vers sa position la plus septentrionale permettant au flux de mousson d'envahir la région. Dans notre région d'étude, la saison pluvieuse, dans son intensité et dans sa durée, est fortement déterminée d'une part, par la structure de l'équateur météorologique (EMI dans la majorité des cas) qui la couvre et par l'évolution de leur migration, et conjointement par la taille de la zone balayée par

les alizés qui se situe au nord de l'Équateur Météorologique et celle de la zone couverte par la mousson (**figure 2.8**). L'apparition des pluies, l'accroissement des volumes précipités puis leur diminution au cours de l'été, traduisent cette migration vers le nord puis le repli vers le sud de la trace au sol de l'EMI. Dans cet espace couvert par la mousson mais sous l'influence de la structure stérilisante de l'EMI, les conditions de la pluviogenèse sont difficiles, la mousson pénétrant en biseau sous l'Harmattan. Les pluies trouvent leur origine dans la manifestation de lignes de grains qui engendrent des perturbations pluvio-orageuses mobiles (**ref. figure 2.7**). Il s'agit de phénomènes météorologiques impressionnants à cause d'une part, de l'alignement arqué des cumulonimbus et, d'autre part, à cause des manifestations liées aux grains et aux précipitations orageuses qui accompagnent leur passage. Les lignes de grains se forment à partir d'une incursion, soit du flux d'alizé, soit du flux d'est supérieur (Jet d'Est Africain) dans la mousson (Sagna P., 2005), sous forme d'une pulsation dans l'Alizé (Leroux M., *op cité*). Ce phénomène météorologique de nos jours, assez bien connu grâce aux travaux qui lui ont été consacrés. Nous citerons notamment parmi les auteurs, Leroux M., (1980), Sagna P., (1988, 2005) et tout dernièrement les travaux du programme AMMA. Les pluies provoquées par les lignes de grains représentent 80 % des précipitations enregistrées en Afrique saharienne (Ourotsho, 1995 *in* Dione, 1996) et 74,4 % en zones soudaniennes et sahéliennes parmi les différents apports durant l'hivernage (Sagna P., 2005). En dehors des lignes de grains qui apportent l'essentiel des précipitations sur le domaine d'étude, se manifestent, très ponctuellement, des remontées de l'équateur météorologique vertical (ou zone intertropicale de convergence) et des perturbations tropicales ayant un caractère cyclonique dont les contributions pluviométriques restent rares et faibles dans notre zone d'étude. Les migrations ponctuelles vers le nord de l'équateur météorologique vertical s'inscrivent, selon Sagna P., (2005), dans des situations marquées par un affaiblissement du champ de pression sur l'Afrique septentrionale et dans le même temps un renforcement de la circulation australe. Elles se traduisent en surface par une migration très importante de la trace au sol de l'équateur météorologique et, en altitude, par une remontée des formations nuageuses.

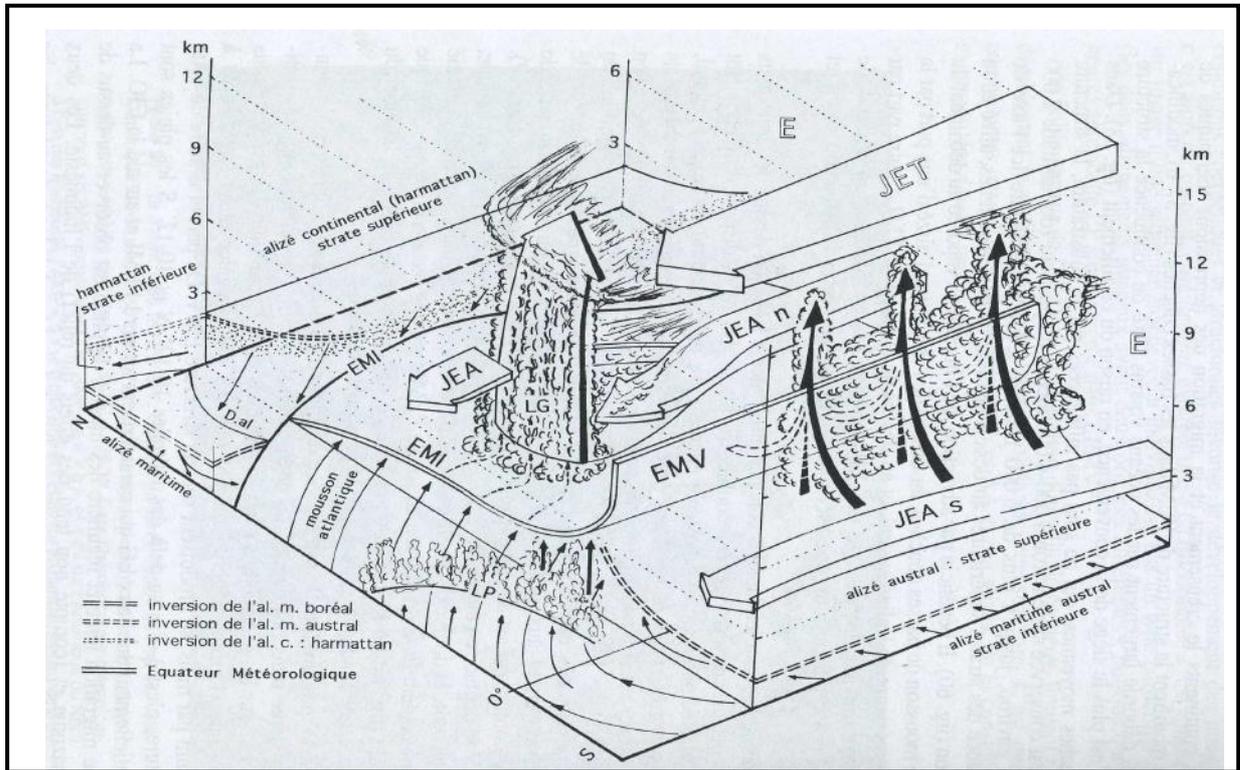


Figure 2. 8 : Structure de la troposphère et composantes de la pluviogenèse sur l'Afrique occidentale et centrale (JET : Jet d'Est Tropical ; JEAN : Jet d'Est Africain nord ; JEAs : Jet d'Est Africain sud), (Leroux M., 2000)

L'année climatique est donc divisée en deux saisons :

- une saison sèche, «peu» pluvieuse, caractérisée par la prédominance de l'alizé maritime et de l'alizé continental et,
- une saison pluvieuse, plus courte, sous l'influence de la mousson.

La variabilité spatiale et temporelle des saisons résulte de la conséquence des échanges méridiens en milieu tropical. Les caractéristiques de la structure aérologique, par la distribution de la pluviométrie qui en découle, permet de diviser l'Afrique occidentale, et à une échelle plus réduite, le Sénégal, en domaines climatiques (**figure 2.9**).

Le climat d'une région ou d'un bassin versant (dans le cas du Ferlo) est généralement défini par les valeurs moyennes d'un ensemble de paramètres hydroclimatiques. Les paramètres, les plus fréquemment utilisés, parmi tant d'autres, sont les températures, la durée d'insolation, l'évaporation, l'humidité relative de l'air, la pression atmosphérique, la pluviosité, l'écoulement. Les valeurs de ces paramètres sont caractéristiques, d'une part, de l'espace dans lequel ils ont été mesurés (données ponctuelles), d'autre part, de la fréquence et de la durée des observations. Les variations climatiques dépendent, bien évidemment, de l'étude de la variabilité de ces paramètres et essentiellement la pluviosité, qui vont être évalués ici sur le plan statistique et cartographique.

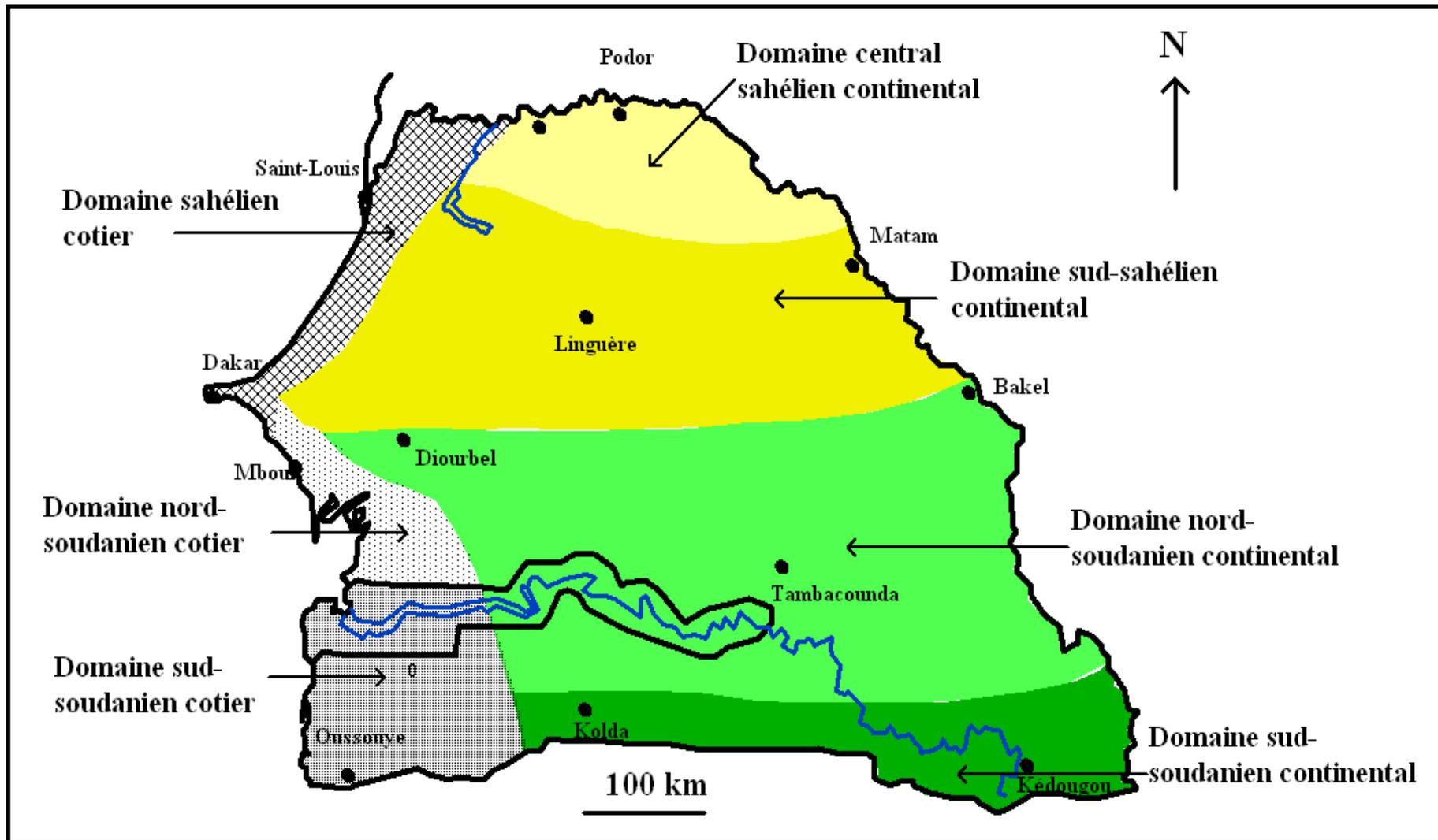


Figure 2. 9 : Les domaines climatiques du Sénégal, adaptés selon Ndong J. B., (1996) et selon Sagna P., (2005)

CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE : UNE RÉGION AUX CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DIFFICILES ENTIÈREMENT DÉPENDANTE DES CONDITIONS PLUVIOMÉTRIQUES

L'analyse des caractères physiques, humains et climatiques de toute la région Nord du Sénégal montre un environnement socio-économique et culturel complexe. **Le bassin versant du Ferlo reste un milieu de faible densité de population mais qui connaît néanmoins une forte pression anthropique due aux nombreuses activités qui y sont pratiquées.** L'élevage extensif, l'agriculture et la cueillette, principaux systèmes d'exploitation et d'utilisation du sol de la région du bassin versant du Ferlo, sont soumis à une attention particulière de la part du monde scientifique et politique depuis les années de grands déficits pluviométriques marqués par des dégâts irréversibles au sein du monde rural. La sécheresse climatique²⁹ sur une longue durée, comme c'était le cas au Sahel, provoque inévitablement la sécheresse hydrologique et la sécheresse agricole. Cette situation multi-échelle a valu injustement à la région du Ferlo le qualificatif de «désert du Ferlo».

La forte dépendance aux paramètres climatiques des ressources naturelles et productives montre toute l'importance d'une analyse de l'évolution du climat. La succession des temps sur le Ferlo est le résultat de facteurs météorologiques exogènes qui s'inscrit dans la circulation générale des deux hémisphères. Il n'existe pas de ruptures entre la circulation tropicale et la circulation extratropicale. Pour Leroux M., (*op. cité*), le passage d'une circulation de masses (AMP) à une circulation de flux (alizés) est nettement observé dans la circulation générale.

A l'échelle des moyennes, la puissance et le dynamisme des AMP, en hiver boréal, se répercutent sur la circulation des alizés dans l'hémisphère Nord. En été boréal et en hiver austral, la région du Ferlo est sous la domination de la circulation de mousson. Les conditions qui gouvernent la circulation générale et leur impact sur la circulation tropicale conditionnent fortement l'évolution des paramètres climatiques locaux, dont la pluie. Les facteurs qui sont à l'origine des modifications de la circulation générale et leur impact font encore débat.

Il est difficile en l'état actuel de les caractériser avec certitude. Il reste cependant que l'analyse des séries climatiques récentes du Sahel montre de réelles évolutions

²⁹ La sécheresse climatique qui est souvent utilisée dans ce travail exprime l'occurrence de faibles précipitations pendant une période de temps suffisamment longue pour engendrer des dommages irréversibles. Les années sèches sont calculées selon une normale climatologique.

climatiques à l'échelle du temps considérée. Une évolution qui s'inscrit dans des conditions climatiques difficiles pour les populations et lourde d'implication pour l'avenir.

Sur la base de plus d'un demi-siècle de mesures, l'analyse à l'échelle fine met en évidence le climat réellement vécu par les populations qui se traduit notamment par une forte variabilité interannuelle (cf. chapitres 4, 5 et 6). Les valeurs moyennes annuelles ne traduisent que très imparfaitement l'évolution réelle de la variabilité de la pluviosité d'une année à l'autre.

Parallèlement, même si les tendances données doivent être considérées avec prudence, au regard des sources et des données utilisables (rares ou d'une fiabilité discutable, chapitre 3), **elles conservent une réelle valeur indicative traduisant une rupture climatique potentiellement chargée d'espoir pour les populations du Ferlo.**

PARTIE 2 : ÉVOLUTION CLIMATIQUE RÉCENTE

CHAPITRE 3 : LES DONNÉES UTILISÉES : SOURCES ET LIMITES

CHAPITRE 4 : LES PRÉCIPITATIONS DANS LE BASSIN VERSANT DU FERLO : UN NOUVEAU TOURNANT ?

CHAPITRE 5 : ÉVOLUTION DES FACTEURS ET DES CONDITIONS THERMIQUES ACTUELLES : UNE TENDANCE CONTRASTÉE

CHAPITRE 6 : ÉVOLUTION DE L'ÉVAPORATION ET DE L'HUMIDITÉ RELATIVE : UN TOURNANT DANS L'ÉVOLUTION CLIMATIQUE CONFIRMÉ

CHAPITRE 3 : LES DONNÉES : SOURCES ET LIMITES

L'analyse statistique est l'outil essentiel pour l'étude de l'évolution descriptive de la variabilité climatique et pour la détection des tendances dans les séries de mesure. Pourtant, si l'outil statistique est précieux à l'évaluation des fluctuations du climat «*nombreux sont les facteurs qui font que la signification des analyses qui en découlent doit être considérée avec prudence*» (Comby J., 1998). Le choix délicat des modèles statistiques adaptés dépend dans la plupart des cas de la nature des données traitées, et les résultats obtenus sont conditionnés par le mode de traitement statistique utilisé. Tenter de cerner les limites de l'analyse statistique ne conduit pas pour autant à une remise en cause de son rôle dans l'analyse de la variabilité climatique. Il nous semble au contraire que ce rôle essentiel ne peut être que renforcé si ces limites sont mieux définies (Comby J., 1998). Dans ce but, une introduction à l'outil statistique utilisé ainsi qu'à ses limites est réalisée pour mieux cerner la valeur représentative des résultats qui en découlent pour chaque type d'analyse, et la justification des choix opérés.

L'étude de l'évolution récente du climat, sur une période de plus d'un demi-siècle, est articulée autour d'une analyse la plus exhaustive possible des précipitations à différentes échelles de temps, puis du comportement thermique du secteur, et enfin des tendances éventuelles pour l'évaporation, l'insolation et l'humidité relative. L'évolution de la représentativité des résultats est d'abord conditionnée par un état des lieux des données (sources, séries temporelles, choix et répartition des stations de mesures, caractéristiques des stations utilisées, etc.), ensuite par une analyse des différentes contraintes liées à l'exploitation des bases de données météorologiques. Ces limites se résument par les faiblesses du réseau de mesure, la brièveté des séries, la faible densité des postes de mesure et les problèmes de fiabilité des données mesurées (causes matérielles et humaines).

1. LE RÉSEAU D'OBSERVATION DE LA RÉGION NORD DU SÉNÉGAL INCLUANT LE DOMAINE D'ÉTUDE

Le réseau global d'observation météorologique du Sénégal fait partie des plus anciens de toute l'Afrique de l'Ouest et a fait l'objet d'amélioration au cours de ces dernières décennies tant sur le plan de la densité (création de nouvelles stations de mesure) que sur le plan de l'innovation (matériels modernes).

1.1. Le réseau d'observations météorologiques

Le réseau est soumis à une gestion bicéphale : la Direction de la Météorologie Nationale (DNM) s'occupe de la maintenance, du suivi des observations, de leur collecte et de leur transmission, tandis que la gestion administrative et financière incombe au bureau des exploitations des activités aéronautiques nationales de l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique (ASECNA). Le dispositif national est globalement composé du réseau synoptique, du réseau climatologique, du réseau agrométéorologique et du réseau pluviométrique. Le Sénégal est aussi doté de stations de réception de données satellitaires, de stations Radar et d'un réseau de mesures d'altitude.

1.1.1. Le réseau synoptique

Le réseau de surface nord-sénégalais est composé de cinq stations synoptiques (**tableau 3.1**). Ces stations fournissent des mesures instrumentales sur les conditions de surface (pression, température, humidité, vent, insolation et précipitations) et sur les observations visuelles (nuages, phénomènes météo). Elles participent toutes à l'échange régional de données et quelques-unes comme Saint Louis, Linguère, Matam, Podor, sont intégrées au réseau mondial. Ces stations effectuent des mesures horaires à tri-horaires qui sont transmises en temps normal toutes les trois heures via le Système Mondial de Transmission des données (SMT).

1.1.2. Le réseau climatologique

Le réseau climatologique est composé seulement de deux stations dans le Ferlo (**tableau 3.1**) : il s'agit des stations de Bakel et Ranérou qui fournissent les mêmes observations que les stations synoptiques, à l'exception des données relatives à la pression atmosphérique. Les observations sont effectuées toutes les heures pendant la période diurne (de 06h00 TU à 12h00 TU). Elles participent également au programme d'échanges des données climatiques de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).

Stations	Types	Altitude (m)	Coordonnées géographiques		Paramètres utilisés et longueurs de série				
			Latitude Nord	Longitude Ouest	R.R	Tn, Tx	Durée d'insolation	H.R	Evaporation
Bakel	Climatologique	25	14°90	12°47	1951-2005				
Barkedji	Pluviométrique	15	15°17	14°52	1951-2005 ³⁰				
Coki	Pluviométrique	43	15°31	16°00	1951-2005 ³¹				
Dagana	Pluviométrique	5	16°31	15°30	1951-2005				
Diourbel	Synoptique	7	14°65	16°23	1951-2005	1961-2005		1961-2005	
Linguère	Synoptique	20	15°38	15°12	1951-2005	1960-1998	1962-1998	1951-2000	1951-1998
Louga	Agrométéorologique	38	15°62	16°22	1951-2005				
Matam	Synoptique	15	15°63	13°25	1951-2005	1951-2005	1958-2001	1962-2005	1951-2000
Podor	Synoptique	6	16°65	14°93	1951-2005	1951-2005	1973-2002	1963-2005	1951-2005
Ranérou	Climatologique	33	15°30	13°97	1963-2005				1951-2005
Saint Louis	Synoptique	4	16°05	16°45	1951-2005	1951-2005	1961-2002	1961-2005	
Yang Yang	Pluviométrique	28	15°39	15°21	1951-2005 ³²				
Widou Thiengoly	Pluviométrique	15	15°20	16°21	1976-2005 ³³				

R.R : Pluviométrie annuelle ; **Tn** : Températures moyennes minimales ; **Tx** : Températures moyennes maximales ; **H.R** : Humidité relative

Tableau 3. 1 : Caractéristiques qualitatives générales des stations de mesure et des données utilisées, DNM, 2002-2009

³⁰ Données 1996 et 1997 inexistantes

³¹ Données 1997, 2003 et 2004 inexistantes

³² Données 2002, 2003, 2004 inexistantes

³³ 1951-1976 ; cumuls annuels estimés par Akpo selon la méthode Dubreuil, 1974.

1.1.3. Le réseau agrométéorologique

Le réseau agrométéorologique exploité avec l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) compte six stations au niveau national dont une seule dans la région du Ferlo (Louga). Ces stations ont été créées en faveur des projets du Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS) ; elles fournissent les mêmes observations que les stations climatologiques, à la même fréquence.

1.1.4. Le réseau pluviométrique

Le réseau pluviométrique national compte 300 postes implantés dans la majeure partie des cas dans les arrondissements et dans les communautés rurales. Les postes pluviométriques recueillent uniquement la hauteur des précipitations et le nombre de jours de pluie. Depuis une période récente, des organismes de recherche comme le projet allemand (GTZ), à Saint Louis, l'Institut de Recherches pour le Développement à Dakar et le Centre de Suivi Ecologique par le biais du projet Réseau d'Observatoires de Surveillance Ecologique à Long Terme, font la collecte d'informations climatologiques. Ils ont installé des stations de mesure pour densifier le réseau de mesures de la Direction Nationale Météorologique (DNM) comme c'est le cas à Widou Thiengoly.

Le réseau d'observation comprend également un dispositif de mesures d'altitude, composé de quatre stations au niveau national dont Saint Louis où deux sondages, exclusivement pour le vent, sont effectués à 06h00 TU et 18h00 TU. S'ajoutent à ce réseau les stations de réception d'imagerie satellitaire qui permettent la surveillance des déplacements et des développements des systèmes convectifs de la mousson africaine. L'imagerie satellitaire est devenue un outil indispensable pour les prévisions. Les stations de réception installées à la DMN et au service météo de l'ASECNA couvrent toute l'Afrique de l'Ouest grâce aux données Météosat Seconde Génération (MSG). Enfin, les stations radar installées à Dakar et à Linguère, permettent la localisation et le suivi des échos de précipitations, notamment ceux associés aux orages, aux cumulonimbus et aux tempêtes tropicales. Ces données sont utilisées d'une manière opérationnelle pour les besoins de la prévision à court terme, notamment aéronautique, et d'autre part, pour la recherche. Jusqu'en octobre 2004, seule la station de Dakar Yoff était équipée en radar pluie (bande C (5 cm), non Doppler). Depuis l'année 2005, un radar météorologique Doppler, bande S (10 cm), acquis par la DNM, a été installé à Linguère (**photo 3.1**).



Photo 3. 1 : Le radar météorologique Doppler, bande S (10 cm) installé à Linguère par la DNM en collaboration avec le Royaume du Maroc au sein du projet BAWAN

Cliché Sarr M. A., 2006

La **figure 3.1** permet de visualiser la répartition des stations de mesure sur le territoire national, qui aujourd’hui assure une assez bonne couverture permettant la collecte et la prévision des phénomènes météorologiques. Parmi ces stations de mesure, un choix s’impose pour répondre à notre problématique d’étude.

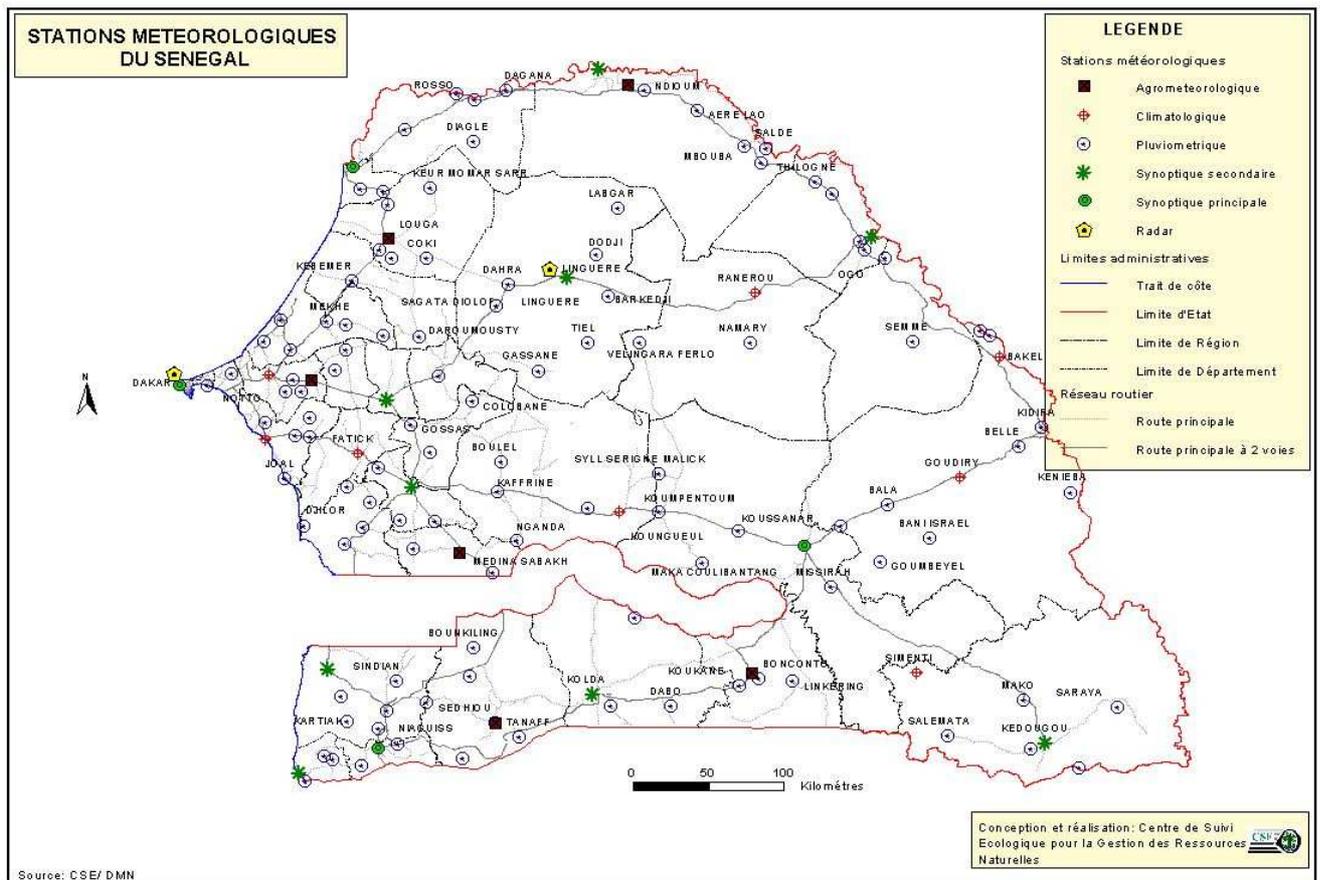


Figure 3. 1 : Réseau météorologique national du Sénégal

1.2. Le choix des stations de mesure utilisées

Un choix s'est évidemment imposé pour la sélection des postes retenus pour l'analyse. Les critères essentiels qui ont conduit à ces choix sont les suivants :

- Disposer de séries longues et communes à toutes les stations, n'ayant pas de lacunes significatives, et surtout sur la plus longue période possible, c'est-à-dire, plus de 50 années au minimum pour la pluviométrie.

- Réaliser un quadrillage le plus étroit possible afin de parvenir à une couverture spatiale relativement précise et homogène du Ferlo. Une maille fine du quadrillage permet également d'observer les fluctuations spatiales des épisodes pluvieux à des pas de temps différents.

Cette sélection a conduit à retenir pour les besoins de l'étude cinq stations synoptiques (Podor, Matam, Linguère, Diourbel et Saint Louis), deux stations climatologiques (Ranérou et Bakel), une station agrométéorologique (Louga), enfin cinq postes pluviométriques qui sont Dagana, Widou, Thiengoly, Coki, Yang Yang et Barkédji (**figure 3.2 et tableau 3.1**).

1.3. Les types de données traitées

Collecter des données météorologiques et climatologiques au sein des services de la DNM n'est pas une chose facile. La base de données qu'il a été possible de construire, pendant presque une année entière, en recopiant à la main dans la salle des archives plus de la moitié des observations, a cependant permis de rassembler de longues séries pour la pluviométrie, les températures, l'insolation, l'humidité relative et l'évaporation.

- Les précipitations constituent le paramètre météorologique le plus constant de nos relevés. Le corpus pluviométrique comprend 13 postes pluviométriques relativement bien distribués sur le domaine d'étude. Les relevés pluviométriques sont partagés entre les données quantitatives et les données qualitatives

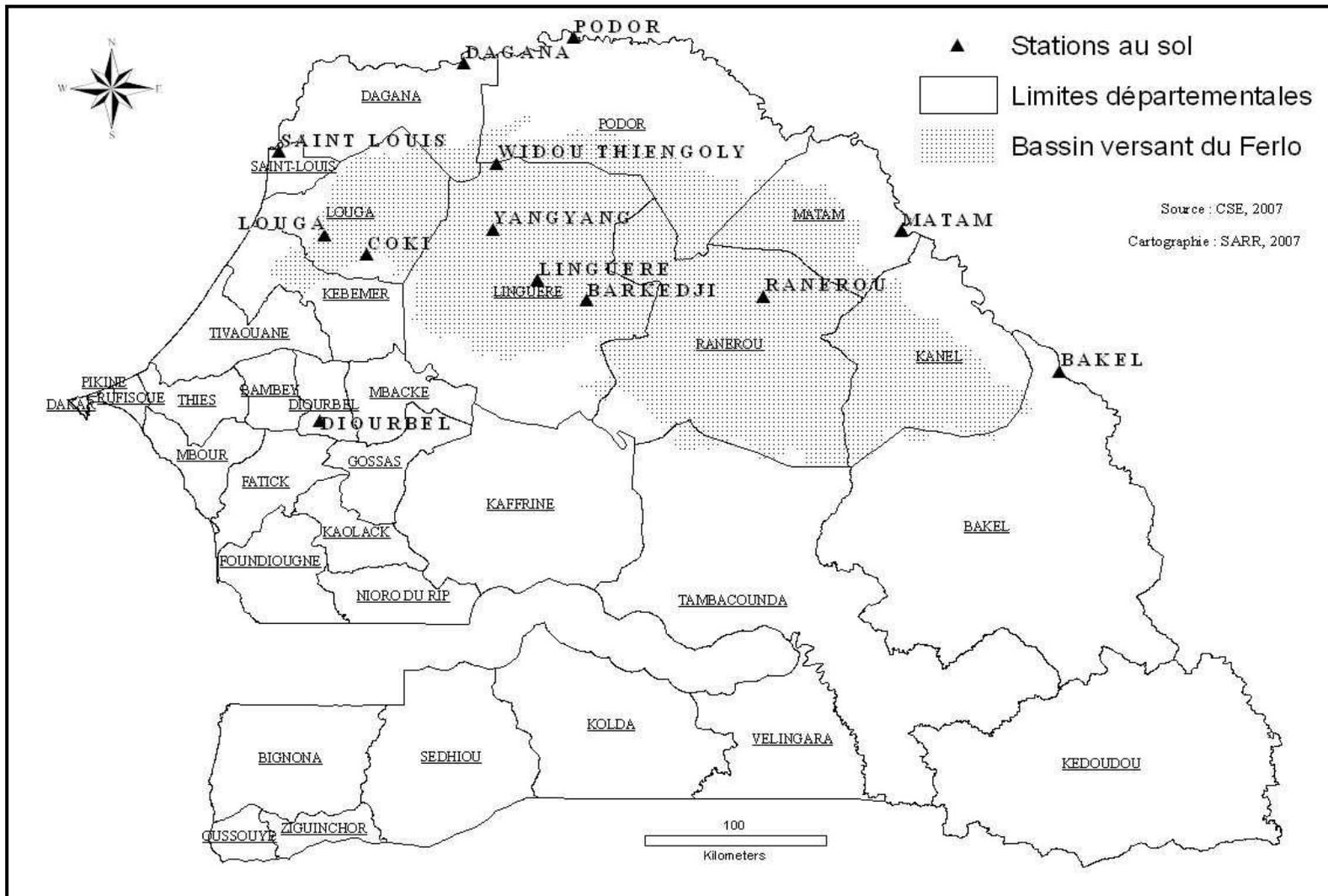


Figure 3. 2 : Carte de situation du Bassin versant du Ferlo et des stations au sol retenues

❖ Les cumuls mensuels enregistrés dans les 13 postes pluviométriques (Bakel, Dagana, Diourbel, Linguère, Louga, Matam, Podor et Saint-Louis) disposant de la série complète (1951-2005). Par contre, les enregistrements font état de quelques lacunes telles que les années 1997, 2003 et 2004 à Coki, 1996 et 1997 à Barkédji et enfin de 2002 à 2004 à Yang Yang. Notons au passage que les mesures de la pluie ont débuté en 1963 à Ranérou. Dans le but de densifier le réseau pluviométrique de la zone d'étude, nous avons eu recours au poste pluviométrique de Widou Thiengoly. Ce poste sera mobilisé dans la technique d'interpolation spatiale par méthode de krigeage car plus le réseau pluviométrique est dense, plus la marge d'erreur est réduite. Les mesures de la pluviométrie pour ce poste ne datant que 1976, elles n'offraient pas une durée assez longue pour analyser la variabilité de la pluviométrie. Nous avons alors eu recours aux données estimées de 1951 à 1975 par Akpo L. E., (1990) (*in* Ndione J. A., 2000). Le manque de postes à l'extérieur du domaine d'étude, surtout au sud-est, crée des effets de bord qu'il faut prendre en considération dans l'interpolation spatiale de la pluie.

❖ Les nombres de jours de pluie enregistrés dans six postes (Podor, Saint-Louis, Louga, Barkédji, Matam et Diourbel) correspondent aux cumuls mensuels sur la période de 1951 à 2005.

- Les températures minimales et maximales ont été obtenues pour les stations de Diourbel, Linguère, Matam, Podor et Saint-Louis. Il s'agit en réalité des moyennes minimales et maximales mensuelles calculées en fonction des quatre relevés quotidiens de températures. A partir de ces données mensuelles, sont calculées les températures mensuelles et l'amplitude thermique mensuelle moyenne. Cependant, les séries de données de ces stations, représentatives du domaine d'étude par leur distribution géographique, ne couvrent pas les mêmes durées en raison des coupures ou bien des installations de matériels tardives.

- L'insolation, ou plus exactement la durée mensuelle moyenne de l'ensoleillement est calculée à partir des stations de : Linguère, Matam, Podor et Saint-Louis.

- L'humidité relative est analysée à partir des données de cinq stations (Linguère, Matam, Podor et Saint-Louis) bien réparties pour caractériser le domaine d'étude.

- L'analyse de l'évaporation est fondée sur les stations de Linguère, Matam, Podor et Saint-Louis. Les données de chacune de ces stations constituent au moins une série d'une cinquantaine d'années.

Le vent en surface est l'un des paramètres les plus difficiles à saisir à cause d'une carence de données dans le domaine d'étude. Ce qui explique notre difficulté à avoir auprès de la DNM des données de vent sur une série longue. Les seules données dont nous avons pu disposer enregistrent des coupures importantes donc inefficaces pour toute évaluation d'une évolution.

2. CONTRAINTES LIMITANT L'EXPLOITATION DES DONNÉES

Bien connaître les contraintes pouvant influencer le traitement statistique des données mesurées permet sans aucun doute une meilleure compréhension des analyses qui en sont tirées. Les faiblesses sont nombreuses mais les plus importantes sont les suivantes.

2.1. Faiblesses liées à l'organisation du réseau et à l'absence de séries longues

Il est aujourd'hui reconnu que l'un des obstacles majeurs à l'étude de l'évolution du climat en Afrique au sud du Sahara en général, et au Ferlo du Sénégal en particulier, est la densité très faible des stations de mesure existantes et/ou utilisables. Le territoire sénégalais compte actuellement environ 300 postes pluviométriques mal répartis entre les arrondissements et les communautés rurales. La plupart d'entre eux sont localisés sur la frange occidentale du pays. La mise en place d'un réseau agrométéorologique dans les années 1970–1980 (après la sécheresse sahélienne de 1970) par la DNM en collaboration avec l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles et du Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel a permis de resserrer les mailles du réseau de postes de mesure. Cependant, ce réseau reste encore de très faible densité surtout au nord-est du pays, correspondant au trois quart du Ferlo, même s'il faut reconnaître que beaucoup de postes pluviométriques ont été soit rénovés soit créés durant l'année 2004. Le Sénégal a des acquis uniques en Afrique : il détient un réseau vieux d'un siècle et demi et une série chronologique de données³⁴. Mais, dans la plupart des stations situées dans la région Nord du Sénégal, il n'existe presque pas de mesures avant 1950 même si les ouvertures de stations se sont faites plus tôt. Au nord du pays, c'est le cas des stations de Bakel en 1918, de

³⁴La station de Saint Louis dispose de la plus longue série chronologique au Sénégal et en Afrique noire. La série commence en 1854, comprend quelques lacunes, mais est interrompue dans les années 1980. Ce n'est qu'après 1992, avec Saint Louis – école, relayé par Saint Louis – ville et en 1957 par Saint Louis – aéroport, que l'on peut disposer d'une série continue (à l'exception de quatre années). Une série continue de près d'un siècle a été créée (Leborgne J., 1988). La série de Dakar est également hétérogène. Elle comprend les relevés de Dakar –ville de 1897 à 1940, de Dakar - Hann de 1938 à 1957 (avec huit années de lacunes), de Dakar - Ouakam de 1941 à 1962, de Dakar – Yoff de 1947 à aujourd'hui, de Dakar – Cap Manuel de 1952 à 1976.

Podor, Matam, Diourbel, Dagana et Louga en 1919. La station de Linguère a vu le jour en 1933. La série chronologique homogène de la pluviométrie de 1951 à 2005 choisie pour l'ensemble des stations utilisées permet d'écarter beaucoup de lacunes qui rendent l'analyse statistique peu fiable voire impossible. En résumé, il est très rare de pouvoir disposer de relevés pluviométriques à pas de temps mensuels, saisonniers et annuels qui excèdent une cinquantaine d'années dans la bande sahélienne. La tâche devient plus délicate lorsqu'il s'agit d'obtenir d'autres paramètres climatiques comme la température, l'insolation, l'humidité, le vent.

2.2. Faiblesses liées à la faible densité des postes de mesure

La faible couverture du réseau de mesures nord sénégalais pose plusieurs contraintes, et parmi elles, nous avons celles liées à l'espace et au temps.

2.2.1. Les contraintes d'échelle spatiale

La quantité de pluie enregistrée par un pluviomètre ne représente que la quantité d'eau recueillie à un endroit précis, c'est-à-dire sur quelques cm². L'existence de fortes disparités dans la répartition spatiale des précipitations, qui est déjà fréquente pour des pluies quotidiennes, est presque systématique pour des événements de forte intensité (Comby J., 1998). L'enregistrement de la quantité d'eau qui tombe sur un pluviomètre est fortement conditionné par le moment de l'endroit précis où se localise l'appareil de mesure. Ces conditions géographiques changeantes, d'un point de mesure à un autre, sont l'un des facteurs majeurs qui expliquent les disparités spatiales de la pluviométrie. Ceci même lorsque tous les points de mesure se localisent dans une région topographiquement homogène ou presque et ne sont séparées que par une faible distance pour beaucoup d'entre eux. Dans la région du Ferlo, les mesures faites au sol, entre les stations de Coki et de Louga, séparées d'environ 25 km et celles enregistrées par Linguère et Barkédji, distantes d'environ 30 km, sont marquées par des écarts importants. Les stations de Coki et de Louga ont enregistré en 1977 respectivement 335 et 169 mm d'où une différence de 146 mm. De même qu'en 1959 à Linguère et à Barkédji, on a mesuré respectivement 538 et 300 mm (écart de 238 mm). En 2005, les mêmes stations ont noté 453 mm (à Linguère) et 638 mm (à Barkédji). Selon Comby J., (1998), ces disparités géographiques, qui se multiplient aux échelles les plus fines, interdisent qu'un réseau de capteurs aussi dense soit-il, puisse rendre compte, précisément, de la variabilité spatiale des volumes déversés.

2.2.2. Les contraintes d'échelle temporelle

La taille des échantillons se pose très souvent comme la première contrainte dans l'analyse statistique et cartographique du climat en région ouest-africaine. Elle est souvent discutée dans la perspective d'une étude sur les durées de retour. La possibilité de remonter plus loin dans le passé permet une évaluation fiable de la durée de retour. Lorsque les séries de mesure atteignent 30 à 50 ans voire plus, les méthodes d'ajustement statistiques permettent des extrapolations intéressantes.

2.3. Problèmes de fiabilité des données mesurées et liées à des causes humaines et matérielles

Le réseau sénégalais souffre d'un problème de vétusté des équipements qui rend l'exploitation des éléments peu fiables. La maintenance régulière des équipements et instruments de mesure n'est pas assurée, faute de pièces de rechange ou de moyens de déplacement dévolus aux techniciens formés à cet effet. Les chefs de stations implantées dans les capitales régionales et départementales ne disposent d'aucun moyen de déplacement pour assurer un encadrement de proximité. D'ailleurs la majorité des stations sont installées dans les maisons même de ces personnes, comme c'est le cas à Linguère (sur le toit), à Barkédji et à Widou (dans la demeure du vétérinaire). Dans le nord du Sénégal, on note une certaine distorsion au niveau des informations relatives aux différents éléments climatologiques ou météorologiques. Ceci est dû au manque de moyens financiers, à l'indisponibilité d'agents de terrain, à l'abandon de postes ou tout simplement à la priorité de mesures de certains paramètres climatiques au détriment d'autres (communication orale du bibliothécaire de la Météorologie nationale à Dakar, 2006). En outre, l'existence dans la même région de différents types d'appareils de mesure conduit à des écarts parfois significatifs au niveau des paramètres mesurés. Les capteurs peuvent se résumer à deux types essentiels : le pluviomètre non enregistreur et les pluviographes (enregistreurs).

A ces imprécisions d'origine matérielle s'ajoutent les erreurs dues aux imperfections humaines. La plupart des stations utilisées connaît encore des prélèvements manuels effectués par les habitants. Ils sont généralement composés d'agents de services publics (dans les sous-préfectures, les communautés rurales, les services vétérinaires), d'agriculteurs ou d'éleveurs avec aucune formation, dans beaucoup des cas. En dépit du sérieux des personnels choisis pour assurer ces observations à chaque «évènement» météorologique, il est évident que la fiabilité des

données est mise en cause. Le retard des rémunérations des agents sur le terrain, un personnel non qualifié l'abandon de postes au profit d'autres activités ou tout simplement la priorité de mesure de certains paramètres au détriment d'autres sont devenus très courants. Ces éléments posent des problèmes dans la chronologie des paramètres climatiques comme le montre la station de Linguère ces dernières années où de 1998 à 2004, les relevés sont absents. On note également un manque de motivation des agents opérant au niveau des stations qui se sentent abandonnés à leur sort (communication orale du responsable de la station de Linguère, 2005).

Par ailleurs, le développement des agglomérations de Podor, Diourbel, Matam, Linguère, Saint Louis, Louga fait que les parcs où sont installés les équipements de mesure sont négativement influencés par des phénomènes parasites locaux. A côté de cela, certaines stations (Ranerou, Barkédji) ne disposent pas de locaux appropriés.

En définitive, comme le souligne André Lebeau, directeur général de Météo France *«on ne mesure, en quelque sorte que la partie visible de l'iceberg et les maxima mis en évidence sont certainement bien inférieurs aux maxima qui ont été réellement atteints»* (in Comby J., 1998). De toute évidence, les données tirées des mesures des phénomènes météorologiques et climatologiques analysés dans ce travail doivent être perçues comme des ordres de grandeurs, même si on peut leur attribuer une réelle valeur indicative.

CHAPITRE 4 : LES PRÉCIPITATIONS DANS LE BASSIN VERSANT DU FERLO : UN NOUVEAU TOURNANT ?

De très nombreuses études (Hubert P., *et al.*, 1987, 1989 et 1998 ; Nicholson, S. E., 1993 ; Paturel J. E., *et al.*, 1997a et b ; Leroux, M., 1996 ; Toupet, C., 1996, Nouarceur Z., 1998) sur l'évolution hydropluviométrique dans la région du Sahel ont souligné l'extrême irrégularité de la pluviométrie au Sahel, 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 jusqu'aux années 1990. Aujourd'hui le nombre d'études climatiques sur ces régions du sud du Sahara a considérablement diminué et peu d'entre elles (Nicholson S. E., *et al.*, 2000 ; Paturel J. E., *et al.*, 2001 ; Ardoin S., *et al.*, 2004, Sagna, P., 2005, Leroux M., 2005) prennent en considération l'évolution pluviométrique des dernières années afin d'évaluer l'éventuelle persistance, ou non, de la sécheresse. L'étude proposée vise à réduire ces lacunes. C'est une des singularités de l'étude puisqu'elle s'inscrit dans une échelle temporelle plus récente et sur une région moins étendue : le bassin versant du Ferlo.

En dépit des contraintes et des limites imposées par la qualité des données des stations de mesure, l'analyse de l'évolution climatique récente du domaine d'étude conserve une réelle valeur indicative. L'étude des séries pluviométriques permet de mettre en évidence un changement de tendance caractérisé par une amélioration des volumes précipités depuis le milieu des années 1980. L'analyse aboutissant au constat de l'atténuation de la sécheresse ou tout au moins du déficit pluviométrique est fondée sur une double démarche :

- Une première se fonde à la fois sur des courbes d'évolution interannuelle, un diagnostic pluviométrique décennal et une évolution spatiale (fluctuations de l'isohyète 400 mm sur le domaine d'étude).
- Une seconde utilise des outils statistiques robustes de détection de ruptures de séries pluviométriques et permet de confirmer le changement de tendance.

Dans tous les cas, l'étude présente d'abord les conditions dites «moyennes» de la pluviométrie avant d'aborder les tendances et les évolutions.

1. ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES

Les précipitations constituent, avec les températures, les éléments climatiques parmi les plus déterminants dont dépendent de manière étroite, non seulement la faune et la flore, mais aussi l'économie générale des zones habitables. Les problèmes des pays arides naissent principalement du déséquilibre entre les ressources et les besoins en eau (Arlery R. et *al.*, 1973). Les précipitations sont, du fait de leurs implications biologiques, écologiques et économiques, l'élément fondamental du milieu sahélien (Courel M. F., 1984). La pluviométrie est un élément déterminant dans une étude climatique sur le domaine sahélien où la ressource en eau est le fondement de tout le système économique. Ceci explique sans doute, dans une large mesure, que les mesures de la pluviométrie sont les plus régulières et les séries de mesure sont les plus longues même s'il existe bien des coupures liées à des causes déjà évoquées précédemment. Dans tous les cas, les données disponibles sur la pluviométrie dans le bassin versant du Ferlo et aux alentours permettent une exploitation qui met en évidence la variabilité spatiale et temporelle des précipitations et des tendances de leurs évolutions.

La répartition de la pluie importe plus encore que les volumes précipités. Comme le note Chamard P., (1979), plus que l'abondance ou la faiblesse des abats, c'est leur distribution dans le temps et dans l'espace qui est déterminante. Les récoltes peuvent être excellentes lorsque le déficit pluviométrique est compensé par la bonne répartition des pluies au cours de la saison des pluies. Les pluies commencent généralement à tomber dans cette région au mois de juin pour finir en octobre même si la «véritable saison des pluies» ne concerne que les mois de juillet, août et septembre, en raison de la masse d'eau «significative» qui est enregistrée. La date de démarrage de la saison des pluies est une variable critique pour le secteur de l'agriculture. La plupart des études orientées sur le démarrage de la saison des pluies ou de la mousson et sa relation avec la dynamique atmosphérique a été réalisée au cours des années 1970 et 1980. Cette période de sécheresse importante au Sahel a été caractérisée par des expériences de grande envergure dont les plus importantes étant le GATE³⁵ en 1974 et le WAMEX³⁶ en 1979 (Fontaine B., et Janicot, S., 1993). Ces travaux se sont principalement basés sur la migration méridienne saisonnière du front intertropical (Sultan B., 2002).

³⁵ GARP Atlantic Tropical Experiment

³⁶ West African Monsoon EXperiment

Cependant, il arrive que l'on enregistre des précipitations faibles voire très faibles en hiver boréal, aux mois de décembre, janvier, février, mars ou avril. Les précipitations hivernales connaissent « une activité plus importante en décembre, mois pendant lequel on enregistre 45 % des pluies maximales au cours de cette période. Novembre concentre 24 % des pluies et février 14 %, janvier 10 % et mars 7 % en moyenne sur la période d'avant les années 1990 (Sagna P., 1993). Les types de perturbations hivernales qui sont à l'origine de ces pluies³⁷, appelées «heug» en Wolof, «pluies de mangues», de «contre saison» sont liées à des «invasions polaires» c'est-à-dire des intrusions d'air des moyennes latitudes vers les basses latitudes (Leroux M., 1983, Sagna P., 1988). Le système, bien connu aujourd'hui, correspond à un renforcement de l'anticyclone des Açores alimenté par les masses d'air polaire, ce qui explique la baisse des températures accompagnant ces perturbations. Les précipitations engendrées sont, dans de rares cas, assez fortes voire «surprenantes», pour la région.

Même s'il est tout à fait admis que le total annuel précipité est directement dépendant du total des pluies de la saison pluvieuse, les pluies enregistrées aux mois de janvier, février, mars voire même avril jouent un rôle crucial dans le reverdissement de la strate herbacée au cœur de la saison sèche. L'influence négative des précipitations de la saison sèche sur les pluies d'hivernage est une question légitime qui anime le débat des scientifiques (Elghadi A. V., et *al.*, 2004). L'analyse faite sur les stations du Ferlo ne montre pas l'existence d'une corrélation positive entre les précipitations de la saison sèche et les précipitations de la saison des pluies. Certaines années ont connu des précipitations aux mois de janvier, février, mars, avril conséquentes sans que cela ait entraîné un hivernage particulièrement déficitaire. C'est le cas des années 1954 à Yang Yang et à Podor, 1964 à Matam et 1979 à Linguère. En revanche, d'autres années comme 2002, avec ses pluies records au mois de janvier, a enregistré un total annuel déficitaire presque dans toutes les stations. A cause de l'effet de surprise, ces précipitations arrivent à causer des pertes matérielles et humaines sur la Mauritanie et le Sénégal. Au cours des 9 et 12 janvier 2002, le Sénégal a en effet enregistré de fortes pluies de heug. Ces pluies méritent le qualificatif d'exceptionnel par leur intensité et par leur étendue atteignant 115,8 mm à Podor alors que le maximum a été observé à Dakar le 14 janvier 1979 avec une hauteur de 34,9 mm.

Au final, il faut noter également que les années les plus déficitaires de la série (1983, 1984, 1996) n'ont recensé presque pas de pluies de heug, de même que l'une des années les plus excédentaires (1969).

³⁷ Ces pluies sont désignées en Mauritanie par le terme de « Negdha »

S'il n'est pas admis une quelconque relation directe entre ces deux types de perturbations, en différentes saisons, il faut souligner que les pluies «hivernales» correspondent à un phénomène qui, tout en restant exceptionnel, n'est ni aléatoire, ni déconnecté du reste du système climatique de la région (Elghadi A. V., et *al.*, 2004).

1.1. Une pluviométrie fortement aléatoire

Au Ferlo comme dans toute région du Sahel, il est très important pour caractériser la pluviométrie de connaître les volumes d'eau précipitée car tous les systèmes d'exploitation et d'utilisation de l'espace en dépendent. Les histogrammes permettent de constater une pluviométrie marquée par une forte irrégularité interannuelle des volumes d'eau précipitée depuis l'origine des relevés. Elle est confirmée dans les analyses des séries les plus récentes. Nicholson S. E., en 1981 observe que la pluviométrie est «*un peu abondante*», *sporadique et extrêmement capricieuse, la sécheresse est une menace permanente et les années sèches³⁸ sont plus fréquentes que les années humides*. Les courbes d'évolution des séries chronologiques, doublées de la courbe de tendance linéaire et celle de la moyenne mobile (calculée sur 5 ans), permettent d'identifier le caractère fortement aléatoire de la pluie (**figures 4.1a, b, c**) quelle que soit la période considérée.

³⁸ Les années sèches ou humides, ou années déficitaires ou excédentaires, définissent des valeurs par rapport à une valeur moyenne en général en prenant en référence une période bien définie. Ces appellations représentent des valeurs indicatives et de positionnement dans une distribution statistique. Une année sèche (déficitaire) caractérise des précipitations inférieures à la moyenne ou normale par opposition à une année humide (excédentaire).

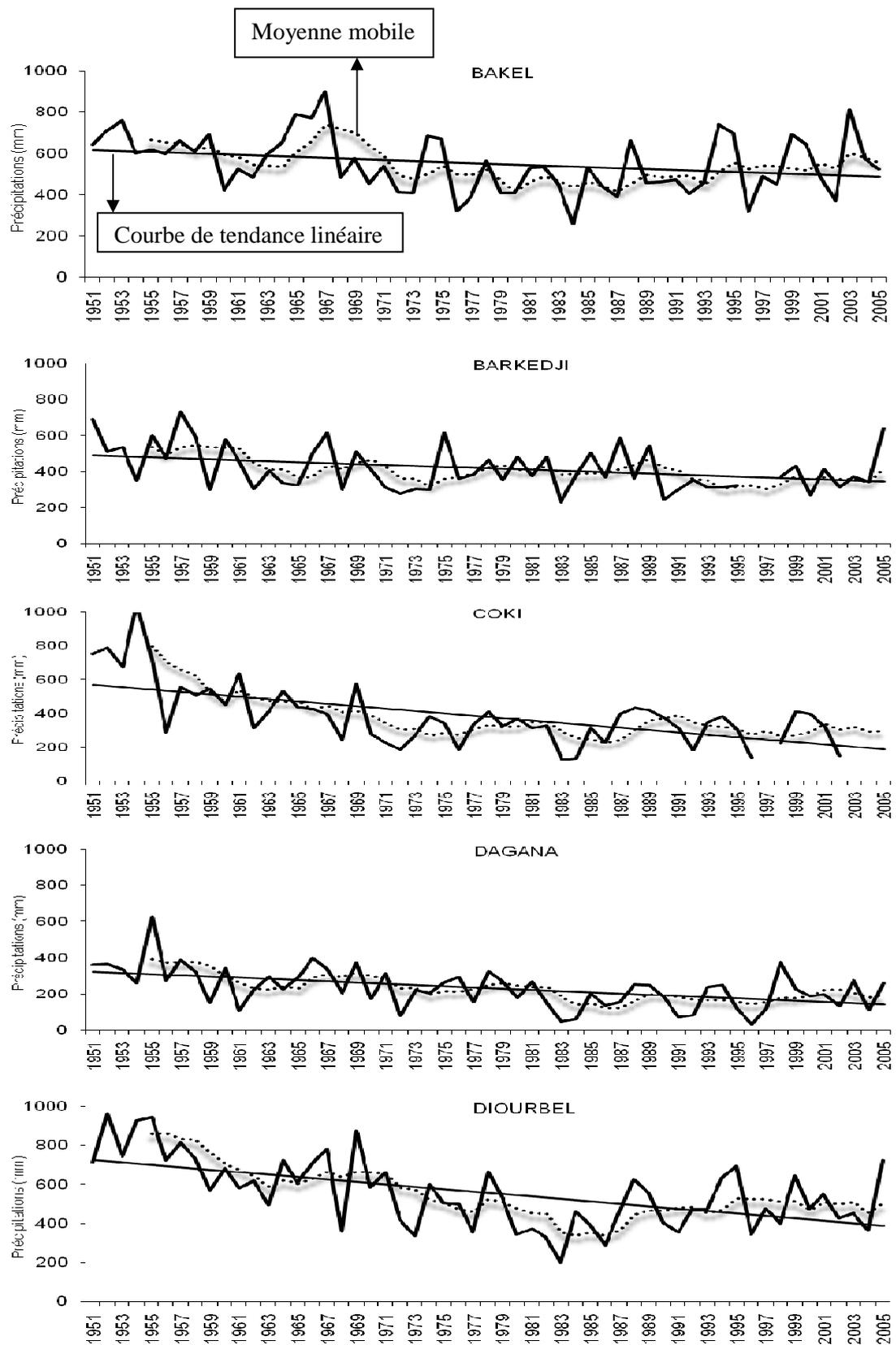


Figure 4. 1a : Variations interannuelles de la pluie au Ferlo, courbe de tendance linéaire et moyenne mobile calculée sur 5 ans (1951-2005) (Sarr M. A., 2008)

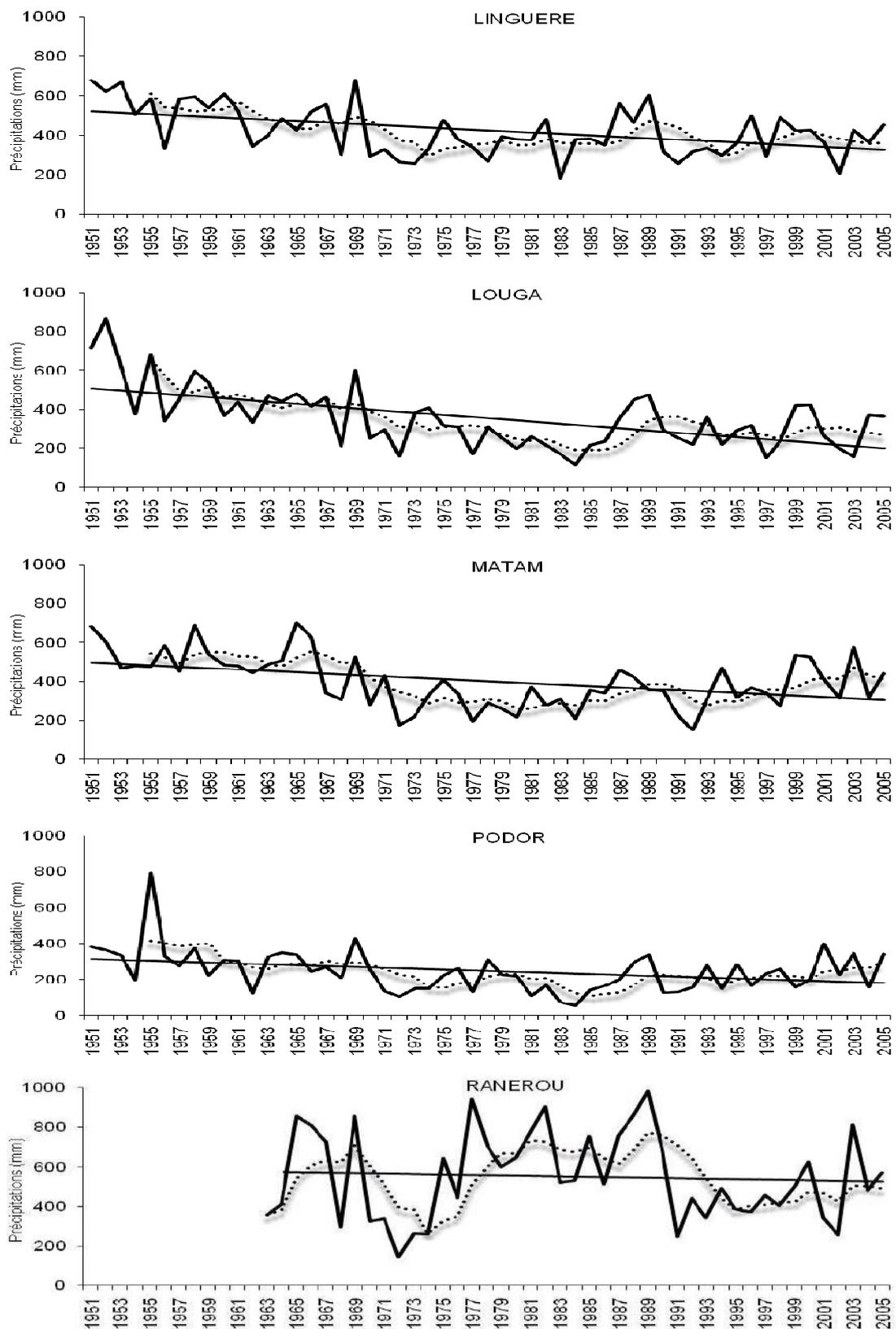


Figure 4. 1b : Variations interannuelles de la pluie au Ferlo, courbe de tendance linéaire et moyenne mobile calculée sur 5 ans (1951-2005) (Sarr M. A., 2008)

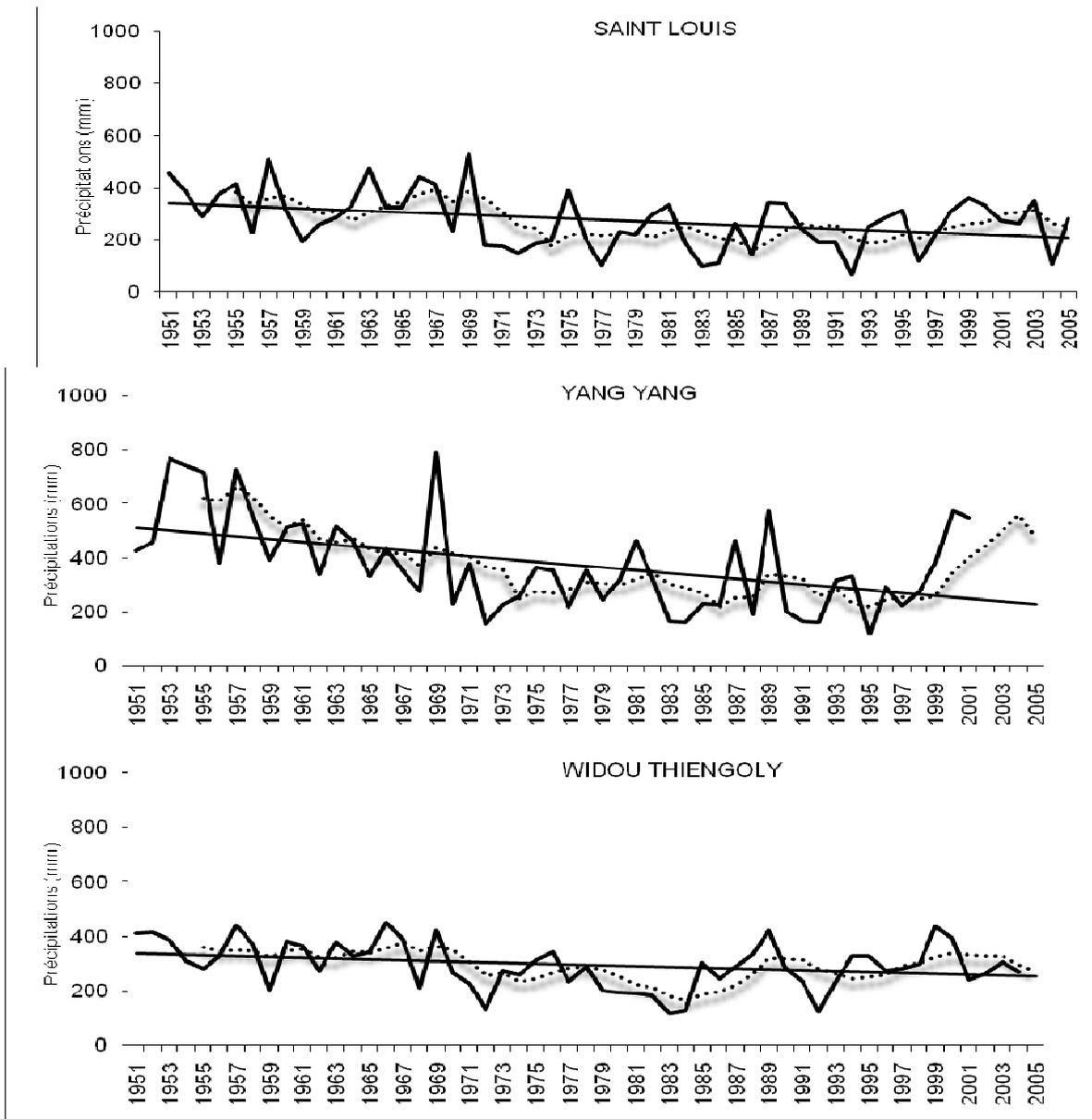


Figure 4. 1c : Variations interannuelles de la pluie au Ferlo, courbe de tendance linéaire et moyenne mobile calculée sur 5 ans (1951-2005) (Sarr M. A., 2008)

1.1.1. Une première lecture traduisant une tendance à la baisse continue

L'analyse des valeurs annuelles de précipitations met en évidence une constante ; la forte variabilité interannuelle alternant des années sèches et des années humides (**figures 4.1a, b, c**). En dépit de cette succession d'années sèches et d'années humides, on peut mettre en exergue des périodes excédentaires (succession d'années excédentaires) et déficitaires (succession d'années déficitaires) continues (au moins 4 années) de la pluie (**tableau 4.1**). Les périodes de baisse sont plus longues et fréquentes que les périodes de hausse. La courbe de tendance linéaire traduit une évolution générale à la baisse sur l'ensemble des stations de mesure mais d'une

intensité variable. Très accentuée pour les stations de Yang Yang, Diourbel, Matam, Coki notamment, la tendance est moins marquée voire absente à Ranérou et à Bakel (**figure 4.1**).

Stations	Période de baisse	Période de stabilité et/ou de hausse
Bakel	1968 – 1973	1951 – 1959
	1976 – 1987	1963 – 1967
Dagana	1982 – 1994	1951 – 1958
	1990 – 1994	1963 – 1969
Diourbel	1979 – 1987	1951 – 1962
	1900 – 2004	
Linguère	1970 – 1974	1951 – 1955
	1976 – 1981	
	1990 – 1995	
	2000 – 2005	
Louga	1975 – 1987	1951 – 1955
	1990 – 1998	1957 – 1961
		1963 – 1967
Matam	1972 – 1987	1951 – 1966
Podor	1971 – 1975	1951 – 1959
	1979 – 1987	
Saint Louis	1970 – 1974	1951 – 1955
	1982 – 1986	1961 – 1967
	1989 – 1993	

Tableau 4. 1 : Répertoire de périodes de baisse et de hausse de la pluviométrie annuelle au niveau de 8 stations étudiées

Au sein de cette tendance générale, les années 1983 et 1984 symbolisent les années les plus sèches des séries chronologiques. La situation très déficitaire de ces deux années a été rendue plus critique sur les plans environnemental, social et économique en raison d'une persistance de la sécheresse biologique, hydrologique et édaphique depuis le début de la période 1970-1980. L'année 1992, comme celle de 1983, a connu une situation déficitaire relativement exceptionnelle.

1.1.2. Une tendance à relativiser en seconde lecture

L'utilisation d'une courbe de tendance par régression linéaire (souvent utilisée dans les évolutions) introduit cependant un biais relatif dans l'analyse et n'est pas adaptée à l'analyse. **Le poids très fort de la décroissance marquée et continue des précipitations de la première décennie de la série influence considérablement la tendance statistique produite sur la période. Une simple analyse des nuages de points et de leur traduction dans l'évolution des**

pluies par une moyenne mobile montre une autre réalité. La distribution de la moyenne mobile sur les séries chronologiques des huit stations³⁹ traduit des fluctuations dans cette évolution.

D'une manière générale, si le début des séries traduit une baisse des précipitations, les dernières décennies, parfois dès les années 1970, mettent en évidence une relative stabilité voire une augmentation des valeurs précipitées. Ainsi, de la fin des années 1960 au début ou milieu des années 1970, c'est le cas de Dagana (1969-1974 environ), de Bakel (1967-1973 environ), de Podor (1969-1975) et de Saint-Louis (1967-1974) ; de la fin des années 1960 jusqu'au milieu des années 1980 comme à Matam (1967-1975 plus ou moins), à Diourbel (1969-1983), à Louga (1967-1984), la tendance est à la baisse.

Le passage à la stabilité, voire à la hausse varie selon les stations. Cette modification de tendance (stabilité et/ou hausse) s'observe donc entre les années 1970 et 1980. L'inversion de tendance est plus nette à Diourbel, à Bakel et à Podor (1983-1984). Elle n'est cependant pas généralisée. On observe également la fin de l'aggravation du déficit pluviométrique en valeurs absolues à partir des années 1970-1980 à Barkédji, Coki, Dagana (avec une légère hausse depuis 1997), Widou (1983) et Louga (1984) et dans une moindre mesure, à Linguère, à Saint-Louis (une légère hausse depuis 1992) et à Yang Yang (avec une nette hausse depuis 1998), où il est difficile de distinguer une tendance très significative. Ranérou fait exception avec une alternance plus nuancée et surprenante en comparaison de celles des autres stations de périodes excédentaire et déficitaire.

En résumé, l'analyse des séries permet de dégager deux séquences relativement distinctes au cours de la période analysée.

- **La première séquence traduit une baisse généralisée des pluies qui s'exprime jusqu'aux années 1970 et/ou les années 1980 selon les stations.**
- **La seconde séquence permet de souligner une certaine stabilité avant une amélioration des valeurs précipitées.**

S'il est encore difficile de marquer une rupture durable dans l'évolution climatique, sur le plan statistique elle paraît évidente. On relève enfin que cette tendance ne s'exprime pas toujours de la même façon au cours des périodes distinguées. Par exemple, la période 1962-1967 est une période stable à Saint-Louis alors que la même période, à une

³⁹ Se sont les seules stations dont les séries n'enregistrent pas de lacunes ou n'ont pas été complétées. Les séries commencent toutes en 1951 et finissent en 2005.

année prés (1961-1966), est une période de baisse à Linguère. A Ranérou, le comportement pluviométrique apparaît très singulier et pose question sur la fiabilité des observations.

1.2. Dynamique spatio-temporelle de la pluviométrie annuelle : le balancement de l'isohyète 400 mm

1.2.1. Évolution spatiale de la pluviométrie

Pour décrire les nuances locales du régime pluviométrique, le tracé des isohyètes par une technique d'interpolation spatiale reste un mode de représentation approprié (Ndong J. B., 1996). La technique d'interpolation par krigeage ordinaire a été choisie parmi quatre autres (la régression locale, la régression globale, l'inversion des distances, les splines) à l'aide d'une étude de validation croisée (Renard F., et Sarr M. A., 2009) qui donne l'erreur absolue la plus faible des différentes techniques d'interpolation⁴⁰. La caractérisation des cumuls annuels sur deux séries de mesures, à savoir 1951-2005 (12 stations) et 1963-2005 (13 stations) sur le bassin versant du Ferlo, nous permet de déterminer les tracés de ces isohyètes sur ces périodes respectives. La série 1951-2005 donne les fluctuations opérées sur les 50 dernières années (les mesures de Ranérou n'ont pas été prises en compte car elles n'existaient pas). La série 1963-2005 a permis d'inclure le poste de Ranérou⁴¹ qui augmente la précision dans les variations de l'isohyète en raison de sa position stratégique dans le sud-est du bassin versant. L'isohyète de valeur 400 mm a été retenue considérant que le bassin versant du Ferlo est globalement compris entre les isohyètes 300 mm et 500 mm, selon la normale 1961-1990.

En première observation, l'isohyète 400 mm de la série 1951-2005, de la **figure 4.2**, est localisée au sud de Louga et de Coki à l'ouest, sur la région de Matam à l'est aux environs de Linguère, divisant la région en deux ensembles Nord/Sud très nets.

En seconde observation, au cours de la période 1963-2005 (**figure 4.3**), l'isohyète 400 mm occupe une position légèrement plus méridionale à l'ouest, au sud de Linguère et de Matam, et se gonfle au nord de Ranérou (introduction de la station) avant de retrouver une partie plus méridionale à Matam.

⁴⁰ L'étude par la validation croisée des techniques d'interpolation spatiale est placée en annexes

⁴¹ Le début des mesures a commencé à partir de 1963

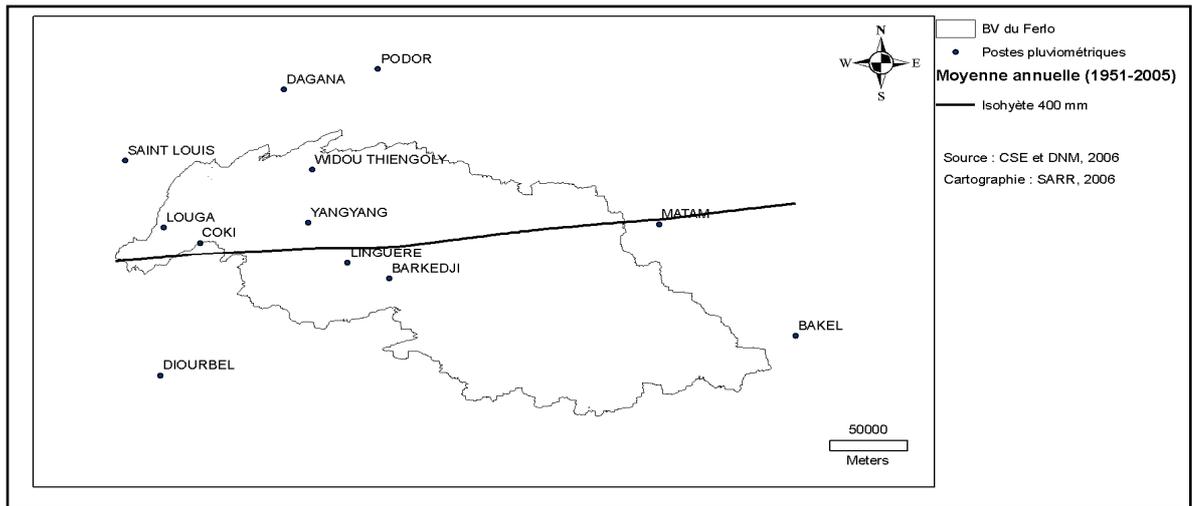


Figure 4. 2 : Le tracé de l'isohyète 400 mm sur la période 1951-2005

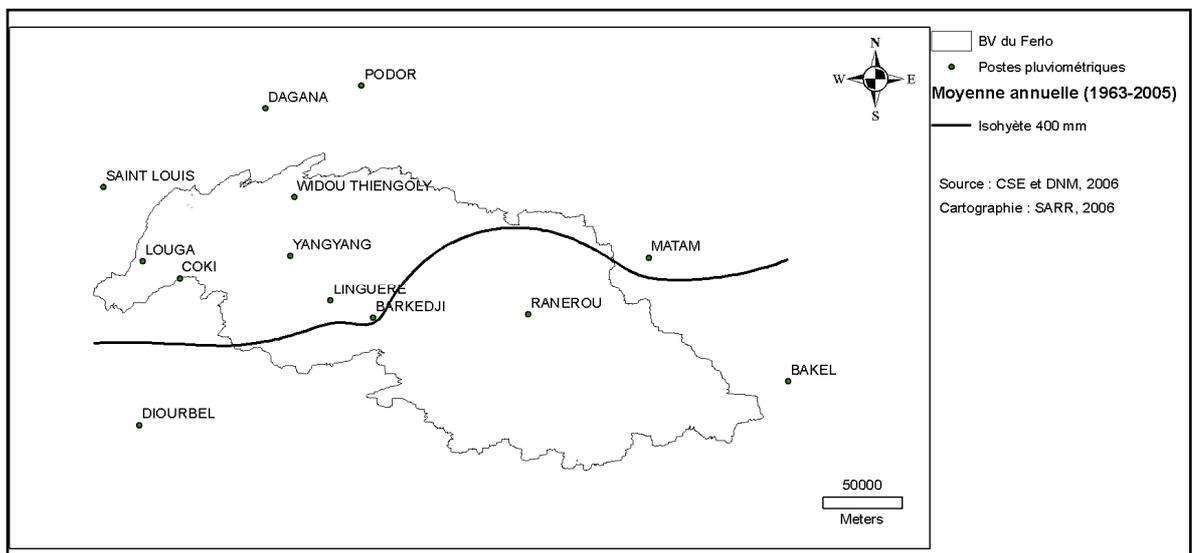


Figure 4. 3 : Le tracé de l'isohyète 400 mm sur la période 1963-2005

En résumé, la période 1963-2005 traduit un accroissement du déficit pluviométrique dans le domaine d'étude par rapport à la moyenne 1951-2005. Mais l'évolution à l'échelle décennale offre là encore une autre lecture.

L'irrégularité spatiale des moyennes décennales de la pluviométrie dans le bassin versant du Ferlo est mise en évidence par la **figure 4.4**. En effet, l'isohyète 400 mm de la décennie 1951-1960 occupe une position latitudinale localisée au nord du bassin versant du Ferlo, entre la région de Dagana au nord et celle de Widou Thiengoly au sud. Au cours de la décennie 1961-1970, la même isohyète se place juste au nord des régions de Louga et de Yang Yang, avec une transition générale progressive vers le sud, estimée aux environs de 50 km. La

fluctuation des isohyètes, du nord au sud, est devenue plus nette entre les décennies 1961-1970 et 1971-1980 car elle passe des limites septentrionales (isohyète 400 mm de 1961-1970) du bassin versant aux positions médianes (isohyète 400 mm de 1971-1980). Cette dernière ne couvre que les régions de Ranérou, Diourbel et Bakel. L'infléchissement vers le sud peut être estimé aux environs de 75 km. Les isohyètes des décennies 1981-1990 et 1991-2000 traduisent de manière irrégulière l'arrêt de la progression vers le sud, et même une migration inverse en direction du nord. Elles se positionnent, à peu près, à la même latitude que celle de 1971-1980, traduisant l'arrêt de la progression vers les latitudes plus au sud. Le tracé de l'isohyète 400 mm de la période de 2001 à 2005, se situe plus au nord encore traduisant un retour à des volumes précipités plus forts. Dans tous les cas, la **figure 4.4** confirme une rupture de la tendance décroissante des moyennes décennales de la pluviométrie en latitude.

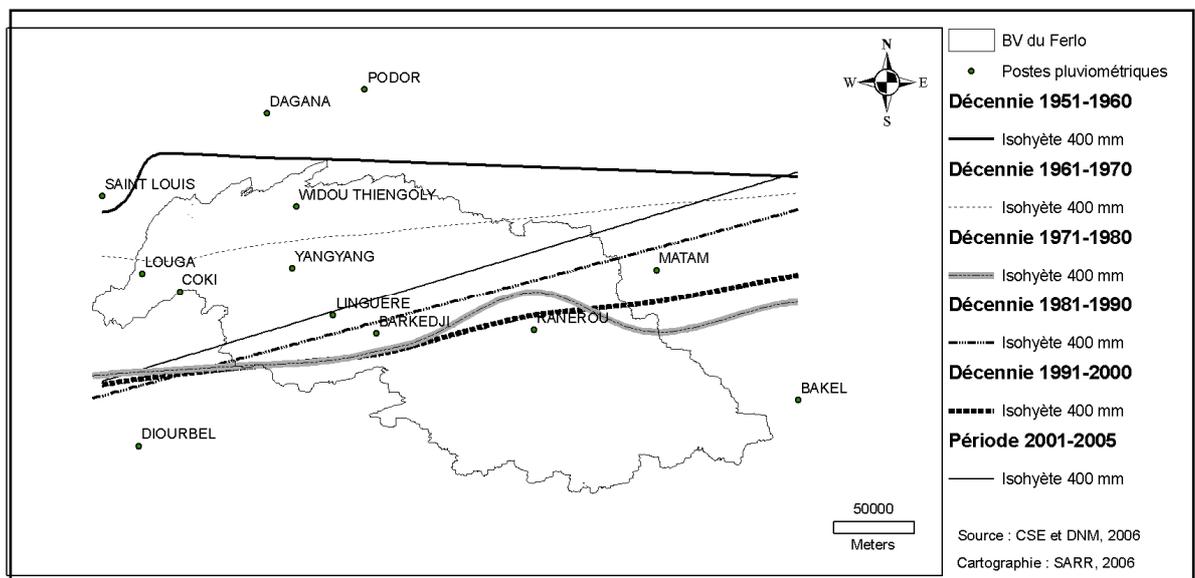


Figure 4. 4 : Fluctuations des isohyètes 400 mm des décennies 1951-1960, 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000 et de la période 2001-2005

La **figure 4.5**, en mettant en exergue les fluctuations des moyennes décennales 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000 et de la période 2001-2005 par rapport à la moyenne de la série 1963-2005, montre également le positionnement de l'isohyète 400 mm au cœur du bassin versant du Ferlo pendant ces trois dernières décennies.

En résumé, si les premières décennies montrent une tendance au glissement vers le sud de l'isohyète 400 mm, les décennies suivantes 1981-1990, 1991-2000, 2000-2005 traduisent l'arrêt de la migration vers le sud et même en 1981-1990 et 2000-2005 une position plus septentrionale.

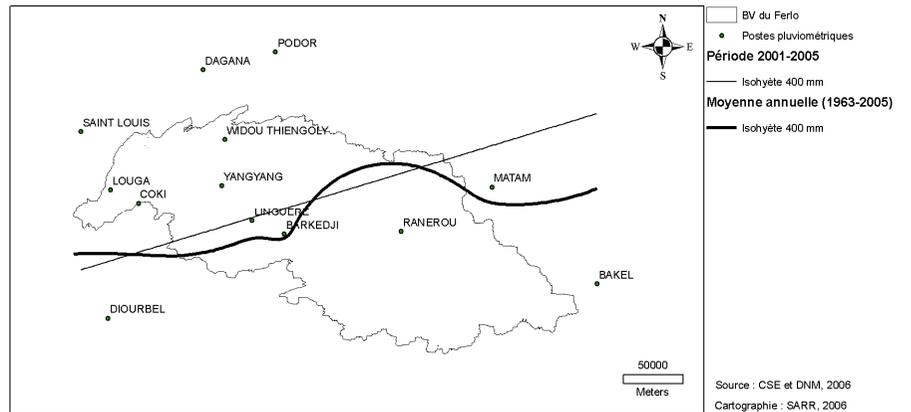
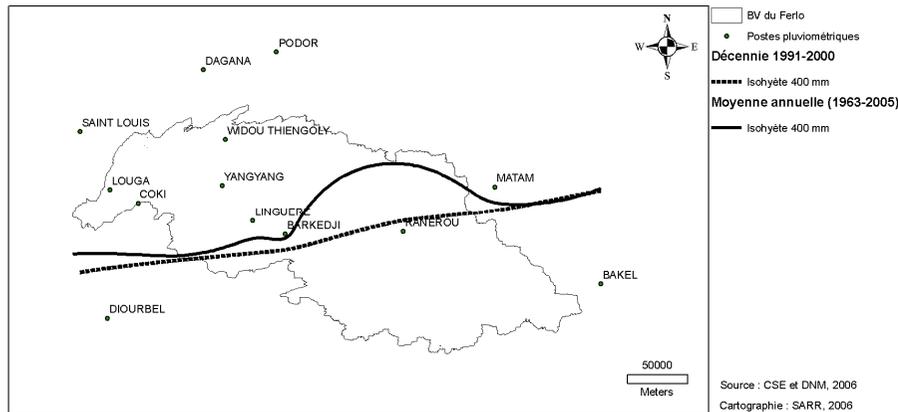
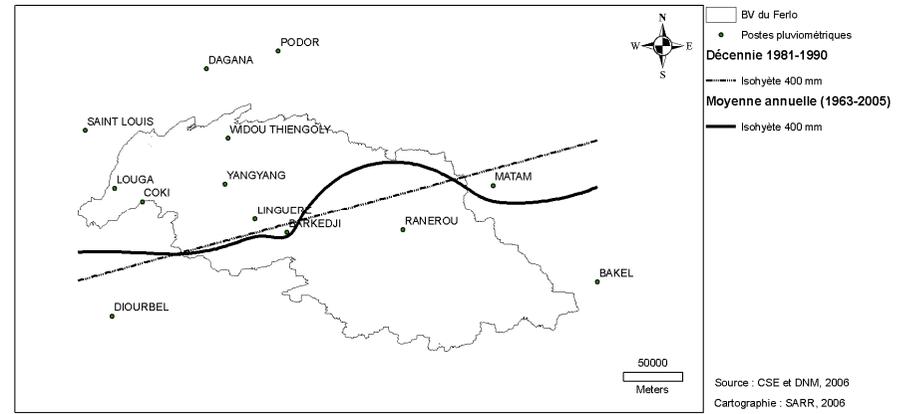
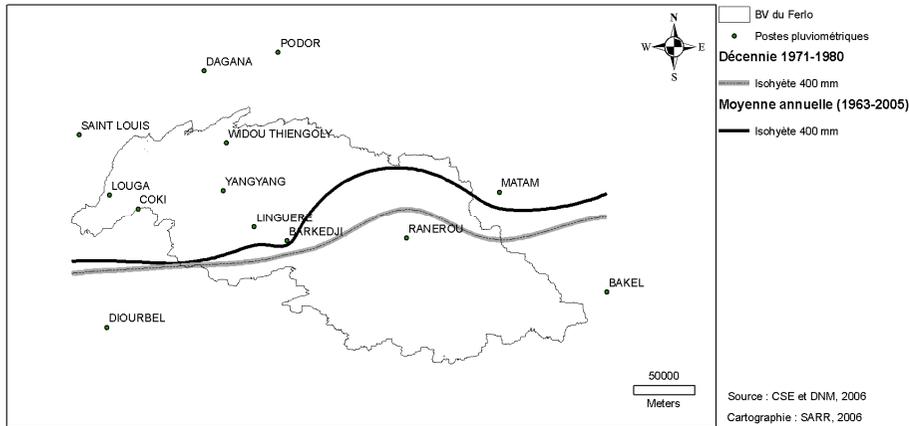


Figure 4. 5 : Fluctuations de l'isohyète (400 mm) : moyennes 1971-80, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2005 autour de l'isohyète de la moyenne de la série (1963-2005)

1.2.2. Illustration de la variabilité interannuelle de la pluviométrie à l'échelle spatiale

L'objectif de ce paragraphe est de mettre en évidence les fluctuations interannuelles de la trace au sol de l'isohyète 400 mm sur le Ferlo en référence aux années les moins pluvieuses (années sèches) et les plus humides caractérisant la période 1990-2005. Au cours de cette séquence récente, peu étudiée, on a retenu les années 1991 et 1992 qui représentent les années les plus sèches et 1999 et 2005 qui sont les années les plus pluvieuses.

- Des années sèches : 1991 et 1992

L'année 1991 est une année qui a enregistré des précipitations très déficitaires par rapport à la moyenne de la série 1990-2005. Six stations ont enregistré pendant cette année les *minima* de précipitations parmi les 13 stations considérées. D'ailleurs, on constate presque la disparition de l'isohyète 400 mm dans le bassin versant du Ferlo par la position qu'elle occupe sur l'extrême sud de cette même région (**figure 4.6**).

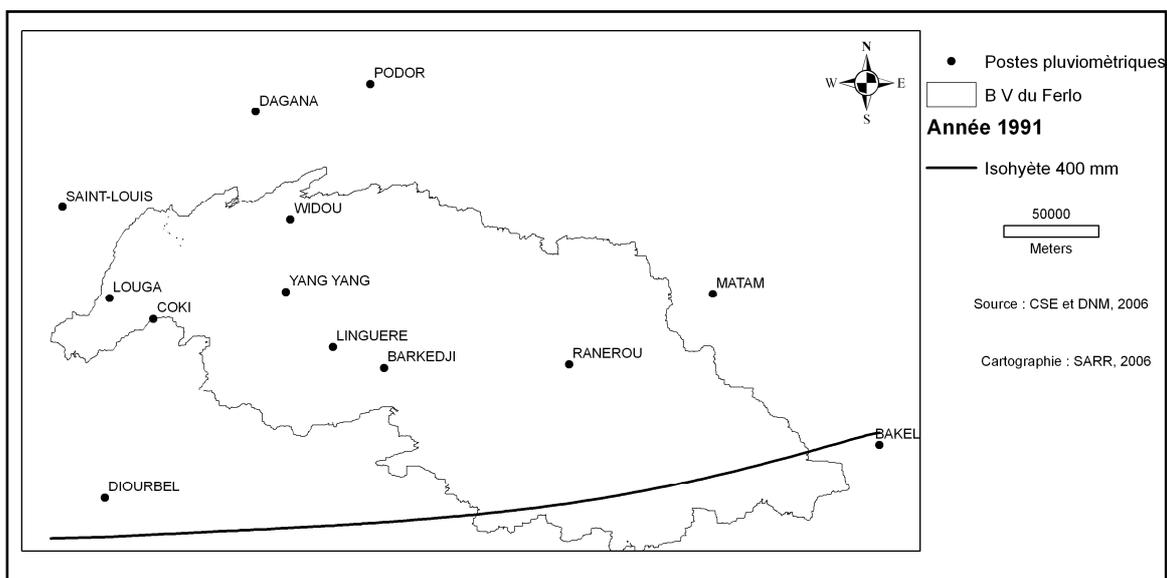


Figure 4. 6 : La position de l'isohyète 400 mm en 1991

L'analyse de l'année 1992 est toujours fondée sur les cumuls annuels des 13 stations pour interpoler la valeur de 400 mm sur l'espace du Ferlo. Si l'année 1992 a été un peu moins catastrophique, on note nettement une position plus septentrionale de l'isohyète 400 mm (**figure 4.7**). Sa localisation en 1992, juste au nord de la région de Ranéro, traduit bien l'enregistrement de précipitations supérieures à celles de l'année précédente sur l'ensemble du secteur.

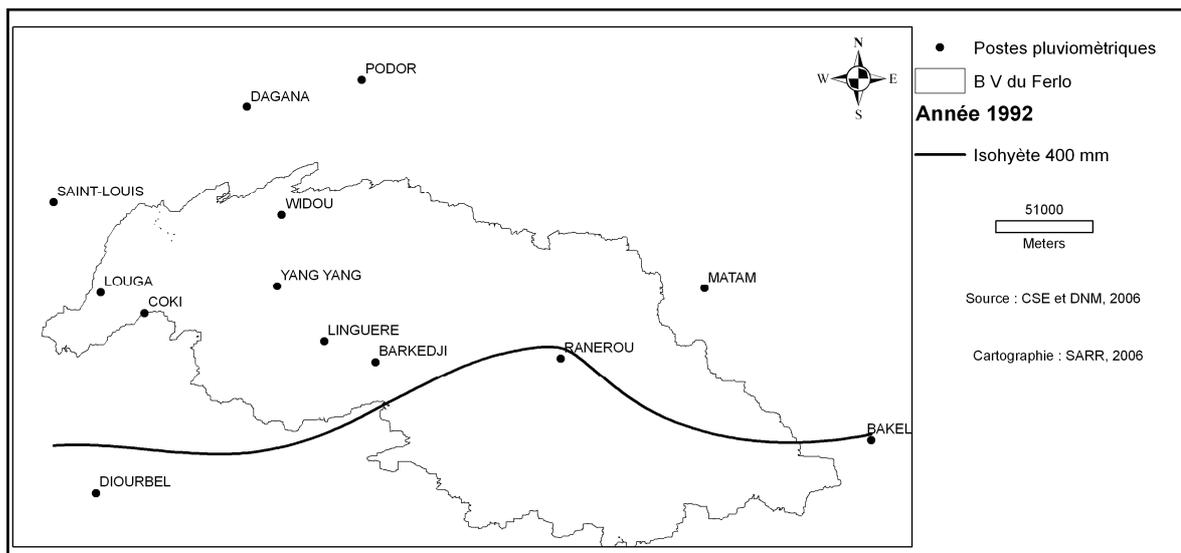


Figure 4. 7 : La position de l'isohyète 400 mm en 1992

- Des années humides : 1999 et 2005

Les années 1999 et 2005. La couverture des $\frac{3}{4}$ du bassin versant du Ferlo par l'isohyète 400 mm pendant l'année 1999 et l'année 2005 (**figures 4.8 et 4.9**) montre nettement l'importance quantitative des précipitations. Cependant, quelques constats s'imposent.

L'isohyète 400 mm de l'année 1999 est située immédiatement au nord de Louga et de Yang Yang à l'ouest du Ferlo pour ensuite décrire une forme relativement convexe en direction de Linguère et de Ranérou (**figure 4.8**). Par contre l'isohyète 400 mm de 2005, se trouvant à peu près à la même localisation que celle de 1999, décrit une courbe parfaitement concave qui englobe toute la partie centrale et orientale du bassin versant du Ferlo (**figure 4.9**).

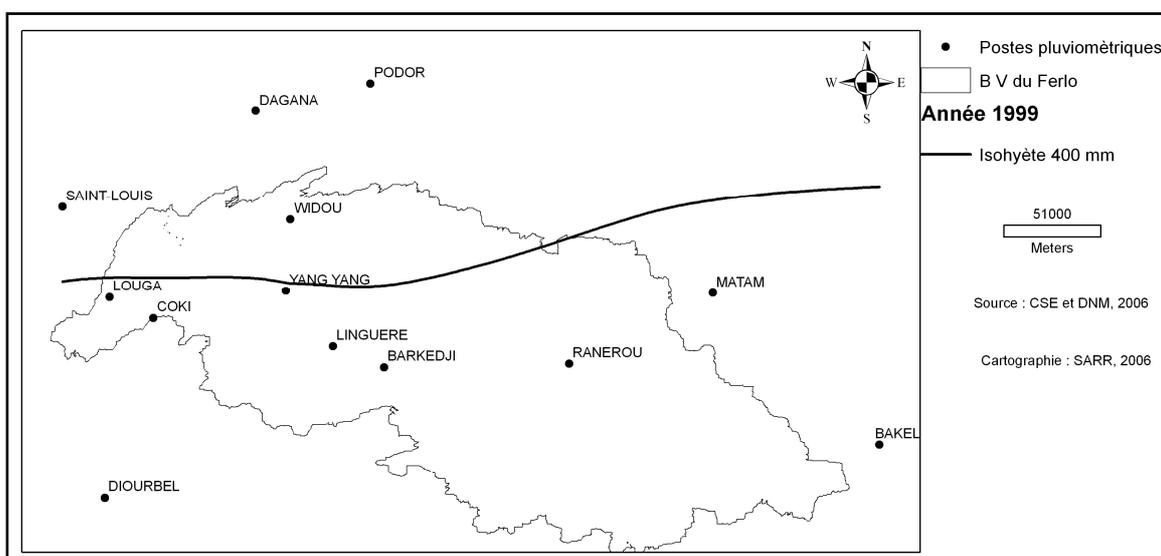


Figure 4. 8 : La position de l'isohyète 400 mm en 1999

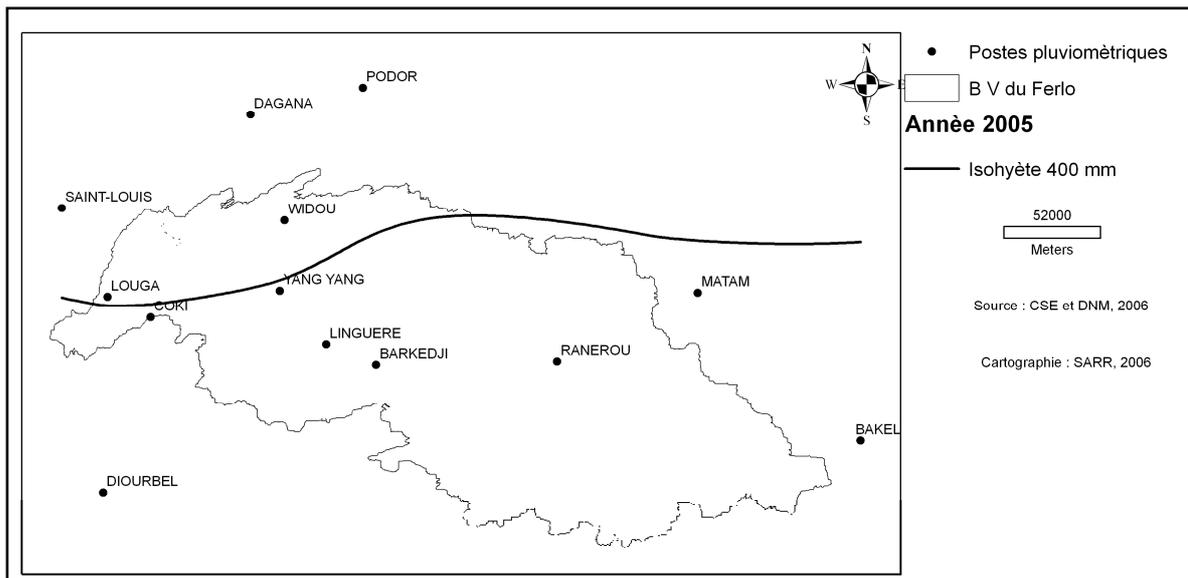


Figure 4. 9 : La position de l'isohyète 400 mm en 2005

L'évolution temporelle des précipitations, décrites à partir de la situation de quelques années sèches et humides sur la période 1990-2005, vient donc confirmer l'extrême irrégularité de la pluie. Et même si une tendance générale traduit un arrêt de la migration vers le sud de l'isohyète 400 mm voire une remontée vers le nord, selon les années, cette migration peut être très variable et influence la position moyenne de l'isohyète dans ces périodes. Ainsi, le poids des années 1991 et 1992, très déficitaires, explique une situation très méridionale de l'isohyète de la décennie par rapport à celle des années 1980-1990 et 2000-2005. Ce constat a déjà été avancé dans les travaux de Ndong J. B., (1996), Dione O., (1996) pour les périodes antérieures. Ce qui nous permet de confirmer le caractère de la forte variabilité pluviométrique en se basant sur les résultats obtenus de l'étude de cette période récente (1990 à 2005).

Le calcul des indices (souvent utilisé) dans la détermination du comportement pluviométrique permet de suivre l'évolution des périodes qui composent la série. De ce fait, en complément de l'analyse sur l'irrégularité spatiale, le calcul des indices montre une forte variabilité interannuelle.

1.2.3. Illustration de la variabilité interannuelle à l'aide d'indices

L'analyse statistique des précipitations à l'échelle annuelle, saisonnière et mensuelle sur la base de quelques indices est reconnue efficace (Le Houerou H. N., 1989) pour évaluer les caractères de la distribution de la pluviosité dans les régions arides du Sahel. Nous nous fondons sur le rapport maximum/minimum, puis l'indice percentile de variabilité (IPV) et enfin l'indice standardisé des précipitations. Le choix de ces indices repose surtout sur leur simplicité d'utilisation mais également sur leur efficacité à produire des résultats.

1.2.3.1. Le rapport entre les extrêmes

Le rapport entre le maximum et le minimum des valeurs de chacune des stations sur la série de mesure considérée met en évidence facilement et rapidement une organisation spatiale des différents degrés de variabilité. Cet indice, utilisé par des auteurs sur les régions arides et semi-arides, présente des inconvénients dans son utilisation. L'indice conduit à accorder une importance exagérée à des événements qui peuvent être de nature fortuite. De plus, lorsque la valeur la plus faible tend vers zéro, l'indice tend vers l'infini et perd ainsi toute signification (Le Houerou H. N., 1989).

Il en sort très nettement des indices de variation plus forts au nord traduisant une variabilité de la pluviosité annuelle beaucoup plus élevée au nord, nord-ouest qu'aux régions du sud et du sud-est du Ferlo (**figure 4.10**).

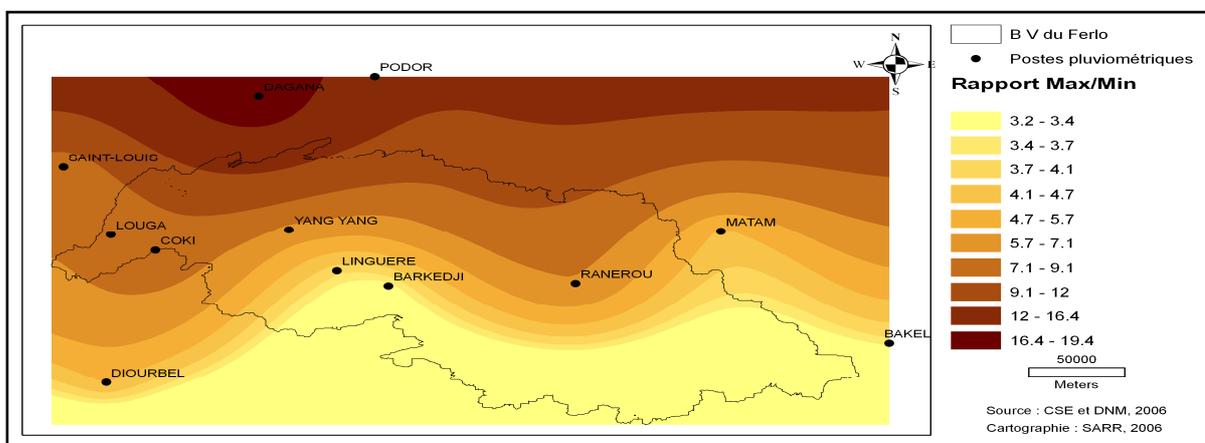


Figure 4. 10 : Distribution du degré de variabilité à partir du rapport entre la valeur maximale et la valeur minimale

1.2.3.2. L'Indice Percentile de Variabilité (IPV)

L'indice percentile de variabilité (IPV) est un outil statistique d'utilisation simple et facile pour la caractérisation de l'irrégularité pluviométrique. Le Houerou H. N., (1989) parle même de méthode empirique mais «irréprochable» qui traduit une non corrélation avec la médiane. L'IPV consiste à utiliser les percentiles des événements réellement survenus (quintile, décile). La variabilité peut alors se définir par le rapport à la médiane (percentile 50) de la différence entre les percentiles 90 et 10 : $p_{90}-p_{10}/p_{50}$ (Austin et Nix, 1978 *in* Le Houerou H. N., 1989).

Appliqué sur une série de données de cumuls annuels de 12 stations pluviométriques du Ferlo, l'IPV corrélé avec les valeurs médianes de ces mêmes stations permet de faire quelques constats. Globalement, il est noté que les stations avec les forts IPV ont également les valeurs médianes les plus faibles, sauf le cas de Ranérou et de Coki qui ont tous les deux des fortes valeurs, aussi bien en IPV qu'avec les médianes (**tableau 4.2**). Et ceci se confirme par une corrélation négative non significative entre la médiane et l'IPV avec r^2 égale à 0,30 contre 0,40 pour les résultats obtenus par Le Houerou H. N., (1989) en Libye.

Stations	Indice Percentile de Variabilité	Valeur médiane en (mm)
Bakel	0,62	532,9
Barkédji	0,79	376,7
Coki	1,20	371,1
Dagana	1,19	228
Diourbel	0,77	548,3
Linguère	0,82	393,7
Louga	1,18	332,8
Matam	0,97	370,8
Podor	1,01	227,9
Ranérou	1,15	514
Saint-Louis	1,05	275,3
Yang Yang	1,14	352,8

Tableau 4. 2 : Relations entre les IPV et les valeurs médianes des stations

Les résultats obtenus par la comparaison de la médiane et à l'IPV montrent une forte variabilité interannuelle de la pluviométrie enregistrée au niveau de toutes les stations de mesure sauf à Ranérou et à Coki où cette variabilité est moins forte.

1.2.3.3. L'Indice Standardisé des Précipitations

L'indice standardisé des précipitations, ou en anglais Standardized precipitation index (SPI) s'écrit selon la formule suivante (Bergaoui M., et *al.*, 2001) :

$$I = Xi - Xm/Si$$

Où Xi est le cumul de la pluie pour une année i ; Xm et Si , sont respectivement la moyenne et l'écartype des pluies annuelles observées pour une série donnée. Le calcul de cet indice permet de déterminer la sévérité du déficit pluviométrique selon différentes classes qui fixent des critères d'évaluation (**tableau 4.3**). Ces derniers permettent de considérer une certaine hiérarchisation qui va de l'humidité extrême à la sécheresse extrême en passant par l'humidité forte, l'humidité modérée, la sécheresse modérée et la sécheresse forte.

Classes du SPI	Degré de la sécheresse
SPI>2	Humidité extrême
1<SPI<2	Humidité forte
0<SPI<1	Humidité modérée
-1<SPI< 0	Sécheresse modérée
-2<SPI<-1	Sécheresse forte
SPI<-2	Sécheresse extrême

Tableau 4. 3 : Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur du SPI
Bergaoui M., Alouini A. 2001 (IRESA, Tunisie) in www.john-libbey-eurotext.fr

L'indice standardisé de précipitations caractérise une situation majoritairement dominée par une sécheresse modérée et dans une moindre mesure une sécheresse forte (**tableau 4.4**). Tous les postes de mesure ont globalement 37 % environ d'années de sécheresse modérée, et le plus fort taux est à 53 % à Barkédji. Les sécheresses extrêmes sont presque rares contre un nombre d'années relativement important de la classe de l'humidité extrême. Il apparaît néanmoins dans notre domaine d'étude plus d'années d'humidité extrême que de sécheresse extrême (**tableau 4.4**).

Ce constat d'ensemble indiquerait t-il que les grandes crises climatiques que le Sahel a connues jusqu'à maintenant seraient le résultat de plus d'années de sécheresse modérée et forte que d'années de sécheresse extrême? En outre, les classes d'humidité forte et d'humidité modérée regroupent un nombre d'années proportionnellement conséquent, plus de 20 sur une série de 55 que comptent l'écrasante majorité des stations.

Par le biais de cet indice, il apparaît aussi, en rapport avec les années, un caractère répété des années de sécheresse, soit modérée soit forte. En effet, les années 1980 sont particulièrement concernées par cette situation de déficit pluviométrique annuel qui a commencé dès le début des années 1970. Cette persistance de la sécheresse, sur plusieurs années, a provoqué de grands déséquilibres tant sur le plan écologique que sur le plan économique. Une succession de deux années ou plus de sécheresse forte voire de sécheresse modérée est plus sévère et dramatique pour l'agriculteur et pour le pasteur du Ferlo qu'une année isolée de sécheresse extrême.

Stations	Nombre d'années	HE	HF	HM	SM	SF	SE	Année HE ou HF*	Année SE ou SF*
Ranérou	43		9	10	17	7		1989*	1972
Barkédji	53	2	7	12	28	4		1957	1983
Coki	52	2	5	15	22	8		1954	1983
Linguère	55	2	9	13	23	8		1969	1983
Diourbel	55	3	5	19	17	10	1	1952	1983*
Widou	55		12	15	18	7	3	1966*	1983*
Podor	55	1	5	19	23	7		1958	1984
Louga	55	3	4	18	19	9		1952	1984
Bakel	55	1	9	15	20	9	1	1967	1984*
Matam	55	3	6	17	21	8		1965	1992
Yang Yang	52	4	5	13	21	9		1969	1998
Saint Louis	55	2	7	18	19	9		1969	2005

Tableau 4. 4 : Répartition des années selon les classes de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI)

HE : humidité extrême, **HF** : humidité forte, **HM** : humidité modérée, **SE** : sécheresse extrême, **SF** : sécheresse forte, **SM** : sécheresse modérée

A l'échelle temporelle, l'indice standardisé de précipitations, qui confirme le caractère toujours irrégulier de la pluviométrie, met en exergue, comme le tracé des moyennes mobiles, des épisodes humides et des épisodes secs (**figures 4.11 et 4.12**). Pour l'ensemble des stations, à l'exception de Ranérou, les séquences sèches sont significativement plus longues que les séquences humides dans cette partie du Sénégal (**figures 4.11 et 4.12**). Le constat est moins net au niveau de Ranérou.

En définitive, on constate là encore des décennies 1950 et 1960 plus humides que les décennies 1970 et 1980 qui restent très sèches dans le Ferlo comme l'attestent les stations de Barkédji, Diourbel, Matam, Podor. Ensuite, on constate une alternance d'années humides et sèches pour les décennies 1990 et 2000 comme à Saint-Louis, Yang Yang, Widou Thiengoly, Bakel, Matam, Podor (**figures 4.11 et 4.12**).

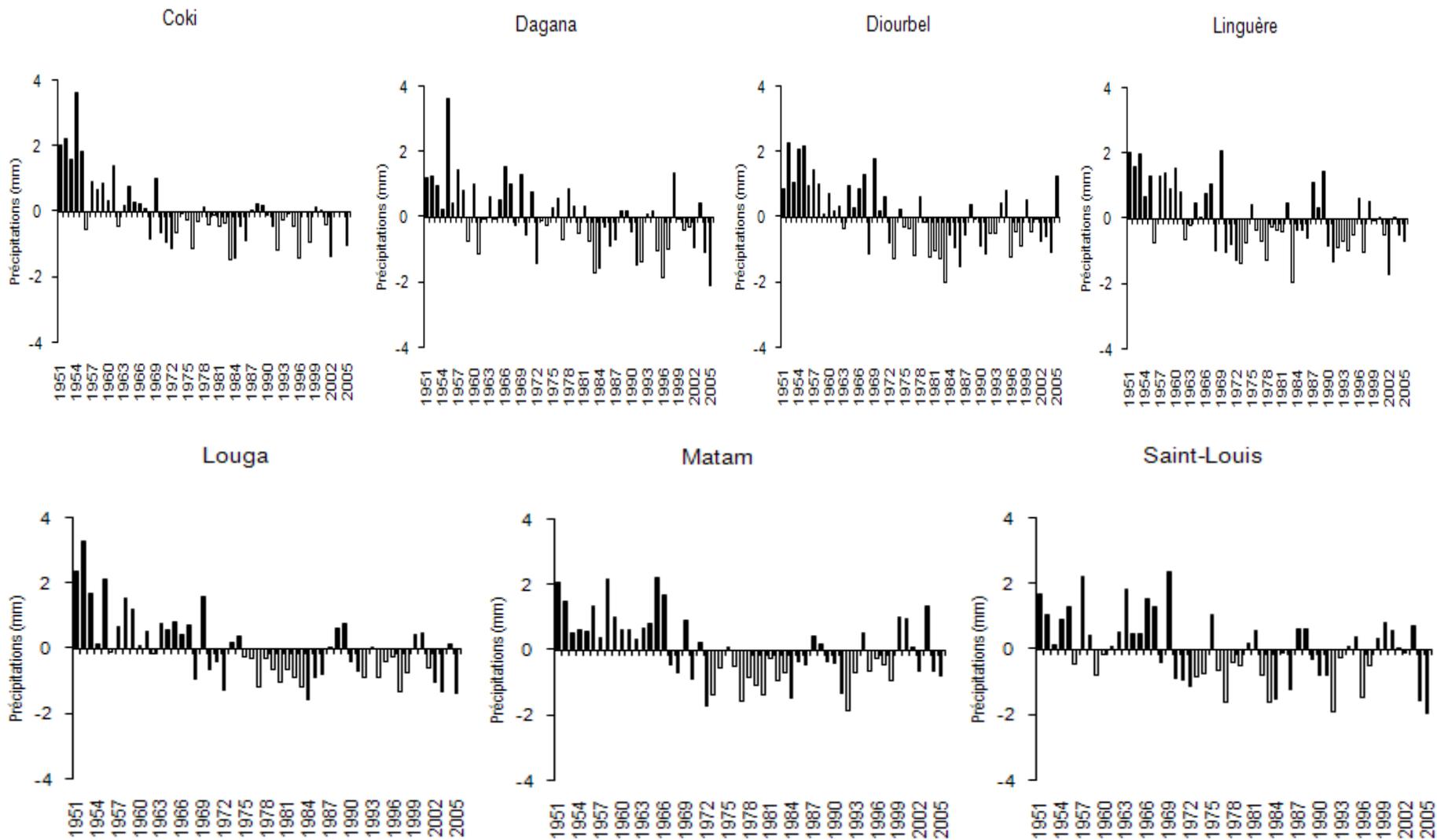


Figure 4. 11 : Évolution de l'Indice Standardisé des Précipitations au Ferlo (Sarr M. A., 2008)

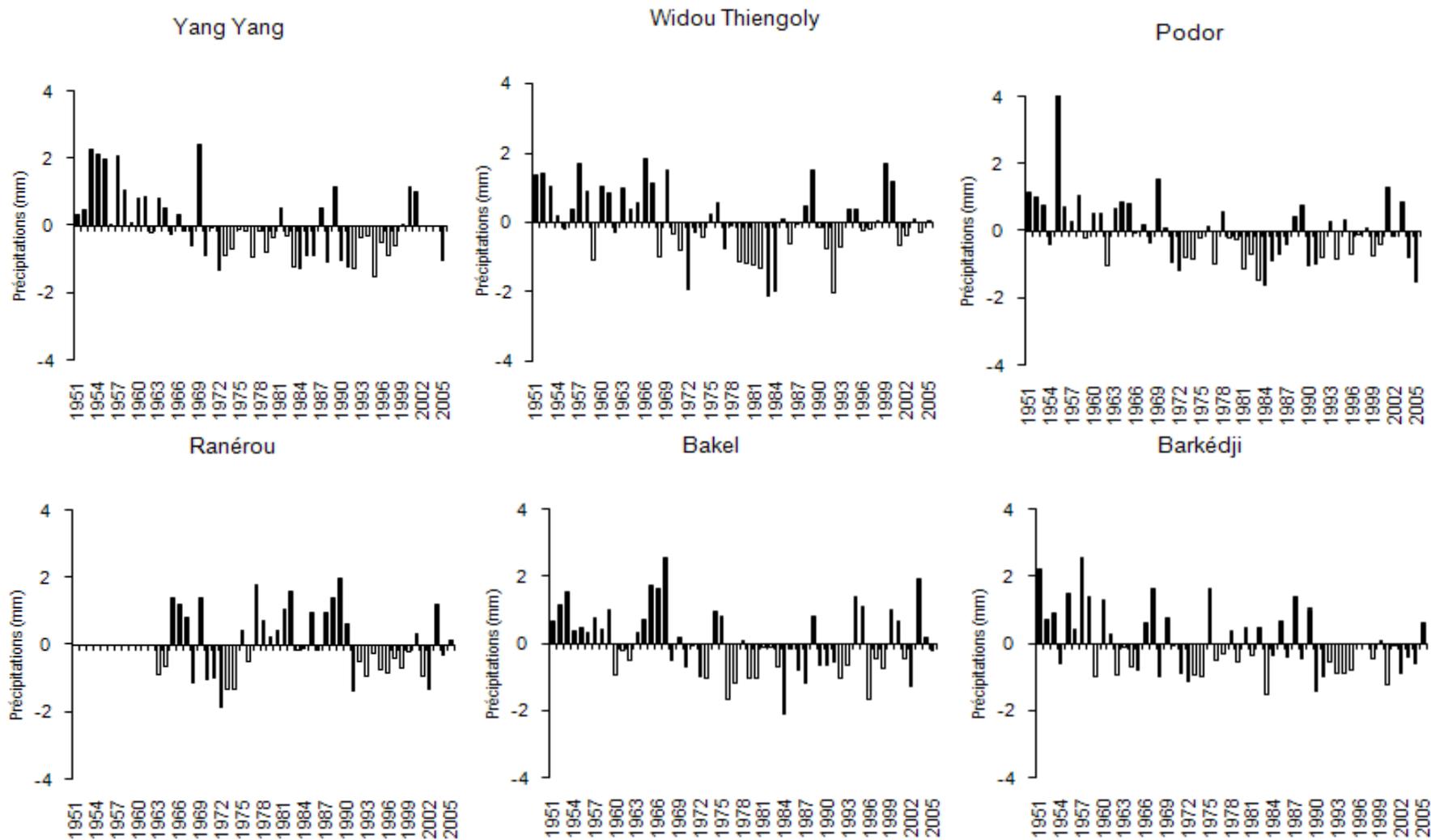


Figure 4. 12 : Évolution de l'Indice Standardisé des Précipitations au Ferlo (Sarr M. A., 2008)

Si la forte irrégularité de la pluviométrie sur toute la période considérée est confirmée dans les dernières années, une rupture nette de la tendance décroissante des cumuls annuels due à la stabilité et/ou à l'amélioration des précipitations enregistrées est notée sur le plan spatial. Il reste que cette irrégularité peut prendre un caractère très contraignant avec notamment des années de sécheresses très fortes provoquant la destabilisation de toute l'économie locale.

1.3. Les fluctuations décennales des précipitations

La technique des écarts à la moyenne consiste à définir, pour chaque station, le comportement de son cumul annuel par rapport à la moyenne depuis le début de la série jusqu'en 2005. La moyenne, rappelons le, n'a qu'une valeur indicative. Elle a permis de construire les courbes des écarts par rapport à la moyenne résultant d'un total annuel selon la moyenne de la série.

L'analyse des variations interannuelles de la pluviométrie sur la base des écarts des cumuls annuels par rapport à la moyenne de la série permet d'avoir une vision des fluctuations pour caractériser dans la globalité la succession d'années sèches et d'années humides. Dans une analyse des précipitations, surtout au Sahel, le problème de la période de référence doit être abordé (Mietton M., 1988). Le choix d'une étude selon des périodes décennales permet d'affiner l'analyse de l'évolution générale autour de la moyenne de la série (1951-2005). Une telle méthode permet d'obtenir de meilleurs résultats sur les réalités pluviométriques autour de la moyenne de la série que ceux fondés sur une prise en compte des normales pluviométriques sur 30 ans. Ainsi, plus la série est longue, plus les observations sont plus nombreuses et intéressantes. La série chronologique dont nous disposons est divisée en cinq décennies et une très courte période de cinq années.

1.3.1. La décennie 1951-1960

Rapportée à la moyenne 1951-2005, la décennie 1951-1960 qui marque en général le début de la diminution des précipitations, reste dans l'ensemble une période excédentaire au regard de la moyenne de la période, si on en juge par le nombre d'années excédentaires par rapport au nombre d'années déficitaires dans l'ensemble des stations. Au cours de cette

période, les fluctuations annuelles des stations traduisent des distributions forts différentes d'une station à une autre. Cependant, on peut distinguer trois types de comportements :

- Les stations qui n'enregistrent aucune année déficitaire, soit 100 % d'années excédentaires. Il s'agit des stations de Diourbel, Matam et Yang Yang. Les *maxima* sont importants. Par exemple, 406,4 mm d'excédent en 1952 à Diourbel et 387,7 mm de plus en 1953 à Yang Yang.

- Les stations qui enregistrent 90 % d'années excédentaires durant la décennie contre 10 % d'années déficitaires. Il s'agit de Bakel, Coki, Dagana, Linguère et Louga. Les maxima pluviométriques concernent les années 1953 à Bakel, 1954 à Coki, 1955 à Dagana, 1951 à Linguère et 1952 à Louga. Les excédents pluviométriques sont respectivement 241 mm, 651,1 mm, 397,2 mm, 254,3 mm et 511,4 mm par rapport à la moyenne de la série (1951-2005).

- Les stations qui enregistrent 80 % d'années aux cumuls annuels excédentaires. Les stations concernées sont Barkédji, Podor et Saint-Louis. Les années où les excédents sont plus importants sont 1957 (312,2 mm et 236,5 mm) respectivement à Barkédji et à Saint-Louis et 1955 (546 mm) à Podor. Parmi les années déficitaires, l'année 1959 est commune à toutes ces stations et c'est à Barkédji qu'elle enregistre le déficit le plus important avec 117,6 mm.

La décennie 1951-1960 reste incontestablement la plus pluvieuse de toute la série de mesures. On constate que les cumuls annuels les plus faibles sont enregistrés au niveau des stations situées au nord comme Saint-Louis et Podor.

1.3.2. La décennie 1961-1970

Cinq types de comportement caractérisent la situation pluviométrique des différentes stations de mesure au cours de cette période qui reste globalement moins pluvieuse que la précédente.

- 80 % des années sont excédentaires aux stations de Saint-Louis et de Diourbel où le maximum est noté en 1969 avec 318,9 mm dans chacune des stations. A Saint-Louis, les années déficitaires concernent 1968 et 1970.

- 70 % des années (de la période 1961-1970) sont excédentaires aux stations de Coki, Louga, Matam et Podor. Si nous observons les *maxima*, le plus fort se localise à Louga en 1969 avec 299,8 mm. Parmi les années déficitaires, nous avons 1970 (119,8 mm) à Matam, 141,5 mm en 1968 à Louga et aussi 147,9 mm en 1968 à Coki.

- 60 % des années connaissent un excédent à Bakel et à Linguère ; le maximum se situe en 1967 à Bakel et en 1969 à Linguère.

- 50 % des années sont déficitaires (1961-1970) au niveau des stations de Dagana et de Yang Yang. A Yang Yang, l'année excédentaire est remarquablement identifiée en 1969 avec 412,6 mm de plus que la moyenne alors que 1970 reste l'année la plus déficitaire avec également 147,8 mm de déficit.

- A Barkédji et à Ranérou, la situation pluviométrique représente 40 % d'années excédentaires contre 60 % d'années déficitaires. Les *minima* sont l'année 1968 (119,5 mm) et l'année 1962 (113,5 mm) à Barkédji. A Ranérou, la même année 1968 observe le plus grand déficit (- 253,1 mm) suivi de 1970 (- 225,3 mm)

Durant cette période, la répartition du nombre d'années déficitaires ou excédentaires en fonction des stations est moins évidente. La plupart des *maxima* annuels sont enregistrés au cours de l'année 1969, période à partir de laquelle une rupture traduisant le début de la grande sécheresse des années 1970 est observée dans la région sahélienne. Cette rupture de série est analysée dans les chapitres suivants.

1.3.3. La décennie 1971-1980

Cette période reste particulièrement déficitaire en ce sens qu'on passe de taux déficitaires très faibles durant la décennie précédente à des taux très forts. Dans cette nouvelle tendance, cinq groupes se dégagent :

- La station de Yang Yang qui comptabilise 100 % d'années déficitaires au cours de cette décennie. Les taux de déficits connaissent quelques disparités fortes.

- Les stations de Coki et de Linguère enregistrent 90 % d'années déficitaires. A Coki, seule l'année 1978 reste excédentaire avec 23,6 mm d'excédent et à Linguère, l'excédent est de 54,1 mm en 1975.

- Les stations de Matam, de Podor et de Saint-Louis enregistrent 80 % d'années déficitaires.

- Les stations de Bakel, Barkédji, Diourbel, Louga comptabilisent chacune 70 % d'années déficitaires. Nous notons également des valeurs fortes au niveau des déficits et des excédents. A Bakel par exemple, le minimum se situe à 228,7 mm de déficit en 1976 et le maximum enregistré en 1974 est de 132,1 mm d'excédent. Les variations entre les valeurs déficitaires et excédentaires sont donc relativement importantes.

- Le dernier type concerne les stations de Dagana et de Ranérou qui restent partagées en autant d'années déficitaires (50 %) que d'années excédentaires (50 %). En ce qui concerne Dagana, 153,3 mm symbolise le plus grand déficit en 1972 et 95,7 mm la valeur maximale en excédent en 1982. Le minimum est de 407,1 mm en 1972 et le maximum en 1977 avec 395,4 mm à Ranérou.

La décennie 1971-1980 fait partie des périodes les plus critiques sur la base de la lame d'eau tombée depuis le début des relevés pluviométriques dans la zone. Les années déficitaires sur l'ensemble de la région sont supérieures ou égales à 80 % sauf à Ranérou et à Dagana.

1.3.4. La décennie 1981-1990

Cette période traduit la persistance de la sécheresse, conséquence environnementale du déficit pluviométrique, des années 1970 avec quelques années de déficit très intense. Les années 1983 et 1984 représentent des moments d'une extrême sécheresse sur le plan végétal et socio-économique. Durant cette décennie, 5 types de comportement pluviométrique peuvent être identifiés.

- Les stations de Bakel et de Diourbel enregistrent 90 % d'années déficitaires. Les années 1984 (288,5 mm) et 1983 (356,4 mm) sont les plus déficitaires respectivement à Bakel et à Diourbel ; par contre l'année 1988 reste partout la plus excédentaire.

- 80 % des années sont déficitaires également à Matam et à Podor. Les années 1987 et 1988 sont les seules à enregistrer des excédents à Matam et 1988 et 1989 le sont aussi à Podor ; par contre 1984 est communément l'année la plus déficitaire.

- Les stations de Coki, Dagana, Louga, Saint-Louis et de Yang Yang, quant à elles, comptabilisent 70 % d'années déficitaires dans la décennie. A Coki, à Dagana, à Saint-Louis et à Yang Yang, 1983 représente l'année où le déficit est le plus important

268,8 mm à Coki, 186,2 mm à Dagana, 174,7 mm à Saint-Louis et 209,4 mm à Yang Yang. Ajoutons que 1988 reste l'année la plus excédentaire à Coki et à Dagana.

- A Barkédji et à Linguère, la décennie compte 60 % d'années déficitaires et l'année 1983 représente encore le minimum.

- La station de Ranérou est la seule à enregistrer 30 % d'années déficitaires contre 70 % d'excédentaires au cours de cette décennie. Les forts taux d'excédent se situent en 1982 (353,6 mm), en 1988 (309,9 mm) et en 1989 (433,8 mm) alors que le plus fort taux de déficit est de 36,1 mm en 1986.

La décennie 1981-1990 est aussi une période caractérisée par une forte fréquence d'années déficitaires. Moins pluvieuse que les décennies 1951-1960 et 1961-1970, la décennie 1981-1990 est moins déficitaire que la décennie 1971-1980, soit 75 % des stations ont 70 % d'années déficitaires contre 83 % à la décennie 1971-1980. Par ailleurs, les années 1983 et 1984 qui se démarquent par leurs fortes valeurs déficitaires durant cette décennie. Au contraire, l'année 1988 reste globalement la plus excédentaire dans le domaine du Ferlo.

1.3.5. La décennie 1991-2000

La décennie 1991-2000 reste caractérisée par un nombre d'années déficitaires supérieures aux années excédentaires. Par ailleurs, il faut noter un état global déficitaire avec quelques disparités spatiales et temporelles. D'ailleurs, la situation pluviométrique décennale met en évidence cinq types de comportement ;

- Le groupe des stations telles que Dagana, Diourbel, Linguère, Louga, Matam et Podor enregistre 70 % d'années excédentaires par rapport à la moyenne. L'année 1996 recense le plus grand déficit à Dagana (200,4 mm), à Diourbel (215,7 mm) et à Linguère. A Podor, c'est l'année 1991, à Louga et à Matam, c'est respectivement les années 1997 et 1992.

- La station de Saint-Louis reste divisée en autant d'années excédentaires (50 %) que d'années déficitaires.

- A Bakel, 40 % d'années sont excédentaires au cours de la période. 1996 est la plus déficitaire parmi toutes les années au contraire de 1994 qui reste la plus excédentaire avec 192 mm de plus que la moyenne.

- 20 % d'années excédentaires sont notées à Coki et à Yang Yang où les années 1999 et 2000 restent les plus excédentaires.

- A Barkédji et à Ranérou, 90 % des années se trouvent sous la moyenne de la série. Le plus grand déficit est de 149,2 mm en 2000 à Barkédji hormis les années 1996 et 1997 qui ne sont pas enregistrées donc non analysées.

Nous restons toujours dans une dynamique pluviométrique où le nombre d'années déficitaires reste supérieur au nombre d'années excédentaires par rapport à la moyenne 1951-2005. On remarque également que la décennie 1991-2000 est moins déficitaire que les décennies 1971-1980 et 1981-1990 mais aussi moins excédentaires que la décennie 1951-1960. L'année 1999 et l'année 2000 sont relativement les plus excédentaires et 1996 la plus déficitaire durant cette décennie.

1.3.6. La période 2001-2005

Cette période des cinq dernières années de la série reste une période avec plus d'années déficitaires. Les années 2003 et 2005 sont les années les plus excédentaires.

- Les stations de Barkédji, Dagana, Diourbel, Linguère, Louga et Ranérou enregistrent 80 % d'années déficitaires sur la période.

- Les stations de Bakel, Matam et de Podor enregistrent 60 % d'années déficitaires. L'année 2002 constitue le minimum à Bakel, 2001 à Matam et 2005 à Podor. Par contre le maximum (le plus fort taux d'excédent) est observé en 2003 à Bakel et en 2005 à Matam.

- La station de Saint-Louis ne recense que 40 % d'années déficitaires représentées par les années 2002 et 2004. Le reste des années comme 2004 se situe bien au dessus de la moyenne de la série.

Si les années déficitaires sont encore fortes, on observe une amélioration qui confirme les observations faites sur les volumes annuels précipités.

Si l'on s'en tient à un simple rapport à la moyenne 1951-2005 qui marque des tendances, on note dans les premières décennies une décroissance de la pluie ; les dernières décennies sont déficitaires. Cependant, en valeur relative, le déficit pluviométrique stagne dans un premier temps puis se réduit au cours des dernières décennies confirmant un redressement.

In fine, on constate que l'évolution pluviométrique décennale est variable d'une station à une autre, et autant d'une décennie à une autre. Matam et Podor se trouvent à 80 % d'années déficitaires sur la décennie 1981-1990 contre 70 % d'années excédentaires à la décennie suivante. Il reste que, globalement, cette étude décrit très nettement une tendance à la baisse depuis la décennie 1951-1960, qui s'est accentuée dans la décennie 1961-1970 et puis qui s'est plutôt stabilisée en 1971-1980. Les taux d'années excédentaires des deux dernières périodes de la série indiquent une inversion de la tendance.

L'analyse détaillée de l'évolution décennale permet quelques constats. Les années 1951, 1952, 1953, 1954 (sauf à Barkédji et à Podor), 1955, 1957, 1958, 1960 (excepté Bakel et Dagana), 1966 1969 et 1988 ont été dans toutes les stations excédentaires et 1969 est presque partout l'année où le maximum pluviométrique a été enregistré.

Parmi les années qui ont connu dans toutes les stations un déficit pluviométrique, nous avons 1968, 1972, 1977, 1983, 1984, 1986, 1990 (sauf à Ranérou), 1991, 1992, 1997, 2002, 2005 (sauf les stations de Barkédji, Diourbel, Saint-Louis). Il faut noter également la situation critique de l'année 1983, qui a enregistré les plus fortes valeurs déficitaires durant la décennie 1981-1990. A ce propos, Courel M. F., (1984) précise que 1983 apparaît comme l'année la plus sévère depuis l'origine des relevés météorologiques, tant au Sahel que dans les régions situées au sud.

En résumé, si une inversion de tendance est observée, elle reste encore modeste et traduit une situation toujours difficile en raison de l'irrégularité interannuelle des pluies et de la persistance d'années très sèches au sein des années marquées par une tendance générale à l'augmentation des valeurs précipitées. Les dernières décennies sont source d'espoir car elles expriment la fin en valeur absolue de l'aggravation du déficit pluviométrique dans le domaine d'étude. Après cette étude sur la pluviométrie par décennie sur la base des cumuls à l'échelle annuelle, il est intéressant d'analyser l'évolution des fluctuations intra-annuelles des précipitations.

1.4. Les fluctuations intra-annuelles des précipitations

1.4.1. Différences entre l'évolution pluviométrique saisonnière de l'année la plus sèche et de l'année la plus humide de la série

Les fluctuations interannuelles de la pluie ne sont que les conséquences de la variabilité pluviométrique mensuelle ou saisonnière interannuelle. Comme nous l'avons déjà évoqué, la saison des pluies, dans notre domaine d'étude, concerne les mois de juin, juillet, août, septembre et octobre. Les pluies de juin à septembre représentent, à elles-seules, plus de 90 % du total annuel. Au cours de la période d'étude (1951-2005), nous avons constaté des différences d'évolution entre les pluies mensuelles des années les plus sèches et celles des années les plus humides comme le montre à titre d'exemple l'évolution intra-annuelle des stations de Podor, Matam, Linguère, Diourbel, Coki, Barkédji et Bakel (figures 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 et 4.19).

En comparant la variation des pluies moyennes mensuelles de la série à celles de l'année la plus sèche et à celle de l'année la plus humide, pour chacune des stations, il apparaît très clairement et presque partout un écart pluviométrique important entre ces deux années extrêmes (figures 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, etc.). Mieux, ces graphiques mettent en évidence un maximum principal (en général en août) et un maximum secondaire (septembre le plus souvent) dans l'évolution pluviométrique saisonnière de l'année la plus humide de toute la série. Alors qu'au cours de l'analyse de l'évolution pluviométrique de l'année la plus sèche, le maximum secondaire est presque inexistant. On observe nettement la prédominance du mois d'août dans la quantité d'eau reçue dans l'année. Cette situation montre l'importance d'une bonne distribution des volumes précipités au cours de la saison pluvieuse.

Pendant les années les plus humides comparées aux années les plus sèches, la saison des pluies connaît une durée plus longue caractérisée par un démarrage au mois de mai (apports pluviométriques significatifs en juin) et une fin en octobre, mais surtout l'essentiel de la pluviométrie est concentrée au mois d'août comme aux stations de Podor, Barkédji et Bakel. Cette situation implique que les sécheresses se caractérisent donc par une perturbation sur plusieurs années de la variation intra-annuelle normale des pluies mensuelles, notamment une forte baisse des précipitations du mois d'août. Selon Morel R., (1991), le mois d'août qui bénéficie de la structure ZICT⁴² du développement vertical subit

⁴² ZICT : Zone de Convergence Intertropicale ou selon Leroux M., l'équateur météorologique vertical

la plus forte baisse de pluviosité, alors que les distributions des pluies des mois de mai et de juin restent inchangées.

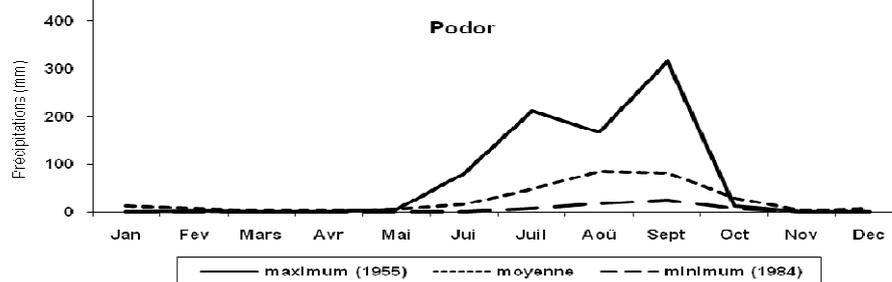


Figure 4. 13 : Variation de la pluie moyenne mensuelle (1951-2005) comparée à la situation de l'année la plus humide et de l'année la plus sèche à Podor

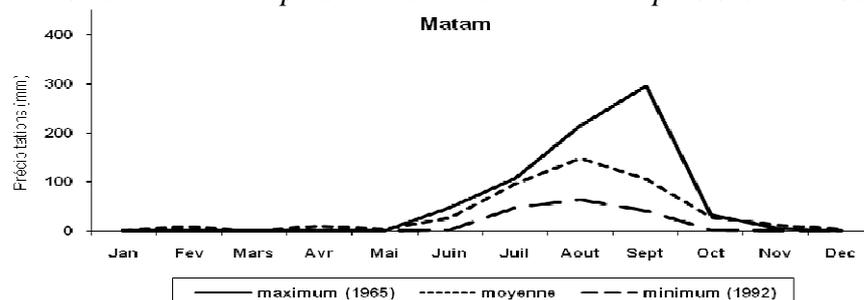


Figure 4. 14 : Variation de la pluie moyenne mensuelle (1951-2005) comparée à la situation de l'année la plus humide et de l'année la plus sèche à Matam

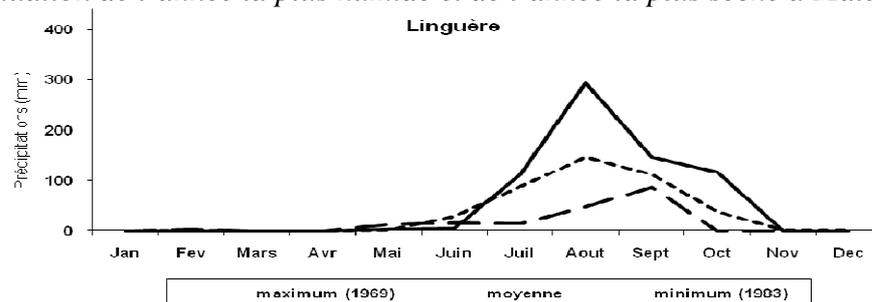


Figure 4. 15 : Variation de la pluie moyenne mensuelle (1951-2005) comparée à la situation de l'année la plus humide et de l'année la plus sèche à Linguère

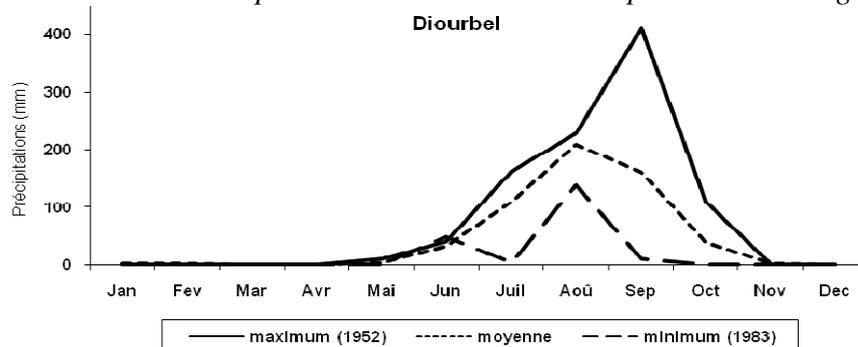


Figure 4. 16 : Variation de la pluie moyenne mensuelle (1951-2005) comparée à la situation de l'année la plus humide et de l'année la plus sèche à Diourbel

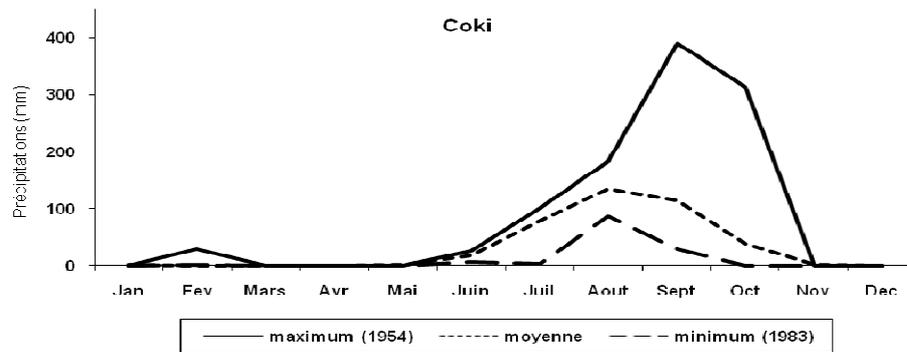


Figure 4. 17 : Variation de la pluie moyenne mensuelle (1951-2005) comparée à la situation de l'année la plus humide et de l'année la plus sèche à Coki

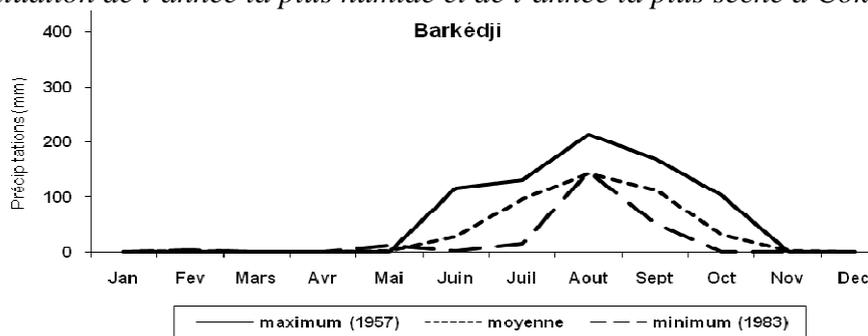


Figure 4. 18 : Variation de la pluie moyenne mensuelle (1951-2005) comparée à la situation de l'année la plus humide et de l'année la plus sèche à Barkédji

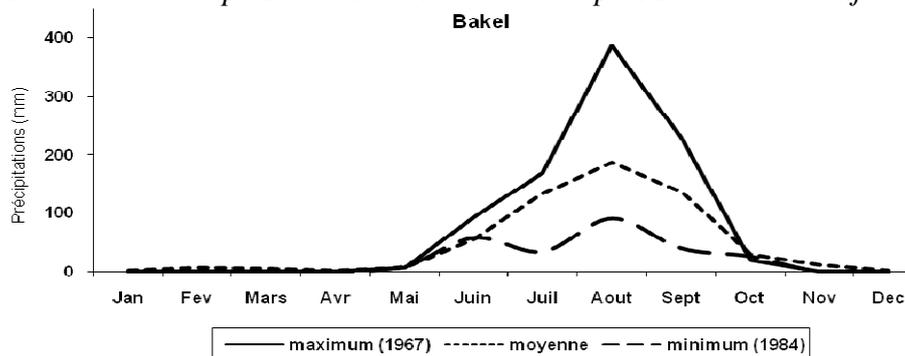


Figure 4. 19 : Variation de la pluie moyenne mensuelle (1951-2005) comparée à la situation de l'année la plus humide et de l'année la plus sèche à Bakel

D'ailleurs le mois d'août représente indiscutablement le maximum pluviométrique de la saison, en d'autres termes, le mois où les fréquences des *maxima* pluviométriques sont les plus importantes (**tableau 4.5**). Les mois de juillet et de septembre font également partie des périodes de la saison qui connaissent des apports maximums mensuels de pluies importants comme c'est le cas à la station de Saint-Louis : 24 fois en septembre au lieu de 23 en août sur 55 ans. La situation pluviométrique du mois d'octobre, représentant aussi la fin des pluies dans cette partie du Sénégal met en évidence quelques *maxima* durant la série. Remarquons également que dans les stations de Bakel et de Matam, les plus orientales, les fréquences de maximum pluviométrique observées en août sont plus

importantes que celles observées en septembre dans les stations de Louga, Linguère, Barkédji, Diourbel (**tableau 4.5**). Dans ces stations là, le nombre de fréquences de maximum pluviométrique en juillet est presque insignifiant (tableau 4.5).

La variation des pluies moyennes mensuelles de la série comparée à celles de l'année la plus sèche et à celles de l'année la plus humide, montre en terme d'évolution une meilleure distribution temporelle et une durée plus longue des précipitations pour les années plus humides.

1.4.2. L'évolution des précipitations au cours de la saison des pluies (1951-2005)

Avant l'analyse des courbes d'évolution des précipitations au cours de la saison des pluies permettant de voir les éléments qui influent sur la tendance générale, il est intéressant de mettre en évidence le climat saisonnier moyen traduisant d'une façon nette un gradient pluviométrique dans le domaine d'étude.

- Sur le plan spatial, la distribution des valeurs moyennes mensuelles de précipitations sur la période 1963-2005 montre une organisation du gradient en fonction des mois de la saison. La spatialisation des valeurs moyennes mensuelles de la série met en évidence deux situations visibles sur l'espace étudié (**figures 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24**). La spatialisation des cumuls mensuels de juin et de juillet traduit un gradient pluviométrique nord-ouest sud-est alors que ceux des mois d'août et de septembre définissent nettement un gradient nord-sud. Ces configurations sont dues à une entrée de la mousson en mai-juin avant une stabilisation de la trace au sol de l'équateur météorologique au dessus de la région en août-septembre confirmant les précipitations les plus importantes de la saison.

Ainsi l'analyse de l'organisation des valeurs moyennes mensuelles de précipitations permet de confirmer la dynamique générale de la pluviogenèse sur cette partie de l'Afrique (cf. chapitre 2).

	Bakel Série : 55 ans				Barkédji Série : 53 ans				Coki Série : 52 ans				Dagana Série : 55 ans				Diourbel Série : 55 ans				Linguère Série : 55 ans			
	M ⁴³	E.T ⁴⁴	C.P ⁴⁵	F.M.P ⁴⁶	M	E.T	C.P	F.M.P	M	E.T	C.P	F.M.P	M	E.T	C.P	F.M.P	M	E.T	C.P	F.M.P	M	E.T	C.P	F.M.P
Juin	54,9	35,3	0,1		28,9	32,9	0,1		18,3	28,6	0,0		9,0	14,7	0,04		31,8	31,7	0,1	1	28,4	33,3	0,1	1
Juillet	133,2	59,2	0,2	11	96,2	42,5	0,2	2	79,3	53,4	0,2	10	43,6	34,8	0,2	6	109,5	64,7	0,2	4	89,0	51,2	0,2	3
Août	186,0	81,1	0,3	33	143,0	60,6	0,3	36	135,0	71,6	0,3	24	88,3	50,4	0,4	28	208,9	93,4	0,4	36	146,3	62,5	0,3	33
Septembre	136,0	75,6	0,2	11	113,1	68,4	0,3	14	113,5	75,7	0,3	18	67,0	55,3	0,3	18	160,1	74,9	0,3	14	112,4	57,1	0,3	15
Octobre	29,8	30,1	0,05		31,7	38,3	0,08	1	38,5	58,6	0,1		19,6	34,3	0,1	3	37,9	41,6	0,1		39,3	47,9	0,1	3

	Louga Série : 55 ans				Matam Série : 55 ans				Podor Série : 55 ans				Ranérou Série : 42 ans				Saint-Louis Série : 55 ans				Yang Yang Série : 52 ans			
	M	E.T	C.P	F.M.P	M	E.T	C.P	F.M.P	M	E.T	C.P	F.M.P	M	E.T	C.P	F.M.P	M	E.T	C.P	F.M.P	M	E.T	C.P	F.M.P
Juin	12,7	20,8	0,04		26,8	24,4	0,1		15,6	17,0	0,1		36,3	41,1	0,1		10,9	14,2	0,04		22,1	23,7	0,1	1
Juillet	63,7	51,6	0,2	4	96,8	54,2	0,2	14	48,0	44,1	0,2	6	127,1	75,2	0,2	6	42,0	41,5	0,2	4	75,2	52,1	0,2	5
Août	137,4	75,1	0,4	36	147,8	69,0	0,4	30	85,7	55,5	0,3	28	198,8	111,3	0,4	27	96,3	59,7	0,4	23	125,6	78,1	0,3	27
Septembre	105,2	64,0	0,3	15	105,0	59,2	0,3	11	83,0	58,0	0,3	19	145,5	89,9	0,3	7	94,1	63,0	0,3	24	110,5	72,6	0,3	17
Octobre	30,1	42,8	0,1		28,4	32,7	0,1		28,9	38,8	0,1	2	42,0	51,7	0,1	2	40,2	54,7	0,1	4	39,1	50,2	0,1	2

Tableau 4. 5 : Valeurs caractéristiques de la variabilité intra-annuelle de 1951 à 2005 (Sarr M. A., 2008)

⁴³ M : Moyenne mensuelle (en mm) 1951-2005

⁴⁴ ET : Ecart-Type mensuel 1951-2005

⁴⁵ C.P : Coefficient Pluviométrique 1951-2005 : rapport de la pluie mensuelle sur la pluie annuelle

⁴⁶ F.M.P : Fréquence Maximum Pluviométrique de 1951 à 2005

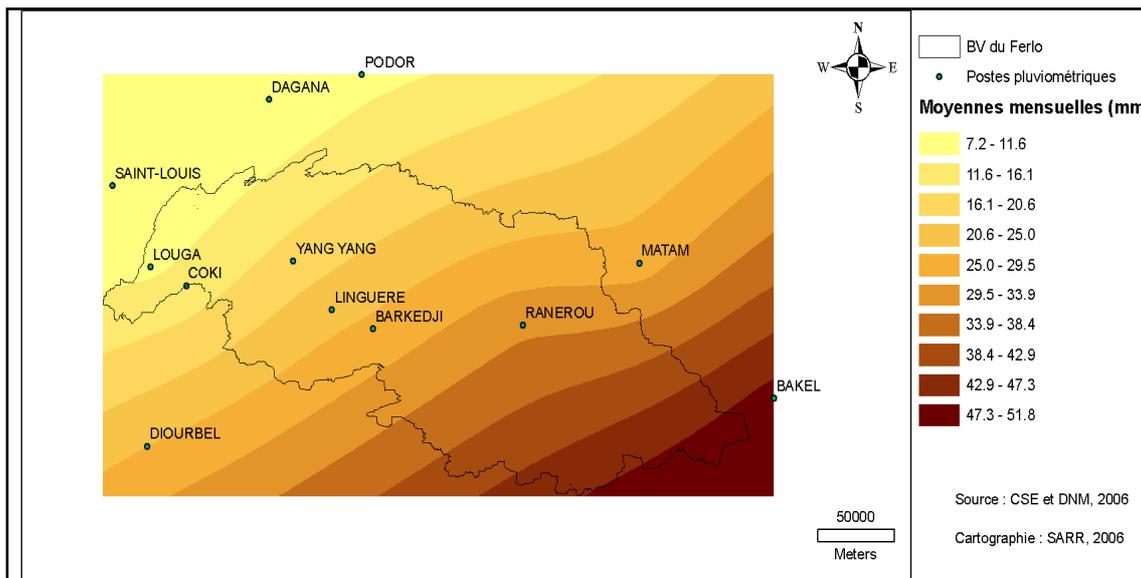


Figure 4. 20 : Spatialisation des cumuls moyens mensuels en juin de 1963 à 2005

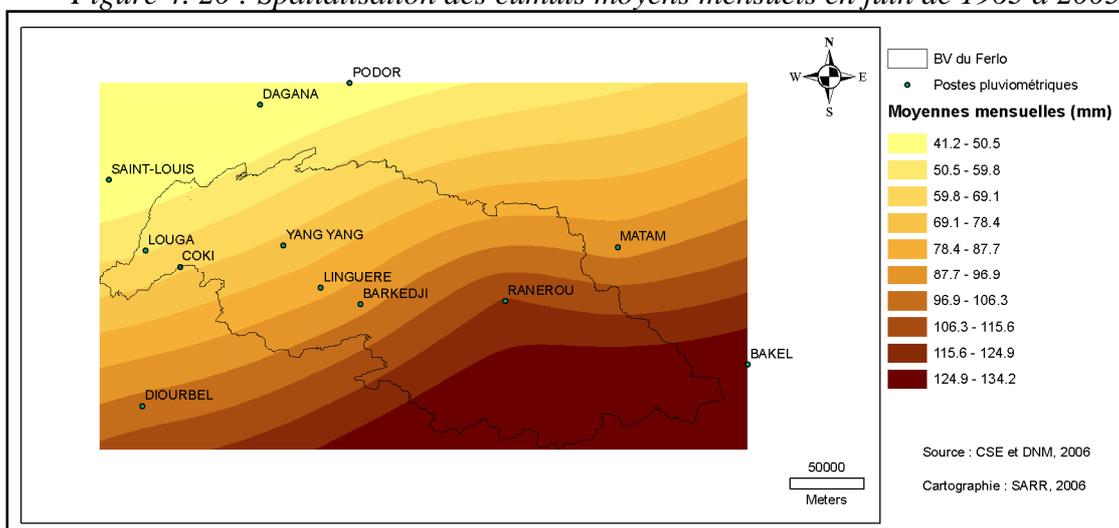


Figure 4. 21 : Spatialisation des cumuls moyens mensuels en juillet de 1963 à 2005

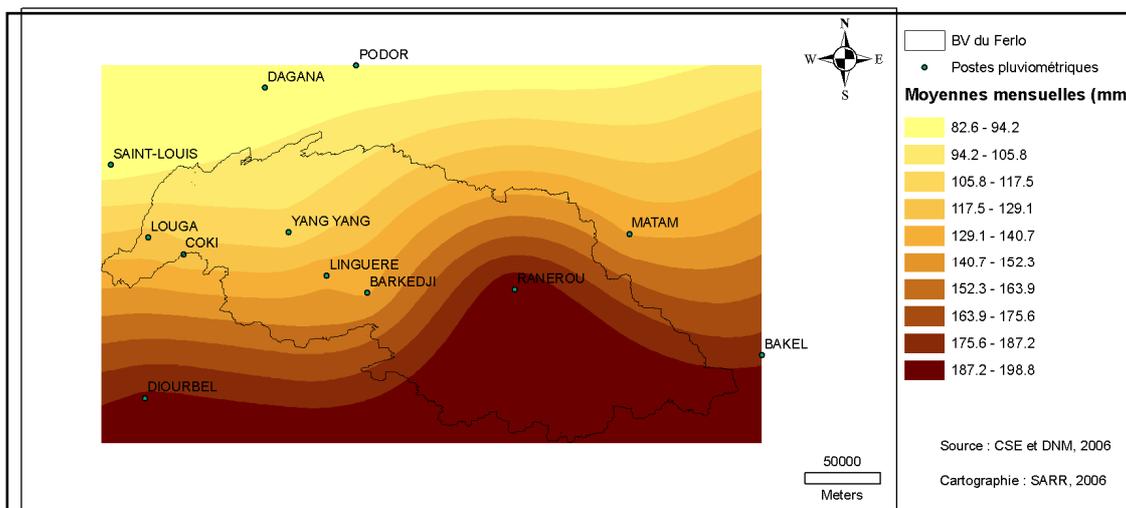


Figure 4. 22 : Spatialisation des cumuls moyens mensuels en août de 1963 à 2005

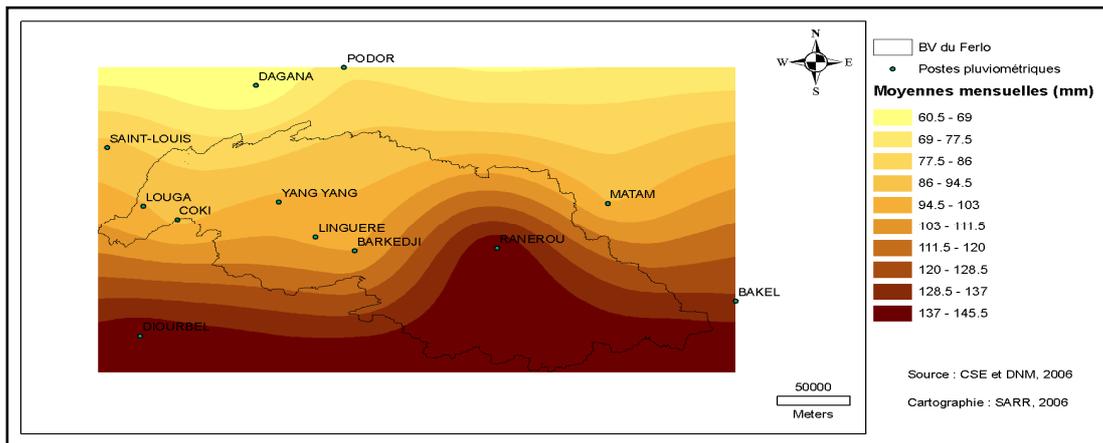


Figure 4. 23 : Spatialisation des cumuls moyens mensuels en septembre de 1963 à 2005

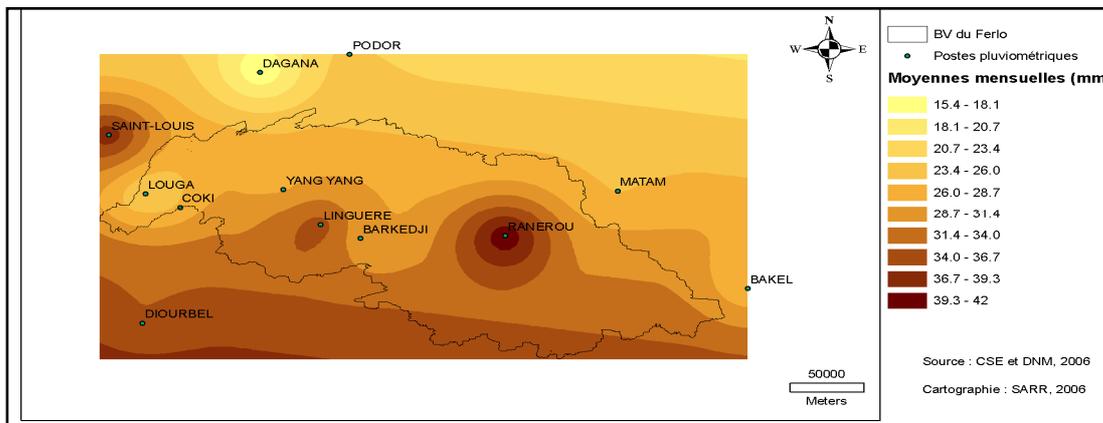


Figure 4. 24 : Spatialisation des cumuls moyens mensuels en octobre de 1963 à 2005

Évolution des précipitations saisonnières de 1951 à 2005 : des tendances confirmées

- Les courbes d'évolution saisonnière des volumes précipités de l'ensemble des stations du Ferlo montrent l'influence non négligeable que peut avoir chaque mois de la saison des pluies dans le bilan pluviométrique annuel (**figure 4.25**). Si la variabilité interannuelle des pluies annuelles est confirmée, on note :

- Une variabilité moins marquée aux mois de juin et octobre comparés aux mois d'août et de septembre où l'irrégularité interannuelle est la plus forte. Il apparaît donc clairement que les fluctuations annuelles des pluies sont fortement conditionnées par le comportement des mois les plus pluvieux de la saison des pluies, notamment août et septembre.

Une observation confirmée par l'évolution des pluies saisonnières, on note :

- Une amélioration très remarquable des volumes précipités enregistrés pendant les mois d'août et de septembre et ce depuis les années 1985-1986. En revanche les pluies en juin et en octobre n'ont pas connu de

tendance significative à partir de cette même date (exemple à Matam, **figure 4.25** ; et à Louga, à Linguère, à Diourbel, **cf. annexes**).

- Un cas à part avec une nette tendance à la hausse de l'apport pluviométrique du mois de juillet dès la fin des années 1980 (Barkédji par exemple).

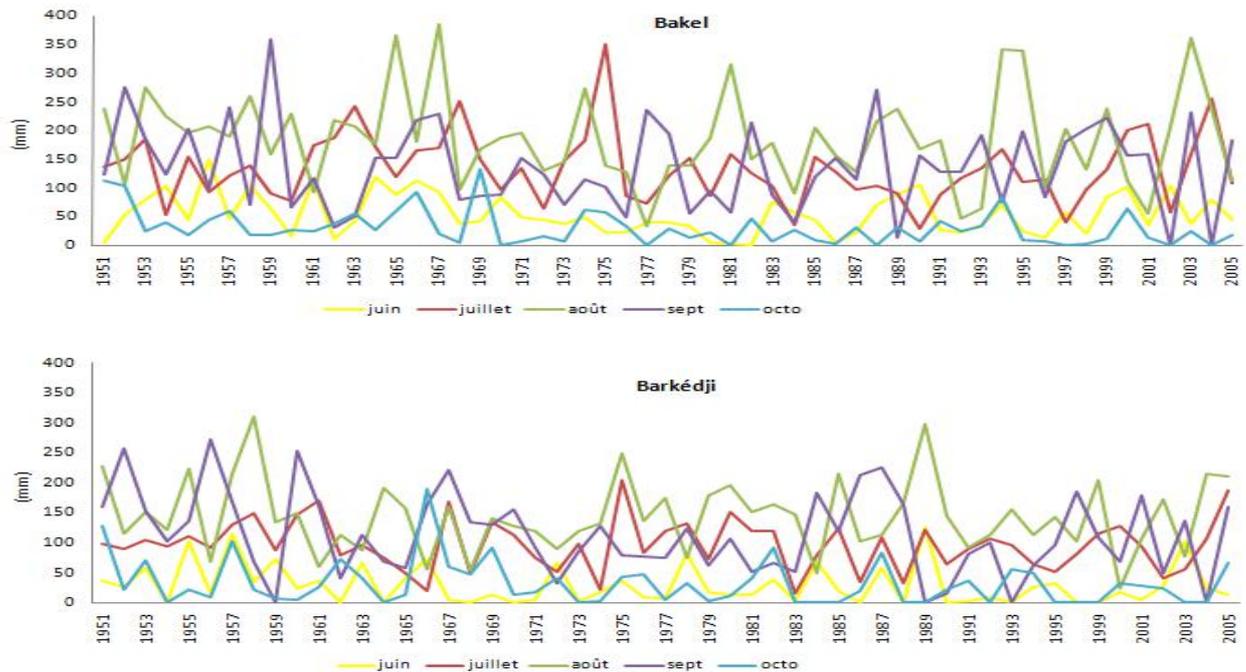


Figure 4. 25 : Évolution saisonnière des précipitations de quelques stations (Sarr M. A., 2008)

La variation intra-annuelle des précipitations se caractérise en fonction de la quantité de pluie enregistrée au cours des différents mois. Que le maximum soit observé précocement (juillet) ou plus tardivement (septembre ou octobre), il résulte essentiellement de la durée de la saison pluvieuse et du nombre de jours de pluies qui sont d'une importance capitale pour le monde agricole et pastoral. D'ailleurs, un démarrage tardif de la saison des pluies crée inévitablement des déséquilibres écologiques (augmentation de la mobilité pastorale, assèchement des points d'eau, déficit de productions primaires végétales, etc...) et des déficits alimentaires importants touchant le tissu social communautaire. Cette situation s'aggrave si on y ajoute une fin précoce des pluies. En revanche, l'installation précoce de l'hivernage a plus tendance à donner de l'espoir et de l'espérance au monde rural, et ce, même si cela n'assure en rien un bon déroulement à terme de la saison.

2. LES JOURS DE PLUIE : CONFIRMATION D'UN TOURNANT

En raison de carences notables de données, l'analyse de l'évolution du nombre de jours de pluie concerne uniquement les stations de Barkédji, Diourbel, Louga, Matam, Podor et Saint-Louis sur la période 1951-2005. Il n'est considéré, pour des raisons de grosses lacunes voire d'enregistrements quasi inexistantes, que le nombre de jours de pluie enregistré pendant la saison des pluies. Les traces au sol n'ont pas été comptabilisées car elles ne sont que très rarement relevées. En revanche, les petites pluies de quelques dixièmes de millimètres ont été conservées puisqu'elles correspondent à une situation pluvieuse.

Nous analyserons d'une part la répartition globale du nombre de jours de pluie sur le domaine d'étude et d'autre part, le rapport quantité de pluie/jours de pluie afin d'évaluer les évolutions et leurs relations surtout au cours des dernières décennies.

2.1. Une tendance à la hausse dans les dernières décennies

Un gradient nord/sud logique : la distribution spatiale du nombre de jours de pluie sur les 55 dernières années confirme un gradient nord/sud. Le nombre moyen de jours de pluie augmente généralement et logiquement du nord au sud (**tableau 4.6**). En effet, à l'échelle de la région, Podor est la station qui a concentré en moyenne le moins de jours de pluie suivie de Saint-Louis. Diourbel, la station la plus méridionale, connaît le plus grand nombre de jours de pluie, devant Matam.

Stations	Nombre moyen de jours de pluie (1951-2005)	Nombre d'années déficitaires par rapport à la moyenne	Nombre d'années excédentaires par rapport à la moyenne
Podor	23	30	25
Saint-Louis	25	30	25
Louga	28	33	22
Barkédji	26	28	25
Matam	33	28	27
Diourbel	45	27	28

Tableau 4. 6 : Nombre de jours de pluie et caractéristiques des années par rapport à la moyenne de la série (1951-2005) (Sarr M. A., 2008)

On remarque, pour la presque totalité des stations, sauf à Diourbel, un plus grand nombre d'années déficitaires que d'années excédentaires par rapport à la moyenne de la série d'une part, et un déficit quantitatif plus accentué dans les stations au nord qu'au sud d'autre part (**tableau 4.6**). Cependant, les variations interannuelles du nombre de jours de pluie fluctuent d'une station à une autre traduisant également quelques disparités (**figure 4.26**). Néanmoins, on peut clairement identifier des groupes d'années caractérisant une tendance particulière.

En première lecture, au regard à la moyenne, on constate :

A Barkédji, avec une moyenne de la série de 26 jours de pluie, on constate une succession d'années positives (excédentaires) et d'années négatives (déficitaires) jusqu'à la fin des années 1980 pour déboucher sur une période totalement déficitaire du début des années 1990 à 2005.

A Diourbel, par rapport à la moyenne de la série qui se situe aux environs de 45 jours de pluie, on a une première période fortement excédentaire de 1951 à 1969 et une deuxième période comprenant 77 % d'années déficitaires et 23 % d'années excédentaires.

A Louga, on peut diviser la série en trois périodes. D'abord, une première période excédentaire de 1951-1959, ensuite une période de 39 années (1960-1999) avec 80 % d'années déficitaires et 20 % d'années excédentaires et enfin une troisième période, de 2000 à 2005 comprenant 5 années excédentaires.

A Matam, on constate que de 1951 à 1967, toutes les années sauf 1961, ont des cumuls saisonniers largement au dessus de la moyenne de la série (33 jours de pluie). De 1968 à 2005, on a une longue période caractérisée par plus d'années déficitaires que d'années excédentaires. A l'intérieur de cette dernière, la succession de plusieurs années de déficits importants (1976-1984) traduit la dureté de la sécheresse de 1983 et 1984 comparée à celle des années 1970.

A Podor et à Saint-Louis, l'évolution du nombre de jours de pluie, bien que marquée par une fluctuation d'années positives (excédentaires) et d'années négatives (déficitaires), permet d'observer une période commune particulière. Cette période entièrement déficitaire (excepté l'année 1975 et l'année 1978), de 1970 à 1987, englobe les sécheresses très marquées des années 1970 et 1980 que le Sahel a connues.

En seconde lecture, une tendance là encore à relativiser :

Si l'on échappe à la référence à la moyenne, comme pour les valeurs, l'analyse de l'évolution du nombre de jours de pluie sur la période étudiée **indique une tendance générale à la baisse jusqu'aux années 1980 suivie d'une période de stabilisation et/ou d'une hausse (figure 4.26)**. La fin des années 1970 et/ou le début des années 1980 représente là aussi un tournant dans l'évolution du nombre de jours de pluie. En outre, l'année 1983 reste déficitaire sur toutes les stations comme c'est le cas d'ailleurs au niveau des précipitations, par contre l'année 2005 est partout excédentaire ce qui n'est pas le cas au niveau des précipitations. Ce constat nous amène à analyser le degré de corrélation entre les valeurs précipitées et le nombre de jours de pluie. Selon Ndong J. B., (1996), c'est plutôt l'abondance de chaque épisode de pluies et leur bonne répartition spatiale au cours de la saison des pluies qui donne un cachet particulier à chaque saison des pluies.

2.2. Les jours de pluie et les cumuls annuels des précipitations

L'analyse des relations entre le nombre de jours de pluie et les volumes précipités permet plusieurs constats (**tableau 4.6**). L'évolution de la corrélation annuelle peut se résumer en deux points :

1- Un nombre de jours de pluie maximal correspond à la quantité de pluie maximale. C'est le cas par exemple de la station de Podor et de Barkédji. Il apparaît clairement que la corrélation n'est pas systématique.

2- Il est aussi constaté que le nombre de jours de pluie minimal est corrélatif à la quantité de pluie minimale. Deux exemples à Diourbel et à Louga étayent cette évolution commune.

En règle générale, le **tableau 4.7** et la **figure 4.26** traduisent d'une manière évidente la forte corrélation entre le nombre de jours de pluie et les volumes précipités. Il existe néanmoins quelques irrégularités propres à chaque paramètre (évolution divergente) qui sont relativement masquées par l'évolution commune.

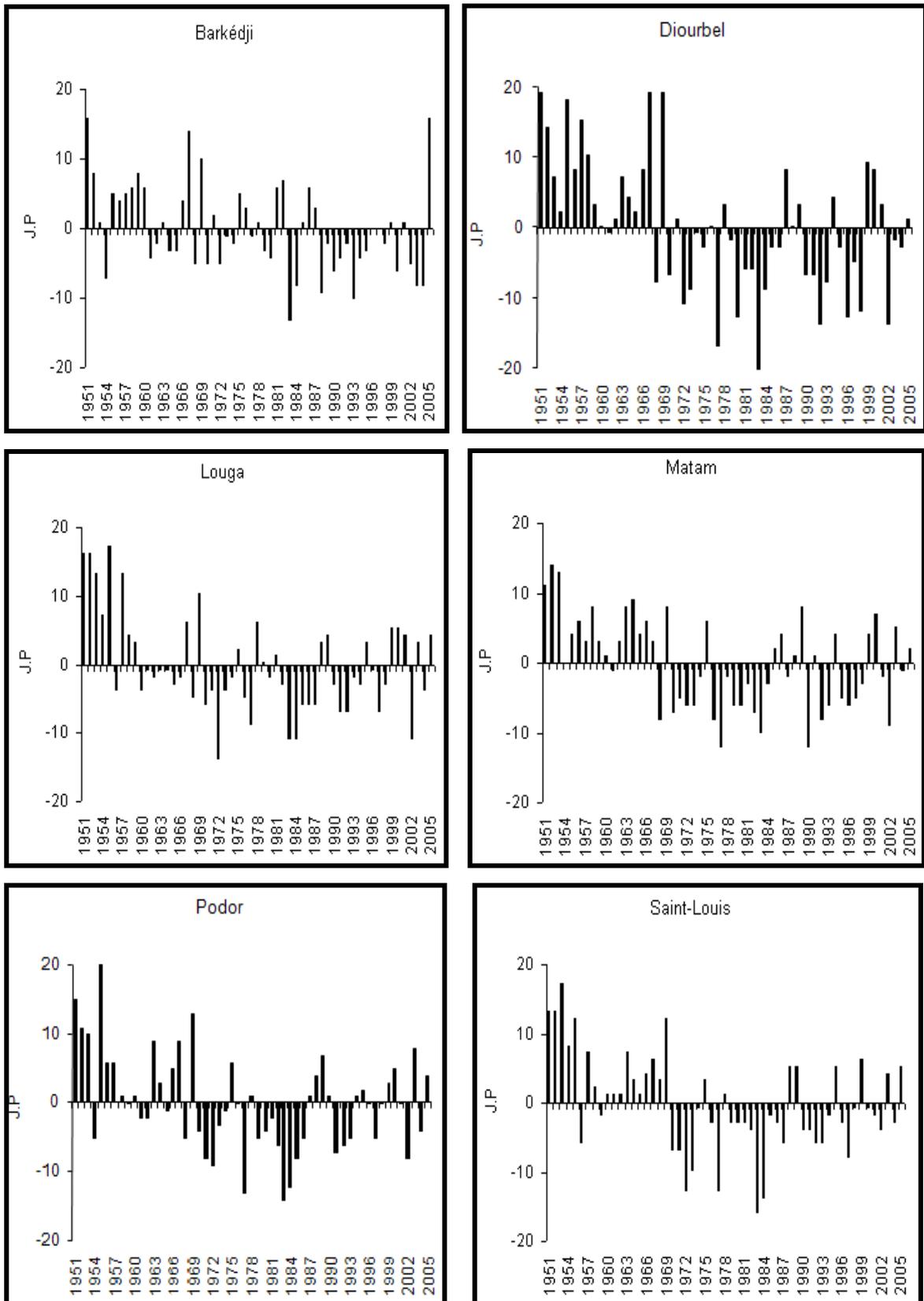


Figure 4. 26 : Les variations interannuelles du nombre de jours de pluie (J.P) au tour de la moyenne de la série 1951-2005 (Sarr M. A., 2008)

- On observe une augmentation du nombre de jours de pluie alors que l'on note une diminution des précipitations. Ce cas de figure est moins fréquent dans l'évolution comparée du nombre de jours de pluie et des cumuls pluviométriques. Les quelques exemples concernés par cette situation et que l'on peut citer sont :

A Barkédji, on a recueilli en 1971 un cumul de 309,2 mm en 28 jours et en 1986 : 368,5 mm en 32 jours de pluie.

Diourbel a recueilli en 1963 en 52 jours de pluie un cumul de 494,3 mm.

Louga a enregistré en 1975 en 30 jours de pluie 317,3 mm et aussi en 2005, un total annuel de 363,1 mm.

- On remarque une diminution du nombre de jours de pluie qui s'accompagne de forts cumuls des précipitations. Les cas sont assez nombreux, parmi lesquels on peut citer :

Matam a relevé en 1965 un cumul de 700,6 mm en 37 jours. On a également enregistré 311,5 mm en 23 jours en 1983 et en 1987 : 459,3 mm en 31 jours.

Saint-Louis a recueilli 373,4 mm en 33 jours en 1954 et en 1987 : 342,7 mm en 19 jours. En 1997, on a également 220,2 mm en 17 jours de précipitations.

Paramètres Stations	Nombre de jours de pluie						Cumul annuel					
	Maximum			Minimum			Maximum			Minimum		
	Jours	Cumul	Année	Jours	Cumul	Année	Jours	Cumul	Année	Jours	Cumul	Année
Podor	45	793,4	1955	9	76	1983	45	793	1955	11	57	1984
Saint Louis	42	289	1953	9	100	1983	32	532	1957	19	67	1992
Louga	45	685	1955	14	156	1972	44	865	1952	17	114	1984
Barkédji	42	689	1951	13	230	1983	31	730	1957	13	230	1983
		638	2005									
Matam	47	603	1952	21	194	1977	37	701	1965	25	152	1992
					350	1990						
Diourbel	64	711	1951	24	200	1983	59	963	1952	24	200	1983
		783	1967									
		875	1969									

Tableau 4. 7 : Correspondances des valeurs maximales et minimales des nombres annuels de jours de pluie et des cumuls annuels de précipitations traduisant de fortes corrélations entre ces deux paramètres (Sarr M. A., 2008)

Dans l'analyse de l'évolution du nombre de jours de pluie et sa comparaison avec les volumes totaux annuels précipités dans le bassin versant du Ferlo, on peut observer :

1. **Des coefficients de corrélation très forts dans la majorité des stations analysées ce qui traduit l'existence d'une bonne corrélation entre ces deux paramètres (figure 4.27). Cette corrélation n'est pas cependant systématique.** Les plus forts taux sont 0,80 à Diourbel et à Louga, les plus faibles sont localisés à Barkédji (0,71) et à Matam (0,74). Podor et Saint-Louis expriment respectivement 0,78 et 0,77 de valeur de coefficient de corrélation.

2. Là encore le caractère très irrégulier des saisons des pluies marqué par l'alternance d'années déficitaires et d'années excédentaires sur la série étudiée.

3. Une diminution du nombre de jours de pluie et des précipitations jusqu'aux années 1970-1980, suivie d'un moment fort de rupture pluviométrique marqué par une période de stabilité et/ou de hausse de ces deux paramètres selon les stations de mesure (**figure 4.27**). Barkédji et Louga montrent une stabilité dans l'évolution commune du nombre de jours de pluie et des volumes précipités. En revanche, Matam, Podor, Diourbel et Saint-Louis font état d'une nette hausse.

L'évolution du nombre de jours de pluie sur la période 1951-2005 confirme les tendances observées sur les précipitations. Le nombre de jours de pluie enregistré au cours de ces dernières décennies traduit la fin de l'aggravation du déficit pluviométrique dans sa distribution. En revanche, s'il est encore difficile d'évoquer une rupture dans l'évolution climatique, sur les plans cartographique et statistique elle paraît évidente grâce aux changements d'allure des courbes d'évolution et des moyennes. L'utilisation de tests de stationnarité dans l'analyse des séries pluviométriques permet de valider ces changements de tendance.

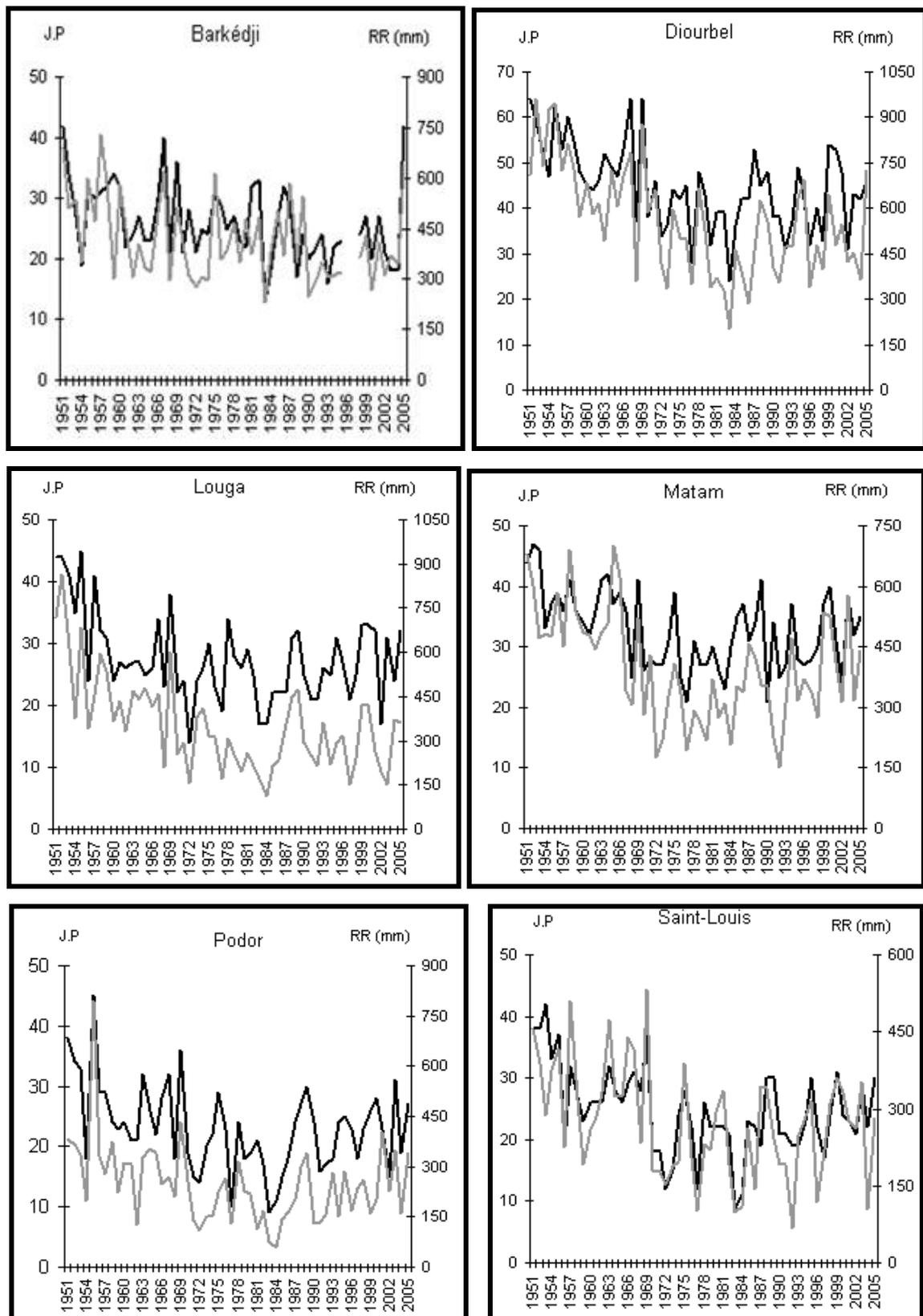


Figure 4. 27 : Évolution des jours de pluie (J.P) et des précipitations (RR) (1951-2005)
(Sarr M. A., 2008)

— J.P — RR (mm)

3. L'APPROCHE STATISTIQUE DES TESTS DE RUPTURES DE SÉRIES PLUVIOMÉTRIQUES DANS LE DOMAINE D'ÉTUDE

Les premières analyses semblent mettre en évidence des nouvelles tendances pluviométriques et/ou des ruptures de séries chronologiques au cours des dernières décennies. Selon Ardoin S., (1994), en terme statistique une rupture peut être définie de façon générale par un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu. Il est retenu dans cette étude deux méthodes statistiques de détection de rupture sur la base de leur utilisation régulière, simple et pertinente sur des séries hydropluviométriques dans les régions tropicales. La simplicité de leur utilisation et la facilité d'interprétation des résultats générés, souvent avec des graphiques, ont motivé notre choix. Selon Bigot S., (2002), la qualité de la plupart de ces méthodes tient aussi en effet à leur capacité à fournir des outils pour la visualisation graphique des résultats qui les rendent facilement utilisables par un utilisateur peu expérimenté. Les techniques de détection de ruptures les plus couramment utilisées, parmi tant d'autres, sont la méthode de segmentation de Hubert (Hubert P., et *al.*, 1987, 1989, 1998 et 2005), la méthode SMWDA⁴⁷ (SMWDA n'est pas fondamentalement meilleure que d'autres procédures, telles que la segmentation, Communication orale de Camberlin P.⁴⁸) et le test bayésien de Lee et Heghinian (Lee A. F. S. et Heghinian S. M., 1977). Ces méthodes statistiques ont permis d'estimer les tendances et les fluctuations des régimes pluviométriques et hydrologiques en Afrique de l'Ouest mais pas sur une échelle fine comme le Ferlo et en règle générale sur des séries moins récentes que celle retenue par cette étude.

Entre les tropiques, particulièrement en Afrique au sud du Sahara, plusieurs travaux constituent aujourd'hui des références en la matière (Hubert P., et *al.*, 1987, 1989 et 1998 ; Nicholson S. E., 1993 ; Paturel J. E., et *al.*, 1997a et b ; Ardoin S., et *al.*, 2004 ; Chaouche A., 1988).

L'ensemble de ces méthodes ont été testées dans le cadre de cette étude. Pour des raisons de simplicité dans leur utilisation, d'efficacité et de gains de temps, seules les méthodes de Hubert et de Lee et Heghinian sont retenues. L'utilisation de ces outils n'est

⁴⁷ Méthode statistique servant à détecter aussi les ruptures d'homogénéité et à les localiser.

⁴⁸ Maître de Conférences - HDR, directeur adjoint du Centre de Recherches en Climatologie de Bourgogne. Il travaille sur les thèmes de variabilité pluviométrique africaine, prévisibilité saisonnière, changement climatique, hydrologie continentale.

cependant pas sans limites, notamment pour la détection de plusieurs ruptures, la validation des résultats et la comparaison entre séries.

3.1. Techniques utilisées : les tests de stationnarité

La démarche statistique, fondée sur les tests⁴⁹ de segmentation de Hubert et de Lee et Heghinian, est une méthode fréquemment utilisée pour évaluer les évolutions dans les séries chronologiques de la pluie.

3.1.1. Segmentation de Hubert

Cette méthode consiste à découper la série proposée en autant de sous séries homogènes («stationnaires» dans le jargon statistique) que possible (Hubert P., 2005). Elle est en quelque sorte un test de stationnarité permettant de déterminer si une série chronologique est ou non homogène (stationnaire), et si elle ne l'est pas, de la découper en autant de sous séries homogènes que possibles (Hubert P., et *al.*, 2005). La segmentation permet donc de découper la série en m segments ($m > 1$) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du ou des segment(s) voisin(s).

Une telle méthode est appropriée pour la recherche de multiples changements des moyennes (Ardoin S., 2003). La procédure de segmentation a déjà été appliquée à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest (Hubert P., et Carbonnel J. P., 1993) pour des périodes antérieures aux années 2000. La segmentation est définie selon la formule suivante :

Toute série x_i , ou $i = i_1, i_2$ avec $1 \leq i_1 < i_2 \leq N$, constitue un segment de la série initiale des (X_i) avec $i = 1, 2, \dots, N$. Toute partition de la série étudiée initiale en m segments constitue une segmentation de rang m définie par :

⁴⁹ Le logiciel KhronoStat comporte les tests de Lee et Heghinian et de Hubert. Ils font partis des tests les plus robustes et les plus utilisés dans les études hydroclimatiques. KhronoStat est élaboré par l'IRD dans le cadre de son programme ICCARE (Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en AfRIque de l'ouest non sahélienne). Il est gratuit à partir du site internet www.mpl.ird.fr/hydrologie/gbt/projets/iccare/khronostat.htm.

$i_k, k = 1, 2, \dots, m$ le rang dans la série initiale de l'extrémité terminale du $k^{i\text{ème}}$ segment ;

$n_k = i_k - i_{k-1}$ la longueur du $k^{i\text{ème}}$ segment.

$\bar{X}_k = \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} X_i / n_k$ la moyenne du $k^{i\text{ème}}$ segment.

La quantité $D_m = \sum_{k=1}^{k=m} D_k = \sum_{k=1}^{k=m} \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} (X_i - \bar{X})^2$ est l'écart quadratique entre la série et la série segmentation considérée.

La segmentation retenue au terme de la mise en œuvre de la procédure est celle qui minimise D_m . Cette condition est nécessaire mais insuffisante pour la détermination de la segmentation optimale. Il faut lui adjoindre la condition selon laquelle les moyennes de deux segments contigus doivent être significativement différentes (Ardoin S., 2004). La signification d'une différence entre deux moyennes diffère d'un contexte climatique à un autre car dans les régions arides ou semi arides comme le Ferlo du Sénégal, il suffit de quelques millimètres entre deux moyennes pour que la différence soit relativement importante.

Toujours selon Hubert et *al.*, (1989), cette procédure de segmentation peut être considérée comme un test de stationnarité. «La série étudiée est stationnaire» constitue l'hypothèse nulle de ce test. La stationnarité est en rapport avec la durée des observations. Si la procédure ne produit pas de segmentation acceptable d'ordre supérieur ou égal à 2, alors l'hypothèse nulle est acceptée. Aucun niveau de signification n'a été attribué à ce test.

La procédure de segmentation, dans le cadre des études de stationnarité sur des séries hydrométéorologiques chronologiques, reste un outil statistique dont la robustesse scientifique est reconnue. Citée dans les inventaires de l'OMM, la segmentation fait l'objet d'un chapitre particulier dans le manuel (Kundzewicz et Robinson, 2000) publié par l'UNESCO⁵⁰ et l'OMM dans le cadre du programme WCP-Water⁵¹ sur les outils statistiques disponibles pour l'étude des modifications climatiques (Hubert P., et *al.*, 2005).

⁵⁰ Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture

⁵¹ The World Climate Program-Water (WCP-Water)

3.1.2. Test de Lee et Heghinian

Ce test a été utilisé d'une part pour l'étude de la structure de la saison des pluies en Afrique soudano-sahélienne par Chaouche A., (1988) et d'autre part sur les régimes hydrologiques de quelques cours d'eau en Afrique de l'ouest et centrale par Ardoin S., (2004). La procédure repose sur la formule suivante :

$$X_i \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & \text{avec } i=1,2,3 \dots \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & \text{avec } i=1,2,3 \dots N \end{cases}$$

Selon Ardoin S., (2004), les ε_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 . Les variables τ , μ , δ et σ sont des paramètres inconnus. τ , δ représentent respectivement la position de la rupture dans le temps et l'amplitude d'un changement éventuel de la moyenne. Le changement éventuel, position et amplitude, correspond au mode des distributions *a posteriori* de τ , δ . La méthode apporte donc la probabilité que le changement se produise au moment τ , dans une série où on suppose *a priori* qu'il y a effectivement un changement à un moment indéterminé. De même, elle donne une estimation de la probabilité que l'amplitude du changement ait la valeur δ . L'estimation est d'autant plus précise que la dispersion est faible.

L'analyse statistique de la série chronologique sur les cumuls annuels de la pluie des stations est réalisée en deux phases : une série longue (1951-2005) et une série courte (1970-2005).

Dans une première phase, est donc pris en compte la totalité de la série, de 1951 à 2005, pour l'ensemble des stations (sauf Ranérou dont la série débute en 1963), dans le but de confirmer à l'échelle du Ferlo la grande rupture pluviométrique des années 1970. Le début de l'épisode de la sécheresse sahélienne récente, entre 1968 et 1970, est bien connu dans le monde des scientifiques. De très nombreuses études sur le climat de l'Afrique, comme le projet ICCARE (Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en AfRIque de l'ouest non sahélienne) sur la période 1950-1989 (Servat, 1994 ; Lubés *et al.*, 1994) et surtout de l'Afrique Occidentale (Morel R., 1991 ; Haroun O., 1998 ; Ndong J. B.,

1996 ; Dione O., 1996 ; Nouaceur Z., 1999) s'accordent sur la date de 1968 comme étant le début de la sécheresse récente et celle de 1969 comme le dernier hivernage pluvieux du Sahel. Ndong J. B., (1996) sur 93 stations sénégalaises met en évidence la sévérité de la sécheresse durant cette même année. Il est question dans cette première phase de vérifier la variabilité spatiale et temporelle de cette grande «cassure» dans les séries pluviométriques dans le bassin versant du Ferlo. L'approche permet d'observer les ruptures principales, statistiquement validées, au cours de cette première phase.

Ensuite, une seconde phase, sur laquelle, nous mettrons plus l'accent, concerne la période de données pluviométriques allant de 1970 à 2005 pour tous les points de mesure. Ce découpage temporel est lié à une procédure qui permet de déceler d'éventuelles ruptures, en prenant en compte les toutes dernières années et en écartant les grandes «cassures» observées durant la première phase. En d'autres termes, ce qui nous intéresse dans cette deuxième phase c'est la situation pluviométrique des années 1990 et des années 2000, peu évoquée dans les analyses précédentes, dans le contexte climatique actuel. Une telle méthode permet de dégager de nouvelles perspectives sur la tendance générale et la non stationnarité de la pluviométrie dans le bassin versant du Ferlo.

3.2. La grande rupture des années 1970

Les résultats de la première phase énumérés dans le **tableau 4.8** mettent en évidence deux périodes dans chacune des stations de travail, séparées par la rupture principale durant la première phase. Toutes les stations sont caractérisées par au moins une rupture statistiquement valide entre 1951 et 2005. Incontestablement, la période 1969-1970 représente un grand tournant dans l'histoire de la pluviométrie dans la mesure où 9 stations sur 11 confirment la «cassure» que certains appellent improprement le début de «la grande sécheresse climatique sahélienne» précisément à cette date (**tableau 4.8**). Deux autres dates de ruptures sont enregistrées plus tôt et plus tard par rapport à 1969-1970 à Barkédji et à Matam. La station de Barkédji a connu une rupture beaucoup plus précoce, c'est-à-dire en 1958-1959. A Matam en 1966-1967. A Diourbel, au contraire, la «cassure» se manifeste deux années plus tard (**tableau 4.8** et **figure 4.28**). Ces résultats confirment les conclusions d'études précédentes faites à une échelle plus large sur l'Afrique au sud du Sahara (Hubert P., et *al.*, 1987, 1989 ; Lubès H., et *al.*, 1994 ; Servat E., 1994 ; Ardoin S., 2004). Il est intéressant de noter par ailleurs un début précoce de la sécheresse sur la partie orientale du

Ferlo avec Bakel et Matam, respectivement en 1966-1967 et en 1967-1968. Avec une progression vers le sud ouest (Diourbel en 1971-1972), la rupture dominante en 1969-1970 est localisée dans la partie septentrionale et centrale du bassin versant du Ferlo.

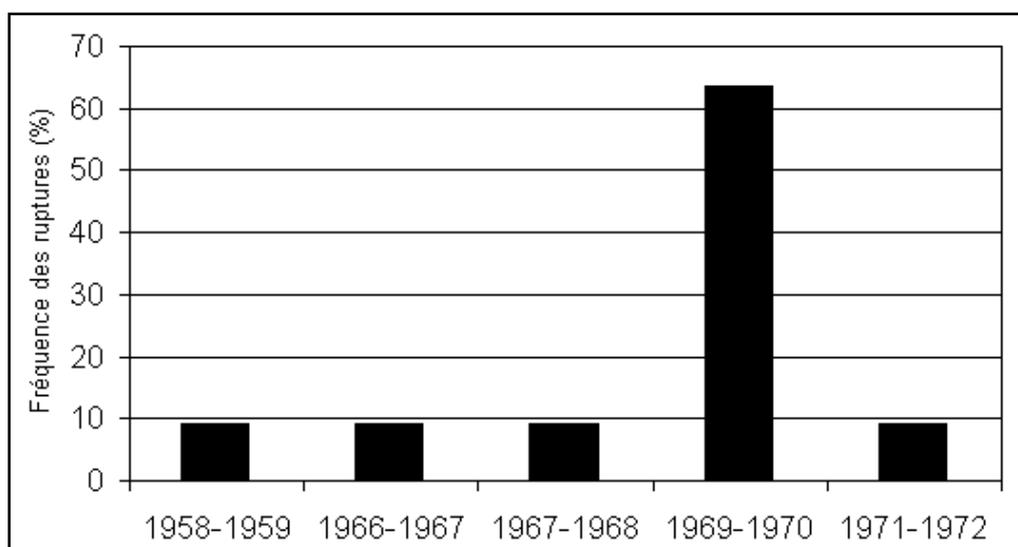


Figure 4. 28 : Variations des ruptures des stations au cours de la première phase (Sarr M. A., 2008)

Stations	Durée	Nombre de ruptures	Périodes de rupture		Déficit moyen (%)
			Hubert	Lee et Heghinian	
Bakel	1951-2005	1	1967	1967	22
Barkédji	1951-2005	1	1958	1958	30
Coki	1951-2005	1	1969	1967	33
Dagana	1951-2005	1	1969	1969	38
Diourbel	1951-2005	1	1971	1971	28
Linguère	1951-2005	1	1969	1969	29
Louga	1951-2005	1	1969	1969	43
Matam	1951-2005	1	1966	1966	37
Podor	1951-2005	1	1969	1970	37
Saint-Louis	1951-2005	1	1969	1969	35
Yang Yang	1951-2005	1	1969	1969	41

Tableau 4. 8 : Déficit moyens par rapport à la date de rupture pour la première phase (1951-2005) (Sarr M. A., 2008)

Le déficit moyen pour l'ensemble des stations de mesure, assimilé au taux de variation entre les moyennes caractérisant les différentes périodes de part et d'autre de la rupture des années 1970, d'une manière générale, se situe aux environs de 34 % sur tout le

Ferlo même si cette fourchette cache quelques disparités (**tableau 4.8**). En effet, Louga (43 %) et Yang Yang (41 %) connaissent les plus forts taux de déficit suivis de Dagana, Podor et Matam. Les stations qui ont connu les plus faibles taux de déficit sont Bakel et Diourbel, avec respectivement 22 et 28% (**tableau 4.8**). Les années 1969-1970 sont bien confirmées dans plusieurs stations sur l'espace du Ferlo comme étant celles de la grande rupture pluviométrique. Cependant la variation des déficits moyens pour la phase 1951-2005 laisse apparaître des singularités locales notamment à l'Ouest, au Nord et au Nord-ouest. La situation est moins catastrophique dans la frange méridionale (au sud d'une ligne de Diourbel à Bakel) et dans le centre sud de la région du Ferlo (Linguère et Barkédji). Ainsi, la spatialisation des taux de déficits moyens montre une certaine organisation géographique selon un gradient sud-est nord-ouest.

De fait la grande rupture des années 1969/1970 met statistiquement en opposition deux périodes séparées par un déficit pluviométrique significatif (34 % environ). En revanche, l'application de ces méthodes sur la série 1951-2005 ne traduit nullement, ni l'absence d'évolution (stationnaire) dans les années 1970-1980, ni le redémarrage observé au cours des dernières décennies.

3.3. Les ruptures sur la période 1970-2005 : cas des années 1990

La seconde phase est aujourd'hui intéressante à analyser sur le plan de l'évolution et de la dynamique des paramètres du climat dans la région sahélienne en général et dans le bassin versant du Ferlo en particulier. La segmentation de Hubert servira également d'outil d'analyse pour caractériser cette série «courte» de 35 années dans la mesure où «certains tests de détection de rupture ne peuvent identifier plusieurs ruptures dans les séries» (Lubès H., et al., 1998 ; Paturel E., et al., 1998). *Le test s'appuie plus sur un schéma descriptif que sur un vrai modèle statistique pour déceler plusieurs ruptures, même s'il s'agit de valeurs extrêmes (segment unitaire),* selon Ardoin S., (2004).

Malgré quelques limites liées à l'utilisation de l'outil pour les séries courtes contrairement aux séries longues pour lesquelles il est mieux adapté⁵², plusieurs constats peuvent être avancés. Seules les propositions débouchant sur une unique rupture avec deux périodes sont retenues. C'est à ce titre que seules les stations de Bakel, Barkédji, Dagana,

⁵² Ce détail méthodologique est essentiel pour souligner les vraies limites de l'outil concernant son application dans les séries chronologiquement courtes

Louga et Matam sont considérées pour les besoins de l'analyse car étant les seules à montrer une rupture unique (**figure 4.29**).

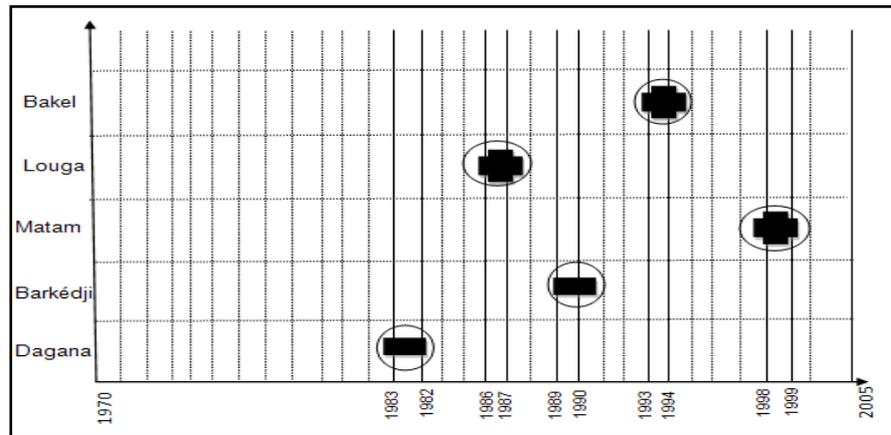


Figure 4. 29 : Répartition temporelle des ruptures uniques de chaque station de mesure sur la période 1970-2005 (Sarr M. A., 2008)

Une première analyse, non représentée et non détaillée ici, de la seconde phase des séries de données pluviométriques, montre que 42 % des stations étudiées connaissent chacune deux ruptures produisant trois périodes relativement stationnaires mais inégalement réparties. C'est le cas de Coki en 1982-1983 et 1984-1985, Diourbel, Linguère, Louga en 1986-1987 et 1989-1990 et Ranérou en 1976-1977 et 1989-1990. Un tel découpage pose des problèmes dans la mesure où une période de deux ou trois années seulement serait chronologiquement très courte et ne pourrait, en aucune manière, sur le plan statistique, être comparée à une période d'une durée de 10 ans par exemple. Pour des raisons de validité statistique, on compare souvent des intervalles de temps égaux : par exemple les décennies (Servat E., 1996), ou deux périodes de 18 ans (Morel R., 1991). De ce fait, les stations pluviométriques figurant dans le **tableau 4.9** n'enregistrent qu'une seule rupture et mettent en évidence deux périodes relativement d'égale durée en terme de nombre d'années.

Stations	Nombre de ruptures	Les ruptures	Gain moyen (%)	Déficit moyen (%)
Bakel	1	1993-1994	19	
Barkédji	1	1989-1990		13
Dagana	1	1982-1983		25
Louga	1	1986-1987	22	
Matam	1	1998-1999	40	

Tableau 4. 9 : Déficits, gains pluviométriques moyens et dates de rupture (1971-2005) (Sarr M. A., 2008)

A travers ce tableau, il apparait une variabilité spatio-temporelle des dates de ruptures à l'échelle du Ferlo. L'irrégularité des cumuls pluviométriques et la dispersion des dates de ruptures positives ou négatives montrent d'une manière générale deux cas de figure (**figure 4.30**) :

- **Stations caractérisées par une rupture positive**

La catégorie des stations caractérisées par une rupture positive dans les années 1990. Les dernières décennies 1990 et 2000 sont moins déficitaires que les décennies 1970 et 1980. Cela concerne trois stations parmi les cinq étudiées. Il s'agit de Bakel, Matam à l'est et Louga à l'ouest. Le coefficient de variation entre les deux périodes est plus important à Matam même si la rupture est constatée plus tôt pour la station de Bakel et bien plus à Louga (**tableau 4.9**). Au milieu des années 1980, le Ferlo tout comme la région sahélienne a connu quelques extrêmes pluviométriques exceptionnels à Louga (**figure 4.30**).

- **Stations caractérisées par une rupture négative**

La seconde catégorie recense les stations qui ont enregistré une rupture négative. Pour Barkédji, des décennies 1960 et 1970 et 1980 plus excédentaires que celle de 1990 et des années 2000. Pour Dagana, seule la décennie 1970 est excédentaire par rapport aux autres.

Cependant, les variations spatiales et temporelles des séquences de ruptures excluent toute tentative de détermination précise de la plus forte fréquence des «cassures» à un moment ou à un autre.

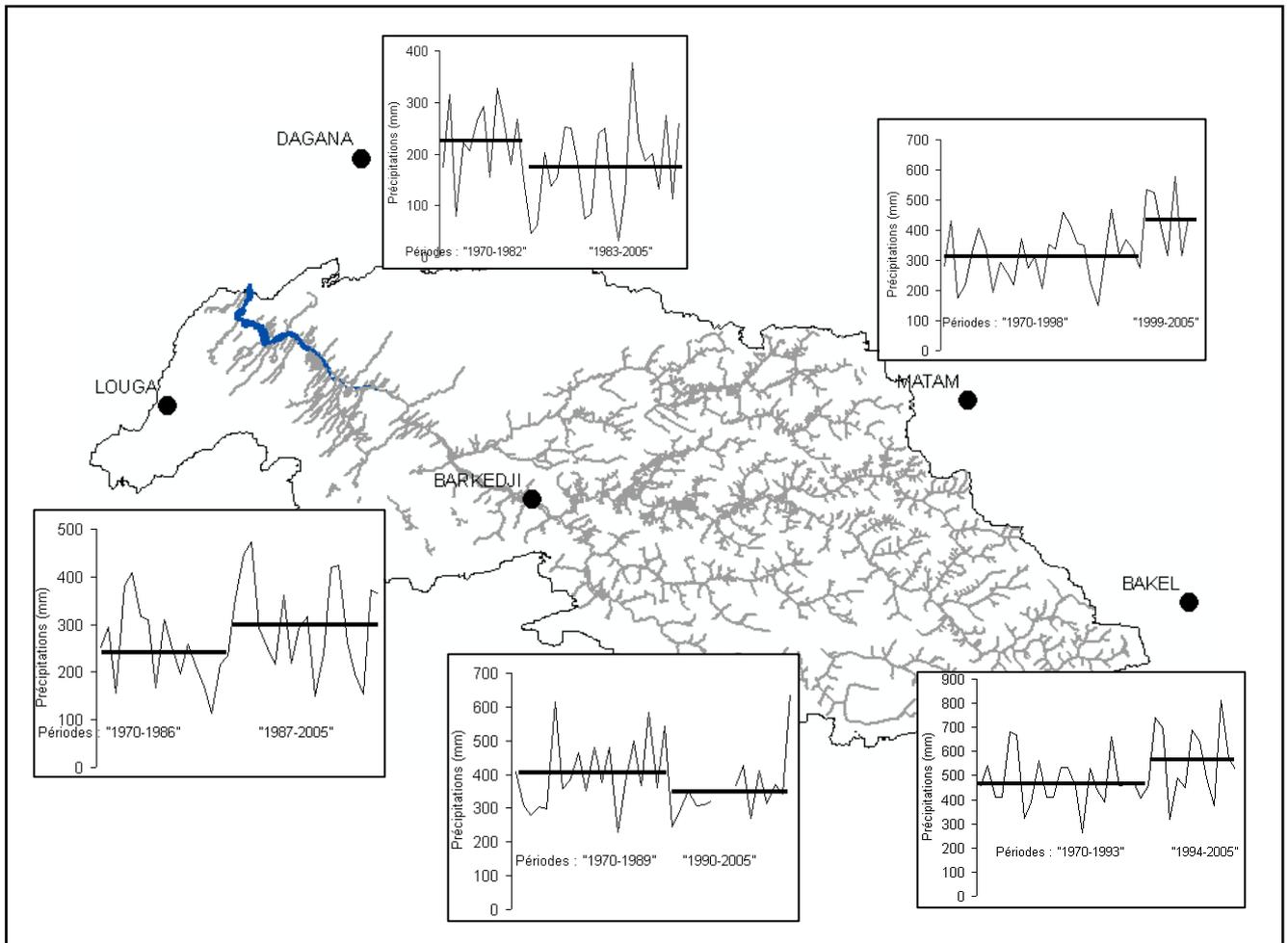


Figure 4. 30 : Répartition des ruptures pluviométriques à l'échelle du bassin versant (Sarr M. A., 2008)

En définitive, l'analyse sur une série longue (1951-2005) et sur une série courte (1970-2005) des cumuls annuels de la pluie de la région du Ferlo montre respectivement une rupture négative généralisée vers les années 1970, mais aussi une alternance de ruptures positives et de ruptures négatives. Plusieurs «cassures» importantes à l'échelle de la zone d'étude sont visibles au cours de ces dernières années. Trois ruptures positives datées des années 1986/1987, 1993/1994 et 1998/1999 et deux ruptures négatives en 1982/1983 et 1989/1990. Les résultats obtenus à partir des données pluviométriques stationnaires corroborent les conclusions d'une étude sur les débits du fleuve Sénégal à Bakel par Hubert P., (2005) qui met en exergue une rupture positive en 1993/1994. **Ces résultats ne définissent en eux même aucune tendance globale à la hausse, mais si l'on croise cette analyse avec celle faite précédemment sur les autres stations on peut émettre des hypothèses sur le commencement d'une nouvelle phase climatique caractérisée par une amélioration des quantités de pluie tombées dès les années 1980.**

Selon le rapport de la météorologie du Sénégal, en date du 03 mai 2002, l'espoir renaît au sein des populations rurales confrontées à des problèmes de sécheresse, depuis trois décennies grâce à un retour depuis 1999 d'années humides et de productions agricoles records (Sarr M. A., 2002).

Après une période continûment humide d'une vingtaine d'années (1951-1969) en comparaison aux autres années de la série, la pluviométrie de la région a été marquée par des déficits pluviométriques constants causant une sécheresse pratiquement ininterrompue de 28 ans ; la période récente (1998-2006) montre une persistance de la variabilité interannuelle et une stabilité et/ou une hausse telle que celle observée au cours de la première moitié du XX^{ième} siècle (Lebel T., et Redelsperger J-L., 2007). Cependant, il est trop tôt pour parler de tournant pluviométrique décisif, d'une phase sèche vers une phase plus humide. La décroissance de la pluie est suivie d'une augmentation mettant en évidence la rupture située globalement au niveau des années 1990 même si elle est moins évidente que celle de 1968.

La détection des ruptures dans les séries hydrologiques et pluviométriques par la méthode de segmentation est influencée par la part définie par les moyennes des différents segments. Comme tout outil statistique, les conclusions fournies ne sont que les plus probables du fait que le modèle part sur des hypothèses définies précédemment. Ainsi, compte tenu des limites du modèle statistique, la fixation de la rupture des années 1990, influencée fortement par les cumuls annuels excendaires des années 1988/1989, n'est que la conséquence d'un processus d'amélioration de la pluie avant cette date. **La tendance à la hausse est plus ancienne que cette rupture ; elle commence juste après le minimum pluviométrique des années 1983 - 1984⁵³ (pour l'essentiel des stations, les années 1983 et 1984 représentent les *minima* pluviométriques de la série). Cette tendance à la hausse, réelle et perceptible dès la fin des années 1980, est facilement détectable sur les courbes d'évolution de la pluviométrie, mais reste encore loin des niveaux optimums précédents (période 1951-1968/1969).** Elle ne traduit pas non plus la période de relative stagnation des déficits qui précède l'amélioration.

Selon Hubert P., et *al.* (2005), la méthodologie utilisée dans ce travail, en se fondant sur l'utilisation de la procédure de segmentation et les résultats obtenus, doit

⁵³ Sur les courbes d'évolution des totaux pluviométriques des stations (figure 4.1a, b, c), on peut aisément apercevoir la place qu'occupent les années 1983-1984. Pour beaucoup de stations étudiées dans ce travail, ces deux années peuvent être aussi représentatives d'une rupture que 1969.

cependant attirer notre attention sur le fait que les ruptures de stationnarité des séries chronologiques ne sont pas absolues, mais sont évidemment relatives à des échelles d'observation.

Après la validation des différentes tendances dans le comportement pluviométrique des stations par les méthodes de ruptures de série, l'utilisation des analyses en composantes principales se justifie par leurs capacités d'analyser d'une part la permanence des structures pluviogéniques et d'autre part, les variations à diverses échelles.

4. REGARDS SUR LES STRUCTURES PERMANENTES ET SUR LES VARIATIONS DE LA PLUVIOMÉTRIE AUX ÉCHELLES ANNUELLES ET MENSUELLES

L'analyse en composantes principales (ACP) facilite l'analyse conjointe d'un grand nombre de données, en tenant compte de leurs caractères multidimensionnels, particulièrement dans le cas d'étude de la variabilité spatio-temporelle de paramètres climatiques et hydrologiques.

Elle permet d'extraire le maximum d'informations sous forme de représentations graphiques ou d'indices simplifiés, permettant leurs interprétations, telle que la mise en évidence de relations entre les variables et/ou l'opposition entre les observations (Ardoin S., 1994). La méthode de l'ACP apporte des résultats sur la dynamique des structures de la variabilité de la pluviosité, d'où son application pertinente dans ce cas de figure, sur les séries pluviométriques du bassin versant du Ferlo. L'analyse en composantes principales met en exergue le mode de variation spatio-temporelle du champ pluviométrique au nord du Sénégal en général, et sur le bassin versant du Ferlo en particulier. Elle produit des éléments permettant de mieux comprendre la distribution spatiale du phénomène et de caractériser les facteurs divers qui déterminent cette distribution. Les ACP sont, selon Fontaine B., (1990) *«une procédure d'analyse objective des données qui permet de synthétiser l'information dans l'espace et dans le temps en résolvant la variabilité en composantes orthogonales»*.

L'ACP concerne les données de chaque station sur la période allant de 1963 à 2005 afin de prendre en compte le poste de Ranérou (dont on rappelle que les mesures débutent à partir de 1963 et qui d'autre part, est le seul poste pluviométrique couvrant tout l'est à l'intérieur du bassin). Une première ACP est faite sur les totaux annuels des stations

de Barkédji, Bakel, Coki, Dagana, Diourbel, Linguère, Louga, Matam, Podor, Saint-Louis, Yang Yang et de Widou Thiengoly. Ensuite une deuxième ACP est axée sur les cumuls mensuels des mois de la saison pluvieuse (juin, juillet, août, septembre et octobre) des postes déjà cités excepté Widou Thiengoly en raison de la particularité de ces données dont les relevés mensuels commencent en 1974. Pour l'approche pratique de l'ACP, il a fallu procéder à quelques ajustements d'ordre statistique.

En premier lieu, grâce à la technique de la régression linéaire, les années 1996 et 1997 qui manquent du poste de Barkédji sont comblées en prenant en compte les deux stations les plus proches, de part et d'autre, c'est-à-dire la station de Linguère et la station de Ranérou. Les relevés du poste pluviométrique de Coki ont subi le même traitement pour ses lacunes en considérant Louga et Linguère comme stations d'appui. Et enfin Louga et Linguère ont également permis de combler les lacunes des années 2002, 2003, 2004 au niveau de Yang Yang.

En second lieu, la méthode de standardisation ou de normalisation à partir des données brutes de chaque station a permis de donner à chaque valeur un poids équivalent. Les données normées des anomalies centrées et réduites ont été obtenues en soustrayant le cumul mensuel (x_i) de la moyenne mensuelle (X_i) de la série (1963-2005) puis en divisant par l'écart type mensuel de la même série (σ) ; selon la formule :
$$\frac{X_i - x_i}{\sigma}$$

4.1. L'analyse factorielle des cumuls annuels (1963-2005)⁵⁴

L'ACP se fonde sur une matrice de 43 lignes (cumuls annuels) et de 13 colonnes qui correspondent aux postes pluviométriques. Les deux premières composantes principales retenues (CP1 et CP2) représentent près de 65 % de la variance totale. La CP1 explique à elle seule 56 % de la variance de l'ensemble des précipitations annuelles au détriment de la CP2 qui ne fournit que 11 % des explications du phénomène pluviométrique. La CP1, exprimant le comportement commun des stations, enregistre la part la plus importante de la variance totale. Les autres composantes principales, en fonction de leur pourcentage «significatif» traduisent des considérations locales. Dans cette

⁵⁴ La série 1963-2005 est prise ici car elle permet d'intégrer les mesures de Ranérou qui sont essentielles dans l'analyse de part la position (sud-est du Ferlo) qu'elle occupe.

étude, seules les composantes principales représentant plus de 10 % de la variance sont retenues.

4.1.1. Profil commun aux 13 postes

La projection des cumuls annuels standardisés sur la CP1 caractérise le profil d'une histoire commune à tous les postes pluviométriques (**figure 4.31**). En effet, cette figure confirme la forte variabilité du champ pluviométrique au niveau des 13 postes grâce au pouvoir de synthèse de la première composante principale (CP1). La CP1 représente l'histoire commune de la région (Richman, 1986 ; Legates et *al.*, 1991 in Moron V., 1994). Elle fait référence à une caractéristique régionale sahélienne qui dicte le même comportement climatique à toutes les stations relevant de la même circulation atmosphérique.

Toutes les stations sont corrélées positivement. Elles ont des coordonnées positives et relativement fortes sur la CP1, comprises entre 0,50 à Ranéroou et 0,86 à Saint-Louis ce qui traduit leur grande ressemblance au niveau de l'expression des événements pluviométriques.

La succession d'années déficitaires et d'années excédentaires par rapport à la moyenne générale est très nette. On observe par ailleurs la rupture de la série au niveau des cumuls annuels enregistrés dans la région à partir de 1969. Ce phénomène est également perçu d'une façon nette au niveau des enregistrements de tous les postes pluviométriques. Le profil de situation commune montre aussi l'amélioration des précipitations dans le domaine d'étude à partir des années 1980 (**figure 4.31**).

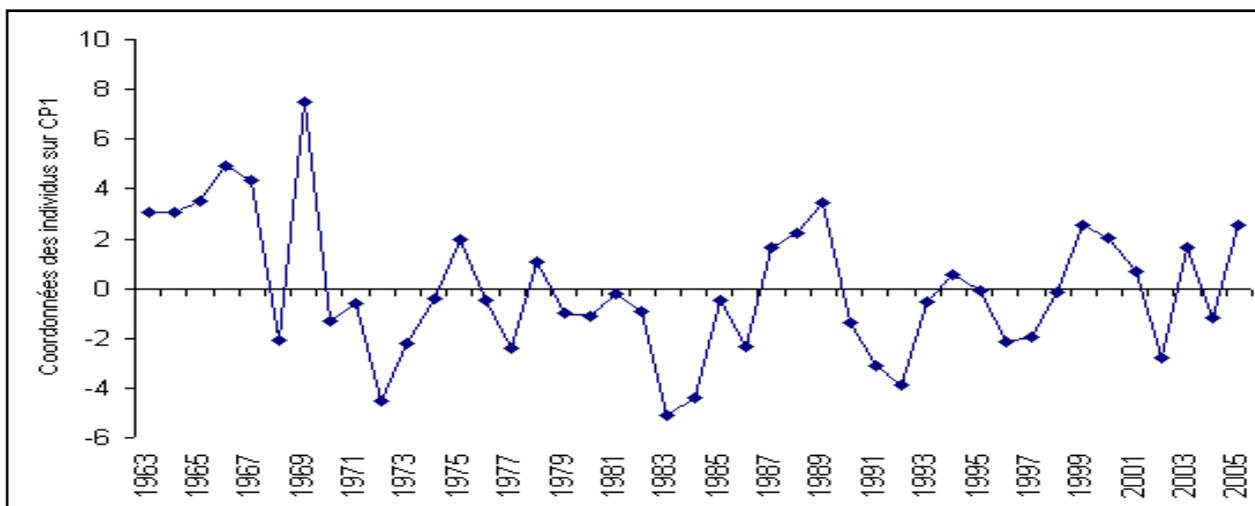


Figure 4. 31 : Profil de situations communes aux 13 postes pluviométriques sur CP1
(Sarr M. A., 2008)

Les résultats mis en évidence ici (**figure 4.30**) illustrent sur l'ensemble des postes les trois pics distincts représentant les périodes les plus sèches, en commençant par la grande sécheresse sahélienne qui sont les années 1972, 1983 et 1992 (**figure 4.31**). On peut ajouter aussi l'année 2002 qui a été la plus déficitaire de ces 10 dernières années. En revanche, quelques années que nous qualifions «d'exceptionnellement» pluvieuses caractérisent cette région du Sénégal. Elles sont entre autres les années 1969, 1989, 1999, 2000, 2003 sans oublier l'an 2005 (**figure 4.31**). Des précipitations importantes sont enregistrées au cours de cette année sur presque toutes les stations. Elles ont permis une bonne production végétale dans tout le Ferlo⁵⁵.

En résumé, l'analyse du profil de situations communes aux 13 postes sur la première composante montre une variabilité pluviométrique interannuelle toujours présente au cours de ces dernières années et des tendances confirmant les observations antérieures dont une tendance à la hausse des volumes précipités visible à partir du milieu des années 1980.

4.1.2. Expression cartographique des coordonnées des variables sur les composantes principales

La cartographie des variables à partir de leurs coordonnées sur les deux composantes principales permet d'appréhender une organisation spatiale du phénomène pluviométrique pouvant être déterminée par des caractéristiques physiques qui entrent dans le champ de l'organisation générale du climat.

4.1.2.1. Expression cartographique des coordonnées des variables sur la CP1

Nous pouvons remarquer l'existence de fortes valeurs (coordonnées) sur la CP1 pour toutes les stations même si Ranérou et Barkédji sont moins corrélées que les autres. Ces deux postes ont un comportement pluviométrique assez similaire ce qui pourrait s'expliquer par leurs positions latitudinales donc sensibles aux conséquences des fluctuations de l'équateur météorologique.

⁵⁵ Au niveau de l'évolution interannuelle de la végétation naturelle sur la période 1981-2005 dans le Ferlo, l'année 2005 représente le maximum de la série.

La CP1 détermine l'essentiel des explications sur le comportement commun à tous ces postes pluviométriques. C'est le cas ici des stations comme Saint-Louis, Widou Thiengoly, Louga, Coki qui sont fortement corrélées à la CP1 et qui se trouvent localisées dans la partie nord ouest du Ferlo (**figure 4.32**). On retient ici le constat que la CP1 montre que toutes les stations ont une évolution pluviométrique assez semblable qui répond évidemment aux conditions de la circulation climatique régionale qui s'inscrit dans la circulation atmosphérique générale.

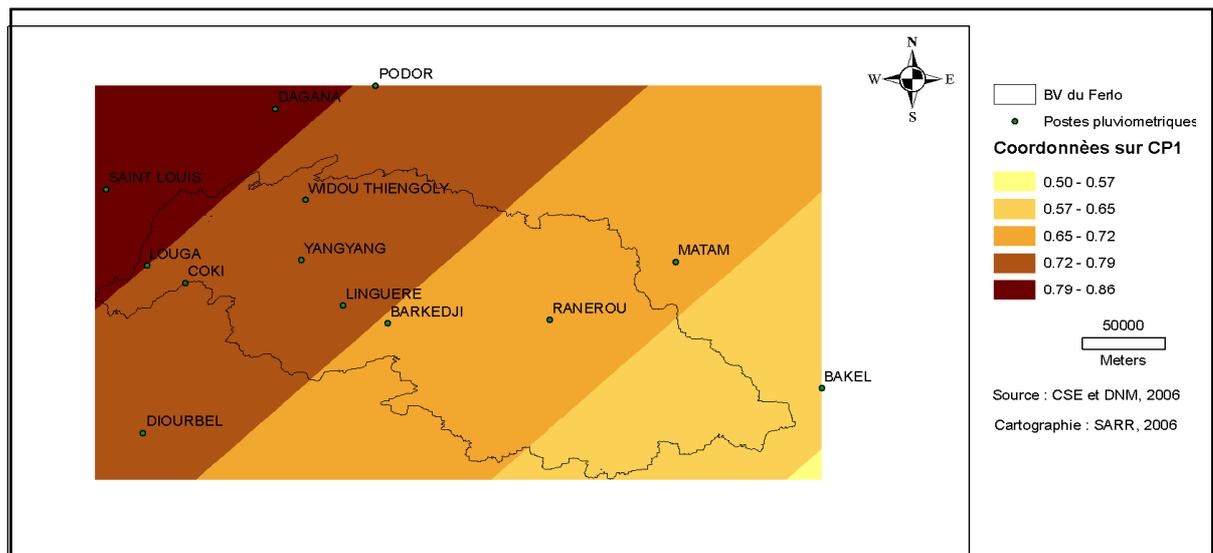


Figure 4. 32 : Cartographie des coordonnées des variables sur la CP1

4.1.2.2. Expression cartographique des coordonnées des variables sur la CP2

La CP2, retenant les 11 % de la variance, souligne les caractéristiques locales en singularisant les régions de Linguère, Ranéroù et Barkédji car elles sont les seules à avoir une bonne corrélation avec la CP2 (**tableau 4.10**). D'ailleurs, elles sont bien individualisées au centre du bassin versant du Ferlo (**figure 4.33**). La structure spatio-temporelle mise en valeur par la CP2 doit toujours venir en appui à celle de la CP1 car la CP2 ne décrit que les particularités locales de l'évolution pluviométrique des trois postes. Celles-ci se surimposent à une évolution régionale décrite par la CP1 (les trois stations sont significativement corrélées à la CP1 comme à la CP2).

Postes pluviométriques	CP2
Bakel	-0,414
Barkédji	0,656
Coki	-0,027
Dagana	-0,101
Diourbel	-0,253
Linguère	0,477
Louga	-0,139
Matam	-0,266
Podor	0,074
Ranérou	0,581
Saint-Louis	-0,103
Yang Yang	0,166
Widou Thiéngoly	-0,151

Tableau 4. 10 : Coordonnées des variables sur CP2 (Sarr M. A., 2008)

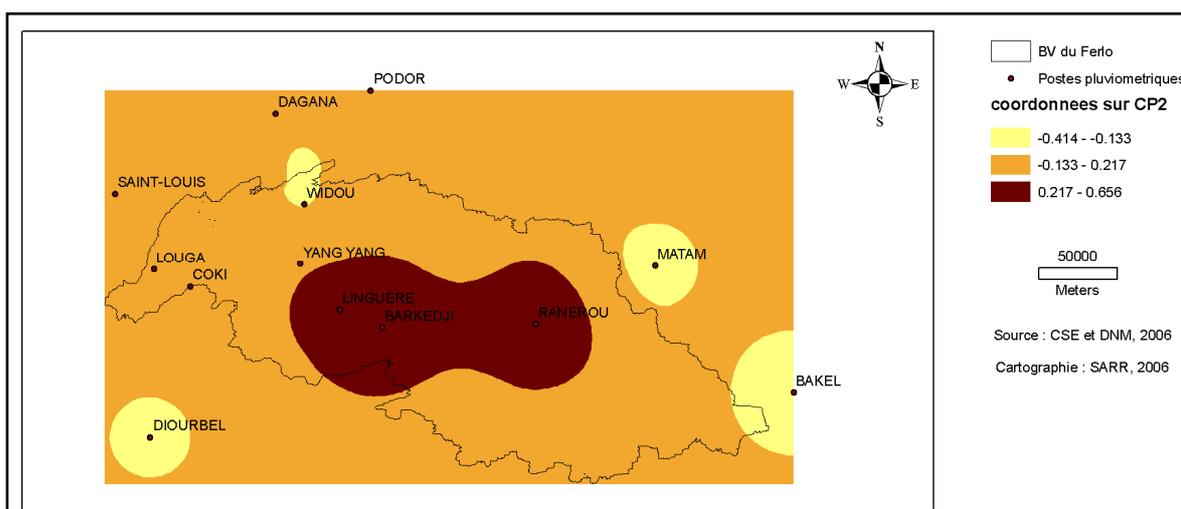


Figure 4. 33 : Cartographie des coordonnées des variables sur la CP2

Comme nous le montre la **figure 4.34**, les régions de Ranérou, Barkédji et Linguère ont été globalement mieux arrosées au cours des années 1980 par rapport à la moyenne des autres régions mais comme Ranérou et Linguère sont aussi assez bien décrites par la CP1, cela implique sans doute que la sécheresse qui a démarré dans les années 1970, y était simplement plus atténuée pendant les années 1980.

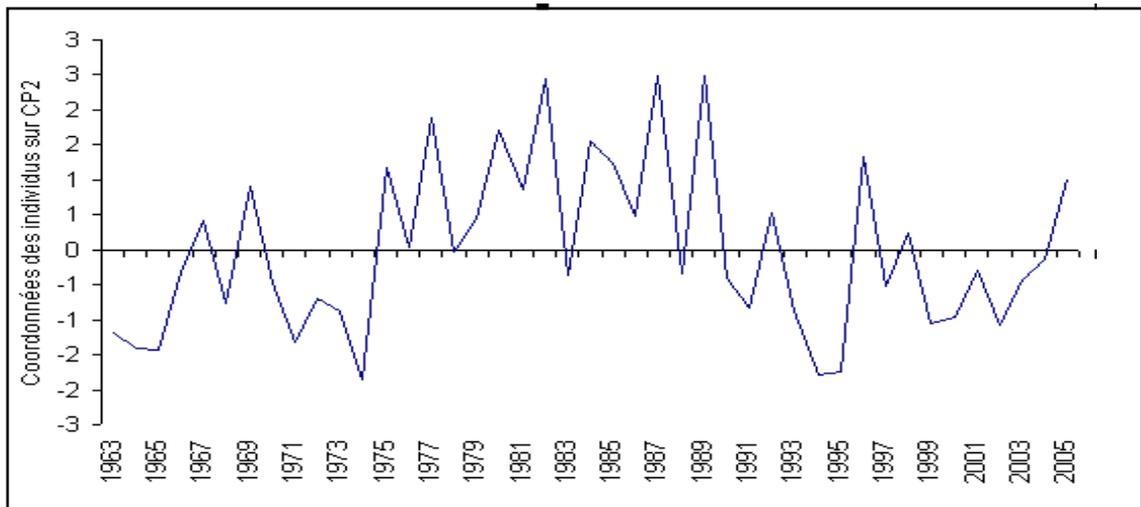


Figure 4. 34 : Profil d'événements communs aux 13 postes pluviométriques sur CP2 (Sarr M. A., 2008)

4.2. L'analyse factorielle des mois de pluie

L'analyse en composantes principales des mois de juin, juillet, août, septembre et octobre a été faite sur la base des cumuls mensuels des postes pluviométriques, excepté celui de Widou Thiengoly, parce que nous ne disposons pour ce poste que des cumuls annuels.

Les deux composantes principales (CP1 et CP2) retenues dans cette étude représentent 59 % de la variance totale. La CP1 regroupant à elle seule 49 % de la variance et détenant plus d'informations, décrit un comportement basé là encore sur une histoire commune. La dynamique pluviométrique au cours de ces mois présente le même profil dans toutes les régions. Dans cette analyse sur les cumuls de juin à octobre la CP1 met en valeur une certaine homogénéité basée sur un début et une fin communs de la saison des pluies. D'ailleurs, toutes les régions ont un poids factoriel (bonne corrélation avec la CP1) important sur la CP1 par exemple Linguère : 0,82, Louga : 0,78 et Dagana : 0,72 et ainsi bien corrélées à la CP1 sauf dans une certaine mesure le cas des régions de Bakel et de Ranérou qui adoptent un comportement sensiblement différent. Cette situation peut être due à un début précoce de la saison des pluies dans ces régions. Les régions de Ranérou et de Bakel sont, là encore, les seules qui enregistrent des précipitations importantes à partir du mois de mai, avant même le commencement de la saison des pluies à cette latitude au Sénégal. La durée de la saison des pluies est un facteur explicatif permettant de caractériser

ces deux postes pluviométriques par rapport aux autres qui se retrouvent relativement concernés par la même durée de la saison des pluies.

La CP2 explique plus de 10 % de la variance ; elle fait appel à des caractéristiques très secondaires dans l'évolution pluviométrique interannuelle. La CP2 permet de différencier ces trois groupes en mettant en évidence le caractère continental ou littoral des régions sans oublier la position centrale. Ainsi se distinguent le groupe Bakel, Ranérou, Matam à l'est, ensuite le groupe Barkédji, Linguère et Diourbel au centre et enfin celui de Saint-Louis, Podor, Yang Yang, Coki, Louga et Dagana à l'ouest (**figure 4.35**). Le premier représente les stations orientales les plus continentalisées, le deuxième identifie les stations centrales, au cœur du pays et le troisième occupe une position plus septentrionale et occidentale à la fois.

L'évolution pluviométrique différente de ces groupes reste quand même favorablement influencée par leur situation géographique où la circulation générale joue le rôle primordial sans écarter l'existence d'autres facteurs secondaires. Au contraire de la CP1 qui indique que les postes pluviométriques ont une évolution assez semblable, la CP2 renseigne sur les caractéristiques locales dont la plus importante se trouve être la continentalité.

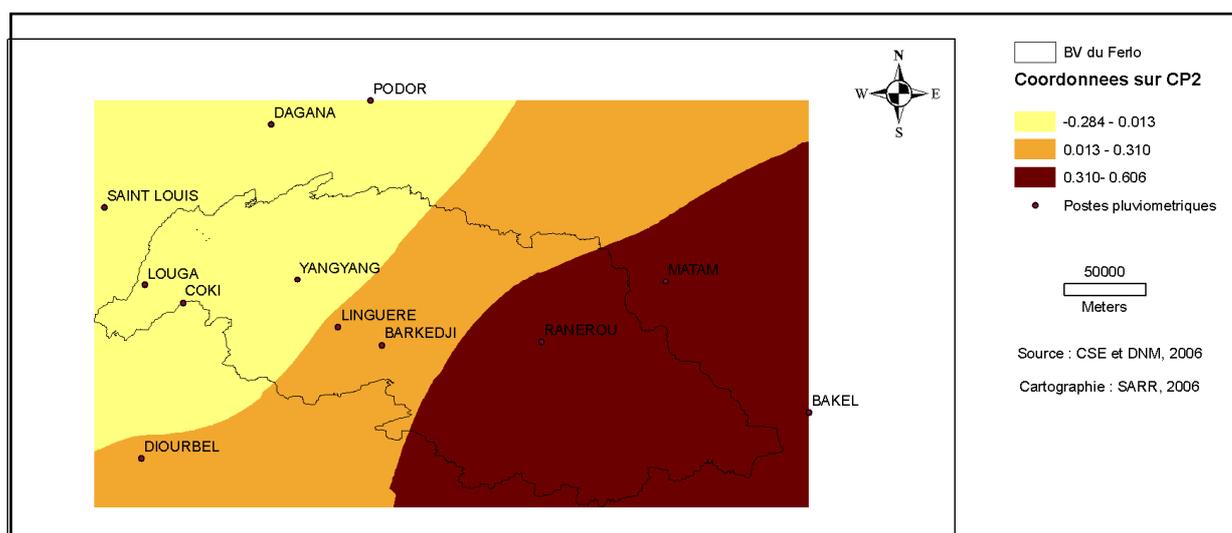


Figure 4. 35 : Cartographie des variables sur CP2

L'ACP sur chaque mois de la saison des pluies dans cette zone permet de passer à une analyse plus fine de la dynamique de la pluie. Elle met en évidence une organisation spatiale du phénomène pluviométrique au cours de l'hivernage (**figures 4.36 et 4.37**). Les

informations autour de la CP1 décrivent des structures annuelles parfaitement stables qui permettent de distinguer voire de localiser les plus forts coefficients de corrélation, à l'ouest plus qu'à l'est. L'évolution saisonnière de la pluie peut être caractérisée grâce aux situations observées aux mois de juillet et d'octobre qui serviront d'exemples.

En juillet, les informations exprimées par la CP1 qui regroupent toutes les stations montrent une situation déficitaire presque continue de la pluviométrie du début des années 1980 jusqu'à la fin des années 1990 (**figure 4.38**). En revanche, la série des mois d'octobre caractérise une période déficitaire plus continue et plus nette depuis l'année 1970 jusqu'à la fin des années 1990. Pour finir, quelques successions d'années excédentaires et d'années déficitaires sont enregistrées dans les décennies 1960 et 2000, aussi bien en juillet qu'en octobre, sur toutes les stations grâce à l'expression de la CP1 (**figure 4.39**).

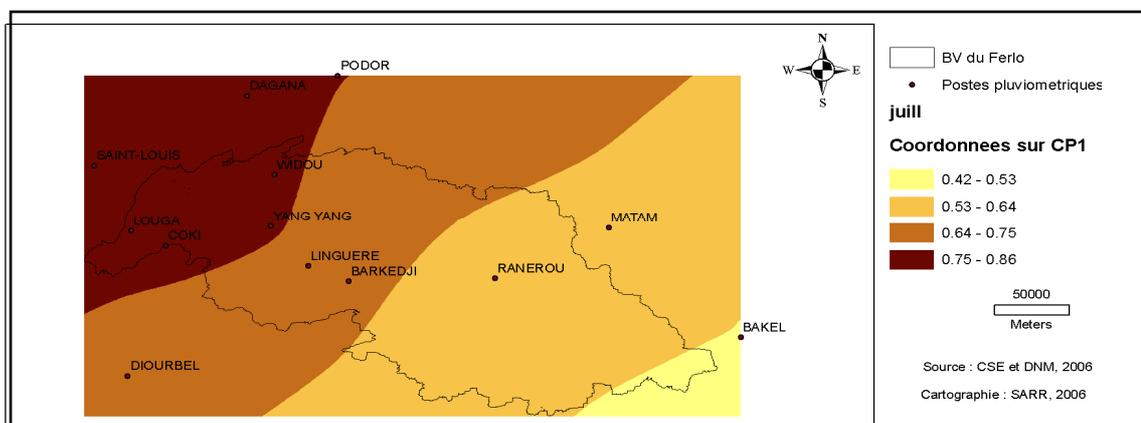


Figure 4. 36 : Cartographie des variables sur CP1 au mois de juillet

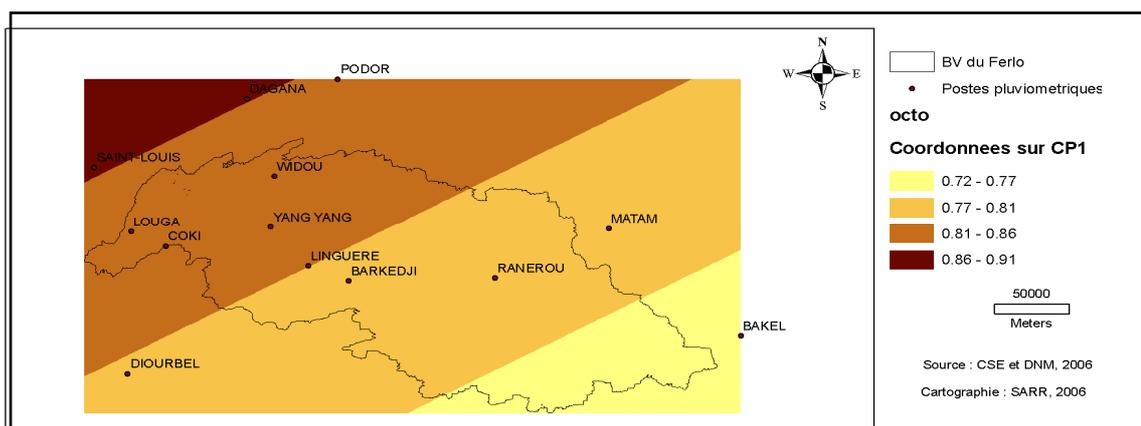


Figure 4. 37 : Cartographie des variables sur CP1 au mois d'octobre

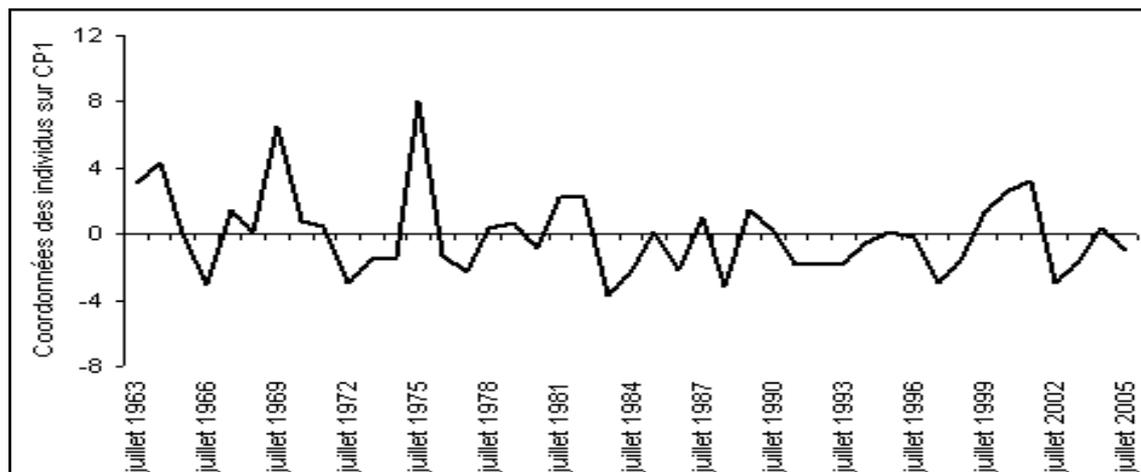


Figure 4. 38 : Profil d'événements communs aux 12 postes sur CP1 au mois de juillet (1963-2005) (Sarr M. A., 2008)

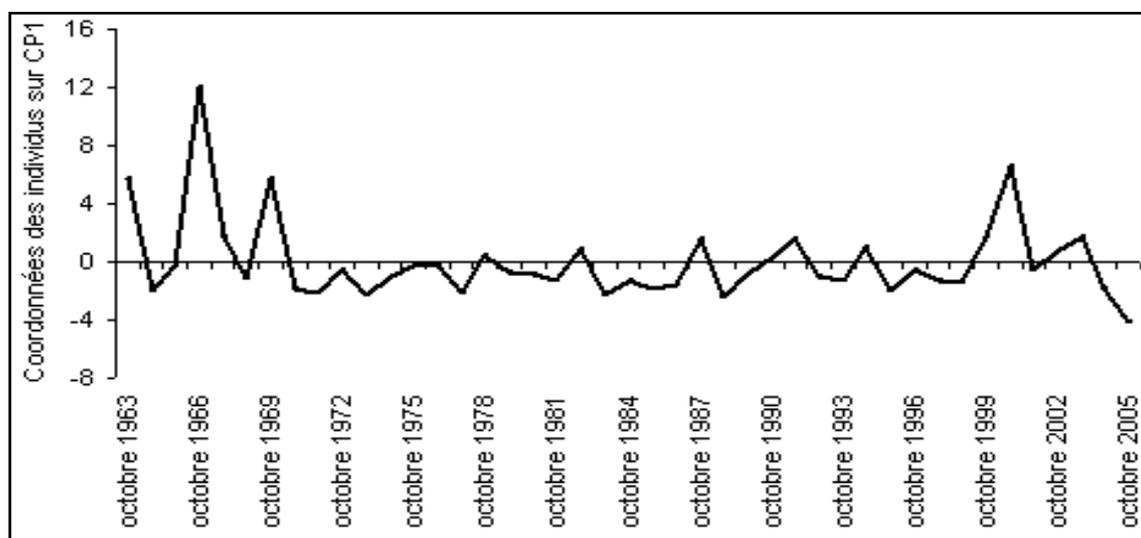


Figure 4. 39 : Profil d'événements communs aux 12 postes sur CP1 au mois d'octobre (1963-2005) (Sarr M. A., 2008)

Ainsi, l'analyse de la CP1 confirme les observations faites à l'échelle annuelle ; - une stabilité des structures annuelles, - un déficit continu selon le mois de juillet ou octobre des années 1970 aux années 1990.

La CP2 apporte des informations supplémentaires sur l'organisation spatiale et temporelle de la pluviométrie au Ferlo en ce sens qu'elle permet une meilleure visibilité de la répartition zonale de la masse d'eau tombée dans ce bassin versant. Les **figures 4.40 et 4.41** laissent apparaître une variabilité spatiale en rapport avec l'expression des variables sur la CP2 dans le Ferlo. La situation des mois de juillet et d'octobre par rapport à la CP2 sans oublier leur détermination sur la CP1, montre quelques caractéristiques locales.

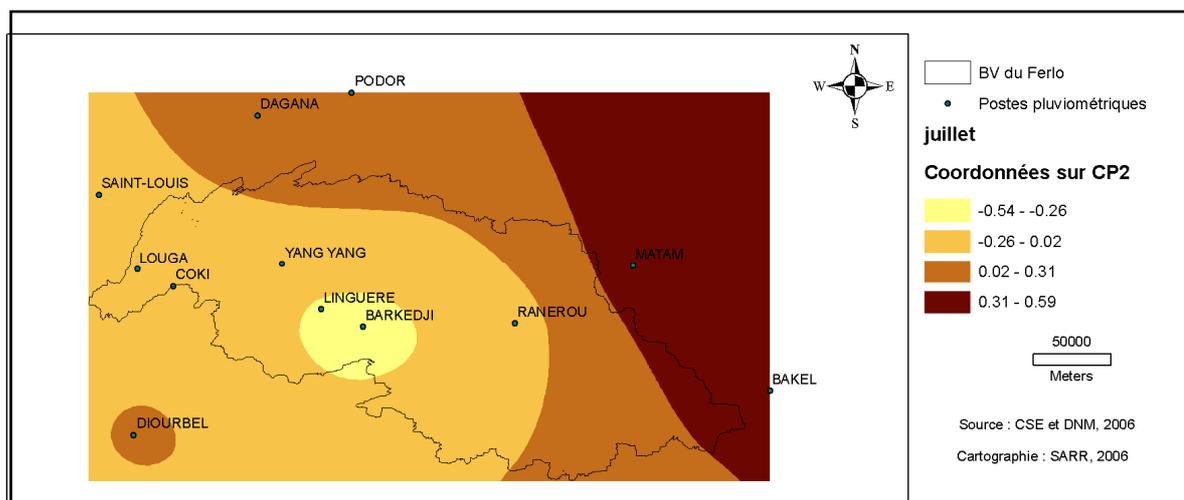


Figure 4. 40 : Cartographie des variables sur CP2 au mois de juillet

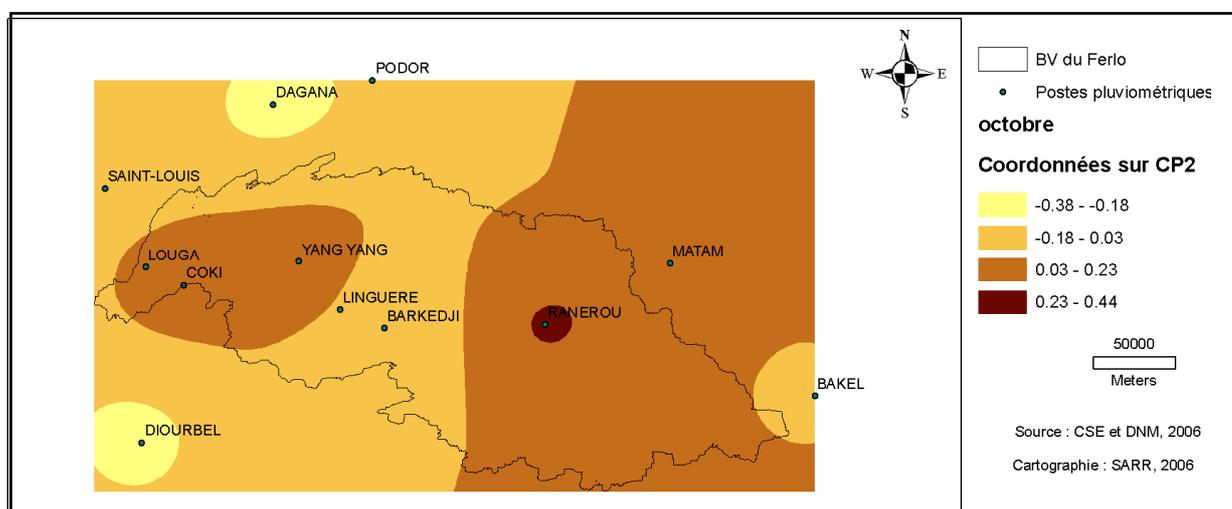


Figure 4. 41 : Cartographie des variables sur CP2 au mois d'octobre

En juillet, les corrélations positives sur la CP2 sont enregistrées à Matam, Bakel, Diourbel, Dagana et à Podor (**figure 4.40**). Le déficit pluviométrique de la période des années 1970-1980/1990 montré par la CP1 a été plus prononcé dans ces régions mais on remarque une atténuation de celui-ci dans les années 2000 (**figures 4.38 et 4.42**). On constate la fin de l'aggravation du déficit pluviométrique, même s'il atteint son maximum sur cette période.

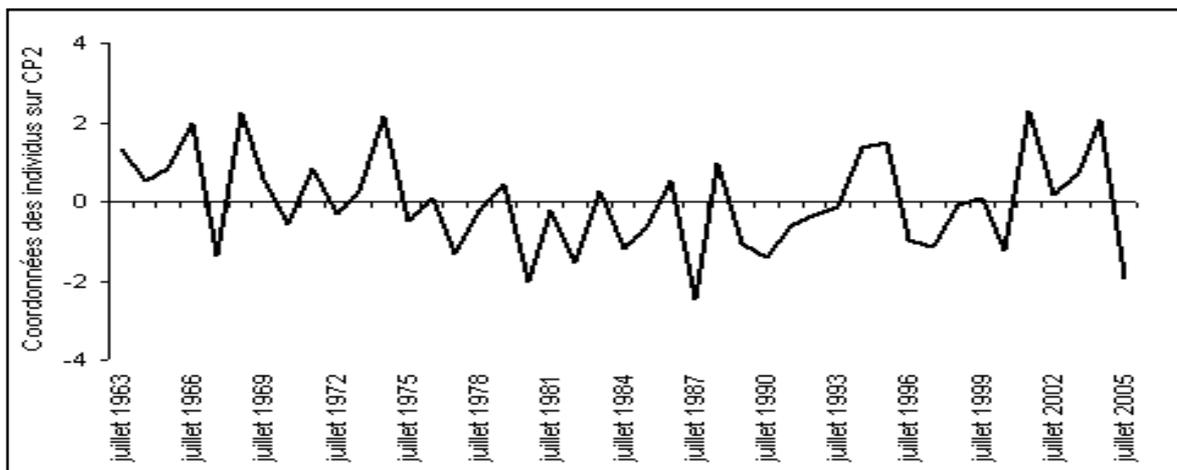


Figure 4. 42 : Profil d'événements communs aux 12 postes sur CP2 au mois de juillet (1963-2005) (Sarr M. A., 2008)

La position des stations comme Ranérou, Matam, Louga, Coki, Yang Yang (**figure 4.41**) est aussi bien décrite par la CP2 que la CP1. La pluviométrie pendant le mois d'octobre est caractérisée par des déficits depuis les années 1970 jusqu'à la fin des années 1990. En revanche, l'année 2000 a connu manifestement dans ces régions une bonne pluviométrie par rapport à la moyenne. Cette situation est bien exprimée par la CP1 (**figure 4.39**) et par la CP2 (**figure 4.43**).

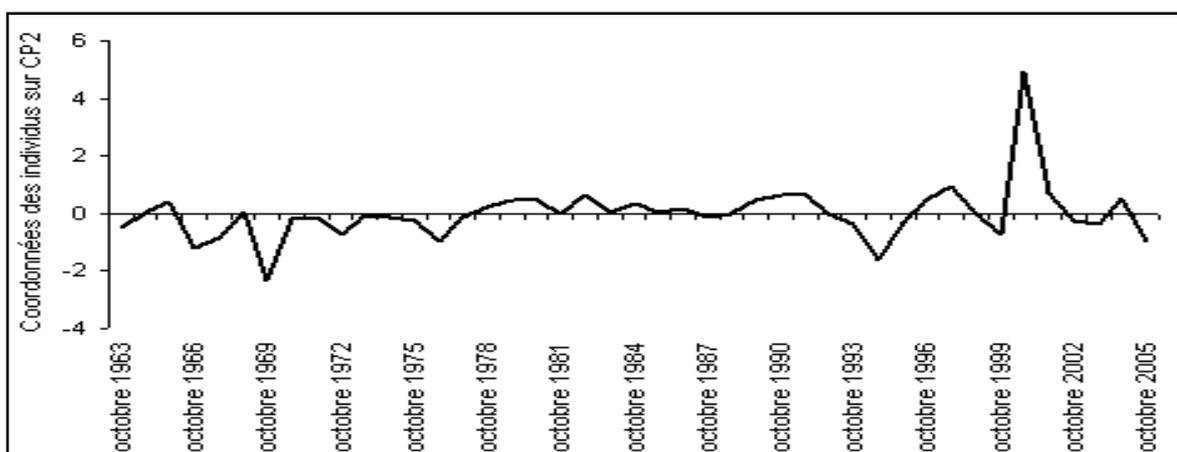


Figure 4. 43 : Profil d'événements communs aux 12 postes sur CP2 au mois d'octobre (1963-2005) (Sarr M. A., 2008)

En conclusion, plusieurs constats peuvent être dégagés de l'analyse sur les précipitations à l'échelle annuelle, saisonnière et mensuelle dans le bassin versant du Ferlo à partir des analyses en composantes principales.

Tant à l'échelle mensuelle, qu'à l'échelle annuelle, les ACP ont mis en évidence :

- 1- Un profil d'évolution commun de ces différentes stations, régie par les mêmes caractéristiques climatologiques.
- 2- On peut également observer une opposition entre deux zones ; la partie sud-est et la partie nord-ouest, ce qui implique l'existence de zones pluviométriques aux caractéristiques spécifiques à l'intérieur du bassin versant du Ferlo. Cette division spatiale, en l'absence de tout relief et de caractéristiques pédologiques, géomorphologiques et paysagères différentielles, détermine l'existence de gradients nord-sud et est-ouest.
- 3- Enfin, les résultats des ACP sur les différents mois de la période d'hivernage, en conjugaison avec les conclusions des ACP sur les cumuls annuels, montrent une stabilité ou une permanence des structures caractéristiques de la pluviogenèse du Ferlo. Ces comportements locaux intègrent parfaitement le modèle de la dynamique de la circulation générale. Ces résultats témoignent aussi : tant à l'échelle annuelle qu'à l'échelle mensuelle, d'une part d'un déficit pluviométrique plus prononcé dans les années 70 et d'autre part, d'une atténuation de ce dernier vers les années 1990 et 2000.

***In fine*, l'analyse en composantes principales confirme la variabilité des précipitations à toute échelle, mais elle confirme également l'amélioration des volumes précipités. L'analyse en composantes principales apporte aussi des éléments de précision sur l'organisation spatio-temporelle de la pluviométrie.**

5. CONCLUSION

L'étude descriptive et statistique de la pluviométrie permet plusieurs constats qu'il faut prendre en considération dans les enjeux sociétaux du domaine d'étude.

Il a été démontré que ces toutes dernières années, particulièrement les deux dernières décennies, sont caractérisées par une situation pluviométrique améliorée même s'il existe quelques disparités entre les stations. 64 % des *maxima* pluviométriques de la série 1970-2005 ont été enregistrés durant la décennie 1996-2005. L'isohyète 400 mm remonte sensiblement vers les latitudes les plus septentrionales. L'évolution du nombre de jours de pluie dans la zone d'étude traduit parfaitement cette amélioration (corrélation significative avec les cumuls annuels).

Les résultats de l'analyse de l'évolution de la pluviométrie laissent penser à une séquence climatique (depuis la fin des années 1980), plus humide que celle des années 1970-1980, mais qui reste encore plus sèche que la séquence des années 1950-1960. **L'étude de la pluviométrie annuelle du Ferlo met en évidence d'abord une baisse continue des volumes d'eau précipités jusque dans les années 1970/1980 selon les stations. Ensuite, on observe une courte période, des années 1970 au milieu des années 1980 selon les stations, caractérisée par la fin de l'aggravation des déficits pluviométriques. Cette période reste relativement stationnaire en terme d'évolution. Enfin, la dernière période montre une amélioration de la pluviométrie annuelle (milieu des années 1980 à 2005).** Les cumuls enregistrés lors des années 2006, 2007, 2008 et 2009 que nous n'avons pas eu le temps d'intégrer dans la thèse, qui sont supérieurs à la normale (1951-2005), **confirment la tendance à la hausse des précipitations** dans le domaine d'étude. En 2007, malgré un démarrage très tardif de l'hivernage, des pluies diluviennes ont touché toute la région de l'Afrique de l'ouest (FAO, 2007). **Au cours de la saison des pluies des années 2008 et actuellement 2009, la situation se renouvelle encore une fois sur presque toute l'Afrique de l'ouest causant des inondations au Bénin, au Burkina Faso, au Sénégal, au Niger, etc.** A titre d'exemple, nous avons observé à Bakel 650,8 mm en 2007 contre 550 mm de moyenne (1951-2005), mais aussi à Saint-Louis avec 320 mm, à Podor avec 334,4 mm en 2006 et 2007 contre une normale de 276 mm à Saint-Louis et de 248 mm à Podor. Selon le rapport sur *l'état de l'environnement au Sénégal (2005)*, on note l'amorce d'une amélioration pluviométrique

observée pendant ces cinq dernières années mais elle semble antérieure dans plusieurs stations. Selon le quotidien électronique sénégalais, *rewmi* du 29 septembre 2009, *trois postes couvrant le département de Linguère (Linguère, Dahra et Barkédji) ont tous enregistré en 2009 des cumuls annuels excédentaires par rapport à ceux de 2008. Linguère est passé de 324 mm en 2008 à 656,6 mm sur 25 jours de pluie en 2009. Dahra a enregistré en 2008 une moyenne de 150,5 mm alors qu'en 2009 il passe à 431 mm sur 20 jours de pluie. Du côté de l'état des cultures, elles ont suivi l'échelonnement des pluies avec un développement et une bonne croissance des semis et cela pour une bonne partie du territoire départemental aussi.* Janicot Serge⁵⁶ fait la même constatation, dans un communiqué de presse de l'IRD analysant la saison pluvieuse de 2007 et parle «des excédents importants de précipitations, les plus dévastatrices depuis trente ans, causant des déplacements importants de populations, et des dégâts sur les cultures et le bétail». Cette situation récente, démontrée dans notre analyse, laisse apparaître sous un autre angle de l'espoir pour le monde rural ainsi que pour l'économie du pays d'une manière générale. **La forte variabilité interannuelle et les différentes tendances sur une période de 55 années traduisent toute la difficulté de pouvoir caractériser l'évolution de la pluviométrie sahélienne. Cette difficulté pose aujourd'hui la question de la représentativité de la moyenne pluviométrique comme elle est souvent donnée dans les manuels.**

Si la pluviométrie est l'un des paramètres climatiques les plus déterminants de la vie sociale et économique des régions sahéliennes touchées par des déficits pluviométriques importants depuis de nombreuses années, l'évaluation de la situation climatique du bassin versant du Ferlo nécessite d'analyser d'autres paramètres climatiques dont l'impact est fort sur la végétation et sur les conditions de sécheresse. L'évaluation de ces paramètres mis en corrélation avec l'évolution des pluies peut permettre de confirmer cet espoir d'une amélioration des conditions générales du climat. Ont été retenus dans cette étude, les facteurs et les conditions thermiques (insolation et températures), l'évaporation et l'humidité relative.

⁵⁶ Serge Janicot, climatologue et Directeur de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement.

POURQUOI ÉTUDIER D'AUTRES PARAMÈTRES CLIMATIQUES ?

Pour évaluer le caractère aléatoire du phénomène climatique qui conduit à l'apparition de tendances différentes sur une série de mesures, il est nécessaire de multiplier les études sur les autres paramètres hormis la pluie sur la période la plus longue possible. Un seul paramètre ne suffit pas en effet à déterminer une évolution climatique globale. Dans le cas du Ferlo, plusieurs contraintes majeures liées à la donnée rendent difficile la réalisation de ce projet. L'étude des paramètres climatiques proposés : durée d'insolation, températures, humidité relative, évaporation ne vise en aucune manière à faire une analyse climatique exhaustive. **Ces analyses visent à évaluer l'existence d'indices dont la représentativité, certes relative aux remarques précédentes, permettrait cependant d'étayer l'hypothèse d'un changement climatique récent au Ferlo, voire une amélioration de ces conditions climatiques.**

CHAPITRE 5 : ÉVOLUTION DES FACTEURS ET DES CONDITIONS THERMIQUES : UNE TENDANCE CONTRASTÉE

Le bassin versant du Ferlo se caractérise par un bilan thermique annuel positif du fait de son appartenance au domaine intertropical et son rattachement à la bande sahélienne. Sa position latitudinale ainsi que la quantité d'énergie solaire reçue déterminent les différentes saisons au cours de l'année. Ainsi, la quantité d'énergie reçue est en forte relation avec la durée d'insolation⁵⁷. Cependant, elle reste fortement affectée par différents éléments tels que la couverture nuageuse et la densité des aérosols présents dans l'atmosphère. A ce titre, l'évolution de la durée d'insolation et celle des températures montrent des tendances contrastées.

1. UNE TENDANCE À LA BAISSÉ DE LA DURÉE D'INSOLATION

L'analyse de la durée d'insolation repose sur les données (cumuls mensuels en heures d'insolation) des stations de Linguère, Matam, Podor et de Saint-Louis.

Les données disponibles dans cette partie du Sénégal sont relativement récentes. Elles couvrent la période de 1961 à 2002 pour ces quatre stations. Il faut ajouter que la série de Linguère et celle de Podor comportent quelques années manquantes. 1993 et 1997 pour Linguère et 1999 et 2000 pour Podor. Les données de la durée d'insolation sont mesurées grâce à un héliographe. L'état des données disponibles est établi dans le **tableau 5.1** et sur la **figure 5.1**.

Stations	Période observée
Linguère	1962 - 1998
Matam	1958 - 2001
Podor	1973 - 2002
Saint-Louis	1961 - 2002

Tableau 5. 1 : Périodes de recueil des données de la durée d'insolation

⁵⁷ L'insolation est étroitement liée à la nébulosité qui exprime le taux de recouvrement du ciel par les nuages. Ce taux est tributaire non seulement des saisons caractéristiques, en l'occurrence la saison sèche et la saison humide, mais il est aussi fonction de l'intensité et de la durée des situations aérodynamiques qui rythment le climat.

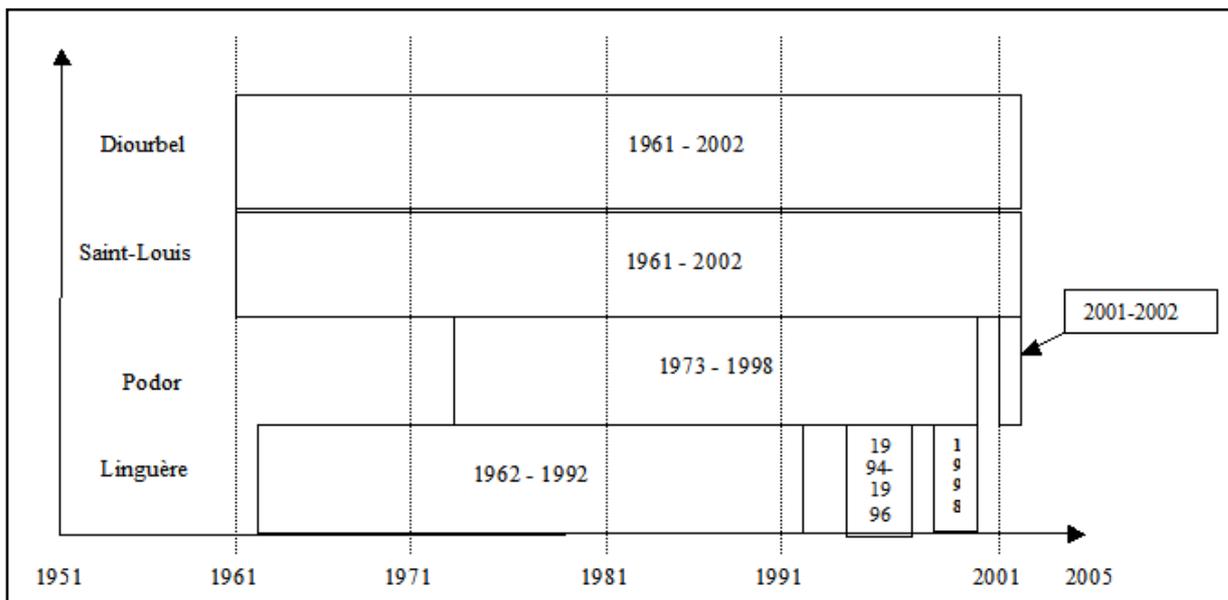


Figure 5. 1 : Longueur de la série des données de la durée d'insolation et lacunes (Sarr M. A., 2008)

En comparant les données de l'insolation des stations sur la série commune de 1973 à 1998 (**Tableau 5.2**), nous constatons la durée d'ensoleillement le plus fort au Nord à Podor et à Linguère, puis vient la station de Matam, à l'est. La station de Saint-Louis, la plus occidentale, est la moins ensoleillée à cause des conséquences de sa situation littorale qui atténuent fortement l'insolation.

Stations	Insolation en heures
Podor	3168
Linguère	3086
Matam	2970
Saint-Louis	2763

Tableau 5. 2 : La moyenne annuelle de la durée d'insolation sur la période 1973-1998 (Sarr M. A., 2008)

Nous allons, à partir de ces quatre stations, étudier la répartition mensuelle et annuelle de l'insolation avec leurs séries de données.

1.1. Distribution mensuelle de l'insolation

Les variations de la durée de l'insolation mensuelle, exprimées en heures et dixièmes d'heures, sont résumées dans le **tableau 5.3**. D'une manière générale, sur l'ensemble de nos stations, la durée d'insolation maximale est enregistrée pendant les mois d'avril et de mai. En

revanche, la durée d'insolation minimale est observée entre les mois de septembre (cœur de la saison pluvieuse) et de février (en hiver boréal). Cette variation saisonnière de la durée d'insolation dépend du mouvement zénithal du soleil (Cf. Chapitre 2) et de facteurs locaux tels que la couverture nuageuse (flux de mousson) et la présence de l'harmattan (flux d'alizé continental). Elle met en opposition deux situations : septembre-février et avril-mai.

L'analyse de l'insolation de chacune de ces stations traduit une variation commune mais elle confirme également quelques particularités.

	Linguère	Matam	Podor	Saint-Louis
Janvier	250	259	243	233
Février	249	247	224	231
Mars	268	285	239	273
Avril	277	290	265	281
Mai	269	285	272	276
Juin	236	257	234	210
Juillet	236	264	252	226
Août	232	293	260	241
Septembre	225	245	234	224
Octobre	258	270	261	257
Novembre	248	258	241	238
Décembre	237	252	237	225

Tableau 5. 3 : La durée d'insolation moyenne mensuelle en heures et dixièmes d'heures sur l'ensemble des périodes d'observation (Sarr M. A., 2008)

La répartition de la durée d'insolation moyenne mensuelle de la station de Matam reflète la situation la plus représentative du phénomène d'insolation dans le Sahel en général et dans le Ferlo en particulier. En effet, la disparité saisonnière observée (**figure 5.2**) entre la période de mars à mai (valeurs fortes) et celle de juin à septembre, (valeurs faibles) sans oublier la période d'octobre à février (valeurs intermédiaires) symbolise parfaitement la distribution mensuelle de la durée d'insolation au Ferlo. Le phénomène est très marquant surtout au niveau des phases de transition. On en remarque trois : de mai à juin (une perte de 30 heures), de septembre à octobre (un gain de 20 heures) et la dernière de février à mars (un gain de 37 heures). La situation de l'insolation en mars, en avril et en mai donne respectivement 285 heures, 290 heures et 285 heures. Juin, juillet, août, septembre ont eu une durée d'insolation de

257 heures, 264 heures, 293 heures, 245 heures respectivement. Le minimum est observé au mois de septembre.

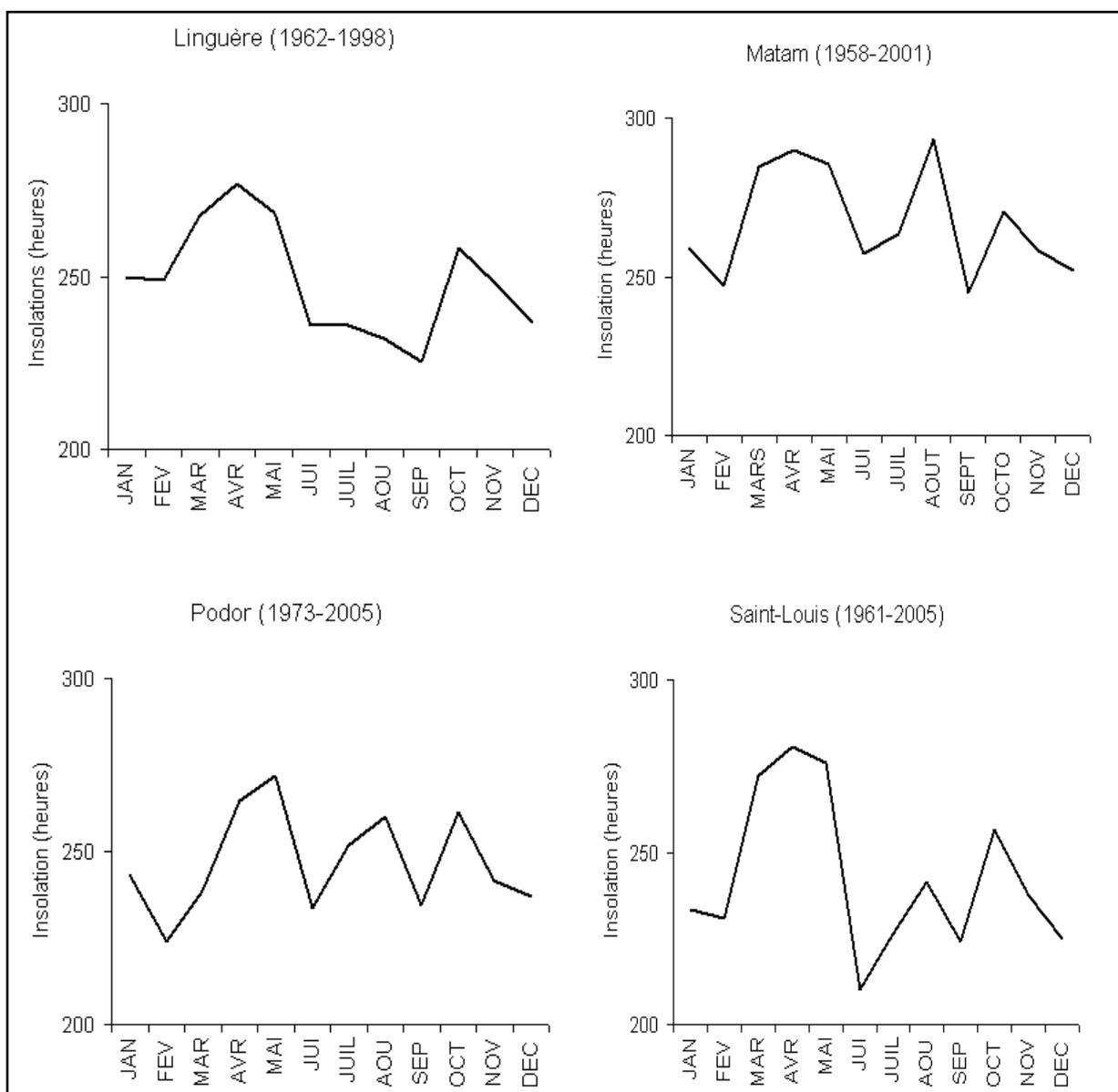


Figure 5. 2 : Variations mensuelles de la durée d'insolation (Sarr M. A., 2008)

A Linguère, au cours de l'année, sur la série 1962-1998, les fortes valeurs sont enregistrées aux mois de mars (268 heures) et d'avril avec un maximum de 277 heures et de mai (269 heures). Cette période se trouve au cœur de la saison sèche ce qui explique cette insolation élevée au détriment des mois qui caractérisent l'hivernage au Ferlo, qui se voit attribuer les plus faibles valeurs en raison des couvertures nuageuses dues à la progression de la mousson pendant cette période de l'année. Ces mois sont : juin et juillet avec 236 heures, août avec 233 heures, et septembre qui enregistre le minimum annuel avec 225 heures (**figure 5.2**).

Une situation assez similaire est aussi observée pour les mois de novembre, décembre, janvier et même février où l'insolation reste faible (solstice d'hiver). En plus du facteur cosmique, ce phénomène est dû également aux incursions d'air polaire qui provoquent la formation de couvertures nuageuses sur la région et conduisent à une insolation moindre.

A Saint-Louis, les mois les plus «ensoleillés» correspondent aux mois de mars, avril et mai avec respectivement 273 heures, 281 heures et 276 heures. Les valeurs connaissent une chute importante à partir du mois de juin. Juin enregistre une perte de 70 heures d'ensoleillement par rapport à la valeur maximale, soit plus de 25 %. Par ailleurs, signalons qu'octobre représente une phase de transition entre la période caractérisée par une couverture nuageuse fréquente liée à la progression de la mousson d'une part, et une autre période de faibles valeurs où la durée d'insolation est atténuée par les alizés maritimes d'autre part (**figure 5.2**).

A la station de Podor, la configuration de la répartition mensuelle de la durée d'insolation est relativement identique à celle de la station de Saint-Louis. Les *maxima* sont enregistrés aux mois d'avril et mai. La période de juin à septembre est caractérisée par les valeurs les plus faibles. Le reste de l'année est sous l'influence de deux alizés aux caractères différents (alizés maritimes et continentaux) ; par conséquent la durée d'insolation d'octobre à février reste assez faible par rapport à la période mars-mai et assez forte par rapport à la période juin-septembre.

1.2. Variabilité interannuelle et tendance à la baisse

L'analyse de la durée moyenne annuelle de l'insolation au Ferlo pour la période étudiée traduit très manifestement une forte variation interannuelle (**figure 5.3**). Au delà de cette fluctuation interannuelle, l'évolution de la durée moyenne annuelle de la durée d'insolation laisse apparaître quelques tendances contrastées. A titre d'exemple, l'évolution à la station de Linguère traduit une hausse depuis 1962 jusqu'au milieu des années 1970 puis on observe une situation stabilisée. A Matam (très nette à partir de 1982), Podor, Saint-Louis, on observe une tendance à la baisse très significative surtout à Podor (jusqu'en 1992) et à Saint-Louis (jusqu'en 1997-1998).

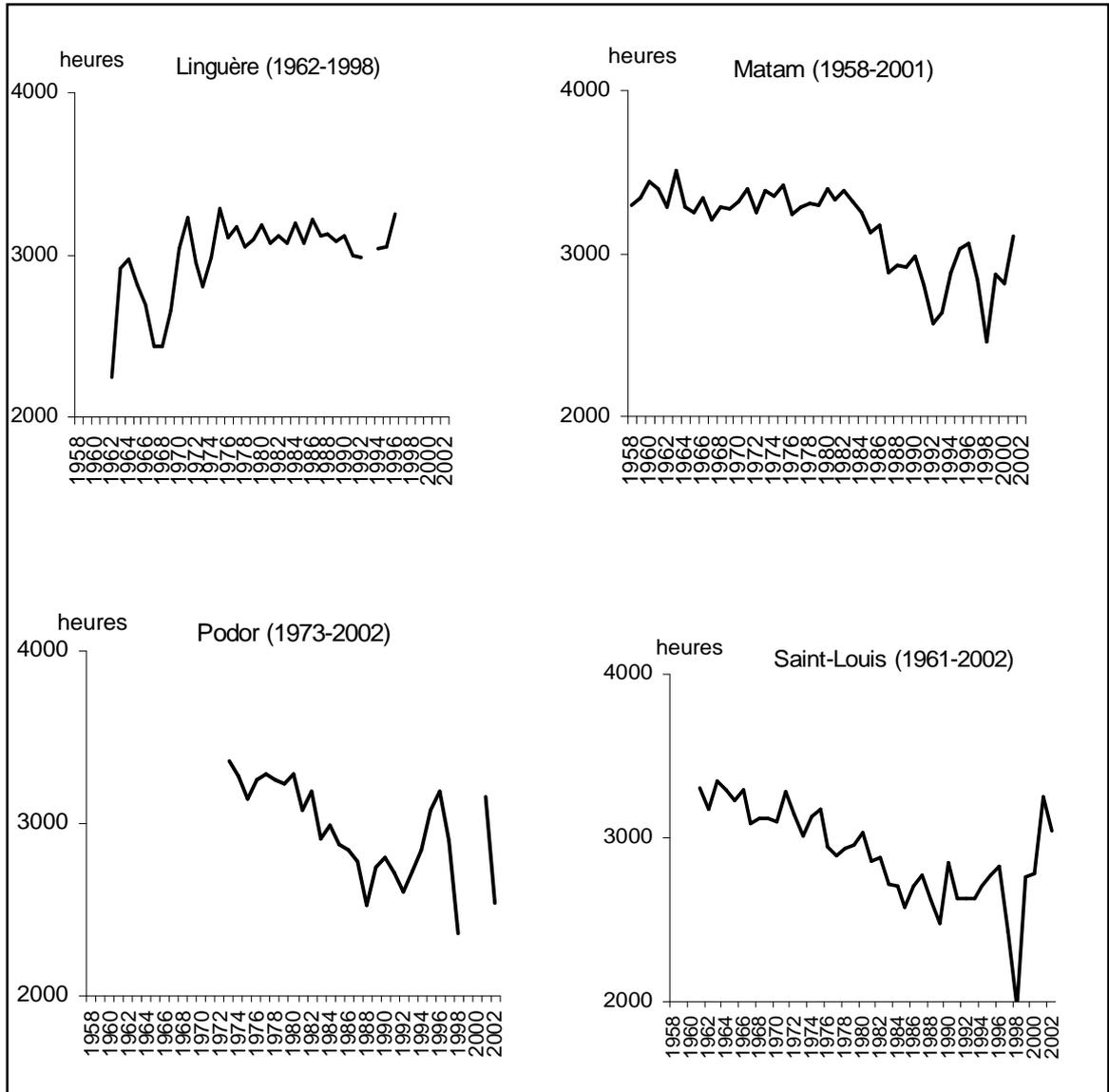


Figure 5. 3 : Évolution interannuelle de la durée d'insolation (1958-2002) (Sarr M. A., 2008)

L'évolution interannuelle de la durée moyenne de l'insolation dans chacune de ces régions permet de diviser la série en périodes caractéristiques d'une tendance (**figure 5.4**). La division de la série de données de chaque station en périodes reste fortement déterminée par la configuration des valeurs annuelles par rapport à la moyenne qui reste une valeur indicative.

A Linguère, la série peut être divisée en deux périodes. De 1962 à 1974, la durée de l'insolation est inférieure à la moyenne de la série 1962-1998. La station n'a enregistré que des valeurs négatives avec un minimum en 1962 avec 2240 heures. De 1974 à 1998, la situation est parfaitement stable mais avec des valeurs au-dessus de la moyenne (**figure 5.4**).

A Podor, la série est également divisée en deux périodes. La période 1973-1982 enregistre que des valeurs excédentaires par rapport à la moyenne. Le maximum est noté en 1973 avec 3368 heures. La période de 1983 à 2002 se caractérise par une situation déficitaire même si trois années (1995, 1996 et 2001) ont enregistré des valeurs positives. Le minimum est de 2360 heures en 1998 (**figure 5.4**).

A Matam, la période 1958-1984 est au dessus de la moyenne contrairement à la période 1985-2001 qui comptabilise que des valeurs déficitaires à l'exception de l'année 1991. Le maximum de la série est de 4930 heures en 1991 alors que le minimum est localisé en 1998 avec 2463 heures (**figure 5.4**).

La série de Saint-Louis est scindée en deux périodes : 1961-1980 et 1981-2002. La première période est largement au dessus de la moyenne avec un maximum en 1963. La dernière période répond parfaitement à une situation déficitaire de la durée d'insolation sauf que les valeurs des deux dernières années de la période sont au-dessus de la moyenne. Le minimum est enregistré en 1998 (**figure 5.4**).

Dans le détail, d'autres constats peuvent être avancés sur la durée d'insolation.

- Le comportement singulier de la station de Linguère, le plus méridional, par rapport à celui des autres montre l'intérêt des applications de la climatologie à l'échelle fine sur le territoire sénégalais. La station de Linguère a une longue séquence où les valeurs annuelles sont inférieures à la moyenne et une seconde où elles sont supérieures à celle-ci en totale contradiction avec les autres stations. Cette situation pose deux hypothèses : serait-elle liée à l'influence d'un facteur très local ou à la défaillance de la plateforme de mesure ?
- Les stations de Podor, Saint-Louis, Matam connaissent une première période caractérisée par des valeurs annuelles de la durée d'insolation supérieures à la moyenne au détriment de la deuxième période, totalement déficitaire. Leurs courbes d'évolution ont relativement la même allure.

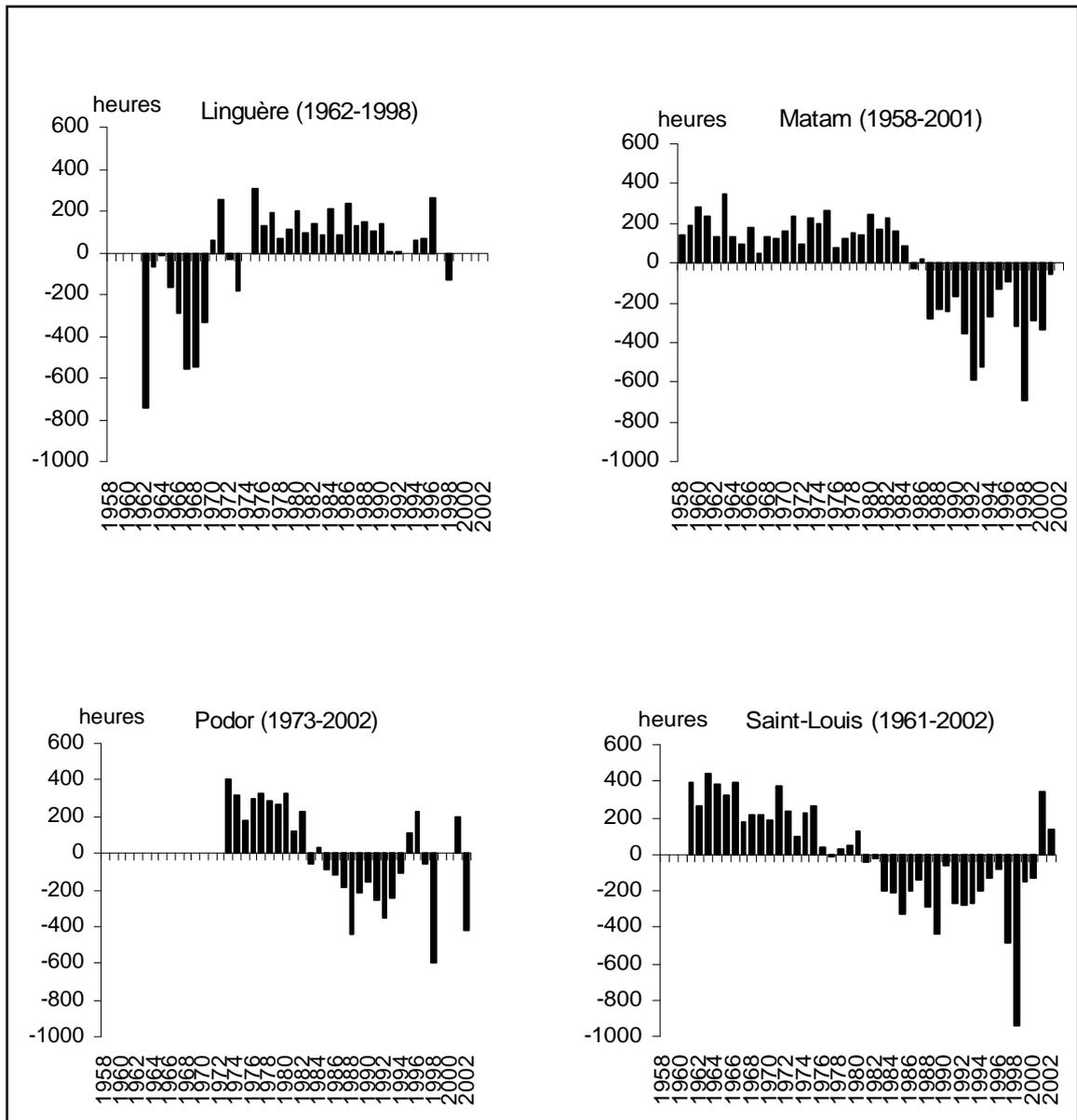


Figure 5. 4 : Variations des écarts de la durée d'insolation par rapport à la moyenne de la série (Sarr M. A., 2008)

Une autre situation assez paradoxale, à première vue, est constatée sur une relation corrélative préétablie entre l'évolution interannuelle de la pluviométrie, l'évolution des températures moyennes et celle de la durée d'insolation.

La baisse de la durée d'insolation liée à l'accroissement de la brume sèche, comme seule tentative d'explication de cette situation est-elle suffisante même si la brume sèche recouvre toute l'Afrique de l'Ouest pendant la saison sèche, et sur plusieurs jours consécutifs (Ndong, 1996). Constituant une masse poussiéreuse dans l'atmosphère, elle diminue la quantité d'énergie reçue en relation avec l'intensité ou la durée d'insolation. Mais la même influence

devrait être observée aussi à la station de Linguère, au même niveau qu'à la station de Matam par exemple quasi aussi méridionale. Par conséquent, les hypothèses sur les causes de ce phénomène semblent devoir être orientées vers d'autres pistes. L'analyse de la distribution saisonnière de la durée d'insolation peut amener également des éléments de réponse car une fréquence accrue des couvertures nuageuses durant les saisons des pluies pourrait expliquer cette baisse enregistrée au cours des dernières décennies.

En résumé, l'analyse de la durée moyenne de l'insolation reste globalement dominée par deux tendances différentes : une tendance à la hausse suivie d'une tendance à la baisse. Cette évolution met en évidence la particularité des années 1980 où tous les changements de tendance (sauf à Linguère) se sont faits (entre 1981 et 1984) (figure 5.4). Cette situation rappelle l'inversion de la tendance des précipitations au cours de la même période. Elle montre l'intérêt de l'analyse de la durée d'insolation car son évolution confirme notre hypothèse sur l'évolution de la pluviométrie.

2. UNE ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES CONTRASTÉE : UNE PREMIÈRE PÉRIODE PLUS FRAÎCHE ET UNE SECONDE PÉRIODE PLUS CHAUDE DEPUIS LES ANNÉES 1980

Les températures dépendent d'abord de la situation en latitude, de la localisation géographique des stations mais aussi des caractères changeants des flux. Le régime thermique dépend aussi du degré de continentalité de la zone considérée. L'analyse des températures est de manière générale essentielle à la description des caractères moyens du climat. Elle prend une importance particulière dans les régions sahéliennes en raison de l'impact des conditions thermiques sur l'intensité de la sécheresse. Les températures sont souvent liées à l'état de l'humidité relative, de la durée d'insolation et de l'évaporation, mais aussi des précipitations. Dans la zone intertropicale, les températures varient peu à l'échelle annuelle. Elles ne constituent pas un élément fondamental de différenciation climatique notamment saisonnière à l'inverse de la pluviométrie, même si elles apportent des nuances dans la caractérisation climatique de ces régions.

L'étude des données de températures du domaine d'étude aborde trois axes majeurs :

- La distribution mensuelle des températures, caractéristiques des saisons et de leur évolution ;
- un gradient thermique selon la répartition des différentes stations ;
- les différentes tendances dans l'évolution des séries de mesure.

La fiabilité variable et la disponibilité des données de températures dans cette région nous imposent là encore de faire des choix de stations pour rendre l'étude la plus représentative possible. Les critères de sélection, de même nature que ceux utilisés pour la pluviométrie, permettent de retenir cinq stations. Il s'agit de Podor, Saint-Louis, Linguère, Matam et Diourbel (**tableau 5.4**). Pour la station de Linguère, nous travaillons sur des données de températures minimales, maximales et moyennes concernant la période allant de 1960 à 1998. Pour les stations de Podor, Matam, Saint-Louis, les températures minimales, maximales et moyennes concernent la période de 1951 à 2005. A Diourbel, seules les températures moyennes de 1961 à 2002 sont prises en compte pour notre analyse (**figure 5.5**).

Précisons par ailleurs, que l'année 1999 manque à la série de Diourbel. Les années 2003 et 2004 ne sont enregistrées dans aucune des stations (**figure 5.5**).

Stations	Période observée
Diourbel	1961-2005
Linguère	1960-1998
Matam	1951-2005
Podor	1951-2005
Saint-Louis	1951-2005

Tableau 5. 4 : Séries de relevés de températures (Sarr M. A., 2008)

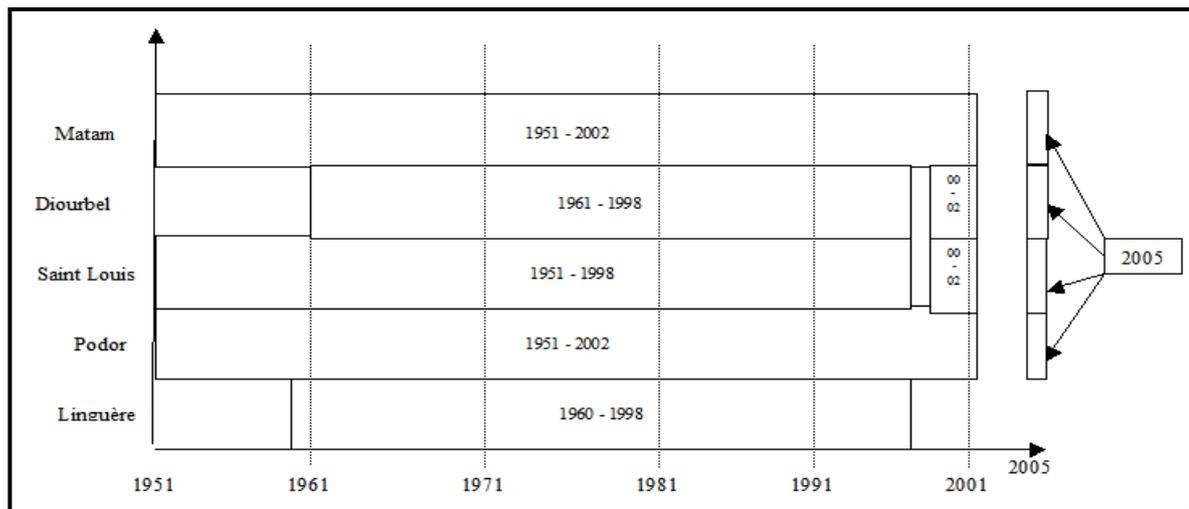


Figure 5. 5 : Longueur de la série des données de l'insolation et lacunes (Sarr M. A., 2008)

2.1. La distribution spatiale des températures mensuelles

Les variations des températures caractérisent parfaitement les deux principales saisons dans cette région nord du Sénégal, la saison sèche et la saison des pluies. Cette saisonnalité reste intrinsèquement déterminée par l'alternance des flux soufflant sur la région du Ferlo durant toute l'année. Entre les flux d'alizé au cours des mois de décembre, janvier et février (conditions fraîches au Ferlo), les flux d'air chaud (Harmattan) au cours des mois de mars, avril, mai et juin (conditions chaudes au Ferlo), les flux d'air humide et moins chaud (mousson) pendant les mois de juillet, août, septembre (conditions humides) et les flux humides et chauds (mi-septembre et octobre, le bassin versant du Ferlo répond relativement à la même logique thermique que le reste du territoire sénégalais. Cette division en quatre «saisons thermiques» reste la conséquence des variations de températures moyennes mensuelles. Cette réalité est même reflétée par quelques termes de la langue wolof qui traduisent bien cette variation des températures au cours de l'année. Les termes wolofs utilisés sont :

«*NOR*⁵⁸», c'est la saison sèche et fraîche, singularisée par le minimum principal des températures observé aux mois de décembre, janvier et février. Cette période correspond à l'hiver dans l'hémisphère Nord ce qui se traduit par l'influence des masses d'air polaires (AMP) sur toute l'Afrique occidentale.

La saison sèche et chaude, appelée «*THIORON*», correspond aux mois de mars, avril, mai, début juin ; période à laquelle on observe le maximum principal des températures (sauf à la station de Saint-Louis, station littorale) ; elle précède les premières précipitations de la saison des pluies.

La saison humide et moins chaude, «*NAWEET*», correspond aux mois de juin, de juillet, d'août, de septembre et jusqu'à mi-octobre. Cette période enregistre le minimum secondaire des températures.

La saison humide et chaude ou «*LOLI*», avec le minimum principal des températures, détermine la fin de l'hivernage ce qui entraîne une remontée sensible de ces températures. Elle correspond globalement au mois d'octobre et au début novembre.

Les variations mensuelles des températures minimales, maximales et moyennes mettent en évidence des situations regroupées entre un maximum principal, un maximum secondaire, un minimum principal et un minimum secondaire (**figures 5.6, 5.7 et 5.8**). Mais nous n'allons considérer que les deux extrêmes (maximum principal et minimum principal) pour notre analyse.

Dans la région du Ferlo, un domaine sous l'influence alternée des alizés (continental et maritime) au cours de la saison sèche, et de la mousson en saison des pluies, on remarque qu'au niveau des températures minimales mensuelles, que les maxima principaux sont partagés entre les mois de juillet, septembre et juin. En revanche, tous les *minima* principaux sont enregistrés au mois de janvier (**figure 5.6**).

A la station de Diourbel, le maximum des températures minimales mensuelles intervient au mois de juillet (24° C) de même qu'à la station de Linguère où elles sont de l'ordre de 24,4° C. A la station de Matam, les températures minimales mensuelles connaissent un maximum de 27,1° C au mois de juin.

Au mois de septembre, à la station de Podor et à celle de Saint-Louis, les températures minimales mensuelles ont un maximum de 25,1° C. Le minimum des températures minimales mensuelles est de partout observé au mois de janvier. Les valeurs sont de 16° C à Diourbel,

⁵⁸ NOR, THIORO, NAWET, LOLI : Mots wolofs traduisant les nuances entre les quatre saisons thermiques.

16,4° C à Linguère, 15,4° C à la station de Matam et de Podor, et enfin 15,7° C pour Saint-Louis.

Il est constaté que les maxima principaux des températures maximales mensuelles (**figure 5.7**) s'observent au mois de mai et les minima principaux au mois de janvier pour tous les postes de mesures à l'exception de Saint-Louis. Les valeurs enregistrées au mois de mai sont : 39,7° C à Diourbel, 40,6° C à Linguère, 42,7° C à Matam, 41,2° C à Podor alors que celles de janvier sont les suivantes : 33,3° C à Diourbel, 32,8° C à Linguère, 33,1° C à Matam et 31,2° C à Podor. La station de Saint-Louis se caractérise par un maximum principal noté en octobre (33,2° C) et un minimum principal au mois de mai (29,3° C).

Les valeurs de températures minimales moyennes mensuelles pour les séries de mesures mettent en évidence une plus forte valeur à Matam (22° C), suivie de celles de Podor (21,4° C), de Linguère (21,3° C), de Saint-Louis (20,4° C) et enfin la valeur moyenne de Diourbel qui est de 20,3° C.

Les températures maximales moyennes mensuelles pour les séries utilisées donnent également des données plus élevées à Matam 37,3 C, à Podor 36,5° C, à Linguère 36,4° C et à Diourbel 36,1° C. Saint-Louis retrouve la valeur la plus faible (31,1° C) ce qui n'est pas le cas au niveau des températures minimales moyennes mensuelles sur la série.

En résumé, l'analyse des températures mensuelles met en évidence quelques constats. D'abord, au niveau de l'amplitude thermique annuelle (la différence entre le mois le plus chaud et le mois le plus frais de l'année), **nous remarquons une répartition qui répond à une logique NS et EW**, de Podor à 13,6° C à Diourbel (5,6° C) également de Saint-Louis (5,7° C) à Matam (9,7° C) en passant par Linguère (7,3° C). **Les écarts diurnes moyens annuels, c'est-à-dire la différence du maximum et du minimum au cours de l'année, sont très élevés à Matam, Podor, Linguère et Diourbel avec respectivement 27,3° C, 25,8° C, 24,2° C et 23,7° C. Saint-Louis enregistre la valeur la plus faible due à sa situation littorale influencée constamment par les alizés maritimes.**

Le mois de janvier est indiscutablement le mois le plus frais de l'année alors que les températures les plus chaudes sont relevées durant le mois de mai sur la région du Ferlo, sauf à la station de Saint-Louis où octobre représente la période du maximum de température (**tableau 5.5**).

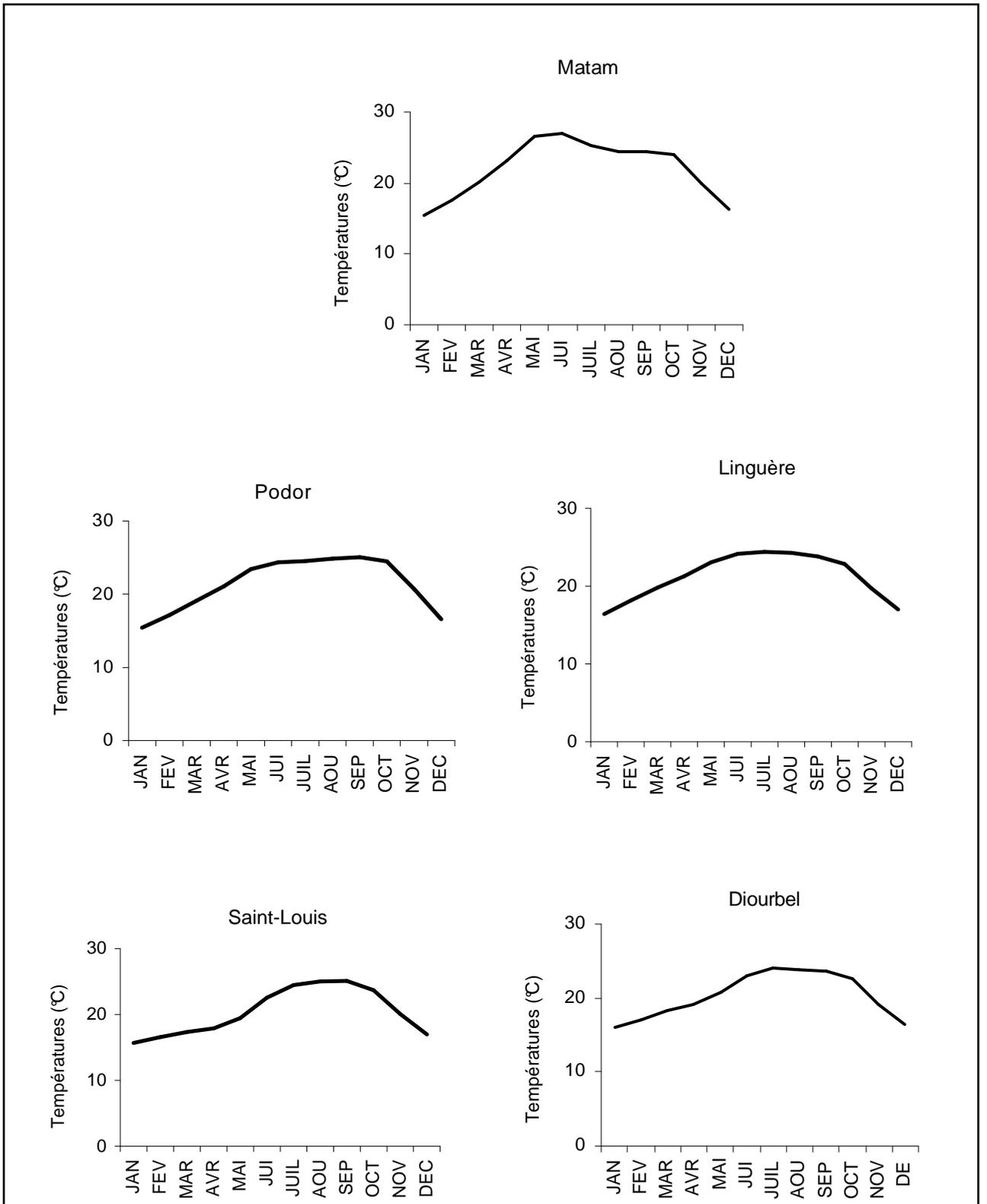


Figure 5. 6 : Températures minimales moyennes mensuelles au cours de l'année sur la période 1951-2005 (Sarr M. A., 2008)

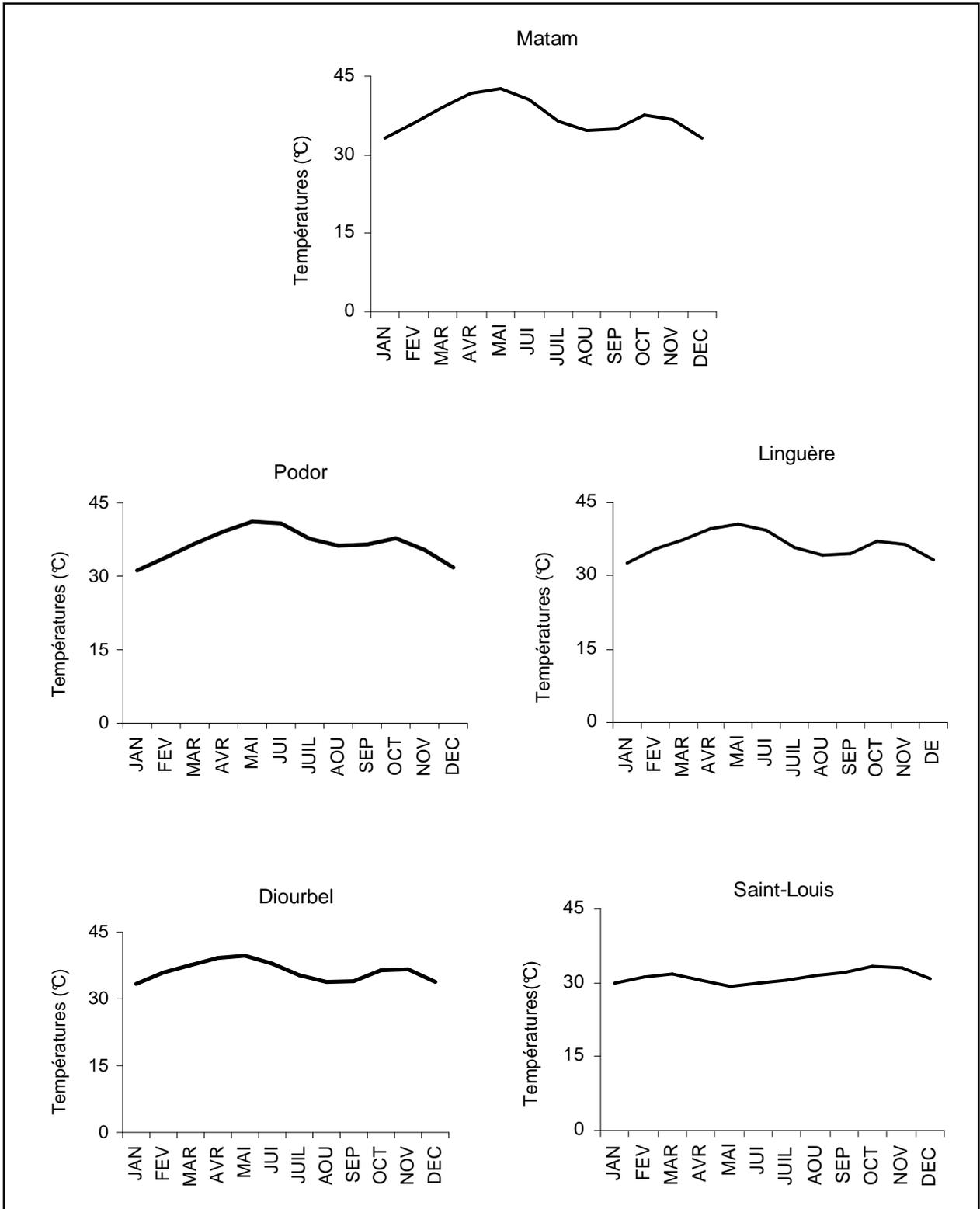


Figure 5. 7 : Températures maximales moyennes mensuelles au cours de l'année sur la période 1951-2005 (Sarr M. A., 2008)

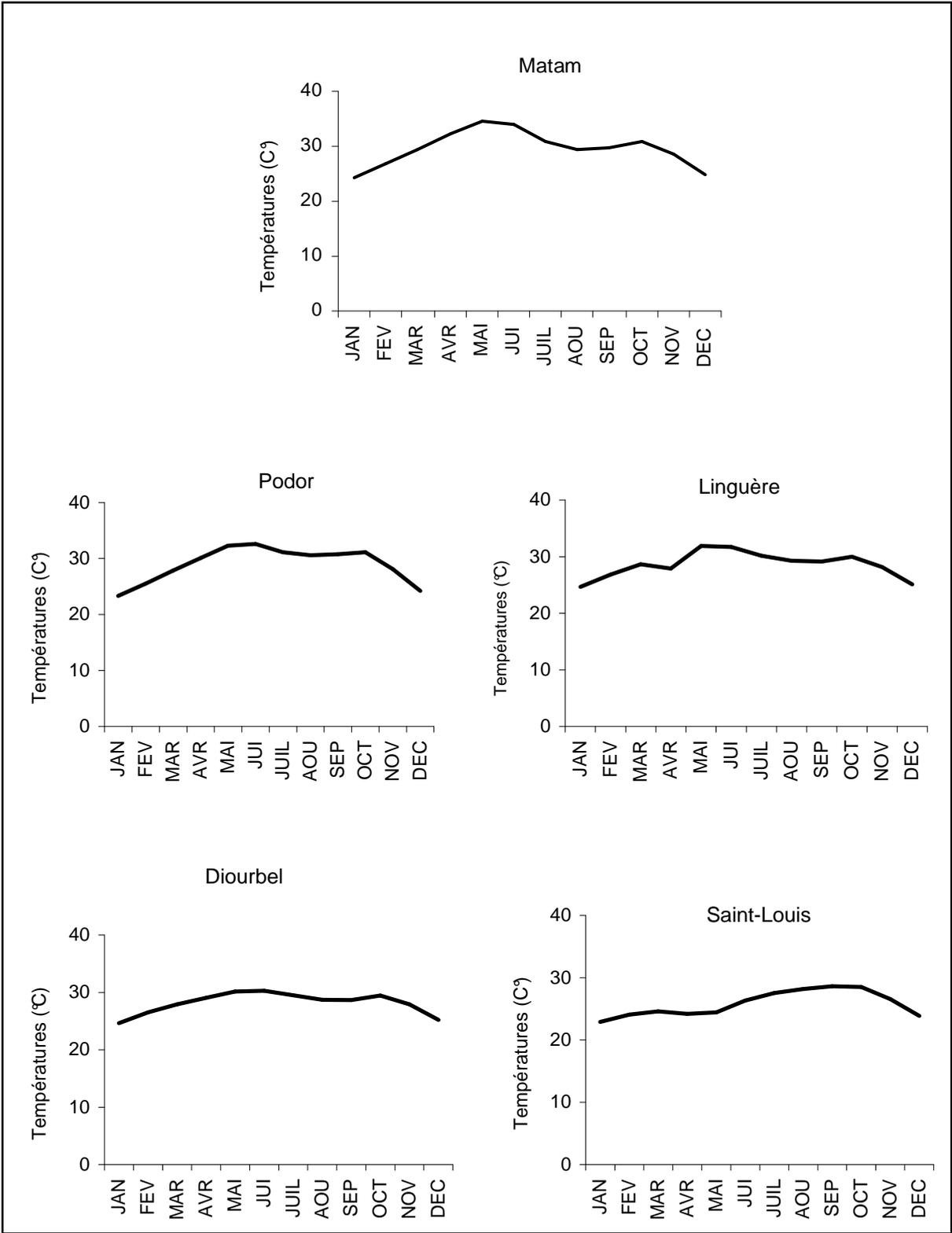


Figure 5. 8 : Températures moyennes mensuelles au cours de l'année sur la période 1951-2005 (Sarr M. A., 2008)

Stations	Diourbel				Linguère				Matam				Podor				Saint-Louis			
Mois	Tn	Tx	Am	Tm																
Janvier	16,0	33,3	17,3	24,7	16,4	32,8	16,4	24,6	15,4	33,1	17,7	24,2	15,4	31,2	15,8	23,3	15,7	29,9	14,2	22,8
Février	17,1	35,9	18,8	26,5	18,1	35,4	17,3	26,8	17,4	36,1	18,7	26,8	17,1	33,9	16,8	25,5	16,6	31,3	14,7	23,9
Mars	18,4	37,6	19,3	28,0	19,8	37,5	17,7	28,7	20,1	39,1	19,0	29,6	19,1	36,6	17,5	27,8	17,3	31,7	14,3	24,5
Avril	19,1	39,2	20,1	29,2	21,3	39,6	18,3	30,4	23,1	41,6	18,5	32,4	21,0	39,1	18,0	30,1	17,9	30,4	12,5	24,1
Mai	20,7	39,7	19,0	30,2	23,1	40,6	17,6	31,8	26,5	42,7	16,2	34,6	23,4	41,2	17,8	32,3	19,4	29,3	9,9	24,3
Juin	23,0	37,9	14,9	30,5	24,2	39,2	15,1	31,7	27,1	40,7	13,6	33,9	24,4	40,8	16,5	32,6	22,5	30,0	7,5	26,3
Juillet	24,0	35,3	11,4	29,6	24,4	35,9	11,5	30,1	25,4	36,6	11,2	31,0	24,5	37,6	13,1	31,1	24,5	30,5	6,1	27,5
Août	23,8	33,8	10,0	28,8	24,3	34,3	10,0	29,3	24,5	34,5	10,0	29,5	24,9	36,3	11,4	30,6	25,0	31,3	6,3	28,1
Septembre	23,5	34,0	10,4	28,8	23,8	34,4	10,6	29,1	24,4	34,9	10,5	29,7	25,1	36,5	11,4	30,8	25,1	32,1	7,0	28,6
Octobre	22,5	36,4	13,9	29,5	22,8	37,1	14,3	30,0	24,1	37,5	13,4	30,8	24,5	37,7	13,2	31,1	23,7	33,2	9,5	28,4
Novembre	19,1	36,7	17,5	27,9	19,7	36,6	16,8	28,1	20,0	36,8	16,8	28,4	20,7	35,4	14,6	28,0	20,1	32,9	12,9	26,5
Décembre	16,5	33,8	17,4	25,1	17,0	33,1	16,1	25,1	16,2	33,1	17,0	24,6	16,6	31,7	15,2	24,1	17,0	30,6	13,7	23,8

Tn : Températures minimales, Tx : Températures maximales, Am : Ecart diurne moyen annuel, $(Tx-Tn)/2$: Tm : Température moyenne

Tableau 5. 5 : Caractéristiques des températures mensuelles minimales, maximales et moyennes (1951-2005) (Sarr M. A., 2008)

Les variations des températures minimales et maximales au cours de l'année sont conditionnées d'une part, par le facteur cosmique et les flux qui règlent l'intensité et la durée du rayonnement solaire et d'autre part, par des facteurs locaux. Dans la zone du Ferlo, l'influence du facteur cosmique (solstice d'été au 21 juin et solstice d'hiver au 21 décembre) se traduit par un maximum au mois de mai et un minimum au mois de janvier. Les températures les plus chaudes, censées être enregistrées en pleine saison des pluies (été boréal donc plus d'apport énergétique) sont fortement influencées par les fluctuations de l'équateur météorologique. Aux mois de juillet ou d'août, l'équateur météorologique couvrant la région amène les couvertures nuageuses et les précipitations. L'intensité du rayonnement diminue, l'humidité de l'air augmente et les températures diminuent.

2.2. Les températures moyennes annuelles : un gradient nord/sud et est/ouest

La distribution spatiale des températures moyennes annuelles au cours de la période étudiée permet deux constats : le découpage latitudinal (nord/sud) comme nous l'avons précisé précédemment, et l'influence ouest/est de la continentalité avec la marque littorale de l'Atlantique. Deux gradients permettent donc de caractériser la distribution des températures moyennes annuelles de la zone du Ferlo (**figures 5.9 et 5.10**).

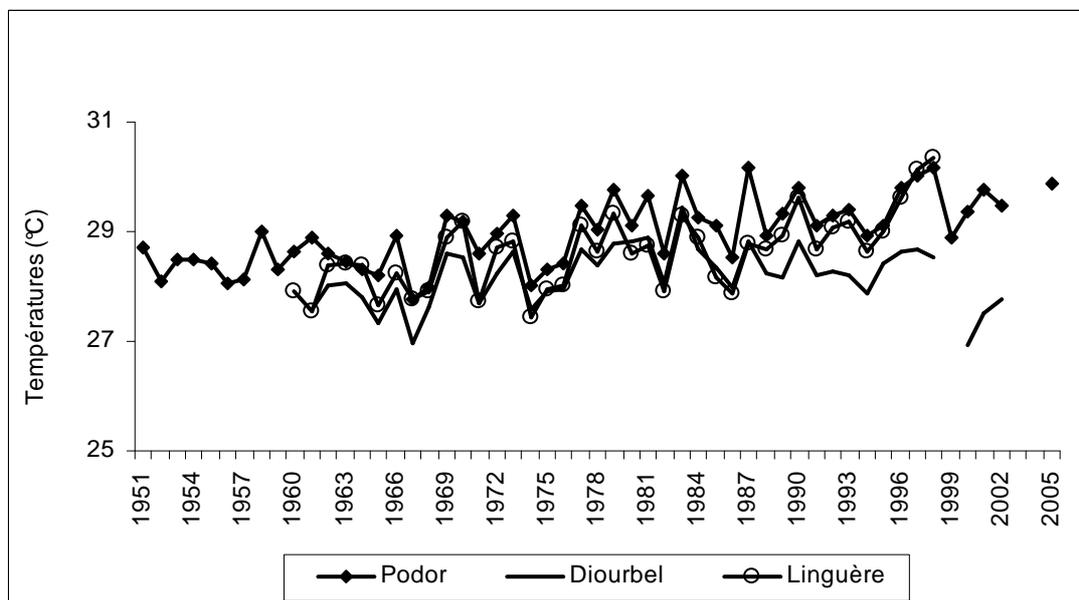


Figure 5. 9 : Évolution des températures annuelles des stations de Podor, Diourbel et Linguère traduisant un gradient thermique nord-sud (Sarr M. A., 2008)

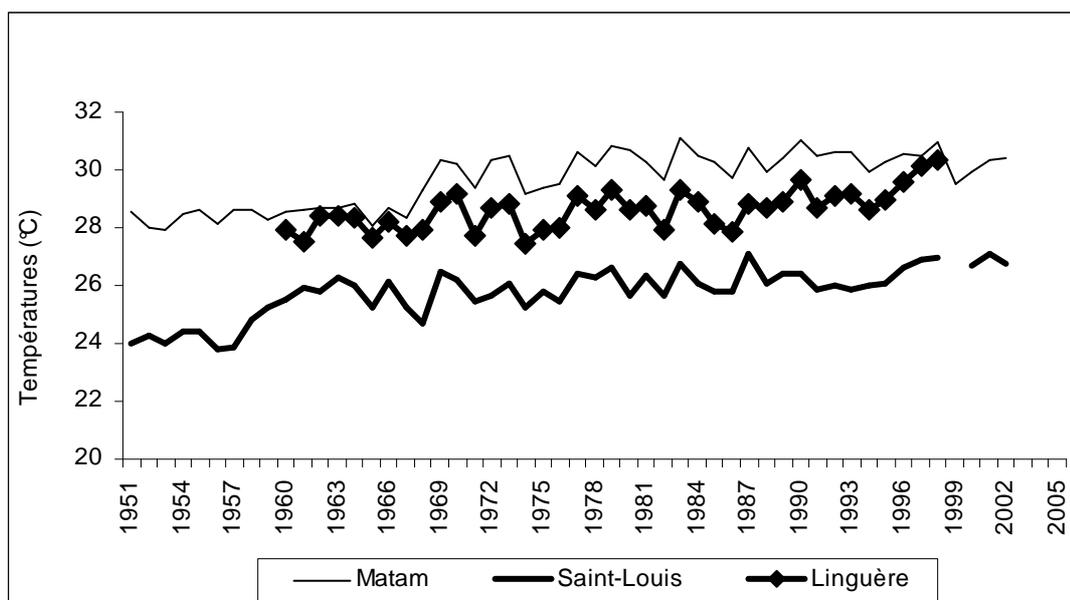


Figure 5. 10 : Évolution des températures annuelles des stations de Matam, Saint-Louis et Linguère traduisant un gradient thermique est-ouest (Sarr M. A., 2008)

Le gradient nord-sud se caractérise par des températures plus élevées au nord qu’au sud. Par exemple les moyennes annuelles de la série indiquent 29° C à Podor, 28,6° C à Linguère et 28° C à Diourbel (**figure 5.9**).

Le gradient est-ouest traduit une différenciation plus sensible entre le régime thermique du littoral et le régime thermique continental (**figure 5.10**). En effet la station de Saint-Louis a évidemment la moyenne (1961-1999) la plus basse avec 25,8° C suivie de la station de Diourbel située au sud de la zone du Ferlo avec 28,2° C. Matam enregistre 29,7° C valeur la plus forte, car cette station est la plus éloignée de l’océan. Linguère et Podor ont des moyennes proches avec respectivement 29,6° C et 29° C.

Les principales nuances thermiques sont perceptibles entre le littoral atlantique et l’intérieur du continent. Au Ferlo, l’un des principaux paramètres déterminants au regard de cette analyse, se trouve être la continentalité, même si le facteur cosmique fixe les principales périodes de faible ou de fort apport. En effet, les stations les plus continentales, comme celle de Matam, enregistrent les températures les plus chaudes. Les températures les plus fraîches sont observées à Saint-Louis qui se situe sur le littoral, sous l’influence des alizés maritimes. Elles sont fortement dépendantes de l’océan qui joue un rôle de régulateur thermique.

Les températures maximales moyennes annuelles mettent là encore en opposition les régions plus chaudes du nord et les régions du sud d'une part, et d'autre part les conditions thermiques plus fraîches des régions occidentales (littorales) et celles plus chaudes des régions est plus continentales. Les valeurs de températures maximales mesurées atteignent 37° C à Podor et 36° C à Diourbel, alors que, de Saint-Louis à Matam, la différence des températures maximales est d'environ 6° C.

Les températures minimales moyennes annuelles confirment encore la disparité qui existe entre le littoral et les régions continentales d'une part, et d'autre part les régions du nord (Podor) et celles du sud (Diourbel). En effet, Matam a enregistré une valeur de 22,1° C de température minimale moyenne contre 20,4° C à Saint-Louis. La température minimale moyenne annuelle de Podor est de 21,4° C, celles de Linguère et de Diourbel, respectivement 21,3° C et 20,3° C.

Ainsi, le schéma thermique moyen du domaine d'étude oppose une région Est avec les fortes valeurs de températures et une région Ouest où les températures sont atténuées par l'effet littoral. En revanche, le cadre moyen reste sous l'influence d'une évolution variable.

2.3. Des tendances différentes dans l'évolution des températures moyennes annuelles écartant toute caractérisation objective d'une tendance globale

L'analyse des courbes de températures moyennes annuelles, lissées par une moyenne mobile relativement courte calculée sur trois ans, des cinq stations du Ferlo, montre, comme pour les précipitations, une forte variabilité interannuelle (**figure 5.11**). L'évolution des températures laisse apparaître la particularité des années 1970-1980. Cette séquence a été le théâtre de multiples perturbations de l'écosystème du Ferlo suite à un profond déficit pluviométrique et une dégradation du couvert végétal qui favorisent d'une manière générale la tendance à la hausse des températures comme c'est le cas à Podor. **Cependant, la décennie 1980 représente aussi un point de «rupture» à partir duquel jusqu'à maintenant on peut observer, d'une part, une stagnation et/ou une hausse des températures moyennes annuelles (à Matam et à Linguère), et d'autre part une baisse sensible à Diourbel (figure 5.11).** Ces observations sont développées et confirmées avec l'appui des écarts centrés réduits pour dégager des tendances avec des périodicités.

Pour le détail, on remarque que les années 1987 et 1998 ont été les plus chaudes à Podor. 1987, 2001 et 2005 représentent les *maxima* de la série à la station de Saint-Louis. Les années 1983 et 1998 à Matam et à Diourbel, 1998 à Linguère. Les années les moins chaudes diffèrent d'une station à une autre également. 1967 à Podor, 1953 à Matam, 1956 à Saint-Louis, 2000 à Diourbel et 1974 à Linguère.

L'évolution des écarts centrés réduits des températures moyennes annuelles montre deux périodes distinctes exprimant deux tendances.

Pour chaque série il est possible de constater une première période pendant laquelle toutes les valeurs sont négatives (températures plus fraîches que la moyenne de la série) même si les écarts sont faibles. Elle concerne les décennies 1950 et 1960. Par exemple, à la station de Podor, une succession de valeurs négatives caractérise la période allant de 1951 à 1968.

Ensuite, vient une seconde période caractérisée par l'alternance d'un nombre moins important de valeurs négatives comparé aux valeurs positives (période plus chaude) de la série (**figure 5.12**). Cette période débute véritablement au milieu des années 1970 et au début des années 1980 selon les stations, date à laquelle les cumuls pluviométriques connaissent également des déficits importants dans le Sahel. A cette occasion, Nouaceur (2008) fait référence à l'année 1976 pour déterminer la période de rupture sur la Mauritanie.

En résumé, il est très nettement constaté que **l'étude de la période de «réchauffement» montre une évolution contrastée entre une stationnarité des valeurs observées à Matam, à Saint-Louis et à Podor, une hausse à Linguère et enfin une baisse à Diourbel (figure 5.12). Cette situation n'est pas significative d'une tendance globale à l'échelle du Ferlo.**

L'étude à l'échelle fine sur l'évolution des températures moyennes minimales et maximales de chaque saison permet de relever la part de chacune de ces deux saisons dans les tendances enregistrées à l'échelle annuelle. L'étude des températures à une échelle saisonnière apporte des informations qui sont en général masquées à l'échelle annuelle.

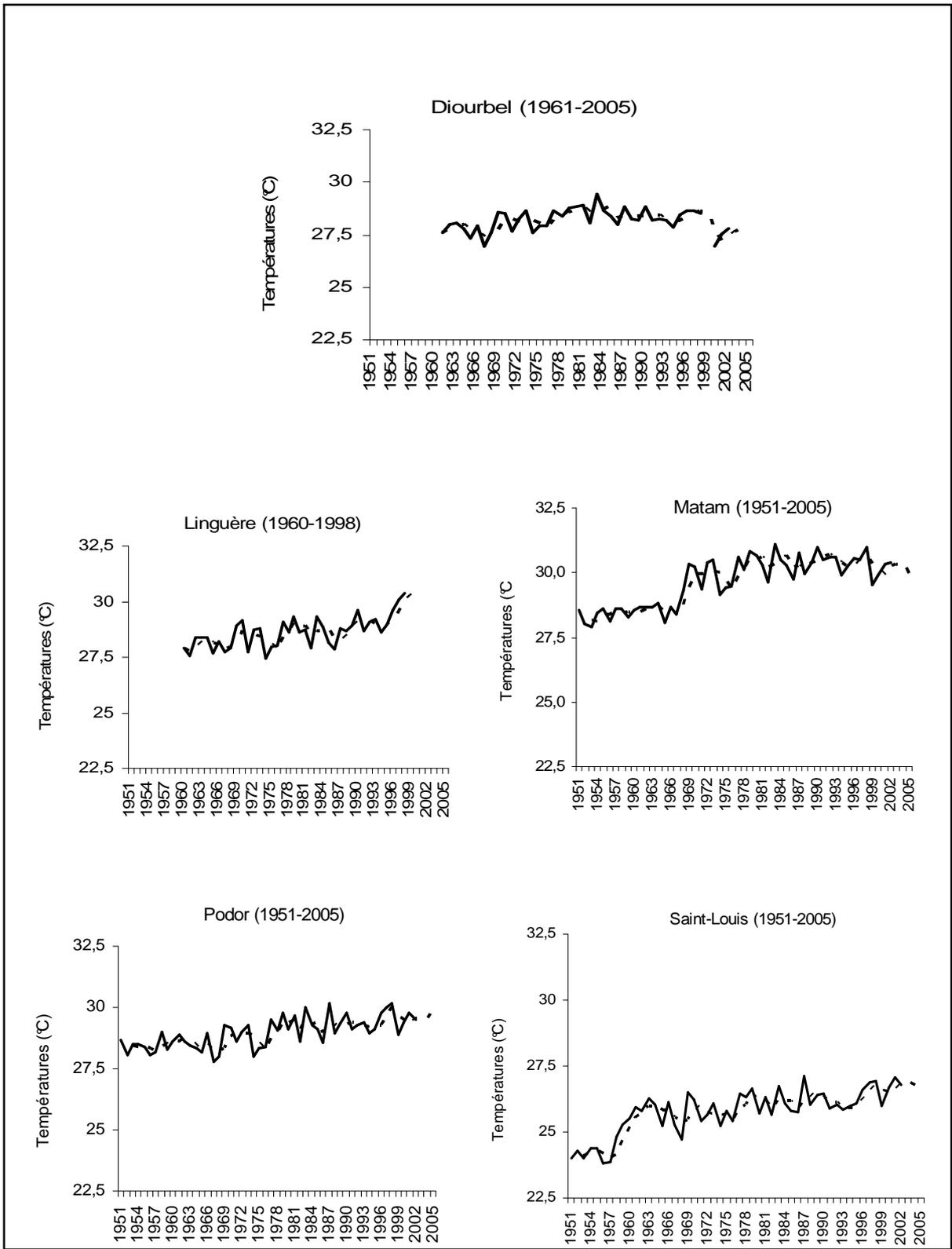


Figure 5. 11 : Évolution des températures moyennes annuelles (1951-2005) et moyenne mobile (en trait discontinu) sur 3 ans (Sarr M. A., 2008)

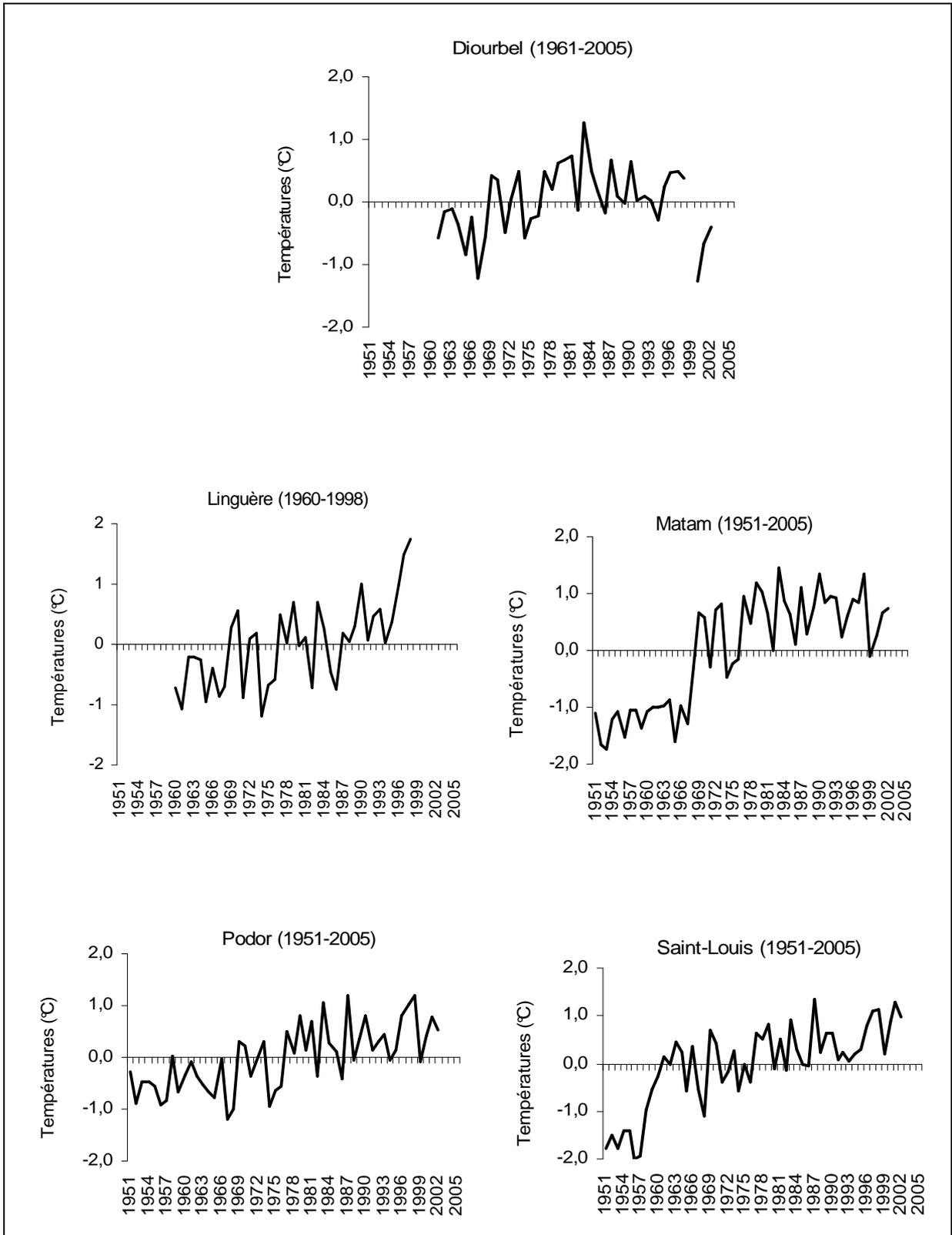


Figure 5. 12 : Écarts centrés réduits des températures moyennes annuelles (1951-2005)
(Sarr M. A., 2008)

2.4. Les températures maximales et minimales moyennes saisonnières

L'analyse de l'évolution des températures minimales moyennes (Tn) et des températures maximales moyennes (Tx) saisonnières montre que le comportement thermique annuel traduit nettement une tendance saisonnière contrastée. Pour mémoire, on observe deux saisons :

- la saison sèche regroupant la période de novembre à mars ;
- la saison pluvieuse ou hivernage allant de juin à octobre.

Il existe par ailleurs quelques nuances thermiques au sein d'une même saison. Durant la saison sèche, les mois de décembre, janvier, février regroupent les températures les plus fraîches comparées à celles du reste de la saison où la région est sous l'influence de l'alizé continental qui est un vent chaud et sec. Ces écarts thermiques «intra-saisonniers» ont amené certains auteurs comme Nouaceur Z., (1998) à utiliser sous les tropiques les termes «d'hiver» pour caractériser les mois les plus frais.

L'analyse des températures maximales et minimales moyennes saisonnières est abordée selon la méthode des quartiles. Cette approche permet d'apprécier les tendances saisonnières générales mais aussi l'évolution des températures exceptionnelles (les plus chaudes et les plus fraîches). Les températures maximales et minimales moyennes saisonnières sont classées en fonction des limites définies par le quartile inférieur (Q1), le quartile médian (la médiane ou Q2) et le quartile supérieur (Q3). Si les températures sont inférieures ou égales à la valeur limite du quartile inférieur, elles sont considérées comme les plus fraîches. En revanche, lorsqu'elles se trouvent supérieures ou égales à Q3, elles sont les plus chaudes de la série de mesure. Et enfin lorsqu'elles sont situées entre le Q1 et Q3, elles sont dites normales. Seuls les deux premiers intervalles sont considérés dans l'analyse.

Cette approche sur la base des quartiles sera suivie d'une analyse des températures maximales et minimales moyennes saisonnières par le biais des courbes d'évolution.

2.4.1. Une hausse des températures minimales et une évolution variable des températures maximales au cours de la saison sèche

Les températures minimales moyennes réparties selon les intervalles du quartile inférieur, du quartile médian et du quartile supérieur confirment parfaitement une diminution progressive de la fréquence des températures les plus basses au cours de la série. Cette situation

est identique dans toutes les stations (**tableau 5.6**). D'une manière générale, on remarque que 70% des années de la décennie 1961-1970 ont des valeurs inférieures ou égales au quartile inférieur.

- A Saint-Louis, ce taux devient nul pour la période 1991-2005 avec une diminution progressive pour les décennies 1971-1980 et 1981-1990 puisqu'elles enregistrent successivement 60 % et 10 % des valeurs en dessous de ce seuil limite.

- A Podor, le pourcentage des années inférieures ou égales au premier quartile passe de 70 %, 80 % pour les premières décennies à 0 % pour la période 2001-2005 en passant par des taux décroissants : 50 % à la décennie 1971-1980, 10 % aux décennies 1981-1990 et 1991-2000.

- Le constat reste le même à la station de Matam, pour ne prendre que celles-là comme exemple. La diminution du pourcentage des années inférieures ou égales au premier quartile passe de 100 % à la décennie 1951-1960 à 0 % à la décennie 1991-2000 et à la période 2001-2005.

	Podor	Matam	Saint Louis
Décennies	$T_n \leq Q1$ (%)	$T_n \leq Q1$ (%)	$T_n \leq Q1$ (%)
1951 – 1960	70	100	20
1961 – 1970	80	90	70
1971 – 1980	50	60	60
1981 – 1990	10	10	10
1991 – 2000	10	10	0
2001 - 2005	0	0	0

Tableau 5. 6 : Pourcentage des années de chaque décennie en fonction du quartile inférieur (Q1) sur la série des températures minimales moyennes en saison sèche (Sarr M. A., 2008)

Pour les températures maximales moyennes, deux situations décrivent fidèlement l'évolution observée (**tableau 5.7**) ; elle se résume entre une absence de tendance particulière à Matam et une diminution progressive de la fréquence des températures les plus fraîches depuis la décennie 1971-1980 à Linguère.

- D'abord à Matam, au cours de la décennie 1951-1960, aucune année n'enregistre des valeurs supérieures ou égales au troisième quartile. Aux décennies suivantes c'est-à-dire 1961-1970 et 1971-1980, le pourcentage passe de 20 à 30 %. Durant la décennie 1981-1990 le pourcentage tombe à 0 % et il progresse jusqu'à 30 % à la décennie suivante.

- A Linguère, l'évolution est assez particulière : au cours de la première décennie, aucune année n'a connu des températures maximales inférieures ou égales au premier quartile.

Ce taux nul évolue à 40 % pour la décennie 1971-1980 pour retomber à 10 % lors la décennie 1991-2000 en passant par 30 % des années à la décennie 1981-1990.

	Linguère	Matam
Décennies	Tx \leq Q1 (%)	Tx \geq Q3 (%)
1951 – 1960	nd ⁵⁹	0
1961 – 1970	0	20
1971 – 1980	40	30
1981 – 1990	30	0
1991 – 2000	10	30
2001 - 2005	nd	10

Tableau 5. 7 : Pourcentage des années de chaque décennie en fonction du quartile inférieur (Q1) et du quartile supérieur (Q3) pour les températures maximales moyennes en saison sèche (Sarr M. A., 2008)

Au cours de la saison sèche, il faut reconnaître qu'on se trouve dans **une situation d'évolution dissemblable** :

- Elle se traduit par **une évolution «contrastée» des températures maximales moyennes des stations entre l'impossibilité de décrire une tendance à la hausse ou à la baisse et la diminution des températures les plus fraîches au cours de la série.**

- **Pour les températures minimales moyennes on remarque l'absence presque totale des températures les plus fraîches de la série dans les dernières décennies ; on observe au cours de cette période les températures les plus élevées.**

Le profil des courbes d'évolution des températures minimales, représentant les valeurs moyennées sur trois ans permettant de lisser la série de mesure, montre plusieurs tendances différentes avec des comportements dans le temps très contrastés sur la même série (**figure 5.13**).

Dans un premier temps on observe :

- 1- Une première période caractérisée par une tendance à la baisse à Saint-Louis et à Podor sur la période allant de 1951 à 1966 voire même 1976 selon les stations suivie d'une seconde période avec une tendance à la hausse.
- 2- Une tendance à la hausse à Diourbel de 1961 jusqu'au milieu des années 1980 suivie d'une tendance à la baisse.
- 3- Une tendance à la hausse continue à Linguère qui définit une situation très singulière par rapport aux autres stations.

⁵⁹ Données non disponibles

- 4- Une stabilité dans l'évolution des données sur la période 1951-1966, suivie d'une hausse (1967-1984) et encore une stabilité de 1985 à 2005 à la station de Matam.

En revanche, la courbe d'évolution des températures maximales moyennes des stations enregistre une tendance partagée entre hausse, baisse et stationnarité (**figure 5.14**). En dehors du fait que le coefficient de détermination est partout faible donc peu significatif, le profil de la courbe décrit les situations suivantes :

- Une tendance à la baisse sur la période 1951-1984 à Podor et à Linguère suivie d'une tendance à la hausse sur la dernière période,
- Deux tendances opposées à Matam (tendance à la hausse de 1951 à 2005) et à Diourbel (tendance à la baisse sur toute la série),
- Une évolution presque stable à Saint-Louis de 1957 à 2005

En somme, au regard de la forte variabilité, il est impossible de déterminer une tendance générale des températures minimales et maximales au cours de la saison sèche à l'échelle du Ferlo.

L'évolution des températures minimales moyennes indique davantage une «augmentation légère» des températures lors des deux dernières décennies. En revanche, l'évolution des températures maximales moyennes se caractérise par une forte dispersion des valeurs annuelles. Ces deux situations thermiques mettent en cause la pertinence de l'utilisation des courbes de tendance linéaire. Cette utilisation engendre une analyse biaisée de l'évolution des températures qui ne tient pas compte des différentes tendances selon la période.

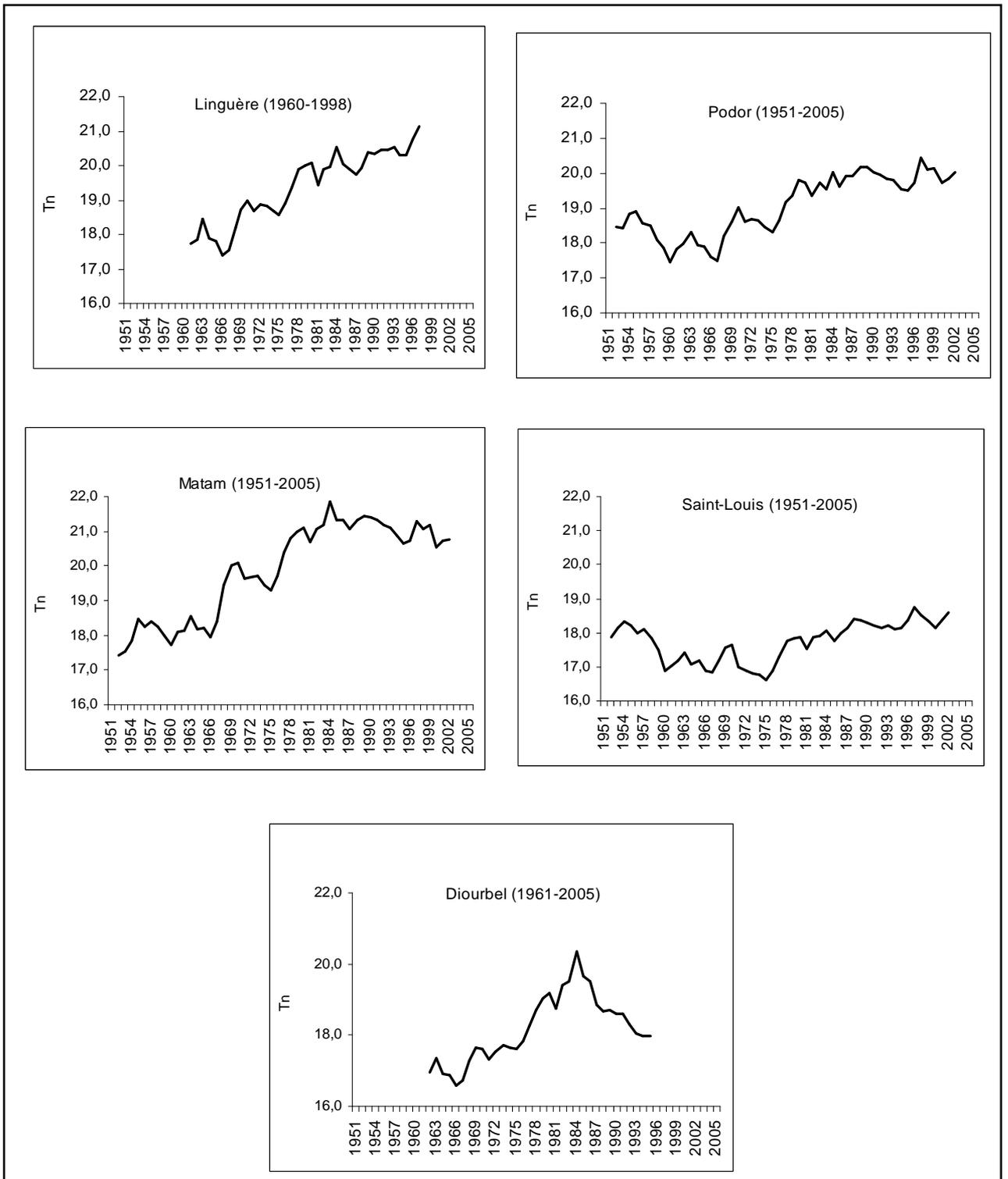


Figure 5. 13 : Températures minimales durant la saison sèche et courbe de tendance linéaire (Sarr M. A., 2008)

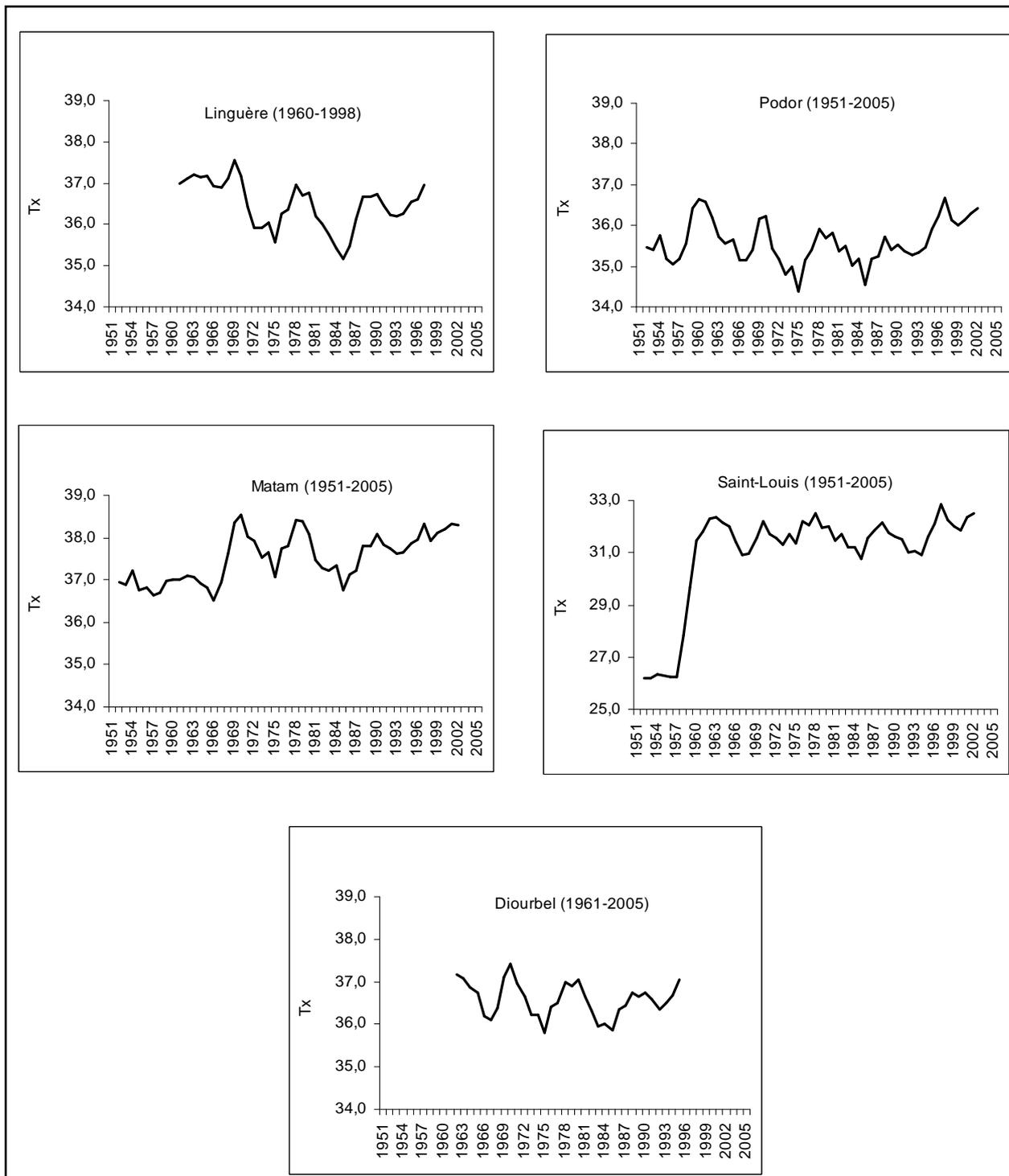


Figure 5. 14 : Températures maximales durant la saison sèche et courbe de tendance linéaire (Sarr M. A., 2008)

2.4.2. Une variabilité forte des températures minimales et une tendance à la hausse des températures maximales au cours de la saison des pluies

Dans l'étude détaillée des températures minimales moyennes, l'exemple des comportements de deux stations permet de caractériser des températures plus chaudes lors des dernières décennies que dans les années 1950 et 1960, même s'il faut noter une variabilité traduisant une dispersion des valeurs.

- A Linguère, on remarque que 70 % des années de la décennie 1961-1970 ont des températures minimales inférieures ou égales au quartile inférieur. Ce pourcentage connaît une nette diminution pour les décennies suivantes ; il est de l'ordre de 10 % pour la décennie 1981-1990 et devient nul à la décennie 1991-2000 (**tableau 5.8**).

- A Matam, on enregistre une hausse nette depuis les années 1950 jusqu'aux années 1980 puis une baisse. Cette situation se matérialise par 100 % des années de la décennie 1951-1960 qui restent inférieures au seuil du premier quartile. Ce pourcentage décroît dans les décennies suivantes jusqu'à être nul à la décennie 1981-1990. En revanche, ce même taux indique une petite augmentation pour la décennie 1991-2000 (20 % des années) puis pour la période 2000-2005 où les années inférieures ou égales au premier quartile atteignent 30 % des années (**tableau 5.8**).

	Linguère	Matam
Décennies	$T_n \leq Q1$ (%)	$T_n \leq Q1$ (%)
1951 – 1960	nd	100
1961 – 1970	70	80
1971 – 1980	20	50
1981 – 1990	10	0
1991 – 2000	0	20
2001 - 2005	nd	30

Tableau 5. 8 : Le pourcentage des années de chaque décennie en fonction du quartile inférieur (Q1) pour les températures minimales moyennes en saison des pluies (Sarr M. A., 2008)

Pour les températures maximales moyennes, l'analyse décennale de trois stations sur cinq utilisées traduit d'une façon évidente ce réchauffement enregistré dans les années 2000.

- A Podor, la tendance s'affirme très nettement avec toutes les années de la décennie 1951-1960 ayant des valeurs inférieures ou égales au quartile inférieur (**tableau 5.9**). Ce pourcentage diminue significativement au cours des décennies suivantes (30 % des années en dessous du premier quartile pour les décennies 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000).

- A Diourbel, l'analyse décennale des *maxima* par le premier quartile suit la même évolution que celle décrite à Podor. On remarque que 50 % des années de la décennie 1961-1970 restent inférieures au quartile inférieur. Ensuite, le pourcentage passe à 20 % aux décennies 1971-1980 et 1981-1990 puis est nul à la décennie 1991-2000.

	Podor	Diourbel
Décennies	$T_x \leq Q1$ (%)	$T_x \leq Q1$ (%)
1951 – 1960	100	nd
1961 – 1970	80	50
1971 – 1980	30	20
1981 – 1990	30	20
1991 – 2000	30	0
2001 - 2005	0	nd

Tableau 5. 9 : Le pourcentage des années de chaque décennie en fonction du quartile inférieur ($Q1$) pour les températures maximales moyennes en saison des pluies

D'une manière générale, l'analyse de la méthode des quartiles sur les valeurs annuelles des températures, minimales et maximales, en saison des pluies, **confirme la fréquence plus accentuée des températures plus chaudes de ces dernières années.**

Au cours de la saison des pluies, l'analyse des courbes des températures minimales à partir des valeurs moyennées sur trois ans décrit parfaitement une tendance partagée entre une hausse et une baisse (**figure 5.15**). On observe quelques exemples :

- les stations de Matam et de Diourbel décrivent une tendance à la hausse pour la première 1951-1984 et une tendance à la baisse concernant la période 1985-2005,
- la station de Linguère reste très singulière avec une tendance à la hausse depuis 1960 jusqu'à 1998, alors que celle de Podor montre une hausse jusqu'au milieu des années 1980 suivie d'une stabilité.

En revanche, les températures maximales moyennes observent une meilleure cohérence dans leur évolution que les températures minimales moyennes (**figure 5.16**). Même si les fluctuations interannuelles des valeurs sont assez fortes, sur l'ensemble des stations, on remarque des comportements thermiques comparables. Par exemple :

- les stations de Linguère, Saint-Louis, voire Diourbel expriment une tendance à la hausse sur toute la série,
- les stations de Matam et Podor montrent une hausse jusqu'aux années 1970 puis une stagnation et/ou une baisse.

En résumé, l'étude des températures maximales moyennes en saison des pluies montre une évolution vers le réchauffement. Par contre les situations de Linguère et de Diourbel exprimant une forte dispersion doivent nous pousser à relativiser une telle tendance à la hausse des températures. Dans cet «élan de hausse générale», la période allant du début des années 1980 jusqu'à la fin de la série traduit plutôt une stabilité qu'une hausse significative.

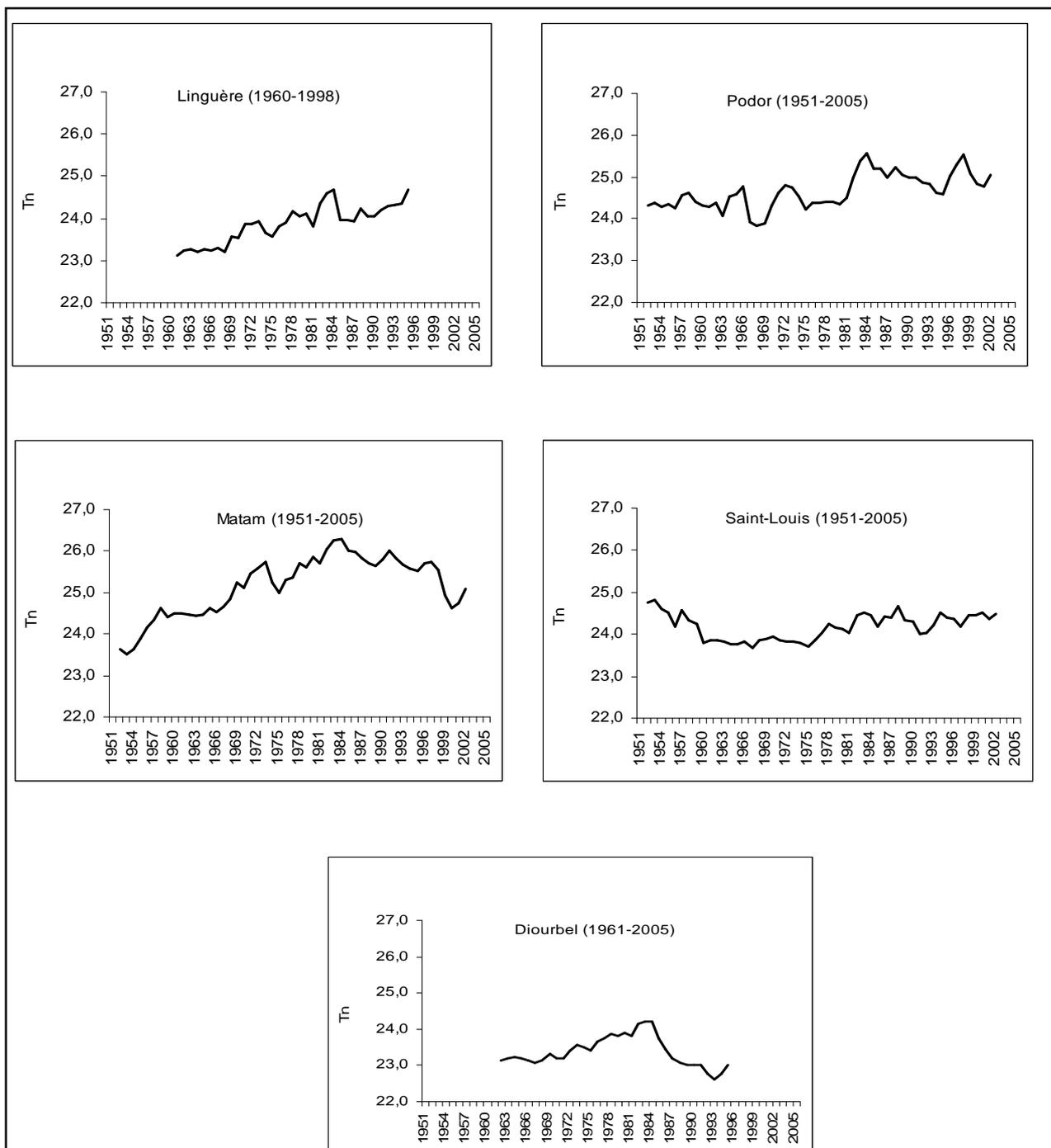


Figure 5. 15 : Températures minimales durant la saison pluvieuse et tendance linéaire (Sarr M. A., 2008)



Figure 5. 16 : Températures maximales durant la saison pluvieuse et tendance linéaire (Sarr M. A., 2008)

Le comportement thermique de la région au cours de la saison des pluies, estimé d'après les températures minimales et maximales, traduit une tendance à la hausse relativement homogène dans la région du Ferlo. Comparées aux températures maximales, les températures minimales représentent des courbes d'évolution où la hausse est plus significative.

En définitive, l'analyse de l'évolution des températures minimales et maximales moyennes saisonnières, par la méthode des quartiles, sur plus d'un demi-siècle, a mis en évidence des températures moyennes plus chaudes au cours des dernières décennies. Cette situation est confirmée pour les températures minimales moyennes, surtout en saison sèche, où les températures sont les plus chaudes de l'année. Les températures minimales moyennes ont connu une hausse très significative durant la saison sèche.

En revanche, l'évolution des températures maximales moyennes traduit une tendance contrastée plus en saison sèche qu'en saison des pluies. En saison des pluies, la tendance à la hausse est significative dans trois stations sur cinq alors qu'en saison sèche elle est caractérisée par une forte variabilité ou une dispersion empêchant toute possibilité d'observer une quelconque tendance significative.

L'étude de l'évolution des températures sur la zone du Ferlo et aux alentours montre très nettement différentes tendances (une baisse, une hausse, une stationnarité) sur la période étudiée. Ces tendances variables mettent en cause une tendance au réchauffement au cours de laquelle toutes les valeurs consignent une hausse continue.

En début des années 1980 jusqu'à 2005, la situation thermique montre dans la majorité des cas une stationnarité ou une hausse des valeurs de températures. Les années 1980, caractérisées par une situation climatique exceptionnelle (inversion de tendance dans l'évolution de la pluie), représentent également un moment de «rupture», un signal du début du réchauffement dans l'évolution des températures moyennes. Nouaceur Z., (2008), en étudiant l'évolution des températures en Mauritanie, avance que l'amorce de cette nouvelle tendance débute vers la fin des années 1970 et le début des années 1980.

3. ÉVOLUTION CONTRASTÉE DE LA DURÉE D'INSOLATION ET DES TEMPÉRATURES

La synthèse de l'évolution des facteurs et des conditions thermiques par le biais de l'évolution de l'insolation et des températures aux échelles annuelles et saisonnières caractérise une situation intéressante placée dans le cadre du débat sur les causes du réchauffement climatique. Ces causes sont d'origine anthropique (émission des gaz à effets de serre) selon certains scientifiques et cosmique pour d'autres (augmentation du rayonnement direct sur la terre). En prenant en considération les positions méridiennes des stations de mesure ainsi que de leurs situations longitudinales, la relation entre ces deux paramètres, qui aurait dû être étroite, n'est pas établie au Ferlo (**figure 5.17**). A Matam, à Podor et à Saint-Louis, les années 1950 sont marquées par une durée d'insolation élevée et des températures en baisse comparées aux années récentes. Ces dernières années, c'est plutôt la durée d'insolation en baisse et les températures en hausse (**figure 5.17**). Néanmoins, à Linguère, on assiste à une tendance commune dans l'évolution de la durée d'insolation et des températures. De 1962 à 2000, cette conformité se traduit par une légère hausse, très significative au niveau de la durée d'insolation depuis 1968.

L'analyse des courbes de températures moyennes annuelles montre comme pour les précipitations une forte variabilité interannuelle et fait globalement remarquer la particularité des années 1970-1980. Cette séquence, caractérisant aussi un point de «rupture climatique», a été le théâtre de multiples perturbations de l'écosystème du Ferlo.

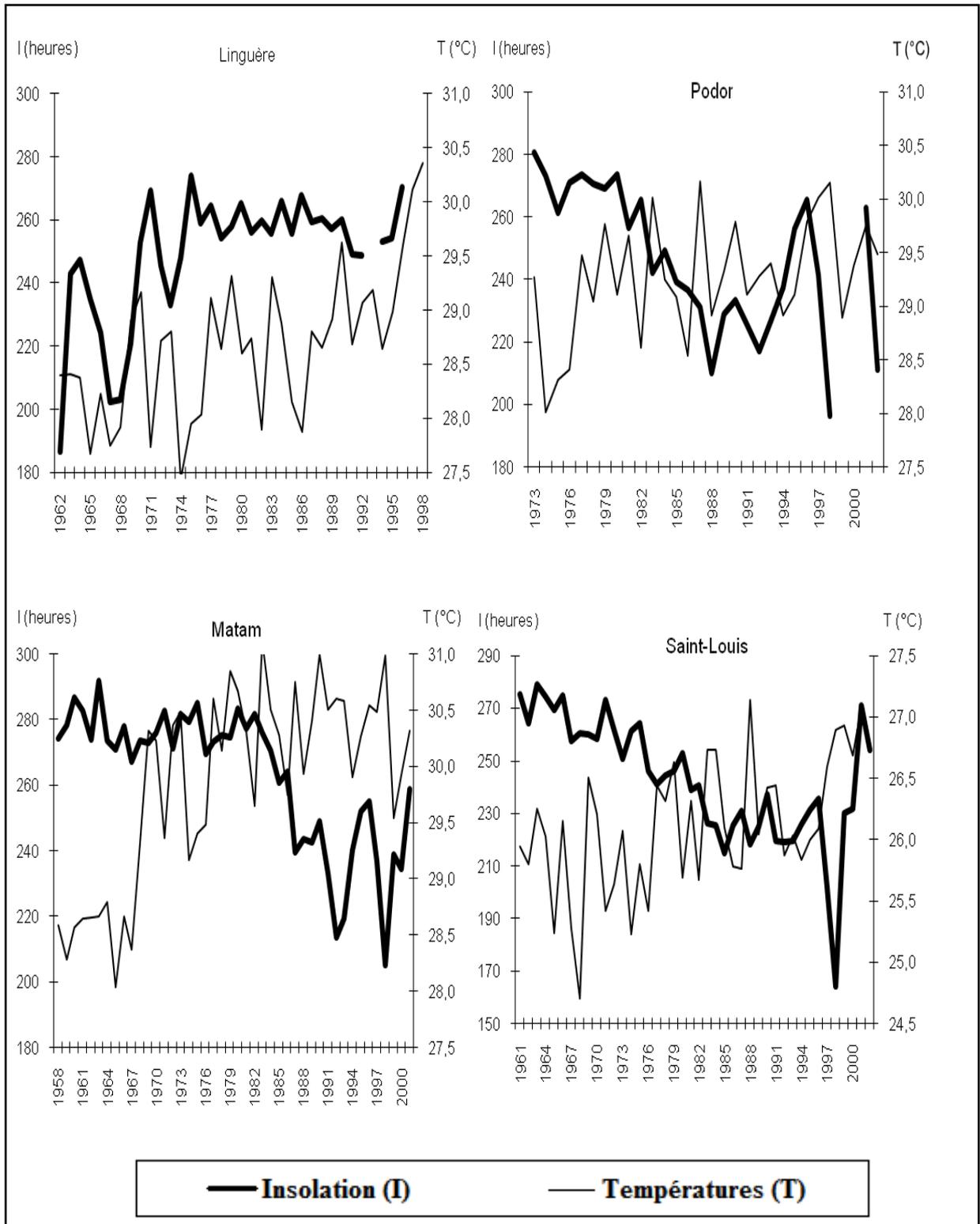


Figure 5. 17 : Évolution comparée entre la durée d'insolation moyenne annuelle et les températures moyennes annuelles dans la région du Ferlo (Sarr M. A., 2008)

CHAPITRE 6 : ÉVOLUTION DE L'ÉVAPORATION ET DE L'HUMIDITÉ RELATIVE : UN TOURNANT DANS L'ÉVOLUTION CLIMATIQUE CONFIRMÉ

Les nombreuses études réalisées sur le climat tropical s'appuient le plus souvent sur la pluviométrie, les facteurs et les conditions thermiques que sur les autres paramètres climatiques comme l'évaporation, l'humidité relative et le vent en surface. Cette situation est due d'une part, à l'inexistence d'un réseau de mesures climatologiques dense permettant de disposer d'une base de données assez représentative, et d'autre part, à l'attention forte apportée à la relation pluie-systèmes de production par les populations. L'étude de l'évaporation est, partout, essentielle en climatologie, et particulièrement dans notre région d'étude pour la détermination des indices bioclimatiques permettant de mesurer la sécheresse agricole, par exemple. Les valeurs critiques de l'évaporation tout comme celles de l'insolation ont des implications dans l'écosystème du Ferlo, en ce sens qu'elles conduisent, pendant des saisons déficitaires, à une saison d'étiage précoce, à la disparition complète des mares temporaires et à une accélération de l'érosion éolienne.

1. L'ÉVAPORATION

L'évaporation est un paramètre climatologique de grande utilité dans les régions à écosystèmes sahéliens pour pouvoir caractériser le bilan hydrique général et établir le rapport volumes précipités/volumes évaporés et/ou évapotranspirés. L'évaporation, comme les précipitations, est exprimée en millimètres (mm). Les mesures des données d'évaporation se font le plus souvent au Sénégal par PICHE et par bac de classe A (dénommé aussi Bac Colorado).

Au Sénégal et selon Ndong (1996), sept facteurs participent à la création des conditions adéquates, pouvant favoriser ou accélérer le processus d'évaporation. Il s'agit de :

- la température : un temps chaud favorise le réchauffement ce qui favorise une évaporation importante,
- la faible pression atmosphérique : la faible pression atmosphérique de l'air sur la surface d'eau facilite également l'évaporation,
- l'humidité relative faible : lorsque l'humidité relative est faible, loin de la saturation, l'eau s'évapore facilement,
- la nature du vent : les vents forts favorisent davantage l'évaporation que les vents faibles,

- les grandes surfaces d'eau : une grande surface d'eau exposée à l'air libre rend plus facile et plus importante l'évaporation qu'une petite surface d'eau.

- la teneur de l'eau en substances dissoutes.

L'étude de l'évaporation est fondée sur les relevés de quatre stations : Podor, Saint-Louis, Matam et Linguère. Les mesures de ces stations sont inégales dans le temps et ne couvrent malheureusement pas la même période (**tableau 6.1** et **figure 6.1**). Podor et Saint-Louis ont des séries s'étalant de 1951 à 2005. Notons que l'année 1993 manque à la série de Saint-Louis. Les années 2003, 2004 ne sont pas enregistrées à Podor et à Saint-Louis. Matam couvre la période allant de 1951 à 2000. A Linguère, la série commence en 1951 jusqu'en 1998 avec 2 années manquantes (1953 et 1978). Les lacunes observées surtout au cours des années 2000 sont une limite à l'exploitation des données.

Stations	Période observée
Linguère	1951 - 1998
Matam	1951 - 2000
Podor	1951 - 2005
Saint-Louis	1951 - 2005

Tableau 6. 1 : Caractéristiques des données d'évaporation (Sarr M. A., 2008)

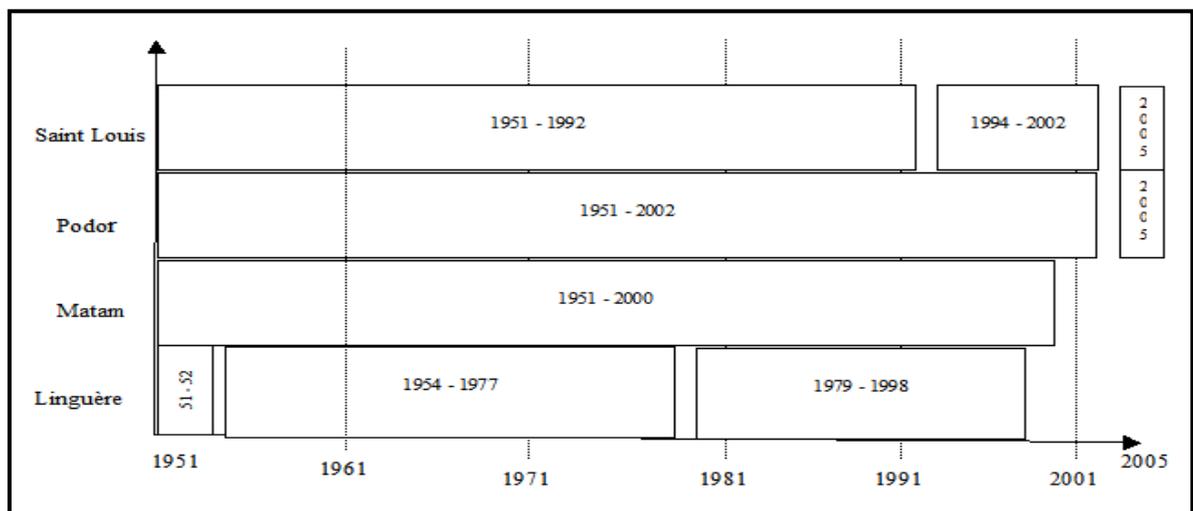


Figure 6. 1 : Longueur de la série des données de l'évaporation et les lacunes (Sarr M. A., 2008)

L'évolution des cumuls de l'évaporation aussi bien mensuels qu'annuels a subi des variations significatives au cours de la période étudiée. Nous proposons d'analyser le schéma mensuel moyen en premier lieu pour mieux suivre l'évolution interannuelle de l'évaporation en second lieu dans le bassin versant du Ferlo.

1.1. Distribution mensuelle de l'évaporation au Ferlo

De manière générale, au cours de l'année, les variations mensuelles de l'évaporation sont caractéristiques de la saisonnalité au Ferlo (**figure 6.2**) : les valeurs fortes de l'évaporation se situent pendant la saison sèche et les valeurs faibles en saison pluvieuse (**tableau 6.2**).

Cependant, les valeurs mensuelles les plus fortes diffèrent d'une station à une autre. A la station de Linguère, les mois de mars et d'avril regroupent les fortes valeurs avec respectivement 401 et 385 mm. A la station de Matam, on enregistre 407 mm au mois de mai et 366 mm au mois d'avril. A la station de Podor, nous avons 354 mm au mois de mai et 320 mm au mois d'avril. Et à la station de Saint-Louis, les *maxima* se situent en janvier et en décembre avec respectivement 205 et 199 mm.

Les valeurs les plus faibles sont toutes localisées entre les mois d'août et de septembre.

- 104 mm en septembre et 111 mm en août à la station de Linguère.
- 137 mm en septembre et 150 mm en août à la station de Matam.
- 143 mm en septembre et 164 mm en août à la station de Podor.
- 92 mm en septembre et 95 mm en août à la station de Saint-Louis.

	Linguère	Matam	Podor	Saint-Louis
Janvier	325	253	223	205
Février	335	265	235	191
Mars	401	342	295	196
Avril	385	366	320	155
Mai	371	407	354	132
Juin	263	349	291	108
Juillet	172	238	219	104
Août	111	150	164	95
Septembre	104	137	143	92
Octobre	201	196	204	127
Novembre	283	225	210	165
Décembre	288	231	211	199

Tableau 6. 2 : L'évaporation en mm dans le Ferlo (Sarr M. A., 2008)

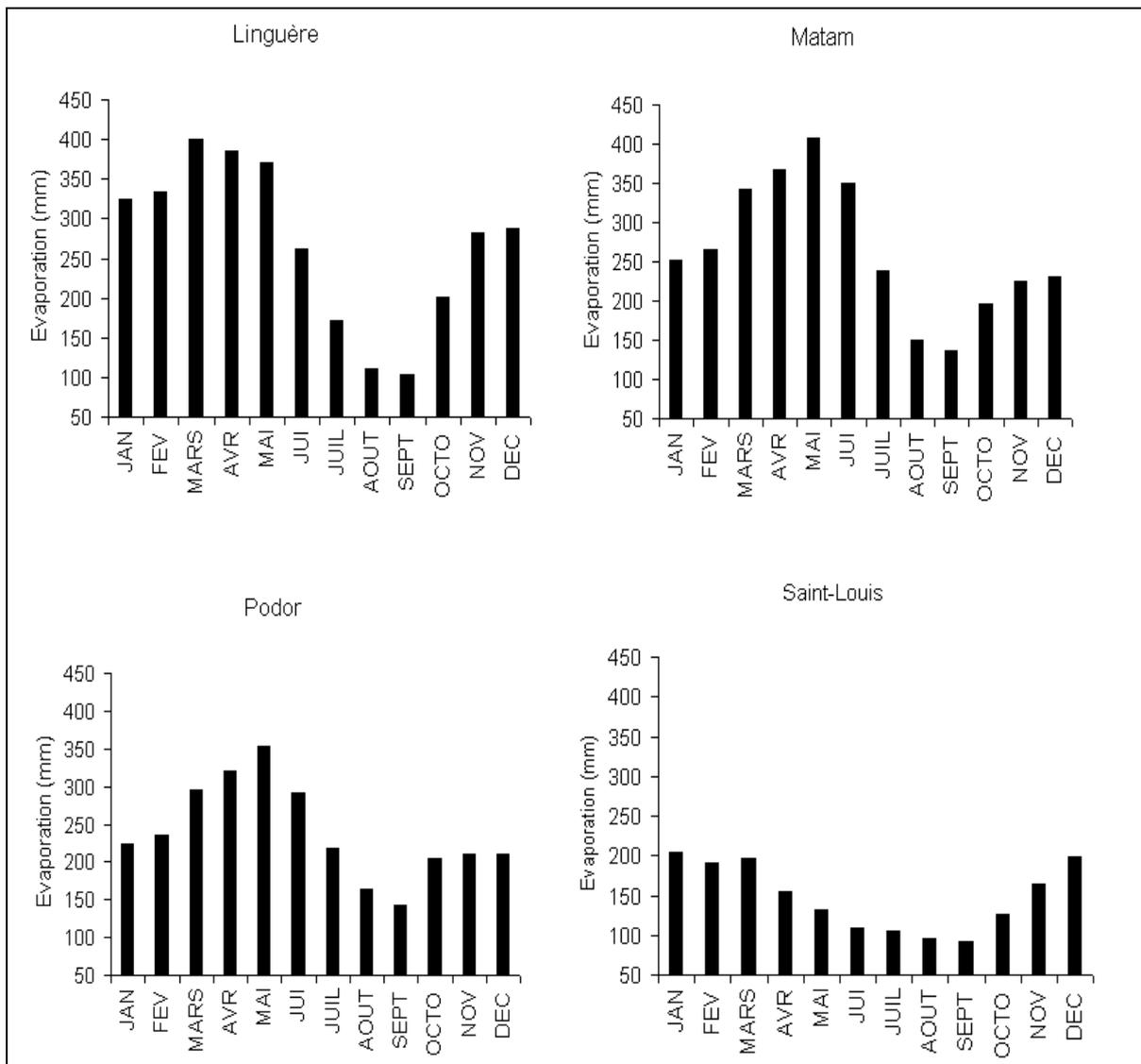


Figure 6. 2 : Moyennes mensuelles de l'évaporation (1951-2005) décrivant la saisonnalité entre de fortes valeurs en saison sèche (précisément aux mois de mars, avril et mai) et de faibles valeurs en saison des pluies (précisément en juillet, août et septembre) (Sarr M. A., 2008)

La différence des cumuls, entre le mois de mai (plus forte évaporation) et le mois de septembre (plus faible évaporation), est égale à 213 mm à Podor. Cette même valeur est évaluée à 113 mm à Saint-Louis, à 270 mm à Matam et enfin, à 297 mm à Linguère, symbolisant l'écart le plus fort parmi les autres.

On note l'existence d'une corrélation entre les fluctuations à l'échelle saisonnière de la pluviométrie, celles des températures et celles de l'évaporation (**figure 6.2**). On constate également, à titre comparatif, que les mois d'août et de septembre correspondent au maximum d'humidité (supérieure à 70 %, voire pages 228, 229) et à la pluviométrie maximale. A l'inverse, l'évaporation est minimale dans tout le bassin versant du Ferlo. Pendant ces deux mois, au cœur de la saison des pluies, les flux de mousson venant du sud, couvrent tout le domaine d'étude se traduisant par une couverture nuageuse et des précipitations. Ce «type de temps» constitue une

forte limitation au rayonnement direct (baisse de l'insolation et des températures et donc de l'évaporation) et «favorisent» en même temps une forte hygrométrie.

Outre les conditions climatiques, l'évolution de l'évaporation dépend d'autres facteurs du milieu. Parmi ceux-ci, on peut citer notamment les conditions phytogéographiques car la végétation influe directement ou indirectement sur le processus de l'évaporation dans un milieu donné. Le potentiel évaporé est fortement influencé par la présence de couvert végétal d'où la notion d'évapotranspiration caractérisant l'évaporation directe de l'eau du sol liée à la transpiration et la respiration des plantes. La part de la transpiration-respiration par les plantes peut être quantitativement importante dans le processus. Mais, dans le domaine d'étude, l'influence du couvert végétal n'est pas significativement importante sachant que toutes les stations (sauf Diourbel) se trouvent dans la même zone biogéographique où les différences de couvert végétal sont faibles.

La qualité de l'air et des flux constituent aussi un critère influant en fonction de la position géographique des stations. L'air sec et instable favorise le processus de l'évaporation et donc augmente la quantité d'eau évaporable. Les fortes valeurs de l'évaporation au Ferlo sont situées pendant les mois où l'harmattan, vent chaud et sec, souffle fortement. Au contraire des stations continentales envahies en pleine saison sèche par l'harmattan (Matam et Linguère qui enregistrent leur maximum en mai), la station littorale de Saint-Louis concentre les plus faibles valeurs d'évaporation en raison de la couverture de la zone par l'alizé maritime, un vent plus humide et plus frais.

Cette situation participe à la distribution spatiale des conditions d'évaporation sur le territoire du Ferlo, avec des zones de forte évaporation (les régions continentales) et des zones de faible évaporation (les régions littorales).

1.2. Évolution de l'évaporation : deux périodes en opposition sur la période 1951-2005

L'analyse des totaux annuels de l'évaporation caractérise d'une manière nette des fluctuations interannuelles fortes et dégage deux tendances différentes (**figures 6.3 et 6.4**).

On remarque une situation commune à toutes les stations, à l'exception de Saint-Louis. Elle divise la série de mesure en deux périodes. Une première période entre 1951 et le début des années 1970, marquée par une évaporation élevée comparée à la seconde période (années 1970-2005) où les valeurs annuelles sont faibles. Les années 1970 et même le début des années 1980 représentent une rupture à partir de laquelle la tendance à la baisse domine jusqu'à maintenant

l'évolution de l'évaporation. Podor fait exception avec une tendance plus irrégulière alternant baisse et hausse.

La spatialisation des cumuls annuels de l'évaporation, selon la normale 1961-1990, montre les plus fortes valeurs à la station de Matam (la plus continentale) et les plus faibles valeurs à la station de Saint-Louis (sur le littoral).

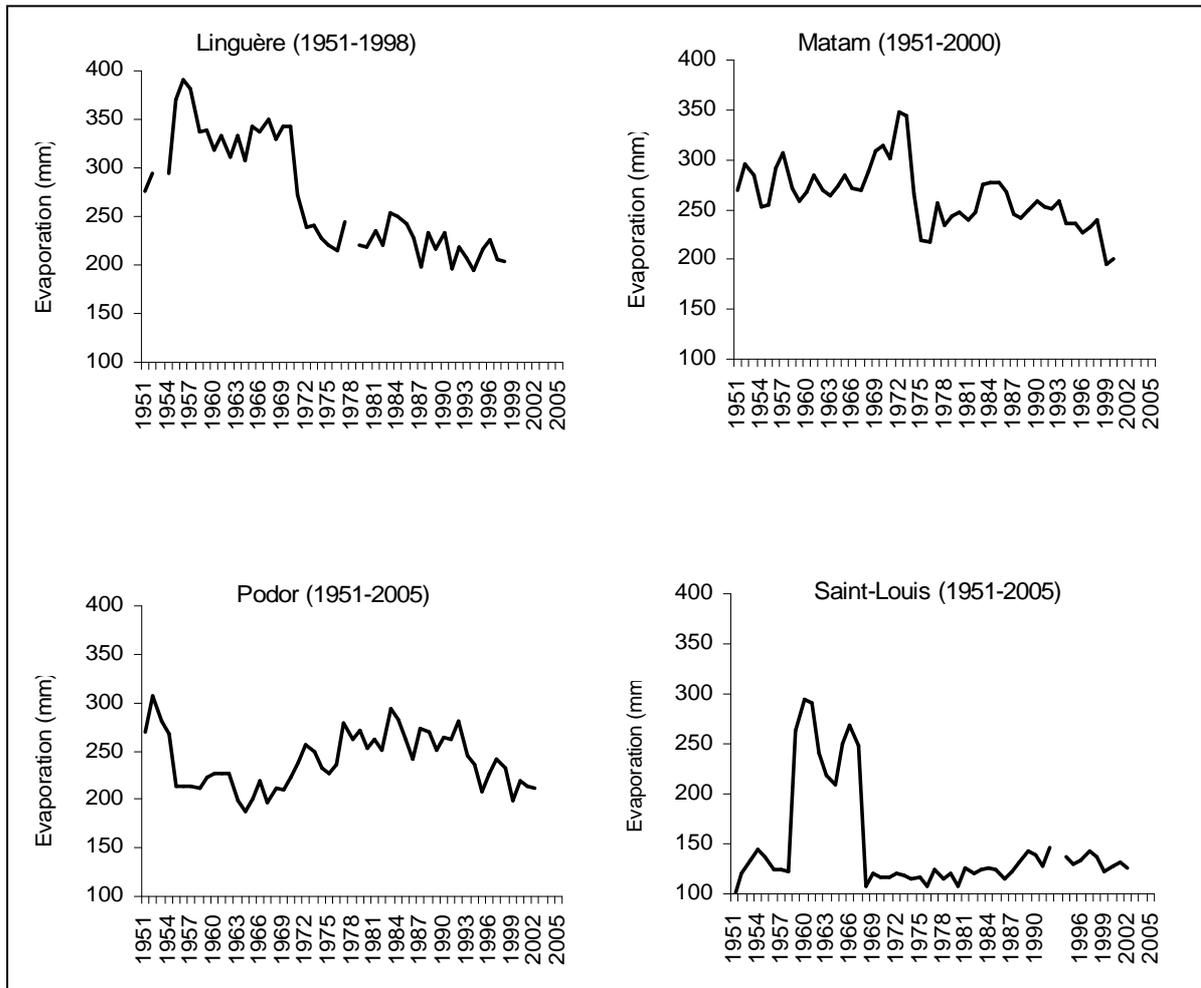


Figure 6. 3 : Évolution des moyennes annuelles (moyenne des 12 mois de chaque année) de l'évaporation (1951-2005) traduisant d'une manière très nette une baisse des valeurs ces deux dernières décennies (Sarr M. A., 2008)

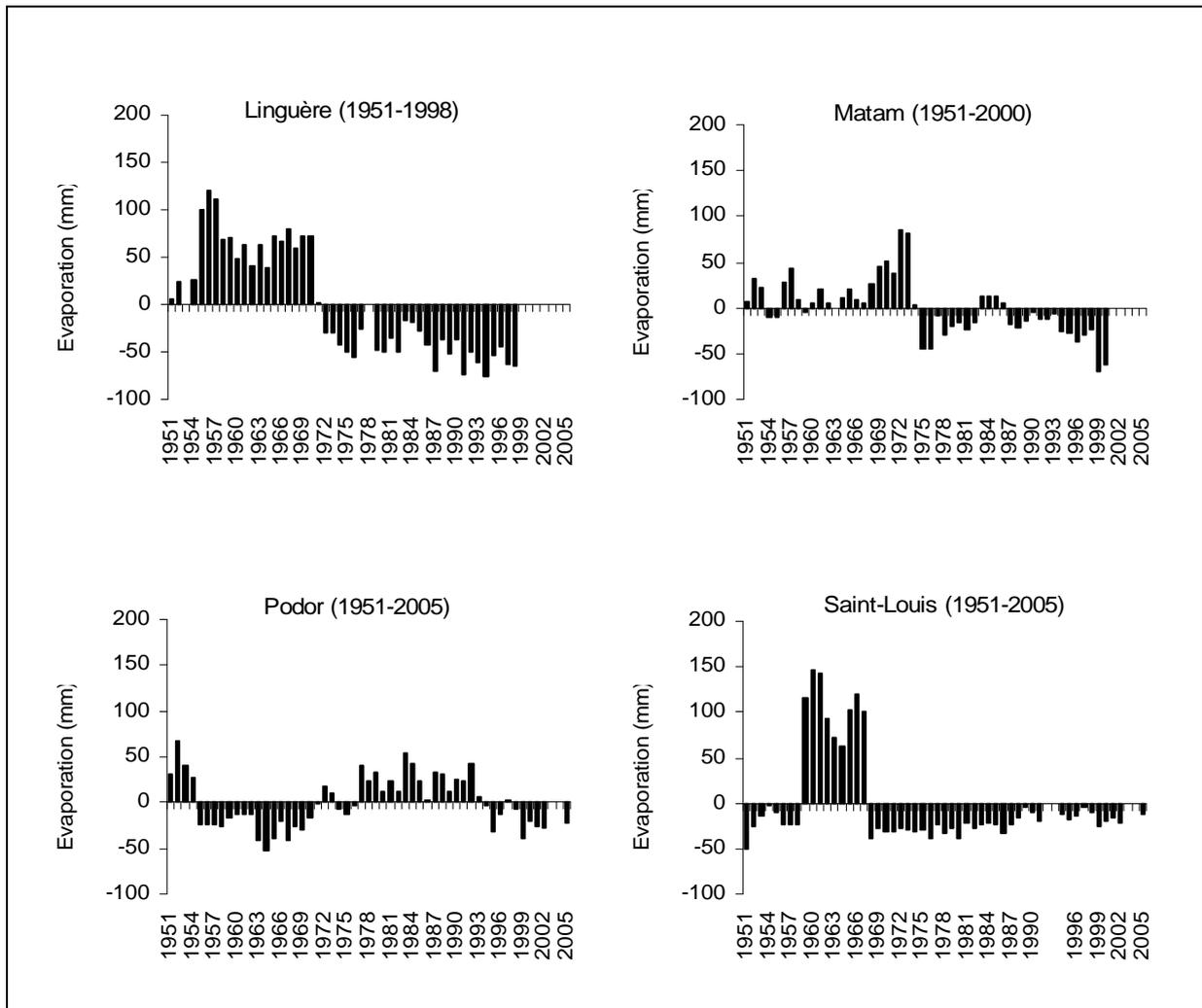


Figure 6. 4 : Variations des écarts à la moyenne de l'évaporation au Ferlo (1951-2005) avec beaucoup plus d'anomalies négatives que d'anomalies positives au cours de ces dernières années (Sarr M. A., 2008)

A la station de Linguère, l'évaporation est plus intense que celle enregistrée dans les autres stations. La technique des écarts à la moyenne confirme ces évolutions ; elle met en évidence les deux périodes principales exprimées précédemment.

De 1951 à 1971, les écarts annuels à la moyenne de la série sont positifs. L'année 1956 symbolise le maximum de la série soit un excédent de 121 mm de plus par rapport à la moyenne (un cumul annuel de 391 mm).

De 1972 à 1998, on ne note que des valeurs négatives avec un minimum de 194,3 mm en 1994 ce qui correspond à un écart négatif de 75,3 mm.

A la station de Matam, les années peuvent être regroupées en deux périodes essentielles :

- De 1951 à 1974, avec des valeurs positives qui restent au dessus de la moyenne. On y note deux maxima en 1972 et 1973. Trois années ont eu à enregistrer quand même des cumuls annuels négatifs par rapport à la moyenne. Il s'agit des années 1954, 1955 et 1959.

- De 1975 à 2000, avec une forte prédominance des cumuls annuels négatifs par rapport à la moyenne avec un minimum de la série en 1999 (un déficit de 69 mm). Au cours de cette même période, quatre années successives (1983, 1984, 1985 et 1986) ont eu des cumuls annuels au dessus de la moyenne de la série.

A la station de Podor, l'allure de la courbe d'évolution confirme le caractère irrégulier de l'évolution de l'évaporation, même au cours de la dernière décennie 1996-2005. Quatre différentes périodes peuvent être observées :

- De 1951 à 1954, on ne note que des valeurs positives par rapport à la moyenne ; le maximum principal est en 1952 avec 306 mm. L'écart moyen par rapport à la moyenne est de 67 mm.

- De 1955 à 1976, la période est caractérisée par des totaux annuels négatifs dont le minimum principal se situe en 1964 avec 199 mm, ce qui constitue un écart de moins 52 mm par rapport à la moyenne. Notons néanmoins l'existence de deux années, 1972 et 1973 qui ont enregistré des totaux annuels positifs.

- De 1977 à 1993, la station a enregistré des totaux annuels positifs avec un maximum principal en 1983 dont l'écart par rapport à la moyenne est de 53 mm.

- De 1994 à 2005, les cumuls annuels négatifs restent majoritaires. Le minimum principal est localisé en 1999.

A la station de Saint-Louis, trois périodes caractérisent la variabilité interannuelle sur la série 1951-2005 :

- De 1951 à 1958, on observe l'existence de valeurs négatives avec un minimum en 1951 enregistrant une moyenne annuelle de 97 mm ce qui implique un écart de moins 51 mm par rapport à la moyenne.

- De 1959 à 1967, la période n'a enregistré que des valeurs positives avec un maximum principal en 1960 de 294 mm. En revanche, la courbe d'évolution au cours de cette période intégrée dans le schéma global de la série est assez inhabituelle. Cette situation a été déjà signalée par Ndong (1996) qui a qualifié les relevés de cette période de douteux. Une interrogation se pose donc sur la fiabilité de tous les relevés de l'évaporation à la station de Saint-Louis.

- De 1968 à 2005, aucune année a enregistré une valeur positive par rapport à la moyenne. Cette situation laisse à deviner la tendance à la baisse de l'évaporation annuelle à Saint-Louis.

Pour la station de Saint-Louis, nous préférons nous garder de toute conclusion, car l'évolution des cumuls annuels consigne une situation exceptionnelle et douteuse.

En résumé, l'analyse des variations interannuelles de l'évaporation de Linguère et de Matam se caractérise par un profil d'évolution commun (figures 6.3 et 6.4). Une première phase avec de fortes valeurs et une seconde phase aux valeurs faibles séparées par une «rupture» bien distincte en 1970. Podor connaît une évolution différente de celles de Linguère et de Matam. Elle est la seule station du domaine d'étude à avoir observé des valeurs positives (par rapport à la moyenne de la série⁶⁰) au cours de la période 1978-1993, précisément.

1.3. Evolution croisée de l'évaporation et des précipitations annuelles

La marque d'un changement climatique au Sahel depuis la fin des années 1960, déjà observée pour l'évolution des précipitations, est également confirmée par l'étude des cumuls annuels de l'évaporation. Il est noté un changement de tendance dans l'évolution de l'évaporation à cette même période. En revanche, la tendance à l'amélioration des cumuls précipités à partir des années 1980 dans le domaine d'étude n'est pas corrélée avec une tendance positive des cumuls annuels de l'évaporation.

Dans la zone du Ferlo, en dépit de la masse d'eau infiltrée, comme un peu partout dans la bande sahélienne, l'évaporation physique ou naturelle représente l'essentiel des pertes de la pluviométrie. La relation entre la pluie et l'évaporation décrit surtout pour les stations de Matam et de Podor, des années de pluviométrie importante qui s'accompagnent d'une baisse de l'évaporation. Ces dernières années en sont la parfaite illustration car elles sont caractérisées par une diminution significative des valeurs de l'évaporation en opposition avec l'amélioration des précipitations. Cette situation confirme de meilleures conditions climatiques dans le domaine d'étude et donne de l'espoir aux populations.

Inversement, des années de faibles précipitations coïncident avec une évaporation élevée, comme c'est le cas durant les années 1970, 1983, 1984 (**figure 6.5**).

⁶⁰ Avec une telle dispersion des données, nous tenons à préciser que la valeur de la moyenne de la série n'est qu'indicative du fait de sa faible signification dans une telle distribution.

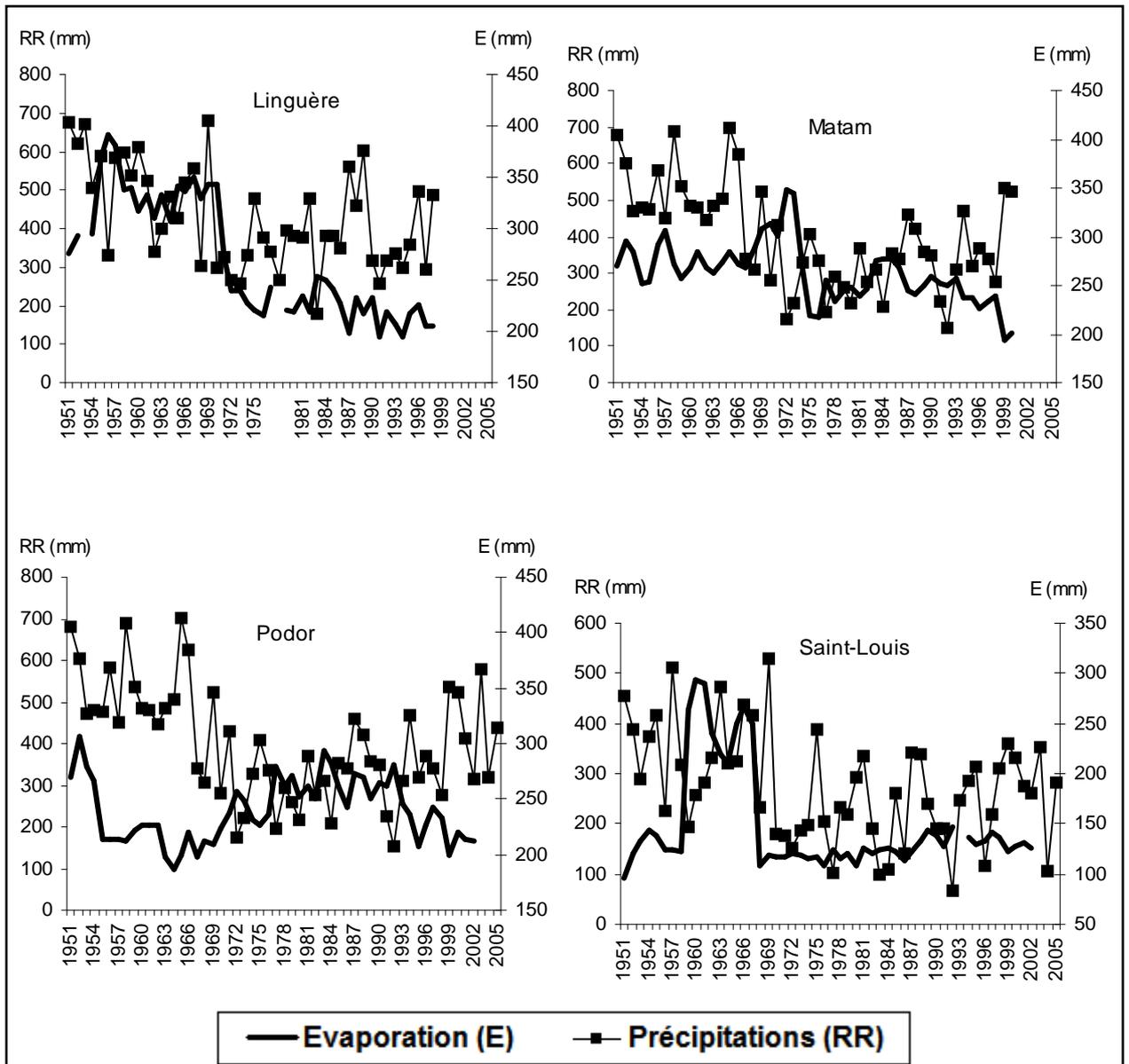


Figure 6. 5 : Évolution comparée entre précipitations cumulés annuels et évaporation moyenne annuelle dans la région du Ferlo (Sarr M. A., 2008)

1.4. Évolution croisée de l'évaporation et de l'insolation

Outre la température, la vitesse et la turbulence de l'air, la vitesse d'évaporation est fonction de l'insolation (Emsalem R., 1970 ; Remenieras G., 1986 ; Mamou A., 1990 ; Godard A. et Tabeaud M., 1993 in Remini B., 2005). Selon Remini B., (2005), les zones arides et semi arides présentent une forte évaporation puisque l'ensemble des facteurs favorables se trouvent réunis ; une température de l'air souvent élevée pendant les saisons sèches, une forte insolation presque continue toute l'année et une présence considérable de vents secs (grande vitesse). La relation entre l'insolation et l'évaporation est bien vérifiée dans le domaine d'étude car les périodes de forte évaporation coïncident avec les périodes au cours desquelles l'insolation est élevée sauf à Linguère (**figure 6.6**). A Linguère, la décennie 1960 caractérise les plus fortes

valeurs d'évaporation mais aussi les plus faibles valeurs d'insolation. Les deux paramètres climatiques connaissent une évolution quasi stationnaire depuis le milieu des années 1970 pour l'insolation, et depuis l'année 1986 pour l'évaporation après une chute spectaculaire des valeurs au début de la décennie 1970. Cette rupture «négative» est d'ailleurs enregistrée vers la même période à Matam et à Saint-Louis. Matam, Podor et Saint-Louis enregistrent une tendance à la baisse des valeurs annuelles de l'évaporation et de l'insolation depuis les années 1980.

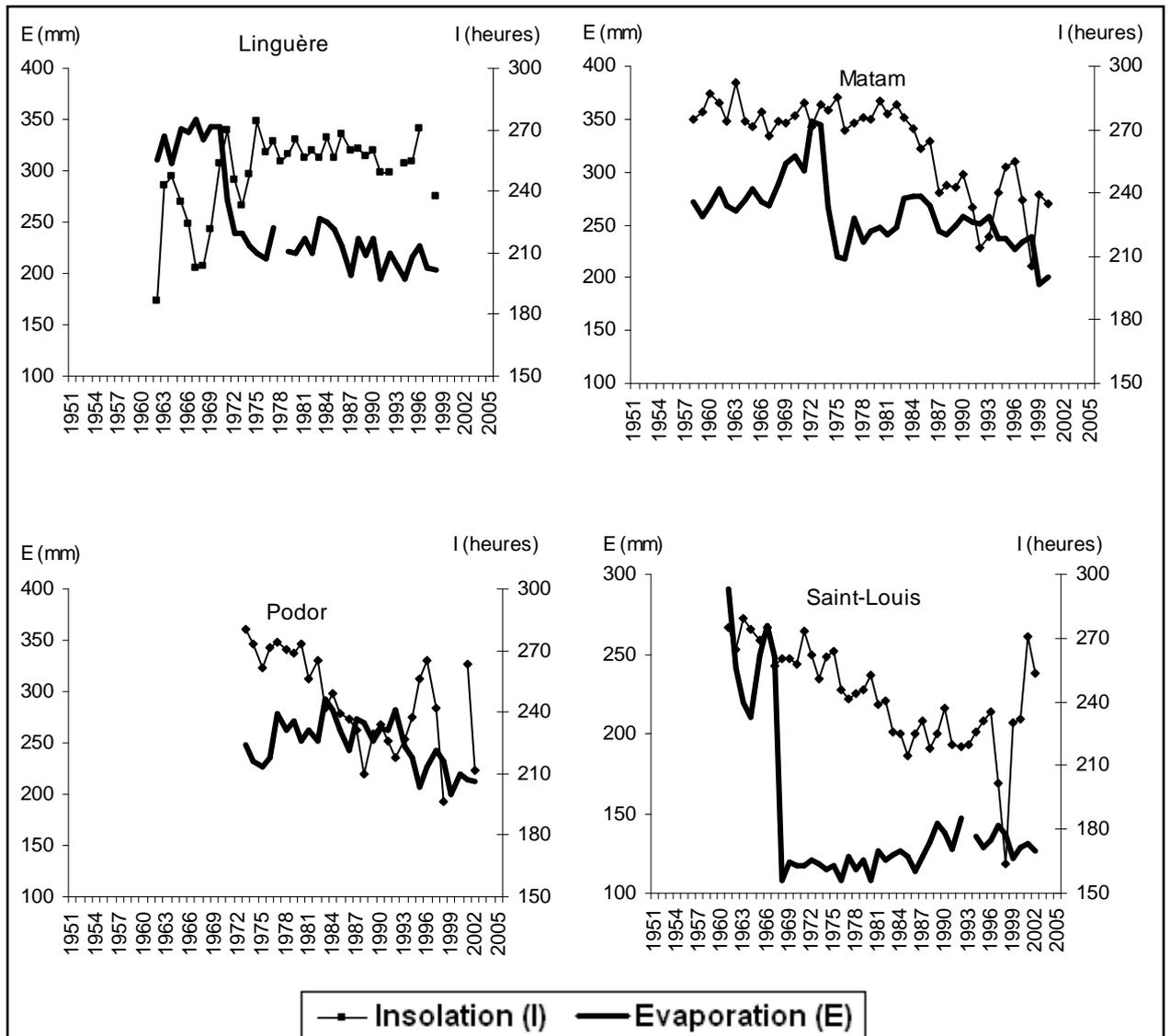


Figure 6. 6 : Évolution comparée entre l'évaporation moyenne annuelle et l'insolation moyenne annuelle (Sarr M. A., 2008)

1.5. Évolution croisée de l'évaporation et des températures

L'évaporation et les températures sont deux paramètres fortement influencés par l'ensoleillement. De fortes températures s'accompagnent généralement d'une évaporation forte et inversement. Dans la zone du Ferlo, les courbes d'évolution de ces deux paramètres n'évoluent pas de la même façon (figure 6.7). On remarque, à l'instar des stations de Podor et de

Matam, une baisse des valeurs de l'évaporation et une stationnarité des températures au cours des vingt dernières années. Par contre, les décennies 1950 et 1960, très pluvieuses, se font remarquer, comme à Saint-Louis, à Matam et à Linguère, par une évaporation forte accompagnant les températures les plus basses de toute la série (**figure 6.7**). En d'autre terme, la corrélation est faible voire inverse entre l'évolution de l'évaporation et celle des températures.

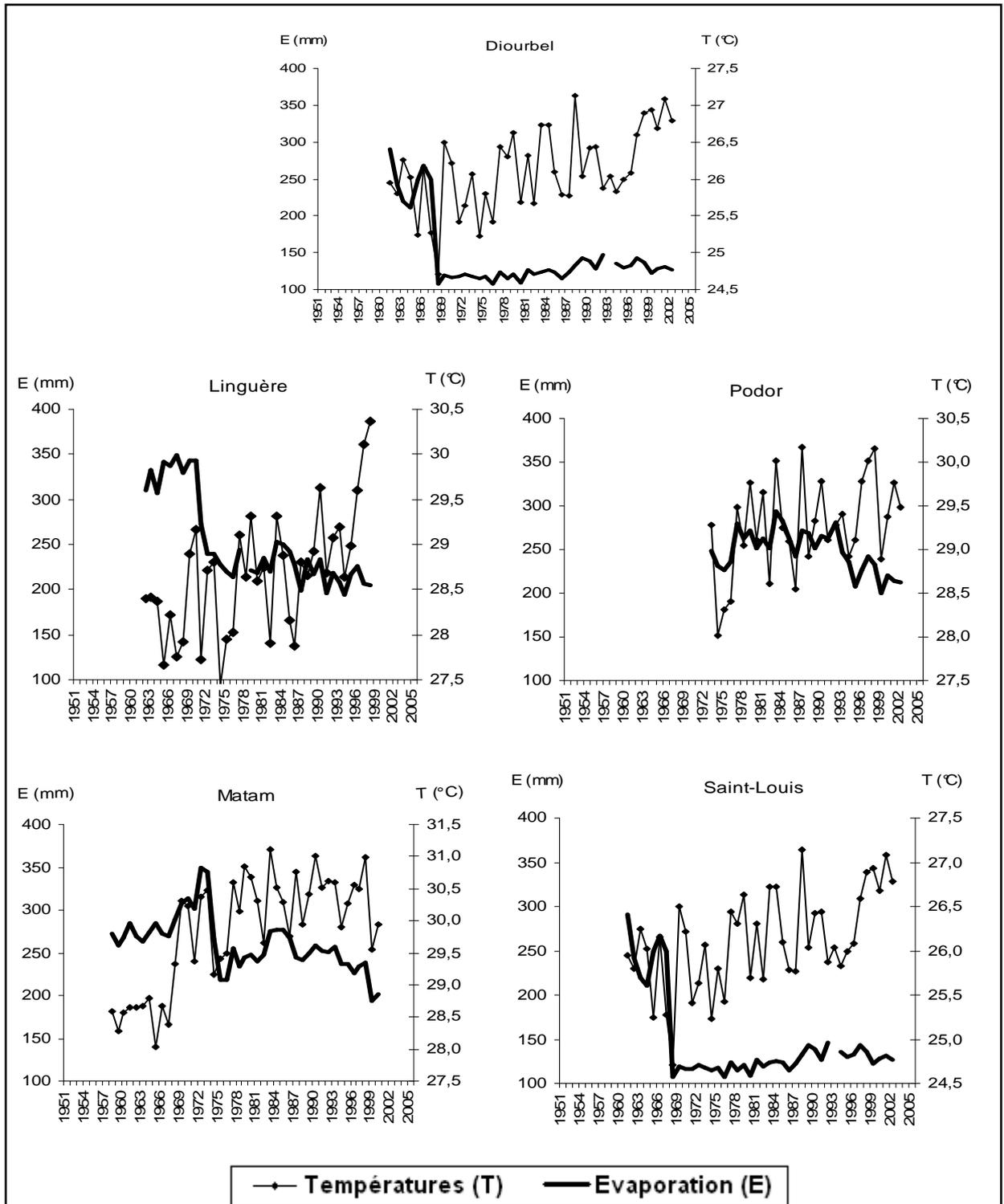


Figure 6. 7 : Évolution comparée entre l'évaporation moyenne annuelle et les températures moyennes annuelles (Sarr M. A., 2008)

2. L'HUMIDITÉ RELATIVE : UNE TENDANCE À LA HAUSSE DEPUIS LES ANNEES 1970/1980

Le degré hygrométrique appelé aussi humidité relative caractérisent l'humidité de l'air avec la tension de la vapeur d'eau contenue dans l'air, appelée humidité absolue. L'humidité relative, exprimée en pourcentage, est définie par le rapport entre la tension de vapeur dans l'atmosphère et la tension de vapeur d'eau saturante (point de rosée), soit 100 %, à la même température. Elle exprime l'écart à la saturation. Les impressions courantes d'humidité ou de sécheresse reposent avant tout sur le déficit de saturation, c'est-à-dire, l'écart entre la tension réelle de la vapeur et sa tension maximale (saturation) possible au même moment. Cette différence est un critère d'appréciation objectif du «degré d'humidification ou de siccité de l'air et ses possibilités plus ou moins grandes de condensation» (Arlery R., 1973). Pour des raisons déjà évoquées liées à un nombre insuffisant de stations climatologiques dans le domaine d'étude, seule l'humidité relative moyenne de cinq stations, exprimée en pourcentage, est prise en compte dans cette étude (**tableau 6.3**).

Stations	Période observée
Diourbel	1961-2005
Linguère	1951-2000
Matam	1962-2005
Podor	1963-2005
Saint-Louis	1961-2005

Tableau 6. 3 : Stations et séries analysées pour l'humidité relative (Sarr M. A., 2008)

L'humidité relative en valeurs moyennes mensuelles est enregistrée dans les stations de Podor, Saint-Louis, Matam, Linguère et Diourbel. La série de Podor s'étale de 1963 à 2005 avec les années 1979, 2003, 2004 non enregistrées. La série de Saint-Louis et celle de Diourbel débutent de 1961 et finissent en 2005, quatre années manquant aux enregistrements de Saint-Louis (1998, 1999, 2003 et 2004), et trois à Diourbel (1999, 2003 et 2004). La série la plus longue est celle enregistrée à Linguère, de 1951 à 2000 avec l'année 1999 comme lacune en raison d'une défaillance d'appareil (**figure 6.8**).

Nous proposons d'analyser le schéma mensuel moyen caractérisant la distribution mensuelle en premier lieu pour suivre l'évolution interannuelle de l'humidité relative en second lieu.

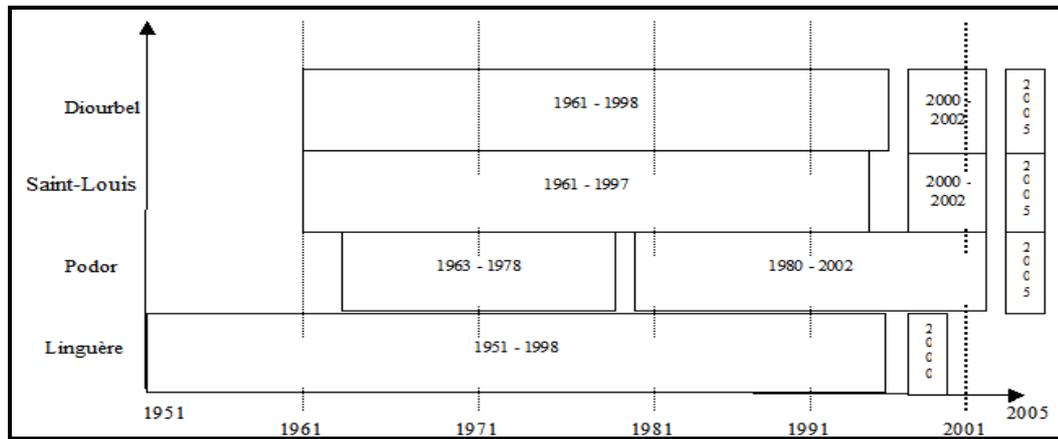


Figure 6. 8 : Longueur de la série des données de l'humidité relative et lacunes (Sarr M. A., 2008)

2.1. Schéma mensuel moyen de l'humidité relative

Les nuances entre les moyennes mensuelles de l'humidité relative traduisent l'alternance des différentes saisons qui caractérise l'année climatique. Les variations du taux de l'humidité relative au cours de l'année (et celles des températures), de la fin de la saison sèche au début de la saison humide, sont nettement plus représentatives au niveau des stations continentales que celles du littoral (**tableau 6.4**). L'écart moyen mensuel de l'humidité relative (1951-2005) dépasse les 10 % à Matam (12 %) et à Linguère (13 %) alors qu'à Saint-Louis, il est de 7 % (**tableau 6.4**). Cette situation résulte de l'alternance des flux des alizés (maritime et continental) et des flux de la mousson et de la pluie.

	Diourbel	Linguère	Matam	Podor	Saint-Louis
Janvier	40	31	33	32	48
Février	39	31	31	31	52
Mars	42	32	28	31	57
Avril	46	35	28	32	63
Mai	51	40	29	35	69
Juin	60	53	41	45	76
Juillet	70	66	58	57	78
Août	76	74	68	64	80
Septembre	76	74	68	64	79
Octobre	66	60	53	49	70
Novembre	50	41	40	38	58
Décembre	42	36	37	35	51

Tableau 6. 4 : L'humidité relative mensuelle (%) dans le Ferlo (Sarr M. A., 2008)

L'analyse des variations mensuelles de l'humidité relative montre d'une part une phase très humide commune à l'ensemble des stations, au cours des mois d'août et de septembre, et d'autre part une situation de décembre à avril qui varie selon les stations, mais où l'humidité relative est à son plus bas taux de l'année (janvier-février pour Diourbel et Linguère ; mars-avril pour Matam ; février-mars pour Podor et décembre-janvier pour Saint-Louis).

Les valeurs maximales sont de 64 % en août à Podor, 80 % en août à Saint-Louis, 68 % en août et en septembre à Matam, 74 % également en août et en septembre à Linguère et 76 % en août et en septembre à Diourbel.

Les valeurs minimales, quant à elles, sont enregistrées aux mois correspondant au cœur de la saison sèche (**figure 6.9**). Les minima se localisent dans la majeure partie des cas durant les mois de février et de mars. Au niveau de Podor, le minimum est de 31 % en février, 48 % en janvier à Saint-Louis, à Matam 28 % en mars et en avril, à Linguère 31 % en janvier et février, et enfin à Diourbel 39 % en février.

La position de la station littorale de Saint-Louis se traduit par l'existence des valeurs les plus fortes de la série en humidité relative moyenne. La station de Saint-Louis bénéficie également d'une fréquence de l'alizé maritime le plus souvent chargé en humidité lors de son passage sur l'océan. La situation géographique de Saint-Louis par rapport au reste des stations lui confère presque toute l'année un temps humide : la moyenne annuelle du degré hygrométrique sur la série considérée est de 65 % à Saint-Louis alors qu'à Matam, elle n'est que de 43 %.

La distribution des moyennes mensuelles de l'humidité relative, au cours de la période étudiée, souligne l'influence significative des différents flux qui déterminent, au cours de l'année, le comportement des paramètres du climat parmi lesquels l'humidité relative, les températures et les précipitations. Cette distribution dépend de l'apport en humidité des flux des alizés maritimes, circulant sur les régions côtières. Elle dépend également de l'impact de la couverture du domaine d'étude par les flux de la mousson pendant toute la saison des pluies au détriment des alizés continentaux, plus forts aux mois de mars, avril et mai et *vice versa*.

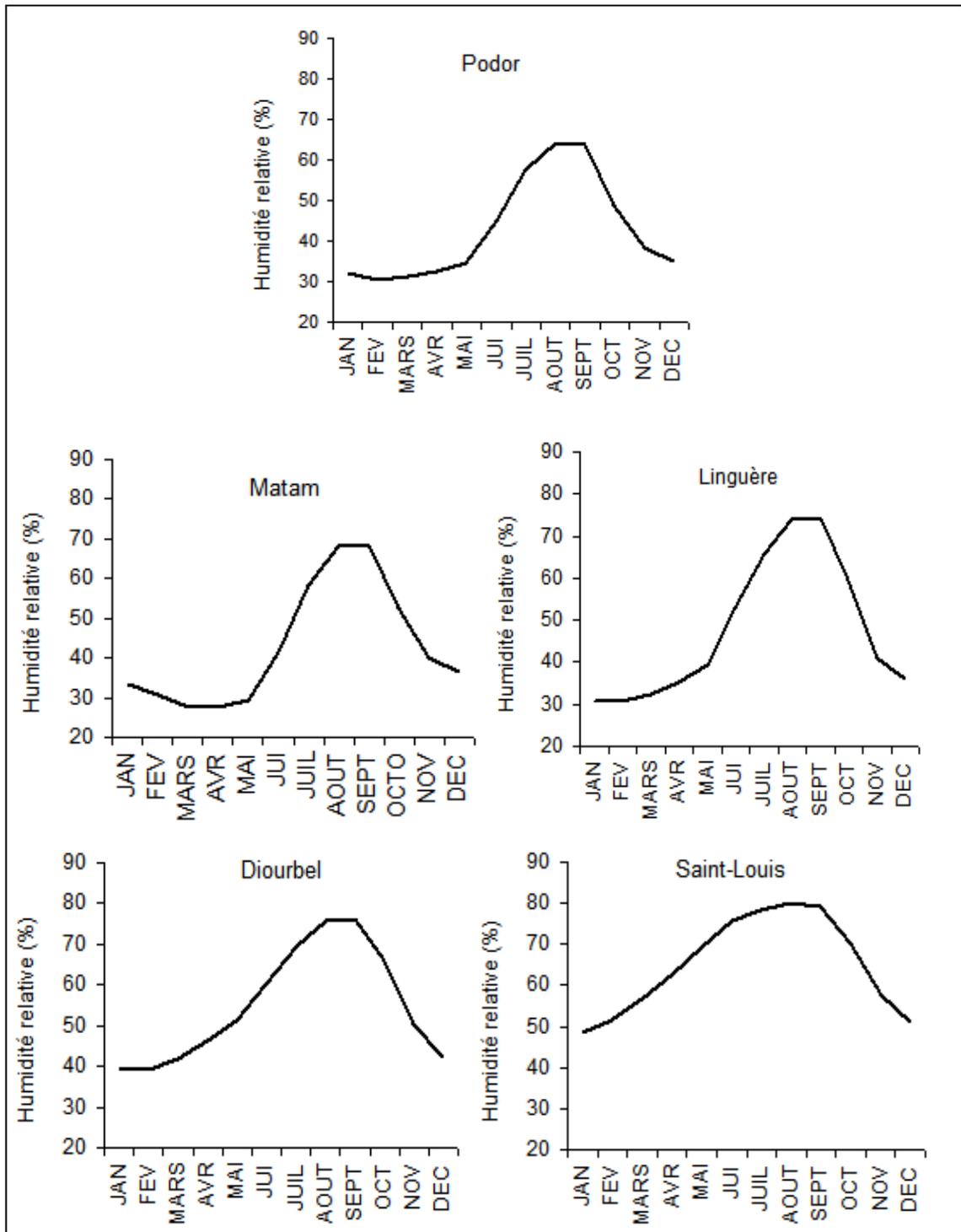


Figure 6. 9 : Évolution mensuelle de l'humidité relative avec des maxima en période pluvieuse (juillet, août, septembre) et des minima en saison sèche, durant les mois de décembre à février (Sarr M. A., 2008)

Par ailleurs, l'étude de la répartition spatiale et temporelle permet la mise en évidence des nuances entre les régions septentrionales, situées dans le domaine climatique sahélien (Podor, domaine central sahélien continental et Linguère, domaine sud-sahélien continental) et les régions au sud du domaine climatique soudanien (Diourbel, domaine nord-soudanien continental). En d'autres termes, la moyenne annuelle de l'humidité relative est plus élevée à Diourbel avec 55 % qu'à Podor avec 43 %.

2.2. Évolution de l'humidité relative : une tendance récente à la hausse

Les courbes d'évolution des valeurs moyennes annuelles de l'humidité relative traduisent des fluctuations qui mettent en évidence, comme c'est le cas pour les précipitations annuelles, une forte irrégularité dans le temps et dans l'espace des valeurs depuis le début des enregistrements jusqu'à nos jours (**figure 6.10**). Conjointement, l'analyse des taux moyens de l'humidité relative, dans le bassin versant du Ferlo, pour la période étudiée, permet plusieurs constats.

Le profil général des courbes d'évolution de l'humidité relative traduit une tendance à la baisse depuis le début des séries jusqu'aux années 1970, puis une courte période de stationnarité, plus nette aux stations de Matam et de Diourbel (années 1970–1980) et enfin une tendance à la hausse. Le début de cette hausse diffère selon les stations ; début et milieu des années 1980 pour Podor, Linguère, Saint-Louis et Diourbel d'une part et d'autre part, début des années 1990 pour Matam. Ainsi, une corrélation positive peut être établie entre l'évolution des précipitations et de l'humidité relative sur la période. L'évolution interannuelle de ces deux paramètres confirme cette corrélation dans le domaine d'étude. L'analyse des volumes précipités respecte parfaitement cette évolution caractérisée par ces trois tendances. L'humidité relative est donc un paramètre climatique fortement influencé par la durée et la densité des précipitations dans le domaine d'étude.

A Linguère, par exemple, les fortes valeurs sont observées au cours de la décennie 1951-1960. 54 % en 1955, 53 % en 1954, 53 % en 1951 sont les plus élevées au cours de la période. L'année 1982 se distingue aussi avec 51 % d'humidité relative. Le minimum est observé en 1973 et en 1977 avec 41 %.

De même que dans les autres stations, les *maxima* en général se situent dans la période antérieure à 1970 et au cours des années 2000. Podor enregistre 48 % en 1964 et en 1999. Saint-Louis enregistre 68 % en 1964, en 1968 mais aussi 69 % en 2005. Matam obtient 50 % en 1962,

1964, 1965 et 48 % en 2000. Le maximum à Linguère est noté en 1955 avec 54 %. Diourbel enregistre 59 % en 1968, 1989, 1992 mais également 61 % en 2005.

Les *minima* se situent en général dans les mêmes années à fort déficit pluviométrique durant la grande sécheresse sahélienne. Le minimum à Podor est en 1972, 1977 et en 1984 avec 38 %. Il est également de 36 % en 1984 à Matam. La station de Linguère l'enregistre en 1973, en 1977 également avec 41 % d'humidité relative pour ne citer que ces cas.

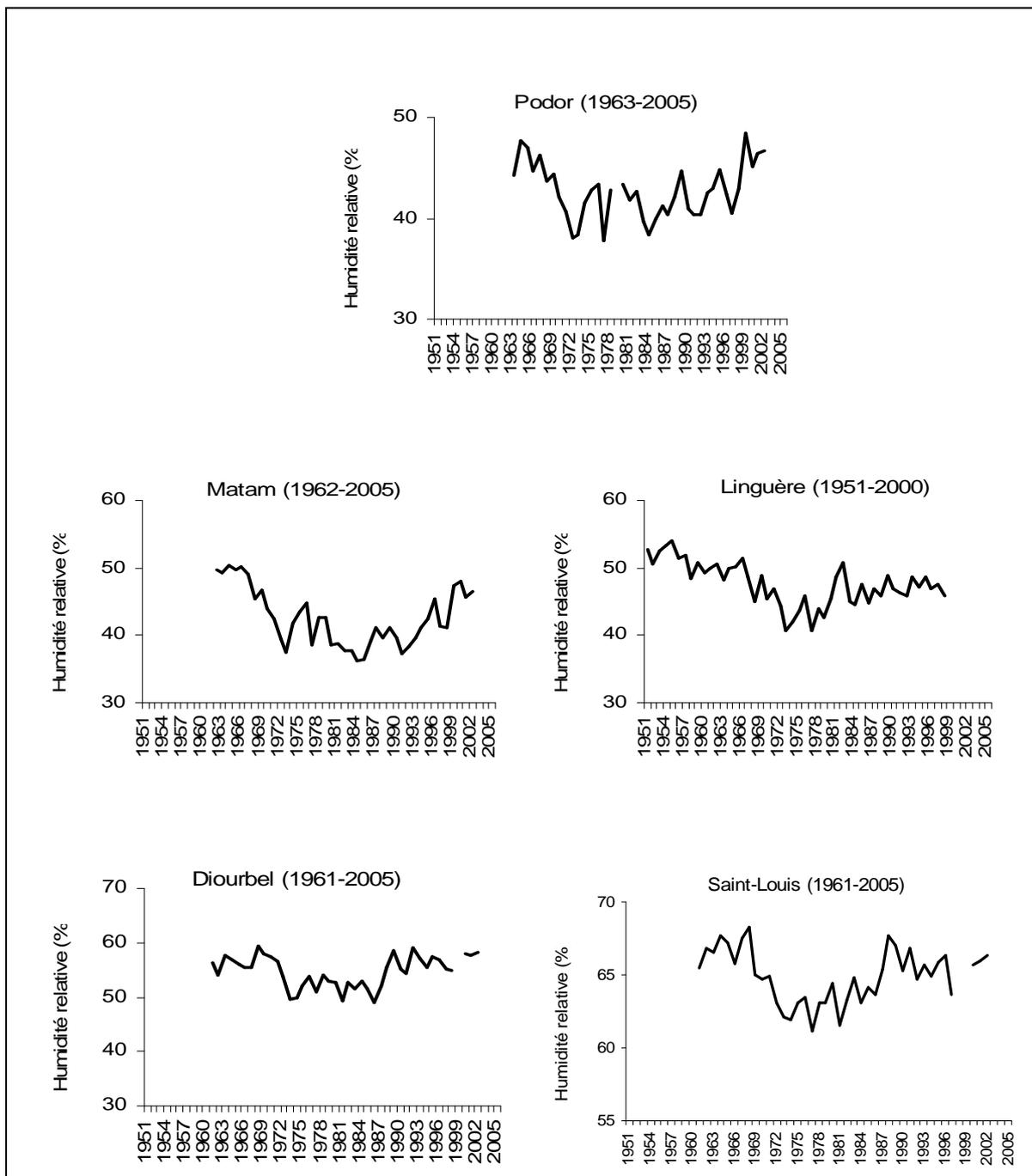


Figure 6. 10 : Variations interannuelles décrivant une forte irrégularité interannuelle de l'humidité relative dans le domaine d'étude (Sarr M. A., 2008)

Les variations interannuelles de l'humidité relative moyenne, selon les écarts centrés réduits confirment les tendances observées. On observe plus de valeurs annuelles représentées par des indices négatifs que de valeurs annuelles aux indices positifs (**figure 6.11**). Globalement, au-delà des caractéristiques apportées par l'indice sur la variation, on confirme nettement, sur l'ensemble des stations, trois grandes périodes caractérisées par des tendances contraires. Ces périodes (1951-1970) et (1980-2005) sont distinctement séparées par les années (1970-1980). On peut facilement détecter une tendance à la baisse de 1951-1970, une amélioration de l'humidité relative depuis quelques années (période 1980-2005) mais aussi une stabilité pendant la fin des années 1970 et début des années 1980. Ces constatations générales se traduisent sur les stations de la façon suivante :

A Diourbel, on note trois périodes :

- 1961–1971, tous les indices sont positifs durant cette période, à l'exception de l'année 1962 ;
- 1972–1987, toute cette période a enregistré des indices négatifs ;
- 1988–2005, toute la période n'a aussi enregistré que des indices positifs à l'exception de l'année 1991, impliquant une tendance à la hausse.

A Linguère, on peut mettre en évidence deux périodes :

- 1951–1967, la situation est totalement excédentaire. Toutes les années ont des indices positifs ;
- 1968–2000, on note une succession de valeurs positives et de valeurs négatives durant cette période. Par contre, 90 % des valeurs annuelles sont représentées par des indices négatifs mais on observe une atténuation des valeurs négatives vers les années 1990 et 2000.

A Matam, on peut distinguer trois périodes également :

- 1962–1970, toute la période ne connaît que des indices positifs ;
- 1971–1998, les années 1975 et 1976 et 1996 sont les seules à enregistrer des indices positifs tandis que le reste de la période enregistre des valeurs négatives ;
- 1999–2005, la période observe des indices positifs sur toutes les années.

A Podor, nous avons trois périodes :

- 1963-1969, période caractérisée par des indices positifs.
- 1970–1997, on assiste à une succession d'indices positifs et d'indices négatifs.
- Toutefois, les années aux indices négatifs représentent environ 89 % de la période ;
- 1998–2005 n'enregistre que des indices positifs.

A Saint-Louis, nous avons également 3 périodes :

- 1961–1969, période caractérisée par des indices positifs ;

- 1970–1986, période pendant laquelle toutes les valeurs annuelles sont représentées par des indices négatifs ;
- 1987–2005, la période n'a enregistré que des indices positifs, à l'exception de l'année 1997.

L'analyse de l'évolution annuelle de l'humidité relative sur la série 1951-2005, par la technique des écarts centrés réduits, permet de constater l'évolution en fonction d'une répartition périodique. La division de la série en périodes donne plus d'informations et permet de noter trois tendances à l'intérieur de la série (une baisse, une quasi-stabilité et une hausse), au lieu de se focaliser sur la tendance linéaire globale, qui comme précisé, pose des problèmes en situation de données très dispersées (**figure 6.11**).

Dans cette division, il faut retenir la dernière période de la série qui commence dans certaines stations dès les années 1980. Elle se caractérise par une situation à la hausse des valeurs de l'humidité relative moyenne. Ce constat au cours de ces années est à restituer dans le contexte de la dynamique actuelle de la pluviométrie étudiée précédemment qui exprime une amélioration des valeurs précipitées.

Ainsi, l'évolution de l'humidité relative dans la zone du Ferlo sur la série 1951-2005 montre particulièrement au cours des vingt dernières années un temps plus humide que les années 1970 et le début des années 1980 mais reste encore loin de la situation hygrométrique des années 1950-1960.

2.3. Évolution croisée de l'humidité relative et des précipitations

La corrélation entre ces deux paramètres climatiques conforte l'espoir du monde rural. L'évolution des précipitations et celle de l'humidité relative sont très proches. On note dans notre domaine d'étude, sur les séries considérées, les mêmes évolutions. Les tendances décennales de la pluviométrie (avec des années 1950 et 1960, plus humides que les années 1990 et 2000, et catastrophiques dans les années 1970 et 1980) sont corrélées avec l'évolution de l'humidité relative. Les valeurs les plus faibles de l'humidité relative sont enregistrées dans les années 1970 et 1980 (**figure 6.12**).

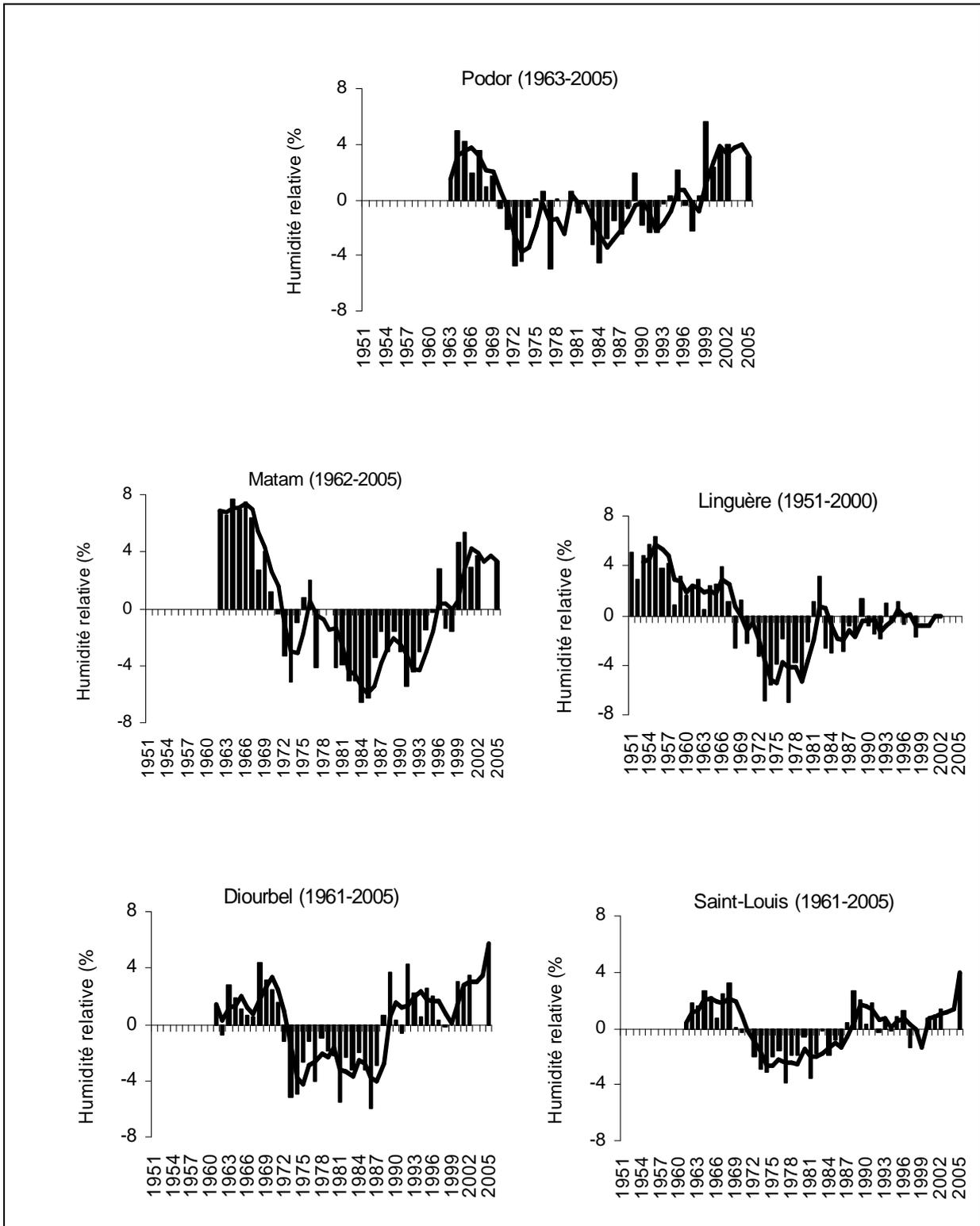


Figure 6. 11 : Écartés centrés réduits de l'humidité relative sur la série (1951-2005) couplés à la courbe de la moyenne mobile sur 3 ans montrant nettement les différentes périodes caractérisées par des tendances inverses (Sarr M. A., 2008)

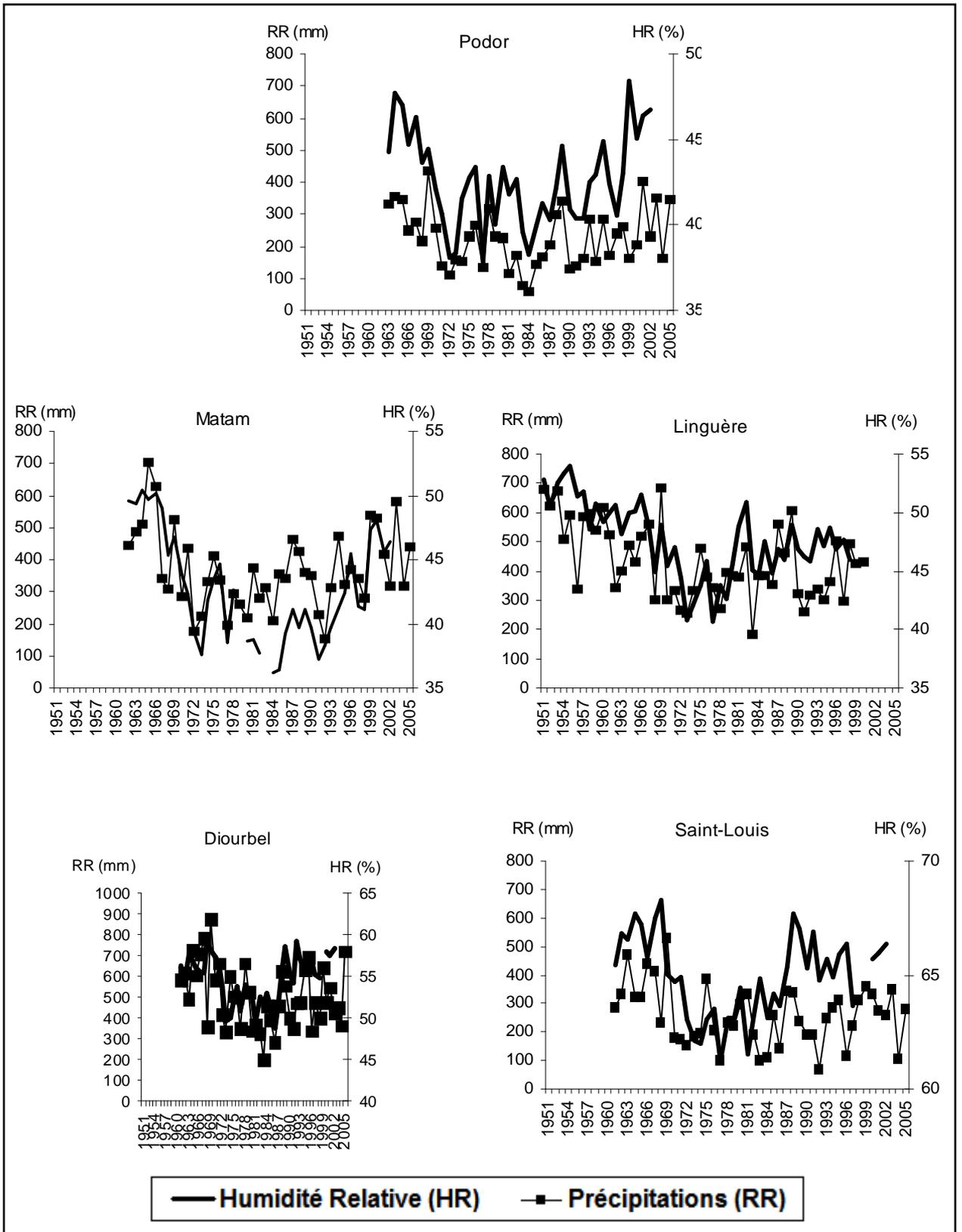
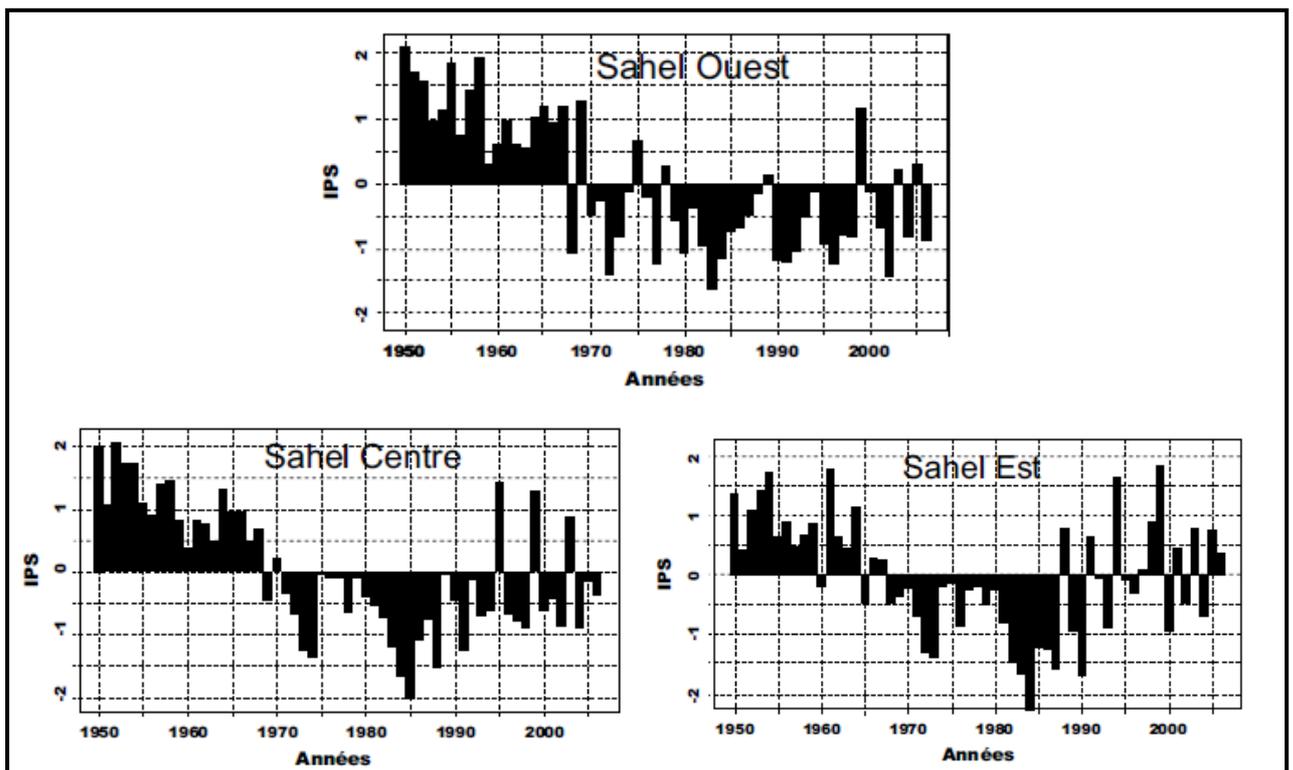


Figure 6. 12 : Évolution comparée entre précipitations cumulés annuels et humidité relative moyenne annuelle (Sarr M. A., 2008)

CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE

De notre analyse statistique, il en ressort :

- Une forte variabilité interannuelle et intra annuelle du climat confirmée par les analyses sur la base des indices statistiques, des ACP, des fluctuations décennales, etc. Cette irrégularité perturbe un écosystème encore fragilisé déjà par des années de déficit pluviométrique continu et aussi par une gestion anarchique des ressources naturelles.
- Une évolution pluviométrique, sur la période 1951-2005, caractérisée par trois tendances qui se résument par une baisse jusqu'aux années 1970, suivie d'une stabilité du déficit dans les années 1970 et 1980. Les deux dernières décennies montrent un retour à de meilleures conditions pluviométriques sur l'espace du Ferlo par rapport à la période de sécheresse qui a été de loin la plus sévère de tout le siècle (**figure 6.13**). Cette tendance qui reste encore loin des niveaux optimums est plus visible dans le Sahel oriental (**figure 6.13**).



Source : Centre Régional Agrhymet, CILSS (2007)

Figure 6. 13 : Variations des indices pluviométriques standardisés (IPS ou SPI) par rapport à la moyenne du siècle sur tout le Sahel

Cette situation est confirmée par :

- l'arrêt de la migration vers le sud de l'isohyète 400 mm sur les deux dernières décennies (1981-1990, 1991-2000) et même une remontée sur la période 2001-2005 ;
- une amélioration très remarquable des volumes précipités enregistrés pendant les mois d'août et septembre depuis les milieux des années 1980 ;
- une hausse du nombre de jours de pluie ces dernières années qui traduit la fin de l'aggravation du déficit pluviométrique dans sa répartition ;
- des ruptures variables selon les stations situées dans les années 1980 et 1990 par la segmentation de Hubert ; Elles n'indiquent aucune amélioration, mais croisées avec les analyses faites précédemment, on peut émettre des hypothèses sur le commencement d'une nouvelle phase climatique ;
- une atténuation significative du déficit pluviométrique dans les années 1990 et 2000 mise en évidence par les analyses en composantes principales.

L'amélioration des conditions pluviométriques est également confirmée par l'analyse de l'évolution des autres paramètres climatiques ; cette confirmation s'exprime par :

- une tendance à la baisse de la durée d'insolation depuis les années 1980 après une tendance à la hausse ;
- une évolution de la situation thermique contrastée mais plus chaude ces dernières années (Sarr, 2009) ;
- une évaporation moins importante (à l'instar de Linguère et de Matam) depuis les années 1970 ;
- une tendance à la hausse de l'humidité relative depuis les années 1970/1980.

En revanche, la fin de l'aggravation du déficit pluviométrique au cours des années 1970 et 1980 suivie d'une amélioration des cumuls précipités ne traduit pas très clairement la fin de la sécheresse, à la première observation, sur les plans agricoles, végétaux, édaphiques. Ainsi, l'étude de l'évolution de la végétation permet de vérifier la traduction de la situation climatique décrite. Le couvert végétal est le seul paramètre environnemental dont nous avons pu avoir des données, des outils de traitements et un cadre adéquat permettant une étude exhaustive. D'autres éléments, comme les pratiques et les productions culturelles, l'état des sols, les niveaux des nappes, etc., seraient intéressants à évaluer en relation avec la pluie.

PARTIE 3 : ÉVOLUTION DE LA VÉGÉTATION

Pour évaluer la traduction de l'amélioration des conditions climatiques sur le couvert végétal, l'étude de la troisième partie est consacrée à l'évolution de la végétation et s'articule autour de trois chapitres.

Le premier chapitre se consacre à l'étude de l'évolution générale, à différentes échelles, de la couverture végétale, basée sur l'indice de végétation (NDVI). Son objectif cherche à caractériser sur la période 1981-2005 la complexité du rapport entre la pluviométrie et le couvert végétal au Ferlo.

Dans le deuxième chapitre, on passe à l'analyse fine avec l'identification des différentes unités paysagères ainsi qu'à l'évolution de leur distribution spatiale et temporelle. Cette étude porte sur deux dates (1990 et 2002) justifiée par la prise en compte des conséquences des aménagements agricoles, pastoraux et hydrauliques qui modifient par ailleurs l'évolution et la répartition du couvert végétal.

Le troisième chapitre de cette partie a pour objectif la vérification de la corrélation entre les images NDVI des capteurs SPOT-VEGETATION, NOAA-AVHRR (NDVI les plus utilisés) et MSG-SEVIRI. La disponibilité de l'information, à l'échelle locale, sur les prévisions de la pluie ainsi que sur la production végétale permettent aux populations de réagir à temps et éventuellement d'une manière non anarchique. C'est pourquoi, nous nous sommes approchés des images de Météosat Seconde Génération avec son nouveau capteur SEVIRI (MSG-SEVIRI) qui apportent certains avantages considérables dans la thématique de la végétation comparés à d'autres capteurs.

Une synthèse sur les propriétés générales des satellites exploités pour les besoins de l'étude a été rajoutée en annexes.

CHAPITRE 7 : ÉVOLUTION INTERANNUELLE, MENSUELLE ET SAISONNIÈRE DE LA PRODUCTION VÉGÉTALE A PARTIR DES IMAGES NDVI DE NOAA-AVHRR

1. LE CHOIX DE L'INDICE DE VÉGÉTATION

Depuis qu'il est possible d'enregistrer par satellite la luminance provenant des objets au sol, dans les bandes spectrales du visible (rouge : R) et du proche infrarouge (PIR), de nombreux auteurs ont développé divers «indices de végétation» fondés sur la combinaison (somme, différence, rapport, combinaison linéaire) des valeurs de ces canaux (Girard M. C., et *al.*, 2000). Les indices de végétation servent d'une part à identifier et à suivre l'évolution temporelle de certains couverts végétaux et d'autre part à évaluer certains paramètres du couvert végétal comme l'estimation de la phytomasse aérienne. Ils sont utilisés pour minimiser la variabilité radiométrique provoquée par des facteurs externes aux couverts végétaux, tels que l'éclairement solaire, les variations angulaires, les propriétés optiques du sol.

Les indices de végétation expriment le contraste entre les comportements spectraux de la végétation chlorophyllienne et des sols nus dans le rouge (R) et le proche infrarouge (PIR). Ces deux canaux concentrent la part d'information la plus importante sur le couvert végétal, soit plus de 90 % (Cosentino, 1990 *in* Kermadi S., 1994). Le rouge et l'infrarouge sont particulièrement bien adaptés pour décrire l'activité photosynthétique de la végétation, tandis que l'infrarouge IRCL (InfraRouge de Courte Longueur d'onde, qualifié quelquefois de moyen infrarouge) traduit plutôt le taux d'humidité du sol et de la végétation (Ioana-Toroimac G., et *al.*, 2006 ; Thomson K. P. B., 1984).

Les indices de végétation sont nombreux et correspondent chacun à une application propre (**tableau 7.1**). Un certain nombre d'indices de végétation ne sont utilisables que pour des couverts «denses» (pas de sol apparent), mais pas très dense (sinon on est confronté à l'effet de saturation), (exemple RVI), et chlorophylliens, sans mélange de matière sèche sur pied avec la matière verte (exemple NDVI). Même si certains sont efficaces, tel que le TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index issu du SAVI) pour calculer le taux de couvert végétal en milieu semi-aride à végétation éparse (Barret F., et *al.*, 1989 ; Purevdorj T., et *al.*, 1998), l'indice NDVI (Normalized Differential

Vegetation Index ou en français Indice de végétation normalisé) le plus connu sera utilisé dans ce travail car il est un bon indicateur de la productivité primaire de la végétation terrestre des zones semi-arides et arides.

Dénomination	Caractéristiques	Auteurs
Différence	Forte sensibilité aux variations atmosphériques	Monget, 1980
Rapport (RVI)	Saturation aux forts indices, sensibilité à la contribution spectrale des sols et aux effets atmosphériques	Knipling, 1970 ; Viollier et al., 1985
Indice de végétation normalisé (NDVI)	Sensibilité aux effets atmosphériques, gamme de variation plus faible, que le précédent, mais sensibilité aux variations angulaires de la visée, selon la position du soleil	Rouse et al., 1974 ; Tucker, 1979
Indice de végétation transformé (TVI)	Essai d'élimination des valeurs négatives, stabilisation de la variance	Dering et al., 1975
Indice de végétation perpendiculaire (PVI)	Diminution de la contribution spectrale des sols, mais sensibilité à diverses caractéristiques des sols	Richardson et Wiegand, 1977
Indice de végétation ajusté au sol (SAVI)	De nombreux indices sont issus de celui-ci pour minimiser l'effet du sol (TSAVI, MSAVI)	Huete, 1988
Indice de végétation normalisé corrigé des effets atmosphériques (ARVI)	Diminue l'effet des aérosols contenus dans l'atmosphère sur le NDVI mais sensible à la contribution spectrale des sols	Kaufman et Tanre, 1992

Source : Girard et al., 1999

Tableau 7. 1 : Les principaux indices de végétation les plus couramment utilisés

Le choix porté sur l'indice de végétation normalisé est donc fondé sur la pertinence de son application en région sahélienne mais aussi sur la disponibilité de la série la plus longue en indices de végétation. En outre, il est un des indices les plus utilisés dans le monde pour mesurer la vitalité de la végétation (Bochenek, 2000; Genovese et al., 2001; Kogan, 2001; Maselli et al., 2000; Seiler et al., 2000; Unganai et Kogan, 1998 in Balaghi R., 2008) et/ou le suivi et la prédiction des cultures (Benedetti et Rossinni, 1993; Kefyalew

et *al.*, 2005; Quarmby et *al.*, 1993 in Balagui, 2008). Le NDVI reflète mieux l'état de la végétation surtout en zones pluviales semi-arides où le climat agit fortement sur les plantes et où les variations inter-annuelles du climat sont importantes. D'autre part, la plus forte fréquence d'utilisation du NDVI dans les travaux scientifiques par rapport à d'autres indices relève de la disponibilité des données, ce qui constitue son plus grand avantage. Le NDVI est dérivé depuis 1980 du capteur de NOAA-AVHRR, et acquis sous format raster couvrant tout le Sénégal avec une résolution d'un kilomètre environ. Il permet ainsi de se libérer d'un travail lourd, sur le plan informatique ou cartographique, de spatialisation des données climatiques en raison d'un manque de moyens techniques informatiques d'une part et de la faiblesse du réseau de stations météorologiques sur le territoire sénégalais d'autre part. Il est obtenu selon la formule suivante :

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R})$$

Parmi les possibilités offertes à l'analyse par l'indice NDVI, on trouve l'étude du comportement et le suivi de la végétation sur les bases des propriétés spectrales des végétaux. Le NDVI est un indice normé qui varie entre - 1 et + 1 mais en général, ces limites ne sont jamais atteintes pour diverses raisons telles que le degré de saturation de réponse dans la bande rouge par exemple. Les valeurs très basses (- 0,9 à 0) correspondent aux secteurs non végétalisés tels que les zones rocheuses, les sols nus, les surfaces d'eau ; les valeurs modérées (0,2 à 0,3) représentent les zones arbustives et de prairie, alors que les valeurs élevées (0,5 à 0,9) traduisent une végétation dense abondante (NASA, 2005).

Malgré les avantages cités précédemment pour l'étude de la végétation, l'utilisation de l'indice de végétation présente quelques limites liées à sa grande sensibilité aux effets atmosphériques. Les plus importants sont :

- les effets atmosphériques perturbateurs, les gaz et les aérosols,
- la vitesse et la nature des vents,
- l'angle zénithal du soleil,
- l'angle de visée.

Dans le contexte de notre étude, la contrainte majeure se manifeste souvent en période des pluies avec des couvertures nuageuses qui peuvent persister au-dessus de la région du Ferlo pendant plusieurs jours. Les valeurs de l'indice NDVI sont alors fortement

biaisées par la présence des nuages. La technique des synthèses temporelles⁶¹, que nous avons développées plus en détails dans les annexes, constitue une alternative à ce type de problème.

En plus des effets atmosphériques, la résolution au sol des images NOAA, à l'échelle du Ferlo, ne permet qu'une analyse grossière et globale par rapport à d'autres satellites comme Landsat.

En dépit de ces éléments potentiellement contraignants qui requièrent une attention particulière dans le choix et dans l'interprétation des images, la forte corrélation de l'indice de végétation normalisé avec la biomasse verte a déjà été démontrée (**figure 7.1**). Les rapports annuels du suivi de la production végétale sur le Sénégal, établis par le Centre de Suivi Ecologique, mettent en évidence chaque année des coefficients de corrélation très significatifs, entre le NDVI et la biomasse⁶². L'indice NDVI est un bon indicateur du comportement de la végétation dans divers milieux mais il est également très adapté pour l'étude de son évolution dans le temps.

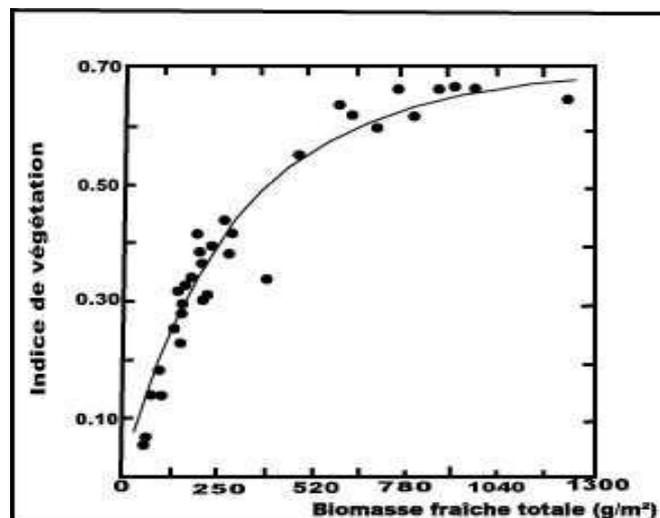


Figure 7.1 : Relation entre l'indice de végétation et la biomasse (d'après Tucker C. J., 1979)

En exprimant un taux de couverture de la végétation d'une région donnée, l'indice NDVI traduit l'état de santé et la densité de cette végétation à un moment précis. En conséquence, dans cette étude, l'utilisation du concept simplificateur et globalisant

⁶¹ Une synthèse temporelle de NDVI consiste à réaliser une image finale où chaque pixel (correspondant au pixel où la température est maximale) sera le pixel de la meilleure qualité sur l'ensemble des images.

qu'est la production végétale est utilisée. La production végétale, grâce aux techniques de la télédétection, permet de soumettre toute la biomasse végétale à des séries de quantifications périodiques. Le suivi de cette évolution de la production végétale par le Centre de Suivi Ecologique est, depuis les années 1980, au Sénégal, un indicateur fiable pour la gestion des déplacements du bétail à la recherche de fourrage. Ces informations, multipliées sur le territoire national, sont mises à la disposition des collectivités territoriales dans le cadre des politiques d'aménagements des espaces ruraux.

2. LES CARACTÉRISTIQUES DES IMAGES NDVI DE NOAA-AVHRR UTILISÉES

Pour évaluer statistiquement l'évolution de la production végétale dans le bassin versant du Ferlo, nous disposons d'une série de synthèses d'images mensuelles de NDVI de NOAA-AVHRR (à partir de synthèses de 15 jours) générées sur toute l'Afrique et Madagascar, sur une période allant de 1981 à 2005 (sauf juin 1981). Les images proviennent de la base de données NASA GIMMS et sont géoréférencées suivant un système de projection spécifique à l'Afrique : projection conique Albers. Les données statistiques extraites concernent le maximum saisonnier du NDVI du bassin versant du Ferlo. L'utilisation du maximum de NDVI au lieu de la moyenne ou du minimum (trois options offertes par le programme de traitement) permet de détecter le plus fort signal dans les régions sèches comme c'est le cas au Ferlo où l'activité végétale n'est pas très importante. Les valeurs NDVI, codées en entier, sont multipliées par 10000⁶³. Le choix porté sur les images NDVI de NOAA-AVHRR est fondé d'une part, sur la longue série de données chronologiques, d'ailleurs la plus longue comparée à celle de SPOT-VEGETATION et d'autre part, sur la disponibilité et la gratuité.

Sur la base de la durée de la saison des pluies et du temps de réponse de la végétation par rapport à la pluie, qui reste très relatif d'une saison à une autre, nous avons considéré dans cette partie du Sénégal la période de juin à décembre de chaque année de notre série.

⁶² Rapports de suivi de la production végétale au Sénégal en 1989, 1995 et 2007 où les coefficients de corrélation sont respectivement 0,87, 0,83 et 0,88 entre le NDVI et la biomasse.

⁶³ Les valeurs multipliées par 10000 sont visibles au niveau de l'échelle des traitements cartographiques sous Idrisi mais rectifiées dans les autres figures pour avoir les valeurs réelles de NDVI (entre - 1 et + 1).

3. LES MÉTHODES D'ANALYSE

L'étude de l'évolution de la production végétale du Ferlo aux échelles saisonnière, mensuelle et interannuelle se fonde sur trois méthodes d'analyse. Le choix de ces méthodes est justifié d'abord par l'objectif affirmé c'est-à-dire étudier l'évolution de la production végétale mais aussi par la simplicité de leur utilisation qui rend l'interprétation des résultats plus aisée. Ces méthodes sont les quartiles, l'indicateur de productivité de la végétation ou en anglais *Vegetation Productivity Indicator* (VPI) et les résidus de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) :

- L'utilisation des quartiles permet de dégager l'existence des tendances dans la série chronologique.
- L'indicateur de productivité de la végétation donne sous un angle différent les fluctuations annuelles et mensuelles de la production de la végétation.
- Et pour finir, les Analyses en Composantes Principales permettent de séparer les structures permanentes de l'occupation du sol de leurs variations annuelles. Grâce à cette technique, on peut observer les variations spatiales ainsi que temporelles de la production végétale.

Ces méthodes sont complémentaires et répondent parfaitement à notre problématique car elles permettent d'évaluer statistiquement et graphiquement les variations de la production végétale en considérant la permanence des systèmes d'occupation du sol dans le temps.

L'analyse de la production à l'échelle saisonnière et mensuelle (août et septembre) permet déjà de comprendre le schéma mensuel moyen et sa distribution qui déterminera l'évolution annuelle.

4. L'ANALYSE DE LA PRODUCTION VÉGÉTALE A L'ÉCHELLE SAISONNIÈRE

4.1. L'évolution mensuelle des mois de juin à décembre sur la période 1981-2005

La forte variabilité observée dans l'évolution intra-annuelle de la production végétale est visible sur la situation interannuelle. Globalement les fluctuations interannuelles de la production végétale des mois de juin, juillet, août, septembre, octobre, novembre et décembre sont relativement proches (**figures 7.2 à 7.8**). Mais quelques particularités presque à chacun de ces mois, sur les 25 années analysées, peuvent être mises en évidence.



Figure 7. 2 : Évolution interannuelle du maximum NDVI de juin (Sarr M. A., 2008)



Figure 7. 3 : Évolution interannuelle du maximum NDVI de juillet (Sarr M. A., 2008)



Figure 7. 4 : Évolution interannuelle du maximum NDVI d'août (Sarr M. A., 2008)



Figure 7. 5 : Évolution interannuelle du maximum NDVI de septembre (Sarr M. A., 2008)



Figure 7. 6 : Évolution interannuelle du maximum NDVI d'octobre (Sarr M. A., 2008)

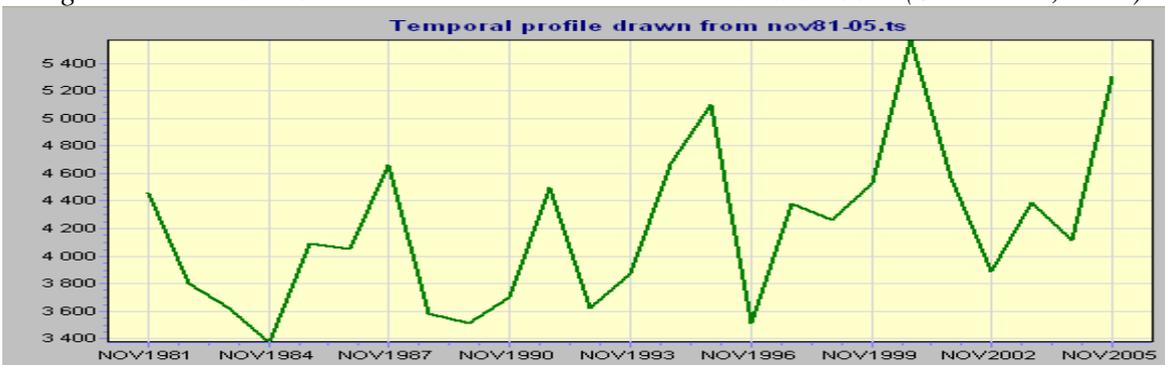


Figure 7. 7 : Évolution interannuelle du maximum NDVI de novembre (Sarr M. A., 2008)

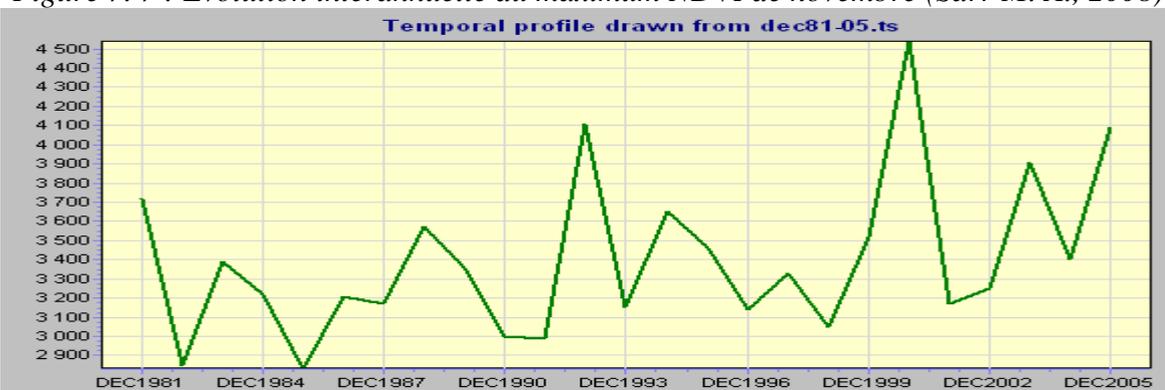


Figure 7. 8 : Évolution interannuelle du maximum NDVI de décembre (Sarr M. A., 2008)

En analysant la distribution des valeurs NDVI des mois concernés sur la période 1981-2005, selon la méthode des quartiles, et en se focalisant principalement sur la distribution entre le quartile inférieur (Q1) et le quartile supérieur (Q3), nous constatons les points suivants ;

- En juillet, août et septembre, sur les 25 ans que comptent notre série, 13 années ont eu des valeurs NDVI supérieures ou égales au quartile médian représentant 50 % des observations dont 62 % de ces années appartiennent à la période 1990-2005. Cette amélioration de la production végétale de ces dernières années se traduit également par 30 % des années qui se trouvent dans l'intervalle du quartile supérieur contre 28 % en juillet dans le quartile inférieur et 33 % des années dans le quartile supérieur contre 29 % dans le quartile inférieur en août (**tableau 7.2**).

- En octobre et en décembre, sur les 25 années de la série, 14 années ont des valeurs NDVI supérieures ou égales au quartile médian dont 70 % se trouvent dans la période 1990-2005. A cela s'ajoute un même pourcentage d'années (33 %) au quartile inférieur et au quartile supérieur en octobre contre 29 % des années appartenant au quartile inférieur et 24 % au quartile supérieur en décembre. On constate à ce niveau que l'évolution interannuelle des mois d'octobre et de décembre traduit également une amélioration de la production végétale (**tableau 7.2**).

- La situation du mois de novembre met en évidence 15 années de la série avec des valeurs NDVI supérieures ou égales à la médiane. Parmi ces années, 73 % d'entre elles se situent dans la période 1990-2005. Le quartile supérieur représente 37 % de la série contre 29 % pour le quartile inférieur (**tableau 7.2**).

- Enfin en juin, 12 années enregistrent des valeurs NDVI supérieures ou égales à la médiane. Le mois de juin tout comme septembre est le seul à avoir un pourcentage d'années plus élevé au premier quartile (33 %) qu'au troisième quartile (29 %) (**tableau 7.2**).

Mois	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
$\leq Q1$	33	29	29	37	33	29	24
$\geq Q3$	29	29	33	33	33	37	29

Tableau 7. 2 : La répartition des valeurs NDVI annuelles en pourcentage selon le quartile inférieur et le quartile supérieur (Sarr M. A., 2008)

A la suite de cette analyse, et en se focalisant sur la période 1990-2005, précisément sur la distribution des années 2000, nous remarquons des comportements communs à l'évolution de certains mois. Concernant les mois de juin, juillet, septembre, octobre et décembre, les années 2000 sont partagées entre le quartile médian et le quartile supérieur. L'année 2005 représente soit le maximum principal, soit le maximum secondaire dans certains mois comme juillet, août et septembre. D'ailleurs, le poids déterminant l'évolution interannuelle des valeurs NDVI est porté par ces derniers mois. En revanche, on note que l'évolution de l'indice NDVI du mois de juin contribue peu à la dynamique interannuelle.

En résumé, **les écarts centrés réduits des valeurs de l'indice NDVI, sur la zone du Ferlo, au cours de la période 1981-2005, montrent d'une part une forte variabilité interannuelle de la production végétale et d'autre part, grâce à la courbe des moyennes mobiles lissée sur 3 ans, une tendance à la hausse des valeurs depuis le début des années 1990 des mois de juin à décembre (figures 7.9, 7.10, 7.11, 7.12, 7.13, 7.14 et 7.15).** Les niveaux de cette croissance de la couverture végétale sont plutôt portés par les dernières années. Au cours des variations interannuelles de juin à décembre, les valeurs NDVI des années 2004 et 2005 ne se retrouvent négatives qu'une seule fois. Par contre, celle de l'année 1982 est positive qu'une seule fois et celle de l'année 1984 reste négative sur toute la série. Cependant, la prédominance de quelques valeurs NDVI annuelles ou mensuelles traduit les périodes de sécheresse qu'a connues la région ; c'est le cas des années 1983, 1984.

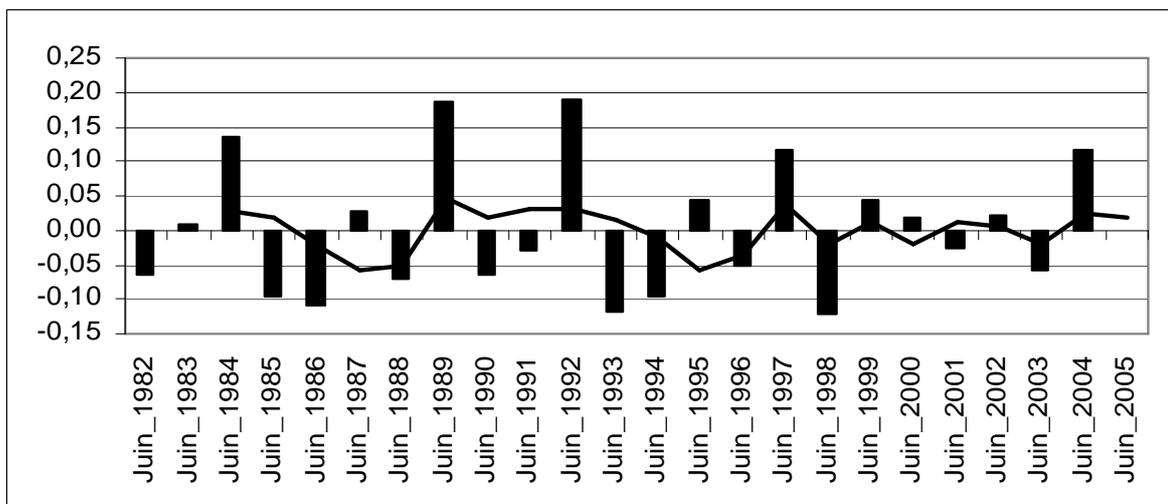


Figure 7. 9 : Écarts centrés réduits des valeurs NDVI en juin (Sarr M. A., 2008)

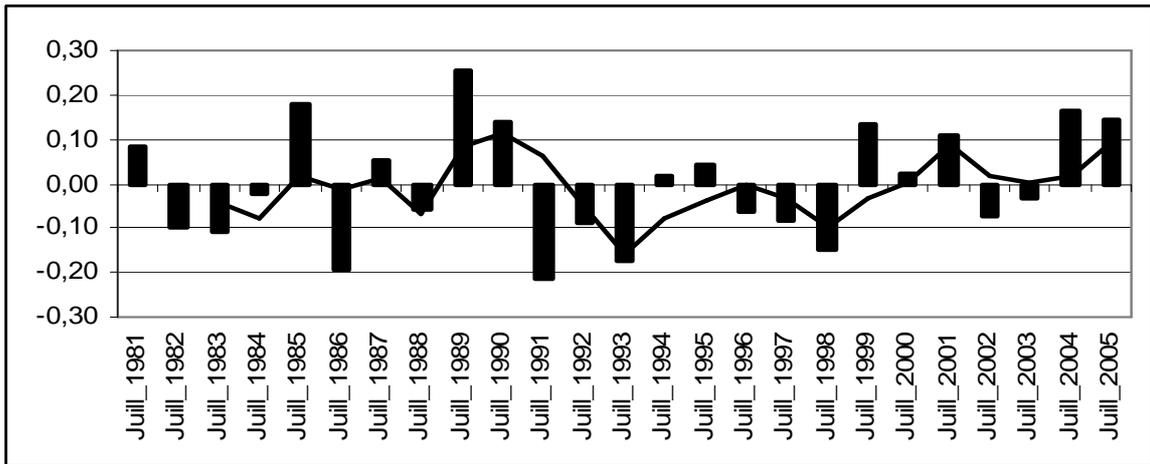


Figure 7. 10 : Écarts centrés réduits des valeurs NDVI en juillet (Sarr M. A., 2008)

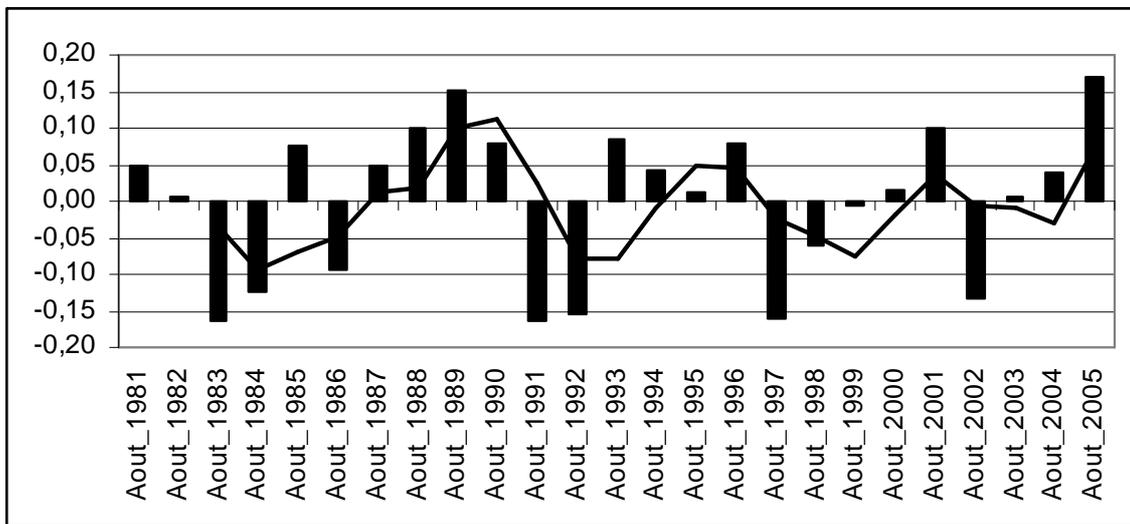


Figure 7. 11 : Écarts centrés réduits des valeurs NDVI en août (Sarr M. A., 2008)

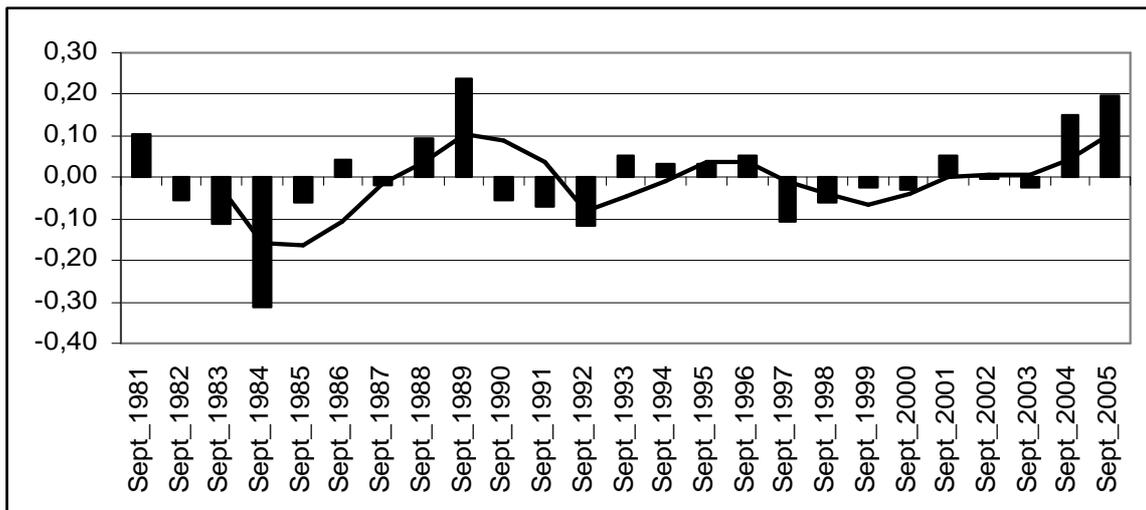


Figure 7. 12 : Écarts centrés réduits des valeurs NDVI en septembre (Sarr M. A., 2008)

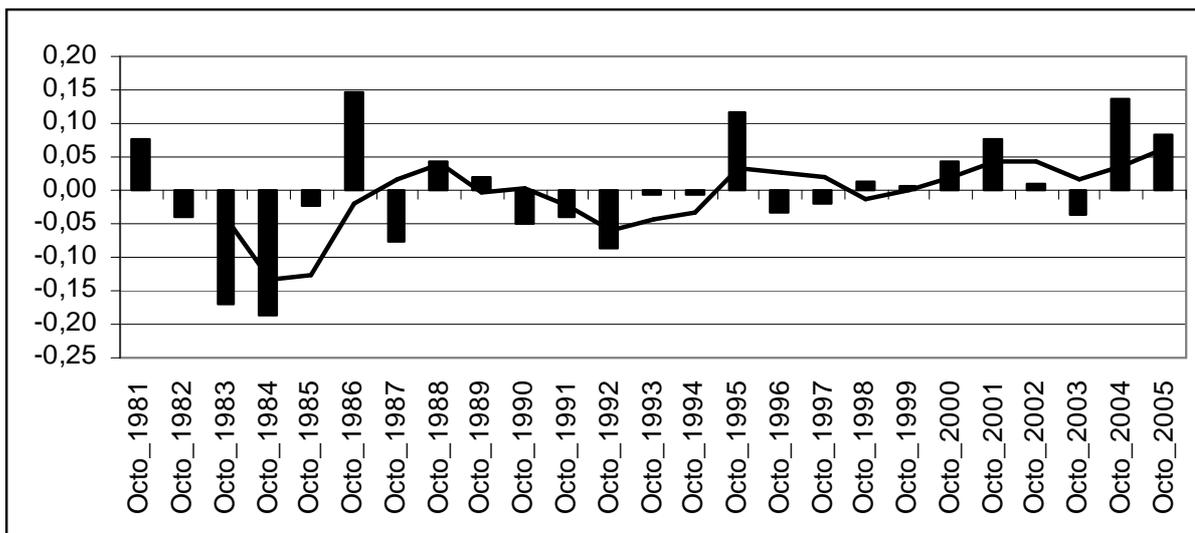


Figure 7. 13 : Écartés centrés réduits des valeurs NDVI en octobre (Sarr M. A., 2008)

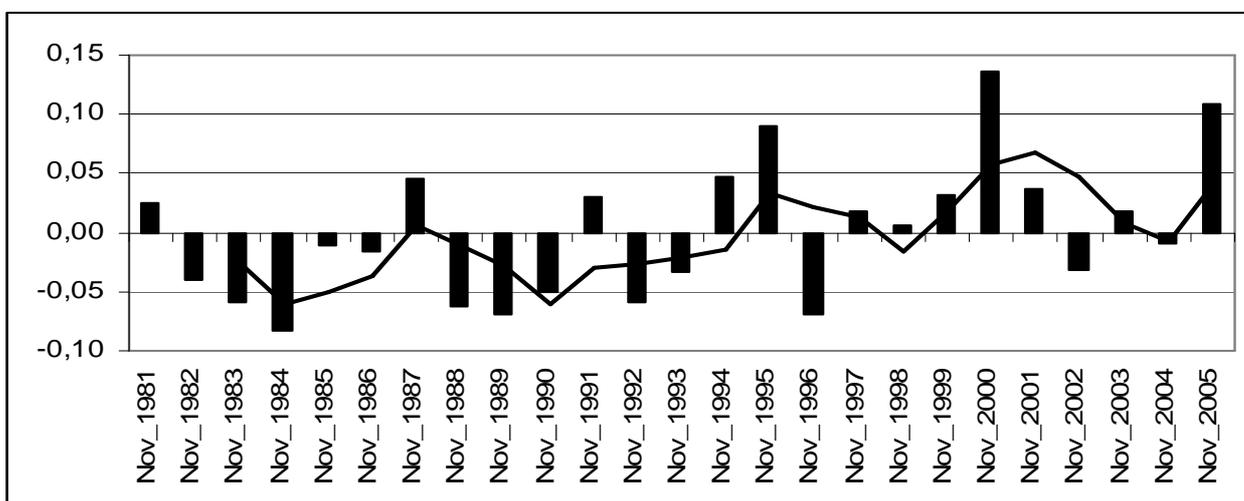


Figure 7. 14 : Écartés centrés réduits des valeurs NDVI en novembre (Sarr M. A., 2008)

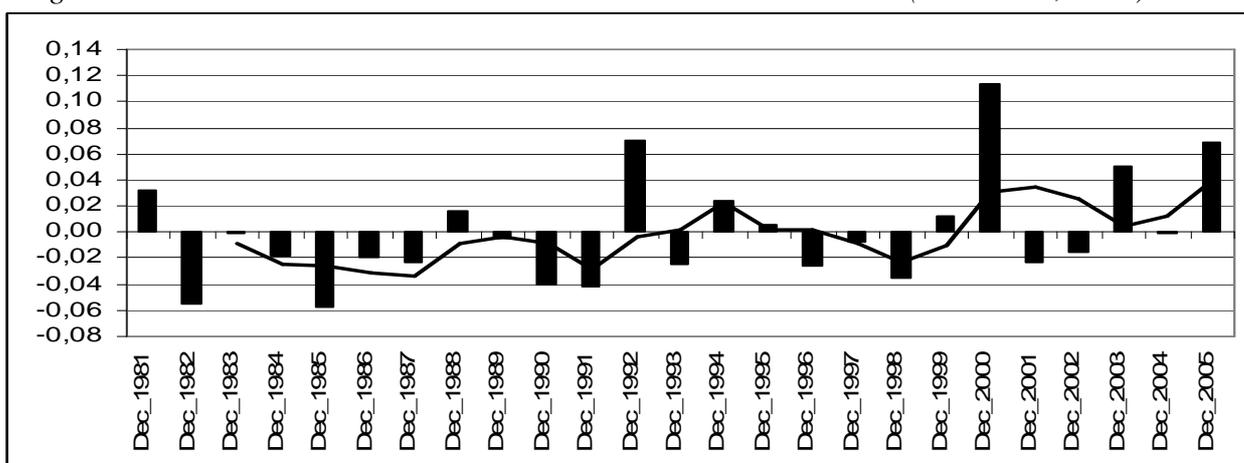


Figure 7. 15 : Écartés centrés réduits des valeurs NDVI en décembre (Sarr M. A., 2008)

4.2. Apports significatifs de la production végétale des mois d'août et de septembre sur le total annuel

Les situations au cours des mois d'août et septembre indiquent à la fois un très fort VPI et un très faible VPI toujours aux mêmes années. Ces mois contribuent d'une manière très significative à la production saisonnière de la végétation pour les années 2005, 2004 ou 1989 comparés surtout aux mois des années 1997, 1983, 1984 ou 1992, périodes pendant lesquelles le VPI reste très faible (**figures 7.16 et 7.17**). Ce constat, sur ces quelques années, pour ne citer que celles là, justifie toute l'importance de la production végétale des mois d'août et septembre dans la production annuelle. On constate largement que les niveaux optimaux atteints en 2005 par exemple au cours de la série sont dus à une importante production végétale des mois d'août et septembre. En revanche, en 1997 on a pu enregistrer une faible productivité aussi bien au niveau annuel qu'au niveau mensuel (août et septembre). D'ailleurs, sur la répartition à l'échelle saisonnière de la production végétale, des rapprochements entre les mois d'août et de septembre mais aussi entre les situations de la production végétale des mois de juillet et d'octobre peuvent être faites (**figures 7.18 et 7.19**).

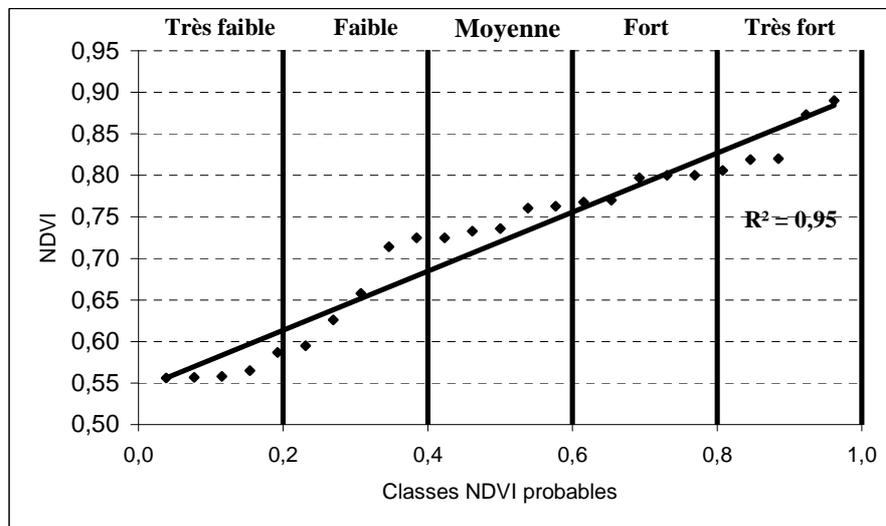


Figure 7. 16 : Détermination de la distribution de la probabilité de NDVI du mois d'août avec les limites des classes de VPI (Sarr M. A., 2008)

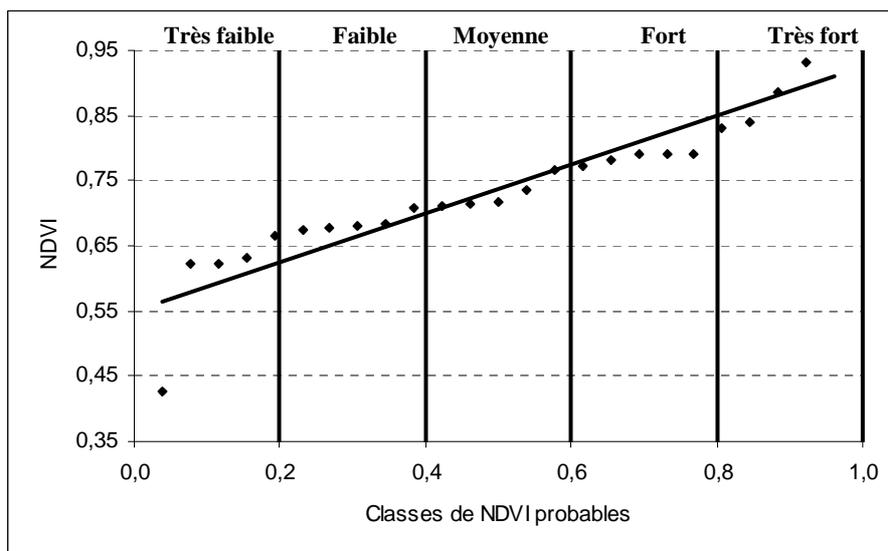


Figure 7. 17 : Détermination de la distribution de la probabilité de NDVI du mois de septembre avec les limites des classes de VPI (Sarr M. A., 2008)

Il faudrait ajouter que l'utilisation du VPI dans l'étude de la production végétale à partir des images NDVI permet une analyse en temps réel de la végétation. Il est également efficace pour un diagnostic de la valeur de NDVI observée au cours de la saison végétative.

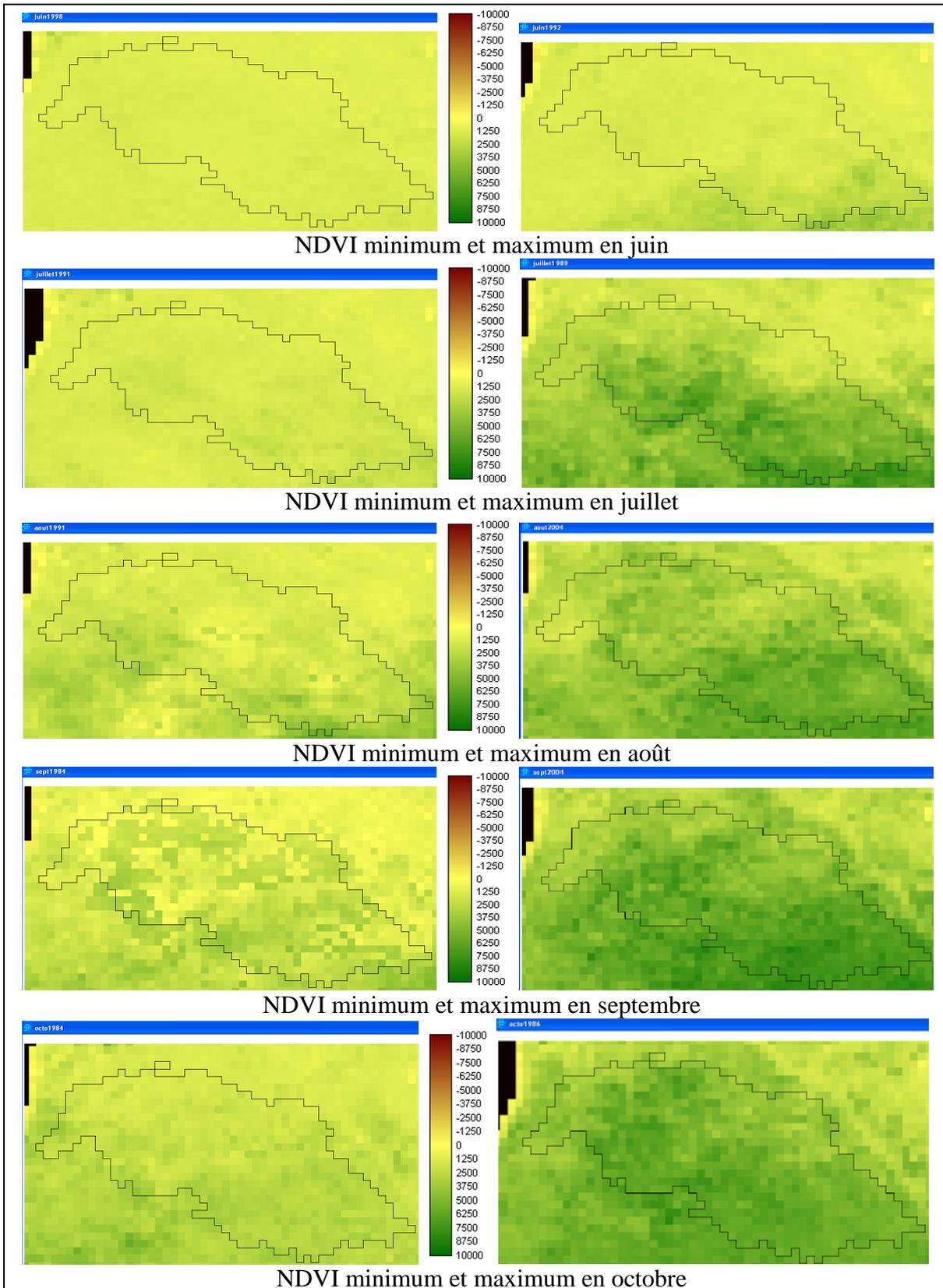


Figure 7. 18 : Planche des indices NDVI minima (à gauche) et maxima (à droite) de juin à octobre (la moyenne des mois de 1981 à 2005) (Sarr M. A., 2008)

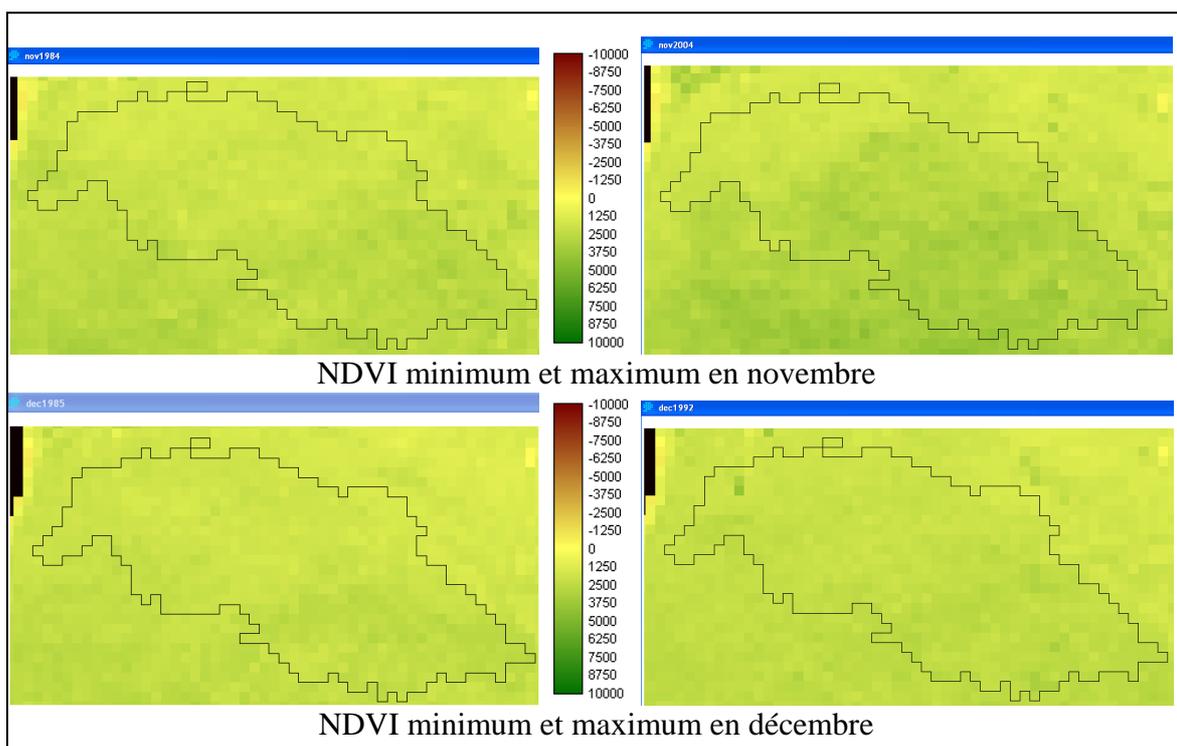


Figure 7. 19 : Planche des indices NDVI minima (à gauche) et maxima (à droite) de novembre à décembre (la moyenne des mois de 1981 à 2005) (Sarr M. A., 2008)

L'analyse à l'échelle saisonnière et mensuelle montre une forte variabilité intra-annuelle. On constate également la part prédominante des mois d'août et de septembre dans la production annuelle. Ces derniers connaissent une tendance à la hausse depuis les années 1990.

5. L'ANALYSE A L'ÉCHELLE ANNUELLE : UNE TENDANCE À LA HAUSSE DEPUIS LES ANNÉES 1990

5.1. Les années 1990 : début d'une amélioration

Le maximum des valeurs NDVI représentant la production maximale de la végétation enregistrée dans la zone du Ferlo, sur la période 1981-2005, permet d'observer d'une part une évolution interannuelle marquée par des irrégularités fortes (**figure 7.20**), et d'autre part, une nette croissance à la hausse des valeurs de l'indice de la végétation depuis le début des années 2000 (**figure 7.21**).

Dans la distribution des données, selon la méthode des quartiles, 28 % des années ont eu des valeurs NDVI inférieures ou égales au premier quartile contre 36 % des années supérieures ou égales au quartile supérieur. L'intervalle médian ou l'ensemble des valeurs qui expriment statistiquement l'état dit «moyen» de la végétation sur la série des 25 années

regroupe 36 % des années. Dans la première classe (quartile inférieur), se retrouvent les années 1983 et 1984, caractéristiques du déficit végétal de la décennie 1980. En outre, les faibles états de la production de la végétation ont été observés au cours des années 1991, 1992, 1997, 1998 et 1999.

En revanche, dans la classe quartile supérieur, les années 1981, 1989, 2004 et 2005 représentent l'état optimal de la production de la végétation au cours de la série 1981-2005. L'année 2005 se distingue par une situation excédentaire exceptionnelle jamais observée depuis 25 ans. Sa valeur maximale NDVI annuelle correspond à plus de 0,93. Elle est suivie de l'année 2004, sa valeur NDVI est égale à 0,89.

Après l'analyse de la production végétale par le biais de la méthode des quartiles caractérisant la forte variabilité interannuelle, l'utilisation de l'indicateur de productivité de végétation permet d'analyser l'évolution de la végétation sous un autre angle en mettant en évidence aussi la particularité des années 2000.

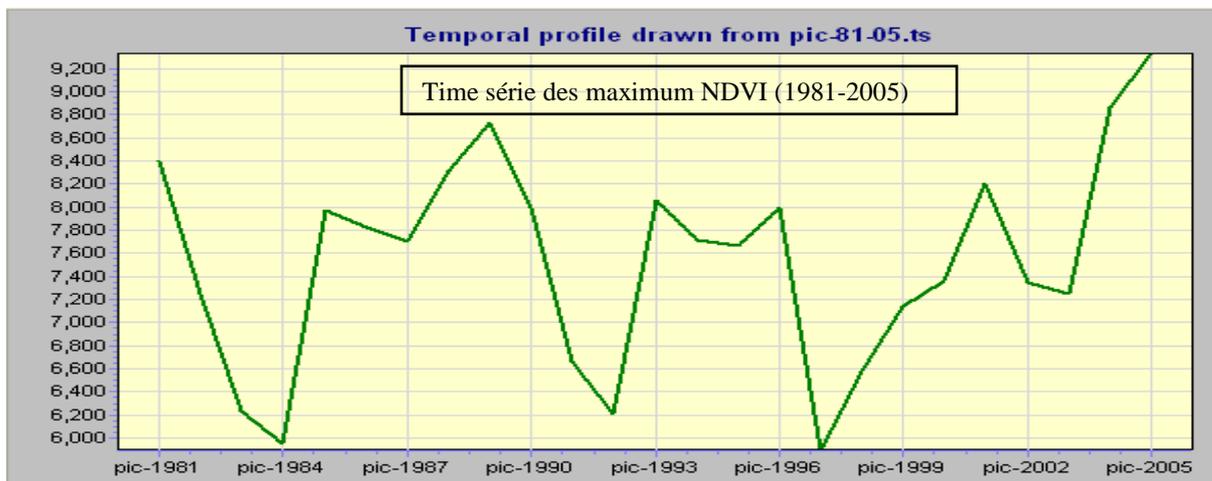


Figure 7. 20 : Évolution interannuelle du maximum NDVI au Ferlo (1981-2005) (Sarr M. A., 2008)

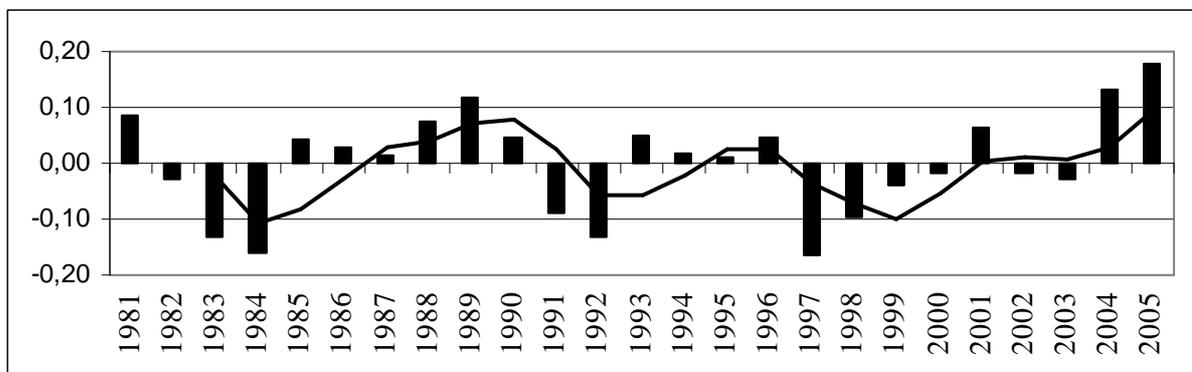


Figure 7. 21 : Écart centrés réduits de l'indice NDVI au Ferlo et courbe de la moyenne mobile lissée sur 3 ans (1981-2005) (Sarr M. A., 2008)

5.2. Un signal fort de la production végétale dans les dernières années confirmé par l'indicateur de productivité de végétation (VPI)

L'utilisation de l'indicateur de productivité de la végétation dans des séries d'images NOAA AVHRR est, à l'origine, développée par Sannier C. A. D., (1998). L'indicateur de productivité de la végétation sert avant tout à évaluer l'état global de la végétation. La méthode permet d'estimer la distribution statistique du NDVI et est sensible au type de végétation environnant. La distribution de probabilité du NDVI sur le Ferlo est calculée avec la méthodologie utilisée pour évaluer la probabilité des événements hydrologiques extrêmes. Ainsi, les données NDVI extraites de toute la série sont rangées de la plus basse à la plus forte. A partir de là, nous calculons la probabilité (P) pour avoir un NDVI inférieur ou égal à une valeur donnée en appliquant la formule définie par Weibull (1939 *in* Sannier C. A. D., 1998). Il s'agit de $P = m/n+1$ et m représente le rang et n le nombre d'années. Les résultats obtenus peuvent donner des périodes de retour (Tr) avec $Tr = 1/P$. Tr représente également le nombre d'années entre les occurrences des événements (Linsley et *al.*, 1975 *in* Sannier, 1998). Et l'application de la méthode permet d'observer les niveaux de probabilité et les temps de retour pour chaque valeur NDVI de la série (**tableau 7.3**).

Classes VPI	Niveau de Probabilité	Période de retour (années)
Très faible	$P < 0,2$	$Tr > 5$
Faible	$0,2 < P < 0,4$	$5 < Tr < 2,5$
Moyenne	$0,4 < P < 0,6$	$Tr < 2,5$
Fort	$0,6 < P < 0,8$	$5 < Tr < 2,5$
Très fort	$P > 0,8$	$Tr > 5$

Tableau 7. 3 : Les classes de VPI en rapport avec les probabilités et les périodes de retour

A l'échelle annuelle, la distribution de la probabilité de NDVI en relation avec les limites des classes de l'indicateur de productivité de la végétation fait état d'une part de fortes fluctuations interannuelles et d'autre part, d'une forte corrélation entre les valeurs NDVI annuelles et la probabilité de distribution (**figure 7.22**). L'indicateur de productivité de végétation fait ressortir la variabilité temporelle de l'état global de la végétation en

distinguant les «bonnes» des «mauvaises» années de production végétale. On remarque alors que 44 % des années ont des indicateurs au dessus de la moyenne de la série, c'est-à-dire des valeurs entre 0,6 et 0,97.

36 % des années, touchées par le déficit pluviométrique, se localisent sous la moyenne, de faible à très faible, tandis que les VPI moyens concernent 20 % des années. Les années de très fort indicateur de productivité de végétation sont représentées par les années 2004 et 2005 mais également les années 1981, 1988 et 1989. Dans la classe avec indicateur très faible, l'année 1997 se fait particulièrement remarquer avec la valeur minimale NDVI de la série.

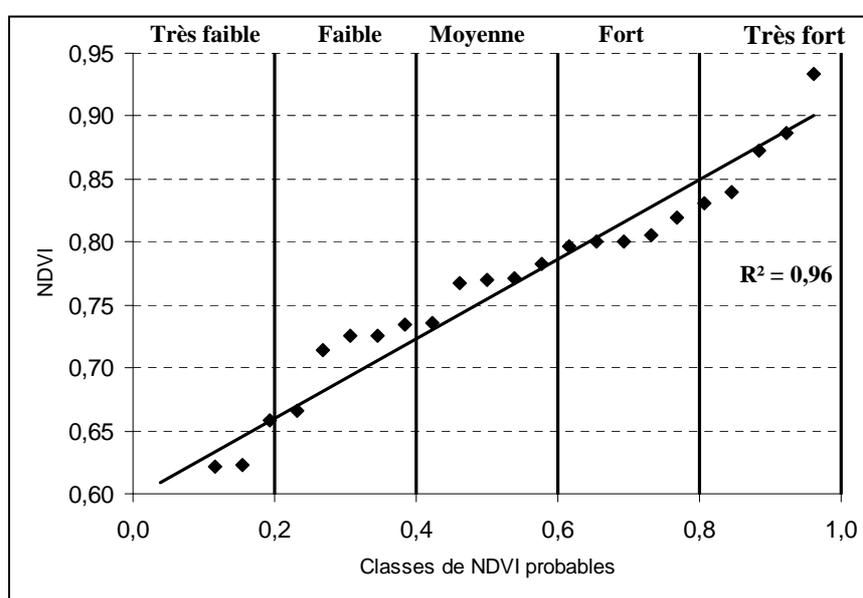


Figure 7. 22 : Détermination de la distribution de la probabilité de maximum NDVI annuels avec les limites des classes de VPI (Sarr M. A., 2008)

5.3. Caractérisation des structures permanentes et de leurs variations grâce aux résidus de l'analyse en composantes principales

Grâce aux Analyses en Composantes Principales (ACP), la stratégie adoptée dans cette partie permet de déterminer les structures permanentes de l'indice de NDVI ainsi que leurs variations dans le temps. Appliquée aux images NDVI annuelles, sur la période 1981-2005, la stratégie se fonde sur les éléments apportés par les trois premières composantes principales. Les trois premières composantes sont sélectionnées sur la base du niveau de signification de leurs variances. A partir de la troisième composante, le pourcentage de l'information sur la variance totale reste insignifiant même si les dernières composantes peuvent parfois mettre en évidence des informations utiles.

La cartographie de la première composante issue de l'analyse en composantes principales indique une fidèle représentation des structures permanentes du bassin versant du Ferlo et communes à l'ensemble des années qui composent la série (**figure 7.23**). Cette représentation des structures permanentes décrit les différentes unités paysagères évoquées d'ailleurs dans la première partie du travail à la **figure 1.9**.

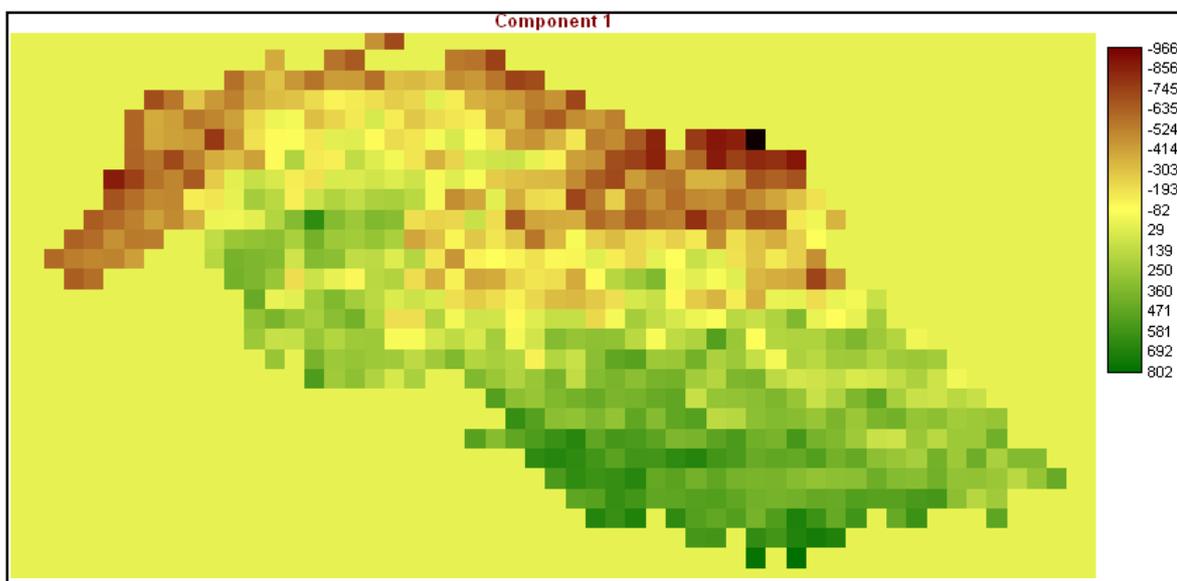


Figure 7. 23 : Cartographie des structures permanentes de la couverture végétale selon la CP1 (1981-2005) (plus la valeur est grande, plus la production est importante) (Sarr M. A., 2008)

La CP1, qui concentre 59,4 % de la variance totale est une synthèse des données en entrée. Son analyse traduit une opposition entre le domaine de la savane arbustive (en vert) et celui de la pseudo-steppe (en rouge). Il s'y ajoute des zones mixtes ou zones tampon en jaune. Ce modèle fournit par l'analyse en composantes principales permet de décrire finement l'organisation spatiale de la couverture végétale mais il ne dit rien sur ses modifications temporelles selon Naizot T., et *al.*, (2004).

Pour appréhender les variations temporelles, et c'est tout l'intérêt de notre démarche, appliquée au contexte du Ferlo, les résidus considérés comme les écarts à ce modèle de permanence de l'occupation du sol sont cartographiés et analysés.

La composante principale 2 (CP2) ne regroupe que 6 % de la variance totale. Ce pourcentage est faible pour déterminer des changements importants. Cependant, elle laisse apparaître sur la cartographie une régionalisation du degré ou du niveau de la variabilité (**figure 7.24**). On trouve des variations plus importantes dans la partie nord-ouest (représentées sur la carte par la couleur verte définissant les forts taux) que dans le reste du bassin versant du Ferlo. Cette situation pourrait s'expliquer par le fait que les terres de la

basse vallée du Ferlo sont menacées depuis longtemps par des aménagements agricoles, qui perturbent complètement les structures anciennes. Au cours des années 1990, le projet de la revitalisation des anciennes vallées fossiles a créé un engouement fort chez les agriculteurs, surtout de la basse vallée. Beaucoup d'hectares de surfaces cultivées et/ou cultivables ont remplacé la végétation naturelle. Par ailleurs, nous constatons des variations plus importantes du début des années 1980 jusqu'au début des années 1990, date à partir de laquelle, de faibles écarts interannuels sont observés (**figure 7.25**).

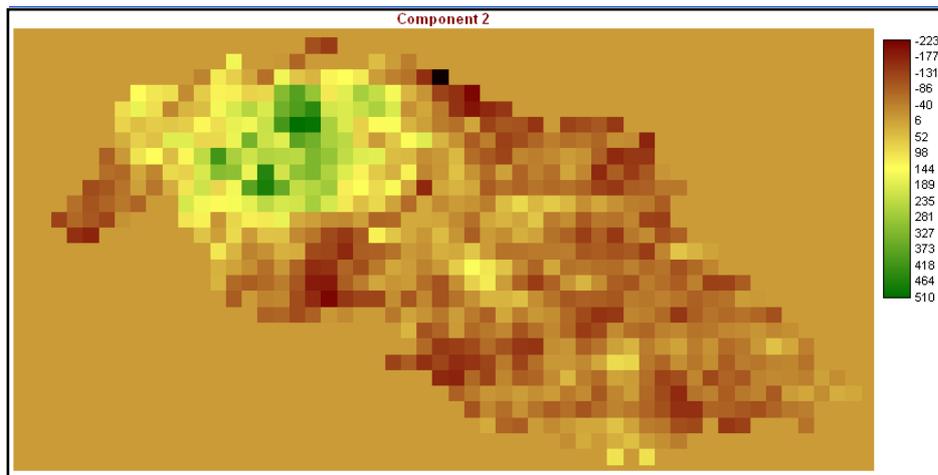


Figure 7. 24 : Représentation cartographique des variations du NDVI selon la CP2 (1981-2005) en précisant que plus on tend vers le vert, plus les variations sont importantes (Sarr M. A., 2008)

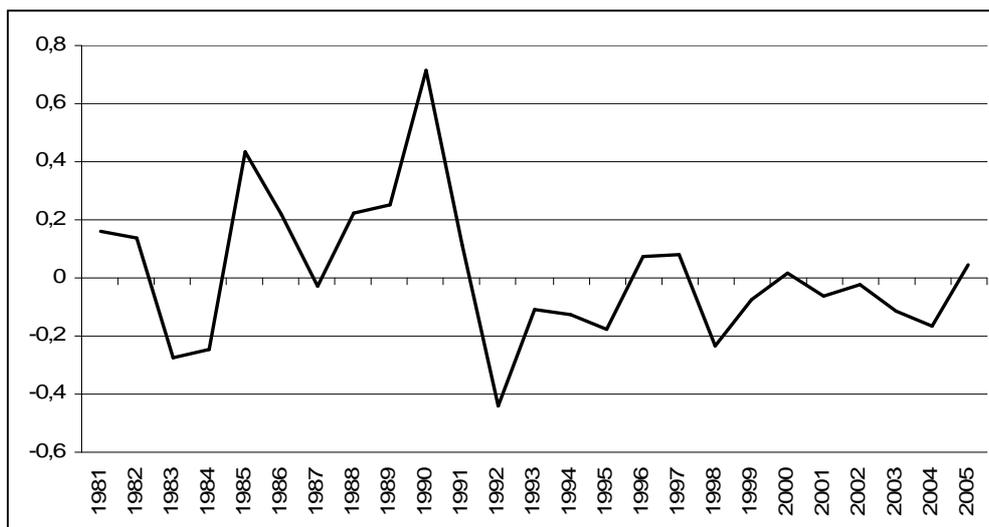


Figure 7. 25 : Variations interannuelles de NDVI sur CP2 (Sarr M. A., 2008)

La composante principale 3 (5 % de la variance totale) apporte plus de précisions sur les variations locales qui ne font que confirmer celles décrites par la CP2. Les résidus de la CP3 mettent en évidence la fragilité des structures permanentes de la production végétale de toute la partie ouest et sud-ouest correspondant aux pixels de couleur verte sur l'image (**figure 7.26**).

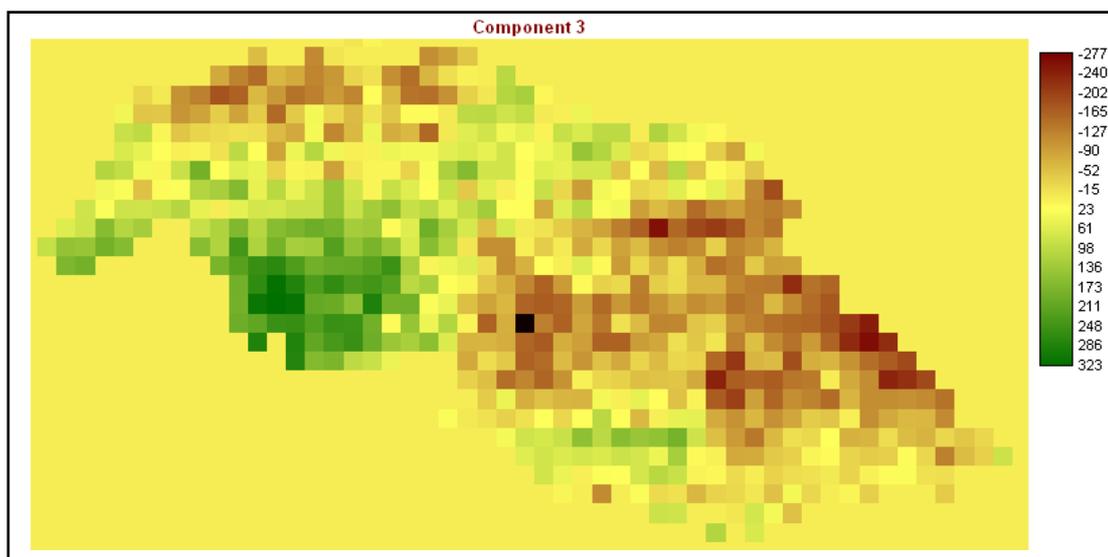


Figure 7. 26 : Représentation cartographique des variations du NDVI par la CP3 (1981-2005) (même lecture de légende que la figure 7.25) (Sarr M. A., 2008)

Selon Naizot T., et *al.* (2004), pour appréhender le fonctionnement d'un système au travers des images satellitaires, il est nécessaire de disposer d'une méthode qui permet, aux échelles de temps de l'étude, de s'affranchir des contraintes techniques liées à l'acquisition des données, de caractériser les structures permanentes et de révéler les changements de l'occupation du sol. La méthode utilisée répond à ces trois objectifs, et, en outre, elle a permis de noter deux caractéristiques fondamentales du fonctionnement du système du bassin versant du Ferlo. Il s'agit d'une part, **de la forte variabilité de la production végétale interannuelle même s'il existe une bonne organisation des structures permanentes selon un gradient sud-est nord-ouest et d'autre part, d'une réduction de cette variabilité de la production végétale annuelle à partir du début des années 2000 comparées au reste de la série (figure 7.25).**

En résumé, les analyses traduisent le schéma moyen de la couverture végétale à l'échelle du Ferlo. On observe à cet effet **une bonne organisation des structures permanentes de la végétation qui se définit par une logique de gradient « vert » du**

nord ouest au sud est dans le bassin versant du Ferlo mais sans oublier de fortes variations spatiales dans les années 1990 dues aux bouleversements environnementaux conséquences de la politique de la revitalisation des vallées fossiles.

En outre, l'évolution interannuelle et mensuelle de l'indice NDVI a montré l'existence d'une forte variabilité en mettant en évidence d'une part les années 1989, 2004 et 2005 comme années phares au niveau de la biomasse et d'autre part, le rôle déterminant que joue la production végétale enregistrée aux mois d'août et septembre dans l'évolution annuelle. Cette irrégularité s'accompagne également d'une tendance à la hausse de la production annuelle depuis le début des années 1990 qui se confirme dans les années 2000.

Dans le domaine d'étude, l'intervention de l'homme dans le milieu naturel, souvent motivé par une amélioration des conditions de son existence, crée généralement des perturbations dans l'organisation permanente de la végétation spontanée qui reste très fortement dépendante de la pluviométrie. L'évolution précise entre la pluviométrie et la production végétale se complexifie souvent, surtout dans la zone du Ferlo, de l'échelle régionale à l'échelle locale.

6. LE RAPPORT ENTRE LA PLUVIOMÉTRIE ET LA VÉGÉTATION : DE L'ÉCHELLE CONTINENTALE A L'ÉCHELLE DU FERLO

La production végétale en milieu sahélien est fortement liée à la pluviométrie (voir pages 271, 272). De nombreux travaux ont démontré la corrélation qui existe entre l'indice NDVI et les précipitations. Parmi ceux-ci, on peut noter les conclusions de Lotsch A., et *al.* (2003) et Zhang X., et *al.* (2005) à l'échelle du continent, celles de Hielkema J. U., et *al.* (1986) et Malo A. R., et Nicholson S. E., (1990) et Camberlin P., et *al.* (2006) qui relèvent une meilleure corrélation sur le Sahel que dans la bande soudanienne par exemple (Nathalie Philippon, communication orale, journées Climat-Sociétés, Nantes mars 2008). Ces conclusions sont également vérifiées par nos résultats qui mettent en évidence une corrélation positive entre le NDVI annuel et les cumuls annuels de la station de Louga (figure 7.27).

6.1. À l'échelle mensuelle

La production végétale varie d'un mois à un autre. Ce constat se traduit par une cartographie régionale de la production végétale identique à la répartition selon un gradient nord sud et nord-ouest sud-est de la pluviométrie. Rappelons que les paysages végétaux varient en fonction de la latitude, des milieux physiques et des espèces dominantes (**figure 1.9**). Dans le bassin versant du Ferlo, les paysages végétaux se structurent globalement en deux strates. On distingue une strate herbacée avec peu de ligneux (domaine de la pseudo-steppe), localisée en grande partie au nord et nord-ouest et composée principalement de graminées annuelles (*Schoenefeldia gracilis*, *Aristida adscensionis*, *Eragrostis tremula*, *Cenchrus bifloris*). On y retrouve également un pâturage aérien où prédominent les espèces ligneuses qui se densifient plus on progresse vers le sud ou le sud-est (domaine de la savane arbustive). Ces deux composantes des parcours végétaux du Ferlo influencent directement les variations saisonnières de la production végétale, obtenues par le maximum de l'indice NDVI, entre les mois de juin et décembre.

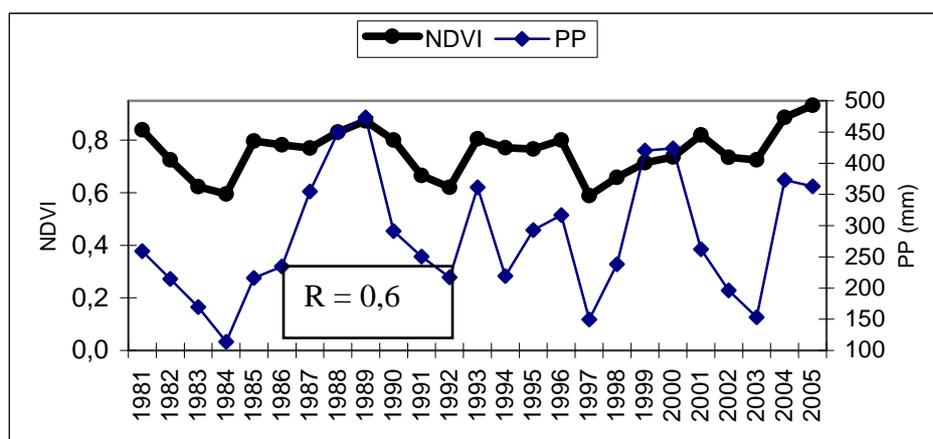


Figure 7. 27 : Les maximums NDVI et les cumuls annuels (PP) à Louga (1981-2005)
(Sarr M. A., 2008)

Le rapport direct entre la pluviométrie et la végétation se traduit d'une manière évidente sur la répartition temporelle du pic saisonnier de la production végétale. En effet, pour suivre l'évolution de la production végétale à l'échelle saisonnière, nous avons divisé la série en périodes de cinq années, pour des commodités cartographiques. Les courbes d'évolution montrent bel et bien une alternance du pic centré sur les mois d'août et de septembre (**figures 7.28⁶⁴, 7.29, 7.30, 7.31 et 7.32**) pour chaque période.

⁶⁴ Les données NDVI de juin 1981 sont manquantes dans la base de données NASA GIMMS

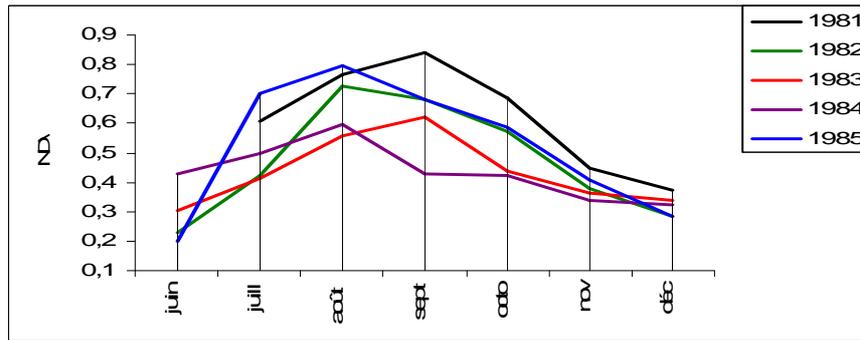


Figure 7. 28 : Évolution du pic saisonnier de la production végétale (1981-1985)
(Sarr M. A., 2008)

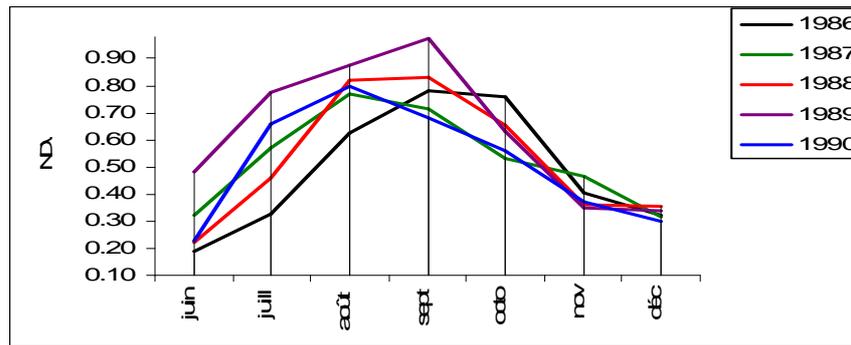


Figure 7. 29 : Évolution du pic saisonnier de la production végétale (1986-1990)
(Sarr M. A., 2008)

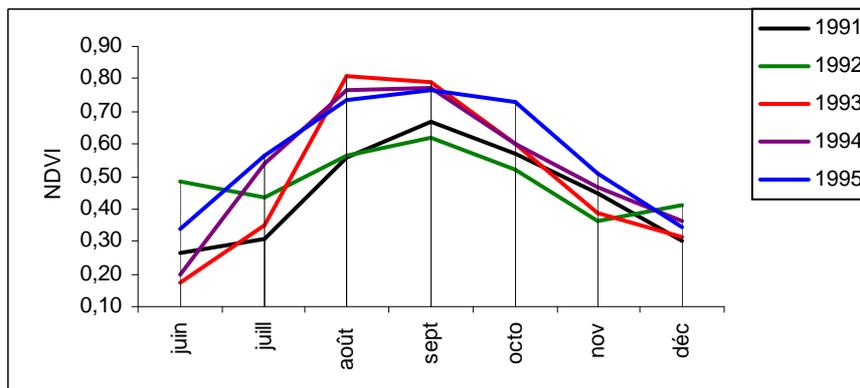


Figure 7. 30 : Évolution du pic saisonnier de la production végétale (1991-1995)
(Sarr M. A., 2008)

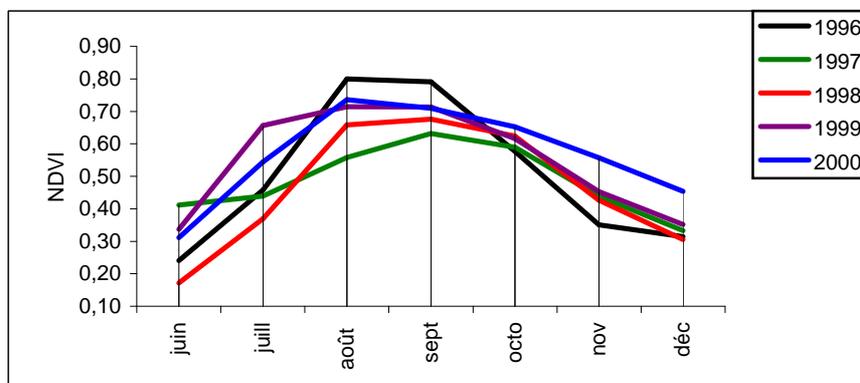


Figure 7. 31 : Évolution du pic saisonnier de la production végétale (1996-2000)
(Sarr M. A., 2008)

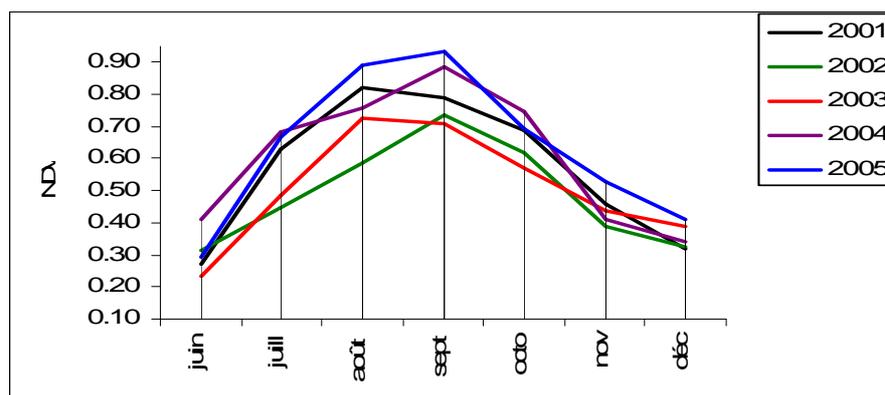


Figure 7.32 : Évolution du pic saisonnier de la production végétale (2001-2005)
(Sarr M. A., 2008)

Parallèlement, les résultats du **tableau 7.4** mettent en évidence une distribution du pic de la production végétale saisonnière en août et en septembre mais aussi la corrélation positive entre les précipitations et la production végétale. Le mois d'août est un mois très important au niveau du processus de la croissance des végétaux dans les régions sahéliennes. Le mois d'août représente le mois le plus pluvieux de l'hivernage, le mois où les fréquences des *maxima* pluviométriques ont été les plus importantes, dans cette partie du Sénégal. Septembre concentre 53 % du pic saisonnier de la production végétale comparé au mois d'août (47 %), sur les 25 années qui constituent notre échantillon de mesure. Le léger avantage du mois de septembre (taux un peu plus élevé) sur le mois d'août s'explique par les retards dans les réponses de la végétation (retard qui peut être de quelques jours ou de quelques semaines selon le type de végétation) par rapport aux précipitations d'août. C'est aussi en août que les plantes sont au stade d'épiaison ou de floraison avec des besoins maximaux en eau. Mais dans tous les cas, on peut affirmer que les mois d'août et de septembre représentent la période où la production végétale atteint sa phase optimale.

En outre, il est évident que les pluies d'août conditionnent fortement l'évolution saisonnière et annuelle du cycle végétatif, même si, rappelons-le, les pluies ne sont pas le seul facteur à prendre en compte. L'évaporation, l'évapotranspiration, le niveau des nappes phréatiques, l'insolation, la nature du substrat, sont tout autant que l'eau des pluies des déterminants significatifs dans les processus phénologiques.

Années	Valeurs minimales et maximales						
	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
1981				Max.			
1982			Max.				
1983				Max.			
1984			Max.				
1985			Max.				
1986				Max.			
1987			Max.				
1988				Max.			
1989				Max.			
1990			Max.				
1991				Max.			
1992				Max.			
1993			Max.				
1994				Max.			
1995				Max.			
1996			Max.				
1997				Max.			
1998				Max.			
1999			Max.				
2000			Max.				
2001			Max.				
2002				Max.			
2003			Max.				
2004				Max.			
2005				Max.			

Max. : maximale

*Tableau 7. 4 : Évolution interannuelle des valeurs NDVI maximales (1981-2005)
(Sarr M. A., 2008)*

6.2. A l'échelle interannuelle

Comme à l'échelle mensuelle, les variations moyennes annuelles de la production de la végétation sont aussi significatives que celles de la pluviosité. A ce propos, les années 2004 et 2005 sont enregistrées globalement pluvieuses et végétalement productives. Les années 1983, 1984 restent les années critiques tant sur le plan pluvieux (quantité d'eau reçue et nombre de jours de pluie) que sur le plan de la production végétale.

A l'échelle régionale ou générale, la relation entre la production végétale et la quantité de pluie tombée semble être plus qu'évidente. Cependant, aux échelles plus fines d'analyse, la pluie n'est pas le seul facteur d'évolution du couvert végétal. L'impact anthropique qui reste encore une fois difficilement quantifiable, doit être considéré.

L'élément majeur de la perturbation de l'écosystème du Ferlo est le pastoralisme transhumant. Ainsi, le tapis herbacé atteint sa croissance végétative optimale entre août et septembre, après les premières pluies, pour commencer à jaunir vers la fin de l'année (comprenant les mois d'octobre, novembre), puis disparaît totalement sous la pression de la dent du bétail. Les incendies fréquents dans le domaine d'étude (visibles sur les images satellites de Landsat au chapitre 8) et les travaux post-cultureux contribuent aussi à la disparition de la couverture végétale. Certaines espèces ligneuses deviennent d'ailleurs automatiquement la cible du bétail après la disparition de l'herbe. Abondant dans le même sens, Lake L. A., et *al.* (2003) affirment que «les bergers peuls n'ont alors plus d'autre solution pour affourager les troupeaux que d'émonder arbustes et arbres ou de transhumer».

Le phénomène de la transhumance est devenue moins importante du fait des politiques d'aménagement récentes sur l'ensemble de la région du Ferlo (construction de forages mécaniques, aménagement de mares temporaires, politique foncière entravant fortement la mobilité). Ces aménagements sont l'œuvre de projets tels que la politique d'hydraulique pastorale⁶⁵, le projet d'aménagement des mares⁶⁶ et le Projet d'Appui à l'Élevage⁶⁷ (PAPEL).

La valeur relative du lien systématique entre la pluie observée et l'état de la végétation imposée par l'action anthropique et ses dérivés se traduit par de faibles taux de corrélation sur quelques stations se trouvant à l'intérieur du bassin versant du Ferlo (**figures 7.33 à 7.35**). Il s'agit de Linguère, de Widou Thiengoly et de Ranérou. Les résultats obtenus sont moins significatifs que dans d'autres stations et permettent de nuancer cette relation de causalité directe à l'échelle locale et nécessitent d'envisager d'autres paramètres typiquement locaux qui seront analysés dans le chapitre suivant qui permettra de suivre et d'analyser l'évolution des paysages végétaux à partir d'images de satellites.

⁶⁵ Depuis les années 1950, le projet d'hydraulique pastorale vise à fournir aux éleveurs des ouvrages hydrauliques modernes (forages à gros débits, des puits-forage ou des puits cimentés).

⁶⁶ Le projet d'aménagement des mares du Ferlo relève de l'autorité de l'Agence de Promotion du Réseau Hydrographique National (APRHN) du Sénégal qui a pour principal objectif d'aménager et de réhabiliter le réseau hydrographique.

⁶⁷ Dans les années 1990, le Projet d'Appui à l'Élevage (PAPEL) intervient dans la zone pour organiser la gestion des ressources naturelles à l'échelle des Unités Pastorales (UP).

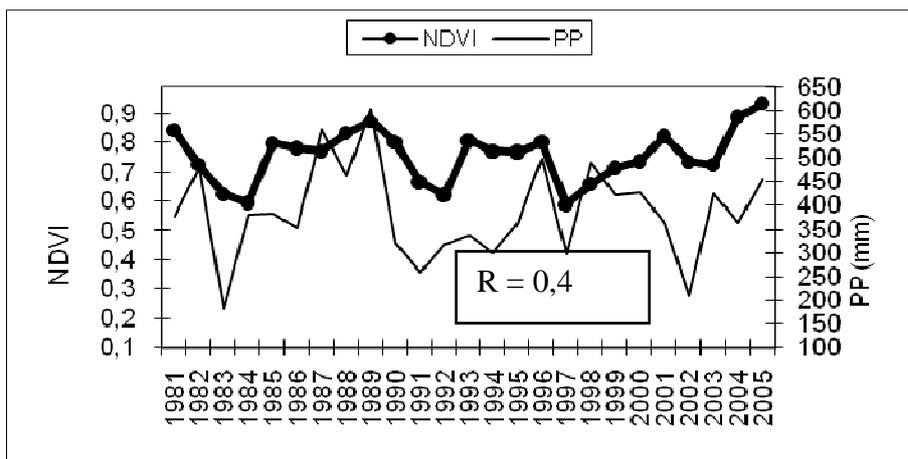


Figure 7. 33 : Les maximum NDVI et les cumuls annuels (PP) à Linguère (1981-2005)
(Sarr M. A., 2008)

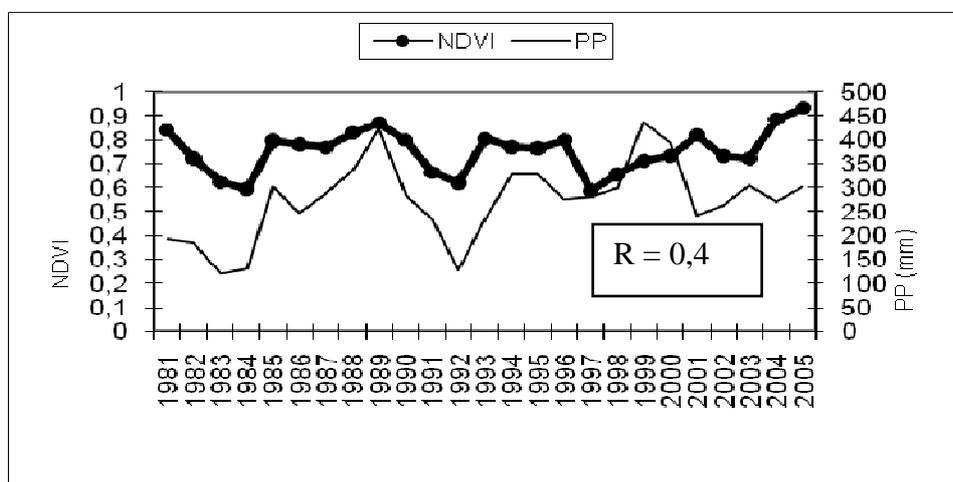


Figure 7. 34 : Les maximum NDVI et les cumuls annuels (PP) à Widou (1981-2005)
(Sarr M. A., 2008)

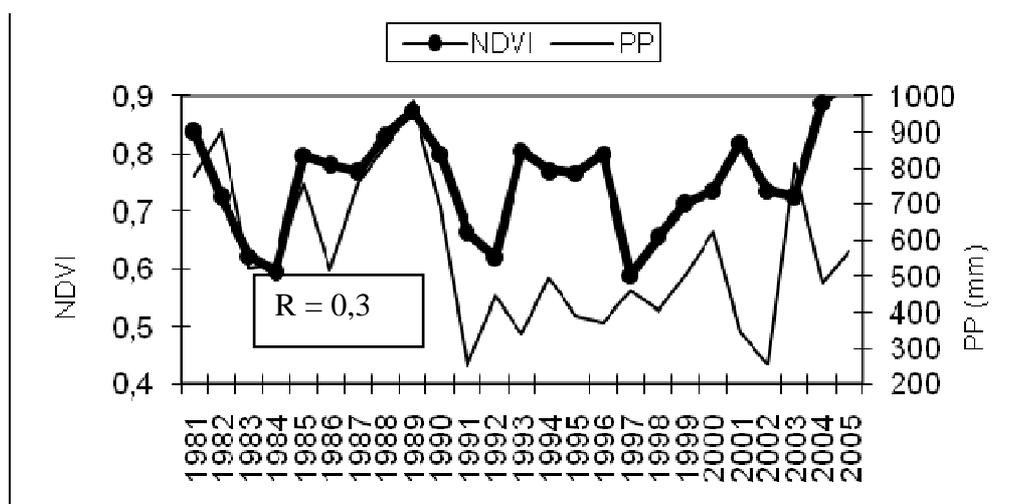


Figure 7. 35 : Les maximum NDVI et les cumuls annuels (PP) à Ranérou (1981-2005)
(Sarr M. A., 2008)

En conclusion, ces premières analyses témoignent **d'une forte variabilité mensuelle et interannuelle de la production végétale dans le domaine d'étude**. En revanche, depuis la fin des années 1980, on note **une amélioration de la production végétale annuelle qui s'inscrit dans une tendance proche de celle de la pluie traduisant un lien de causes à effets**. Hountoudji Yvon-Carmen, et *al.*, (2009), en étudiant l'évolution de la pluviométrie en rapport avec celle du NDVI maximum, sur 109 stations au Bénin, sur la période 1981-1999, affirme que **98 % des résultats obtenus pour les précipitations contre 76 % des valeurs NDVI maximum/précipitations montrent une tendance positive allant de modérée à très forte**.

Cependant, **la relation directe entre l'évolution des pluies et celle de la production végétale est à relativiser dans certains sites du domaine d'étude où l'influence des pratiques liées aux systèmes d'exploitation et d'utilisation de l'espace est loin d'être négligeable**. Ainsi, l'importance de la réduction de la mobilité pastorale favorisant le développement de la savane arbustive à arborée est mise en évidence dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 8 : UNE PROGRESSION SENSIBLE DE LA SAVANE ARBUSTIVE A ARBORÉE LIÉE À LA RÉDUCTION DE LA MOBILITÉ PASTORALE

L'occupation des sols est une variable fondamentale pour la planification régionale ainsi que pour l'étude et la compréhension de l'environnement et de ses transformations, de son évolution. L'étude de ces évolutions, devenue incontournable aux inventaires cartographiques et au suivi des phénomènes environnementaux (Ouattara T., et *al.*, 2006), est rendue de plus en plus pertinente grâce à l'amélioration des techniques et méthodes de la télédétection.

Ainsi l'analyse de la dynamique des unités composant le paysage du Ferlo devient aujourd'hui possible et surtout plus précise grâce au rapport de l'énergie solaire réfléchi par chacune des unités paysagères sur l'énergie solaire incidente. Les réponses résultantes de cette relation entre les variations de l'albédo et le comportement des différentes composantes du paysage permettent de décrire leur évolution. Deux méthodes complémentaires sont utilisées pour orienter notre démarche.

- La détection des différentes unités du terrain dépend de la capacité à distinguer les différents types de couvert à partir de leur réflectance spectrale (méthode radiométrique).

- L'approche dite géographique est aussi prise en compte. Elle est fondée sur la caractérisation des objets par leur position géographique et par des connaissances sur leurs positions spatiales relatives (Girard M. C., et *al.*, 1999). La reconnaissance des objets à partir de travaux de terrain et en relation avec des informations déjà acquises (cartes existantes) constitue une des bases de notre traitement.

1. PRINCIPES ET MÉTHODES DE TRAITEMENT ET D'IDENTIFICATION

1.1. Choix des données utilisées et des périodes étudiées

L'analyse est fondée sur l'exploitation d'images satellitaires optiques, notamment celles des capteurs TM (Thematic Mapper) et ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) de Landsat. Ce choix de données parmi d'autres à disposition (SPOT par exemple fournit des images à 10 m de résolution spatiale (résolution plus fine), Ikonos de 1 à 5 m et QuickBird de 1 à 4 m) a été déterminé essentiellement par des questions de coût. En effet, les images

Landsat ont été mises à disposition gratuitement par le Centre de Suivi Écologique du Sénégal ce qui n'était pas envisageable pour les autres dont le coût, même aux prix recherches, les rendait inaccessibles pour ce travail. Les images traitées ont la même résolution spatiale c'est-à-dire 30 m même si celles de 1990 ont été prises avec le capteur TM et celles de 2002 avec le capteur ETM+ (**tableau 8.1**). Cette résolution spatiale qui reste fine (le pixel fait 30 m sur 30 m) donne une meilleure souplesse dans le choix des échelles de sortie (plus de détails dans la cartographie). A l'échelle de l'étude proposée, la valeur représentative des résultats reste intéressante.

L'accessibilité des images dites de haute résolution comme celles de Landsat de dernière génération est encore un problème. Le bassin versant du Ferlo est couvert par plusieurs scènes (**figure 8.1**) prises à des dates différentes au cours de l'année. Suivant la date d'acquisition, certains clichés pris ne sont pas toujours appropriés pour une étude sur l'évolution des espaces végétaux. En saison sèche, on est souvent confronté d'une part à la disparition presque totale de la couverture végétale herbacée et d'autre part aux effets de feux de brousse ou à la présence d'aérosols. En saison des pluies, le plus souvent, la couverture nuageuse constitue un obstacle. Ainsi, la meilleure période pour le choix des images est réduite aux mois de novembre et décembre. Les images sélectionnées dans cette étude datent du mois de novembre.

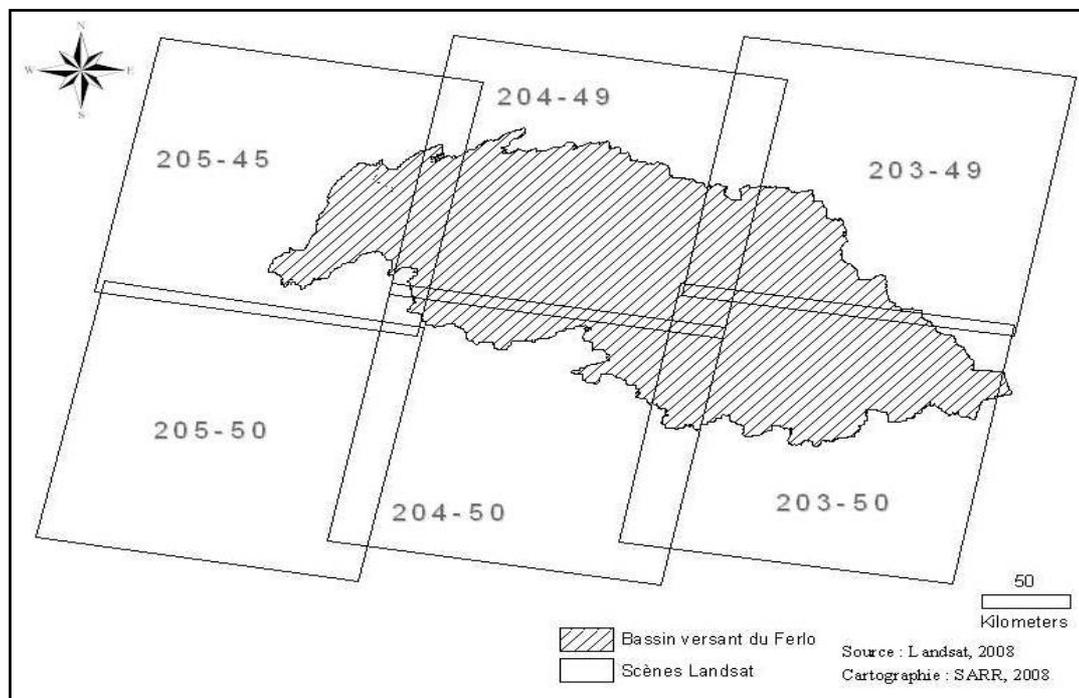


Figure 8. 1 : Localisation des scènes de Landsat sur le bassin versant du Ferlo

Le mois de novembre coïncide avec la période où la végétation verte couvre encore la région car les dernières gouttes de pluies tombent généralement au mois d'octobre dans cette partie du pays. En conséquence, les images prises au mois de novembre permettent de déterminer d'une manière significative l'évolution des espaces végétaux et d'autres types d'occupation du sol. Les deux dates retenues sont le 28 novembre 1990 pour les scènes 204-49 et 204-50 et le 5 novembre 2002 pour les mêmes scènes. Parmi la série de scènes à notre disposition, celles de 1988 figurent parmi les plus anciennes, mais restent envahies par des feux importants. La présence des feux sur les images constitue une contrainte dans une analyse diachronique car ils modifient la répartition des unités paysagères ou rendent impossible la détection précise des surfaces de l'unité paysagère occupée ; c'est pourquoi nous avons sélectionné les images de 1990. Les scènes de 2002 restent par contre les plus récentes, de qualité exploitable. Les deux dates retenues se justifient également par l'intervalle de temps qui les sépare (12 années) permettant d'apprécier les évolutions des unités paysagères. Plus la résolution temporelle est grande et plus la perception temporelle du changement est précise (Robin 2002).

En outre, l'année 1990 se situe dans les premières années où l'on observe une amélioration des précipitations. La série est donc inscrite dans la période caractérisée par une réduction des déficits maximums atteints dans les années 1970. L'année 2002 symbolise la conséquence de plusieurs années caractérisées par une amélioration des précipitations. Ainsi, à partir de ces deux dates, qui n'expriment en grande partie que les conditions végétales de l'année considérée, on peut également observer les répercussions des années antérieures.

1.2. Choix du secteur étudié

Sur le plan spatial, en dépit de la couverture complète du bassin versant par Landsat (**figure 8.1**), l'analyse est concentrée sur la seule partie centrale du bassin versant du Ferlo (**figure 8.2**), une zone que nous allons appeler par commodité «Bassin Versant Centre (BVC)» d'une superficie d'environ 2115 km².

Le choix porté sur ce secteur a été déterminé par plusieurs contraintes, notamment les dates de couverture d'images communes et le respect de la mosaïque. Il se trouve que, parmi la série d'images qui était à notre disposition, seules celles de novembre 1990 et de 2002 appartiennent aux mêmes scènes 204-49 et 204-50. Les régions ouest et est du bassin versant du Ferlo ne sont pas analysées en raison de l'absence des scènes prises aux mêmes

dates que celles couvrant le BVC. Ce fait contraignant nous oblige à exclure les extrêmes est et ouest (qui sont pourtant tout aussi intéressants à analyser que le BVC), et à ne considérer que la zone couverte par les clichés 204-49 et 204-50. Cependant, le bassin versant centre regroupe les unités paysagères essentielles et caractéristiques de tout le bassin versant du Ferlo.

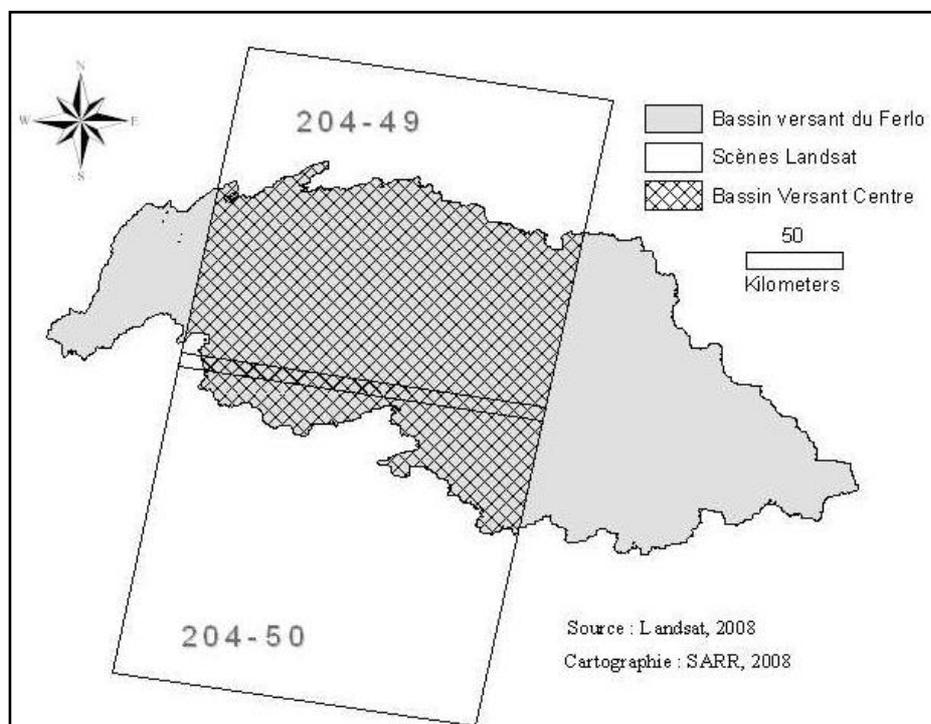


Figure 8. 2 : La zone d'étude ou Bassin Versant Centre (BVC)

1.3. Contribution des données de terrain

La zone du bassin versant du Ferlo est composée de paysages aux caractéristiques différentes que nous avons eu la chance de découvrir, après y avoir passé plusieurs séjours. Ces différents séjours dans la ville de Linguère ont permis de parcourir de multiples fois ce vaste domaine et de prendre conscience de la richesse potentielle spécifique du Ferlo.

Dans le cadre de ces séjours qui ont permis de s'imprégner des réalités du terrain, deux missions effectuées ont notamment servi à la prospection de l'espace géographique. Les périodes d'observation sont les suivantes : au mois de novembre 2004 dans les départements de Linguère et de Louga ; au cours du mois de février 2007, avec une mission du CSE dans les départements de Louga, Linguère, Podor et Ranérou.

Au total, les sorties sur le terrain et les travaux de laboratoire ont permis une identification, sur le plan physiognomique, physiologique et spectral des diverses unités paysagères caractéristiques des principaux éléments constitutifs des milieux sahéliens.

Effectuer une analyse des espaces végétaux et des autres systèmes d'occupation du sol nécessite la conjugaison de données de base (**tableau 8.1**) provenant de différentes sources (données statistiques générales, cartes topographiques, différentes cartes thématiques d'occupation du sol), des travaux de terrain et du traitement analogique et numérique d'images. Des classifications à partir de diverses compositions colorées (ces opérations sont détaillées dans la partie «production des cartes d'occupation des sols») sont exécutées afin de déterminer et de produire des cartes d'occupation du sol et une carte mettant en évidence les changements d'occupation du sol.

Supports	Zone couverte	Feuilles ou scènes	Echelles ou Résolution spatiale	Sources	Projection utilisée	Dates
Carte topographique	Sénégal		1/200 000	IGN France	UTM WGS 84	2000
Cartes d'occupation du sol	Régions : Louga Matam	205-49/50 204-49/50 203-49/50	Choix de définition	CSE	UTM WGS 84	1999
Carte morpho-pédologique	Sénégal	Landsat MSS (1972-1981)	1/500 000	USAID	UTM WGS 84	1985
Images satellites	centre du bassin versant	204-49	30 m	CSE	UTM WGS 84	1990 et 2002
		204-50	30 m	CSE	UTM WGS 84	1990 et 2002

Tableau 8. 1 : Les sources utilisées. Source : CSE

Pour arriver à la production de ces résultats (cartes d'occupation du sol et carte de changements), des outils sont choisis. Le choix des outils se fonde surtout sur l'objectif final c'est-à-dire la mise en évidence de changements sur les plans cartographique et statistique mais aussi sur la maîtrise des outils sélectionnés. Les différentes étapes de traitement numérique des données (développées à la suite des outils) ont également été influencées par les outils.

1.4.. Les outils sollicités

Durant toute cette étude, les logiciels suivants ont été utilisés :

- Le logiciel de traitement d'images ENVI 4.4 pour les corrections géométriques des images
- Les logiciels IDRISI ANDES et ENVI 4.4 pour les compositions colorées et les classifications non dirigées qui constituent une aide à l'interprétation visuelle à l'écran
- Le logiciel SIG ARCGIS 9.2 pour la numérisation et la création des cartes d'occupation du sol et de la carte des changements.

1.5. Le traitement numérique des données satellitaires

L'analyse des images satellitaires est construite en sept étapes, depuis le choix des images jusqu'à l'interprétation (**figure 8.3**). Cependant, pour mieux saisir la cohérence de ces étapes de traitement, l'explication en est faite selon un regroupement en deux thèmes : l'assemblage des scènes et la correction géométrique (acquisition des images, géoréférencement, mosaïque) et ensuite la production de cartes (compositions colorées, classification, détermination des couches, digitalisation et codification des couches et production de cartes-statistiques).

1.5.1. Assemblage des scènes et correction géométrique

Après le travail d'acquisition des données, la technique de la mosaïque a été utilisée pour l'assemblage de la scène 204-49 à celle de 204-50 afin de couvrir totalement le Bassin Versant Centre (**figure 8.2**). Elle consiste à choisir une série de points fixes et facilement identifiables⁶⁸ dans la zone et d'arriver à en dégager un nombre optimal⁶⁹ pour le calage. Du coup, l'image ETM+ de 2002 reçue en format GEOTIFF a été prise comme l'image de référence pour corriger géométriquement l'image de 1990. Ces images ont été également ramenées au même système de projection. La correction géométrique a permis

⁶⁸ Il est souvent recommandé d'aller chercher des repères au niveau des structures relativement durables et géographiquement fixes. Dans notre cas, se sont les plans de cours d'eau, les pistes dégagées, les habitations, les champs qui nous ont servi de points d'encrage.

⁶⁹ Les points doivent être répartis spatialement et en nombre suffisant de sorte que toute la surface soit couverte pour pouvoir respecter les marges d'erreur qui sont relatives à chaque logiciel de traitement d'images.

de doter les images d'un système de coordonnées compatible avec toute la base de données de terrain. Elles ont été projetées dans le système UTM et sur l'ellipsoïde WGS 84 pour faire efficacement des superpositions de couches d'informations.

En vue de l'analyse diachronique, il est nécessaire de rendre comparable l'apparence sur écran des zones invariantes des images Landsat de 1990 et 2002. Nous n'avons pas eu recours ici à des corrections atmosphériques, difficiles à mettre en œuvre en l'absence de données sur l'état de l'atmosphère et sa variabilité spatiale aux deux dates considérées. En revanche, une approche empirique a été utilisée : la technique de rehaussement global des images appliquée par défaut dans le logiciel ENVI consiste en effet à effectuer une dilatation d'histogramme, en sélectionnant deux valeurs de seuil S_{min} et S_{max} , qui seront respectivement affectées aux valeurs 0 et 255 lors de l'affichage des images sur écran. Les valeurs S_{min} et S_{max} sont calculées automatiquement à partir de l'histogramme cumulé des comptes numériques dans l'image, en considérant les fréquences cumulées de 2 % des pixels (S_{min}) et 98 % des pixels (S_{max}). Cette technique s'avère efficace pour une analyse visuelle comparative des deux images ; pour une comparaison des valeurs de luminance entre les deux dates, il permet d'identifier des zones invariantes, et de recourir aux techniques de spécification d'histogramme, voire à des transformations radiométriques basées sur les réponses spectrales de ces invariants (Caloz R., et Collet C., 2001).

1.5.2. Production des cartes d'occupation du sol

La technique de la composition colorée, qui reste une étape primordiale dans le processus de la photo-interprétation, a été utilisée pour obtenir la meilleure visualisation des objets de l'image (eau, surfaces cultivées, végétation). Rappelons que les «fausses couleurs» observées sont obtenues par combinaison des informations de trois bandes différentes. Les capteurs TM et ETM+ disposent de sept bandes spectrales, allant du visible à l'infrarouge thermique (**tableau 8.2**). Ce nombre important de bandes permet d'essayer de multiples combinaisons de trois bandes pour obtenir des synthèses en couleurs additives mettant en évidence les différents thèmes. Dans le cadre de notre travail dont l'objectif principal est d'analyser les espaces végétaux, nous avons utilisé plusieurs combinaisons avec les bandes 2, 3, 4, 5 et 7. Par exemple, la combinaison des bandes 3-4-5, affichées respectivement en rouge, vert et bleu, fortement conseillée par les ouvrages spécialisés de télédétection, (Girard M. C., et *al.*, 1999) pour l'étude des couverts végétaux,

nous a permis d'identifier deux grands types de végétation dans le Bassin Versant Centre (**figure 8.4**). Ces bandes 3-4-5 sont sensibles à l'activité chlorophyllienne des plantes. La combinaison 3-4-5 facilite l'identification de l'eau qui apparaît en noir sur la composition colorée. La végétation, en fonction de sa densification, est colorée de vert clair à vert sombre (savane) ou de vieux rose (pseudo-steppe arbustive). La composition colorée 3-4-5 permet également une bonne séparation des eaux temporaires vis à vis des autres systèmes d'occupation du sol, et une bonne discrimination entre les végétaux, les zones inondables et les surfaces cultivées, principaux systèmes d'occupation du sol du Bassin Versant Centre (**figure 8.4**). Cependant, quelques limites s'imposent à la délimitation précise des différents espaces végétaux (Major D. J., et *al.*, 1990).

La technique de la classification non dirigée a été utilisée dans le but d'avoir une vue d'ensemble sur la distribution spatiale des unités d'occupation du sol. Les images générées par la classification non dirigée ont servi de documents de validation pour confirmer les observations faites sur les compositions colorées. Malgré le manque d'homogénéité⁷⁰ remarqué principalement à l'intérieur de la savane arbustive ou de la pseudo-steppe arbustive qui ne facilite pas le zonage visuel des images, la procédure de délimitation sur écran des unités d'occupation du sol a été rendue possible grâce aux différents travaux de terrain et à la consultation de documents disponibles (cités dans le **tableau 8.1**).

Satellite	Capteur	Bandes spectrales (µm)	Résolution spatiale	Largeur du champ global d'observation
LANDSAT	TM	B1 : 0,45 à 0,52 B2 : 0,52 à 0,60 B3 : 0,63 à 0,69 B4 : 0,76 à 0,90 B5 : 1,55 à 1,75 B6 : 10,4 à 12,5 B7 : 2,08 à 2,35	30 m <i>Id.</i> <i>Id.</i> <i>Id.</i> <i>Id.</i> 120 m 30 m	185 km
	ETM+ (TM et 2 améliorations)	B6 : 10,4 à 12,5 Panchromatique : 0,50 à 0,90	60 m 15m	185 km

Tableau 8. 2 : Synthèse des caractéristiques du capteur LANDSAT

⁷⁰ Le manque d'homogénéité est lié aux nuances dans la couverture végétale que l'on peut observer à l'intérieur de la pseudo-steppe ou à l'intérieur de la savane.

La numérisation des contours des unités d'occupation du sol identifiées sur le terrain et regroupées selon des catégories prédéfinies, a généré des données vectorielles qui ont été vérifiées et validées sur le terrain lors de nos missions en collaboration avec le Centre de Suivi Ecologique.

Pour passer à une analyse simplifiée de l'évolution de l'occupation du sol, nous avons identifié les types suivants, classés selon le modèle de la classification de l'occupation du sol LCCS⁷¹ utilisé par la FAO (Di Gregorio et Jansen, 2000) ; zones inondables, eau temporaire, surfaces cultivées, pseudo-steppe arbustive, savane arbustive à arborée et zones brûlées. Il convient de préciser que toutes les zones brûlées se situent dans les zones de savane arbustive à arborée ; par conséquent, lors de l'étude quantitative des changements, leurs superficies ont été octroyées à cette dernière classe.

⁷¹ Le LCCS (Land Cover Classification System) est un système de classification typologique développé par Di Gregorio et Jansen en 2000, à ne pas confondre avec un système de classification d'images. Les systèmes de classification typologique servent à attribuer de manière systématique un nom à un type d'occupation du sol.

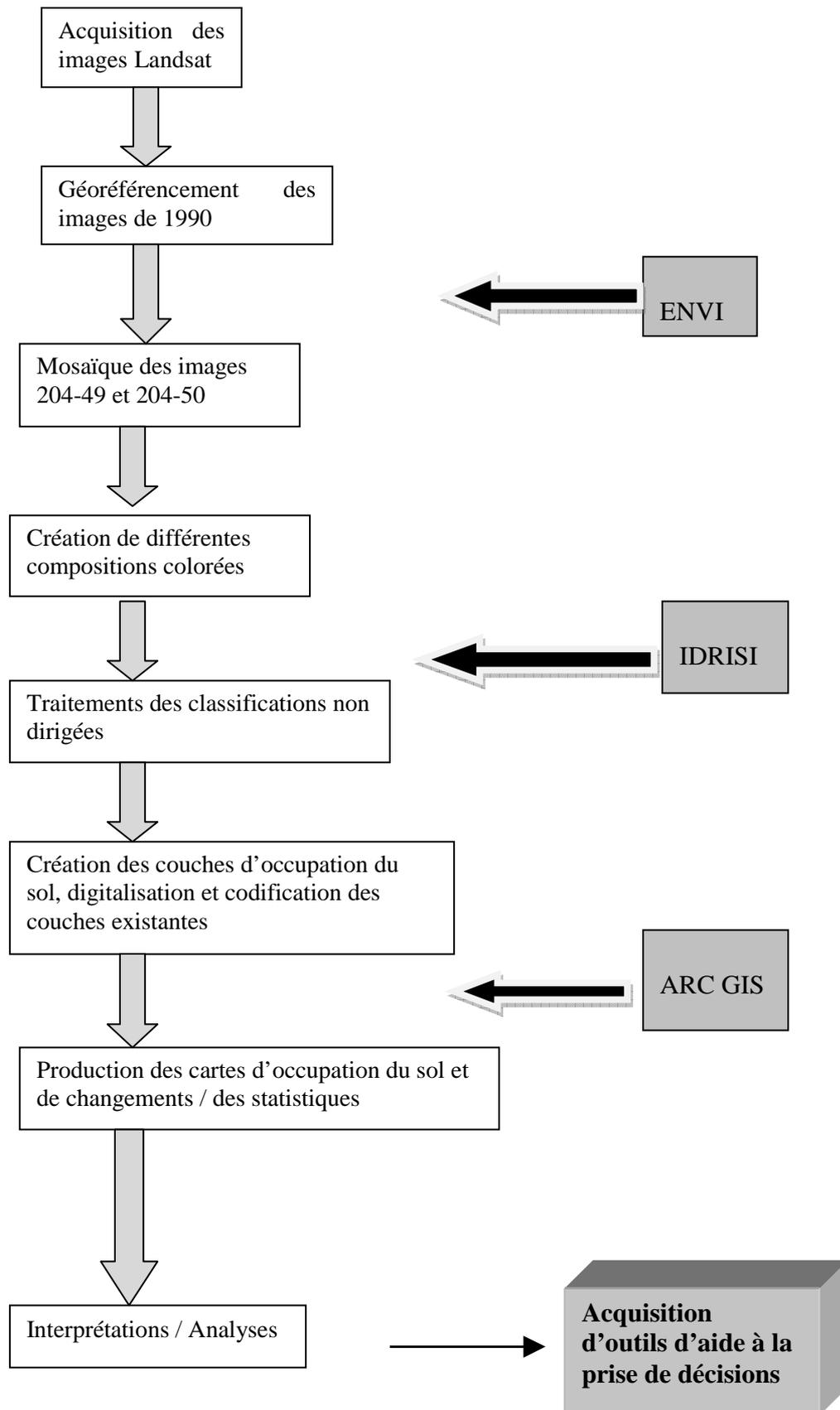


Figure 8. 3 : Étapes essentielles du traitement des images

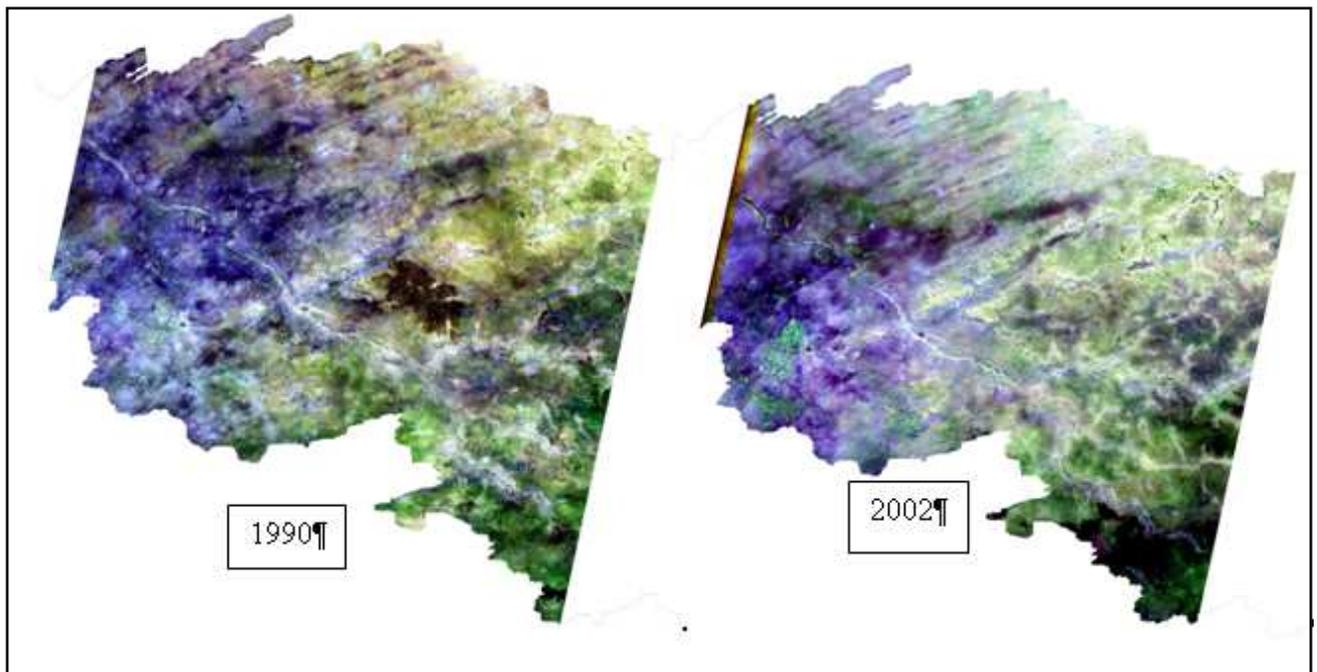


Figure 8. 4 : Compositions colorées des bandes 3-4-5 des images 1990 et 2002
(Sarr M. A., 2008)

2. IMAGES DES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE LA COUVERTURE VÉGÉTALE DU DOMAINE D'ÉTUDE

Dans cette partie du Ferlo, la pseudo-steppe arbustive, très ouverte, est formée sur des ensembles dunaires pour lesquels on peut isoler quatre grandes unités topographiques. Il s'agit des hauts de dunes, des pentes, des bas de pentes et des replats, avec pour chacune de ces unités une végétation éparse (Nizinski J., et *al.*, 1992). La pseudo-steppe arbustive compte aussi une composante ligneuse dominée par des arbustes dont la hauteur est comprise entre 2 et 5 mètres (**photos 8.1 A et B**).

Sur la partie Est, on note une végétation «forestière» de type savane arbustive à arborée, relativement plus dense que les formations à l'Ouest (**photos 8.2 A et B**). La partie plus au sud de la zone, se compose essentiellement de la savane boisée avec des espèces soudano-sahéliennes comme *Pterocarpus lucens*, *Acacia seyal* (**photos 8.3 A et B**). La savane arbustive à arborée est généralement caractérisée par une strate herbacée qui forme un tapis presque continu en fin de saison des pluies.



Photo 8. 1 : La végétation de type pseudo-steppe arbustive sur l'axe Mbeuleukhé-Widou (Clichés Sarr M. A., 02-02-2007)



Photo 8. 2 : La végétation de type savane arbustive à arborée sur fond de vallée ou dans la zone inondable sur l'axe Linguère-Barkédji (Clichés Sarr M. A., 02-02-2007)



Photo 8. 3 : La savane arbustive au sud est de Barkédji (Clichés Sarr M. A., 02-02-2007)

3. ENTRE MODIFICATIONS ET CONVERSIONS DES SYSTÈMES

L'étude de l'évolution de l'occupation du sol est fondée sur l'analyse de la carte de 1990 et de celle de 2002. Le croisement des informations ou la superposition de ces deux cartes d'occupation du sol du Bassin Versant Centre de 1990 et de 2002 permettra de constituer une carte des changements et une matrice qui traduiront l'évolution des différentes classes entre ces deux périodes.

Pour apprécier et cerner les types d'évolution, trois critères ont été retenus dans cette étude. Il s'agit des «**modifications**» et des «**conversions**» de ces unités qui s'opposent aux situations dites «sans changement». Par «**modification**» il faut comprendre les changements intervenus à l'intérieur d'une même catégorie d'occupation du sol, par exemple le passage d'une savane arbustive à une pseudo-steppe arbustive ou vice versa. La «**conversion**» est définie comme le passage d'une catégorie de paysage à une autre ; par exemple zones inondables devenues surfaces cultivées. Les termes «**sans changement**» qualifient les classes qui n'ont pas connu de transformations de classe entre les deux dates de l'étude, c'est-à-dire n'ayant été affectées ni par les modifications, ni par les conversions.

3.1. Prédominance de la végétation naturelle en 1990

En 1990, l'occupation du sol est dominée par les zones de végétation naturelle ou spontanée à savoir la pseudo-steppe arbustive et la savane arbustive à arborée (**figure 8.5 et tableau 8.3**). Au total, les thèmes se répartissent ainsi :

- Les zones inondables couvrent une superficie de 52349,5 hectares, soit 2,37 % de la superficie du Bassin Versant Centre.
- L'eau temporaire occupe 2031,2 hectares de terrain soit environ 0,092 % de la région d'étude.
- Les surfaces cultivées s'étalent sur 121494,5 hectares soit 5,49 % de la région d'étude.
- La pseudo-steppe arbustive couvre toujours la plus grande partie de la région soit 63,37 %.
- La savane arbustive à arborée s'étend sur une superficie de 67 9495,2 hectares soit 30,73 % de la superficie totale.

- Les zones brûlées couvrent en septembre 1990 une superficie de 48 329,5 hectares soit environ 2,19 % de la surface totale.

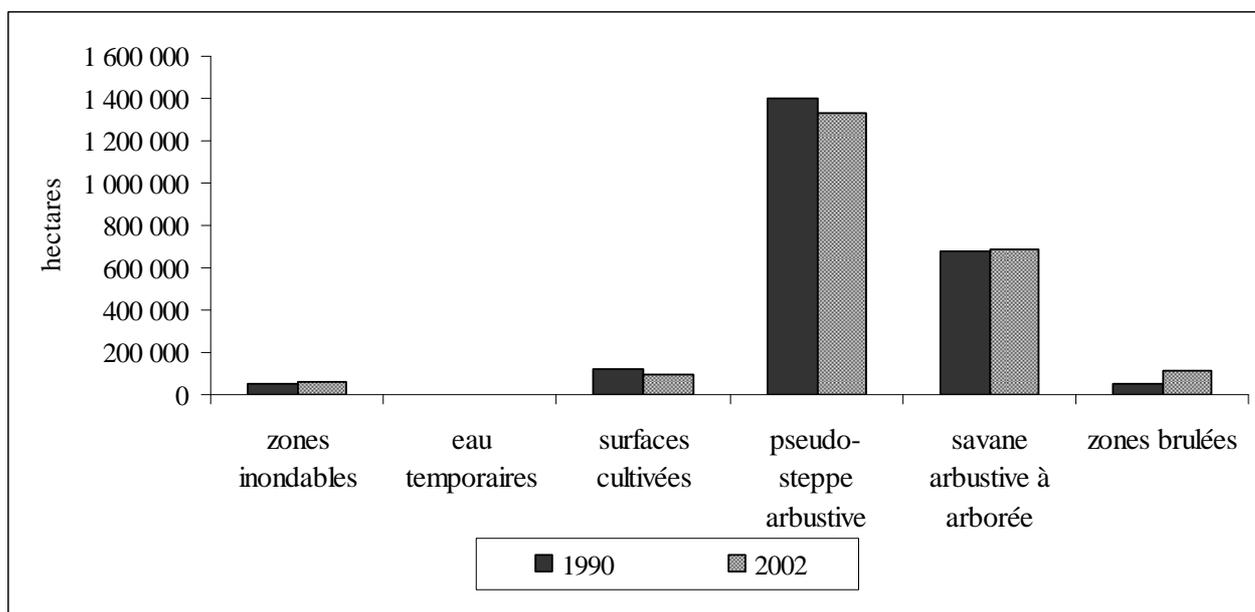


Figure 8. 5 : Répartition des différents types d'occupation du milieu en 1990 et en 2002 (Sarr M. A., 2008)

3.2. Un milieu encore sauvage mais menacé par davantage de feux en 2002

L'état de l'occupation du sol en 2002 montre relativement la même distribution que celle de 1990, c'est-à-dire une prédominance de la pseudo-steppe arbustive et de la savane arbustive à arborée (**figure 8.5** et **tableau 8.3**).

- Les zones inondables couvrent une superficie de 59 682,9 hectares soit environ 2,7% de la superficie totale.
- L'eau temporaire s'étend sur 1863,8 hectares de superficie estimée à 0,084 % du territoire total.
- Les surfaces cultivées s'étalent sur une superficie de 97 907,9 hectares représentant 4,43 % du Bassin Versant Centre.
- La pseudo-steppe arbustive domine la répartition avec 1 334 445,2 hectares soit environ 60,34 % de la superficie totale.
- La savane arbustive à arborée s'étend sur 683 672,1 hectares soit 30,91 % de la totalité.

- Les zones brûlées ont plus que doublé et couvrent une superficie égale à 117 077,9 hectares soit un pourcentage de 5,29 % par rapport à la superficie totale.

On note aussi la prédominance de la végétation spontanée (pseudo-steppe arbustive et savane arbustive à arborée) au détriment des autres systèmes dans la distribution des systèmes d'occupation et d'utilisation du sol en 1990 mais aussi en 2002 (**tableau 8.3**). Ce constat traduit parfaitement le caractère pastoral de la zone concernée comme pour toute la zone sylvo-pastorale d'ailleurs. C'est le domaine des grands pastoraux où peu d'habitations existent encore. Parmi le reste des unités, les eaux temporaires provenant du Lac de Guiers et les zones inondables sont les moins étendues sur l'ensemble du Bassin Versant Centre. Au niveau spatial, les unités d'occupation et d'utilisation du sol, regroupées autour des zones inondables, eau temporaire, surfaces cultivées, pseudo-steppe arbustive, savane arbustive et arborée et zones de feux, se répartissent clairement au niveau du terrain même si certaines limites entre elles prêtent à confusion (**figures 8.6 et 8.7**).

CLASSES	Superficie (ha)		% (BVC)	
	1990	2002	1990	2002
zones inondables	52 349,5	59 682,9	2,37	2,70
eau temporaire	2 031,2	1 863,8	0,092	0,084
surfaces cultivées	121 494,5	97 907,9	5,49	4,43
steppe arbustive	1 401 399,1	1 334 445,2	63,37	60,34
savane arbustive à arborée	679 495,2	683 672,1	30,73	30,91
zones brûlées	48 329,5	117 077,9	2,19	5,29

*Tableau 8. 3 : Caractéristiques de l'occupation du sol en 1990 et en 2002
(Sarr M. A., 2008)*

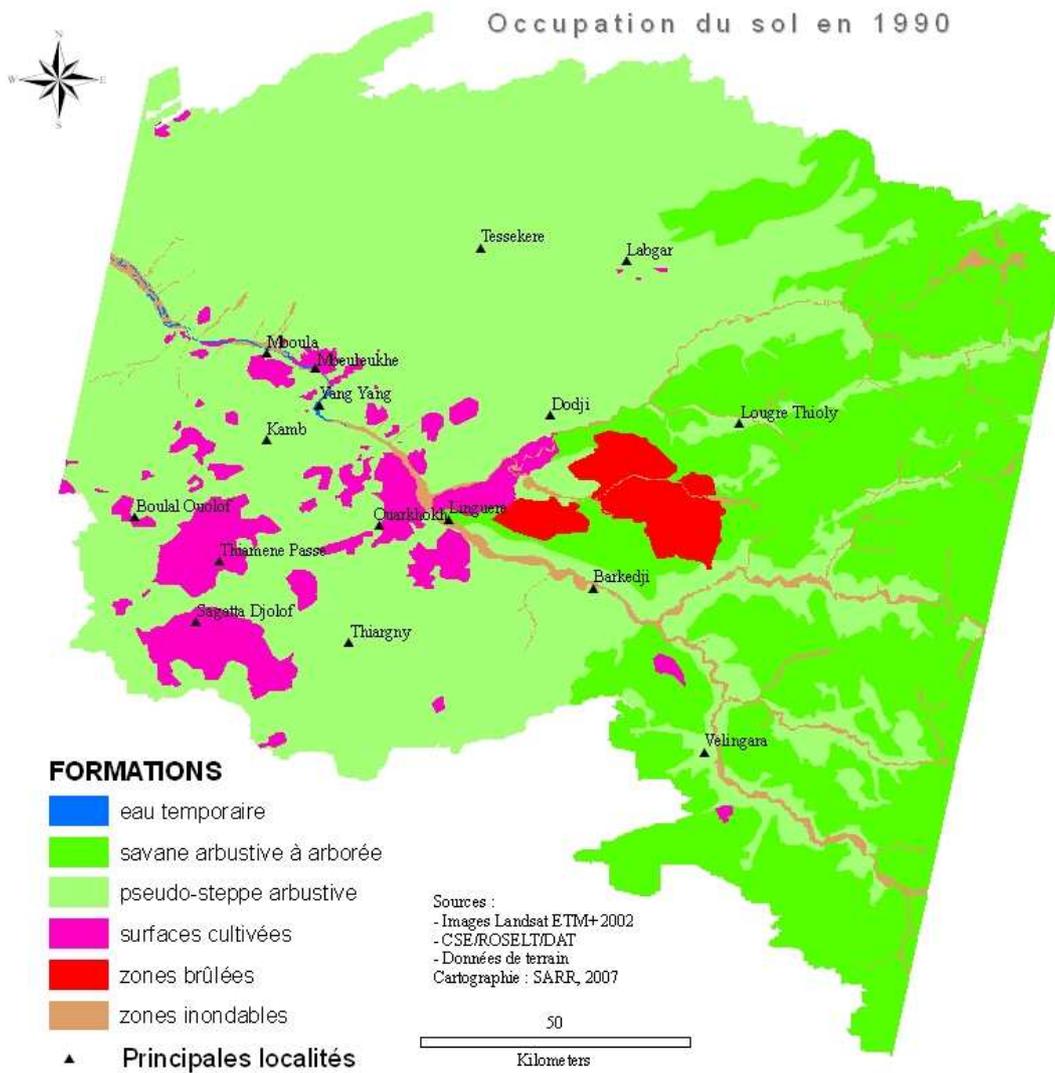


Figure 8. 6 : Carte d'occupation du sol en 1990

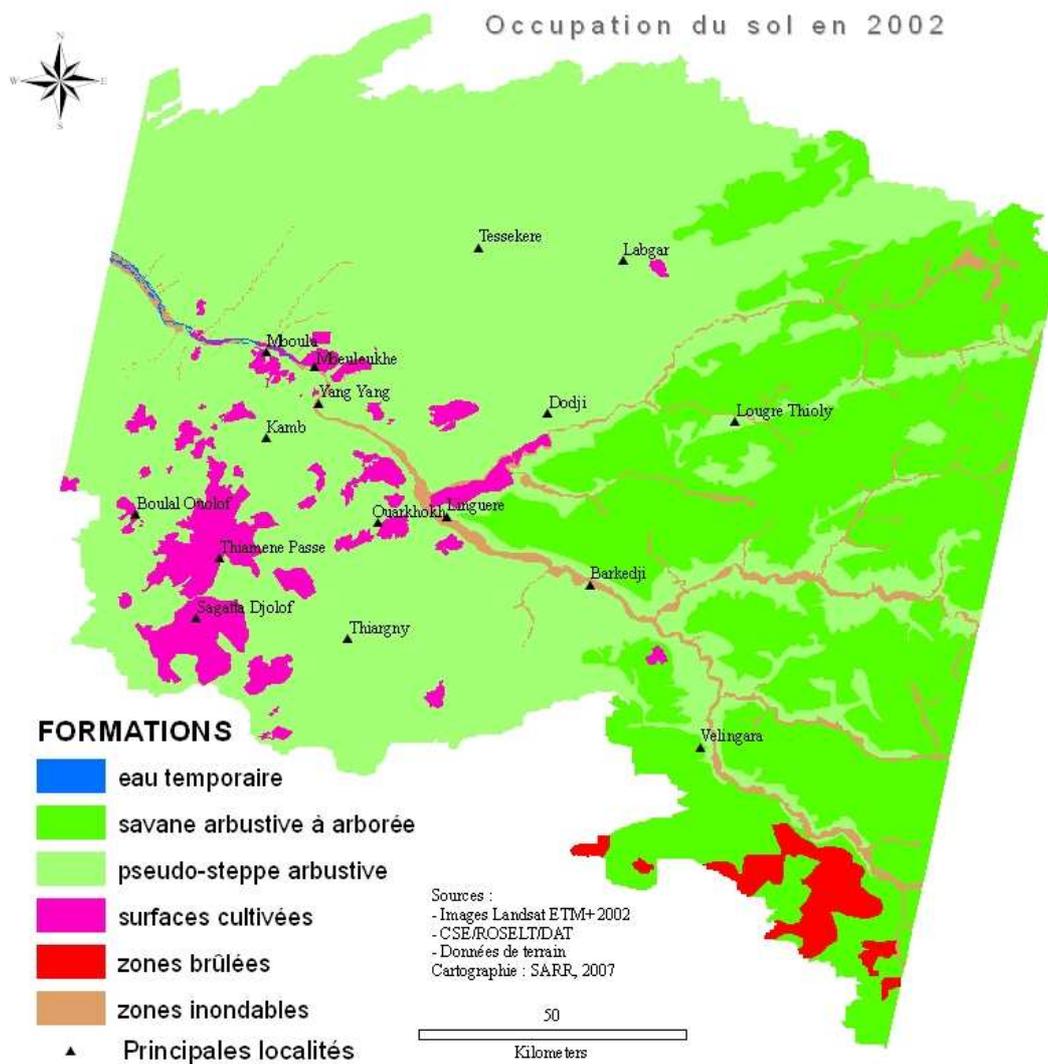


Figure 8.7 : Carte d'occupation du sol en 2002

4. CROISSANCE DES SURFACES DE SAVANE ARBUSTIVE A ARBORÉE ET RÉDUCTION DES SUPERFICIES DE LA PSEUDO-STEPPE ARBUSTIVE

La matrice des changements générée par le croisement des cartes d'occupation du sol de 1990 et de 2002 de la zone du Bassin Versant Centre (BVC) du Ferlo montre une évolution faible des différentes unités d'occupation du sol (Sarr, 2009). 85,8 % de la zone n'a pas subi de changements, ce qui correspond à une superficie de 1 897 231,02 ha sur une surface totale de 2 211 493,6 ha (**figure 8.8**). 225 030,9 ha soit environ 10,2 % de la superficie a connu des modifications mais également 89 231 ha soit 4,04 % des conversions (**tableau 8.4**).

Les changements ont le plus affecté les surfaces cultivées en terme de conversion, et ensuite la pseudo-steppe arbustive et la savane arbustive à arborée en terme de modifications. L'eau temporaire a été l'unité d'occupation de l'espace la moins perturbée entre 1990 et 2002 (**figure 8.7**). A ce propos, selon Robin M., (2002), chaque entité géographique (parcelle de culture, forêt, ville, plage de sable, etc.) évolue de manière variable et indépendamment des autres.

Période	Superficies sans changements		Superficies modifiées		Superficies converties		TOTAL (ha) BVC
	(ha)	% (BVC)	(ha)	% (BVC)	(ha)	% (BVC)	
1990 - 2002	1 897 231,02	85,8	225 030,9	10,2	89 231	4,04	2 211 493,6

Tableau 8. 4 : Répartition des changements entre 1990 et 2002

4.1. Les modifications dans la végétation spontanée entre 1990 et 2002

Dans la végétation spontanée, le passage de la pseudo-steppe arbustive à la savane arbustive à arborée, mais également des changements de type inverse représentent des superficies relativement limitées (**figure 8.8**). 70 660 hectares soit 3,2 % du BVC passent de la savane arbustive à arborée à la pseudo-steppe arbustive. Cette transition est observée le plus fréquemment au nord-est et au sud de la carte où des zones se dégradent. A l'inverse, dans la plus part des secteurs à l'est du BVC, précisément tout le long de plusieurs zones inondées, on enregistre une densification de la végétation. 76 628 hectares soit 3,5 % du BVC passent de la pseudo-steppe arbustive à la savane arbustive à arborée (Sarr M. A., 2009).

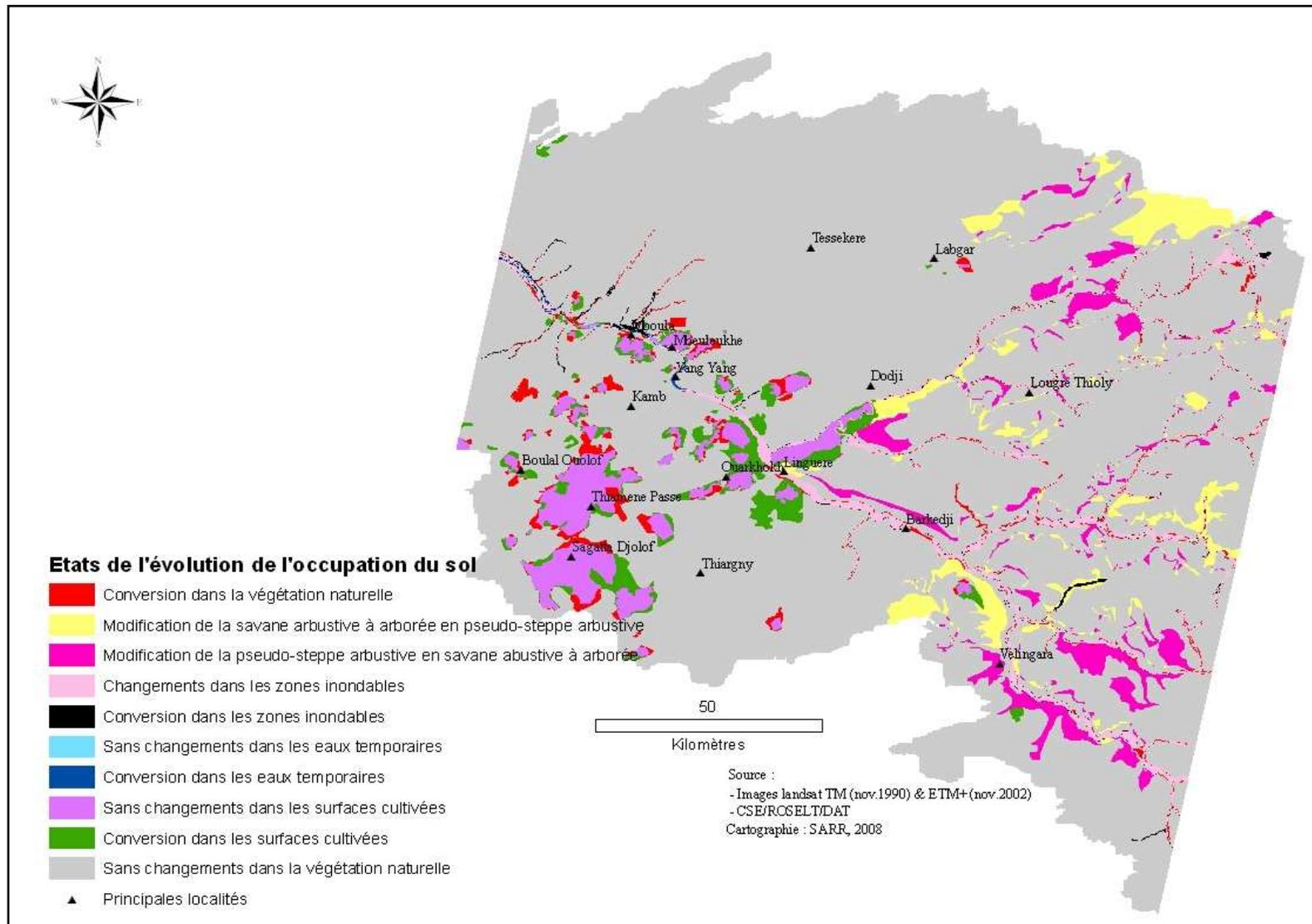


Figure 8. 8 : Les changements des modes d'occupation du sol dans le BVC de 1990 à 2002

4.2. Les conversions entre 1990 et 2002

Les conversions représentent à l'échelle du BVC 4,03 % et sont de natures diverses. Elles touchent inégalement mais faiblement toutes les unités d'occupation du sol. La pseudo-steppe arbustive, de manière très évidente est la plus touchée (2 % de conversion) puis les surfaces cultivées (1,2 %). L'eau temporaire avec 0,02 % de surface convertie est l'unité la moins affectée par le phénomène (**tableau 8.5**).

Catégories en 1990		Catégories en 2002	Surface (ha)	% / Sup. BVC
Zones inondables	⇒	Eau temporaire	948,1	0,04
Zones inondables	⇒	Surfaces cultivées	725	0,03
Zones inondables	⇒	Pseudo-steppe arbustive	7 751,9	0,04
Zones inondables	⇒	Savane arbustive à arborée	4 963,5	0,2
Total			14 388,6	0,6
Eau temporaire	⇒	Zones inondables	278,9	0,01
Eau temporaire	⇒	Surfaces cultivées	55,8	0,00 3
Eau temporaire	⇒	Pseudo-steppe arbustive	111,4	0,005
Total			446,1	0,02
Surfaces cultivées	⇒	Zones inondables	446,2	0,02
Surfaces cultivées	⇒	Pseudo-steppe arbustive	21 973,4	0,9
Surfaces cultivées	⇒	Savane arbustive à arborée	223,1	0,01
Total			22 642,5	1,02
Pseudo-steppe arbustive	⇒	Zones inondables	4 907,7	0,2
Pseudo-steppe arbustive	⇒	Eau temporaire	167,3	0,008
Pseudo-steppe arbustive	⇒	Surfaces cultivées	43 333,1	1,9
Total			48 408,1	2,2
Savane arbustive à arborée	⇒	Zones inondables	1 394,7	0,06
Savane arbustive à arborée	⇒	Surfaces cultivées	1 951,9	0,08
Total			3 346,3	0,15

Tableau 8. 5 : Récapitulatif des conversions opérées lors de l'évolution des modes d'occupation du sol (Sarr M. A., 2008)

- Les zones inondables : au total, 14 388,6 hectares soit 0,6 % de la superficie totale sont passés de zones inondables à, soit des zones d'eau temporaire, soit des surfaces cultivées, soit ont évolué en pseudo-steppe arbustive et en savane arbustive à arborée. On peut noter que 4 963,5 hectares, soit 0,2 % de toute cette surface convertie, ont été colonisés par la savane arbustive à arborée.

- Les zones d'eau temporaire : la transformation des zones d'eau temporaire en d'autres modes d'occupation est extrêmement faible dans l'ensemble (446,1 hectares converties). On enregistre un passage de surfaces d'eau temporaire à des zones inondables estimées à 278,8 hectares entre 1990 et 2002.

- Les surfaces cultivées : ce mode d'occupation et d'utilisation de l'espace a été converti entre ces deux dates en zones inondables d'abord, en pseudo-steppe arbustive ensuite et enfin en savane arbustive à arborée. La surface totale convertie représente 22 642 hectares soit 1,02 % de la surface totale et se répartit comme suit ; 446,2 hectares en zones inondables, 21973,4 hectares en steppe arbustive et 223,1 hectares en savane arbustive à arborée.

- La pseudo-steppe arbustive : entre les années 1990 et 2002, la pseudo-steppe arbustive a cédé des superficies, la part la plus forte aux surfaces cultivées, 43 333,1 hectares soit 1,9 % de la superficie totale, ensuite aux zones inondables et enfin aux zones d'eau temporaire.

- La savane arbustive à arborée : la conversion de ce mode d'occupation du sol ne concerne que les zones inondables (1 394,7 hectares soit 0,6 % de la superficie totale) et les surfaces cultivées (1 951,9 hectares soit 0,08 % de la superficie totale). Au total, de 1990 à 2002, la conversion totale de la savane arbustive à arborée est de 0,2 %. Ce taux est distribué entre les autres modes d'occupation du sol.

4.3. Le rôle du climat et de l'homme dans les changements observés

L'impact de l'homme a donc vraisemblablement joué un rôle essentiel dans l'augmentation des surfaces de la savane arbustive à arborée. Ce constat rend difficile

l'évolution de l'impact des évolutions climatiques, nécessairement relativisées par des pratiques agricoles. Les évolutions observées sont en fait le fruit du croisement et des interactions de ces deux paramètres : naturel et anthropique

L'augmentation des surfaces de la savane arbustive à arborée qui passe de 727 824,7 hectares en 1990 à 800 749,9 hectares en 2002 et la diminution des superficies de la pseudo-steppe arbustive qui passe de 1 401 394,5 à 1 334 445,2 hectares (**figure 8.9 et tableau 8.6**) sont à analyser en relation avec les effets du pastoralisme. La croissance du nombre de mares aménagées, due en grande partie à l'amélioration des conditions pluviométriques, traduit la réduction de la mobilité pastorale (la politique de fixation des bétails autour des points d'eau). Cette dernière engendre la densification de la végétation dans les couloirs des zones inondées (**figure 8.5**) qui étaient autrefois, et même en période de déficit pluviométrique, sollicitées par le bétail grâce à l'eau ainsi que la verdure.

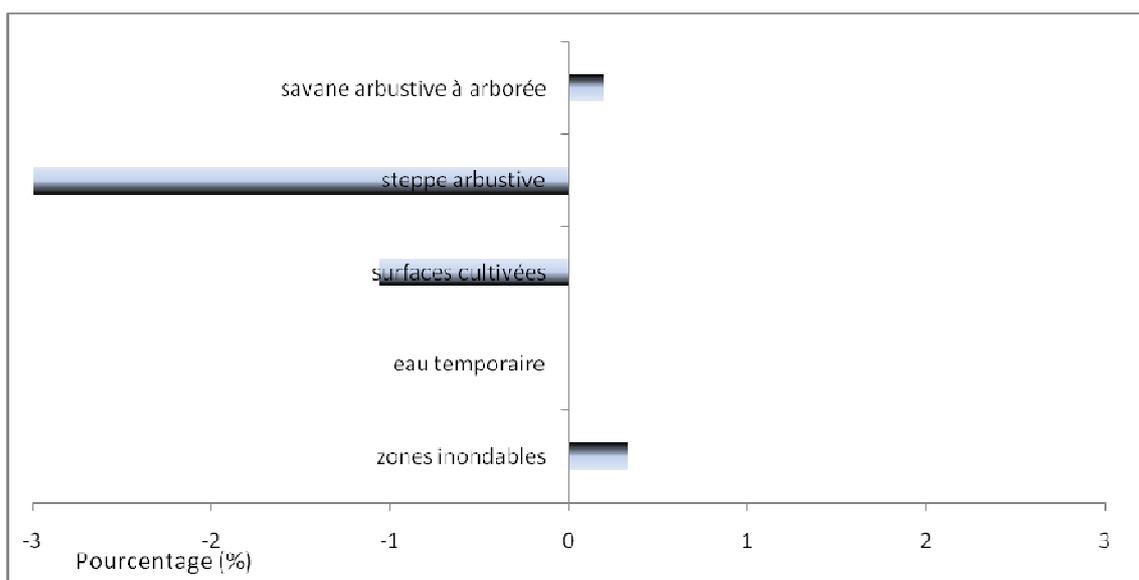


Figure 8. 9 : Bilan des changements opérés entre 1990 et 2002 dans chacun des modes d'occupation du sol (Sarr M. A., 2008)

La superficie des zones inondables est passée de 52 349,5 hectares en 1990 à 59682,9 hectares en 2002 (**figure 8.9 et tableau 8.6**). L'augmentation des zones inondables, de l'ordre de 7 333,4 hectares, est due globalement au retrait des surfaces autrefois occupées par les eaux temporaires. La variabilité pluviométrique interannuelle en est la principale cause car on peut avoir une réduction des superficies d'eau temporaire au détriment de zones inondables en

raison d'une année caractérisée par une mauvaise pluviométrie. La réduction des superficies d'eau temporaire de 1990 à 2002 est fortement liée à l'évolution des zones inondables. Il reste difficile de traduire une évolution générale sur la période. L'année 2002 comparée à celle de 1990, a eu des cumuls pluviométriques relativement moins importants, sur presque toute la région. En conséquence, les surfaces d'eau temporaire ont donc été remplacées par des zones inondables, le plus souvent, mais également par des surfaces cultivées et de la pseudo-steppe arbustive.

La régression des surfaces cultivées au cours de ces années se traduit par une réduction de superficie estimée à 23 586,6 hectares (**figure 8.9 et tableau 8.6**). Ces surfaces cultivées sont en général remplacées par la végétation naturelle. L'essentiel des terres de cultures dans le bassin versant du Ferlo est localisé au sud-ouest en raison des caractéristiques ethnologiques (population wolof et paysans), mais également pédologiques (sols plus favorables à la mise en culture). L'agriculture, principalement pluviale, est un secteur en difficultés depuis ces trente dernières années. Les conséquences des différentes sécheresses précédentes causant l'exode rural entraînent le recul de la pratique agricole laissant naturellement la place à la pseudo-steppe arbustive même si durant ces toutes dernières années, on assiste à un effet inverse encore timide avec une conquête des terres du Ferlo Sud par les grands cultivateurs venant du Baol. Cette conquête doit être associée aux efforts déployés par les services publics et les organisations internationales, efforts développées dans la première partie (Sarr, 2009).

FORMATION	Sup. (ha) 1990	Sup. (ha) 2002	Etat
zones inondables	52349,5	59682,9	accroissement
eau temporaire	2031,2	1863,8	réduction
surfaces cultivées	121494,5	97907,9	réduction
steppe arbustive	1401399,1	1334445,2	réduction
savane arbustive à arborée	727824,7	800749,9	accroissement

Tableau 8. 6 : Caractéristiques dynamiques des modes d'occupation du sol de 1990 à 2002 (Sarr M. A., 2008)

En résumé, cette étude donne un aperçu de l'état de l'amélioration de l'environnement du bassin versant du Ferlo. L'accroissement des zones inondables mais surtout de la savane arbustive à arborée en sont les illustrations, même s'il est à noter que les modifications dans la végétation naturelle sont peu significatives en terme de superficies. Ces modifications confirment encore une fois, en priorité, l'action de l'homme, par ses activités, dans cette évolution environnementale. Comme il a été souligné dans le chapitre précédent et sous un autre angle, plus précis dans ce cas, les politiques d'aménagement et de gestion de l'activité pastorale même en situation climatique ou plutôt pluviométrique relativement défavorable, contribuent à l'amélioration des paysages végétaux longtemps menacés par le pastoralisme transhumant. L'amélioration récente des apports pluviométriques est donc difficilement quantifiable et n'a vraisemblablement eu que peu d'effet direct sur l'évolution des couverts végétaux. Cependant, cette amélioration qui paraît se profiler et les changements d'état des paysages végétaux, observés même s'ils sont encore timides et s'ils restent fragiles, méritent aujourd'hui un suivi régulier avec des outils efficaces pour pouvoir améliorer les politiques en matière environnementale en fonction des futures évolutions envisageables. L'utilisation de satellites de seconde génération permet d'y contribuer fortement.

CHAPITRE 9 : L'UTILISATION DE MSG POUR UN MEILLEUR SUIVI DE LA PRODUCTION VÉGÉTALE EN AFRIQUE OCCIDENTALE

Comme on l'a évoqué, la production végétale dans la région sahélienne en général, et dans le Ferlo en particulier est une ressource importante pour la survie de l'activité pastorale ainsi que de l'activité économique toute entière. Sa gestion et son suivi nécessitent des outils qui prennent en compte les réalités géographiques et économiques des régions concernées. C'est dans cette optique que l'outil MSG pourrait rendre plus efficace cette gestion de la végétation, en ce sens qu'il est susceptible d'apporter des informations plus complètes et plus fines que les outils qui sont actuellement utilisés.

Ce chapitre vise à évaluer l'intérêt des données du capteur SEVIRI des satellites géostationnaires Météosat Seconde Génération (MSG) pour le suivi en temps réel de la végétation des zones arides et semi-arides. L'étude repose sur la comparaison de l'indice de végétation NDVI du capteur SEVIRI par rapport aux indices de végétation NDVI des capteurs des satellites SPOT-VEGETATION et NOAA-AVHRR, actuellement utilisés pour les applications opérationnelles de suivi de végétation à l'échelle locale (Ferlo), nationale (Sénégal) ou régionale (Sahel). L'étude est focalisée sur l'ensemble du bassin versant du Ferlo. Les caractéristiques principales des capteurs et des images NDVI sont la résolution, la répétitivité et la synthèse temporelle (**tableau 9.1**). Des informations plus complètes sur le capteur SEVIRI sont disponibles en annexes.

	NOAA-AVHRR	SPOT-VEGETATION	MSG-SEVIRI
Résolution	1,1 km (archive GIMMS = 8 km)	1,1 km	3 km (ré-échantillonnage possible)
Répétitivité	1 jour	1 jour	15 minutes
Synthèse temporelle	10 jours (archive GIMMS = 15 jours)	10 jours	durée fixée par utilisateur

Source : Lacaze B., Nantes, 2008

Tableau 9. 1 : Caractéristiques des capteurs et des synthèses temporelles de NDVI

1. LES DONNÉES UTILISÉES

1.1. Les caractéristiques des images NOAA-AVHRR traitées

Les données NDVI du capteur AVHRR de NOAA acquises depuis 1981 sur l'ensemble du globe sont disponibles à partir de plusieurs archives, dont l'archive GIMMS (*Global Inventory Modeling and Mapping Studies*) de la NASA. Ces données, pour la période juillet 1981 à décembre 2003, avec une fréquence bimensuelle et une résolution spatiale de 8 km (Tucker C. J., et al., 2005), sont accessibles par téléchargement auprès du site Internet de l'Université du Maryland⁷². Les données d'archive concernant les années 2004 à 2005 ont été obtenues grâce à la collaboration de Molly Brown, Biospheric Sciences Branch, NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA. Les données NDVI pour le continent africain sont obtenues avec quelques caractéristiques principales (**tableau 9.2**) et une projection géographique bien définie (**tableau 9.3**). Ce système est la projection « clarkes-ae » définie dans la liste de projections du logiciel IDRISI.

Coordonnées zone couverte	Bas gauche lat. : - 42.243 ° Bas gauche lon. : - 23.490 ° Haut gauche lat. : 43.711° Haut gauche lon. : - 24.600 ° Bas droite lat. : - 42.242 ° Bas droite lon. : 63.414 ° Haut droite lat. : 43.712 ° Haut droite lon. : 64.523 °
projection	Albers Equal Area Conic
résolution spatiale	8 km
taille image	1152 colonnes x 1152 lignes
format	GeoTiff
codage comptes numériques CN	de - 10000 à + 10000 (<i>signed integer</i>)
relation entre CN et NDVI	CN = 10000 x NDVI
valeurs extrêmes de NDVI	- 1 et + 1

Source : NASA-GIMMS, 2007

Tableau 9. 2 : Caractéristiques des images NDVI de l'archive GIMMS pour l'Afrique

⁷² <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/gimms/>

datum	aucun
delta WGS84	0 0 0
ellipsoid	Clarke 1866
major s-ax	6378206.4
minor s-ax	6356583.8
origin long	20
origin lat	1
origin X	5000000
origin Y	5000000
stand ln1	-19
stand ln2	21

Source : NASA-GIMMS, 2007

Tableau 9. 3 : Caractéristiques de la projection Albers_Africa de l'archive GIMMS

1.2. Les caractéristiques des images SPOT-VÉGÉTATION traitées

Les données NDVI du capteur VÉGÉTATION de SPOT sont disponibles par téléchargement auprès du site Internet VITO⁷³: Les données de synthèse décadaire sont disponibles en deux versions S10 et D10. Nous avons utilisé ici les données S10, qui sont obtenues par une technique de synthèse temporelle fondée sur la comparaison pixel par pixel de 10 valeurs journalières de réflectance pour en dériver les meilleures estimations dans les canaux rouge et proche infrarouge, à partir desquelles l'indice NDVI est calculé (**tableau 9.4**). On obtient ainsi une valeur de NDVI qui est la valeur maximale observée dans la période (technique MVC = *Maximum Value Compositing*).

⁷³ <http://free.vgt.vito.be/>

zone couverte : longitudes	de 26° Ouest à 60° Est
zone couverte : latitudes	de 38° Nord à 35° Sud
projection	Plate Carrée
résolution spatiale	0,008929° (environ 1km)
taille image	9633 colonnes x 8177 lignes
format	hdf
codage comptes numériques CN	de 0 à 255 (byte)
relation entre CN et NDVI	$CN = 0,004 \times NDVI - 0,1$
valeurs extrêmes de NDVI	- 0,1 et 0,92

Source : <http://free.vgt.vito.be/>, 2007

Tableau 9. 4 : Caractéristiques des images NDVI de l'archive SPOT-VEGETATION pour le continent africain

1.3. Les caractéristiques des images MSG-SEVIRI traitées

Les données NDVI du capteur SEVIRI de MSG ont été obtenues par l'interface Internet⁷⁴ du GDR 2839 du CNRS « MSG-ATR » (Groupe De Recherche Meteosat Seconde Génération-Acquisition en Temps Réel). Dans l'approche proposée, l'utilisateur peut définir la zone d'étude (coordonnées en latitude/longitude), ainsi que la résolution spatiale de l'image NDVI résultante (**tableau 9.5**). Les images étant acquises au quotidien avec des angles solaires zénithaux variables, on ne peut pas utiliser une technique de type MVC pour estimer le NDVI sur une période de plusieurs jours. En effet, les valeurs de NDVI sont variables au cours de la journée en fonction de l'angle solaire zénithal (**figure 9.1**), avec un minimum généralement observé aux alentours du midi solaire (Fensholt F., et al., 2006). La technique mise en œuvre dans le cadre du GDR MSG-ATR consiste à rechercher pour les données journalières et pour chaque pixel l'heure d'observation du maximum de température de brillance (d'après les données du canal thermique 10,8µm de l'instrument SEVIRI) : ceci permet dans la plupart des cas d'éliminer la contamination par des surfaces nuageuses qui ont

⁷⁴ <http://msg.univ-paris1.fr/>

des températures plus basses que celle des pixels clairs (Bergès J., et Lacaze B., 2004, Lacaze B., et Bergès J., 2005). La synthèse temporelle peut ensuite être obtenue pour un nombre de journées fixé par l'utilisateur.

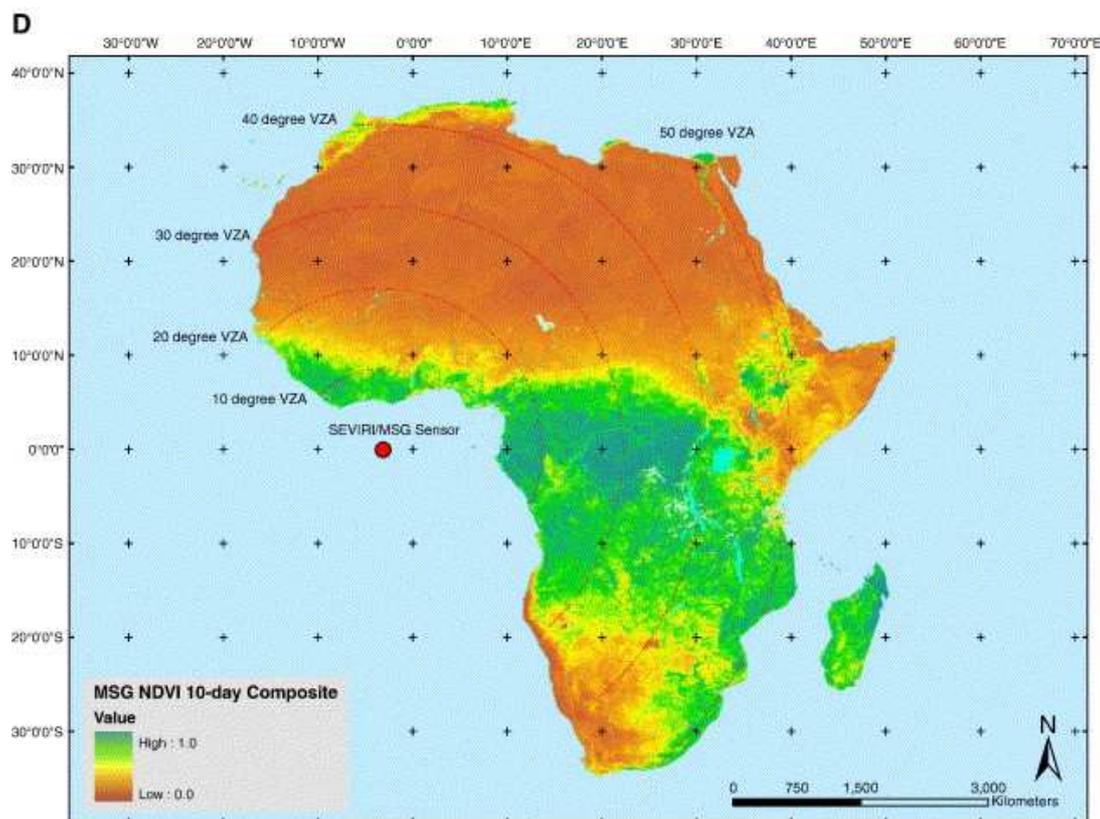


Figure 9. 1 : Variation de l'angle de visée sur le continent africain.
(Source : Fensholt et al., 2006)

zone couverte : longitudes	18° Ouest à 10° Ouest
zone couverte : latitudes	10° Nord à 18° Nord
projection	Plate Carrée
résolution spatiale	0,01 degré
taille image	1000 colonnes x 800 lignes
format	Gif
codage comptes numériques CN	de 0 à 160 (byte)
relation entre CN et NDVI	$CN = 200 \times NDVI + 8$
valeurs extrêmes de NDVI	-0,04 et 0,76

Tableau 9. 5 : Caractéristiques des images NDVI issues de MSG-SEVIRI pour la zone d'étude Afrique de l'Ouest. Source : <http://msg.univ-paris1.fr/>, 2007

Pour une meilleure comparaison des données, nous avons extrait pour les trois sources de données la même zone géographique (bassin versant du Ferlo), et les images NOAA-AVHRR et SPOT-VEGETATION ont été ré-échantillonnées à la résolution spatiale choisie pour les images MSG (0,01 degré).

2. ÉVOLUTION COMPARÉE DES DONNÉES NDVI DES TROIS CAPTEURS

2.1. Comparaison des 3 sources de données NDVI à l'échelle mensuelle pour l'année 2005

La figure 9.2 indique la cinétique mensuelle des maxima de NDVI observés dans le Ferlo (moyenne de tous les pixels du bassin versant) d'après les 3 sources de données.

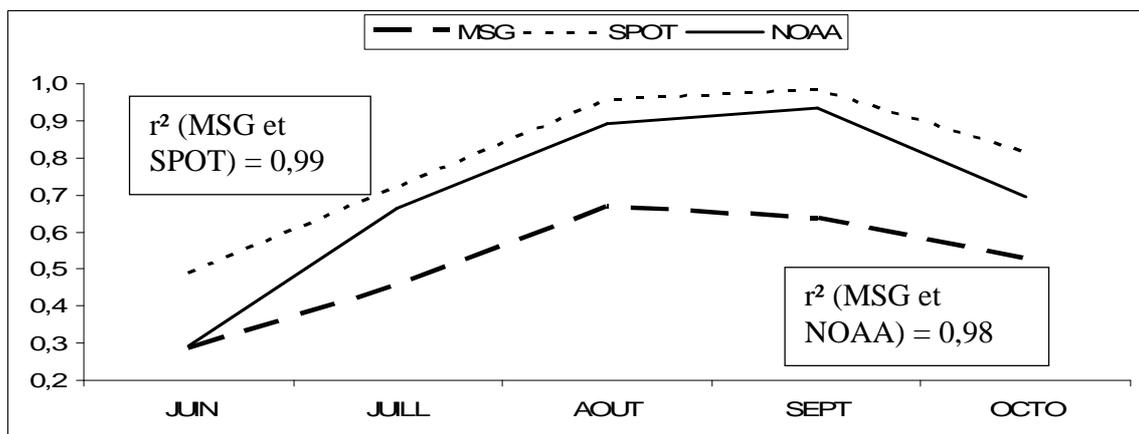


Figure 9. 2 : Evolution mensuelle de l'indice de végétation NDVI maximal observé dans le Ferlo avec les capteurs MSG-SEVIRI, SPOT-VEGETATION et NOAA-AVHRR en 2005 (Sarr M. A., 2008)

Si les évolutions temporelles sont similaires, on constate des différences de valeurs de NDVI qui sont liées aux pré-traitements différents des images. Les images NDVI de SPOT-VEGETATION sont issues de données ayant subi une correction des effets atmosphériques, et fournissent dans tous les cas les valeurs les plus élevées de l'indice. Les images NDVI de NOAA-AVHRR résultent d'une normalisation de données (Brown L., et al., 2005) qui aboutit à des valeurs légèrement plus basses de l'indice ; dans certains cas (octobre et juin) les valeurs

de NDVI apparaissent nettement sous-estimées par rapport à celles de SPOT-VEGETATION. Les images NDVI issues de MSG-SEVIRI n'ont subi aucune correction atmosphérique : il s'agit de valeurs brutes résultant du calcul effectué à partir des valeurs de luminance dérivées des comptes numériques enregistrés dans les canaux visible et proche infrarouge. Il est donc logique que les valeurs de NDVI du capteur SEVIRI soient plus faibles que celles observées pour les deux autres sources de données.

La concordance des évolutions temporelles se traduit par des coefficients de détermination (r^2) très significatifs (**figure 9.2**) : ils sont de l'ordre de 0,99 entre les données de MSG-SEVIRI et de SPOT-VEGETATION et de 0,98 entre celles de MSG-SEVIRI et de NOAA-AVHRR.

Il faut cependant noter la discordance entre les pics de végétation observés en août pour MSG, et en septembre pour SPOT-VEG et NOAA-AVHRR (**figure 9.2**). On doit relativiser cette différence en soulignant que le maximum d'indice observé peut porter sur une zone restreinte (cas limite : un pixel) et qu'il faudrait donc faire une analyse plus détaillée de la répartition spatiale des valeurs de NDVI obtenues avec les trois sources de données, qui ont des résolutions spatiales différentes, pour identifier la cause possible des différences observées.

2.2. Comparaison des données décennales de SPOT-VÉGÉTATION et MSG-SEVIRI (2005 et 2006)

A l'échelle décennale, le constat se résume à une évolution similaire des indices NDVI issus des deux capteurs durant la saison des pluies en 2005 et en 2006. La corrélation est très significative entre les valeurs décennales de l'indice NDVI de MSG-SEVIRI et de SPOT-VEGETATION au cours de l'année 2005 (**figure 9.3**). Le coefficient de détermination est égal à 0,97. On note cependant une diminution des valeurs NDVI de MSG pour les deux dernières décennales de septembre, alors qu'il y a stabilité de l'indice issu de SPOT-VEGETATION, ce qui confirme l'observation faite pour les valeurs mensuelles.

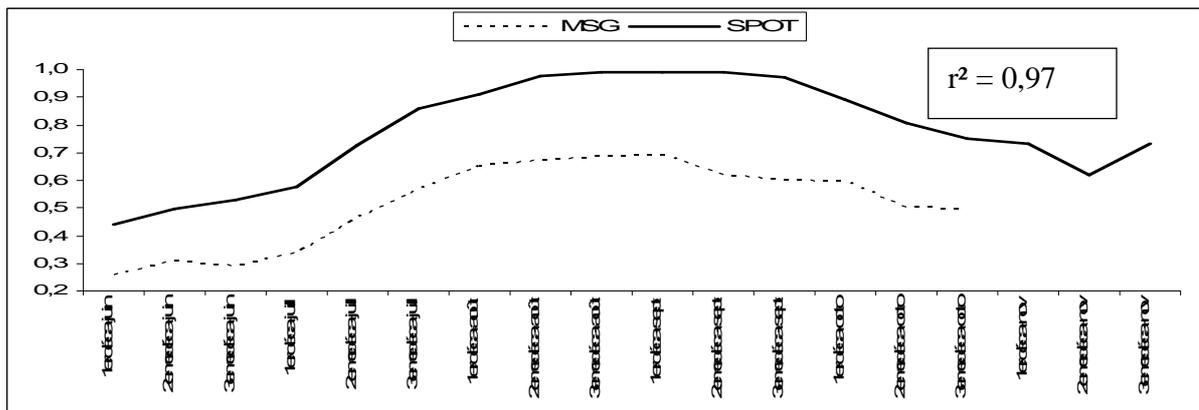


Figure 9. 3 : Evolution décadaire (de juin à novembre) de l'indice NDVI maximal observé dans le Ferlo avec les capteurs SPOT et MSG en 2005 (Sarr M. A., 2008)

La **figure 9.4** traduit une situation moins bien corrélée par rapport à celle de 2005 avec le coefficient de détermination « r^2 » égal à 0,91 entre MSG-SEVIRI et SPOT-VEGETATION. Cette situation peut s'expliquer par la présence d'une masse nuageuse persistante avec d'énormes cumulo-nimbus liés aux lignes de grains couvrant la zone du Ferlo pendant plusieurs jours durant cette décade. Dans ce cas, les images de synthèse de SPOT, malgré une meilleure résolution spatiale, n'ont pas pu éliminer tous les pixels affectés par les nuages. On a ici une illustration de la meilleure qualité des synthèses MSG en cas de couverture nuageuse importante. Contrairement à ce qui a été observé pour 2005, les indices issus de MSG indiquent une cinétique de développement végétal jusqu'à la dernière décade de septembre, suivie d'une décroissance rapide et régulière.

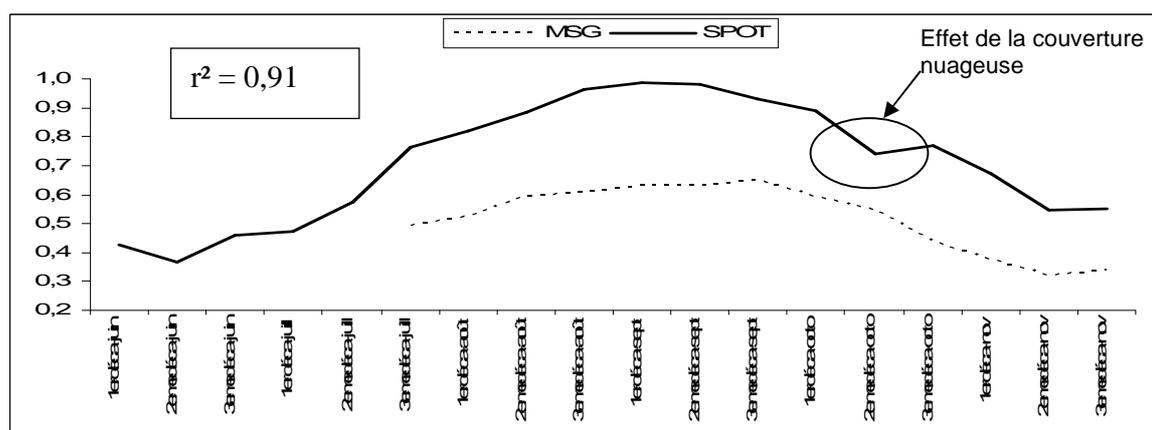


Figure 9. 4 : Evolution décadaire (de juin à novembre) de l'indice NDVI maximal observé au Ferlo avec les capteurs SPOT et MSG en 2006 (Sarr M. A., 2008)

2.3. L'apport sensible de l'outil MSG-SEVIRI aux politiques d'aménagement

Le suivi de la végétation dans les régions arides et semi-arides de l'Afrique tropicale s'est imposé comme une priorité pour les décideurs politiques comme pour les scientifiques depuis la période de sécheresse généralisée en région sahélienne (1970-1989), qui succédait à une période plus humide (1950-1969). Le contexte climatique de la période actuelle (1990-2007) se caractérise par une variabilité spatiale et interannuelle accrue (Ali A., et *al.*, 2007) avec une amélioration sensible des précipitations (Sarr M. A., 2008), qui pourrait avoir des conséquences fortes sur la production végétale. Au Sénégal, le tapis herbacé et le couvert ligneux constituent des ressources indispensables pour un ensemble de secteurs d'activités, et principalement pour l'élevage extensif, ce qui implique la nécessité d'une bonne politique de suivi de la production végétale. La dynamique de la couverture végétale fait partie des principales activités du Centre de Suivi Ecologique (CSE), avec la production de cartes de biomasse végétale pendant la saison des pluies à l'échelle du pays, à partir des données de satellites à défilement (NOAA-AVHRR, SPOT-VEGETATION). Aujourd'hui, en plus de ces deux vecteurs utilisés, l'outil MSG-SEVIRI pourrait être aussi un bon indicateur de politique d'aménagement et de prévision pour les besoins de suivi de la végétation et des feux de brousse à temps réel. Cette proposition est confortée par les conclusions suivantes :

- L'étude comparative des valeurs maximales NDVI observées dans le bassin versant du Ferlo pour les pixels non nuageux n'a pas d'apport significatif. Elle met en évidence des taux de corrélation forts dans les évolutions temporelles de NDVI, généralement similaires pour les données des trois capteurs comparés.
- En cas de couverture nuageuse persistante, la haute résolution temporelle de MSG (une image toutes les 15 mn) permet, au contraire, une meilleure qualité des synthèses décennales qui sont accessibles facilement en temps quasi-réel selon la procédure développée par le GDR MSG-ATR du CNRS.

Il convient de souligner que la nature des pré-traitements des données et, pour MSG, la position du soleil variable selon les moments de la journée sélectionnés lors de la détection de la température maximale, sont des éléments à prendre en compte pour expliquer les différences observées entre les valeurs absolues de NDVI, et pour proposer une harmonisation des valeurs de NDVI entre les trois capteurs. Les bonnes corrélations observées entre les valeurs de NDVI des trois capteurs peuvent néanmoins conduire à des solutions empiriques pour ajuster les valeurs de NDVI d'un capteur à l'autre ; il resterait à vérifier la généralisation spatiale et temporelle des corrélations observées ici sur les seuls pixels d'indice NDVI maximal.

CONCLUSION DE LA TROISIÈME PARTIE

A partir des images de télédétection, nous avons pu montrer les fortes relations entre les fluctuations mensuelles et annuelles de la pluviométrie et le comportement de la couverture végétale aux mêmes échelles. Le Nord et l'Ouest du bassin versant se distinguent du Sud et de l'Est, car dans le premier groupe on retrouve les faibles valeurs de l'indice NDVI et dans le second groupe, les fortes valeurs de ce même indice. Ces résultats sont validés par la classification en zones phytogéographiques du bassin versant, présentée dans la première partie du travail. Les zones phytogéographiques sont réparties selon un gradient «vert» nord-ouest sud-est qui dépend principalement des précipitations. A l'échelle fine, en revanche, on a établi que cette relation directe est à relativiser par l'intervention d'autres facteurs notamment d'origine anthropique comme la réduction de la mobilité pastorale. En définitive, les évolutions sont le fruit d'un croisement des impacts de ces deux facteurs essentiels.

En terme d'évolution notamment, il est intéressant de recouper les résultats obtenus par le biais des deux types de sources de données à résolution spectrale et spatiale différentes. L'augmentation modeste des superficies de la savane arbustive à arborée et le recul sensible des surfaces allouées à la pseudo-steppe arbustive, entre les années 1990 et 2002, analysés sur les images de Landsat, sont des faits, qui confrontés avec les fortes valeurs de NDVI des années 1990 et 2002, permettent de soulever d'autres questions. En effet, la gestion des politiques environnementales dans le bassin versant en particulier, et dans tout le Sahel en général, demande plus de prises sur les impacts anthropiques y compris pastoraux. Par exemple, l'année 2002 comparée à 1990, enregistre un cumul annuel pluviométrique plus faible avec une baisse, de l'ordre de 50 à 120 mm selon les stations, et une valeur NDVI assez « faible » ; en revanche, c'est une année caractérisée par une extension de la savane arbustive à arborée au détriment de la pseudo-steppe arbustive. Ceci laisse supposer le rôle déterminant de la diminution de la transhumance pastorale dans cette situation de dynamique des espaces végétaux. Selon Touré⁷⁵ (communication orale) le taux d'installation des campements (sédentaires pour le moment) dans le Sud du Ferlo, de l'ordre de 70 %, est en forte croissance entre 1980 et 2000. La transhumance pastorale a longtemps été un moteur de déséquilibres écologiques dont les dégâts étaient difficilement quantifiables et prévisibles.

⁷⁵ Chercheur pastoraliste au PPZS (Pole Pastorale Zones Sèches, Dakar)

Pour bien mesurer l'ampleur de ce phénomène, qui existe toujours même si son intensité a diminué significativement, il faudrait que d'autres études à une plus grande échelle, avec des données précises et exploitables sur la mobilité pastorales, soient réalisées. A ce propos, l'outil MSG permettrait de disposer de données en temps réel plus fiables pour tout type de temps (végétation, feux de brousse, activités pastorales) et de pousser la réflexion plus loin sur les politiques d'aménagement. Le recours à cet outil d'évaluation apparaît d'autant plus justifié au regard de l'amélioration des cumuls pluviométriques. Même si les conséquences de cette évolution climatique sont aujourd'hui encore difficiles à mettre en évidence et si l'on peut supposer qu'elles restent encore modestes. Elles sont cependant à prendre fortement en considération dans les politiques d'aménagement futures, qui pourraient être fortement influencées si les conditions s'améliorent encore et deviennent plus favorables.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au terme de notre travail de recherche, le respect des principaux objectifs fixés pour répondre à la problématique de la thèse permet de dresser plusieurs constats significatifs et d'ouvrir des perspectives de recherche future, stimulante.

1. RAPPEL DES PRINCIPAUX OBJECTIFS DE LA THÈSE

Ce travail de thèse s'inscrit dans la continuité des études initiées par le professeur Leroux et ses collaborateurs au sein du Laboratoire de Climatologie, Risques, Environnement (LCRE) sur toute la bande sahélienne en général, et en particulier sur l'Afrique de l'Ouest (Leroux M., 1973 ; Leroux M., 1980 ; Leroux M., 1991 ; Leroux M., 1993 ; Sagna P., 1988 ; Ndong J. B., 1996 ; Comby J., 1996 ; Dione O., 1996 ; Nouaceur Z., 1998, 2005 ; Sagna P., 2005), et des études de nombreux chercheurs qui ont consacré leurs travaux à l'Afrique de l'Ouest. Les résultats de ces différentes études avaient pu montrer d'une part l'extrême irrégularité de la pluviométrie mettant en évidence les phases de sécheresse, et d'autre part leurs impacts sur le plan environnemental, social et économique. Grâce à ces études s'appuyant sur des données cartographiques, des images satellites, des données de terrain, la dynamique du climat dans ces régions est aujourd'hui connue même s'il reste encore des champs à explorer. Ainsi, l'objectif principal de ce travail consistait à actualiser, en apportant des éléments précis de connaissances, l'évolution climatique récente du Ferlo, notamment pour les précipitations, et celle de la production végétale en prenant en compte plus d'un demi-siècle de données. Le second but était de tenter d'évaluer, le cas échéant, les liens qui pouvaient être établis entre ces deux évolutions éventuelles, voire d'établir un lien avec l'évolution d'autres facteurs dont en particulier celle de l'action anthropique par le pastoralisme transhumant, facteur contraignant du fait de la relation entre la pluviométrie et la production végétale.

Pour aboutir à ces objectifs, cette thèse s'est déroulée en quatre étapes essentielles.

- La mise en évidence de la fragilité du milieu physique, humain, social et politico-juridique qui conditionne les enjeux sociaux et économiques liés aux fluctuations climatiques.
- La mise en évidence des tendances et des modifications climatiques susceptibles d'influencer les conditions environnementales, dont notamment la production végétale reposant sur une analyse statistique et cartographique.
- La mise en évidence de l'évolution de la production végétale à partir des outils de télédétection optique dans le but d'évaluer les liens de causalités entre le comportement de la pluviométrie et celui de la végétation sur la période analysée.
- Une évaluation des réponses aux questions de stratégies régionales d'adaptation aux changements climatiques, aux facteurs d'évolution de la couverture végétale ; et la recherche de réponses adaptées aux tendances observées.

2. SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS

L'étude de l'évolution de la pluviométrie sur le Ferlo a permis de mettre en évidence un tournant dans l'évolution climatique récente, quels que soient les méthodes et les outils statistiques utilisés. En première lecture, ces résultats confirment les observations faites sur le Sahel central et surtout oriental où a été observée une amélioration récente des cumuls annuels de pluie. Elles confirment encore les résultats de plusieurs travaux (Hubert P., 2005 notamment) qui tendaient à prouver que le Sahel Occidental suivait une évolution similaire en dépit de résultats moins univoques selon les auteurs qui pour l'essentiel avaient travaillé sur des séries plus anciennes. **La réactualisation de ces analyses dans notre étude qui tient compte des dernières années d'observation, permet de confirmer cette évolution générale sur le Sahel, partie occidentale comprise.** Ce tournant est généralement localisé dans les années 1980 en se caractérisant par des faits majeurs :

- Une amélioration des conditions pluviométriques caractérisée par des épisodes pluvieux très intenses, mais avec des cumuls pluviométriques qui n'atteignent pas encore ceux des années 1950, voire du début des années 60.

Conjointement, l'analyse a également montré que cette rupture climatique (à l'échelle de la série considérée) n'est pas le seul fait de l'évolution des cumuls annuels précipités. Ainsi on observe également :

- une tendance à la baisse de la durée d'insolation ;
- une évolution de la situation thermique (températures minimales, maximales et moyennes) contrastée caractérisée par une hausse significative durant les années les plus sévères de la grande sécheresse (1970 au début des années 1980 à 1990, selon les cas, suivie d'une période depuis la fin des années 1990 où les températures n'évoluent plus à la hausse en règle générale ;
- une tendance nette à la diminution de l'évaporation (notamment à Linguère et Matam) ;
- une nette tendance à la hausse de l'humidité relative.

Au total l'évolution des cumuls pluviométriques annuels et celle des autres paramètres observés traduisent une amélioration sensible, sans être encore très forte, des conditions climatiques. L'impact de cette amélioration encore faible sur l'environnement et les conditions de vie des populations est à relativiser. Les cumuls pluviométriques actuels ne sont pas encore assez forts pour que l'on puisse affirmer que la sécheresse sahélienne n'est plus qu'un mauvais souvenir. Cette évolution constitue cependant un espoir, qu'une analyse plus fine des précipitations peut conforter. Jusqu'alors, les études antérieures ont surtout laissé apparaître une rupture récente dans l'évolution de la pluviométrie mettant en opposition deux périodes : l'une s'étalant de 1950 au milieu des années 1980 caractérisée par les auteurs comme une séquence continue à la baisse des cumuls annuels, l'autre débutant entre le milieu et la fin des années 1980, selon les stations, se traduisant par un retour à la hausse de ces cumuls annuels et mensuels. **Une analyse plus fine et pourtant fondée sur la simple observation des moyennes mobiles sur la période, technique basique et robuste, mais qui évite certains lissages imposés par des techniques plus élaborées, montre une autre réalité. En effet il apparaît que la rupture dans la tendance déficitaire continue des cumuls annuels depuis les années 1950, est antérieure au milieu ou à la fin des années 1980-1990.** Ainsi, la tendance au déficit pluviométrique s'arrête, selon les stations, entre le début et la fin des années 1970. Elle est suivie d'une période sans évolution significative, mais au contraire avec une tendance nette à la stationnarité, soit à l'arrêt de l'accroissement des

déficits. Une troisième période enfin lui fait suite avec une tendance nette à l'amélioration continue des cumuls annuels et mensuels.

Cette étude montre, qu'alors que la sécheresse climatique entrainait dans sa phase la plus contraignante et dramatique pour les populations locales, l'évolution de la pluviométrie cessait de s'aggraver. Les totaux annuels atteints, très bas, expliquent l'aggravation de la sécheresse, mais les cumuls pluviométriques annuels observés, dès lors, témoignent de la fin de l'aggravation du déficit pluviométrique. **Le changement climatique observé semble donc s'inscrire dans une séquence plus longue et surtout moins récente que les constats antérieurs à notre étude, l'affirmaient. Cette séquence étant plus longue, on pourrait envisager en se méfiant de conclusions trop hâtives, que ce changement climatique s'inscrit dans une tendance plus profonde qui laisse entrevoir un espoir encore plus fort d'amélioration des conditions climatiques.**

Une fois ce constat fait, la troisième partie visait à vérifier si cette amélioration relative des conditions climatiques avait une traduction directe sur l'évolution du couvert végétal.

Cet espoir se vérifie également sur le couvert végétal. En effet, l'examen de l'analyse de la production végétale montre les fortes relations entre les fluctuations mensuelles et annuelles de la pluviométrie et le comportement de la couverture végétale aux mêmes échelles. Ces observations traduisent une opposition entre le Nord et l'Ouest du bassin versant par rapport au Sud et à l'Est, car dans le premier groupe on retrouve les faibles valeurs de l'indice NDVI et dans le deuxième groupe, les fortes valeurs de ce même indice. Ces résultats sont validés par la classification en zones phytogéographiques du bassin versant, présentée dans la première partie du travail. Les zones phytogéographiques sont réparties selon un gradient «vert» nord-ouest sud-est qui dépend principalement des précipitations.

A l'échelle fine, par contre, cette relation directe reste difficile à établir à cause de l'intervention d'autres facteurs notamment d'origine anthropique comme la réduction de la mobilité pastorale. L'augmentation modeste des superficies de la savane arbustive à arborée et le recul sensible des surfaces allouées à la pseudo-steppe arbustive, entre les années 1990 et 2002, analysés sur les images de Landsat, sont des faits, qui confrontés avec les fortes valeurs de NDVI des années 1990 et 2002, permettent de soulever d'autres questions. En effet, la

gestion des politiques environnementales dans le bassin versant en particulier, et dans tout le Sahel en général, demande davantage de prise sur les impacts anthropiques y compris pastoraux. Donc, dans les évolutions du couvert végétal doivent être pris en compte le croisement les impacts de la pluviométrie ainsi que l'action anthropique.

Devant cette complexité dans l'évaluation du couvert végétal, il serait intéressant de recouper les résultats obtenus par le biais des types de sources de données à résolution spectrale et spatiale différentes qui permettraient de prendre en considération des impacts à différentes échelles.

Aujourd'hui, il serait intéressant d'effectuer d'autres études sur une échelle plus longue et plus étendue en intégrant les conditions dynamiques des deux hémisphères géographiques.

3. PERSPECTIVES DE RECHERCHES

3.1. Nécessité d'une approche multicateurs pour le suivi de la végétation

Les informations transmises par les satellites sont devenues cruciales pour le suivi de la surface de la terre, particulièrement en ce qui concerne le couvert végétal (Dubreuil V., et *al.*, 1997). Les préoccupations dans ce domaine sont nombreuses, des agriculteurs qui aimeraient connaître l'état de leurs cultures et les rendements probables aux éleveurs qui recherchent les meilleures zones de pâturages pour les besoins des troupeaux. Ainsi les images satellites et les techniques de la télédétection spatiale, moins coûteuses que des mesures de terrain sur des territoires vastes, sont devenues incontournables pour beaucoup de pays africains au sein de leurs politiques de planification en matière de développement. Face à un tel intérêt pour l'information spatiale, principalement pour le suivi de la production végétale, la recherche d'une grande précision spatiale et temporelle pousse à réfléchir sur l'utilisation d'autres capteurs en complément afin d'enrichir la gamme de données disponibles. Bien sur, les contrôles sur le terrain restent une démarche incontournable. Les résultats obtenus dans l'étude comparative à différentes échelles des courbes d'évolution de l'indice NDVI des capteurs SPOT-VEGETATION, NOAA-AVHRR, mais aussi MSG-SEVIRI amène à préconiser la contribution du satellite MSG pour la collecte d'informations en temps réel dans le domaine de l'étude pour la végétation et les feux de brousse.

Sur les questions de politique en matière pastorale, l'outil MSG pourrait être également un bon indicateur de politique d'aménagement et de prévision, et il pourrait être associé à d'autres outils à haute résolution spatiale pour envisager des applications d'aménagement et de gestion à l'échelle locale.

3.2. Recherches de solutions aux problèmes d'eau, nécessaire pour une agriculture performante pouvant assurer l'autosuffisance alimentaire

L'évolution actuelle de la pluviométrie des pays au Sud du Sahara est caractérisée par une forte variabilité interannuelle et intra annuelle. Par contre, les pluies enregistrées ces dernières années ont été des sources d'espoir. Le Sénégal fait partie des pays où l'essentiel de la population active travaille dans le secteur de l'agriculture (77 % pour le Sénégal, estimation en 1990, *Direction des statistiques et de la prévision*), et presque tous les besoins de consommation des produits agricoles sont couverts par les importations. Au cours des années 1970 et 1980, les paysans ont été poussés à délaisser le secteur agricole au bénéfice du commerce ou de l'immigration à cause d'une pluviométrie particulièrement aléatoire et déficitaire dans les années 1970 et 1980 (la Grande Sécheresse Sahélienne). Il faut ajouter à cette situation les problèmes de commercialisation des produits d'une agriculture commerciale moins concurrente qui a du mal à exister dans un contexte économique mondial difficile au détriment d'une agriculture vivrière.

Depuis les années 2000, dans une volonté de trouver des solutions aux problèmes de l'agriculture qui reste fortement tributaire de la pluviométrie, la question de l'eau, dans sa forme pluviale, est posée. C'est dans cette perspective que les pouvoirs publics sénégalais se sont orientés, après l'échec du programme de revitalisation des vallées fossiles⁷⁶, en

⁷⁶ Au début des années 1950, le Sénégal a initié dans la région sylvo-pastorale appelée communément « Ferlo » un programme d'hydraulique pastorale reposant sur l'exploitation des nappes profondes pour permettre une meilleure utilisation des ressources pastorales de cette région. Mais avec les sécheresses que le pays a connues par la suite, le problème de l'eau n'a pas été réglé pour autant. Ainsi, à partir de 1988, ce programme d'hydraulique a été élargi au domaine des ressources en eau de surface. Les vallées fossiles sont dans un premier temps ciblées et les premiers aménagements ont lieu dans la partie inférieure de la basse vallée du Ferlo. Par la suite, un projet plus ambitieux ayant comme objectif la valorisation de tout le potentiel en eau du pays est mis sur pied. L'échec du programme de revitalisation des vallées fossiles est dû par un non consensus entre les différents États qui composent l'OMVS concernant le partage des eaux. En effet, ce programme nécessite beaucoup d'eau.

collaboration avec le Royaume du Maroc au sein du projet BAWAAN⁷⁷. Malgré toutes ces tentatives, l'agriculture sénégalaise connaît une situation difficile causée par la pluviométrie déficitaire. Avec la récente crise alimentaire qui touche le Sénégal, due à la flambée des prix des produits pétroliers qui se répercute sur les denrées de première nécessité, il est plus qu'urgent de réfléchir à des solutions concrètes pour la gestion et l'utilisation des eaux des fleuves de la Gambie et du Sénégal, dans le cadre de l'OMVG (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie) et l'OMVS (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal) pour des alternatives à une agriculture irriguée. Dans ce même ordre, il est opportun pour des pays comme le Sénégal, essentiellement agricole, de mettre des moyens dans la réhabilitation du secteur agricole.

La forte dépendance des pays sahéliens vis-à-vis des conditions climatiques, notamment pluviométriques soulève aujourd'hui des pistes de recherches sur les causes des évolutions, sur la nécessité de poursuivre le suivi climatique et d'approfondir les études par une analyse dynamique des phénomènes, notamment des lignes de grains. Ces interrogations constituent un travail de thèse en soi et qu'il n'était pas possible, en ce sens d'aborder ici. On peut cependant proposer quelques hypothèses.

De toute évidence, la situation des températures et l'amélioration des conditions pluviométriques au Ferlo traduit une forte marge d'incertitude (Comby J., 2009) dans les *scenarii* proposés dans le dernier rapport de novembre 2007 du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC). D'ailleurs de vives polémiques sur les véritables causes ainsi que les conséquences de ce réchauffement du climat (Leroux M., 2005, 2007 ; Usoskin I. G., 2007 ; Svensmark H., 2007) animent le monde scientifique même si la tendance à la hausse selon Douguedroit A., et *al.* (2007) et Reynaud J., (2007) est observée différemment d'une région à une autre.

A - Une confirmation du réchauffement climatique ?

Si l'on s'en tient aux observations du passé, le projet PMIP II (*Paleoclimate Modelling Intercomparison Project*) propose une modélisation des interactions entre

⁷⁷ Le projet BAWAAN est une coopération entre la république du Sénégal et le royaume du Maroc dans le domaine des pluies provoquées. Les objectifs se résument en trois points : d'abord pallier aux besoins en eau suite à un déficit pluviométrique, ensuite accroître le taux de la pluviométrie sur la région sylvo-pastorale et le bassin arachidier, et enfin approfondir la recherche sur la physique des nuages.

l'atmosphère, l'océan et la végétation pendant les deux derniers extrêmes climatiques qu'a connus la terre, il y a 18 000 et 6 000 ans (Braconnot P., 2007 a et b). Les sorties de modèle permettent d'observer que, pendant l'Optimum Climatique Holocène (OCH), il y a 6 000 ans, caractérisé par une croissance des températures en région tempérée, les précipitations avaient tendance à augmenter dans la région ouest africaine. Parallèlement, le Dernier Maximum Glaciaire (DMG) se caractérise plutôt par une diminution radicale des précipitations en Afrique de l'Ouest, dans un contexte de refroidissement général de l'hémisphère Nord et d'intensification des cellules anticycloniques.

Cependant, les conséquences annoncées du réchauffement climatique planétaire, soit un accroissement de la sécheresse et des déficits pluviométriques sur le Sahel, ne sont pas vérifiés par les observations (Sarr M. A., 2009). Erreurs dans l'évaluation des conséquences du réchauffement climatique ou fausse piste ? La question reste ouverte.

B- Une tendance au renforcement de la dynamique atmosphérique ?

En opposition à la théorie du réchauffement climatique, les approches dynamiques, du type de celles de Marcel Leroux pourraient expliquer l'accroissement de volumes précipités par un renforcement de la dynamique atmosphérique traduisant un renforcement du flux de mousson et la formation de lignes de grains plus puissantes et plus fréquentes ? En effet, si comme le déclare Marcel Leroux le pôle nord se refroidit, la puissance et la fréquence des AMP pourraient augmenter et favoriser conjointement la fréquence et la puissance des pulsations dans les alizés et la mousson, en partie à l'origine des lignes des grains. Dans l'hémisphère Sud, un accroissement du froid antarctique renforcerait la puissance de l'agglutination de Sainte-Hélène et conjointement la puissance du flux de mousson qui rejoint l'Afrique de l'Ouest. Ce schéma en l'état n'est encore qu'une hypothèse qui ne fait pas l'unanimité. Ce schéma n'est pas nécessairement source d'espoir. **Si l'on peut faire le constat d'une amélioration des précipitations annuelles, la nature des pluies qui en est responsable est encore mal connue.** Plusieurs travaux cités (Sagna P., 2005 ; Jannicot S. et al., 1993 ; Jannicot S., 2002) donnent des pistes de réflexion. **Dans le meilleur des cas, si les pluies s'avèrent bénéfiques par les valeurs recueillies, elles pourraient aussi être à l'origine d'un transfert du risque, de la sécheresse vers les «excès» pluviométriques,**

sources d'inondation. Cela pourrait expliquer les évènements de ces dernières années dans beaucoup de pays de l'Afrique de l'Ouest.

Il convient cependant de rester prudent dans cette forme d'analyse très conjoncturelle. La manifestation ponctuelle d'une telle catastrophe ne permet pas de confirmer une évolution durable. Si cette évolution reste difficile à confirmer en l'état actuel, il conviendra de surveiller, dans les années à venir, avec beaucoup d'attention, les évolutions climatiques et les grandes orientations des politiques d'aménagement territorial des pays en question.

Ainsi, au-delà des constats tirés des observations réelles, il est difficile de définir les causes de ces évolutions et d'en mesurer la profondeur (pérennité ou pas?). Il est donc nécessaire de multiplier les analyses pour en affiner les précisions et mieux comprendre l'origine de ces modifications (évolution des flux sur le secteur considéré ; vitesse, direction et humidité, évolution des centres de pression atmosphérique de part et d'autre de l'équateur météorologique, évolution de l'activité solaire, etc...).

Dans tous les cas les espoirs et les enjeux associés aux réponses qui peuvent être apportées constituent des perspectives de recherche très stimulantes et indispensables.

L'évolution et la dynamique du climat passé et présent de l'Afrique tropicale en général et de l'Afrique de l'Ouest en particulier, ont fait l'objet de plusieurs études. De nombreuses questions restent néanmoins sans réponses, parmi elles, nous en retiendrons deux essentielles car lourdes de conséquences.

Quelle est la part de l'homme et de ses activités dans les modifications environnementales? L'évaluation de la responsabilité des activités humaines dans les processus de dégradation de la végétation, à des échelles fines, permet de fournir des informations qui pourraient corriger les politiques d'aménagements mises en place. Des solutions durables faces aux déséquilibres écologiques commencent par distinguer les causes anthropiques des causes climatiques.

Quelle est la part des conditions locales (végétation, sols par exemple) dans la caractérisation du climat global? Analyser l'évolution récente du climat conduit à fournir des éléments permettant de comprendre l'avenir. En effet, les modèles de circulation générale apparaissent comme l'outil incontournable mais restent très affaiblis dans leurs prévisions du

climat futur à cause d'un manque de prise en considération des éléments influençant le climat à l'échelle fine. La modélisation climatique régionale sur la base d'études locales pourrait apporter des réponses à ce problème de résolution spatiale.

ANNEXES

ANNEXE 1 : CARACTÉRISTIQUES DES SATELLITES UTILISÉS NOAA (AVHRR), LANDSAT (TM et ETM+), SPOT (VEGETATION), MSG (SEVIRI)

La problématique définie dans le plan énoncé précédemment requiert des outils différents. Des images à haute résolution spatiale pour l'identification et la dynamique des unités paysagères, et des images à haute répétitivité avec une excellente sensibilité à la végétation. Etant donné que le suivi temporel de l'indice de végétation occupe une place importante dans cette étude, notre choix s'est porté sur les satellites et les capteurs tels que SPOT-VEGETATION (synthèse de 10 jours), NOAA-AVHRR (synthèse de 15 jours), MSG-SEVIRI (acquisition de tous les quarts d'heure) grâce à leur haute répétitivité pour une meilleure qualité de la réponse radiométrique de la végétation. Cette haute répétitivité conduisant à la facilité de faire des synthèses, permet de s'affranchir des effets des nuages fréquents en période d'hivernage et de garder que les pixels non couverts ou non endommagés par les nuages. Nous passons d'abord par un rappel condensé des particularités de chacun de ces satellites ainsi que des capteurs embarqués à bord pour une meilleure compréhension des potentialités et des limites des images traitées. Ce rappel donne tout simplement une brève description de certains caractères liés à notre problématique d'étude.

1. Le satellite NOAA

1.1. Les particularités du satellite

Les satellites NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) sont des satellites à orbite quasi-polaire. Le plan de l'orbite conserve un angle constant par rapport à la direction terre-soleil (héliosynchrone). Ils survolent la terre à environ 850 km d'altitude et se déplacent à une vitesse de 7,45 mètres par seconde. Leur période révolution est de 102 minutes. Les satellites NOAA survolent l'équateur 14 fois par jour en passage ascendant et descendant. De ce fait, avec deux satellites déphasés, nous avons une acquisition de quatre images par jour pour chaque point du globe à des intervalles de six heures : en matinée et en soirée par le satellite de numéro pair; de nuit et en début d'après midi par le satellite de numéro impair. Le dernier satellite, NOAA 18, est lancé le 20 mai 2005. Ces informations d'ordre général, sont explicitées dans le site (www.noaa.gov).

1.2. Les caractéristiques du capteur AVHRR

Le capteur AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) utilise deux types de transmission : le mode HRPT (*High Resolution Picture Transmission*) et le mode APT (*Automatic Picture Transmission*). Les données du capteur AVHRR sont disponibles en quatre modes opérationnels selon les prétraitements effectués à bord ou à la station de réception. Les données peuvent être retransmises directement au sol et visionnées tout de suite après qu'elles aient été captées, ou elles peuvent être enregistrées à bord du satellite pour être retransmises et traitées plus tard.

Avec le radiomètre AVHRR, la détection des rayonnements émis ou réémis par la surface de la terre et l'atmosphère s'opère dans cinq bandes spectrales, du visible à l'infrarouge thermique (**tableau 1**). Une scène AVHRR comporte donc cinq images simultanées de la terre vue dans ces cinq domaines de longueur d'onde. Les dimensions du pixel au nadir sont de 1,1 km avec une répétitivité de 12 heures.

N°	Canal	NOAA 6, 7 et 8	NOAA 9, 11, 12, 14	NOAA 15, 16, 17, 18	Résolution au sol
		AVHRR/1 (µm)	AVHRR/2 (µm)	AVHRR/3 (µm)	
1	Visible	0,58 à 0,68	0,58 à 0,68	0,58 à 0,68	1,1 km
2	Proche Infrarouge (PIR)	0,72 à 1,10	0,72 à 1,10	0,72 à 1,10	1,1 km
3A	Moyen Infrarouge (MIR)	0,58 à 1,64	0,58 à 1,64	0,58 à 1,64	1,1 km
3B		3,55 à 3,93	3,55 à 3,93	3,55 à 3,93	
4	Infrarouge Thermique (IRT)	10,50 à 11,50	10,50 à 11,50	10,50 à 11,50	1,1 km
5		10,50 à 11,50	11,50 à 12,50	11,50 à 12,50	

Tableau 1 : Eléments caractéristiques des satellites NOAA

Les bandes du rouge et du proche infrarouge (PIR), plus que les autres bandes de NOAA-AVHRR permettent de suivre, l'évolution de la couverture végétale. Ces deux bandes sont tout simplement plus sensibles à l'activité photosynthétique des végétaux.

Les synthèses de NDVI, utilisées dans ce travail, pour constituer des séries temporelles, ne sont que le résultat de la combinaison des bandes du rouge et du proche infrarouge. Les synthèses de NDVI sont des «*Maximum Value Composite*» effectués sur 15 jours après filtrage de nuages ou d'autres effets atmosphériques grâce aux canaux thermiques.

2. Le satellite LANDSAT

2.1. Les particularités de Landsat

Le programme *Earth Resources Technological Satellite* (ERTS) a donné naissance aux différentes générations de satellites LandSat (mot formé par la contraction de «*Land*» et «*Satellite*»). Le premier satellite (Landsat 1) a été lancé en juillet 1972. Les satellites Landsat ont tous une orbite héliosynchrone sub-polaire, inclinée à 98,2° avec un cycle de 16 jours. Les scènes TM (*Thematic Mapper*) et ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), dont nous disposons dans ce travail, couvrent chacune une surface d'environ 185 km sur 185 km. Les satellites se situent à 705 km de la surface de la terre.

2.2. Les caractéristiques des capteurs TM et ETM+

La qualité des images Landsat a évolué au fil des années, selon le type de capteur, depuis le MSS jusqu'à ETM+. Les premiers satellites Landsat disposaient de capteur MSS (MultiSpectral Scanner) avant l'arrivée des capteurs TM et ETM+. Dans ce travail, nous nous intéressons qu'aux deux derniers capteurs.

- TM : le capteur TM embarqué à bord des satellites Landsat 4 et 5 produit des images depuis 1984. Une scène est composée de 7 bandes multispectrales ; 3 bandes dans le visible, une bande infrarouge, 2 bandes infrarouges moyens et une bande infrarouge thermique. Toutes les bandes ont une résolution spatiale d'environ 30 m sauf la bande infrarouge thermique (120 m).
- ETM+ : ce capteur à bord du satellite Landsat 7, est lancé en avril 1999. Il fournit une meilleure qualité des images Landsat. Comparé au capteur TM, le capteur ETM+ apporte les améliorations suivantes ; une bande supplémentaire qui est la bande panchromatique avec une résolution spatiale de 15 m, une amélioration de la résolution de la bande infrarouge thermique rendue à 60 m.

3. Le satellite SPOT

3.1. Les particularités de SPOT

Le Centre National d'Etudes Spatiales qui gère la flotte des satellites SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) dispose actuellement de 3 satellites opérationnels. Il s'agit de SPOT 2, lancé en janvier 1990, SPOT 4, mis en orbite en mars 1998, et de SPOT 5, dernier à être lancé en mai 2002. Les satellites SPOT, avec une inclinaison sur l'équateur de 98,7° et un cycle de 26 jours au-dessus du même point, ont une orbite héliosynchrone. Leur altitude à l'équateur se situe aux environs de 830 km.

A bord des satellites SPOT, sont installés différents capteurs qui définissent les caractéristiques particulières des scènes prises.

3.2. Les capteurs SPOT

Parmi ces différents capteurs, nous pouvons nous limiter à celui de VEGETATION (VGT), qui caractérise toutes nos images SPOT utilisées dans ce travail, mais il est aussi intéressant de connaître les autres capteurs installés à bord de SPOT pour déterminer les principales fonctions de chacun d'entre eux.

- **HRV (*High Resolution Visible*)** : les trois premières générations de SPOT sont dotées de ce type d'instrument. Sur un satellite, chaque HRV peut, indifféremment, acquérir des images en mode panchromatique ou multispectral et balayer chacun une bande de 60 km. La taille de l'image fait 60 km sur 60 km et une résolution pixellaire de 10 m pour les images panchromatiques et de 20 m pour les images multispectrales.
- **HRVIR (Haute Résolution Visible et Infrarouge)** : on trouve cet instrument à bord du satellite SPOT 4. Il est également équipé d'un capteur VEGETATION (présenté ci-après) et d'enregistreurs de données et un système de transmission des images vers les stations de réception au sol. Le HRVIR est très semblable au HRV même s'il existe quelques améliorations au niveau des bandes.
- **VEGETATION** : c'est le capteur qui nous intéresse dans notre étude sur la couverture végétale. Il fournit des données précises sur les caractères quotidiens du couvert végétal à l'échelle du globe. Le capteur VEGETATION, installé sur SPOT 4, fonctionne indépendamment du HRVIR. Il dispose d'un instrument de prise de vue

radiométrique, grand angle opérant dans les 4 bandes du spectre avec une résolution d'environ 1 km. Les bandes sont : bleue (0,43 – 0,47 μm), rouge (0,61 – 0,68 μm), proche infrarouge (0,79 – 0,89 μm), moyen infrarouge (1,58 – 1,75 μm). Le capteur VEGETATION 2 sur SPOT 5 remplace VEGETATION en gardant les mêmes propriétés pour la continuité.

- Les capteurs HRG (Haute Résolution Géométrique) et HRS (Haute Résolution Stéréoscopique) font partie des améliorations apportées au satellite SPOT 5. Ces instruments qui n'intéressent pas notre problématique apportent quand même des informations supplémentaires telles que des couples d'images stéréoscopiques quasi-simultanées pour le capteur HRS, et des données à quatre niveaux de résolution pour un champ d'observation de 60 km pour le capteur HRG.

Les produits générés par SPOT-VEGETATION sur le couvert végétal sont soit des synthèses journalières soit des synthèses décennales, en fonction des zones géographiques définies par l'utilisateur. Les images SPOT-VEGETATION sont aujourd'hui traitées et stockées dans une base de données gérée par le centre VITO (*Vlaamse Instelling Voor Technologisch*) en Belgique.

4. Le satellite Météosat Nouvelle Génération (MSG)

4.1. Les singularités de MSG

MSG est un programme en coopération entre EUMETSAT (Organisation Européenne pour l'Exploitation des Satellites Météorologiques) et l'ESA (Agence Spatiale Européenne). Conçu pour répondre aux besoins des utilisateurs (Etats membres), MSG contribue à la prévision météorologique opérationnelle et fournit d'importantes données pour les recherches climatiques et biogéographiques.

Le premier satellite Météosat 1 a été lancé en 1977. Météosat Nouvelle Génération, qui est le huitième satellite de cette série, diffère très profondément de ses prédécesseurs. La flotte actuelle de MSG se compose de deux satellites opérationnels, à savoir, MSG 1 ou Météosat 8, lancé en août 2002 et MSG 2 ou Météosat 9, mis en orbite précisément le 21 décembre 2005. Les projets de lancement de MSG 3 et MSG 4 sont prévus respectivement en 2009 et en 2012.

Les satellites MSG sont en orbite géostationnaire et se trouvent à une altitude de 36 000 km de la terre. Ils ont un angle zénithal de visée constant et une couverture globale limitée ; pas de couverture sur les pôles par contre une meilleure définition de la résolution sur l'équateur. Plus on s'éloigne de la région équatoriale, plus nous enregistrons des distorsions géométriques sur les images MSG comme c'est le cas sur celles de la région du Ferlo. Mais précisons quand même que ce problème n'est pas un véritable obstacle de l'exploitation optimale des images sur le Ferlo.

4.2. Les particularités du radiomètre SEVIRI

Grâce au capteur multispectral SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infra Red Imager*), les données prises par le satellite ont contribué de façon significative aux prévisions météorologiques mais également au suivi environnemental. Les caractéristiques de SEVIRI peuvent se résumer en quelques points (**tableau 2**) :

- les 12 canaux répartis entre les longueurs d'ondes du visible (1 bande), du proche infrarouge (1 bande), du moyen infrarouge (1 bande), du HRV (1 bande) et du infrarouge thermique (8 bandes) au lieu de 3 sur les anciens satellites Météosat ;
- une résolution spatiale deux fois plus précise qu'antérieurement (HRV : 1 km au lieu de 2,25 km, visible et infrarouges : 3 km au lieu de 5 km) ;
- des images deux fois plus fréquentes, toutes les 15 minutes au lieu de 30 minutes ;
- et enfin une capacité de transmission de données multipliée par 10.

En somme, l'étude que nous avons menée sur l'occupation et l'utilisation des sols ainsi que la dynamique de la production végétale dans la région du Ferlo implique l'exploitation d'outils aux caractéristiques diverses. Les images satellitaires utilisées, provenant de différents capteurs, donnent d'une part des données à haute répétitivité temporelle, et d'autre part des informations d'une bonne résolution spatiale. Ces différences jouent sur les coûts des images dont certaines sont difficilement à la portée de tous. Le **tableau 2** fait la synthèse des différences au niveau des capteurs.

La présentation ci-dessus des capteurs, en n'insistant que sur les éléments qui sont vraiment importants pour notre étude, permet de mieux comprendre les résultats obtenus.

Satellite	Capteur	Bandes spectrales (µm)	Résolution spatiale	Largeur du champ global d'observation
MSG	SEVIRI	HRV : 0,5 à 0,9 VIS 0,6 : 0,56 à 0,71 VIS 0,8 : 0,74 à 0,88 SWIR 1,6 : 1,5 à 1,78 IR 3,9 : 3,48 à 4,36 IR/WV 6,2 : 5,35 à 7,15 IR/WV 7,3 : 6,85 à 7,85 IR 8,7 : 8,3 à 9,1 IR 9,7 : 9,38 à 9,94 IR 10,8 : 9,8 à 11,8 IR 12 : 11 à 13 IR 13,4 : 12,4 à 14,4	1 km 5 km	12500 km
NOAA	AVHRR	1 : 0,58 à 0,68 2 : 0,72 à 1 3A : 1,58 à 1,64 <i>(depuis NOAA 15)</i> 3B : 3,53 à 3,93 4 : 10,3 à 11,3 5 : 11,5 à 12,5	1,1 km	2700 km
SPOT	VGT 1 et 2	B0 : 0,43 à 0,47 B2 : 0,61 à 0,68 B3 : 0,79 à 0,89 MIR : 1,58 à 1,75	1 km	2250 km
LANDSAT	TM	B1 : 0,45 à 0,52 B2 : 0,52 à 0,60 B3 : 0,63 à 0,69 B4 : 0,76 à 0,90 B5 : 1,55 à 1,75 B6 : 10,4 à 12,5 B7 : 2,08 à 2,35	30 m Id. Id. Id. Id. 120 m 30 m	185 km
	ETM+ (TM et 2 améliorations)	B6 : 10,4 à 12,5 Panchromatique : 0,50 à 0,90	60 m 15m	185 km

Tableau 2 : synthèse des caractéristiques des capteurs utilisés

Des informations plus complètes sur le capteur SEVIRI sont disponibles sur le site <http://www.educnet.education.fr/orbito/system/meteosat/met23.htm>.

5. Les principes de synthèse de NDVI par l'utilisation de la température maximale

Les couvertures nuageuses régulières en périodes de saison des pluies posent des difficultés dans les traitements d'images appliqués à l'environnement. Grâce à la technique de synthèses de NDVI, on arrive à apporter des réponses par rapport à ce problème.

La différence évidente entre les températures des nuages (inférieures) et les températures du sol (supérieures) permet de déceler facilement l'origine des signaux réfléchis et mesurés, c'est-à-dire voir si le signal provient du sol ou du nuage. Ainsi, avec les cartes de températures obtenues par le canal thermique des capteurs, il est possible de détecter la présence de nuages dans un endroit précis. Et alors, une synthèse temporelle de NDVI consiste à rechercher sur un ensemble d'images NDVI les pixels de chaque image les plus persistants afin de réaliser une image finale où chaque pixel (correspondant au pixel où la température est maximale) sera le pixel de la meilleure qualité sur l'ensemble des images.

Néanmoins, les synthèses journalières peuvent avoir encore des nuages car il arrive que des couvertures nuageuses persistent pendant des jours sur une zone ; par conséquent, il est préférable de travailler sur des synthèses de plusieurs jours.

ANNEXE 2 : CHOIX DE LA MÉTHODE D'INTERPOLATION SPATIALE PAR LA TECHNIQUE DE LA VALIDATION CROISÉE

Une connaissance pointue de la distribution spatio-temporelle des précipitations est un enjeu majeur, essentiellement en raison du risque croissant de diminution de cette ressource vitale. Cette problématique prend une dimension supplémentaire dans des territoires soumis à une faible pluviométrie annuelle, telle que la zone sahélienne. Généralement, cette compréhension de la pluie s'obtient par un réseau de pluviomètres fournissant des données ponctuelles. Il est alors nécessaire d'interpoler ces données pour acquérir une vision spatialisée du phénomène pluvieux. Cependant, il existe un grand nombre de méthodes d'interpolation spatiale, et le choix n'est pas évident. Cette sélection doit être faite en fonction de l'exactitude de l'estimation souhaitée, de la complexité de mise en œuvre, des moyens à disposition, et de la rapidité de la méthode employée. Cinq méthodes d'interpolation spatiale ont été évaluées par une méthode de validation croisée, sur le bassin versant du Ferlo au Sénégal. Deux types de pluie ont servi à cette évaluation. Ici, la connaissance fine de la distribution de la pluie reste un des facteurs déterminants concernant le développement agricole et pastoral.

Ainsi, le but de cette étude est de mettre en évidence la méthode d'interpolation spatiale la plus représentative et la plus adaptée aux moyens à disposition pour chacun des territoires d'étude. En effet, parmi toutes ces méthodes, y en a-t-il une qui donne globalement de meilleurs résultats lors de l'estimation de la pluviométrie, c'est à dire une méthode dont la moyenne des écarts absolus entre les valeurs de pluie observées et les valeurs estimées est la moins importante possible ?

Afin de répondre à cette question, l'exposé est construit en deux parties. D'abord une brève évaluation des principes méthodologiques suivie des résultats obtenus par validation croisée. Enfin, la conclusion statuera sur l'adaptabilité d'une méthode sur le territoire du Ferlo et fera également office de perspective.

1. Evaluation des méthodes d'interpolation spatiale : mode opératoire

1.1. Choix et description des techniques d'interpolation spatiale

Les méthodes d'interpolation spatiale sont nombreuses et d'une représentativité des phénomènes pluvieux inégale. Ces techniques sont en général divisées en deux catégories : **les méthodes déterministes**, et **les méthodes stochastiques** qui prennent en compte le concept de hasard et modélisent la variable régionalisée par une fonction aléatoire (Baillargeon C., 2002).

Les méthodes d'interpolation déterministes sont généralement subdivisées en trois catégories. Elles regroupent les techniques barycentriques, les techniques par partitionnement de l'espace, ainsi que les splines. Les techniques stochastiques rassemblent quant à elles les techniques de régression classique, de régression locale et de krigeage (Baillargeon C., 2002).

Cinq différentes méthodes ont été retenues pour évaluation et vont être brièvement décrites afin d'en avoir une appréciation globale, car ces dernières sont largement détaillées dans la littérature spécialisée et l'objet de cet article n'est pas d'en faire une présentation exhaustive. Ces cinq méthodes ont été choisies afin de couvrir l'ensemble des fondements théoriques des techniques d'interpolation spatiale. **Il s'agit de la méthode de l'inverse des distances et de la méthode des splines pour les techniques déterministes, et des méthodes de régression globale, de régression locale, et de krigeage pour ce qui concerne les techniques stochastiques.**

- Méthode de l'inverse des distances :

La méthode de l'inverse des distances est la méthode barycentrique la plus employée. Elle attribue à chaque pluviomètre une pondération inversement proportionnelle à la distance entre celui-ci et le point à estimer. Les surfaces obtenues sont continues et interpolent exactement les données (**figure 1**). Cependant, cette méthode présente de nombreux inconvénients car elle ne tient pas compte de la configuration géométrique des sites d'observations entre eux (uniquement la distance entre le pluviomètre et le point à estimer est utilisée), et fournit des cartes d'interpolation en «œil de bœuf» autour des pluviomètres. En outre, les valeurs interpolées sont toujours comprises entre les valeurs minimales et maximales

pluviométriques, ce qui peut s'avérer être un désavantage lorsque le réseau ne fournit pas de points de mesure situés aux limites du domaine d'observation pris en considération (Arnaud M., et al., 2000).

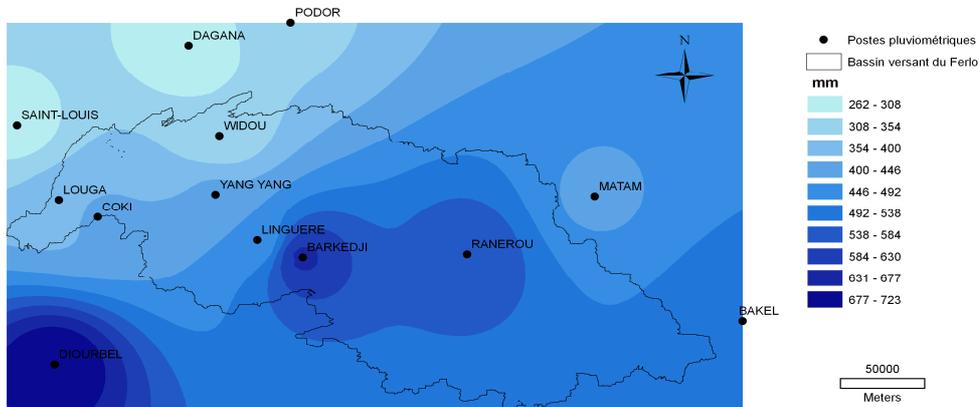


Figure 1 : Hauteur totale d'eau précipitée (mm) pour l'année 2005 par la méthode de l'inverse des distances sur le Ferlo

▪ Spline :

Une spline est une règle souple utilisée en dessin et en cartographie afin de tracer des courbes lisses passant par des points préalablement positionnés. En mathématiques, spline est une famille de fonctions régulières minimisant en général l'énergie de flexion sous des contraintes d'ajustement à des données ponctuelles. Deux catégories de fonctions splines peuvent être identifiées. La première regroupe les splines d'interpolation qui passent exactement par les valeurs observées aux pluviomètres et fournissent ainsi une interpolation exacte, et les splines de lissage qui passent aux environs de ceux-ci, à utiliser quand les valeurs pluviométriques sont connues avec une certaine imprécision (interpolation inexacte) (Arnaud M., 2002). Pour ces différentes raisons, seules les splines d'interpolation seront utilisées dans cet article (**figure 2**).

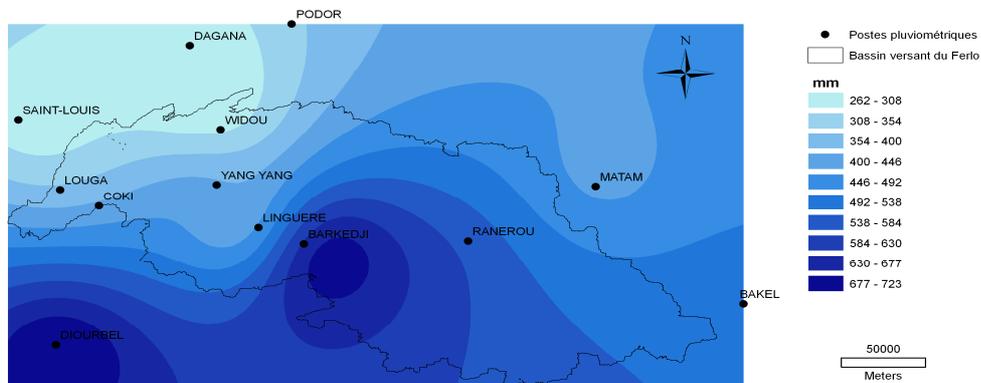


Figure 2 : Hauteur totale d'eau précipitée (mm) pour l'année 2005 par la méthode des splines sur le Ferlo

- Interpolation par régression classique :

L'interpolation par régression classique (ou globale) est une méthode stochastique qui suppose que la variable régionalisée étudiée est une fonction aléatoire (bien que certains auteurs comme Arnaud M., et Emery X., (2000) considèrent cette méthode comme déterministe). Cette interpolation consiste à ajuster une surface aux données pluviométriques (valeurs régionalisées) observées. Cette méthode s'apparente à une technique de lissage spatial qui élimine les variations locales pour retenir une surface plutôt lisse qui rend compte au mieux de la variabilité spatiale globale de la distribution pluvieuse (**figure 3**). C'est pourquoi ce modèle de régression est fréquemment appelé «surface de tendance» (*trend surface*). L'interpolation par régression classique est approximative et globale, car la surface interpolée générée ne passe pas forcément par les points d'observation (interpolation inexacte), et tous les sites d'observation, même ceux éloignés, vont influencer avec le même poids l'estimation en n'importe quel point de la zone d'étude (Baillargeon C., 2002). L'interpolation par régression classique est à son avantage lorsque les surfaces considérées changent lentement et graduellement.

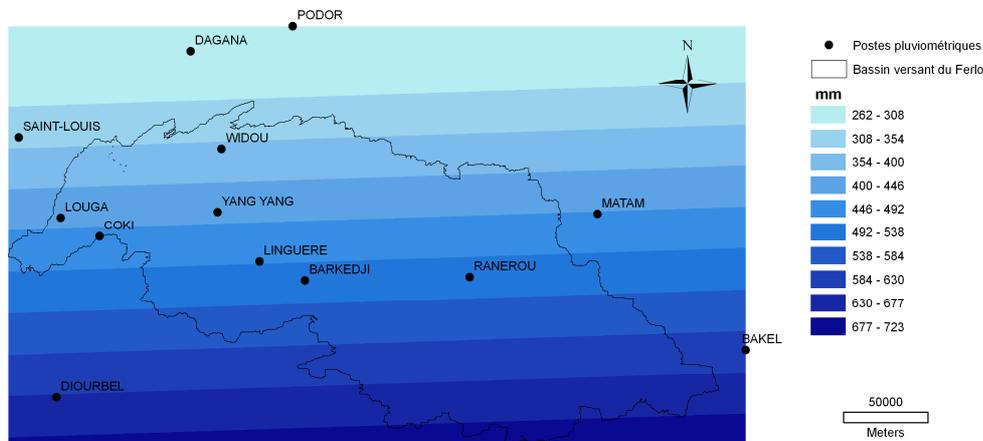


Figure 3 : Hauteur totale d'eau précipitée (mm) pour l'année 2005 par régression classique sur le Ferlo

- Interpolation par régression locale :

L'interpolation par régression classique permet d'être ajustée afin de diminuer l'impact des observations éloignées sur un point considéré, et ainsi fournir en théorie une interpolation plus efficace. Il s'agit alors d'une interpolation par régression locale, encore appelée «régression kernel» ou «régression pondérée géographiquement» (**figure 4**). De ce fait, plus

une valeur régionalisée a été mesurée loin du point à estimer, moins celle-ci a d'influence, et cela jusqu'à un certain éloignement à déterminer où elle n'aura plus d'impact du tout (Baillargeon C., 2002).

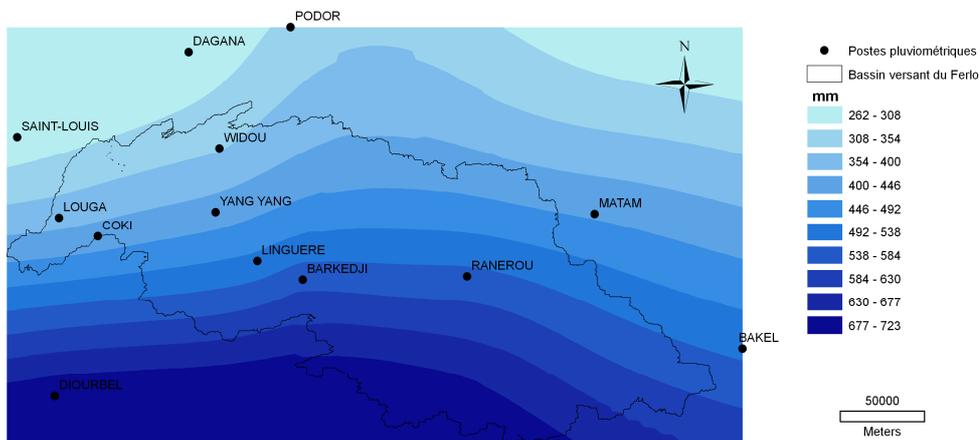


Figure 4 : Hauteur totale d'eau précipitée (mm) pour l'année 2005 par régression locale sur le Ferlo

- Krigeage ordinaire:

Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale stochastique qui tient compte à la fois de la configuration géométrique des points observés et de la structure spatiale propre à la variable estimée, à la différence des interpolations par régression. De nombreuses formes de krigeage ont été développées bien que le krigeage ordinaire soit le plus utilisé (**figure 5**). En règle générale, l'interpolation spatiale par krigeage se construit en cinq temps : analyse exploratoire, choix du type de krigeage, analyse et modélisation du variogramme, réalisation des interpolations puis évaluation des estimations par une validation croisée. La mise en oeuvre du krigeage est extrêmement complexe et a été étudiée en profondeur dans la littérature spécialisée, ainsi l'objet de ce texte n'est pas d'en faire une explication détaillée. En théorie, le krigeage générerait les interpolations spatiales les plus justes et serait la méthode d'estimation la plus efficace (Arnaud M., et *al.*, 2000). C'est donc ce que cet article va confirmer ou contredire, en comparant cette méthode aux quatre autres précitées, sur des échantillons de pluie qui vont maintenant être détaillés.

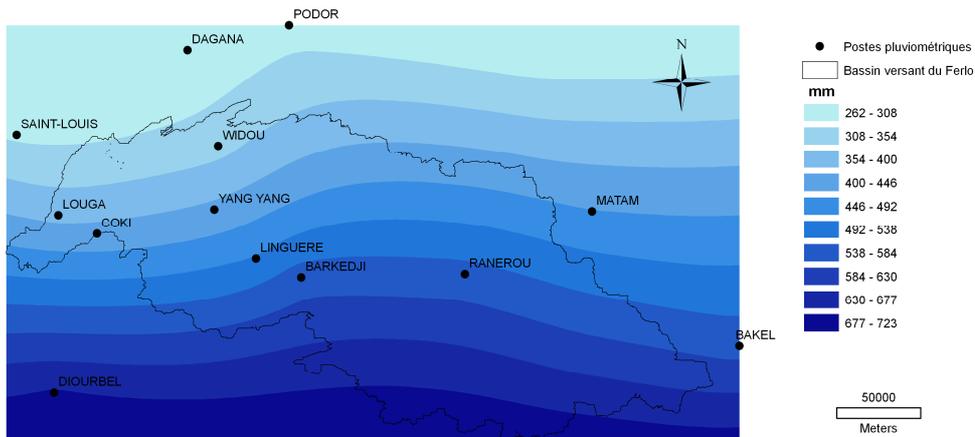


Figure 5 : Hauteur totale d'eau précipitée (mm) pour l'année 2005 par krigeage ordinaire sur le Ferlo

1.2 - Deux échantillons de pluies analysés pour une évaluation complète

L'évaluation des cinq méthodes d'interpolation spatiale porte sur la réalisation de cartes fondées sur les cumuls pluvieux annuels. Afin d'avoir un ensemble de résultats représentatifs, ces interpolations sont effectuées sur les hauteurs d'eau cumulées annuelles de l'année 1988 à l'année 2005, soit 18 années différentes. Cependant, ces cumuls annuels ont une distribution pluvieuse dont le gradient change lentement et graduellement. Or, il a été expliqué que certaines méthodes comme la régression classique sont à leur avantage dans ce genre de configuration, c'est pourquoi un autre échantillon de pluie à forte disparité spatiale pluvieuse et à plus faible volume précipité va être utilisé.

Il s'agit des cumuls mensuels des 10 mois les plus pluvieux des années 1983 et 2005. Ce sont deux années différentes sur le plan des cumuls mensuels pluviométriques car 1983 reste une année très déficitaire au contraire de l'année 2005 très pluvieuse.

Les cinq méthodes d'interpolation spatiale de la pluie sont donc appliquées sur un échantillon de pluies annuelles, et sur un échantillon à disparité spatiale plus importante afin qu'aucune méthode ne se trouve avantagée par rapport à une autre. Pour finir, il convient d'évaluer ces méthodes par un test de validation croisée dont le principe est maintenant détaillé.

1.3 – Principe de l'évaluation par validation croisée

Le but de cet article est de mettre en évidence la méthode d'interpolation spatiale la plus représentative et la plus adaptée aux moyens à disposition concernant le territoire du

Ferlo. Dans cet objectif, une méthode de type *jackknife approach* comparant un échantillon de valeurs de pluie de base à un échantillon de valeurs test lors d'un même épisode pluvieux peut être utilisée (Tomczak K. P. B., 1998). Dès lors, les valeurs de l'échantillon de base servent à estimer les valeurs tests qui sont ensuite comparées aux valeurs observées. Cependant, cette méthode peut être optimisée pour obtenir une évaluation par validation croisée. Cette dernière consiste à réduire l'échantillon test à un seul pluviomètre, le reste des pluviomètres formant l'échantillon de base. Ensuite, à tour de rôle, chaque pluviomètre est utilisé en tant qu'échantillon test, et sa valeur estimée peut ainsi être comparée à sa valeur observée (Baillargeon C., 2002).

L'évaluation des méthodes d'interpolation par validation croisée consiste donc à estimer chaque donnée pluviométrique (échantillon test) en ne tenant compte que des autres données (échantillon de base), puis à comparer la valeur estimée (test) à la valeur observée (Baillargeon C., 2002 ; Arnaud M., et *al.*, 2000). La validation croisée qui permet d'évaluer l'efficacité des méthodes d'interpolation spatiale va être maintenant appliquée sur les échantillons de pluie sélectionnés.

D'une manière concrète, la différence absolue entre valeur observée et valeur estimée a été calculée par validation croisée pour chaque pluviomètre sur les deux échantillons de pluie, et à l'aide des cinq méthodes. Il a ensuite été calculé une erreur absolue moyenne et son écart type pour chaque méthode, sur chaque cumul annuel et chaque cumul mensuel. De ces erreurs absolues moyennes sur chaque situation pluvieuse en a été tirée une erreur d'estimation moyenne globale propre à chaque méthode d'interpolation spatiale, cela pour les deux échantillons de pluie analysés. Ces résultats ainsi que leur interprétation font l'objet de la partie suivante.

2 – Résultats de l'évaluation par validation croisée et observations

Les figures 6 et 7 mettent en évidence les résultats sur les moyennes d'erreurs

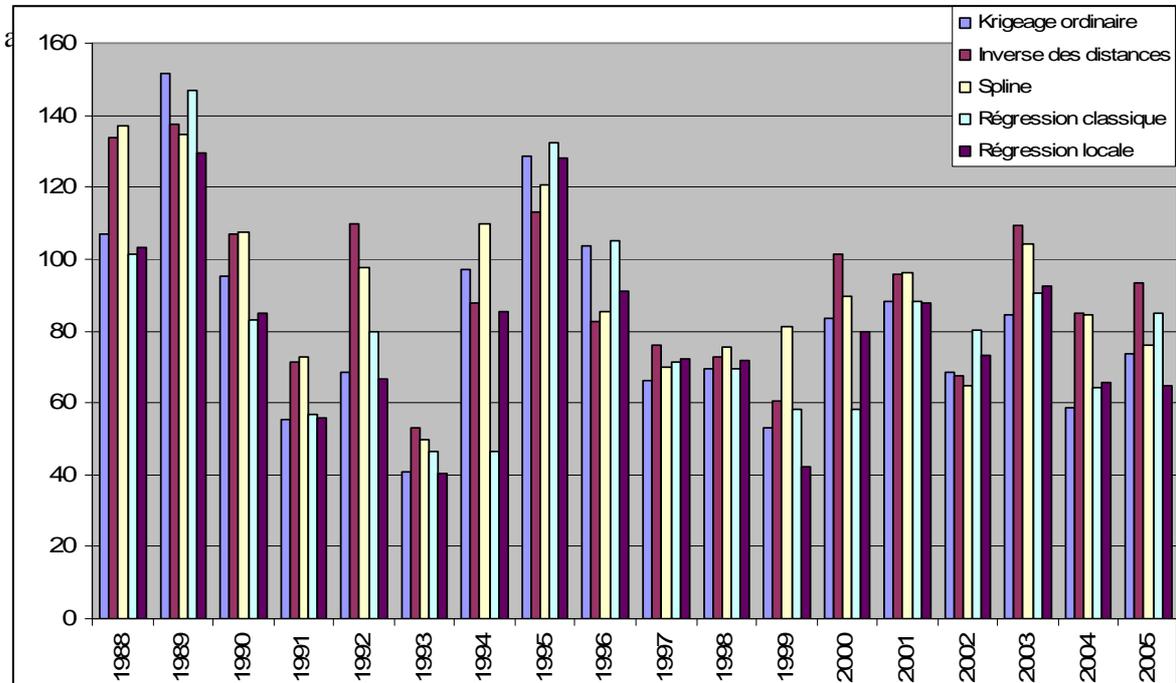


Figure 6 : Moyennes des erreurs absolues (mm) par validation croisée de chaque méthode d'interpolation sur chaque cumul pluvieux annuel sur le Ferlo

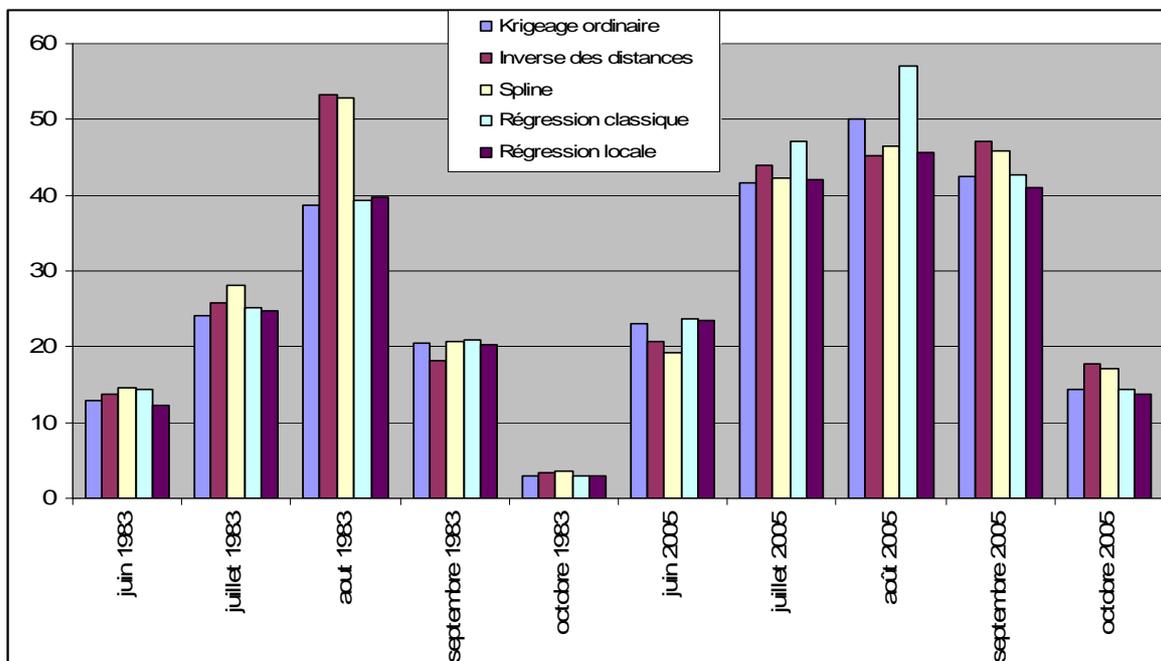


Figure 7 : Moyennes des erreurs absolues (mm) par validation croisée de chaque méthode d'interpolation sur les mois d'hivernage des années 1983 et 2005

Au regard de ces résultats, il est possible d'affirmer que la méthode d'interpolation spatiale qui donne les moyennes d'erreurs les plus faibles sur la période 1988-2005 est la technique de la régression locale avec une moyenne égale à 79,7 mm de précipitations (**tableau 1**). Elle reste sur les cumuls annuels la technique la plus représentative, car sur les 18 années que compte la série, elle enregistre six fois les moyennes d'erreurs absolues annuelles les moins importantes (**figure 6**). Toujours sur cette même période, les méthodes de régression classique (81,3 mm) et de krigeage ordinaire (82,9 mm) viennent juste après la régression locale, même si la différence des moyennes d'erreurs absolues entre ces méthodes reste très faible (**tableau 1**). Nous remarquons par ailleurs que les splines et l'inverse des distances représentent les méthodes qui enregistrent la moyenne d'erreurs absolue annuelle la plus forte avec 92 mm chacune.

	Méthode D'interpolation	Krigeage	Inverse des distances	Spline	Régression classique	Régression locale
Echantillon de pluies	Cumuls annuels de 1988 à 2005	82,9	92	92	81,3	79,7
	Hivernage 1983 cumuls mensuels	19,9	22,8	23,9	20	20,5
	Hivernage 2005 cumuls mensuels	34,3	34,9	34,2	36,9	33,2

Tableau 1 : Erreurs d'estimation moyennes globales (mm) obtenues par validation croisée sur les échantillons de pluies analysées sur le Ferlo

A l'échelle des saisons d'hivernage de 1983 et de 2005, les écarts entre les moyennes d'erreurs d'estimation globale des différentes méthodes sont presque insignifiants. En effet, au cours de la saison des pluies de 1983 dans le Ferlo, les résultats de la validation croisée mettent le krigeage ordinaire et la technique de régression classique respectivement en première et deuxième position (19,9 mm et 20 mm de moyennes d'erreurs globales, **tableau 1**). La moyenne d'erreur la plus forte est enregistrée par la méthode des splines dans cette saison de l'année 1983.

En ce qui concerne la saison des pluies de l'année 2005, on remarque encore que les méthodes se valent car les écarts se situent aux environ d'1 mm. Il est quand même intéressant

de signaler la position de la méthode des splines qui est cette fois-ci la deuxième méthode aux erreurs d'estimation globale la plus faible avec 34,2 mm, derrière la régression locale qui occupe encore une fois la meilleure position avec 33,2 mm.

La différence entre les valeurs à chaque épisode pour les cinq méthodes est relativement encore plus faible. Lorsque l'on examine les erreurs d'estimation moyennes globales, il ressort que la méthode fournissant globalement les estimations les plus justes est l'interpolation par les spline (7,4 mm d'erreur absolue moyenne globale), suivie de près par les techniques de krigeage ordinaire (7,7 mm) et de l'inverse des distances (7,9 mm).

3.2 - Analyse et comparaison des méthodes d'interpolation sur les deux zones d'étude

D'une manière globale, il peut être constaté que les techniques d'interpolation spatiale donnent des résultats très satisfaisants sur la zone du Ferlo. Les erreurs d'estimation dépassent rarement 100 mm quelque soit la méthode pour les cumuls annuels sur la zone du Ferlo, avec des hauteurs d'eau précipitées pouvant aller jusqu'à 700 mm dans la partie sud. Les différences d'estimation concernant les hivernages sont encore plus faibles, et l'on assiste à une quasi-homogénéité de l'efficacité des méthodes. Il est donc intéressant de remarquer qu'il est très difficile d'établir un palmarès entre les méthodes, presque chacune d'entre elles se révélant la plus efficace sur un des échantillons testés. Par exemple, la technique de krigeage ordinaire se classe en tête pour interpoler les mois d'hivernage de 1983 du Ferlo, mais c'est la régression locale qui est la plus satisfaisante en ce qui concerne les cumuls annuels et les mois d'hivernage de l'année 2005 (**tableau 1**).

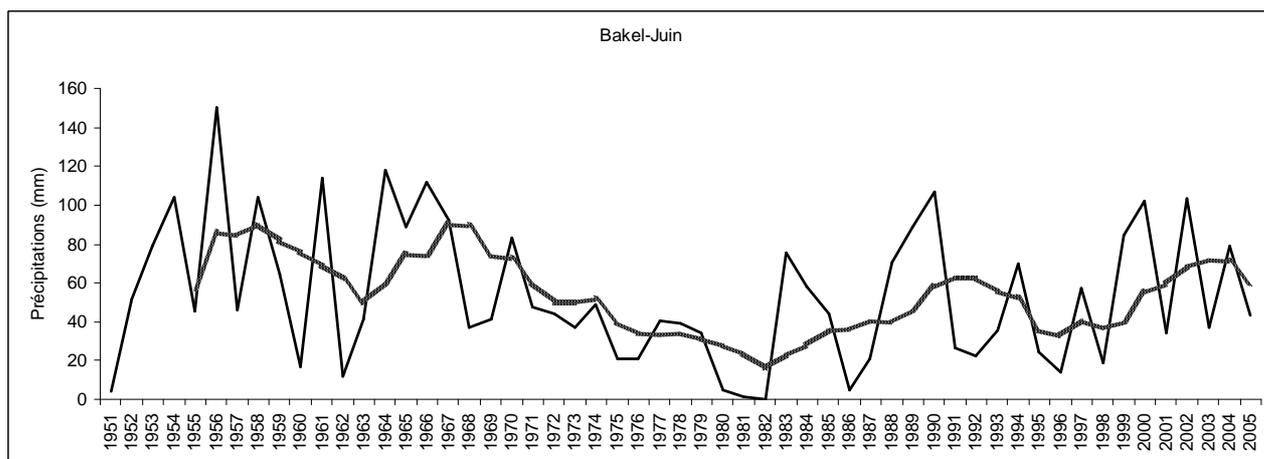
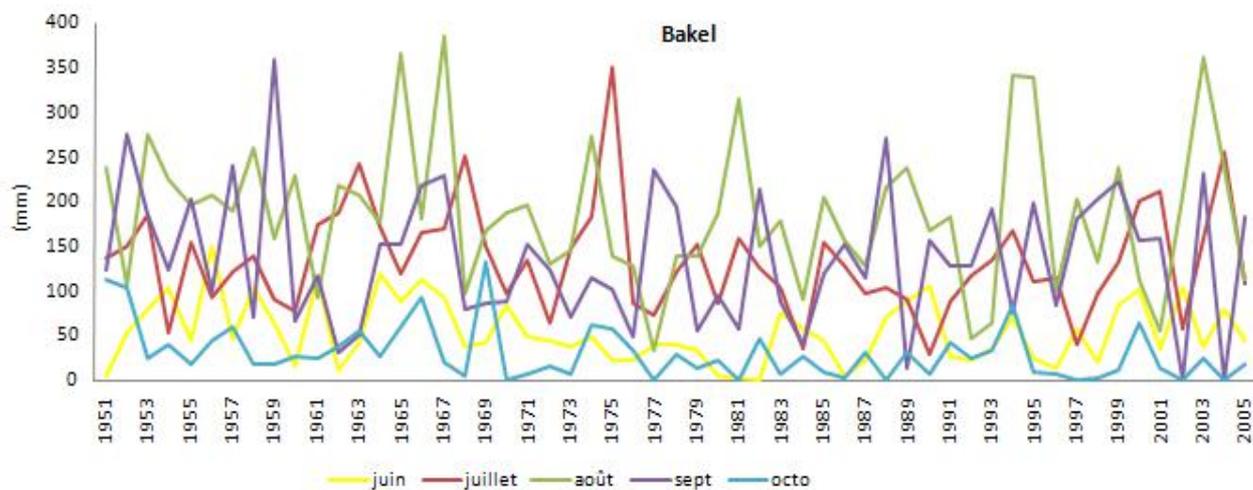
A efficacité pratiquement semblable, un des facteurs à prendre en compte lors du choix de l'utilisation d'une méthode ou d'une autre est la complexité et le temps passé à sa réalisation. En effet, pour exemple, les méthodes de régression sont beaucoup plus simples et rapide à mettre en œuvre que les techniques de krigeage. Lors de la désignation d'utilisation d'une méthode d'interpolation, il convient donc de prendre en compte son efficacité mais aussi sa complexité de mise en œuvre et sa rapidité d'utilisation.

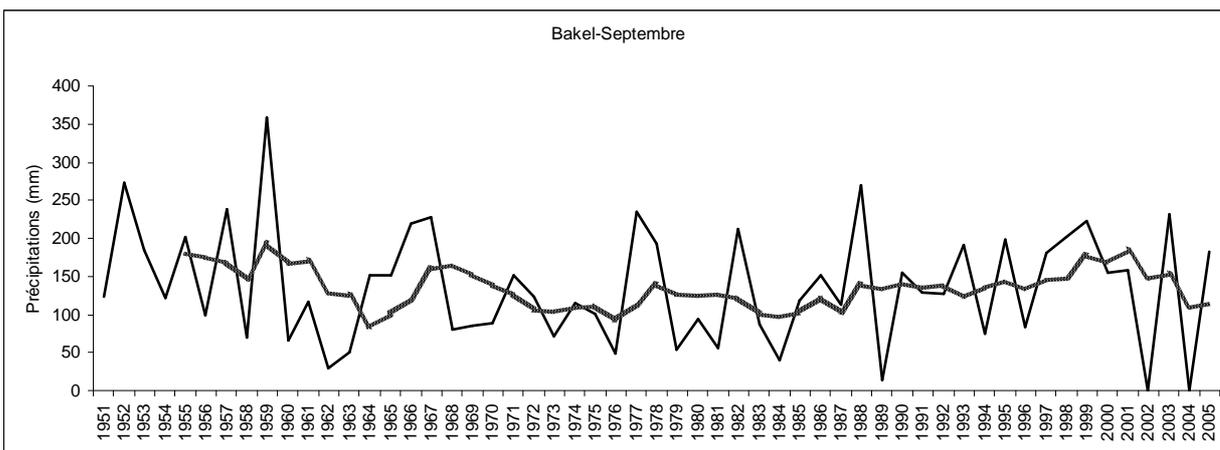
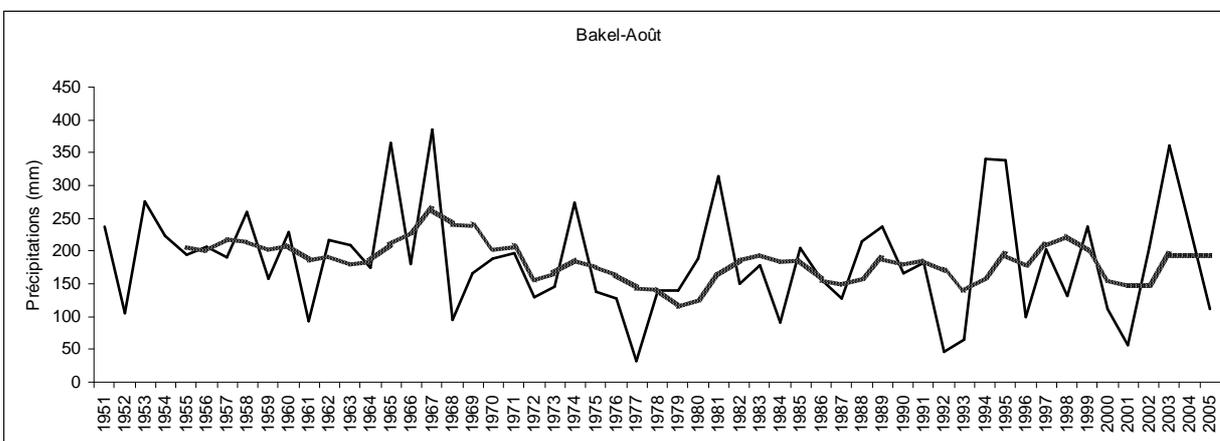
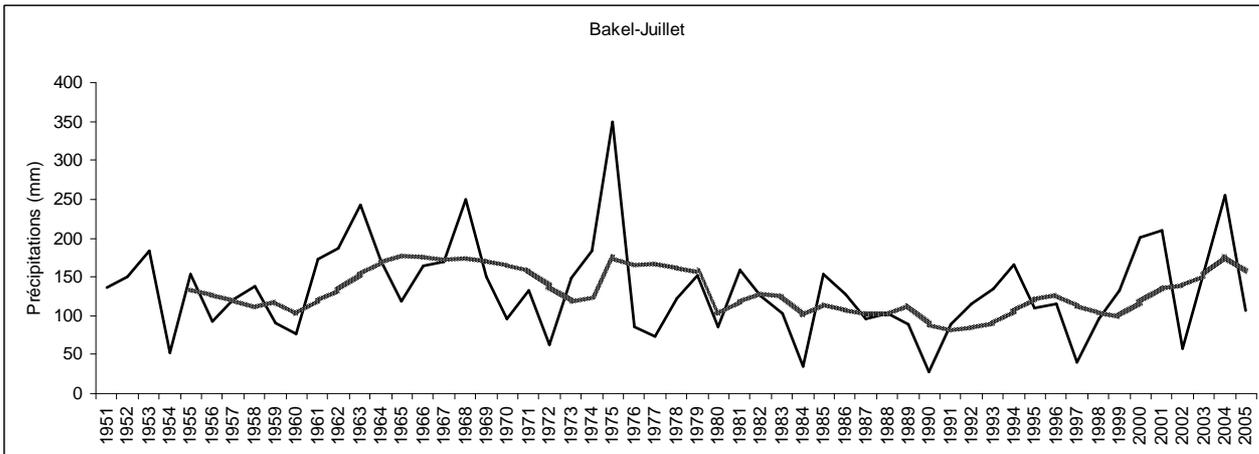
Conclusion

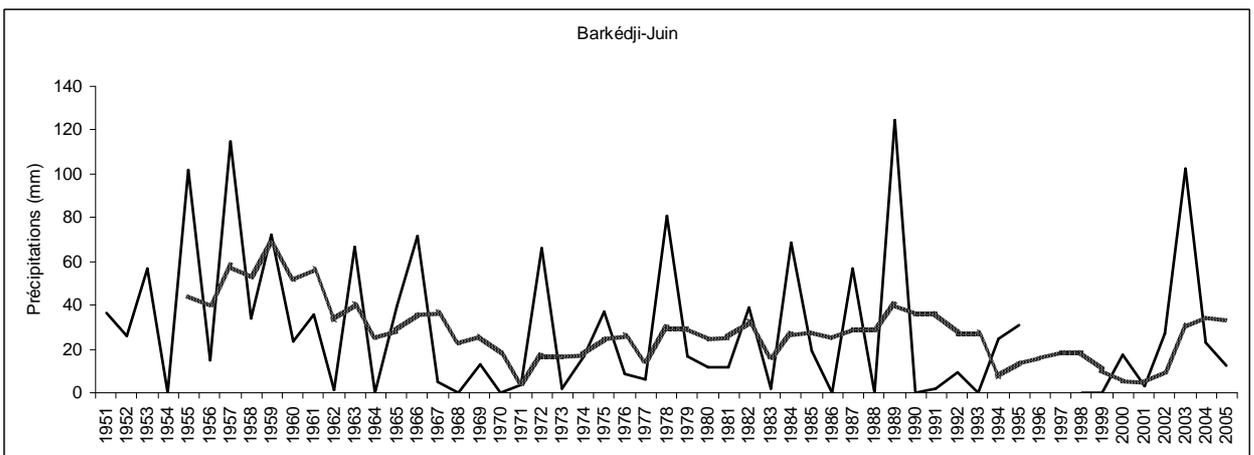
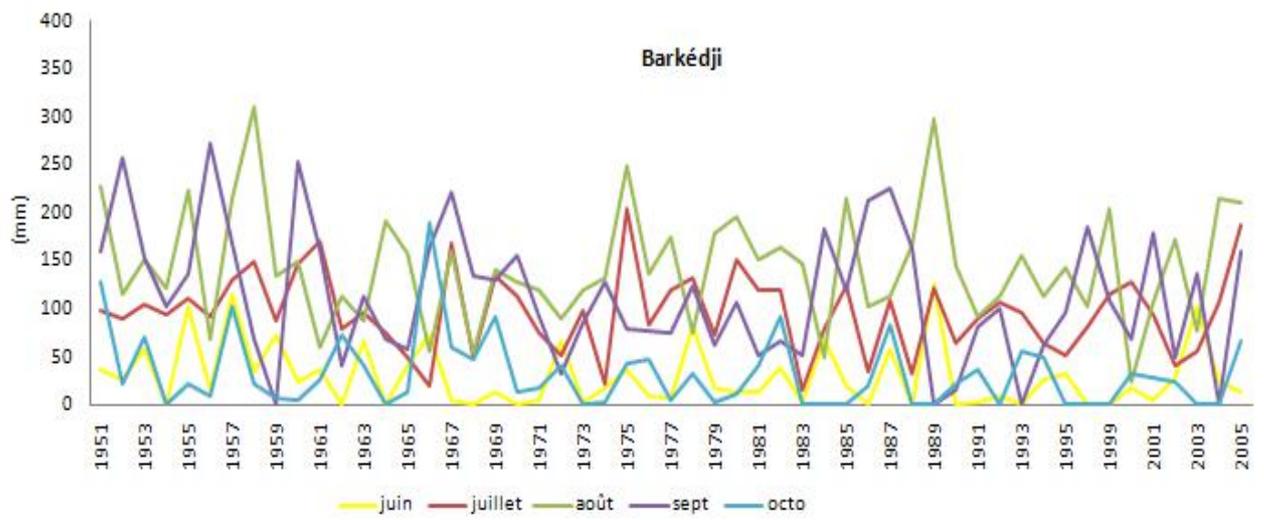
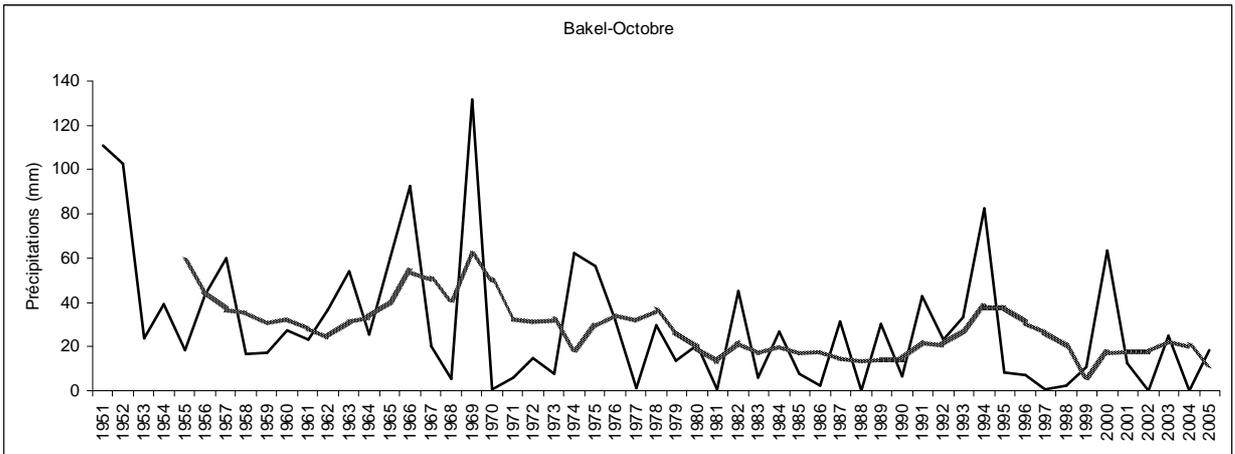
La connaissance fine de la distribution pluviométrique est une nécessité majeure, et cela, quelles que soient les applications de cette compréhension. Elle est notamment nécessaire au Ferlo situé en zone climatique de type sahélien.

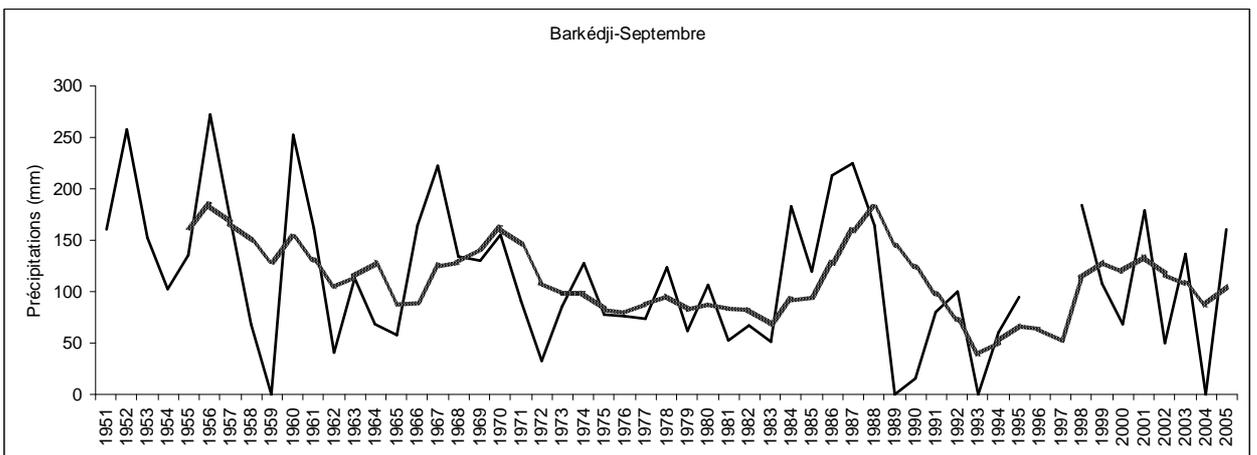
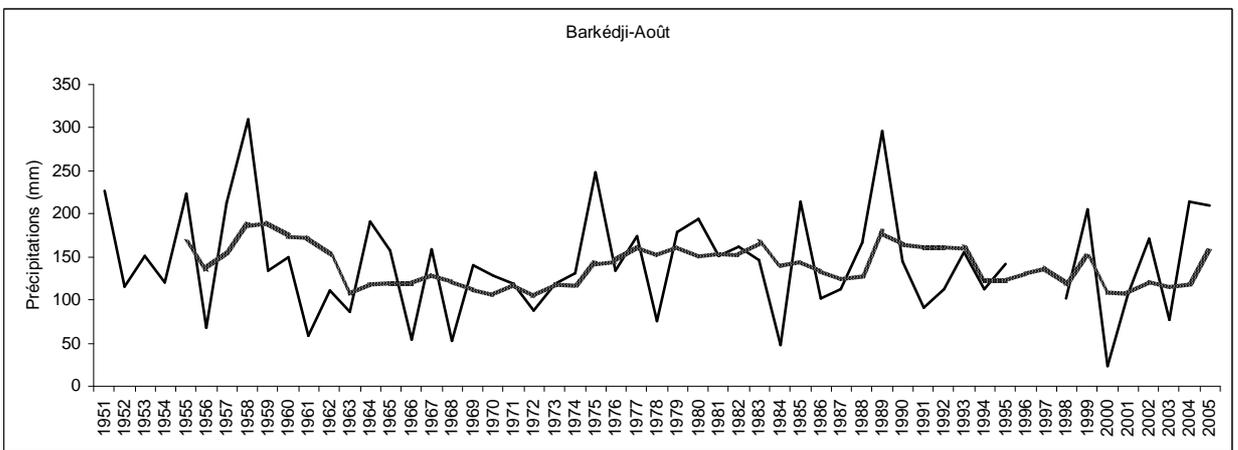
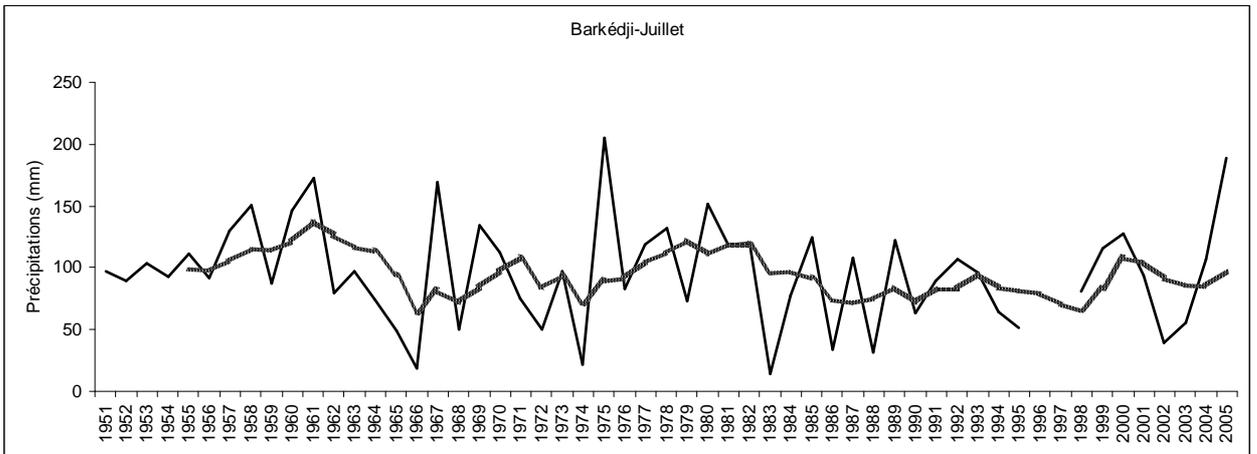
Cette étude a donc eu pour but de comparer un grand nombre de méthodes d'interpolation spatiale, déterministes et stochastiques, afin de valider l'utilisation d'une d'elles pour les besoins des cartes d'interpolation de la pluie produites dans ce document. Il en est ressorti qu'aucune méthode ne se dégageait particulièrement par rapport à une autre, des méthodes efficaces pour certains échantillons de pluies se révélant décevantes pour d'autres, comme par exemple la méthode des splines. Il est aussi intéressant de remarquer que les méthodes déterministes offrent des résultats semblables aux méthodes stochastiques, malgré l'avantage présumé de ces dernières qui modélisent le phénomène pluvieux par une fonction aléatoire. Dans cette optique, le choix de l'utilisation de l'une ou de l'autre n'est pas uniquement conditionné par l'efficacité de la méthode, mais la complexité de mise en œuvre et sa rapidité en font autant de critères de sélection à prendre en compte. N'empêche que c'est la méthode de krigeage ordinaire qui a été utilisée pour la production de nos cartes de spatialisation de la pluviosité dans le bassin versant du Ferlo.

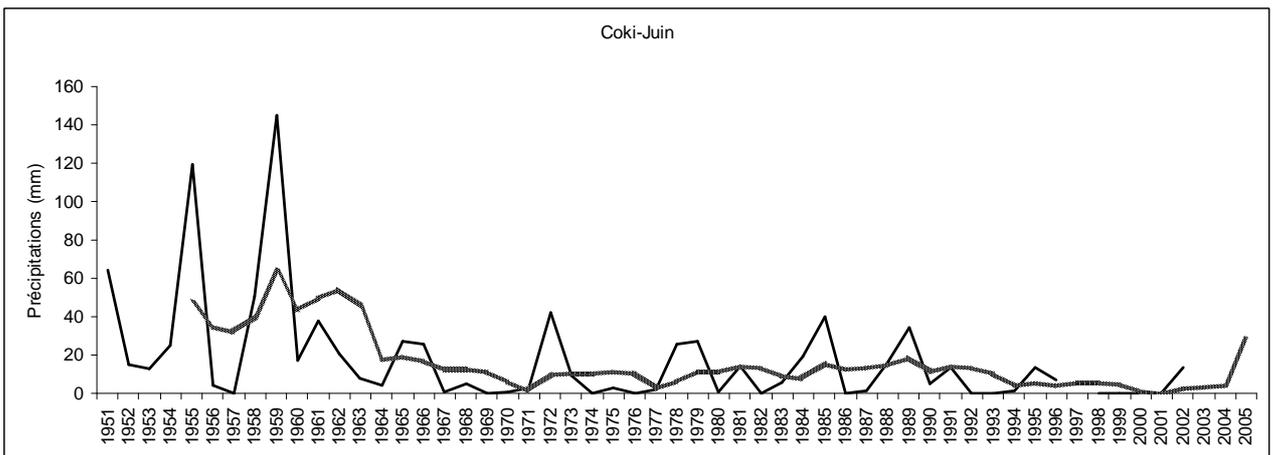
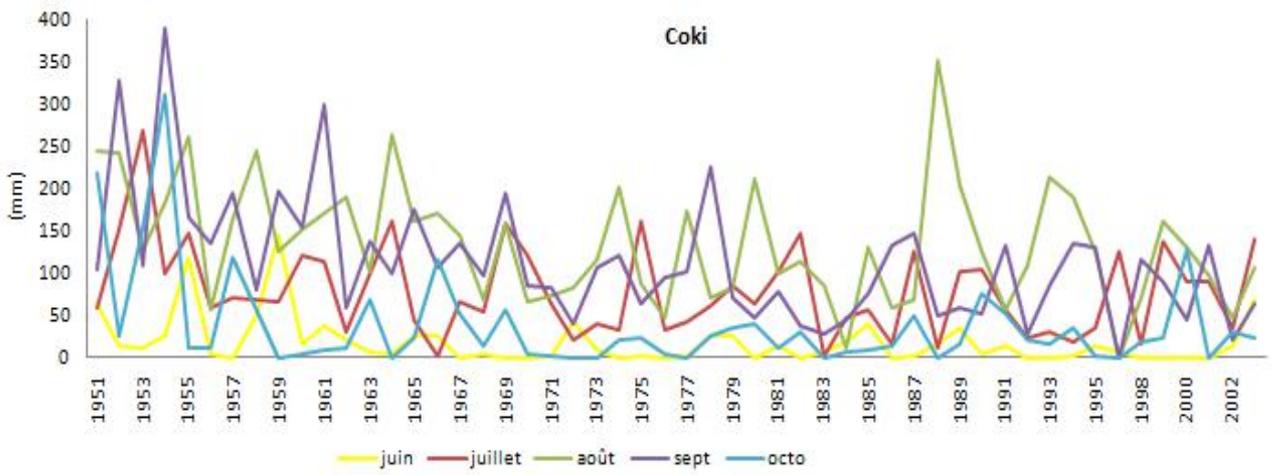
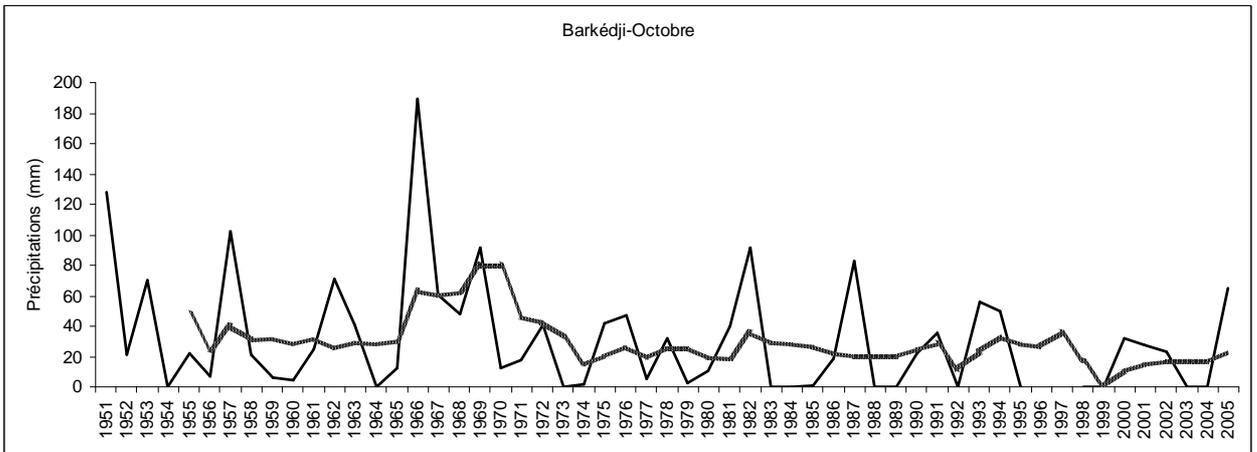
ANNEXES 3 : LES COURBES D'ÉVOLUTION INTERANNUELLE DES MOIS DE LA SAISON DES PLUIES ENSEMBLE D'ABORD ET SÉPARÉES ENSUITE (DOUBLÉES D'UNE COURBE DES MOYENNES MOBILES SUR 3 ANS) DES VOLUMES PRÉCIPITÉS DE CHAQUE STATION SUR LA PÉRIODE 1951- 2005

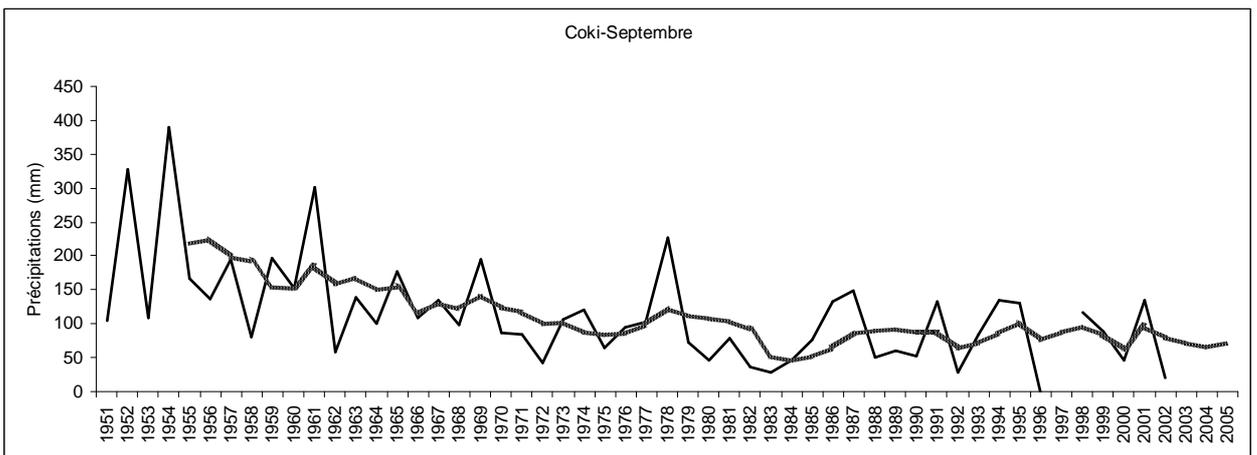
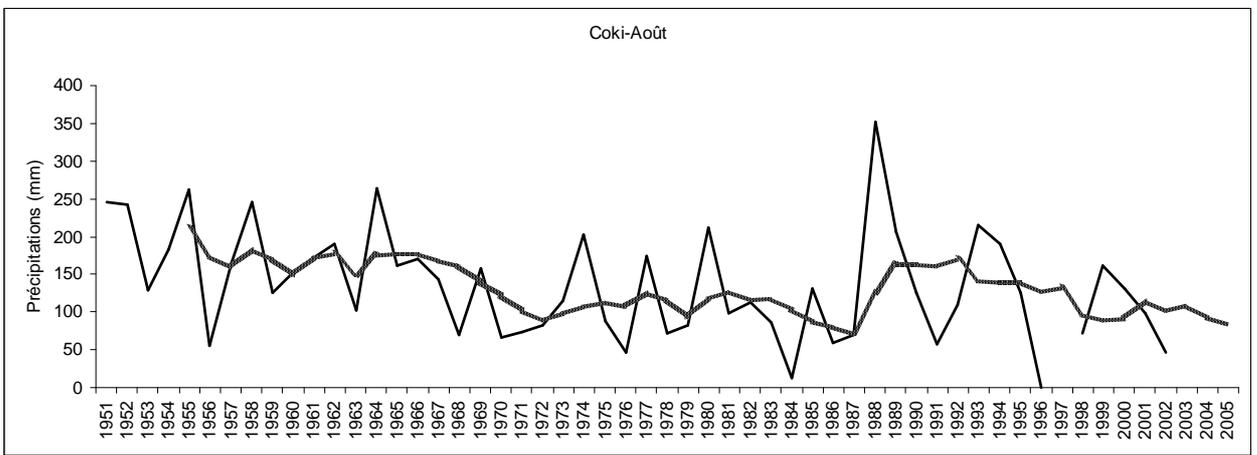
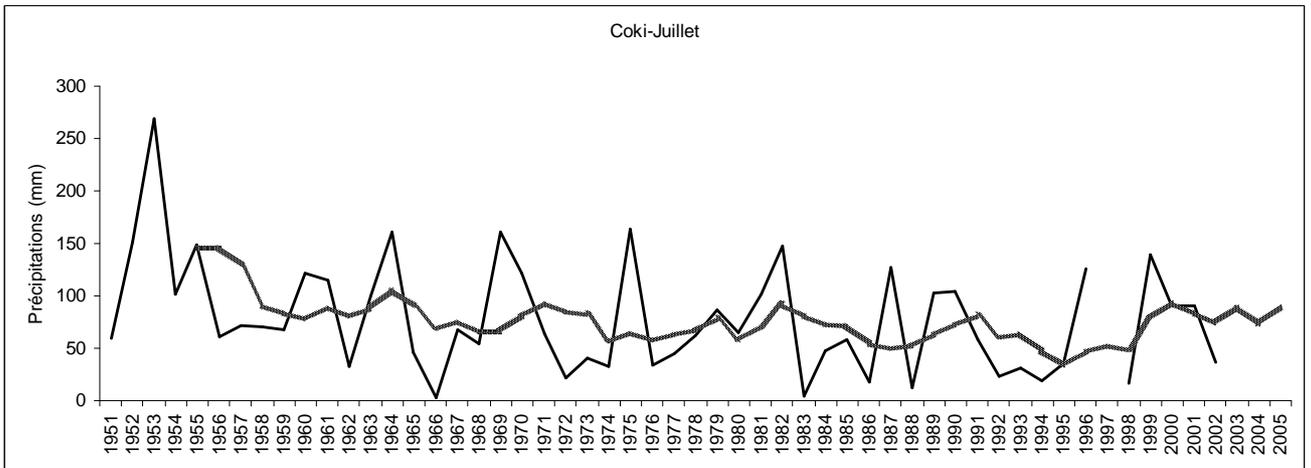


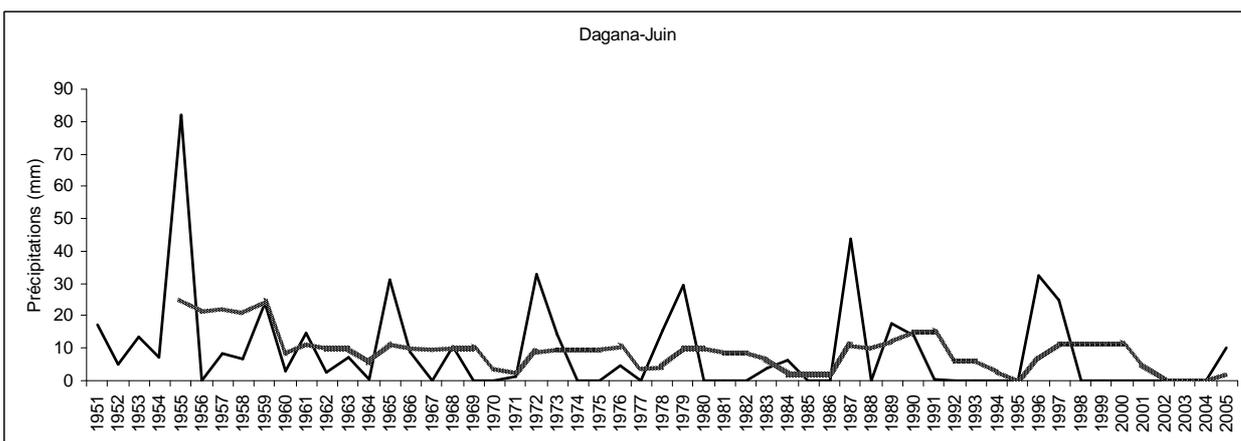
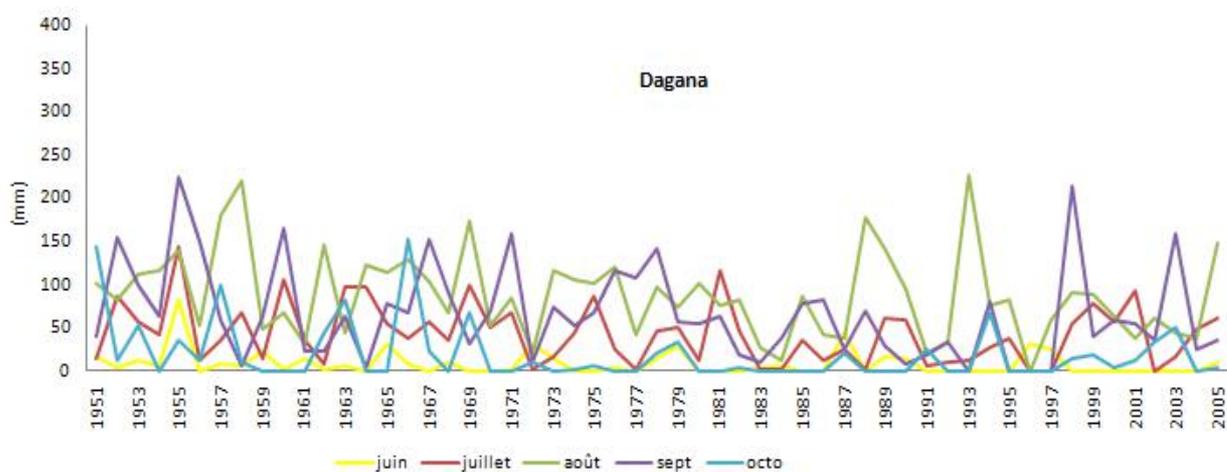
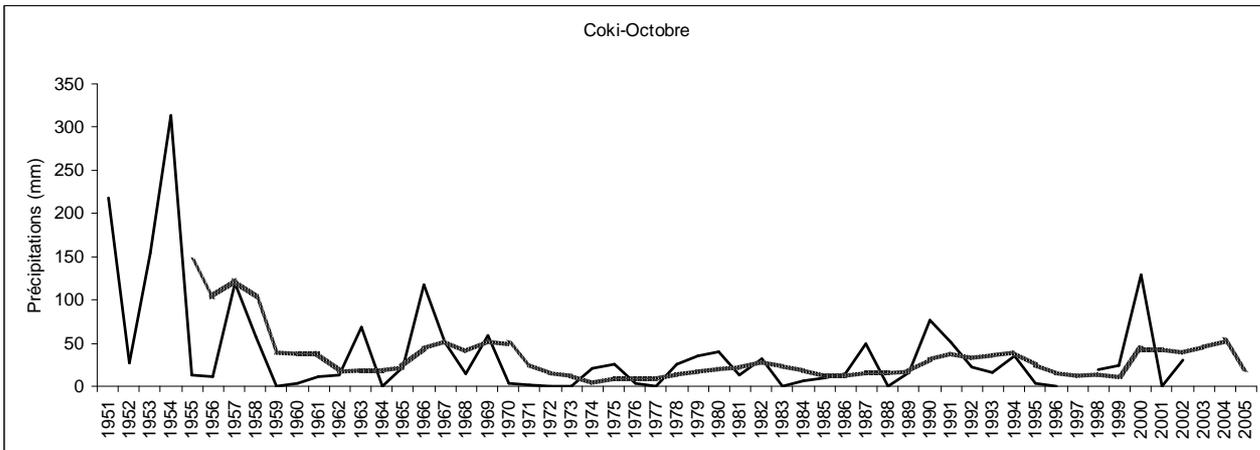


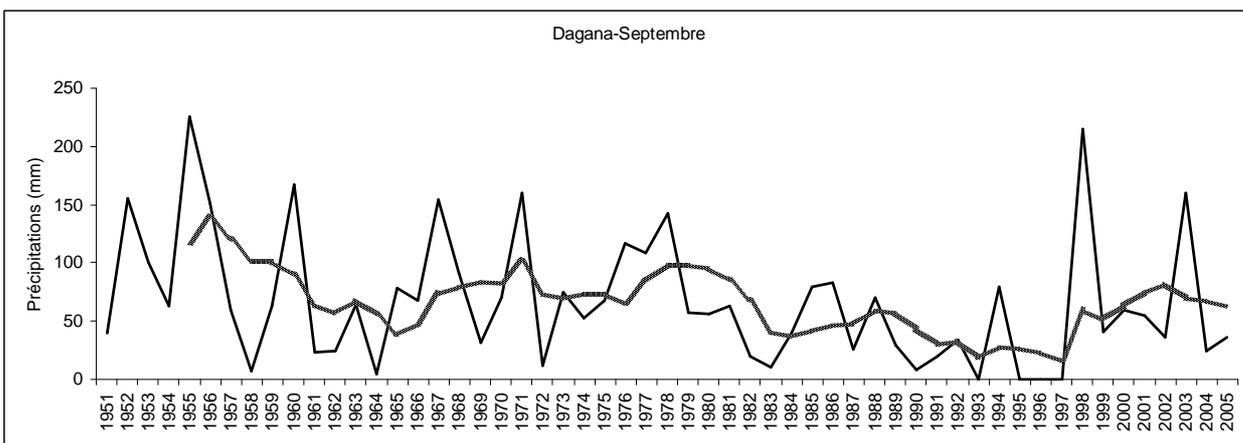
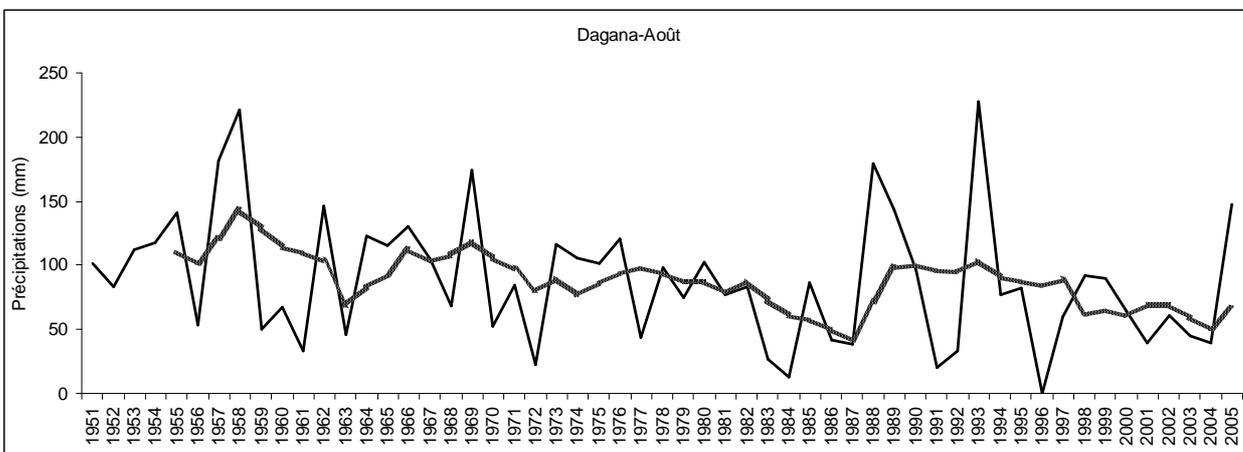
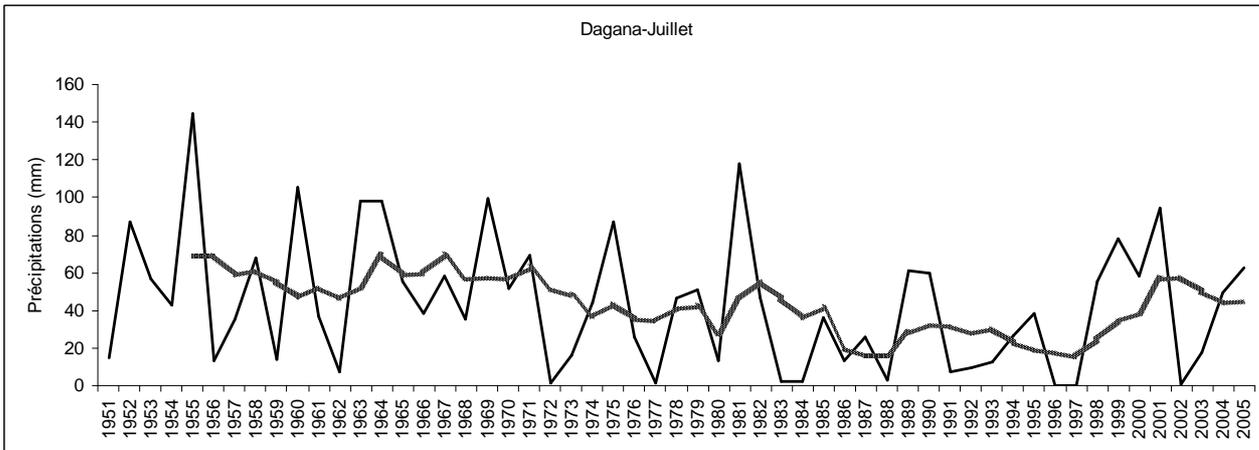


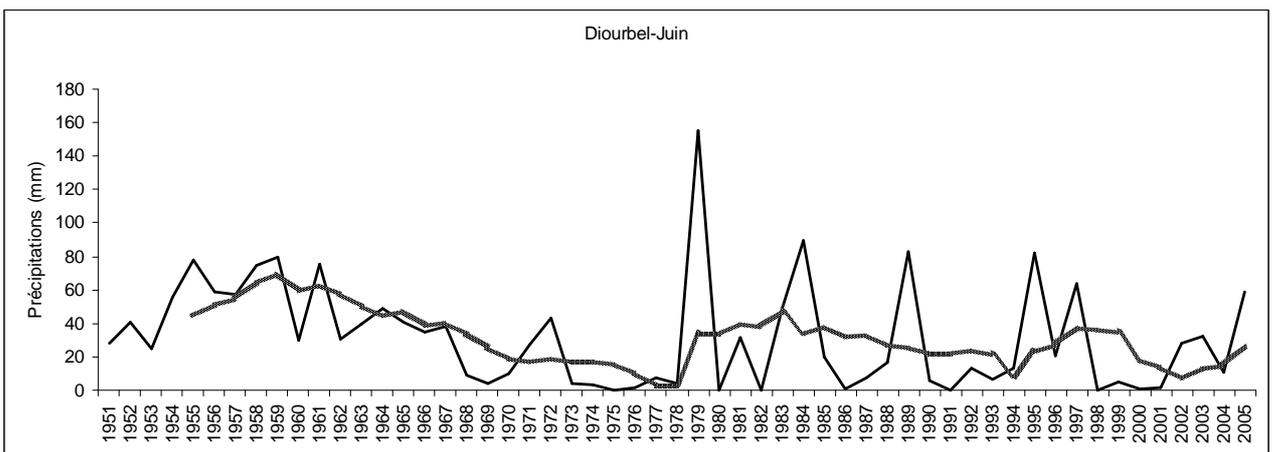
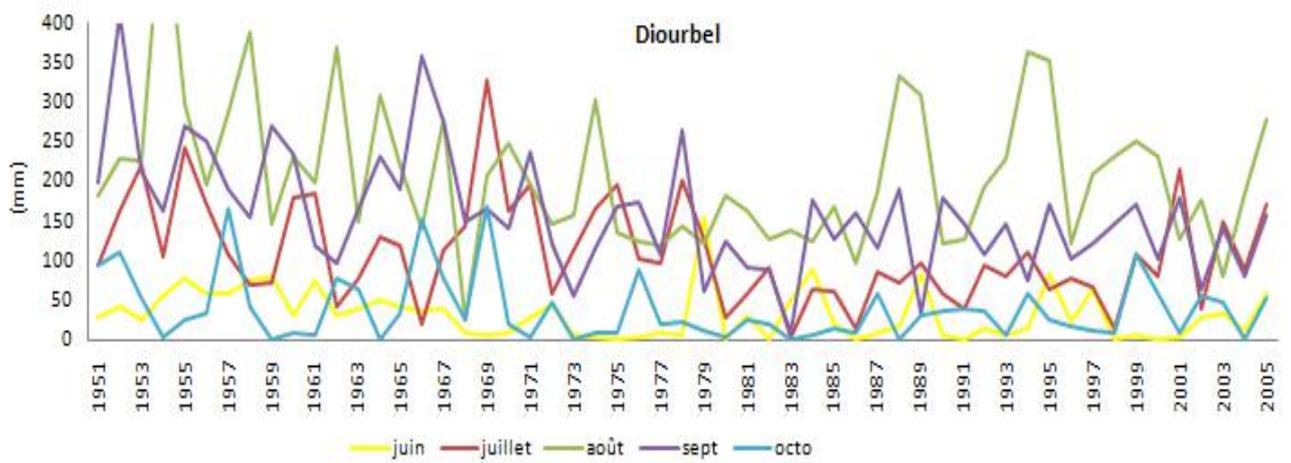
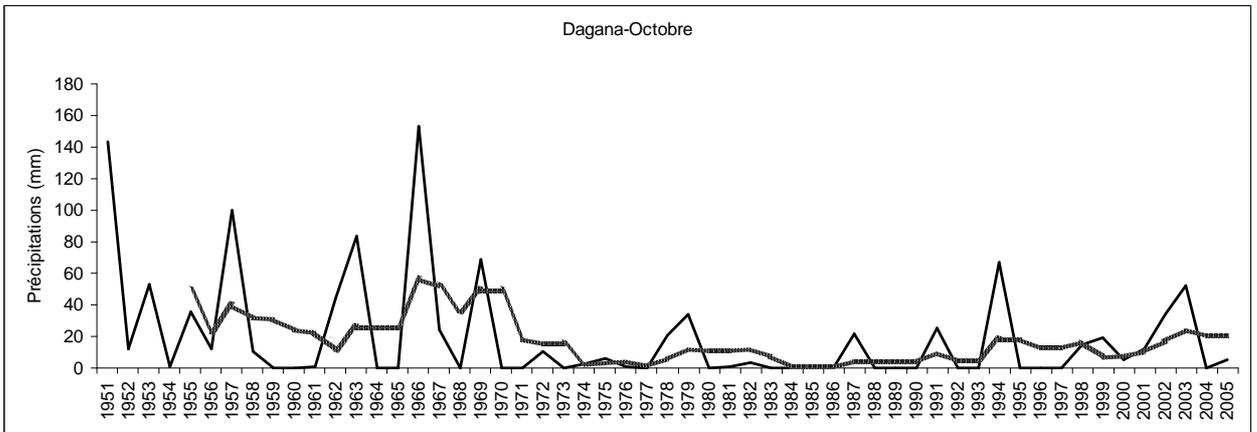


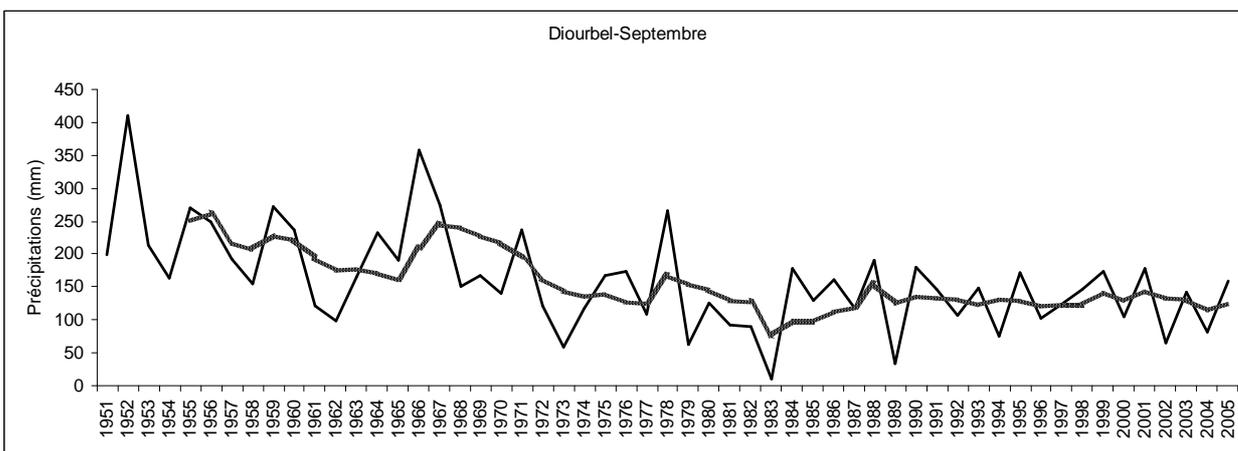
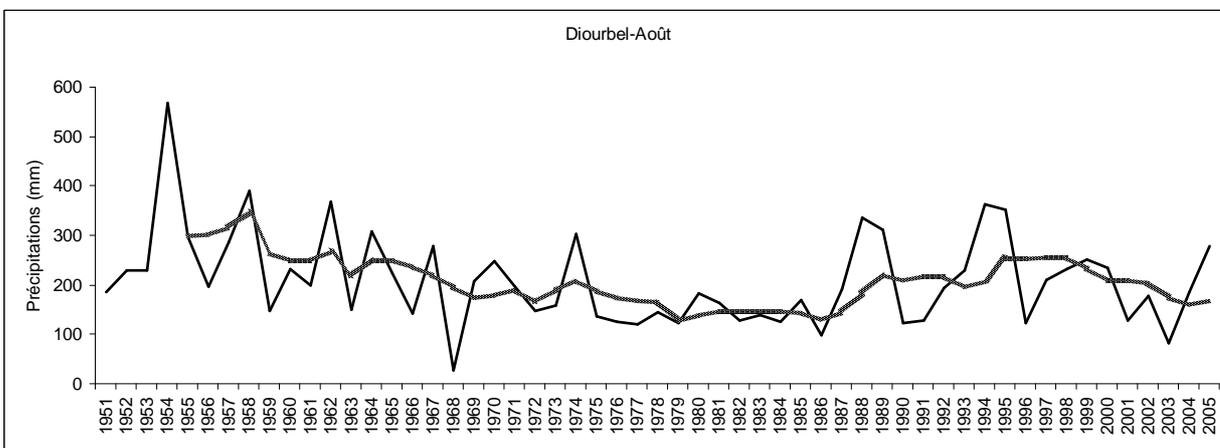
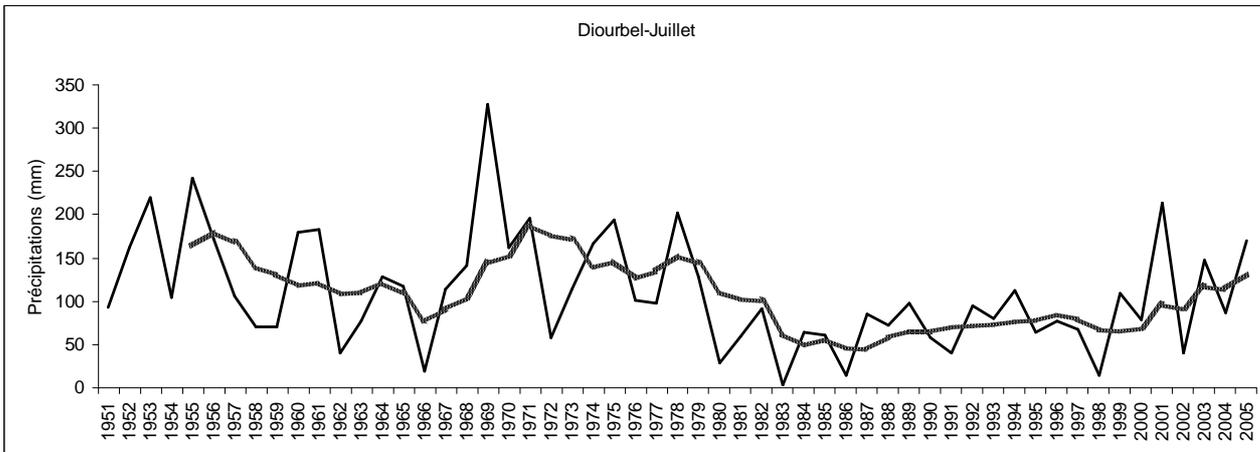


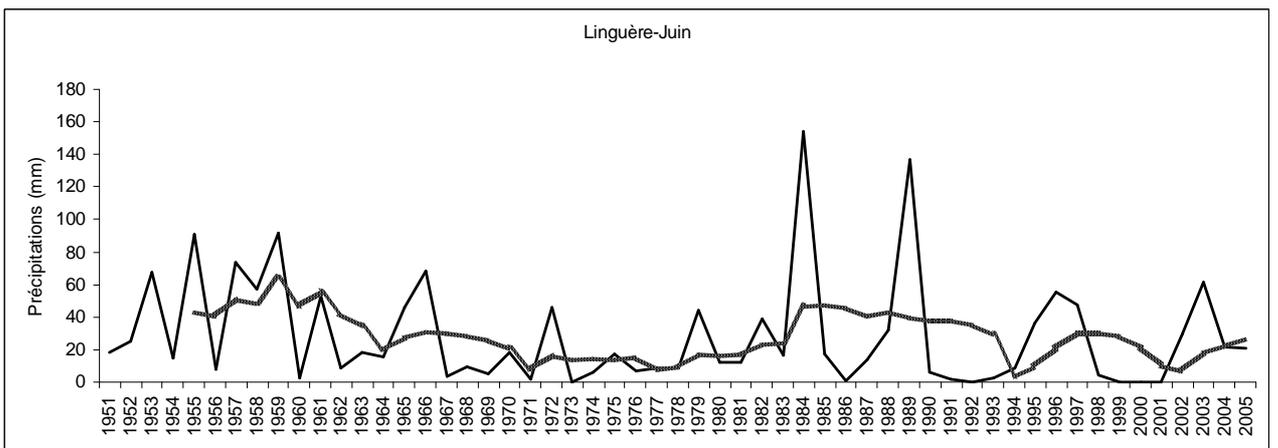
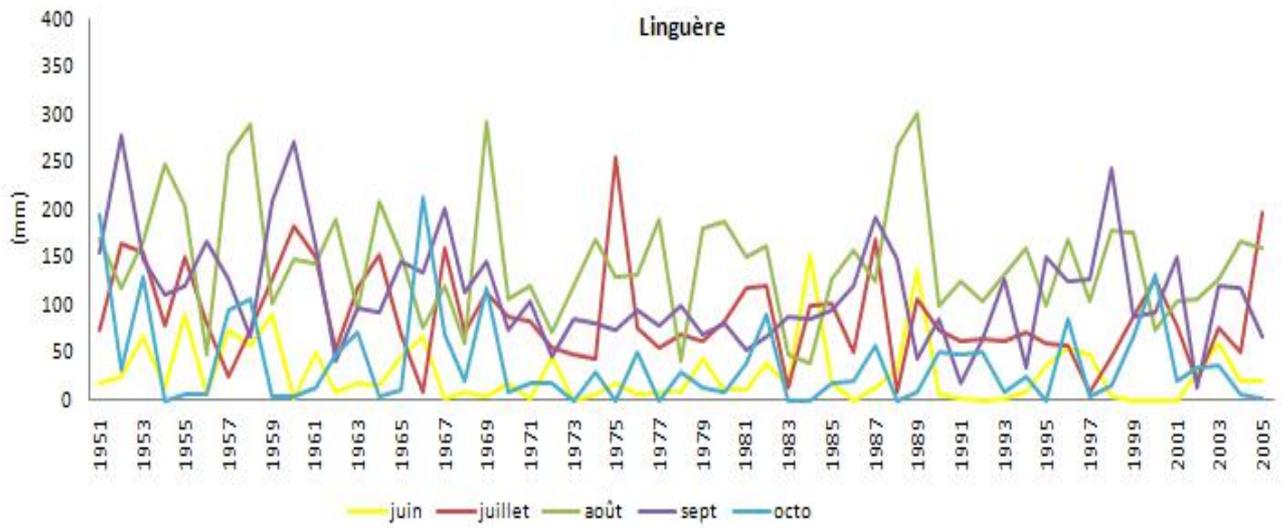
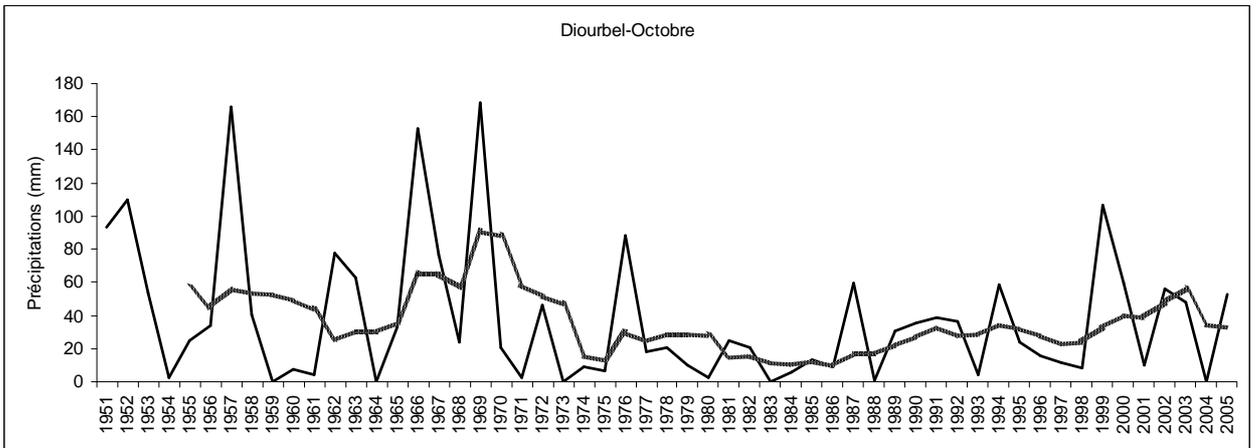


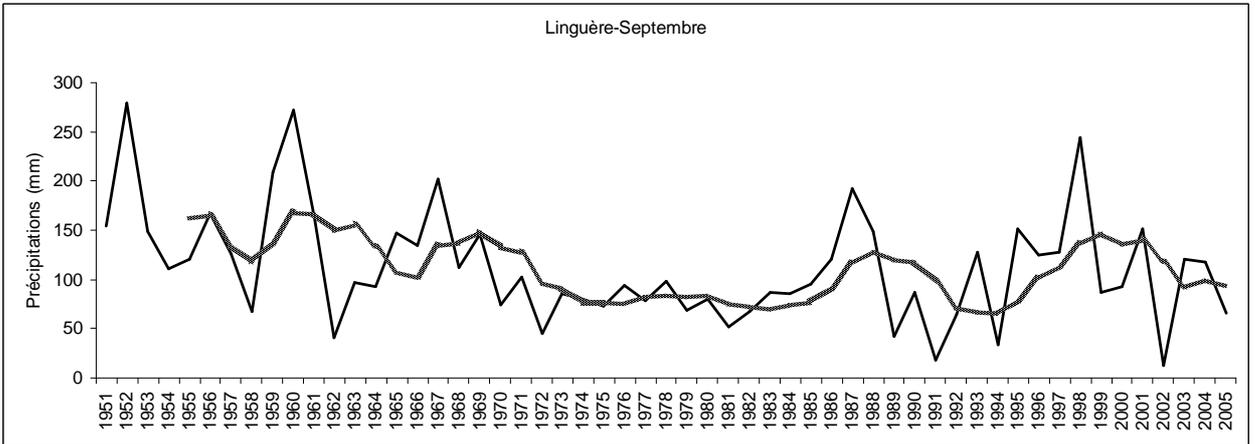
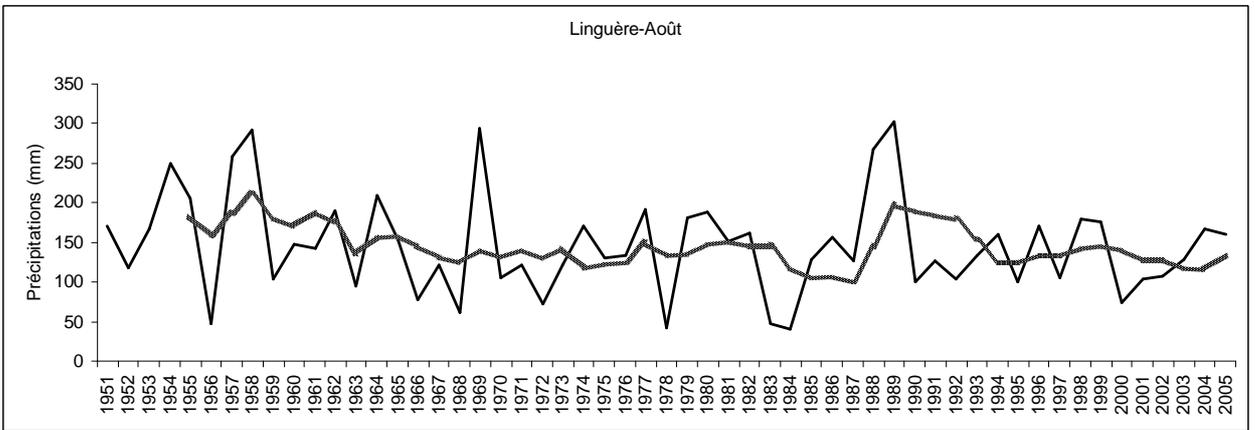
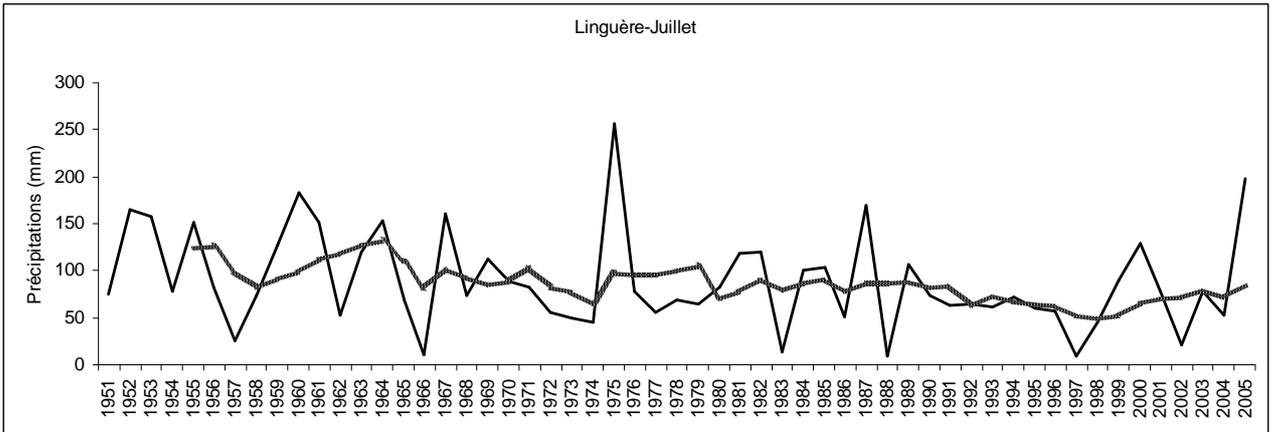


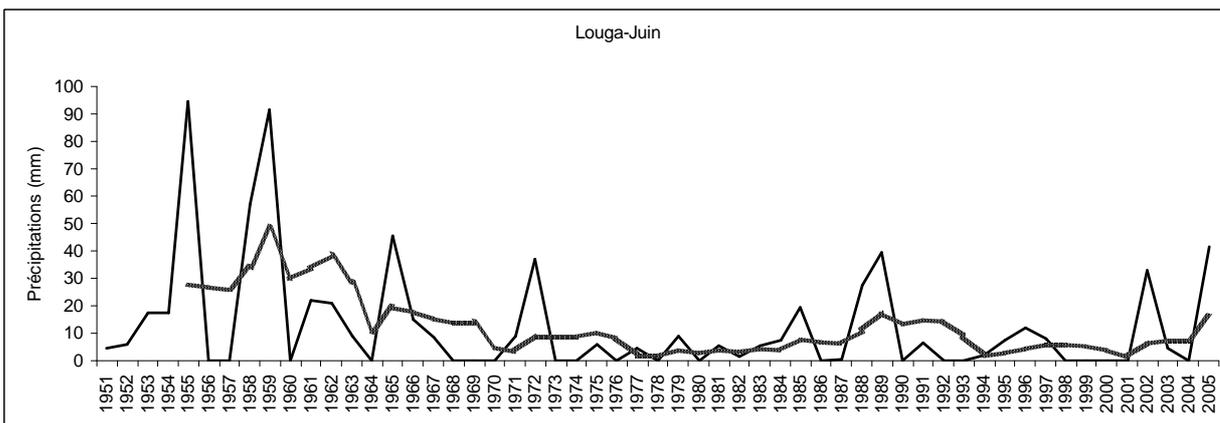
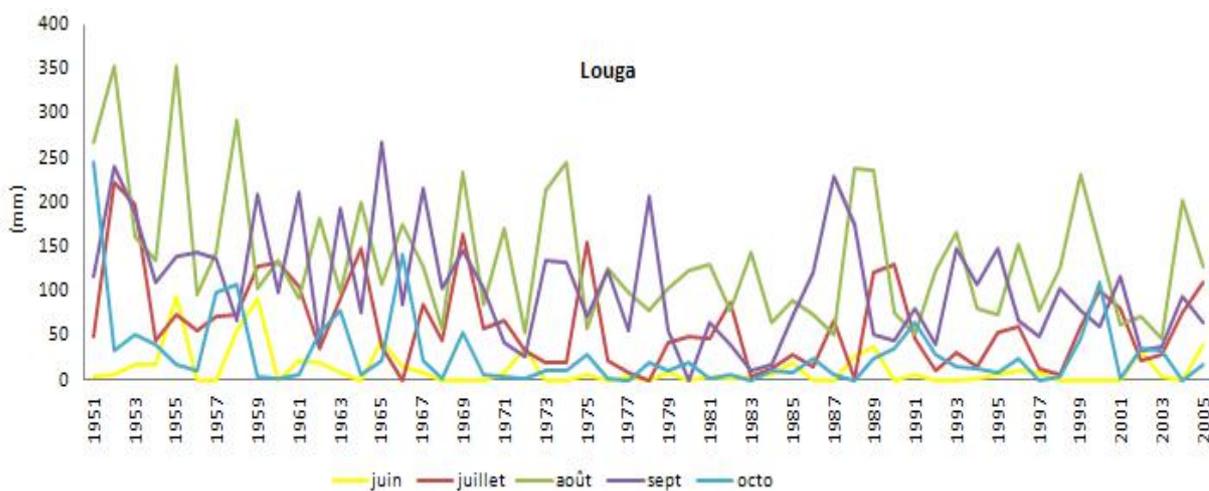
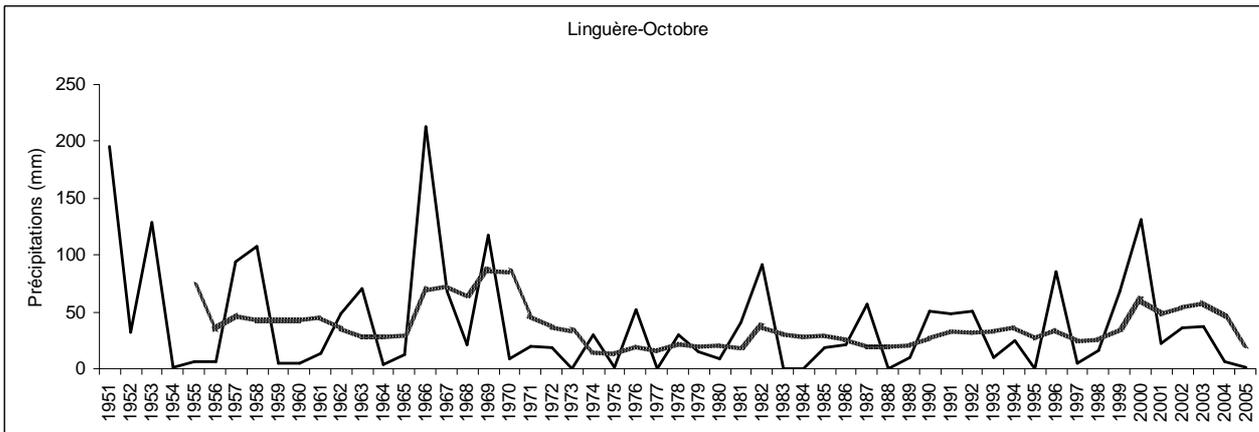


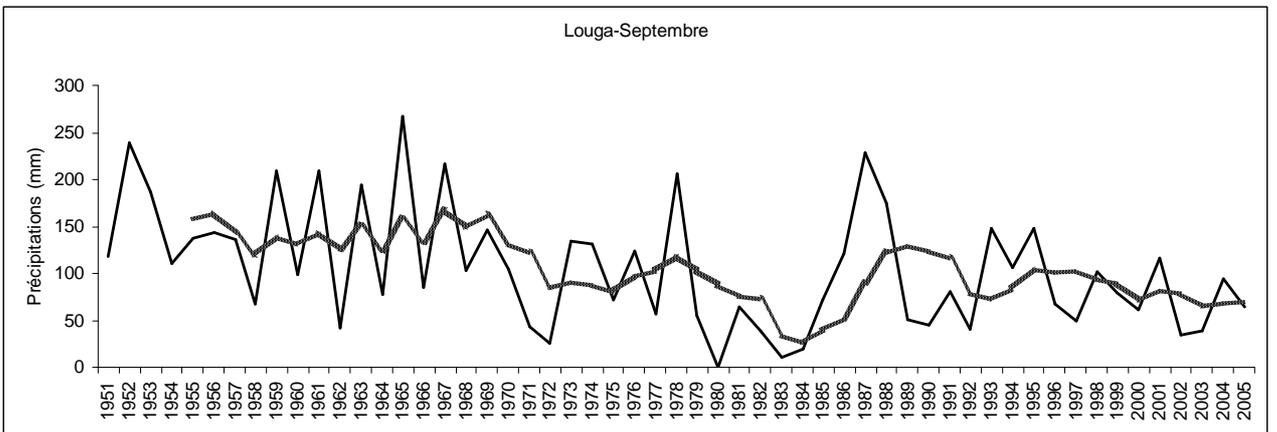
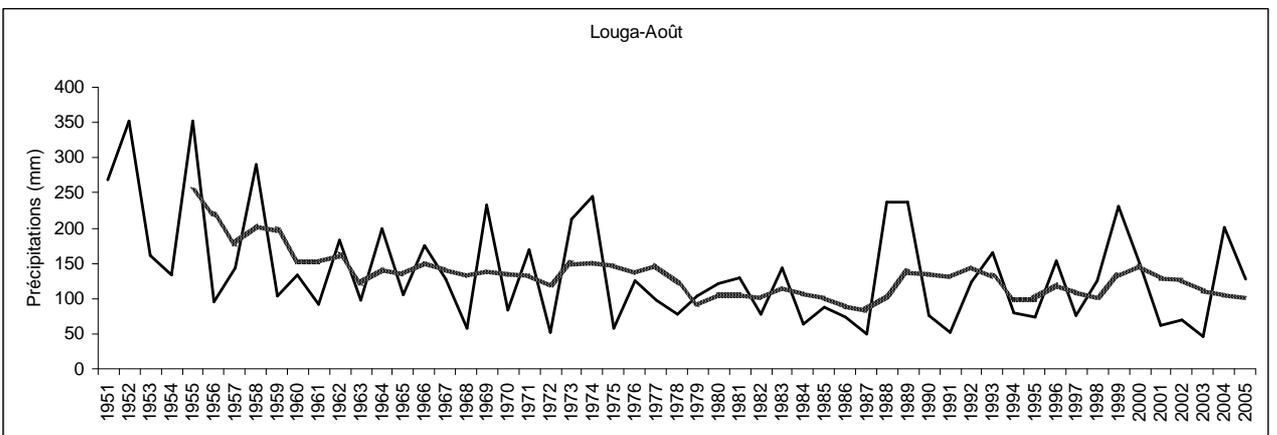
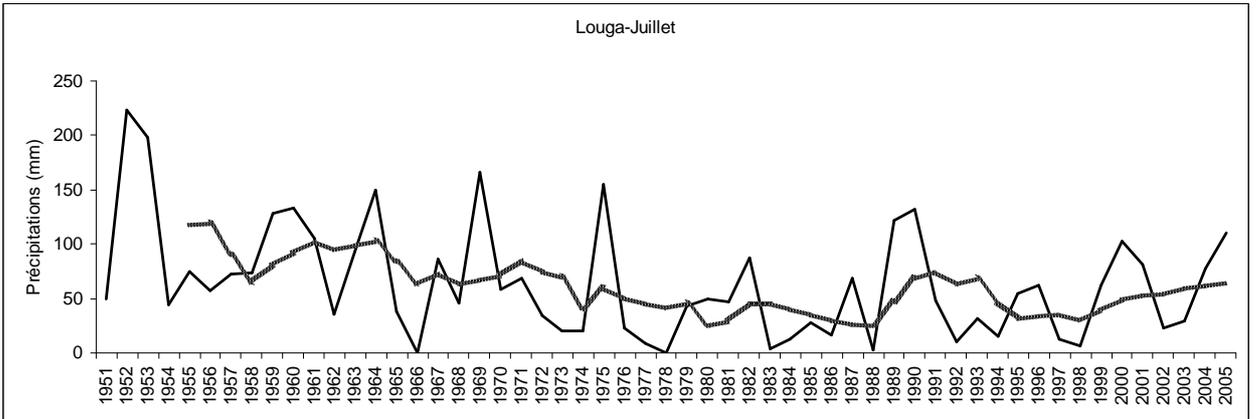


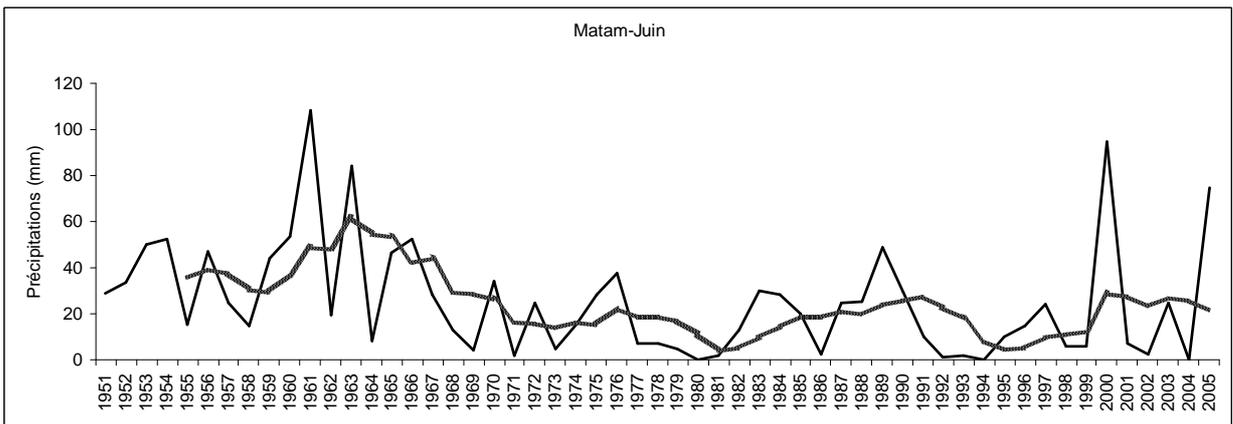
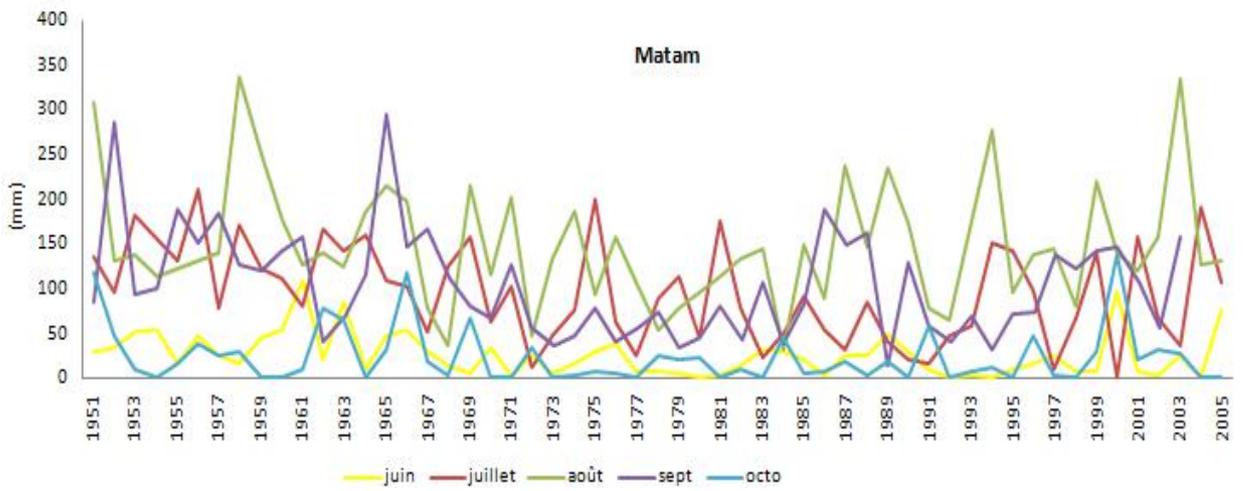
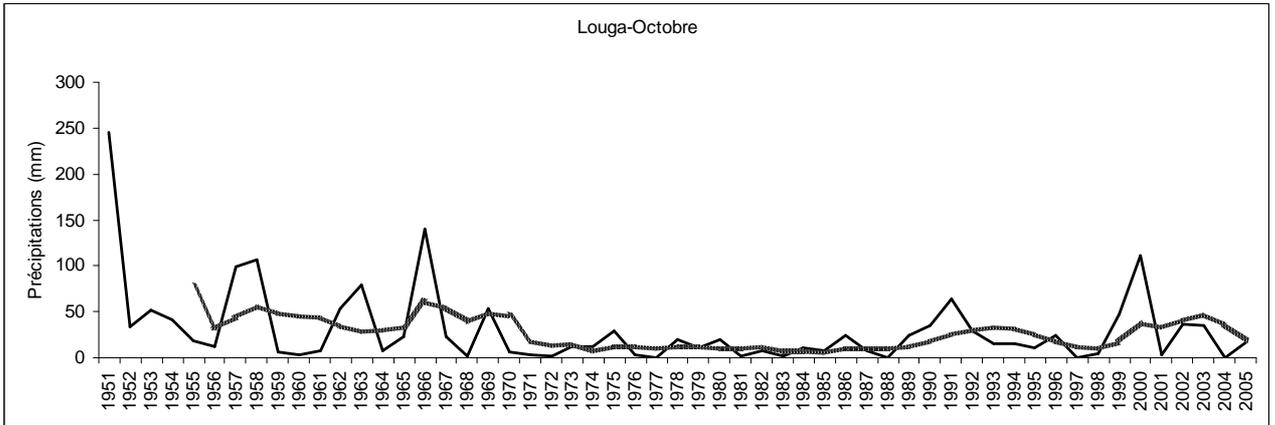


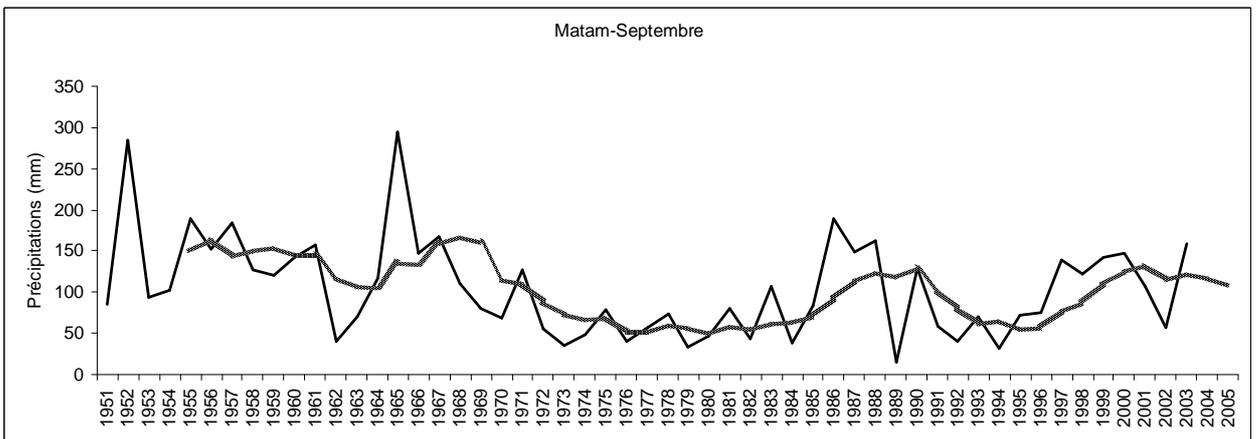
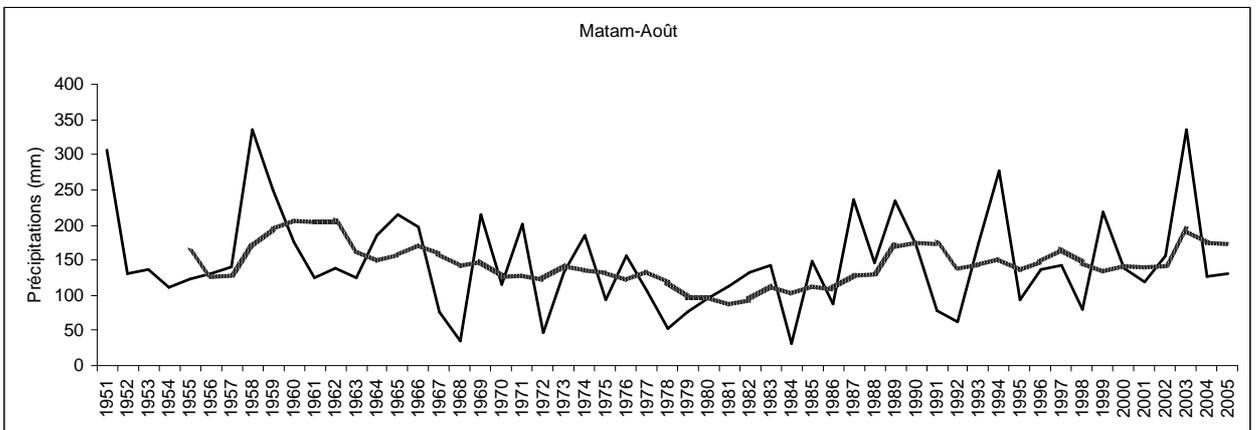
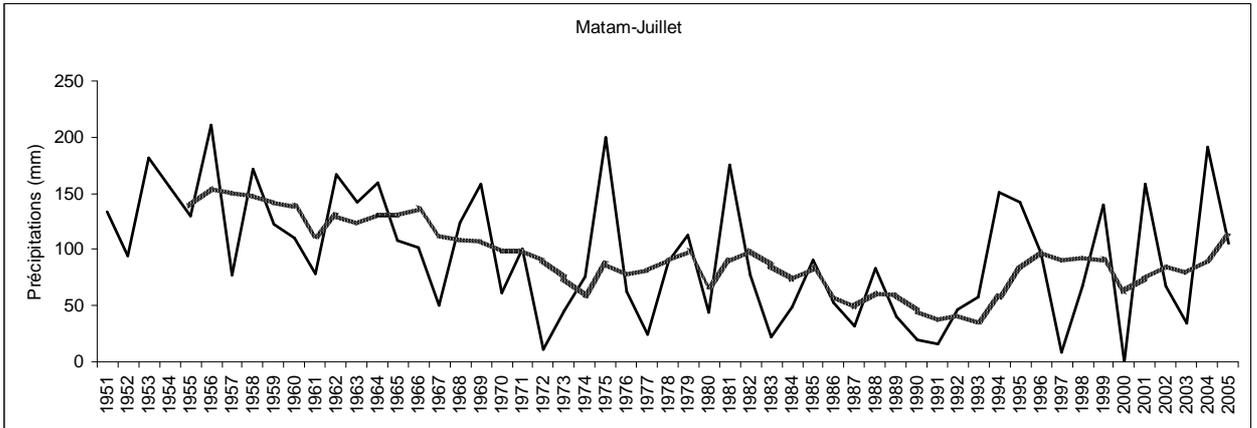


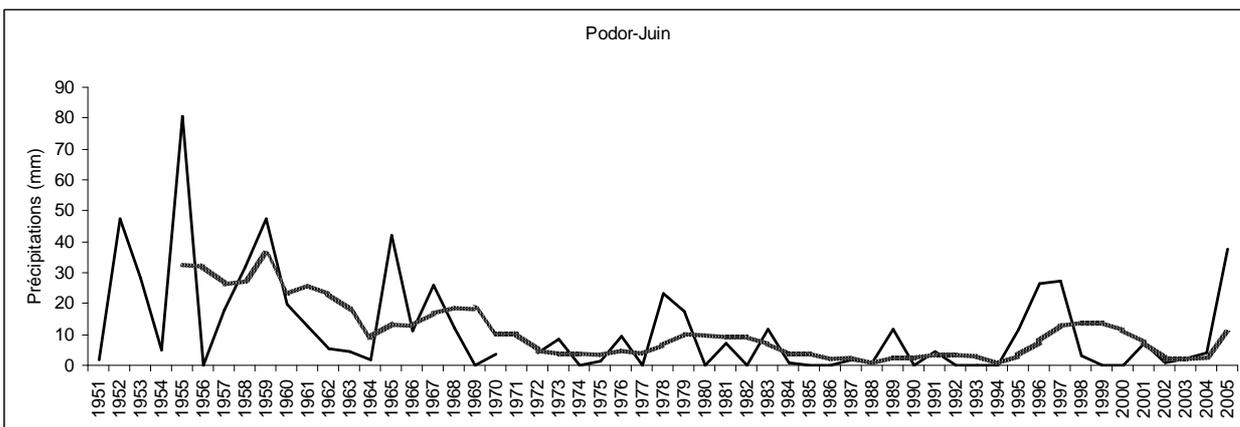
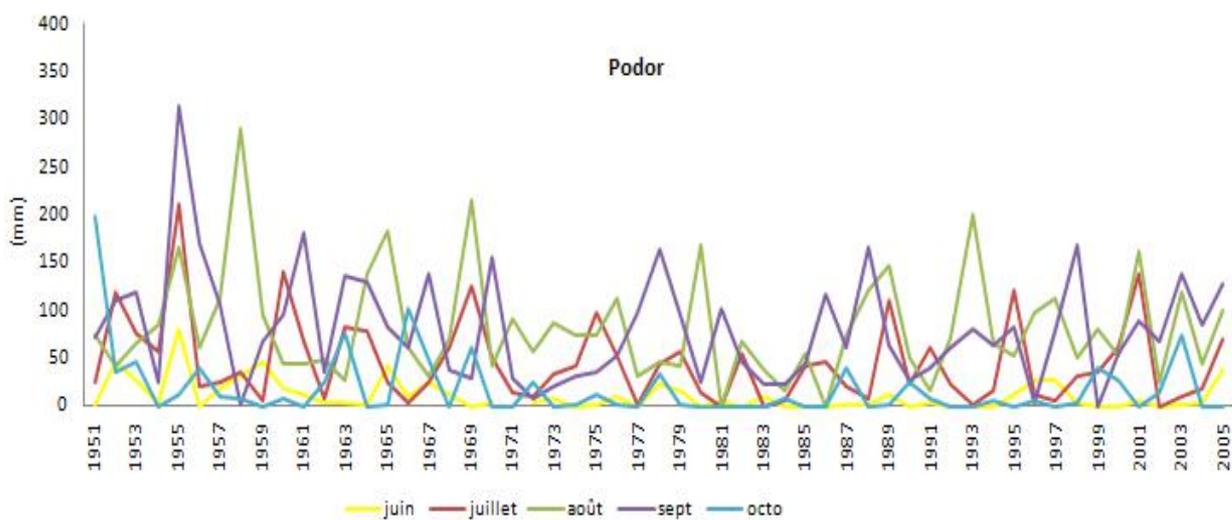
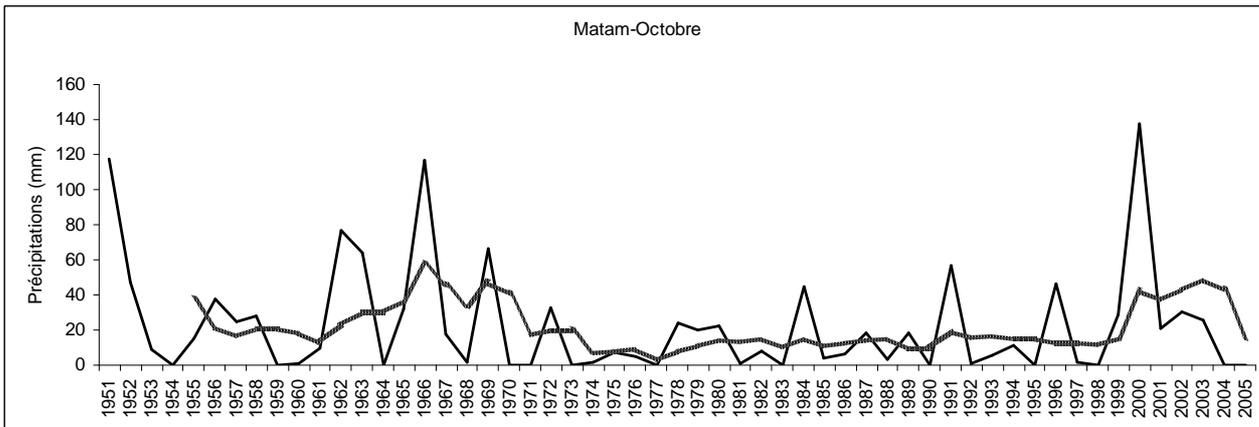


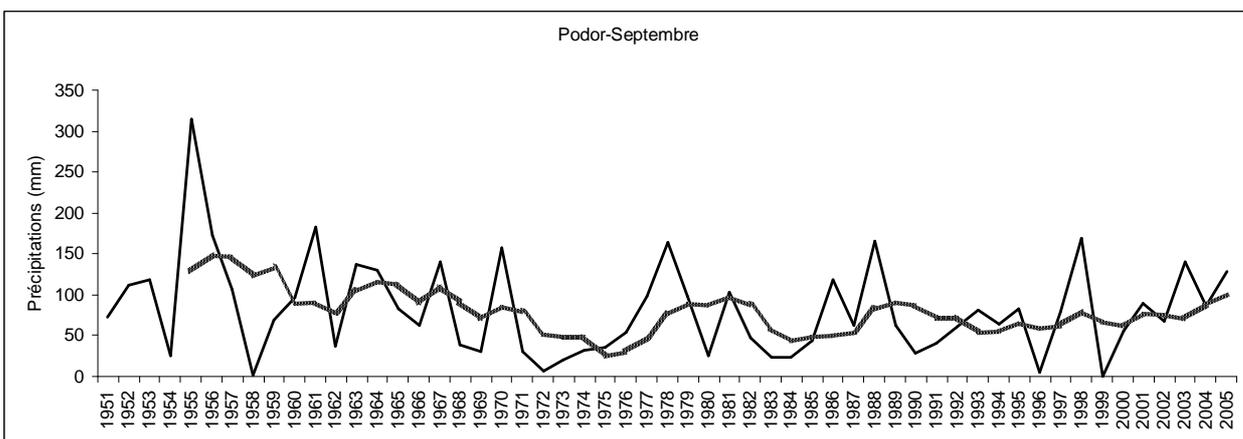
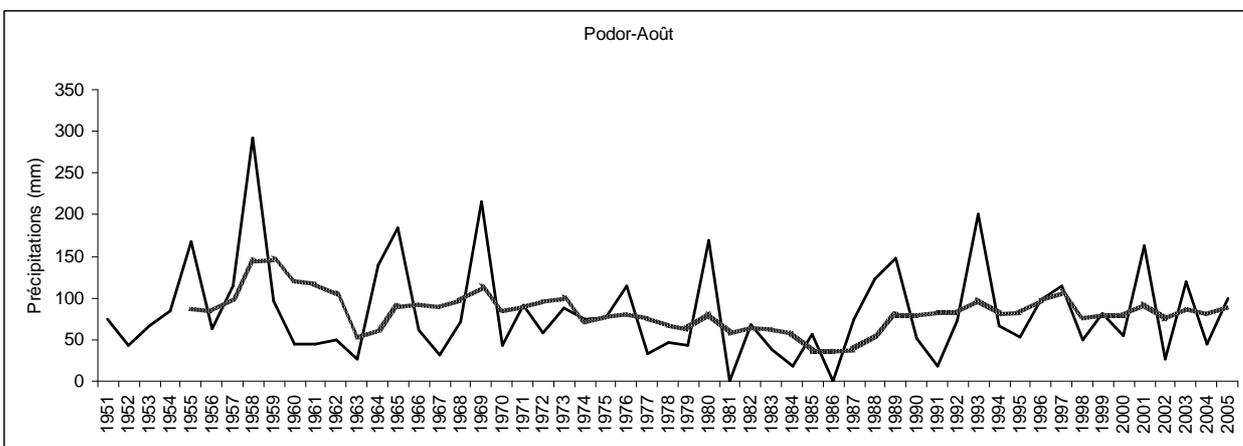
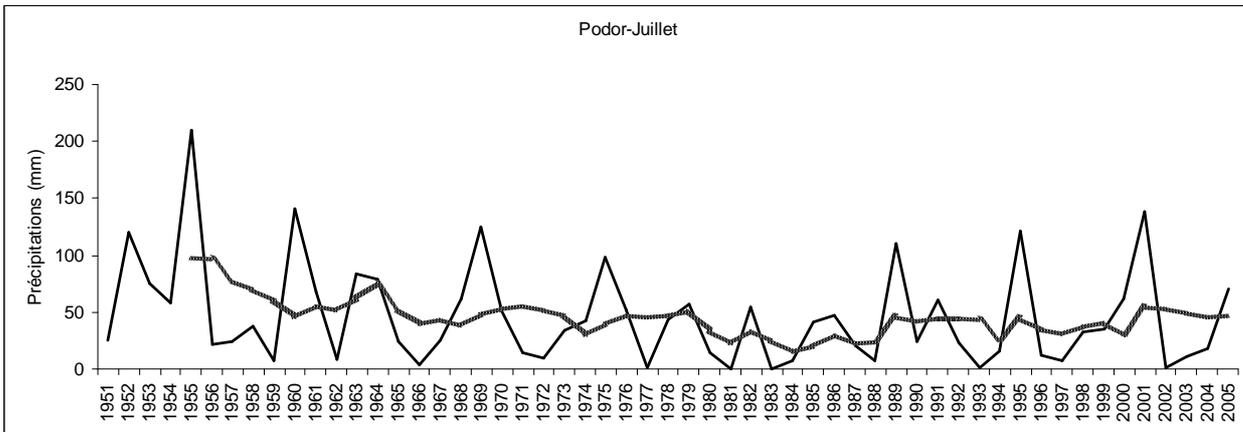


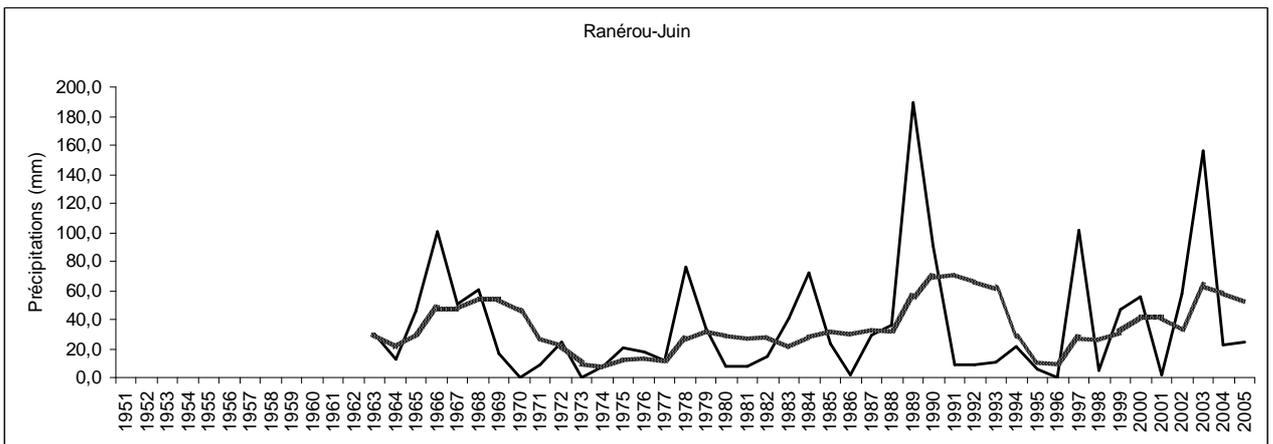
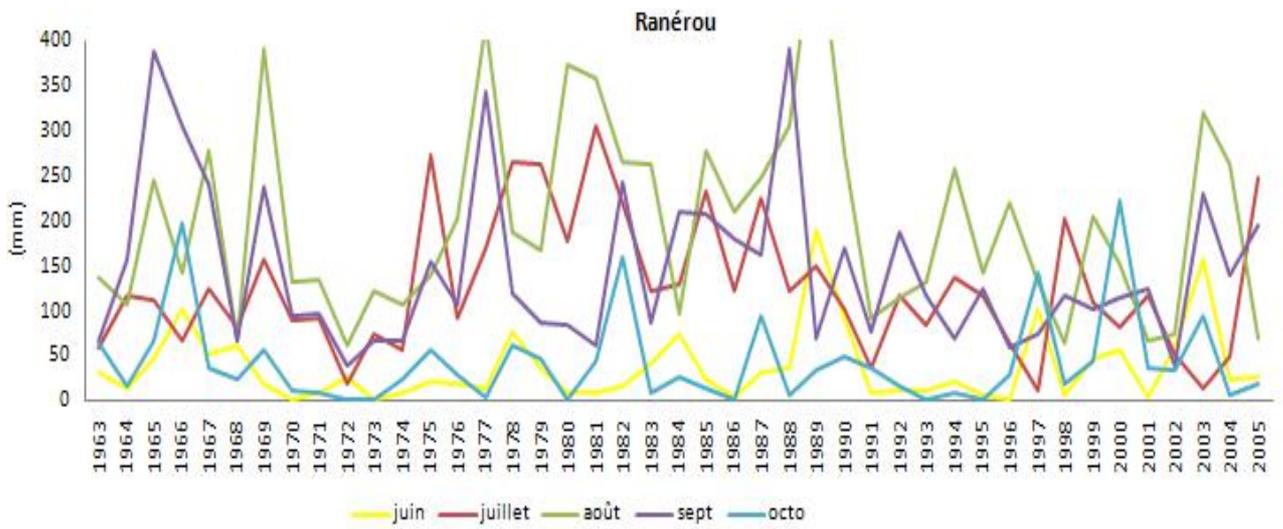
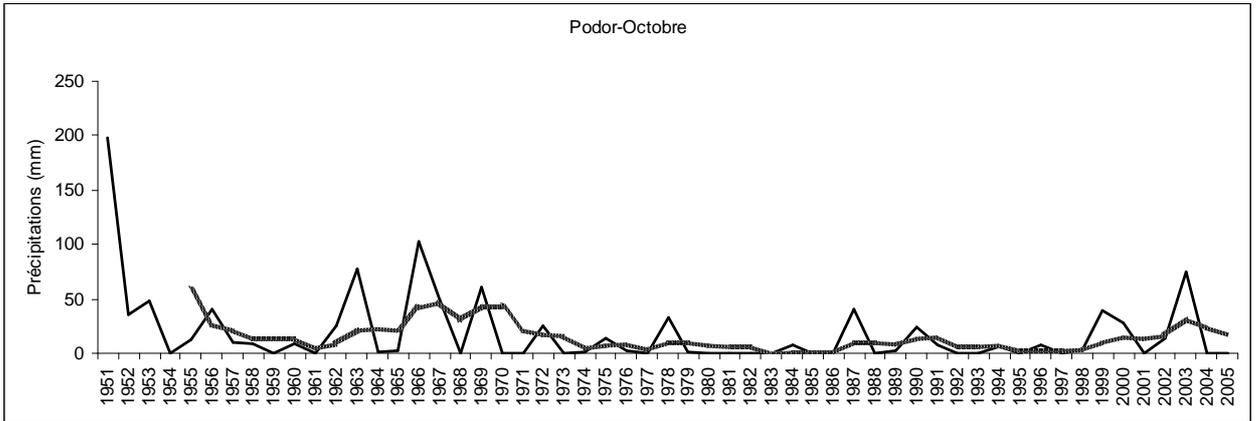


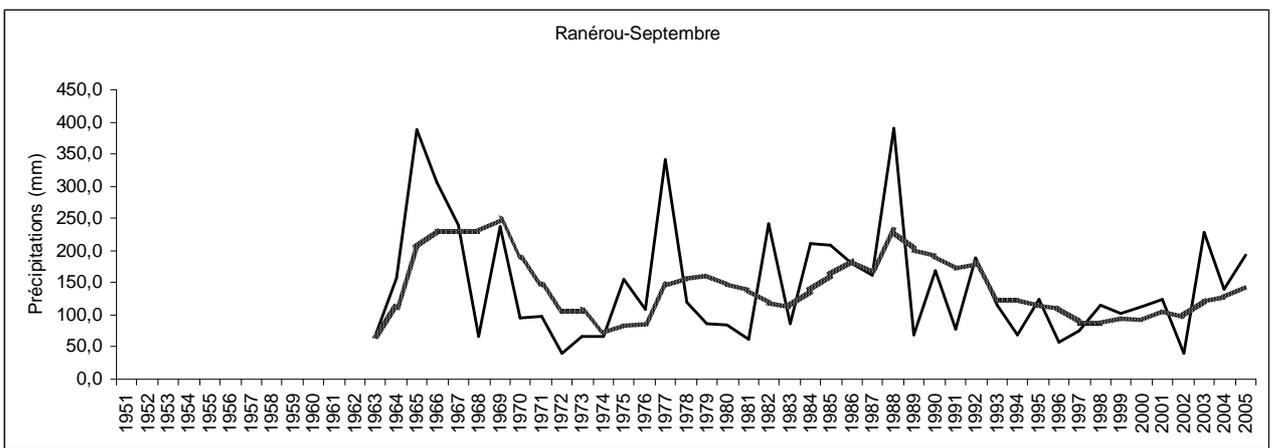
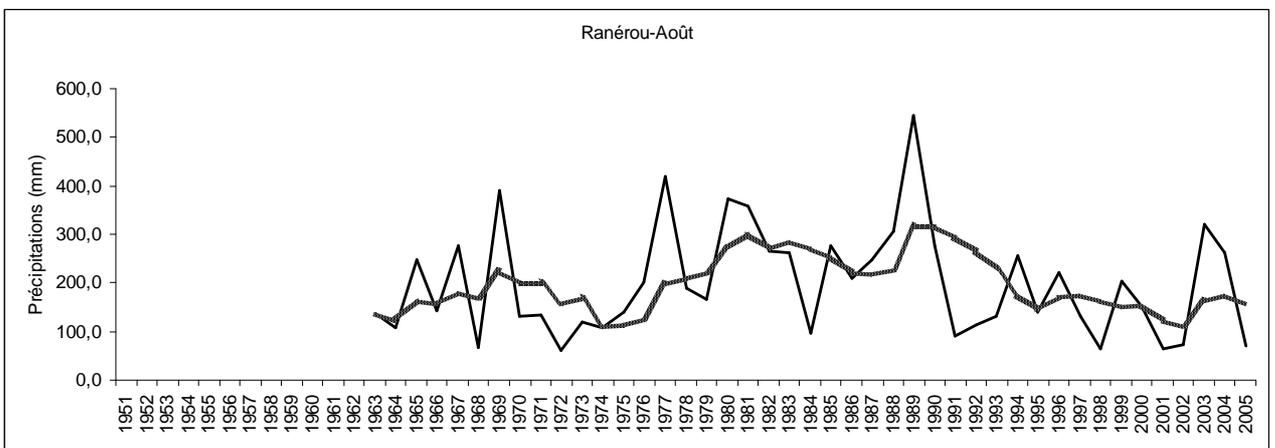
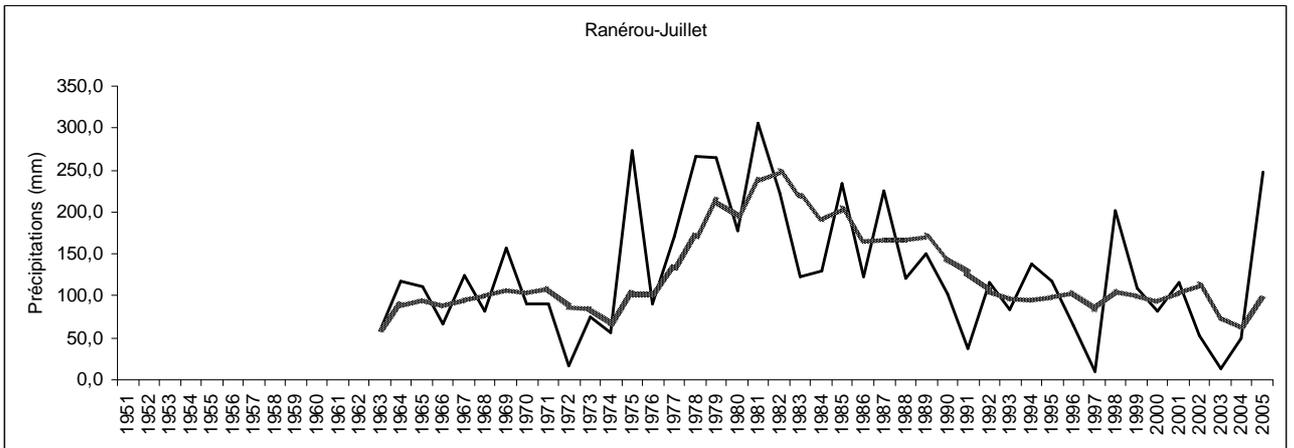


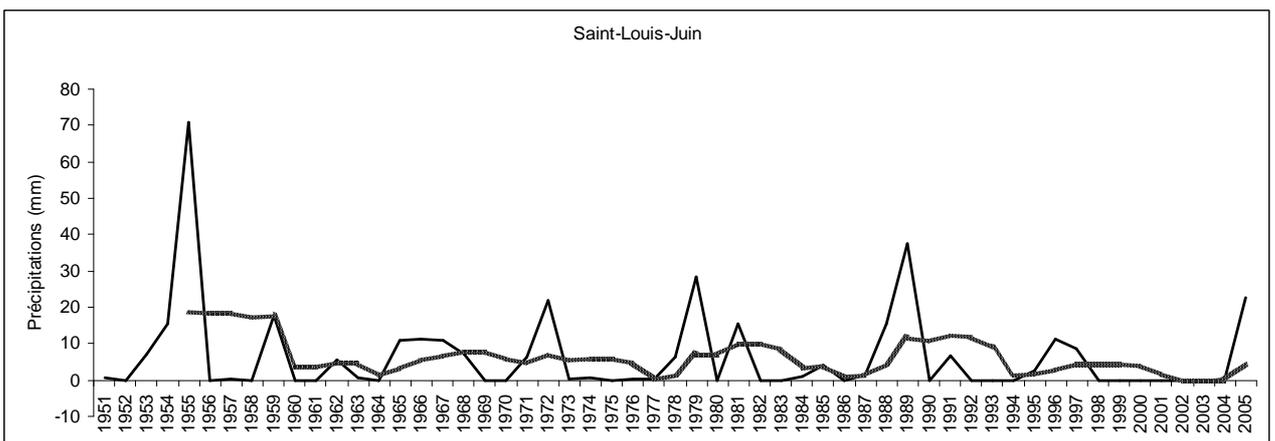
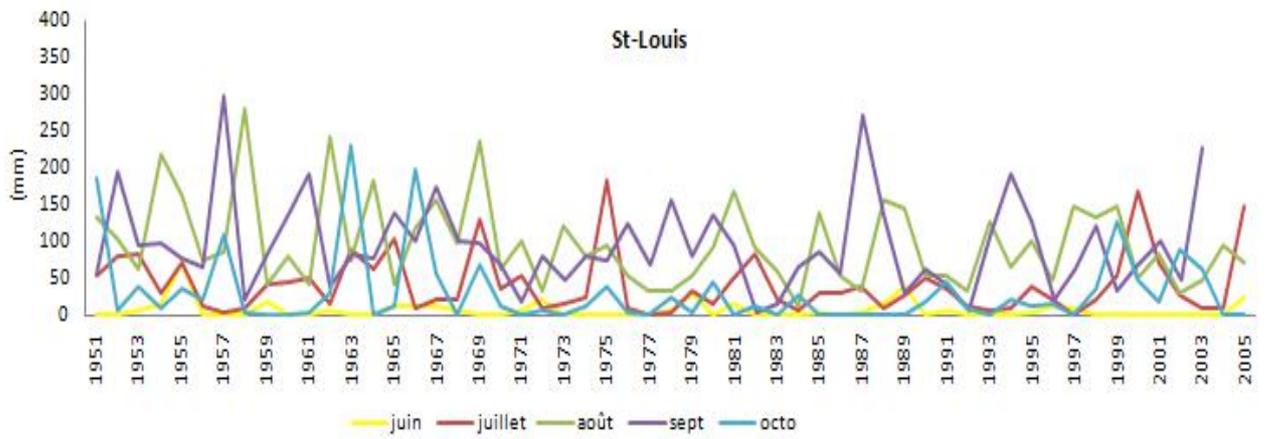
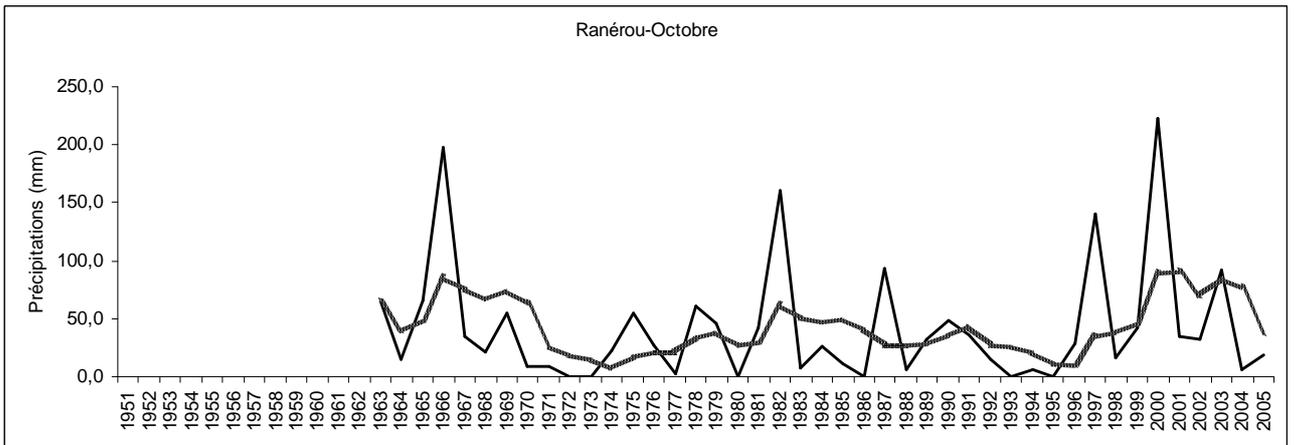


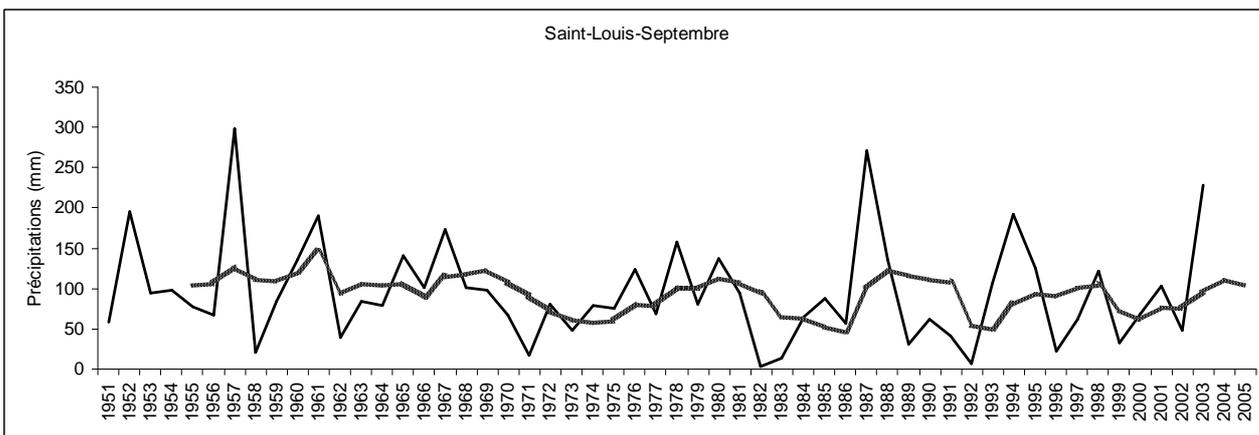
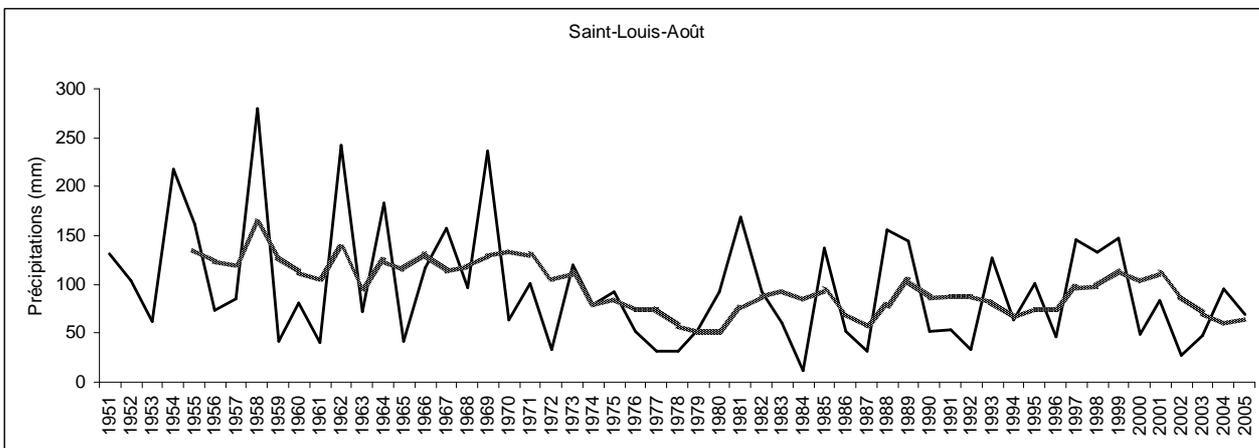
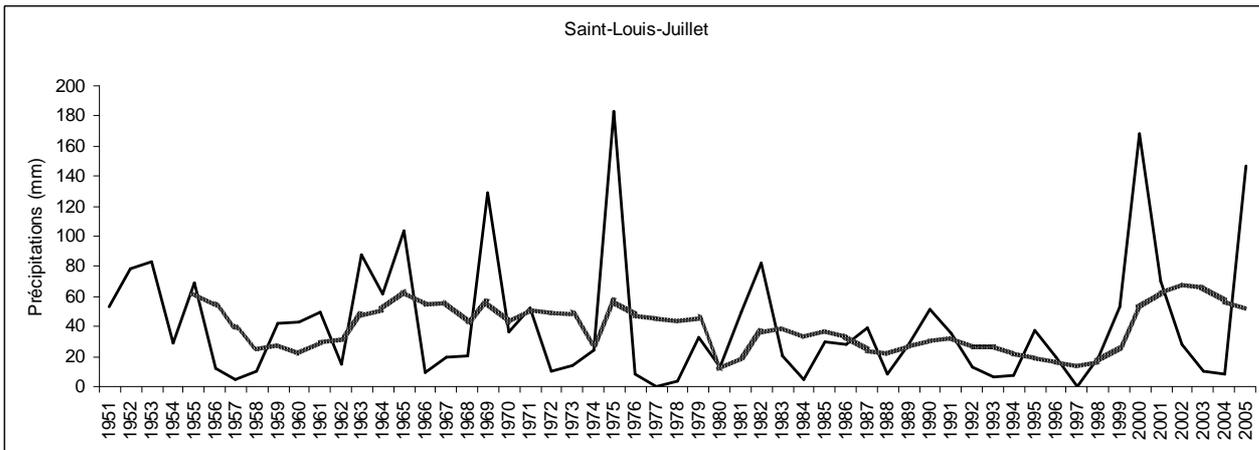


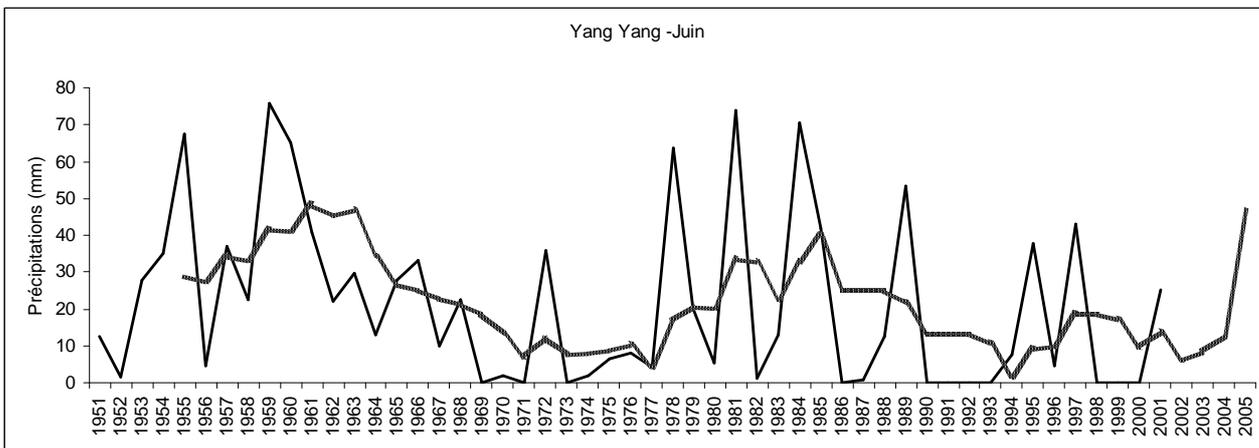
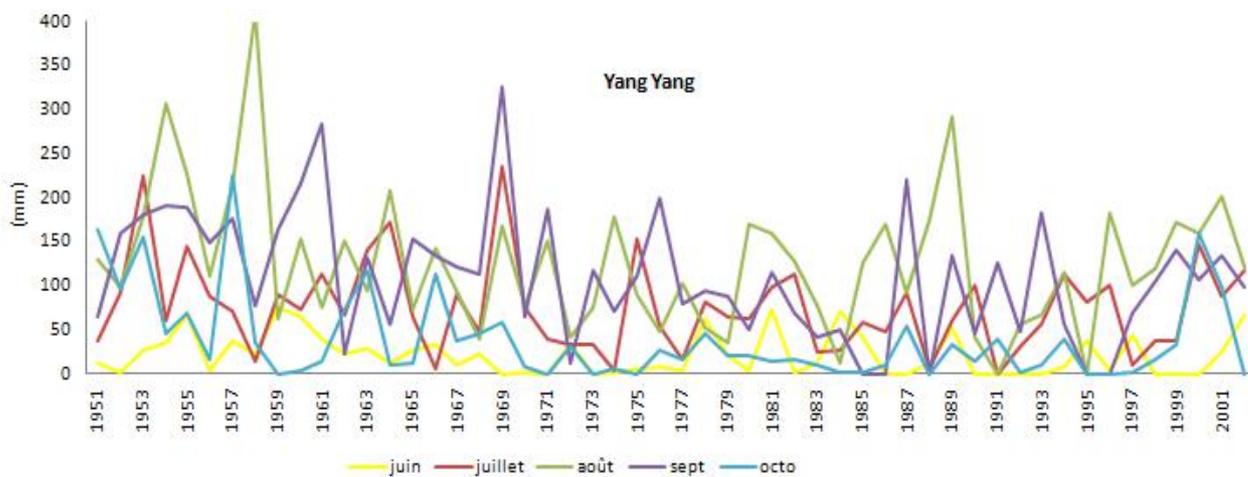
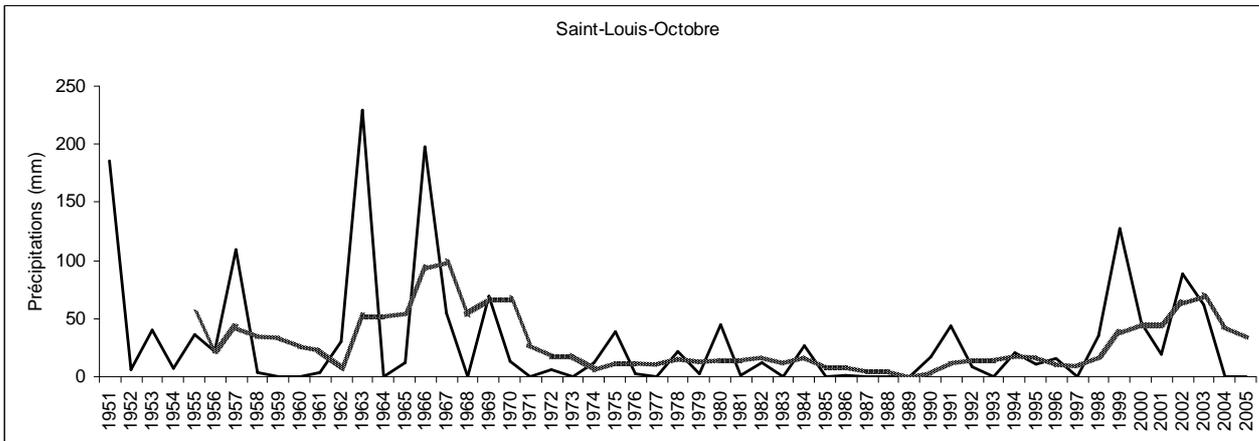


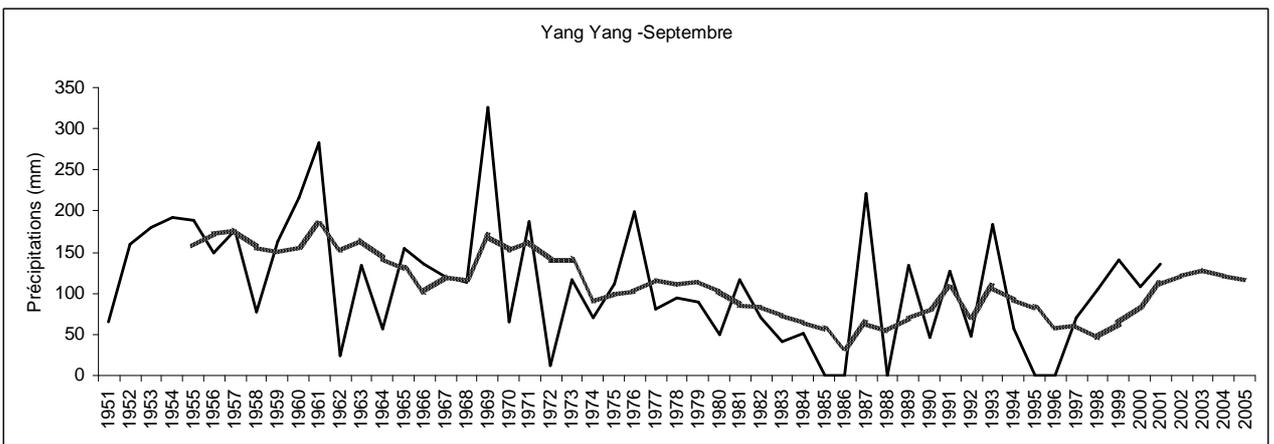
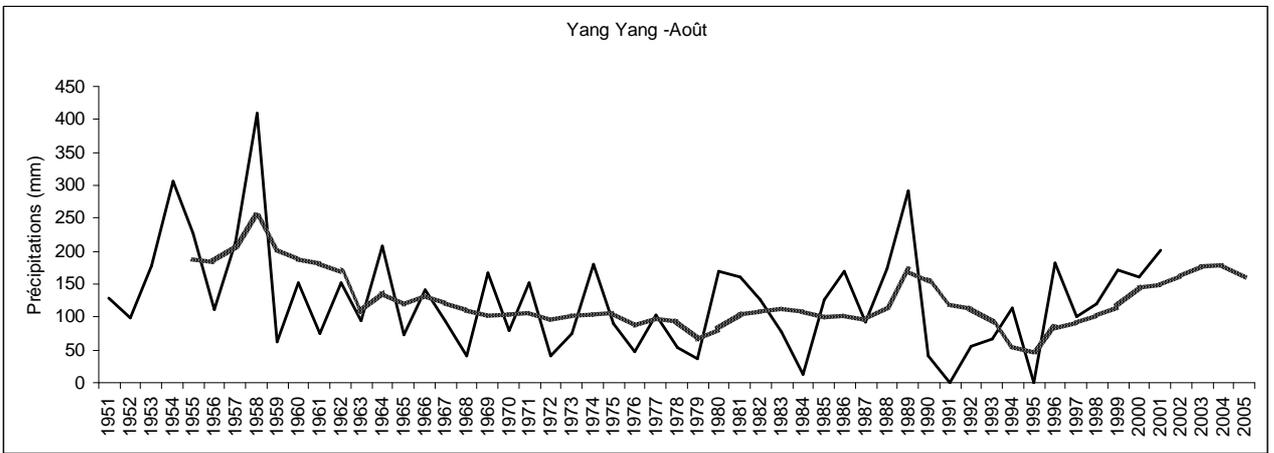
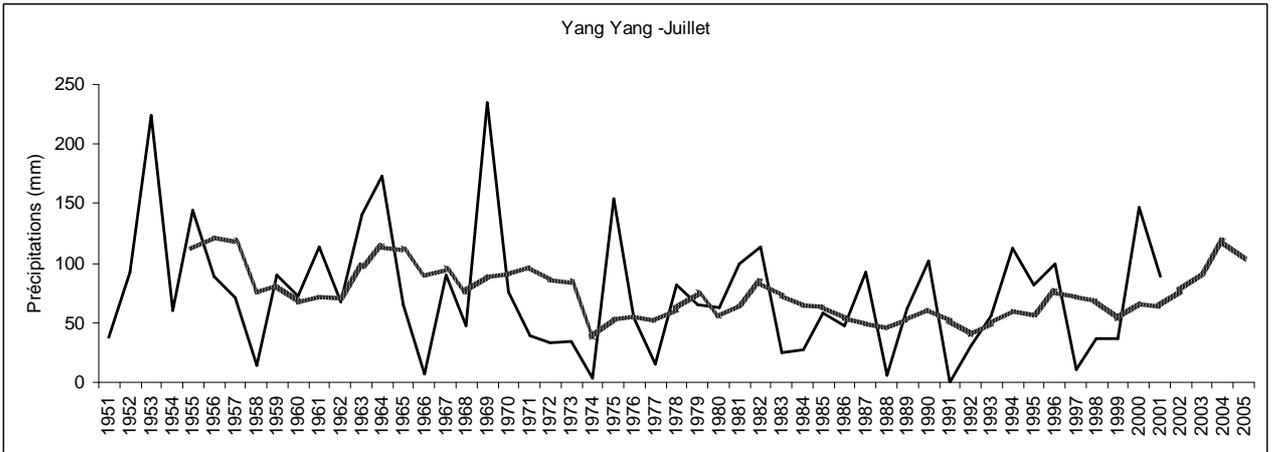


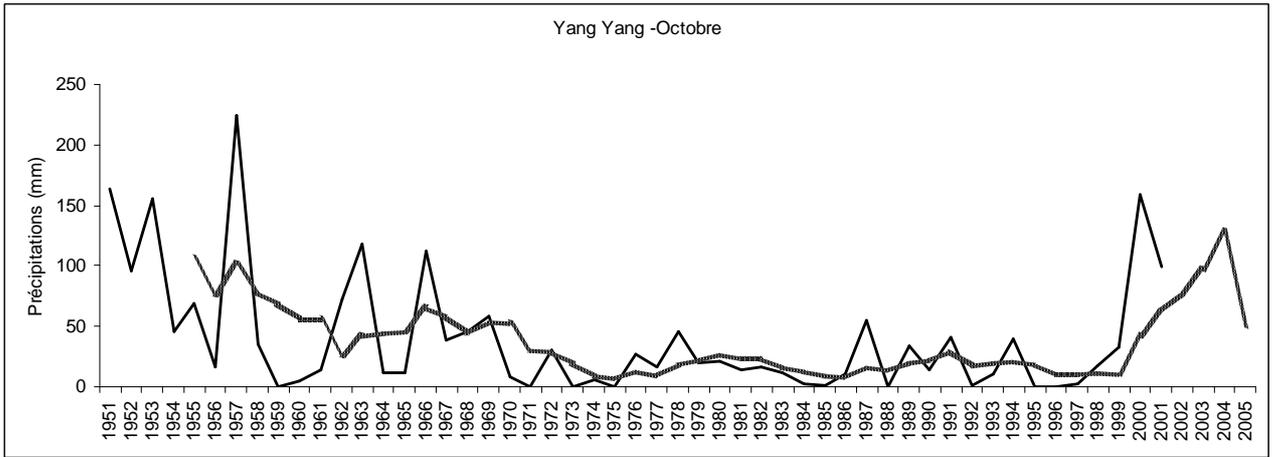












BIBLIOGRAPHIE

1. ACC – GRIZA - LAT., 1983. Système de production de l'élevage du Sénégal dans la région du Ferlo. Synthèse de fin d'étude d'une équipe pluridisciplinaire, *CSE*.
2. AIGUO DAI, PETER J. LAMB, KEVIN E. TRENBERTH, MIKE HULME, PHILIP D. JONES and PINGPING XIE, 2004. The recent drought is real. *Int. J. Climatol.* **24**: 1323–1331 pp.
3. AFOUDA A., BOUCHEZ J-M., BRAUD I., CAZENAVE F., DEPRAETERE C., DESSAY N., DIEDHIOU A., GALLE H., GALLEE H., GOSSET M., HAVERKAMP R., LAURENT H., LE BARBE L., LABEL T., MESSENGER C., ONIBON H., REGGIANI P., 2001. Variabilité climatique et variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest : un système couplé. Atelier sur le couplage des modèles atmosphérique et hydrologiques, 3-5 décembre, Toulouse, France.
4. AKPO L E., 1992. Influence du couvert ligneux sur la structure et le fonctionnement de la strate herbacée en milieu sahélien. Les déterminants écologiques. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, option Ecologie, *UCAD-FST, Département Biologie Végétale*, 142 p.
5. 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.
6. ALBERGEL J., 1987. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m au km études des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de doctorat de sc. Naturelles, *Université Paris VI*, 314p.
7. Ali A., Lebel T., Amani A., 2007. Revisiting the standardized precipitation index applied to rainfall variability analysis in the Sahel. *AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Analyses)*, 2nd International Conference, Karlsruhe, 26-30 nov., Abstracts (Genau I., van den Akker E. et Redelsperger J. –L. eds), 243-244 pp
8. ARDOIN-BARDIN S., 2004. Variabilité hydroclimatologique et impacts sur les ressources en eau des grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat. *Univ. Montpellier II. Sciences et Techniques du Languedoc*, 440 p
9. ARLERY R., GRISSOLET H., GUILMET B., 1973. Climatologie : Méthodes et Pratiques. Paris ; Bruxelles ; Montréal : *Gauthier – Villars*, XVII, 43 p.
10. ARNAUD M, EMERY X. 2000. Estimation et interpolation spatiale. *Hermes Science Publications*, Paris.
11. AUBERT G. et MAIGNIEN R. et DUBOIS J., 1949. L'érosion éolienne dans le Nord du Sénégal et du Soudan français. *Bull. Agric. Congo Belge* L – 2, 1309-1316 pp.
12. AUBERT. G., 1949. Observations sur les sols du Ferlo et de la vallée du Sénégal, rapport *ORSTOM* n°27 – miméo.
13. AUGUSTIN B., 1939. Géographie Universelle : Afrique septentrionale et occidentale, ss.dir de Vidal de la Blache P. et Gallois L. Paris, A. *Colin*, tome XI. 525 p
14. BA A., 1984. Analyse bibliographique – Les migrations dans la vallée du fleuve Sénégal. Publication du Laboratoire de Géographie Humaine. *Université de Dakar*, 113 p.
15. BA A. T., COGELS X. et al., 1984. Le lac de Guiers. Problématique d'environnement et de développement. Actes du colloque ISE 09 au 11 mai 1983, Dakar ; *ISE*, 7, 506 p.
16. BA C., 1980. Elevage et pêche. In Atlas Jeune Afrique : Le Sénégal. Paris : *Edition Jeune Afrique*, 72 p.
17. BA C., 1986. Les peul du Sénégal. Etude géographique, *Ed. NEA*, 394 p.

18. BAILLARGEON C. Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en statistique pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.), *Université Laval*, Québec, 2002.
19. BALAGHI R., TYCHON B., EERENS H., JIBENE M., 2008. Empirical regression models using NDVI, rainfall and temperature data for the early prediction of wheat grain yields in Morocco. *Inter. Journ. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 10, Issue 4, 438-452 pp.
20. BARET F., GUYOT G., MAJOR D. J. 1989. TSAVI: A vegetation index which minimize soil brightness effects on LAI and APAR estimation. In proceedings of the 12th *Canadian Symposium on Remote sensing*, Vancouver, 1355-1358 pp.
21. BARRAL H., 1982. Le Ferlo des forages, gestion ancienne et actuelle de l'espace pastoral, *ORSTOM*, Dakar, 16 p.
22. BARRAL H., BENEFICE E., 1983. Systèmes de production d'élevage au Sénégal dans la région du Ferlo. Synthèse de fin d'étude d'une équipe de recherches multidisciplinaire ISRA-ORANA-OCCGE-GERDAT-ORSTOM, Dakar 1972 p.
23. BARRAL H., 1982. Le Ferlo des forages. *ORSTOM*, DAKAR, 85 p.
24. BAUDET G., 1974. Les pâturages et l'élevage au Sahel. Notes tech. *MAB/UNESCO*, 29–33 pp.
25. BAUDET G., 1981. Systèmes de production d'élevage au Sénégal. Etude du couvert herbacé (2^{ème} campagne). *DGRST. ACC / LAT – IEMVT*, 20 p.
26. BAUDET G., 1984. Recherche d'un équilibre entre production animale et ressources fourragères au Sahel. *Bull. de la Société Languedocienne de Géographie*, Tome 18, fasc. 3 – 4, Montpellier, 167 – 178 pp.
27. BAUDET G., 1987. «Connaissance et gestion de l'espace pastoral sahélien» in Territoires pastoraux et agropastoraux en zone tropical. Gestion, aménagements et intensification fourragère, Etudes et synthèse de l'IEMVT, *Maisons Alfort* n°24, 5-59 p.
28. BAYOKO A., FONGANG S., 1991. Analyse d'une situation de poussières en zone Sénégal-Mauritanienne, AIC, 103-113 pp.
29. BENEFICE E., CHEVASSUS A., SIMON S., NDIAYE F., 1986. Aménagements agricoles et aspects nutritionnels : études de populations rurales du Ferlo et la moyenne vallée, *ORSTOM*, DK.
30. BENEFICE E., CHEVASSUS A., SIMON S., 1981. Situation alimentaire des éleveurs dans la zone sylvo-pastorale : résultats globaux. *ORSTOM*, ORANA, DK.
31. BERGAOUI M., ALOUINI A., 2001. Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique : cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. *Sécheresse*, 12 : 205-13.
32. BERGES J., LACAZE B., 2005. Vers un suivi en temps réel de la sécheresse au Maroc à partir des données MSG, Communication au colloque intern. Aménagement du territoire et risques environnementaux, Fès, Maroc, 15-16 avril.
33. BERRETO S. PEREIRA, 1964. Reconnaissance pédologique du Ferlo-sud. Centre ORSTOM de Dakar, 42 p. multigr., 1 carte pédologique.
34. BENCHETRIT M., CABOT J., DURENTES-DATES F., 1971. Géographie des régions chaudes, Paris, *Fernand Nathan, Collection Fac. Géographie*. 272 p.
35. BENOIT M., 1977. Le pastoralisme en savane et la « territorialisation » des parcours. *Cahiers ORSTOM*, Sc. Humaines, vol. XIV, n°2.
36. BENOIT M., 1988. La lisière de Kooya : espace pastoral et paysage dans le nord du Sénégal (Ferlo). *L'espace géographique*, XVIII (2), 95 – 108 pp.

37. BERNUS E., 1984. Les causes de la désertification : Les thèses en présence. *Bull. de la Société Languedocienne de Géographie*. Tome 18, fascicule 3 – 4. Montpellier, 159 – 165 pp.
38. BERNUS E., 1984. Attitude de populations. *Bull. de la Société Languedocienne de Géographie*. Tome 18, fascicule 3 – 4. Montpellier, 179 – 184 pp.
39. BERNUS E., 1984. "L'homme et l'animal concurrents ; problèmes d'écologie pastorale sahélienne", p 11 – 122 in *Le développement rural en question*, Paris *ORSTOM*, mémo. N° 106, 505 p.
40. BETTEMONT J., 1986. Acteurs et stratégie de l'eau dans la vallée du fleuve Sénégal, *Revue de géographie de Lyon*, 61, 63 – 78 pp.
41. BIGOT S., 2002. Détection des anomalies et discontinuités dans une base de données. Détection des discontinuités temporelles au sein des séries climatiques : point méthodologique et exemple d'application. Actes des journées de climatologie de la commission « Climat et Société » du *CNFG*, Strasbourg 21-23 mars.
42. BILLE J. C., POUPON H., 1974. La régénération de la strate herbacée in *Recherches écologiques sur une savane sahélienne du Ferlo septentrional, Sénégal. Rev. Ecol. Appl.*, t28, n°1, 21 – 48 pp.
43. BILLE J. C., 1974. Recherches écologiques sur une savane sahélienne du Ferlo septentrional, Sénégal : 1972, année sèche au Sahel. *La terre et la vie*, vol. 28, 5 – 20 pp.
44. BILLE J. C., 1977. Etude la production primaire nette d'un écosystème sahélien. Travaux et Doc. *ORSTOM*, n° 65, 1 carte hors texte, Paris, 82 p.
45. BONFIGLIOLI A.M., DIALLO Y. D., 1988. Kisal. Production et survie au Ferlo (Sénégal). Dakar, OXFAM.
46. BONFIGLIOLI A. M., 1990. Pastoralisme, agro-pastoralisme et retour : itinéraires sahéliens. *Cah. Sci. Hum.* 26 (1 – 2), 255 –266 pp.
47. BONN F., 1996. Précis de Télédétection, sous la dir. De Ferdinand Bonn, vol. 2, applications thématiques, *Presses de l'Université du Québec / AUPELF*, 633 pp.
48. BOULET R., 1968. Pédologie. Atlas international de l'Ouest africain. *Ed. Lawa-Aioa*, 1-23 pp.
49. BOURLIERE F., 1978. La savane sahélienne de Fété-Olé in : Problèmes d'écologie : Structures et fonctionnement des écosystèmes terrestres. *Masson*, Paris.
50. BRACONNOT P., OTTO-BLIESNER B., HARRISON S., JOUSSAUME S., PETERSCHMITT J.-Y., ABE-OUCHI A., CRUCIFIX M., DRIESSCHAERT E., FICHEFET T., HEWITT C. D., KAGEYAMA M., KITO A., LAIME A., LOUTRE M.-F., MARTI O., MERKEL U., RAMSTEIN G., VALDES P., WEBER L., YU Y., ZHAO Y., 2007. Results of PMIP2 coupled simulations of the mid-Holocene and Last Glacial Maximum –Part 1: experiments and large-scale features, *Climate Of The Past*, **3**, 261–277 pp.
51. BRGM., 1966. Etude hydrogéologique en vue du développement pastoral dans le Ferlo et la région du lac de Guiers. *BRGM*, Dakar.
52. BROWN L.; WOLF E. C. 2005. Reversing Africa's decline. Worldwatch Institute, Washington, DC, USA. Paper 65.
53. BUDE M. E., TAPPAN G., ROWLAND J., LEWIS J., TIESZEN L. L., 2004. Assessing land cover performance in Senegal, West Africa using 1-km integrated NDVI and local variance analysis. *Journal of Arid Environment* 59 418-498 pp.
54. CALOZ R., COLLET C., 2001. Traitements numériques d'images de télédétection. Précis de télédétection. Vol. III. *PUQ / AUF*, 386 p.

55. CAMBERLIN P., MARTINY N., PHILIPPON N., RICHARD Y., 2007. Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa. *Remote sensing of Environment* : 106, 199-216 pp.
56. CHAMARD C. PH., 1979. «l'agriculture sénégalaise», information géographique, n°4, 180 : 186, *J. B. Baillière Edit.*, Paris.
57. CHAOUICHE A., 1988. Structure de la saison des pluies en Afrique soudano-sahélienne. Thèse de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 263 p.
58. CHAPERON P., 1976. Quatre années de sécheresse dans le Sahel : Données pluviométriques et hydrologiques en Mauritanie et au Sénégal, extension géographiques et perspectives, *NEA*, DK.
59. COGELS F. X., GAC J. Y., 1983. Circulation et salinité des eaux du lac de Guiers. Problèmes de développement et modèle de gestion. In Le lac de Guiers. Actes du colloque ISE 9 – 11 mai, *Université de Dakar*.
60. COLLET C., 1992. Système d'information en mode image. *Presses polytechniques romandes*, Paris.
61. COLY A., 1992. Le lac de Guiers : modalités de gestion hydrologique et approche quantitative en 1991 : rapport de stage DEA de géographie physique. ORSTOM, Dakar (SEN), multigr., bibl., ill., tabl., graph, 43 p.
62. COMBY J., 1992. Les agglutinations anticycloniques en saison froide. Analyse dynamique de l'hiver 1991-1992, *Publ. Ass. Int. de Clim.* Vol. 5, pp. 403-413.
63. COMBY J., 1998. Les paroxysmes pluviométriques dans le couloir rhodanien et ses marges. Thèse de Doctorat de Géographie et Aménagement, *Univ. Jean Moulin Lyon III*, Fac. des Lettres et Civilisations, Labo de Géo. Physique, UMR 5600 CNRS, 668 p.
64. COMBY J., 2009. Les changements climatiques récents : alternatives aux explications d'un réchauffement planétaire d'origine anthropique. In Les conséquences géostratégiques du réchauffement climatique. *Les cahiers de Mars*, N°200, 42-46 pp.
65. CORNET A., POUPON H., 1977. "Description des facteurs du milieu et de la végétation dans cinq parcelles situées le long d'un gradient climatique en zone sahélienne, au Sénégal", *Bull. IFAN*, série A. vol.39, n°2, 241 – 302 pp.
66. COUREL M. F., COSSUS L., CHAMARD Ph. C., MAINGUET M., 1980. Le vent, facteur de désertification des régions saharo-sahéliennes et sahéliennes. Pre. XXIV th Inter. Géogr. Congress. Symposium proceedings. Fujinomia August 25 – 30, *J. A. MABBUT et BERKOWICZ Edit*, 111 – 131 pp.
67. COUREL M. F., CHAMARD Ph. C., 1983. Les variations spatiales et temporelles des précipitations au Sahel. *Rev. Hommes et terres du Nord*. Univ. Lille (France), n°3.
68. COUREL M. F., 1984. Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse d'Etat, *Université de Paris I*, 407 p.
69. CSE., 1987 à 2005. Production végétale. Cartes au 1/2 500 000.
70. CSE., 1991. Etude de la distribution spatiale et des mouvements de bétail par enquêtes aériennes, 1989 – 1990, 21 p.
71. 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.
72. CSE., 1996. Carte des densités de population par communauté rurale, *République du Sénégal*.
73. CSE., 1996. L'imagerie NOAA/AVHRR dans la veille environnementale. Rapport technique. 57 p.
74. CSE., 1996. Rapport sur le suivi de la production végétale, N°97/02.

75. CSE., 2000. Annuaire sur l'Environnement et la Gestion des ressources naturelles du Sénégal, 1^{ère} Edition, Dakar, 268 p.
76. CSE., 2003. Suivi de la production végétale 2003 : Situation des parcours naturels. Dakar, 9 p.
77. CSE., ROSELT/OSS., 2002. Synthèse des études diagnostiques des sites de l'observatoire du Ferlo. Dakar, 10 p.
78. CSE., ROSELT/OSS., 2002. Caractérisation des systèmes actuels d'exploitation des ressources naturelles dans les zones de Widou, Souilène et Linguère, comparaison avec les systèmes anciens.
79. CSE., ROSELT/OSS., 2002. Caractérisation des sols de l'observatoire du Ferlo (Sénégal).
80. CSE., ROSELT/OSS., 2002. Bilan climatique de l'observatoire du Ferlo (Sénégal), Rapport de consultation.
81. CSE., ROSELT/OSS., 2002. Volet socio – économique des sites de l'observatoire du Ferlo (Sénégal).
82. CSE., 2005. Cartographie multi dates des zones humides du Sénégal. Rapport final, 25p.
83. DAI A., LAMB P.J., TRENBERTH K.E., HULME M., JONES P.D., XIE P., 2004. Comment the recent Sahel drought is real. *Inter. Journal Climatology* 24 : 1323-1331 pp.
84. DERRUAU M., 1996. Composantes et concepts de la géographie physique. Paris, A. Colin, Collection U. Série géo, 283 p.
85. DE WISPELAERE G., 1980. Systèmes de production d'élevage au Sénégal. Etude et Cartographie de l'évolution de la végétation par télédétection. Rapport de 1^{ère} année, *IEMVT*, 23 fig 162 p.
86. DE WISPELAERE G., 1980. Les photos aériennes témoins de la dégradation du couvert ligneux dans un géosystème sahélien sénégalais : Influence de la proximité d'un forage, *Cahiers ORSTOM*, série Sc. Humaines, Vol. 17, n°3-4, 155-166 pp.
87. DHONNEUR G., 1974. Nouvelles approches des réalités météorologiques de l'Afrique occidentale et centrale, ASECNA, *Univ. Dakar*, 407 p.
88. DIALLO A. K., 1984. Bilan des études et recherche en agropastoralisme au Sénégal. Séminaire Atelier CILSS/Institut du Sahel. Nouakchott, 317 références, 38 p.
89. DIAW A., 1993. Le rôle des structures d'exploitations agricoles dans l'aménagement du delta du fleuve Sénégal. Thèse de Doctorat Géographie Aménagement. *Univ. d'Orléans*, Faculté des Lettres et Sciences Humaines. Département de Géographie, Aménagement et cartographie. Centre d'Etude et Recherche sur le Cadre de vie et l'Aménagement Régional (C.E.R.C.A.R), 504 p.
90. DIENE M., 1988. Dynamique pastorale et tendances socio-économiques dans la région de Podor. Exemple de l'élevage bovin. Maîtrise de Géographie, *Univ. CAD*, Dakar.
91. DIONE O., 1996. Evolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et gambie. Thèse de Doctorat Géographie – Aménagement. *Univ. Jean Moulin Lyon 3*, Facultés des Lettres et Civilisations, Laboratoire de Géographie Physique (LGP), CRGA, 421 p.
92. DIOP A. T., 1984. Inventaire et suivi des ressources en eau du Ferlo nord (Zone pilote du projet Ecosystèmes pastoraux sahéliens) mémoire de confirmation – *LNERV*, 34 p.
93. DIOP A. T., 1989. L'aménagement et la gestion des ressources sylvopastorales au nord du Sénégal : le cas de l'aire d'influence du forage de Tatki. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle. *UCAD*, Fac. des Sc. ISE, 138 p + annexes.

94. DIOP A. T., 1992. La gestion des parcours de l'aire d'influence du forage de Tatki : relation entre les données de végétation, taux d'exploitation et transhumance. *Revue élevage et Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, 81 – 90 pp.
95. DIOP A. T., 2001. Transhumance et nomadisme au Sénégal : Perspectives pour une amélioration de l'élevage pastorale, *FAO*, 95 p.
96. DIOP A. T., SANE F. C., DIENE M., NDIAYE O., TOURE I., 2002. La remise en eau de la basse vallée du Ferlo : stratégie de lutte contre la sécheresse dans la région sylvopastorale du Sénégal. *Science et Changements planétaires, Sécheresse*, Volume 13 Numéro 3, 165-173 pp.
97. DIOUF A., et al., 1989. Commentaire d'une carte de production végétale au Sénégal. *Biologie Géologie*, N° 3, 527-533 pp.
98. DIOUF M., 2000. Dynamique des écosystèmes sahéliens : effets de la sécheresse et des microsites topographiques sur la diversité de la végétation ligneuse au Ferlo (Nord – Sénégal). DEA, département de Biologie végétale. Fac. Des Sciences et Techniques. *UCAD*. DK.
99. DIRECTION DE L'ELEVAGE, PROJET PACE – SENEGAL., 2006. Les mouvements du bétail au Sénégal, rapport final, Dakar, 110 p.
100. DEFCCS, 1999. Rapport d'activité, *République du Sénégal*, 300 p.
101. DI GREGORIO, JANSEN, 2000, Land Cover Classification System: Classification Concepts And User Manual, *FAO*, Rome
102. DOUGUEDROIT A., BRIDIER S., 2007. Réchauffement climatique et evolution de l'environnement des stations en region méditerranéenne française (1951-2005). Actes du colloque du XXème de l'AIC, Climat Tourisme Environnement, 204-209 pp.
103. DRESCH J., MARTIN V., PELISSIER P. (sous la dir.), 1977. Atlas national du Sénégal, *IGN*, 147 p.
104. DRURY S. A., 1998. Images of the earth, a guide to remote sensing (2nd.ed). *Oxford Science Publishers*, 203 p.
105. DUBOIS. J., Esquisse pédologique du Sénégal (1/1 000 000) non publié.
106. DUBREUIL V., MARCHAND J-P., 1997. Le climat, l'eau et les hommes. Ouvrage en l'honneur de Jean Mounier. *PUR*, 353 p.
107. DUPIRE M., 1957. Les forages dans l'économie peulh, in Grosmaire, Service des Eaux et Forêts, Saint-Louis, 19-24 pp.
108. DUPIRE M., 1970. Organisation sociale des peul. Thèse de Doctorat. *Université de Paris*, Plon, 622 p.
109. EC/FAO ACP, 1999. Collecte de données. Etude sur les ressources forestières et les plantations forestières du Sénégal. Période 1992-1999. Rapport technique AFDCA/TR/15.
110. EL HILI M., 1990. L'Afrique est malade de son environnement. In Coll. De l'Observatoire du Sahara et du Sahel, *Sécheresse*, vol. 1, n°3, 212 – 213 pp.
111. ELGHADI A. V., BALLOUCHE A., 2004. Temps perturbé d'hiver et sécheresse sahélienne. L'exemple d'une station mauritanienne (Aleg, Brakna). *Revue Norois* (En ligne), 191 (2004/2), 11-19 pp.
112. Enda et République française, Ministère de la coopération, 1986. Enjeux de l'après-barrage, vallée du sénégal, 632 p.
113. FAO, SMIAR, 2007. Sahel : situation météorologique et état des cultures, Rapport N°3, 13 septembre 2007, 1-5 pp.

114. FAURE. J., 1953. Les sols et la végétation de la région de Louga. Bull. n°11 CRA, Bambey.
115. FAYE B., 2001. Le rôle de l'élevage dans la lutte contre la pauvreté, *revue Elev. Méd. Pays trop.*, 54 (3-4) : 231-238 pp.
116. FAYOLLE, 1974. Valorisation du cheptel bovin en zone sylvo pastorale de la République du Sénégal : *Maisons Alfort*, IEMVT / Dakar Hann, Laboratoire National de l'élevage
117. FENSHOLT, R., SANDHOLT, I., RASMUSSEN, M. S., STISEN, S. and DIOUF, A. (2006). Improved Primary Production modelling in the semi-arid Sahel using MODIS vegetation and stress indices and Meteosat PAR data. *Remote Sensing of Environment*, In review.
118. FONTAINE B., 1990. Etude comparée des moussons indienne et ouest africaine : caractéristiques, variabilité et téléconnexions. Textes et tableaux. *Centre de Recherches de Climatologie URA 909* du CNR, Dijon, 233 p.
119. FONTAINE B., JANICOT S., 1993. L'évolution des idées sur la variabilité inter-annuelle récente des précipitations en Afrique de l'Ouest. *La Météorologie*, 8 (1), 28-53 pp.
120. FONTAINE, B., N. PHILIPPON, and P. CAMBERLIN, 1999. An improvement of June-September rainfall forecasting in the Sahel based upon region April-May moist static energy content (1968-1997). *Geophysical Research Letters*, **26(14)**, 2041-2044.
121. IEMVT, ISRA., BRGM., 1989. Elevage et potentialités pastorales sahéliennes. Synthèses cartographiques, Dakar / Paris, 27 p
122. GALLAIS J., 1984. Hommes du Sahel, Espace – Temps et pouvoirs, Le delta intérieur du Niger 1960 – 1980, ouvrage publié avec le Centre national des lettres, *Flammarion*, Paris.
123. GIEC, 2007. Climate Change, Synthesis reports. <http://www.ipcc.ch>
124. GIRARD M. C., GIRARD C. M., 1999. Traitement des données de télédétection, *Dunod Ed.*, Paris, 529 p plus CD Rom. (voir aussi cours de télédétection et «Vademecum de télédétection»).
125. GIRARD M. C., GIRARD C. M., 1999. La télédétection appliquée, zones tropicales et intertropicales. *Dunod Ed.*, Paris, 529 pages plus CD Rom.
126. GODARD A., 1993. Les climats : Mécanismes et répartitions. Paris, A. Colin, cursus, collection géographie, 191 p.
127. GODARD V., 2006. Cours de télédétection, Département de Géo., Université Paris 8. site web : www.ipt.univ-paris8.fr/vgodard/enseigne/memotele/mem43tel.htm
128. GROSMARE P., 1957. Eléments de politique sylvopastorale au Sahel Sénégalais. Partie 2 : Les conditions du Milieu. Fasc. 10 A – Le milieu physique. Service des Eaux, Saint-Louis, Sénégal, 56 p.
129. HIELKERMA, J. U., S. D. PRINCE, and W. L. ASTLE., 1986. Rainfall and vegetation monitoring in the savanna zone of the democratic republic of Sudan using the NOAA AVHRR, *Int. J. Remote Sensing*, 7, 1499-1513 pp.
130. HUBERT P., CARBONNEL J. P. et CHAOUICHE A., 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of hydrology*, 110, p 349-367.
131. HUBERT P., CARBONNEL J. P., 1987. Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'ouest. *J.of Hydrology*, 95, 165-183 pp.

132. HUBERT P., CARBONNEL J. P., 1993. Segmentation des séries annuelles de débits de grands fleuves africains, Bull. du CIEH, Ouagadougou, 92, pp 3-10.
133. HUBERT P., SERVAT E., PATUREL J.E., KOUAME B., BENDJOUDI H., CARBONNEL J.P., LUBES-NIEL H., 1998. La procédure de segmentation, 10 ans après. In : Water Ressources variability in Africa during the XXth Century. (ed. By Servat, Hughes, Fritsch and Hulme) Proc. Abidjan, 98 conf., *IAHS Publ*, no.25, 2267-173 pp.
134. HUBERT P., 2000. The segmentation procedure as a tool for discrete modelling of hydrometeorological regimes, stochastic environmental research and risk assessment, 13; 297-304 pp.
135. HUBERT P., 2005. Sahel : La sécheresse est finie. Sources Nouvelles, Actualités du secteur eau et assainissement. Edition spéciale N° 16, nov 2005.
136. HUBERT P., BADER J-C., BENDJOUDI H., 2007. Un siècle de débits annuels sur le fleuve Sénégal, Séminaire HSM Montpellier, 22-24 novembre 2005. Impacts climatiques et anthropiques sur la variabilité des ressources en eau et publié dans le *Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 52, 68-73 pp.
137. HUBERT-MOY L., 1991. Etudes d'échelles emboîtées pour déterminer l'indice de végétation et la température du sol. Satellites et Climatologie. Actes du colloque de Lannion-Rennes (France), 20-22 juin 1990. *AIC*, 73-81 pp.
138. IEMVT, ISRA., BRGM. 1989. Elevage et potentialités pastorales sahéliennes. Synthèses cartographiques, Dakar / Paris. 27 p
139. IOANA-TOROIMAC G., ZAHARIA L., BIGOT S., BELTRANDO G., 2006. Activité végétale et caractéristiques hydroclimatiques en Dobroudja (Roumanie) : l'apport des données SPOT-4 VEGETATION. *Téledétection*, vol. 6, n°3, 195-204 pp.
140. ISRA., 1996. La remise en eau de la vallée fossile du Ferlo : Enjeux et impacts sur les activités des populations de la zone sylvopastorale. Diagnostic participatif : le CRZ et ses partenaires, URRZS-CRZ, 39 p.
141. JANICOT S., 2002. La Mousson d'Afrique de l'Ouest : des téléconnexions à la variabilité synoptique, HDR, *Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)*.
142. JANICOT S., FONTAINE B., 1993. L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l'Ouest. *La Météorologie*, série 8 (1), 28-53 pp.
143. JANICOT S., 1991. Deux interprétations différentes de la variabilité pluviométrique au Sahel, *Pub. AIC*, 141-156 pp.
144. KANE I., 2007. Prélèvement végétal en région sub-soudanienne. Thèse de Doctorat, *Univ. Lyon 3, Géog*,
145. KERMADI S., 1994. Les saisons climatiques : SAÏS, DIR, MOYEN-ATLAS (MAROC). Etude analytique, dynamique et satellitaire, thèse de Doctorat, *Université de Toulouse Le Mirail*, Institut de Géographie, 370 p.
146. LACAZE B., et BERGES J., 2006. Contribution of Meteosat Seconde Generation (MSG), imagery to drought early warning. Proceedings of the first inter. Conf. on remote Sensing and Geoinformation processing in the Assesment and Monitoring of the land degradation and desertification, Trier, Germany, 7-9 September, 406-412 pp.
147. LAKE L. A., TOURE E. H. S. N., 1985. L'expansion du bassin arachidier, Sénégal 1954 – 1979, Approche cartographique et interprétation dynamique. Paris, *Amira*, 102 p.

148. LAKE L. A., NDOUR N., THIOBANE M., BA A., 2003. Evolution de la production végétale des parcours naturels au Sahel : le nord-ouest sénégalais durant les années 1990. *Sécheresse Revue électronique* 1 E, N°1.
149. LAVIGNE DELVILLE P., CAMPHUIS N., 1998. Aménager les bas-fonds dans les pays du Sahel. Paris : *collection Le point Sur*, 527 p.
150. LEBEL T., REDELSPERGER J-L., 2007. Le projet AMMA, un exemple d'étude intégré et multidisciplinaire sur un système climatique régional. Publications S.H.F. sur les variations climatiques et hydrologie. Congrès de la Société Hydrotechnique de France, 29^e journées de l'hydraulique. Lyon, 27-28 mars 2007.
151. LEBORGNE JEAN, 1988. Un siècle d'évolution de la pluviométrie dans la région mauritano-sénégalaise. *Climats et Climatologie*. Dijon, p 309-318.
152. LEE A. F. S., HEGHINIAN S. M., 1977. A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variable : a Bayesian approach. *Technometrics* 19 (4), 503 – 506 pp.
153. LE BORGNE J., 1988. La pluviométrie au Sénégal et en Gambie. *Ministère français de la Coopération et ORSTOM*, 95 p.
154. LE HOUEROU H. N., 1989. The grazing land ecosystems of the African Sahel, *Springer-Verlag*, Berlin, 282 p.
155. LE HOUEROU H. N., 1989. Les hommes face aux sécheresses : Nordeste brésilien, Sahel africain, *IHEAL et EST-Samuel Tastet Editeur*, 1989, 127 – 137 pp.
156. LEPRUN J. C., 1971. Nouvelles observations sur les formations dunaires sableuses fixées du Ferlo nord occidental (Sénégal). Ass. Sénégal, Et. Quaternaires ouest africaines, *Bull. Liaison*, Sénégal, 31, 69-78 pp.
157. LEROUX M., 1970. La dynamique des précipitations en Afrique Occidentale. Publ. *Dir. Expl. Mét. ASECNA*, Série I, n°23, Dakar.
158. LEROUX M., 1974. Champ de vent en altitude en Afrique occidentale. Publ. *Dir. Expl. Mét. ASECNA*, Série I, n°34, Dakar.
159. LEROUX M., 1983. Le climat d'Afrique tropicale. Thèse de doctorat d'Etat es-lettres, *Univ. Dijon*, 3 tomes, 1427 p.
160. LEROUX, 1986a. l'anticyclone mobile polaire : facteurs premiers de la climatologie tempérée. *Bull. Asso. Géog.*, Paris 4, 311-328 pp.
161. LEROUX M., 1988. La variabilité des précipitations en Afrique occidentale : les composantes aérologiques du problème. *Veille climatique* N° 22, 7 figures, 26-45 pp.
162. LEROUX M., 1992. Perceptions "statistiques" et réalités dynamiques. Transport méridien en masse extratropicale, agglutination anticyclonique et circulation linéaire tropicale, *pub. AIC*, vol.5, 157-167 p.
163. LEROUX M., 1992. L'équateur météorologique de l'Afrique tropicale. Du Front Intertropical (FIT) à l'Equateur Météorologique (EMI et EMV). Evolution d'un concept, *Pub. AIC*, vol. 5, 145-156 pp.
164. LEROUX M., 1993. Le climat de l'Afrique tropicale = The climate of tropical Africa. Paris, *Edition Champion*, 633 p.
165. LEROUX M., 1993. The moving polar high a new concept explaining the actual mechanism of the meridional air –mass and energy exchanges, and the global propagation of talaeco-climatic changes. *Global and planetary changes*, 7, 69 – 93 pp.
166. LEROUX M., 1996. La dynamique du temps et du climat. Paris, *Masson*, Enseignement des sciences de la terre. 310 p.

167. LEROUX M., 2000. La dynamique du temps et du climat. Paris, *Dunod*, 2ième édition, 367 p.
168. LEROUX, 2001. The Meteorology and Climate of Tropical Africa. *Springer-Praxis books in environment sciences*, UK, 548 p.
169. LEROUX M., 2002. Les climats subtropicaux dits “méditerranéens” et les climats de la Méditerranée (2 ème Partie), Revue de *La Recherche à l’information*. La formation géographique, vol. 66, SEDES, Paris.
170. LEROUX M., 2005. Global Warming : Myth or Reality? The Erring ways of Climatology. Chichester, UK, *Praxis Publishing Ltd.*, 509 p
171. LEROUX M., 2007. Les échanges méridiens commandent les changements climatiques. Séminaire de travail : Evolution du climat, *Académie des sciences*, Paris, 5 mars, 12 p.
172. LETHIELLEUX M., 2003. Statistique descriptive. Réviser la gestion. Express. 3 ième édition, *Dunod*, Paris, 153 p.
173. LOSTSCH A., FRIEDL M. A., ANDERSON B. T., TUCKER C. J., 2003. Coupled vegetation-precipitation variability observed from satellite and climate records, *Geophys. Res. Lett.*, 30 (14), 1774, doi:10.1029/2003GL017506.
174. LUBES H., MASSON J. M., SERVAT E., PATUREL J. E., KOUAME B., BOYER J. F., 1994. Caractérisations de fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques. Etude bibliographiques. Programme ICCARE, rapport N°3, *ORSTOM*, Montpellier, France, 21 p.
175. LUBES H., MASSON J.M., PATUREL J.E., SERVAT E., 1998. Variabilité climatique et statistique. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l’homogénéité de chroniques. *Rev. Sci. Eau* 11(3), 383-408 pp.
176. MAHE G., 1993. Les écoulements fluviaux sur la façade Atlantique de l’Afrique: étude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situation hydroclimatique moyenne et extrême. Paris édition de l’*ORSTOM* : Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, Collection études et thèses. 438 p.
177. MAIGNIEN. R., 1965. Carte pédologique du Sénégal au 1/1.000.000. *ORSTOM* Paris, Sér. Notices et cartes, n° 24, 1 carte, 63 p.
178. MAJOR D J., BARET F., GUYOT G., 1990. A ratio vegetation index adjusted for soil brightness. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. n°5, 727-740 pp.
179. MALO, A. R., and NICHOLSON S. E., 1990. A study of rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using NDVI, *J. Arid Environ.*, 19, 1-24 pp.
180. MARTINY N., RICHARD Y., CAMBERLIN P., 2005. Interannual persistence effects in vegetation dynamics of semi-arid Africa. *Geophysical research letters*, vol. 32, L24403, doi:1029/2005GL024634.
181. MAYMARD J. M., 1962. Les sols de la région de Matam (avec une carte pédologique au 150.000, édité par la SOGETHA – PARIS) 21 X 30, ronéotypées, 8 figures, 2 cartes 42 p.
182. MBAYE M., 1991. Etude de la dynamique des peuplements ligneux du Ferlo. Cas de trois forages : Tessekré, Mbidi, Tatki (1979-1985). Mémoire de Maîtrise, Département de Géographie, Fac. Des Lettres et Sciences Humaines, *UCAD*, DK.

183. MICHEL P., 1973. Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Thèse d'Etat, Strasbourg (1970). Mémoire *ORSTOM*, Paris, n°63, 3 tomes, 752 p, cartes h. t.
184. MICHEL P., 1985. Sécheresse et transformation de la morphodynamique dans la vallée et dans le delta du Sénégal. *Revue géomorphologique*, N°4 – TXXXIV.
185. MICHEL P., BARUSSEAU J F., SALL M M., 1993. L'après-Barrage dans la vallée du fleuve Sénégal : Modifications hydrodynamiques et sédimentologiques : Conséquences sur le milieu et les aménagements hydro-agricoles. Résultats des travaux du projet C.A.M.P.U.S 1989-1992, programme de coopération avec l'Afrique et Madagascar pour la promotion universitaire et scientifique. Perpignan : *Presses Universitaires de Perpignan*. Collection études.
186. MICHEL P., 1984. Les variations du climat au Quaternaire récent dans le Sahel d'Afrique Occidentale et leurs conséquences sur les formations superficielles, l'hydrologie et la pédogenèse. *Bull. de la Société Languedocienne de Géographie*. Tome 18, fasc. 3-4, Montpellier, p 125 – 138 pp.
187. MICHEL P., SALL M M., 1980. Géologie et hydrogéologie. Hydrologie. Atlas du Sénégal, ed. *Jeune Afrique*.
188. MIETTON M., 1988. Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina Faso. L'érosion en zone de savane. *Université de Grenoble I*, 511 p.
189. MIETTON M., HAMERLYNCK O., OULD DADDAH M., OULD BABA M. L., DUMAS D., DUVAÏL S., 2006. Le bas-delta du fleuve Sénégal. Une gestion de l'eau dans l'incertitude chronique. Actes du colloque d'Arles «Incertain et Environnement : mesures, modèles, gestion » *IRD*, 321-335 pp.
190. Ministère de l'environnement et de la protection de nature et CSE, 2005. Rapport sur l'état de l'environnement au Sénégal, *République du Sénégal*, 231 p.
191. MOREL R., 1991. Evolution de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest depuis 1950. Actes de colloque de Fribourg, *AIC*, vol. 4.
192. MOREL R., 1992. Atlas agroclimatologie des pays de la zone du CILSS. Centre *AGRHYMET*.
193. MORINEAU A. et ALUJA-BARRET T., 1998. Analyses en Composantes Principales (avec illustrations SPAD), CISIA – CERESTA, Saint-Mandé.
194. MORON V., 1994. Variabilité des précipitations en Afrique Tropicale au nord de l'équateur (1933-1990) et relations avec les températures de surface océanique et la dynamique de l'atmosphère, thèse de Doctorat, Centre de Recherche de Climatologie, *Univ. de Bourgogne*.
195. NAIZOT T., AUDA Y., DERVIEUX A., THIOULOUSE J., BELLAN M. F., 2004. Une nouvelle analyse multi-temporelle d'images satellites, les résidus de l'Analyse en Composantes Principales. Un cas d'étude : une série d'images Landsat Thematic Mapper de la Camargue, France. *Int. J. Remote sensing*, vol. 25, N° 10, 1925-1938 pp.
196. NAZA 2005. site internet : <http://www.earthobservatory.nasa.gov>.
197. NDIAYE D. S. BA T., 2006. Etude multi-date de l'évolution de l'occupation du sol dans la région de Dakar : Dynamique des espaces agricoles urbains et péri-urbains versus l'espace bâti. Rapport de communication du Centre de Suivi Ecologique (CSE) et de l'Istituto Agronomico per l'Oltremare (IAO), 12 p.
198. N'DIAYE P., 1997. L'implication des populations dans la gestion des ressources naturelles. Le cas du Sénégal. In *dév. Durable au Sahel*, ss. La dir. de TERSIGUEL Ph., et BECKER C. Ed. *Karthala*, Paris, 247 – 259 pp.

199. N'DIAYE P., 1980. Végétation et faune. Atlas du Sénégal, *ed. J. Afrique*, 18–19 pp.
200. NDIAYE M. D., LAKE L. A., THIOBANE M., 2000. Dynamique du peuplement rural. Projet ecssén. 85–103 pp.
201. NDIONE J. A., 2002. Bilan climatique de l'Observatoire ROSELT du Ferlo (Sénégal). CSE, Dakar, Sénégal, 38 p.
202. NDIONE J. A. et KEBE C. M. F., 2002 : Epizootie de a fièvre de la vallée du rift au Sénégal en 1987 : Conditions pluviométriques d'une émergence. *Pub. Ass. Int. Clim.*, vol. 14, 428-436 pp.
203. NDONG J B., 1996. L'évolution du climat au Sénégal et les conséquences de la sécheresse récente sur l'environnement. Thèse de Doctorat Géographie – Aménagement. *Univ. Jean Moulin Lyon 3*, Facultés des Lettres et Civilisations, Laboratoire de Géographie Physique (LGP).
204. NICHOLSON S. E., 1981. Rainfall and atmospheric circulation during drought periods and wetter years in West Africa. *Monthly Weather Review*, vol. 109, n°10, 2191-2208 pp.
205. NICHOLSON S. E., 1986a. The nature of rainfall variability in Africa south of equator. *JCLI*, 6; 515-530 pp.
206. NICHOLSON S. E., 1986b. "The spatial coherence of African rainfall anomalies : interhemispheric teleconnections". *JCAM*, 25, 1365 – 1381 pp.
207. NIZINSKI J., MORAND D., FOURNIER C., 1992. Le rôle du couvert ligneux sur le bilan hydrique d'une steppe (nord du Sénégal). *Cah. Orstom*, sér. Pédologique, vol. XXVII, N°2, 225-236 pp.
208. NOUACEUR Z., 1999. Evolution récente des lithométéores en Mauritanie. Thèse de doctorat, *Université Jean Moulin Lyon III*, 503 pages.
209. NOUACEUR Z., SAGNA P., 1996. Le réchauffement du climat en Afrique de l'Ouest (Mauritanie, Sénégal, Mali), Publications de l'AIC, Vol. 9, 463-470 pp.
210. OUATTARA T., DUBOIS J.M., GWYN J., 2006. Méthodes de cartographie de l'occupation des terres en milieu aride à l'aide de données multi-sources et de l'indice de végétation TSAVI. *Téledétection*, vol. 6, n°4, 291-304 pp.
211. PAREIRA BARRETO., 1964. Reconnaissance pédologique du Ferlo – Sud avec une esquisse pédologique au 1/250000. rapport miméo – *ORSTOM* Hann.
212. PATUREL J. E., SERVAT E., DELATTRE M. O., LUBES N. H., 1998. Analyse de séries pluviométriques de longues durées en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrol. Sci. J.* 43(6), 937-946 pp.
213. PATUREL J. E., SERVAT E., DELATTRE M. O., LUBES N. H., 1997a. Variabilité climatique et analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. *CR acad. Sc. Paris*, 325, Série Iia, 779-782 pp.
214. 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.
215. PAGNEY P., 1994. Les climats de la terre. 2 ième édition, *Masson*, Paris, 167 p.
216. POUPON H., 1976. Influence de la sécheresse de l'année 1972-1973 sur la végétation d'une savane sahélienne du Ferlo septentrional, Sénégal, *NEA*.
217. PLANHOL W DE., ROGNON P., 1970. Les zones tropicales arides et subtropicales. Paris, A. Colin, Collection U série géographie, 487 p.

218. POMMIER A., 2005. Analyse objective de la dynamique aerologique de basses couches dans l'espace Atlantique Nord : mécanismes et évolution de 1950 à 2000. Thèse de Doctorat de Géographie, *Univ. Jean Moulin Lyon 3*.
219. POUPON H., 1977. Etude de la phénologie de la strate ligneuse à Fété-Olé (Sénégal septentrional) de 1971 à 1977. *Bull. IFAN*, 41, 1, 44-85 pp.
220. POUPON H., 1980. Nitrogen cycling in a soil-tree system in a sahelian savanna: example of Acacia Senegal. Stockholm : *SCOPE/UNEP*, 363 – 369 pp.
221. PUREVDORJ T., TATEISHI R., 1998. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. *International Journal of remote sensing*, vol. 19, n° 18, 3519-3535 pp.
222. RATSIVALAKA S., 2006. Climat, couverture végétale et érosion des sols à Madagascar. Apport de la télédétection et de SIG, document de synthèse des travaux, vol.2, pour l'obtention de HDR, *Université Jean Moulin Lyon 3*, 172 p.
223. REMINI B., 2005. L'évaporation des lacs de barrages dans les régions arides et semi arides : Exemples algériens. *LARHYSS Journal*, ISSN 1112-3680, N°04, 81-89 pp.
224. RENARD C. et COMBY J., 2006. Evaluation de techniques d'interpolation spatiale de la pluie en milieu urbain pour une meilleure gestion d'événements extrêmes : le cas du grand Lyon, *La Houille Blanche*, Vol. 6, pp. 73-78.
225. RENARD F. et SARR M. A., 2009. Quantification spatiale de la pluie en milieu rural sahélien (Ferlo, Sénégal) et en milieu urbain tempéré (Grand Lyon, France) : Evaluation de méthodes d'interpolation spatiale. *J. Libbey Ed., Sécheresse*, vol. 20 N°3, 244-25 pp.
226. République du Sénégal, 2000. Etude bathymétrique et limnologique du lac de Guiers. Rapport de synthèse, DGPRE, Carl Bro Interna., *Tropis Environn.*, DK, 123p.
227. République du Sénégal, Direction des Statistiques et de la prévision, 2005. Rapport de recensement général de la population, Dakar, 354 p.
228. REYNAUD J., 1994. Evolution récente de la pression en surface et des températures dans l'espace Atlantique nord, du Groenland à la Scandinavie, Publication de l'AIC, vol. 7, 268-279 pp.
229. RICHARD Y., POCCARD I., 1998. A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual variation in southern Africa. *Inter. J. Remote sensing*, vol. 19 ; 2907-2920 pp.
230. ROBERTY, G., 1952. La végétation du Ferlo, *Bull. de l'IFAN*, série A : Sc. Nat., 14 (3), 777 -798 pp.
231. ROBIN M., 1995. La télédétection. *Nathan*, Paris.
232. ROBIN M., 2002. Télédétection, Des satellites au SIG. Une analyse complète du processus de création d'un type essentiel d'information géographique. *Nathan Université*. 318 p.
233. SAGNA P., 1988. Etude des lignes de grains en Afrique de l'ouest, Th. 3^{ème} cycle, *Univ. Dakar*, 291 p.
234. SAGNA P., 1991. Apport pluviométrique des lignes de grains au Sénégal de 1981 à 1985. *Pub. AIC*, p. 279-297.
235. SAGNA P., 2005. Dynamique du climat et son évolution récente dans la partie ouest de l'Afrique de l'occidentale. Thèse de Doctorat d'Etat es lettres. Tome I II, Dep. Géo, Fac. des Lettres et Sciences humaines, *UCAD*.
236. SAGNE M., 1985. Caractéristiques des sols de l'observatoire du Ferlo. CSE – ROSELT/OSS. Rapport de consultation.

237. SALL A., 1995. La remise en eau de la vallée du Ferlo et son impact sur la vie pastorale dans la zone de Keur Momar Sarr (Région de Louga), mémoire de Maîtrise, Départ. De Géographie, Fac. Des lettres et Sc. Humaines, UCAD, Dakar. 108 p.
238. SALL M. M., 1978. Mise en place des systèmes dunaires continentaux (Sénégal – Afrique Occidentale). PARCE.
239. SALL M. M., 1978. Evolution du système ogolien et problème de désertification. PARCE.
240. SALL M. M., 1983. Dynamique et morphogenèse actuelles au Sénégal Occidental. Thèse d'Etat, *Univ. Strasbourg I*, 2 tomes, 604 p., cartes h.t.
241. SAMBA KIMBATA M. J., 1993. Précipitations et bilan de l'eau dans le bassin forestier du Congo et ses marges. Thèse de Doctorat ès Lettres en Sciences Humaines, *Univ. de Dijon*, Tome 1, 242 p et Tome 2 ; 189 p
242. SANNIER C A D., TAYLOR J.C., DU PLESSIS W., CAMPBELL K, 1998. Real-time vegetation monitoring with NOAA-AVHRR in Southern Africa for wildlife management and food security assessment. *Int. J. Remote Sensing*, 1998, Vol. 19, N° 4, 621-639 pp.
243. SANTOIR C., 1983. Raison pastorale et pratique de développement : Les peuls face aux aménagements, *ed. l'Harmattan*, ORSTOM, 185 p.
244. SANTOIR C., 1977. Les sociétés pastorales du Sénégal face à la sécheresse (1972-1973). Réactions à la crise et degré de rétablissement deux ans après. Le cas des peul du Galodjina. *ORSTOM*, Travaux et documents, n°166, 185 p.
245. SARR M.A., SALL O., FAYE M., NDIAYE A., DIOUF A., 1998. Etude de la salinité dans le Gandiolais, Sénégal, Rapport de terrain, Journ. *UGB*, Saint-Louis.
246. 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.
247. SARR M. A. et LACAZE B., 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). *Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection*, version en texte intégral disponible sur le site Internet HAL-SHS.
248. SARR M. A., 2008. Variabilité pluviométrique en Afrique de l'Ouest : Dynamique des espaces végétaux à partir des images satellites. Exemple du Bassin Versant du Ferlo (Sénégal). Actes de colloque Climat-Sociétés du *Comité National Français de Géographie*, Nantes, 18 p.
249. SARR M. A., 2009. Tournant dans l'évolution des précipitations et des températures au Ferlo (Sénégal) : deux paramètres traduisant une tendance au réchauffement. «Extrêmes climatiques : genèse, modélisation et impacts», Actes de colloque de *l'Association Internationale de Climatologie*, Numéro spécial, Cluj University Press, 425-430 pp.
250. 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. *Cybergeéo : European Journal of Geography* (en ligne), Environnement, Nature, Paysage : [www.cybergegeo.eu/index 22707.html](http://www.cybergegeo.eu/index%2022707.html).
251. SERVAT E., PATUREL J. E., LUBES H., 1996. La sécheresse gagne l'Afrique tropicale. *La Recherche*, N°290, 24-25 pp.
252. SERVAT E., 1994. ICCARE. Identification et Conséquences d'une variation du Climat en Afrique de l'ouest et non sahélienne. Présentation du programme, Rapport N°1, *ORSTOM*, Abidjan, Cote d'Ivoire.

253. SOW A A., 1984. Pluies et écoulement fluvial dans le bassin du fleuve Sénégal : Contribution à l'hydrologie fluviale en domaine tropical humide africain. Volume V.
254. SULTAN BENJAMIN, 2002. Etude de la mise en place de la mousson en Afrique de l'Ouest et de la variabilité intra-saisonnière de la convection. Applications à la sensibilité des rendements agricoles. Thèse de Doctorat, Environnement : milieux, techniques, sociétés. *Univ. Paris 7 – Denis Diderot, UFR GHSS*, 288 p.
255. SVENSMARK H., FRIIS-CHRISTENSEN E., 2007. Reply to lokwood and Fröhlich- The persistent role of the sun in climate forcing, Scientific. Report, Danish National Space Center, 6 p.
256. SYLLA C., 1986. Comportement de divers ligneux en plantation dans la zone sahélienne : le cas de MBIDI. *Ecologie forestière. Mémoire de Confirmation, CNRF, DK*, 80 p.
257. SY Boubou Aldiouma, 2000. Sécheresse et érosion des vents dans la vallée et le delta du Fleuve Sénégal. *AFRISOR, Revue des Sciences et Humaines*, ISSN 0851–1772, N° 1, février, 107-127 pp.
258. SY O., 2003. Dynamique des ressources en eau et de la mobilité pastorale en ZSP. Thèse de troisième cycle, *Univ. Cheikh A. Diop, Département de Géographie*, 186 p.
259. 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, URL : <http://www.cybergeo.eu/index22057.html>
260. TERSIGUEL P., et al., 1997. Développement durable au Sahel. *Karthala*, Paris, 280 p.
261. THOMSON K.P. B., BERNIER M., TEILLET P., HORLER D., GOSSELIN C., 1984. Evaluation des capteurs TM, MSS, HRV pour estimer la superficie du maïs dans le contexte canadien. Les actes du 8ième symposium canadien de télédétection et 4 ième congrès de l'association québécoise de télédétection, 3-6 mai 1983, Montréal, 840 p.
262. TOMCZAK M. 1998. Spatial interpolation and its uncertainty using automated anisotropic inverse distance weighting (IDW) – Cross validation / Jackknife approach. *Journal of Geographic and Decision Analysis*, vol. 2, no. 2: 51-62 pp.
263. TOUPET C., MONOD T., 1992. Le Sahel, Paris *Nathan*, Université géographique d'aujourd'hui. 192 p.
264. TOUPET C., 1996. La crise sahélienne. *Revue Géographique de Lyon*, vol. 70, n° 3 – 4, 181 – 186 pp.
265. TOURE O., 1997. Espace pastoral et dynamiques foncières au Sénégal- Programme Zones Arides- IIED- 33 p
266. TOURE O., 1994. La gestion des ressources naturelles en milieu pastoral : L'exemple du Ferlo sénégalais. In *dév. Durable au Sahel*, ss. La dir. de TERSIGUEL Ph., et BECKER C. *Ed. Karthala*, Paris. 127 – 141 pp.
267. TOURE O., 1990. *Ngaynaaka majji : l'oubli des pratiques pastorales dans le Ferlo (Nord Sénégal)*. CSE, Dakar.
268. TOURE O., 1990. Le zonage du ferlo. Analyse des modes d'exploitation du milieu et de leur évolution dans la zone sahélienne sénégalaise. *CSE*, Dakar.
269. TUCKER C. J., 1979. Red and infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8, 127-150 pp.
270. UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – FOOD AND AGRICULTURAL ORGANISATION., 1987. Pluviosité au Ferlo (région sahélienne sénégalaise) depuis 1919. The global environment monitoring system, GEMS, Serie Sahel, n°2, 95 p.

271. UNIVERSITE CHEIKH A. DIOP et UNIVERSITE DE SHERBROOKE., 2000. Ecographie du Sénégal subsaharien et développement, dynamique des espaces pastoraux des années 1950 à 2015. Projet Ecossén, *IFAN – CARTEL*, 259 p.
272. USAID, 1985. Carte morphopédologique. Projet USAID/RSI N° 685-0233. *République du Sénégal*, Ministère de l'intérieur, PNAT.
273. USOSKIN I. G., KOVALSTOV G. A., 2008 (A paraître). Cosmic ray and climate of the earth : possible connection. *Compte rendus Géoscience*, 10 p.
274. VALENTIN C., 1983. Système de production d'élevage au Sénégal : effets du pâturage et du piétinement sur la dégradation des sols autour des points d'eau artificiels en région sahélienne (Ferlo, Nord). ORSTOM, DK.
275. VALENTIN C., 1981. Evolution de la surface du sol : piétinement, érosions hydriques et éolienne, *ORSTOM*, Abidjan.
276. VALENZA J., DIALLO A. K., 1972. Etude des pâturages naturels du Nord Sénégal. *Maisons – Alfort, IEMVT, DAKAR, LNERV*, Fac, Ministère du dév. Rural, études agrostologique, n°34, 311 p.
277. VINCKE C., 1995. La dégradation des systèmes écologiques sahéliens : effets de la sécheresse et des facteurs anthropiques sur l'évolution de la végétation ligneuse au Ferlo – UCL – (Bel.) *ORSTOM*, DK, 87 p.
278. WANE A., ANCEY V., et GROSIDIER B., 2006. Les unités pastorales du Sahel sénégalais, outils de gestion de l'élevage et des espaces pastoraux. Projet durable ou projet de développement durable ?, Développement durable et territoire, Dossier 8 : Méthodologies et pratiques territoriales de l'évaluation en matière de développement durable, mis en ligne le 13 décembre 2006.
279. WEBER C., 1995. Images satellitaires en milieu urbain. *Hermès*. Paris.
280. HOUNTOUDJI Y. C., OZER P., NICOLAS J., 2009. Mise en évidence des zones touchées par la désertification par télédétection à basse résolution au Niger. *Cybergéo*, Environnement, Nature, Paysage.
281. ZHANG, X., FRIEDL M., SCHAAF C. B., STRAHLER A H., LIU A., 2005. Monitoring the response of vegetation phenology to precipitation in Africa by coupling MODIS and TRMM instruments, *Journal Geophysical Research*, Vol. 110, D12103, doi:10.1029/20044JD005263

Base de données d'images satellites

Centre canadien de Télédétection

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/fundam/fundam_f.html

Un très bon cours de télédétection en français et en anglais

SERTIT : <http://sertit.u-strasbg.fr>

OSRS Remote sensing.org : <http://www.remotesensing.org>

Ressources en Télédétection (format d'image, images, capteurs, lancements, logiciels, ...)

Spotimage : <http://www.spotimage.fr>

Site de la société Spotimage qui distribue les produits issus des satellites SPOT

Images gratuites : Landsat anciennes (années 1990) : <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>
(images couleur compressées MrSid, par carrés UTM)

Télécharger les canaux bruts, en format geoTIFF, par scène Landsat
<http://glcf.umiacs.umd.edu/data/>

Le site nima est pour obtenir du SPOT panchromatique à 10 m (également des années 1990) :

<http://geoengine.nima.mil/>

http://www.fas.org/irp/imint/doc/rst/sect3/sect3_1.html

http://www.wds.worldbank.org/servlet/WDSContentServer/WDSP/IB/2000/07/21/000094946_00040705411362/Rendered/PDF/multi_page.pdf

<http://www.cas.sc.edu/geog/rslab/Rsc/mod8/exercises/Tsa.html> (1 sur 18) 15/05/2007 :
Time series change analysis using standardized principal components analysis. Change detection exercise.

free.vgt.vito.be/, les synthèses décennales de NDVI issues de SPOT-VEGETATION

<http://prodig.univ-paris1.fr/msg/>, les synthèses décennales élaborées à partir des séries d'images du capteur SEVIRI de MSG et obtenues selon la procédure mise au point dans le cadre du GDR MSG-ATR.

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE

Figure 1 : Démarche méthodologique générale de ce travail de thèse 17

CHAPITRE 1 - PARTIE 1

Figure 1. 1 : Les zones écogéographiques du Sénégal	24
Figure 1. 2 : Le bassin versant du Ferlo	25
Figure 1. 3 : Carte et coupe hydrogéologiques du bassin versant du Ferlo.....	26
Figure 1. 4 : Localisation des anciennes provinces et répartition globale des ethnies sur le territoire national	28
Figure 1. 5 : Localisation des sites du Lac de Guiers, du Canal.....	31
Figure 1. 6 : Bilan hydrologique du lac de Guiers (1976 à 1981)	32
Figure 1. 7 : Répartition des principales mares (aménagées et non aménagées) dans le bassin versant du Ferlo.....	36
Figure 1. 8 : Les principaux types de sols du bassin versant du Ferlo	40
Figure 1. 9 : Les principales formations végétales du bassin versant du Ferlo	44
Figure 1. 10 : Localisation et identifiant des communautés rurales au nord du Sénégal	48
Figure 1. 11 : Répartition de la population au nord du Sénégal selon le recensement de 1988	49
Figure 1. 12 : Répartition de la densité (habitants/km ²) au nord du Sénégal	50
Figure 1. 13 : Évolution de la population au nord du Sénégal entre 1988 et 2001	51
Figure 1. 14 : Répartition des forages mécanisés dans le bassin versant du Ferlo.....	60
Figure 1. 15 : Évolution des effectifs du cheptel par espèce et par département	63

CHAPITRE 2 - PARTIE 1

Figure 2. 1 : Identification d'une masse d'air froid (AMP) à partir d'un BME (a) et analyse de la circulation et des formations nuageuses associées (b), Leroux (1996) Sagna (2005)..	71
Figure 2. 2 : Structure verticale moyenne de la troposphère tropicale, schémas saisonniers (Leroux, 1983) déterminant les positions moyennes des deux structures de l'équateur météorologique. La structure FIT porte maintenant le nom d'équateur météorologique incliné (EMI) et la zone intertropicale de convergence celui d'équateur météorologique vertical (EMV) (Leroux M., 1992).....	75
Figure 2. 3 : Champ de vent moyen en surface en janvier et en juillet sur l'espace atlantique (adapté de Leroux M., par Sagna P., 2005).....	76
Figure 2. 4 : Les flux et discontinuités au Sénégal selon Leroux M., (1980).....	80
Figure 2. 5 : Coupe de la troposphère sur l'Afrique de l'Ouest en août le long du Méridien 0° (d'après Sagna, 1988 adaptée de Leroux, 1970, 1972, 1973)	82
Figure 2. 6 : Migrations de l'Équateur Météorologique (marqué par les traits continus et discontinus) en surface en Afrique de l'ouest et sur la région du Ferlo (Leroux, M., 1983).....	83
Figure 2. 7 : La migration d'une ligne de grains sur l'Afrique de l'Ouest durant l'été de l'hémisphère Nord et associée aux lithométéores (Leroux M., 2001)	84

Figure 2. 8 : Structure de la troposphère et composantes de la pluviogenèse sur l'Afrique occidentale et centrale (JET : Jet d'Est Tropical ; JEAn : Jet d'Est Africain nord ; JEAs : Jet d'Est Africain sud), (Leroux M., 2000).....	88
Figure 2. 9 : Les domaines climatiques du Sénégal, adaptés selon Ndong J. B., (1996) et selon Sagna P., (2005)	89

CHAPITRE 3 - PARTIE 2

Figure 3. 1 : Réseau météorologique national du Sénégal	97
Figure 3. 2 : Carte de situation du Bassin versant du Ferlo et des stations au sol retenues.....	99

CHAPITRE 4 – PARTIE 2

Figure 4. 1a : Variations interannuelles de la pluie au Ferlo, courbe de tendance linéaire et moyenne mobile calculée sur 5 ans (1951-2005).....	109
Figure 4. 2 : Le tracé de l'isohyète 400 mm sur la période 1951-2005.....	115
Figure 4. 3 : Le tracé de l'isohyète 400 mm sur la période 1963-2005.....	115
Figure 4. 4 : Fluctuations des isohyètes 400 mm des décennies 1951-1960, 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000 et de la période 2001-2005	116
Figure 4. 5 : Fluctuations de l'isohyète (400 mm) : moyennes 1971-80, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2005.....	117
Figure 4. 6 : La position de l'isohyète 400 mm en 1991	118
Figure 4. 7 : La position de l'isohyète 400 mm en 1992.....	119
Figure 4. 8 : La position de l'isohyète 400 mm en 1999	119
Figure 4. 9 : La position de l'isohyète 400 mm en 2005	120
Figure 4. 10 : Distribution du degré de variabilité à partir du rapport entre	121
Figure 4. 11 : Évolution de l'Indice Standardisé des Précipitations au Ferlo	126
Figure 4. 12 : Évolution de l'Indice Standardisé des Précipitations au Ferlo	127
Figure 4. 13 : Variation de la pluie moyenne mensuelle (1951-2005) comparée à la situation de l'année la plus humide et de l'année la plus sèche à Podor	136
Figure 4. 14 : Variation de la pluie moyenne mensuelle (1951-2005) comparée à la situation de l'année la plus humide et de l'année la plus sèche à Matam.....	136
Figure 4. 15 : Variation de la pluie moyenne mensuelle (1951-2005) comparée à la situation de l'année la plus humide et de l'année la plus sèche à Linguère	136
Figure 4. 16 : Variation de la pluie moyenne mensuelle (1951-2005) comparée à la situation de l'année la plus humide et de l'année la plus sèche à Diourbel.....	136
Figure 4. 17 : Variation de la pluie moyenne mensuelle (1951-2005) comparée à la situation de l'année la plus humide et de l'année la plus sèche à Coki	137
Figure 4. 18 : Variation de la pluie moyenne mensuelle (1951-2005) comparée à la situation de l'année la plus humide et de l'année la plus sèche à Barkédji	137
Figure 4. 19 : Variation de la pluie moyenne mensuelle (1951-2005) comparée à la situation de l'année la plus humide et de l'année la plus sèche à Bakel.....	137
Figure 4. 20 : Spatialisation des cumuls moyens mensuels en juin de 1963 à 2005	140
Figure 4. 21 : Spatialisation des cumuls moyens mensuels en juillet de 1963 à 2005	140
Figure 4. 22 : Spatialisation des cumuls moyens mensuels en août de 1963 à 2005	140
Figure 4. 23 : Spatialisation des cumuls moyens mensuels en septembre de 1963 à 2005	141
Figure 4. 24 : Spatialisation des cumuls moyens mensuels en octobre de 1963 à 2005	141

Figure 4. 25 : Évolution saisonnière des précipitations de quelques stations.....	142
Figure 4. 26 : Les variations interannuelles du nombre de jours de pluie (J.P) au tour de la moyenne de la série 1951-2005.....	146
Figure 4. 27 : Évolution des jours de pluie (J.P) et des précipitations (RR) (1951-2005)	149
Figure 4. 28 : Variations des ruptures des stations au cours de la première phase.....	155
Figure 4. 29 : Répartition temporelle des ruptures uniques de chaque station de mesure sur la période 1970-2005.....	157
Figure 4. 30 : Répartition des ruptures pluviométriques à l'échelle du bassin versant	159
Figure 4. 31 : Profil de situations communes aux 13 postes pluviométriques sur CP1	163
Figure 4. 32 : Cartographie des coordonnées des variables sur la CP1	165
Figure 4. 33 : Cartographie des coordonnées des variables sur la CP2.....	166
Figure 4. 34 : Profil d'événements communs aux 13 postes pluviométriques sur CP2	167
Figure 4. 35 : Cartographie des variables sur CP2	168
Figure 4. 36 : Cartographie des variables sur CP1 au mois de juillet	169
Figure 4. 37 : Cartographie des variables sur CP1 au mois d'octobre	169
Figure 4. 38 : Profil d'événements communs aux 12 postes sur CP1	170
Figure 4. 39 : Profil d'événements communs aux 12 postes sur CP1	170
Figure 4. 40 : Cartographie des variables sur CP2 au mois de juillet	171
Figure 4. 41 : Cartographie des variables sur CP2 au mois d'octobre	171
Figure 4. 42 : Profil d'événements communs aux 12 postes sur CP2 au mois de juillet (1963-2005).....	172
Figure 4. 43 : Profil d'événements communs aux 12 postes sur CP2 au mois d'octobre (1963-2005).....	172

CHAPITRE 5 – PARTIE 2

Figure 5. 1 : Longueur de la série des données de la durée d'insolation et lacunes.....	178
Figure 5. 2 : Variations mensuelles de la durée d'insolation.....	180
Figure 5. 3 : Évolution interannuelle de la durée d'insolation (1958-2002)	182
Figure 5. 4 : Variations des écarts de la durée d'insolation par rapport	184
Figure 5. 5 : Longueur de la série des données de l'insolation et lacunes.....	187
Figure 5. 6 : Températures minimales moyennes mensuelles	190
Figure 5. 7 : Températures maximales moyennes mensuelles	191
Figure 5. 8 : Températures moyennes mensuelles.....	192
Figure 5. 9 : Évolution des températures annuelles des stations de Podor, Diourbel.....	194
Figure 5. 10 : Évolution des températures annuelles des stations de Matam, Saint-Louis et Linguère traduisant un gradient thermique est-ouest	195
Figure 5. 11 : Évolution des températures moyennes annuelles (1951-2005).....	198
Figure 5. 12 : Écarts centrés réduits des températures moyennes annuelles (1951-2005)	199
Figure 5. 13 : Températures minimales durant la saison sèche	204
Figure 5. 14 : Températures maximales durant la saison sèche et courbe de tendance linéaire	205
Figure 5. 15 : Températures minimales durant la saison pluvieuse et tendance linéaire	208
Figure 5. 16 : Températures maximales durant la saison pluvieuse et tendance linéaire.....	209
Figure 5. 17 : Évolution comparée entre la durée d'insolation moyenne annuelle et les températures moyennes annuelles dans la région du Ferlo	212

CHAPITRE 6 – PARTIE 2

Figure 6. 1 : Longueur de la série des données de l'évaporation et les lacunes	214
Figure 6. 2 : Moyennes mensuelles de l'évaporation (1951-2005) décrivant la saisonnalité entre de fortes valeurs en saison sèche (précisément aux mois de mars, avril et mai) et de faibles valeurs en saison des pluies (précisément en juillet, août et septembre)	216
Figure 6. 3 : Évolution des moyennes annuelles de l'évaporation (1951-2005) traduisant d'une manière très nette une baisse des valeurs ces deux dernières décennies.....	218
Figure 6. 4 : Variations des écarts à la moyenne de l'évaporation au Ferlo (1951-2005) avec beaucoup plus d'anomalies négatives que d'anomalies positives au cours de ces dernières années	219
Figure 6. 5 : Évolution comparée entre précipitations cumulés annuels et évaporation moyenne annuelle dans la région du Ferlo	222
Figure 6. 6 : Évolution comparée entre l'évaporation moyenne annuelle et.....	223
Figure 6. 7 : Évolution comparée entre l'évaporation moyenne annuelle et les températures moyennes annuelles.....	224
Figure 6. 8 : Longueur de la série des données de l'humidité relative et lacunes	226
Figure 6. 9 : Évolution mensuelle de l'humidité relative avec des maxima en période pluvieuse (juillet, août, septembre) et des minima en saison sèche, durant les mois de décembre à février	228
Figure 6. 10 : Variations interannuelles décrivant une forte irrégularité interannuelle de l'humidité relative dans le domaine d'étude	230
Figure 6. 11 : Écarts centrés réduits de l'humidité relative sur la série (1951-2005) couplés à la courbe de la moyenne mobile sur 3 ans montrant nettement les différentes périodes caractérisées par des tendances inverses	233
Figure 6. 12 : Évolution comparée entre précipitations cumulés annuels et humidité relative moyenne annuelle.....	234
Figure 6. 13 : Variations des indices pluviométriques standardisés (IPS ou SPI) par rapport à la moyenne du siècle sur tout le Sahel	235

CHAPITRE 7 – PARTIE 2

Figure 7. 1 : Relation entre l'indice de végétation et la biomasse.....	241
Figure 7. 2 : Évolution interannuelle du maximum NDVI de juin.....	244
Figure 7. 3 : Évolution interannuelle du maximum NDVI de juillet.....	244
Figure 7. 4 : Évolution interannuelle du maximum NDVI d'août.....	244
Figure 7. 5 : Évolution interannuelle du maximum NDVI de septembre.....	245
Figure 7. 6 : Évolution interannuelle du maximum NDVI d'octobre	245
Figure 7. 7 : Évolution interannuelle du maximum NDVI de novembre	245
Figure 7. 8 : Évolution interannuelle du maximum NDVI de décembre	245
Figure 7. 9 : Écarts centrés réduits des valeurs NDVI en juin	247
Figure 7. 10 : Écarts centrés réduits des valeurs NDVI en juillet	248
Figure 7. 11 : Écarts centrés réduits des valeurs NDVI en août.....	248
Figure 7. 12 : Écarts centrés réduits des valeurs NDVI en septembre	248
Figure 7. 13 : Écarts centrés réduits des valeurs NDVI en octobre.....	249
Figure 7. 14 : Écarts centrés réduits des valeurs NDVI en novembre.....	249
Figure 7. 15 : Écarts centrés réduits des valeurs NDVI en décembre	249

Figure 7. 16 : Détermination de la distribution de la probabilité de NDVI du mois d'août avec les limites des classes de VPI.....	250
Figure 7. 17 : Détermination de la distribution de la probabilité de NDVI du mois de septembre avec les limites des classes de VPI.....	251
Figure 7. 18 : Planche des indices NDVI minima (à gauche) et maxima (à droite).....	252
Figure 7. 19 : Planche des indices NDVI minima (à gauche) et maxima (à droite).....	253
Figure 7. 20 : Évolution interannuelle du maximum NDVI au Ferlo (1981-2005).....	254
Figure 7. 21 : Écartés centrés réduits de l'indice NDVI au Ferlo et	254
Figure 7. 22 : Détermination de la distribution de la probabilité de maximum NDVI annuels avec les limites des classes de VPI.....	256
Figure 7. 23 : Cartographie des structures permanentes de la couverture végétale selon la CP1 (1981-2005) (plus la valeur est grande, plus la production est importante).....	257
Figure 7. 24 : Représentation cartographique des variations du NDVI selon la CP2 (1981-2005) en précisant que plus on tend vers le vert, plus les variations sont importantes..	258
Figure 7. 25 : Variations interannuelles de NDVI sur CP2	258
Figure 7. 26 : Représentation cartographique des variations du NDVI par la CP3.....	259
Figure 7. 27 : Les maximums NDVI et les cumuls annuels (PP) à Louga (1981-2005).....	261
Figure 7. 28 : Évolution du pic saisonnier de la production végétale (1981-1985)	262
Figure 7. 29 : Évolution du pic saisonnier de la production végétale (1986-1990)	262
Figure 7. 30 : Évolution du pic saisonnier de la production végétale (1991-1995)	262
Figure 7. 31 : Évolution du pic saisonnier de la production végétale (1996-2000)	262
Figure 7. 32 : Évolution du pic saisonnier de la production végétale (2001-2005)	263
Figure 7. 33 : Les maximum NDVI et les cumuls annuels (PP) à Linguère (1981-2005)	266
Figure 7. 34 : Les maximum NDVI et les cumuls annuels (PP) à Widou (1981-2005).....	266
Figure 7. 35 : Les maximum NDVI et les cumuls annuels (PP) à Ranérou (1981-2005)	266

CHAPITRE 8 – PARTIE 3

Figure 8. 1 : Localisation des scènes de Landsat sur le bassin versant du Ferlo.....	269
Figure 8. 2 : La zone d'étude ou Bassin Versant Centre (BVC)	271
Figure 8. 3 : Étapes essentielles du traitement des images	277
Figure 8. 4 : Compositions colorées des bandes 3-4-5 des images 1990 et 2002	278
Figure 8. 5 : Répartition des différents types d'occupation du milieu en 1990 et en 2002	281
Figure 8. 6 : Carte d'occupation du sol en 1990.....	283
Figure 8. 7 : Carte d'occupation du sol en 2002.....	284
Figure 8. 8 : Les changements des modes d'occupation du sol dans le BVC de 1990 à 2002.....	286
Figure 8. 9 : Bilan des changements opérés entre 1990 et 2002	289

CHAPITRE 9 – PARTIE 3

Figure 9. 1 : Variation de l'angle de visée sur le continent africain.....	296
Figure 9. 2 : Evolution mensuelle de l'indice de végétation NDVI maximal observé dans le Ferlo avec les capteurs MSG-SEVIRI, SPOT-VEGETATION et NOAA-AVHRR en 2005.....	297
Figure 9. 3 : Evolution décadaire (de juin à novembre) de l'indice NDVI maximal observé dans le Ferlo avec les capteurs SPOT et MSG en 2005	299

Figure 9. 4 : Evolution décadaire (de juin à novembre) de l'indice NDVI maximal observé au Ferlo avec les capteurs SPOT et MSG en 2006	299
--	-----

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1 - PARTIE 1

Tableau 1. 1 : Caractéristiques démographiques de la zone sylvo-pastorale. RGPH, 1988.....	47
Tableau 1. 2 : Évolution des productions (prod.) contrôlées de gomme (g.)	55
Tableau 1. 3 : Effectifs du bétail par espèce et par département	62
Tableau 1. 4 : Liste des points d'eau visités	67

CHAPITRE 3 - PARTIE 2

Tableau 3. 1 : Caractéristiques qualitatives générales des stations de mesure et des données utilisées, DNM, 2002-2009	95
--	----

CHAPITRE 4 PARTIE 2

Tableau 4. 1 : Répertoire de périodes de baisse et de hausse	112
Tableau 4. 2 : Relations entre les IPV et les valeurs médianes des stations.....	122
Tableau 4. 3 : Répartition des années selon les classes	124
Tableau 4. 4 : Valeurs caractéristiques de la variabilité intra-annuelle de 1951 à 2005	139
Tableau 4. 5 : Nombre de jours de pluie et caractéristiques des années.....	143
Tableau 4. 6 : Correspondances des valeurs maximales et minimales des nombres annuels de jours de pluie et des cumuls annuels de précipitations traduisant de fortes corrélations entre ces deux paramètres	147
Tableau 4. 7 : Déficit moyens par rapport à la date de rupture.....	155
Tableau 4. 8 : Déficit, gains pluviométriques moyens et dates de rupture (1971-2005)	158
Tableau 4. 9 : Coordonnées des variables sur CP2.....	166

CHAPITRE 5 - PARTIE 2

Tableau 5. 1 : Périodes de recueil des données de la durée d'insolation.....	177
Tableau 5. 2 : La moyenne annuelle de la durée d'insolation sur la période 1973-1998	178
Tableau 5. 3 : La durée d'insolation moyenne mensuelle en heures et dixièmes d'heures.....	179
Tableau 5. 4 : Séries de relevés de températures	187
Tableau 5. 5 : Caractéristiques des températures mensuelles minimales, maximales et moyennes (1951-2005).....	193
Tableau 5. 6 : Pourcentage des années de chaque décennie en fonction du quartile inférieur (Q1) sur la série des températures minimales moyennes en saison sèche	201
Tableau 5. 7 : Pourcentage des années de chaque décennie en fonction du quartile inférieur (Q1) et du quartile supérieur (Q3) pour les températures maximales moyennes en saison sèche	202
Tableau 5. 8 : Le pourcentage des années de chaque décennie en fonction du quartile inférieur (Q1) pour les températures minimales moyennes en saison des pluies	206

Tableau 5. 9 : Le pourcentage des années de chaque décennie en fonction du quartile inférieur (Q1) pour les températures maximales moyennes en saison des pluies.....	207
---	-----

CHAPITRE 6 - PARTIE 2

Tableau 6. 1 : Caractéristiques des données d'évaporation.....	214
Tableau 6. 2 : L'évaporation en mm dans le Ferlo.....	215
Tableau 6. 3 : Stations et séries analysées pour l'humidité relative	225
Tableau 6. 4 : L'humidité relative mensuelle (%) dans le Ferlo	226

CHAPITRE 7 – PARTIE 3

Tableau 7. 1 : Les principaux indices de végétation les plus couramment utilisés	239
Tableau 7. 2 : La répartition des valeurs NDVI annuelles en pourcentage selon le quartile inférieur et le quartile supérieur	246
Tableau 7. 3 : Les classes de VPI en rapport avec les probabilités et les périodes de retour ..	255
Tableau 7. 4 : Évolution interannuelle des valeurs NDVI maximales (1981-2005)	264

CHAPITRE 8 – PARTIE 3

Tableau 8. 1 : Les sources utilisées. Source : CSE.....	272
Tableau 8. 2 : Synthèse des caractéristiques du capteur LANDSAT	275
Tableau 8. 3 : Caractéristiques de l'occupation du sol en 1990 et en 2002.....	282
Tableau 8. 4 : Répartition des changements entre 1990 et 2002	285
Tableau 8. 5 : Récapitulatif des conversions opérées lors de l'évolution des modes d'occupation du sol	287
Tableau 8. 6 : Caractéristiques dynamiques des modes d'occupation du sol de 1990 à 2002	290

CHAPITRE 9 – PARTIE 3

Tableau 9. 1 : Caractéristiques des capteurs et des synthèses temporelles de NDVI.....	292
Tableau 9. 2 : Caractéristiques des images NDVI de l'archive GIMMS pour l'Afrique	293
Tableau 9. 3 : Caractéristiques de la projection Albers_Africa de l'archive GIMMS	294
Tableau 9. 4 : Caractéristiques des images NDVI de l'archive SPOT-VEGETATION pour le continent africain.....	295
Tableau 9. 5 : Caractéristiques des images NDVI issues de MSG-SEVIRI pour la zone d'étude Afrique de l'Ouest. Source : http://msg.univ-paris1.fr/ , 2007	296

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

CHAPITRE 1 - PARTIE 1

Photo 1. 1 : Bassins de rétention de Mboguéré	35
Photo 1. 2 : Mares aménagées de Diourdy	35
Photo 1. 3 : Mares aménagées de Pitarky.....	35
Photo 1. 4 : Mares aménagées de Mbaye	35
Photo 1. 5 : Ces clichés montrent l'état de nombreux ravins aux abords du bassin Pitarky, ainsi qu'une activité maraîchère pratiquée et irriguée par les eaux de la mare de Diourdy et enfin un jeune éleveur peul qui boit dans les eaux de la mare de Mboguéré.....	38
Photo 1. 6 : Les alentours du forage de Dodji	59
Photo 1. 7 : Forages mécaniques de Barkédji et alentours. Ces clichés montrent une disparition complète de la couverture végétale due au piétinement par le bétail.....	59
Photo 1. 8 : Les impacts des feux de brousse d'origine indéterminée sur le tapis herbacé sur l'axe Mbeuleukhé-Widou Thiengoly deux jours avant notre arrivée sur zone.	66

CHAPITRE 3 - PARTIE 2

Photo 3. 1 : Le radar météorologique Doppler, bande S (10 cm) installé à Linguère par la DNM en collaboration avec le Royaume du Maroc au sein du projet BAWAN	97
--	----

CHAPITRE 8 - PARTIE 3

Photo 8. 1 : La végétation de type pseudo-steppe arbustive sur l'axe Mbeuleukhé-Widou	279
Photo 8. 2 : La végétation de type savane arbustive à arborée sur fond de vallée ou dans la zone inondable sur l'axe Linguère-Barkédji	279
Photo 8. 3 : La savane arbustive au sud est de Barkédji.....	279

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	2
REMERCIEMENTS.....	3
GLOSSAIRE DES ABRÉVIATIONS	5
RÉSUMÉ.....	7
SUMMARY.....	9
INTRODUCTION GÉNÉRALE ET OBJECTIFS SCIENTIFIQUES	11
UN CONTEXTE SCIENTIFIQUE FAVORABLE	13
PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	14
LE DÉROULEMENT DES RECHERCHES	16
PARTIE 1: LE FERLO ; UNE DENSITÉ FAIBLE DE LA POPULATION MAIS UNE FORTE PRESSION SUR UN MILIEU FRAGILE	20
CHAPITRE 1 : UN ÉCOSYSTÈME FRAGILE SOUS FORTE PRESSION	21
1. ENTRE TERRAINS SABLEUX ET PLATEAUX DE CUIRASSES FERRUGINEUSES	26
2. LES RESSOURCES EN EAU TRIBUTAIRES D'UNE PLUVIOMÉTRIE ALÉATOIRE	29
2.1. <i>Les eaux souterraines : une source d'espoir d'accès difficile.....</i>	29
2.2. <i>Les eaux de surface, un potentiel aléatoire pour une gestion difficile</i>	30
2.2.1. Le fleuve Sénégal	30
2.2.2. Le lac de Guiers	31
2.2.3. La basse vallée du Ferlo.....	33
2.2.4. Les mares temporaires devenues stratégiques en raison de leurs usages diversifiés	34
3. LE FERLO, ENTRE SOLS BRUNS SUBARIDES ET SOLS FERRUGINEUX	39
4. LES PRINCIPALES FORMATIONS VÉGÉTALES, CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCOSYSTÈME SAHÉLIEN DU FERLO	42
5. LA DÉMOGRAPHIE AU FERLO : UNE POPULATION JEUNE.....	46
ET HÉTÉROGÈNE	46
6. LES STRATÉGIES D'OCCUPATION DE L'ESPACE ET LEUR DYNAMIQUE.....	52
6.1. <i>L'agriculture, une activité partagée entre ethnies.....</i>	52
6.2. <i>La cueillette : un secteur d'activité délaissé en milieu Ferlo</i>	53
6.3. <i>Le système pastoral : la marque identitaire du domaine d'étude.....</i>	55
6.3.1. L'organisation socio-économique du système pastoral.....	61
6.3.2. La problématique foncière de l'espace pastoral.....	65
6.3.3. La mobilité pastorale au Ferlo	67
CHAPITRE 2 : LES TRAITS GÉNÉRAUX DE LA CIRCULATION MOYENNE TROPICALE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET DANS LE BASSIN VERSANT DU FERLO : CONSÉQUENCES SUR LES PRÉCIPITATIONS.....	69
1. LES MÉCANISMES GÉNÉRAUX DE LA CIRCULATION TROPICALE	69
1.1. <i>Introduction : les échanges méridiens, cadre général.....</i>	69
1.2. <i>Écoulement en masse de l'air froid des hautes et moyennes latitudes vers les basses latitudes et constitution des Agglutinations Anticycloniques</i>	70
1.3. <i>Dynamique de la circulation des flux sur l'ouest africain</i>	73
2. LES FLUX DE LA CIRCULATION TROPICALE.....	76

2.1. <i>Les circulations d'alizé</i>	76
2.1.1. L'alizé maritime au Sénégal	78
2.1.2. L'alizé continental ou Harmattan.....	78
2.2. <i>Le flux de mousson</i>	79
3. LES DISCONTINUITÉS SUR L'AFRIQUE DE L'OUEST	81
3.1. <i>L'Équateur Météorologique (EM)</i>	81
3.1.1. La structure inclinée de l'Équateur Météorologique (EMI).....	83
3.1.2. La structure verticale de l'Équateur Météorologique.....	84
4. LA PLUVIOGENÈSE DANS L'OUEST DE L'AFRIQUE.....	85
4.1. <i>La saison sèche</i>	85
4.2. <i>La saison des pluies</i>	86
PARTIE 2 : ÉVOLUTION CLIMATIQUE RÉCENTE.....	92
CHAPITRE 3 : LES DONNÉES : SOURCES ET LIMITES	93
1. LE RÉSEAU D'OBSERVATION DE LA RÉGION NORD DU SÉNÉGAL INCLUANT LE DOMAINE D'ÉTUDE.....	93
1.1. <i>Le réseau d'observations météorologiques</i>	94
1.1.1. Le réseau synoptique	94
1.1.2. Le réseau climatologique.....	94
1.1.3. Le réseau agrométéorologique.....	96
1.1.4. Le réseau pluviométrique.....	96
1.2. <i>Le choix des stations de mesure utilisées</i>	98
1.3. <i>Les types de données traitées</i>	98
2. CONTRAINTES LIMITANT L'EXPLOITATION DES DONNÉES	101
2.1. <i>Faiblesses liées à l'organisation du réseau et à l'absence de séries longues</i>	101
2.2. <i>Faiblesses liées à la faible densité des postes de mesure</i>	102
2.2.1. Les contraintes d'échelle spatiale	102
2.2.2. Les contraintes d'échelle temporelle.....	103
2.3. <i>Problèmes de fiabilité des données mesurées et liées à des causes humaines et matérielles</i>	103
CHAPITRE 4 : LES PRÉCIPITATIONS DANS LE BASSIN VERSANT DU FERLO : UN NOUVEAU TOURNANT ?.....	105
1. ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES.....	106
1.1. <i>Une pluviométrie fortement aléatoire</i>	108
1.1.1. Une première lecture traduisant une tendance à la baisse continue.....	111
1.1.2. Une tendance à relativiser en seconde lecture.....	112
1.2. <i>Dynamique spatio-temporelle de la pluviométrie annuelle : le balancement de l'isohyète 400 mm</i>	114
1.2.1. Évolution spatiale de la pluviométrie.....	114
1.2.2. Illustration de la variabilité interannuelle de la pluviométrie.....	118
à l'échelle spatiale	118
1.2.3. Illustration de la variabilité interannuelle à l'aide d'indices	121
1.2.3.1. Le rapport entre les extrêmes.....	121
1.2.3.2. L'Indice Percentile de Variabilité (IPV).....	122
1.2.3.3. L'Indice Standardisé des Précipitations.....	123
1.3. <i>Les fluctuations décennales des précipitations</i>	128
1.3.1. La décennie 1951-1960.....	128
1.3.2. La décennie 1961-1970.....	129
1.3.3. La décennie 1971-1980.....	130
1.3.4. La décennie 1981-1990.....	131
1.3.5. La décennie 1991-2000.....	132
1.3.6. La période 2001-2005.....	133
1.4. <i>Les fluctuations intra-annuelles des précipitations</i>	135
1.4.1. Différences entre l'évolution pluviométrique saisonnière de l'année la plus sèche et de l'année la plus humide de la série.....	135
1.4.2. L'évolution des précipitations au cours de la saison des pluies (1951-2005)	138
2. LES JOURS DE PLUIE : CONFIRMATION D'UN TOURNANT	143
2.1. <i>Une tendance à la hausse dans les dernières décennies</i>	143

2.2. <i>Les jours de pluie et les cumuls annuels des précipitations</i>	145
3. L'APPROCHE STATISTIQUE DES TESTS DE RUPTURES DE SÉRIES PLUVIOMÉTRIQUES DANS LE DOMAINE D'ÉTUDE	150
3.1. <i>Techniques utilisées : les tests de stationnarité</i>	151
3.1.1. Segmentation de Hubert.....	151
3.1.2. Test de Lee et Heghinian	153
3.2. <i>La grande rupture des années 1970</i>	154
3.3. <i>Les ruptures sur la période 1970-2005 : cas des années 1990</i>	156
4. REGARDS SUR LES STRUCTURES PERMANENTES ET SUR LES VARIATIONS DE LA PLUVIOMÉTRIE AUX ÉCHELLES ANNUELLES ET MENSUELLES	161
4.1. <i>L'analyse factorielle des cumuls annuels (1963-2005)</i>	162
4.1.1. Profil commun aux 13 postes.....	163
4.1.2. Expression cartographique des coordonnées des variables sur les composantes principales	164
4.1.2.1. Expression cartographique des coordonnées des variables sur la CP1.....	164
4.1.2.2. Expression cartographique des coordonnées des variables sur la CP2.....	165
4.2. <i>L'analyse factorielle des mois de pluie</i>	167
5. CONCLUSION	174
CHAPITRE 5 : ÉVOLUTION DES FACTEURS ET DES CONDITIONS THERMIQUES : UNE TENDANCE CONTRASTÉE	177
1. UNE TENDANCE À LA BAISSSE DE LA DURÉE D'INSOLATION.....	177
1.1. <i>Distribution mensuelle de l'insolation</i>	178
1.2. <i>Variabilité interannuelle et tendance à la baisse</i>	181
2. UNE ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES CONTRASTÉE : UNE PREMIÈRE PÉRIODE PLUS FRAÎCHE ET UNE SECONDE PÉRIODE PLUS CHAUDE DEPUIS LES ANNÉES 1980	186
2.1. <i>La distribution spatiale des températures mensuelles</i>	187
2.2. <i>Les températures moyennes annuelles : un gradient nord/sud et est/ouest</i>	194
2.3. <i>Des tendances différentes dans l'évolution des températures moyennes annuelles écartant toute caractérisation objective d'une tendance globale</i>	196
2.4. <i>Les températures maximales et minimales moyennes saisonnières</i>	200
2.4.1. Une hausse des températures minimales et une évolution variable.....	200
des températures maximales au cours de la saison sèche.....	200
2.4.2. Une variabilité forte des températures minimales et une tendance à la hausse des températures maximales au cours de la saison des pluies	206
3. ÉVOLUTION CONTRASTÉE DE LA DURÉE D'INSOLATION	211
ET DES TEMPÉRATURES	211
CHAPITRE 6 : ÉVOLUTION DE L'ÉVAPORATION ET DE L'HUMIDITÉ RELATIVE : UN TOURNANT DANS L'ÉVOLUTION CLIMATIQUE CONFIRMÉ.....	213
1. L'ÉVAPORATION	213
1.1. <i>Distribution mensuelle de l'évaporation au Ferlo</i>	215
1.2. <i>Évolution de l'évaporation : deux périodes en opposition sur la période 1951-2005</i>	217
1.3. <i>Évolution croisée de l'évaporation et des précipitations annuelles</i>	221
1.4. <i>Évolution croisée de l'évaporation et de l'insolation</i>	222
1.5. <i>Évolution croisée de l'évaporation et des températures</i>	223
2. L'HUMIDITÉ RELATIVE : UNE TENDANCE À LA HAUSSE DEPUIS LES ANNEES 1970/1980.....	225
2.1. <i>Schéma mensuel moyen de l'humidité relative</i>	226
2.2. <i>Évolution de l'humidité relative : une tendance récente à la hausse</i>	229
2.3. <i>Évolution croisée de l'humidité relative et des précipitations</i>	232
PARTIE 3 : ÉVOLUTION DE LA VÉGÉTATION	237
CHAPITRE 7 : ÉVOLUTION INTERANNUELLE, MENSUELLE ET SAISONNIÈRE DE LA PRODUCTION VÉGÉTALE A PARTIR DES IMAGES NDVI DE NOAA-AVHRR.....	238
1. LE CHOIX DE L'INDICE DE VÉGÉTATION	238
2. LES CARACTÉRISTIQUES DES IMAGES NDVI DE NOAA-AVHRR UTILISÉES	242

3. LES MÉTHODES D'ANALYSE	243
4. L'ANALYSE DE LA PRODUCTION VÉGÉTALE A L'ÉCHELLE SAISONNIÈRE	244
4.1. <i>L'évolution mensuelle des mois de juin à décembre sur la période 1981-2005</i>	244
4.2. <i>Apports significatifs de la production végétale des mois d'août et de septembre sur le total annuel</i>	250
5. L'ANALYSE A L'ÉCHELLE ANNUELLE : UNE TENDANCE À LA HAUSSE DEPUIS LES ANNÉES 1990	253
5.1. <i>Les années 1990 : début d'une amélioration</i>	253
5.2. <i>Un signal fort de la production végétale dans les dernières années confirmé par l'indicateur de productivité de végétation (VPI)</i>	255
5.3. <i>Caractérisation des structures permanentes et de leurs variations grâce aux résidus de l'analyse en composantes principales</i>	256
6. LE RAPPORT ENTRE LA PLUVIOMÉTRIE ET LA VÉGÉTATION : DE L'ÉCHELLE CONTINENTALE A L'ÉCHELLE DU FERLO	260
6.1. À L'ÉCHELLE MENSUELLE.....	261
6.2. A L'ÉCHELLE INTERANNUELLE	264
CHAPITRE 8 : UNE PROGRESSION SENSIBLE DE LA SAVANE ARBUSTIVE A ARBORÉE LIÉE À LA RÉDUCTION DE LA MOBILITÉ PASTORALE	268
1. PRINCIPES ET MÉTHODES DE TRAITEMENT ET D'IDENTIFICATION	268
1.1. <i>Choix des données utilisées et des périodes étudiées</i>	268
1.2. <i>Choix du secteur étudié</i>	270
1.3. <i>Contribution des données de terrain</i>	271
1.4. <i>Les outils sollicités</i>	273
1.5. <i>Le traitement numérique des données satellitaires</i>	273
1.5.1. <i>Assemblage des scènes et correction géométrique</i>	273
1.5.2. <i>Production des cartes d'occupation du sol</i>	274
2. IMAGES DES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE LA COUVERTURE VÉGÉTALE DU DOMAINE D'ÉTUDE.....	278
3. ENTRE MODIFICATIONS ET CONVERSIONS DES SYSTÈMES	280
3.1. <i>Prédominance de la végétation naturelle en 1990</i>	280
3.2. <i>Un milieu encore sauvage mais menacé par davantage de feux en 2002</i>	281
4. CROISSANCE DES SURFACES DE SAVANE ARBUSTIVE A ARBORÉE ET RÉDUCTION DES SUPERFICIES DE LA PSEUDO-STEPPE ARBUSTIVE	284
4.1. <i>Les modifications dans la végétation spontanée entre 1990 et 2002</i>	285
4.2. <i>Les conversions entre 1990 et 2002</i>	287
4.3. <i>Le rôle du climat et de l'homme dans les changements observés</i>	288
CHAPITRE 9 : L'UTILISATION DE MSG POUR UN MEILLEUR SUIVI DE LA PRODUCTION VÉGÉTALE EN AFRIQUE OCCIDENTALE	292
1. LES DONNÉES UTILISÉES.....	293
1.1. <i>Les caractéristiques des images NOAA-AVHRR traitées</i>	293
1.2. <i>Les caractéristiques des images SPOT-VÉGÉTATION traitées</i>	294
1.3. <i>Les caractéristiques des images MSG-SEVIRI traitées</i>	295
2. ÉVOLUTION COMPARÉE DES DONNÉES NDVI DES TROIS CAPTEURS	297
2.1. <i>Comparaison des 3 sources de données NDVI à l'échelle mensuelle pour l'année 2005</i>	297
2.2. <i>Comparaison des données décennales de SPOT-VÉGÉTATION et MSG-SEVIRI (2005 et 2006)</i>	298
2.3. <i>L'apport sensible de l'outil MSG-SEVIRI aux politiques d'aménagement</i>	300
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	304
1. RAPPEL DES PRINCIPAUX OBJECTIFS DE LA THÈSE	304
2. SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS	305
3. PERSPECTIVES DE RECHERCHES	308
3.1. <i>Nécessité d'une approche multicapteurs pour le suivi de la végétation</i>	308
3.2. <i>Recherches de solutions aux problèmes d'eau, nécessaire pour une agriculture performante pouvant assurer l'autosuffisance alimentaire</i>	309

ANNEXES.....	314
ANNEXE 1 : CARACTÉRISTIQUES DES SATELLITES UTILISÉS NOAA (AVHRR), LANDSAT (TM ET ETM+), SPOT (VEGETATION), MSG (SEVIRI).....	315
ANNEXE 2 : CHOIX DE LA MÉTHODE D'INTERPOLATION SPATIALE PAR LA TECHNIQUE DE LA VALIDATION CROISÉE.....	323
ANNEXES 3 : LES COURBES D'ÉVOLUTION INTERANNUELLE DES MOIS DE LA SAISON DES PLUIES ENSEMBLE D'ABORD ET SÉPARÉES ENSUITE (DOUBLÉES D'UNE COURBE DES MOYENNES MOBILES SUR 3 ANS) DES VOLUMES PRÉCIPITÉS DE CHAQUE STATION SUR LA PÉRIODE 1951- 2005.....	334
BIBLIOGRAPHIE	359
LISTE DES FIGURES.....	376
LISTE DES TABLEAUX	381
LISTE DES PHOTOGRAPHIES	383
TABLE DES MATIÈRES	384

**Imprimé par le Service Édition
de l'Université Jean Moulin Lyon 3**