

UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

ÉCOLE SUPÉRIEURE POLYTECHNIQUE

GROUPE DE FORMATION DOCTORALE

MASTER 2 DE RECHERCHE

"SCIENCES DE L'INGENIEUR"

OPTION: Météorologie Océanographie et Gestion
des Milieux Arides (MOGMA)

"MÉMOIRE DE STAGE"

Année Universitaire 2013 - 2014

**Caractéristiques Climatiques De L'Observatoire
Population Santé De Niakhar**

Présenté et soutenu par:

Cheikh Modou Noreyni Fall

Sous la direction de :

Pr. Amadou T. Gaye: Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan

Siméon-FONGANG (LPAO-SF)

Dr. Cheikh Dione: Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan

Siméon-FONGANG (LPAO-SF)

Dédicaces

Je dédie ce mémoire de Stage :

A Ma Famille, Mes Amis
Et à tous ce qui m'ont aidé et encouragé durant ces
années d'études

Remerciements

Mes remerciements vont en premier lieu au bon **DIEU** pour la force et la volonté qu'il m'a donné durant ces années d'études.

Je tiens aussi à remercier le Professeur **Amadou Thierno GAYE** Directeur du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan Siméon Fongang (LPAO-SF) pour m'avoir accueilli dans son laboratoire.

Ce travail est réalisé, sous l'encadrement du **Pr. Amadou Thierno GAYE** et **Dr. Cheikh DIONE**. Je les adresse mes remerciements les plus sincères pour m'avoir proposer un sujet intéressant, de l'avoir suivi, et de m'avoir aidé à le mener à terme grâce à leurs conseils précieux et à leurs interventions pertinentes.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à **Dr Malick WADE**, **Dr Mamadou S. DRAME** et à **Ismaila DIALLO** de m'avoir honorer d'accepter de participer au jury

Je tiens à remercier du fond du cœur : **Dr Saïdou Moustapha SALL**

Je tiens à remercier tous les enseignants et chercheurs du LPAO-SF, je veux nommer : **Dr. Daouda Badiane, Malick Wade, Philippe Estrade, Eric Machu, Thomas Gorgues, Jean philippe Lafore, Frédéric Hourdin, Olivier Pujol, Juliette Mignot, Belen et Elsa, Dominique Dagonne**

Je remercie aussi tous les doctorants et post-doctorants du LPAO-SF en l'occurrence **Lamine Mbaye, Moussa Gueye, Moussa Diakhaté, Seyni Sallack, Saliou Faye, Ibrahima Diouf, Ibrahima Camara, Abdou Lahad Dieng, Coumba Niang, Baye cheikh Mbaye, Siny Ndoye, Souleymane Sy, Mame Diarra Bousso, Habib Senghor, Marie J.G. Sambou, Alix A.Gounoune, Lala Kounta, Dahirou Wane, Aissatou Faye et Moustapha Tall .**

Je remercie aussi du fond du cœur mes camarades de promotion, je veux nommer **Adama Badiane, Adama Sylla**, à mon ami **Demba Ndao Niang** et à **Ibrahima Diack** qui a partagé des cours avec nous.

Je remercie également la Secrétaire du LPAO-SF Mademoiselle **Johnson** et je dis merci à Madame **Diakhaté** et **Kiné**.

Finalement, je tiens vivement à remercier ma famille pour m'avoir aidé et encouragé durant ces années d'études.

Résumé

Les précipitations constituent un facteur climatique déterminant pour la population Sénégalaise. En effet, cette population est majoritairement composée de ruraux qui vivent de l'agriculture pluviale. Une agriculture qui se base sur une saison des pluies qui dépend de la dynamique de la mousson africaine. Ce travail met en évidence les caractéristiques climatiques de la zone centre du Sénégal. Communément appelée bassin arachidier, elle englobe le domaine d'étude du projet CERAO, en l'occurrence l'observatoire population santé de Niakhar. cette zone est extrêmement sensible face aux aléas climatiques à cause de son agriculture pluviale qui constitue la principale activité économique de la population.

Les résultats montrent un gradient Sud-Nord de la date de début de la saison (DDS) dans la zone centre du Sénégal. Cependant, dans la zone de Niakhar, et la zone dense ce gradient Sud-Nord de la DDS est faiblement observé, ce qui illustre la forte variabilité spatiale de ce paramètre. Le caractère haute fréquence avec une variabilité spatiale des pauses pluviométriques de courte durée $DS1$ comprises entre 1 et 3 jours et $DS2$ comprises entre 4 et 7 jours dans la zone est montré. Tandis que les pauses longues $DS3$ comprises entre 8 et 14 jours et $DS4$ supérieures à 15 jours montrent une faible occurrence dans la zone mais avec une variabilité spatiale beaucoup plus important. Les zone dense, sud et Nord enregistrent des pauses $DS3$ en début et fin de saison, alors que la zone de Niakhar peut observer ces pauses en milieu de saison. La zone de Niakhar enregistre les pauses extrêmes $DS4$ en début et milieu de saison.

Les séquences humides d'un jour sont très fréquentes dans la zone, alors que les séquences humides supérieures à 4 jours sont de basse fréquence avec une variabilité spatiale. Environ 50% des précipitations journalières dans la zone sont inférieures à 10 mm.

Ces résultats montre la forte variabilité spatiale des précipitations dans la zone qui semble jouer un rôle sur la répartition des rendements agricoles.

Mots clés: Zone de Niakhar, Précipitations, Date de début de saison, Pauses pluviométriques, Séquences humides, Variabilité spatio-temporelle

Abstract

The precipitation establish a important factor climatic for the Senegalese population. Indeed, this population mainly consists of farmers who live on the pluvial agriculture. An agriculture which bases on a rainy season which depends to the dynamics of the African monsoon. This work highlights the climatic characteristics of the center zone of Senegal. Collectively called peanut bassin, it includes the study zone of the project CERAO, in this particular case the observatory population health of Niakhar DSS site. This zone is extremely sensitive to the climatic hazards because of its pluvial agriculture. which establishes the main economic activity of the population.

The results show a south-north gradient of the onset in the center zone of Senegal. However, in the zone of Niakhar, and the dense zone this south-north gradient of the onset is weakly observed. The high-frequency character with a spatial variability of the short dry spell ($DS = 1-3$ days or $DS1$) and ($DS = 4-7$ days or $DS2$) in the zone is shown. Whereas the long dry spell ($DS = 8-14$ days or $DS3$) and the extreme dry spells ($DS \geq 15$ days or $DS4$) show a low-frequency in the center zone of Senegal but with a spatial variability more important. Dense, south and the north zone record the $DS3$ at the beginning and the end of season While the zone of Niakhar can observe these dry spell ($DS3$) in the middle of season. The Niakhar zone records the extreme dry spells $DS4$ at the beginning and middle of season.

The wet spell which owed a day ($WS1$) are very frequent in the zone. While the wet spell ($WS > 4$ days or $WS4$) are of low frequency with a strong spatial variability. Approximately 50% of the daily precipitation in the zone are lower in 10 mm.

These results show the strong spatial variability of the precipitation in the zone which seems to contribute on the distribution of the agricultural yields.

Key words: Niakhar zone, precipitation, onset, dry spell, wet spell, spatio-temporal variability

Liste des Acronymes

- ZCIT:** *Zone de Convergence Inter-tropicale*
- MOA:** *Mousson Ouest Africaine*
- FIT:** *Front Inter-Tropical*
- JEA:** *Jet d'Est Africain*
- JET:** *Jet d'Est Tropical*
- SHL:** *Saharian Heat Low*
- MCS:** *Mesoscale Convectif System*
- DDS:** *Date de début de saison*
- DS:** *Dry Spell*
- WS:** *Wet Spell*
- LST:** *Land surface temperature*
- AMMA:** *Analyses Multidisciplinaire de la Mousson Africaine*
- ANACIM:** *Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie*
- IRD:** *Institut de Recherche pour le Développement*
- LPAO-SF:** *Laboratoire Physique de l'Atmosphère et océanographie Simeon Fongang*
- ANR CERAO:** *Auto-adaptation des agro-socio-ecosystèmes tropicaux face aux changements globaux*
- GIEC:** *Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat*
- IPCC:** *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- RCP:** *Representative Concentration Pathway*
- MSG:** *Meteosat Second Generation*
- SEVIRI:** *Spining Enhanced Visible and InfraRed Imager*

Contents

Dédicaces	I
Remerciements	III
Résumé	VI
Abstract	VII
Liste des Acronymes	VIII
Introduction Générale	1
1 Généralités	3
1.0.1 Tendances Climatiques	5
1.1 La Pluviométrie au Sénégal	8
1.1.1 Variabilité interannuelle des précipitations	11
1.1.2 Variabilité saisonnière des précipitations au Sénégal	12
1.1.3 Variabilité spatiale des précipitations au Sénégal	13
2 Approche Méthodologique	16
2.1 Données	16
2.1.1 Réseau d'observation synoptique de l'ANACIM	17
2.1.2 Réseau de Pluviographes de LPAO-SF	17
2.1.3 Base de Données de l'IRD sur l'Observatoire population santé de NIAKHAR	18
2.2 Méthodologie Statistique Utilisée	19
2.2.1 Indice d'Anomalie Standardisée	19
2.2.2 Date de début et fin de saison et la longueur de la saison	20

2.2.3	Séquence humide (WS) et pause pluviométrique (DS)	21
2.2.4	Présentation de la zone d'étude	22
3	Caractéristiques pluviométriques dans la zone centre du Sénégal	24
3.1	Introduction	24
3.2	Variabilité interannuelle des précipitations	25
3.3	Variabilité spatio-temporelle de la date de début de la saison	26
3.3.1	Variabilité spatio-temporelle de la longueur de la saison	29
3.4	Fréquences des pauses pluviométriques au cours de la saison	29
3.4.1	Variabilité spatio-temporelle des pauses pluviométriques	30
3.4.2	Impacts des pauses pluviométriques sur le cumul journalier	33
3.5	Fréquences des séquences humides (WS)	34
3.5.1	Variabilité spatio-temporelle des séquences humides	36
3.6	Conclusion	38
4	Caractéristiques climatiques de l'observatoire population santé de Ni- akhar	39
4.1	Introduction	39
4.2	Variabilité interannuelle des précipitations	40
4.3	Variabilité spatio-temporelle de la date de début de saison	42
4.4	Fréquences des pauses pluviométriques	46
4.4.1	Variabilité interannuelle des séquences sèches	47
4.4.2	Occurrence des séquences sèches	49
4.4.3	Impacts des pauses pluviométriques sur le cumul journalier	51
4.5	Fréquence des séquences humides	53
4.5.1	Variabilité interannuelle des séquences humides	54
4.5.2	Les types de pluies	56
4.6	Conclusion	58
	Conclusion Générale	59
	Bibliographie	60
	Liste des figures	69

Liste des tableaux**70**

Introduction Générale

L'Afrique de l'Ouest, plus particulièrement le Sahel constitue une zone climatique où la pluie présente une forte variabilité spatio-temporelle. En effet, de 1970 à 1990, le Sahel a connu l'un des épisodes de sécheresse les plus sévères de l'histoire marquée par de forts déficits pluviométriques dans les pays Sahéliens. Au Sénégal, les précipitations constituent un facteur climatique primordial pour la population dont la majorité est composée de ruraux qui vivent de l'agriculture. Un secteur extrêmement vulnérable face aux aléas climatiques et qui emploie environ 60% de la population. Comme tous les pays Sahéliens, les précipitations reposent sur une courte saison des pluies qui s'étend de Juin à Septembre et qui est soumise à une forte variabilité à toutes les échelles spatio-temporelles. Elles dépendent de l'occurrence des systèmes convectifs de meso-échelles et des lignes de grains mais aussi par des orages isolés. Cette saison des pluies dépend de la dynamique très complexe de la mousson Ouest-Africaine.

Dans un contexte de changement climatique global, il est nécessaire de mieux comprendre les échelles de variabilités des précipitations au Sahel pour mieux prévoir les conséquences drastiques sur les rendements agricoles sur la santé humaine et animale. C'est ainsi que le projet Analyses Multidisciplinaire de la Mousson Africaine (AMMA) a été créé pour mieux améliorer notre connaissance du système de mousson Ouest africaine dans toutes ses échelles de variabilité. Ce projet constitue la base de plusieurs petits projets avec des objectifs spécifiques. C'est le cas de l'ANR CERAO (Auto-adaptation des agro-socio-écosystèmes tropicaux face aux changements globaux) dont l'objectif est d'améliorer la production céréalière dans la zone spécifique de l'observatoire population santé de Niakhar. Notre étude s'inscrit dans le cadre du projet CERAO.

L'objectif de cette étude est de mettre en exergue les caractéristiques climatiques de la zone centre du Sénégal, communément appelée bassin arachidier. Cette zone englobe le domaine d'étude du projet CERAO, en l'occurrence l'observatoire population santé de

Niakhar. Il constitue l'un des plus anciens systèmes de suivi démographique de l'Afrique. Pour atteindre ces objectifs, nous allons faire une approche statistique des différents paramètres de la saison des pluies tels que la date de début de saison, la longueur de la saison, la fréquence des pauses et des séquences humides et les types de pluies. En utilisant, des données d'observations de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM), des données du réseau de stations de l'IRD qui se trouvent dans la zone de Niakhar, enfin nous allons utiliser des données du réseau de pluviographes qui couvrent des zones proches du domaine d'étude.

Pour répondre à ces questionnements scientifiques, ce travail de mémoire comporte quatre chapitres.

- Dans le premier chapitre, nous présentons les généralités sur le climat au Sénégal, en rappelant les différents types de climats rencontrés dans le pays et en montrant les tendances observées et futures du climat.
- Dans le deuxième chapitre, l'approche méthodologique est présentée. D'abord, nous présentons les données utilisées, en parlant de leur source leur caractère et le mode d'acquisition de ces données. Ensuite, nous présentons les outils statistiques utilisés pour ce travail et enfin la dernière partie de ce chapitre porte sur une présentation de la zone d'étude en l'occurrence l'observatoire population santé de Niakhar.
- Le troisième chapitre sera consacré aux résultats obtenus dans la zone centre du Sénégal. nous allons montrer la variabilité interannuelle des précipitations, la variabilité spatio-temporelle de la date de démarrage de la saison, la fréquence des pauses et séquences humides, l'impact de ces pauses sur la pluviométrie journalier et les types de pluies observés dans la zone.
- C'est dans le quatrième chapitre, que nous allons présenter une application de l'observatoire population santé de Niakhar et des zones proches de l'observatoire telles que les zones couvrant le réseau de pluviographes du Laboratoire Physique de l'Atmosphère et océanographie Simeon Fongan (LPAO-SF).

La dernière partie de ce mémoire est consacrée à la conclusion et l'ouverture de perspectives pour ces différents résultats scientifiques.

Chapter 1

Généralités

Le Sénégal est un pays de l’Afrique de l’Ouest Sahélienne, situé entre les longitudes $11^{\circ} 30' - 17^{\circ} 30'$ Ouest et les latitudes $12^{\circ} 30' - 16^{\circ} 30'$ Nord. Il fait partie de la zone tropicale qui ceinture le continent africain du tropique de Cancer au Nord à $23^{\circ} 6'$ au tropique de Capricorne à $23^{\circ} 6'$ au Sud. Le climat de cette partie du globe est d’abord défini par son bilan radiatif net [Janicot et al 2012]. Cette région a la particularité de recevoir le maximum du flux solaire incident, ce qui en fait une zone excédentaire en énergie par rapport à d’autre partie du globe. Cependant, au Nord de cette zone nous avons le Sahara qui est déficitaire en énergie caractérisé par un albédo élevé. En effet, au Sahel le flux incident est maximum en début de printemps avec une faible variation d’Avril à Août, alors que le rayonnement net à la surface est maximum pendant la mousson en Juin-Juillet. Ce décalage est caractéristique d’une région semi-aride subtropicale [Guichard et al 2011]. Cette situation géographique particulière du Sénégal et la présence de 700 km de côte lui confère une variété climatique assez diversifiée. Le relief au Sénégal est globalement plat à l’exception du Sud-Est de la frontière avec la Guinée où les altitudes peuvent être supérieures à 200 m . La savane dense domine le sud, au centre nous avons de la savane boisée, tandis qu’au Nord nous rencontrons de la steppe et des arbres. Le contraste climatique observé du sud vers le Nord avec un gradient Sud-Nord des précipitations et aussi du littoral vers l’intérieur, permet de distinguer quatre zones climatiques au Sénégal. La figure 1.1 illustre les différents sous domaines climatiques du Sénégal.

- **Le domaine côtier ou la région des vents maritimes:** Dans cette zone, les précipitations moyennes annuelles sont de 400 mm . Ce cumul annuel n’est pas

homogène dans toute la zone, elle suit un gradient Sud-nord. La proximité avec l'océan génère une humidité relative assez élevée avec l'effet de la brise de mer et des températures assez fraîches de l'ordre de $20^{\circ} C$ pendant la saison sèche. Pendant la saison des pluies, les températures dépassent rarement $30^{\circ} C$, l'influence maritime participe à adoucir les températures [Ndong 2003].

- **La région Sahélienne:** elle constitue la zone la plus au Nord du pays. Elle constitue la partie la plus sèche du Sénégal avec des précipitations moyennes annuelles inférieures à 400 mm . L'humidité relative est assez faible 45, 38%. Dans cette zone les précipitations sont générées par des systèmes orageux violents et aléatoires [Gaye 2002][Diop 1996]. La température montre une forte variabilité saisonnière. Elle peut osciller entre $30^{\circ} C$ et $35^{\circ} C$ pendant la saison des pluies et de $22^{\circ} C$ à $25^{\circ} C$ pendant la saison sèche.
- **La région Soudanaise continentale:** C'est la zone située au centre du pays englobant le bassin arachidier, elle est très sensible à la variabilité climatique notamment la pluviométrie à cause de la dépendance de cette zone à l'agriculture pluviale. Les précipitations moyennes annuelles sont comprises entre 400 mm et 800 mm , comme dans la région sahélienne, les précipitations sont causées par des systèmes orageux violents et aléatoires, d'où une forte variabilité spatiale et temporelle des précipitations dans la zone. Les températures varient entre $25^{\circ} C$ à $35^{\circ} C$ selon la saison. Cette région est subdivisée en sous domaines. Une zone centre Nord où le cumul moyen est compris entre 400 et 600 mm et une zone centre Sud où le cumul moyen est compris entre 600 et 800 mm .
- **La région Soudanaise côtière:** C'est la zone centre-ouest qui fait face à l'océan atlantique. elle a les mêmes caractéristiques que la région Soudanaise continentale mais avec une humidité relative plus importante à cause de l'influence de l'océan.
- **La région Guinéenne continentale:** C'est la zone la plus au Sud du pays. Les précipitations annuelles moyennes dépassent 800 mm et les températures varient de $22^{\circ} C$ à $32^{\circ} C$. Dans cette zone les précipitations sont générées par des systèmes organisés de méso-échelles et de ligne de grains, d'où une variabilité spatio-temporelle moins importante par rapport à la région soudano-sahélienne.

- **La région Guinéenne côtière:** elle se situe au Sud-ouest du pays. Sa position méridionale et sa proximité avec l’océan lui confère une humidité relative assez élevée. Elle enregistre les cumuls annuels les plus forts dans le pays, pouvant dépasser en moyenne les 1100 *mm*.

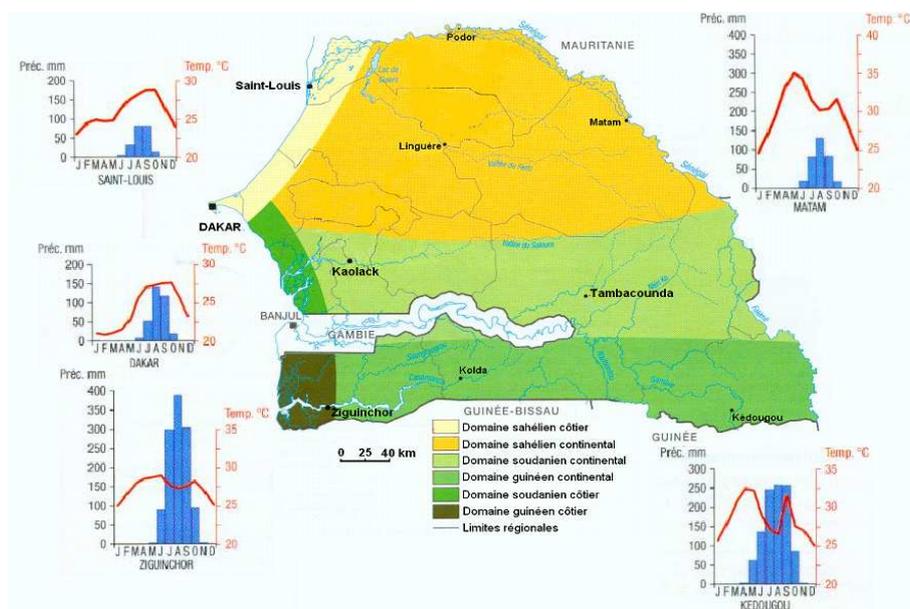


Figure 1.1: *les différentes régions climatiques du Sénégal* [Coline 2010]

1.0.1 Tendances Climatiques

Le Sénégal fait partie des rares pays de l’Afrique de l’Ouest, à avoir plus d’un siècle de données climatiques en particulier pluviométriques. En effet, les premières mesures pluviométriques ont eu lieu en 1854 [Costa et al 2002]. La figure 1.2a montre globalement deux signaux. Un premier signal de succession d’années pluvieuses qui s’étend dans la période 1950 – 1967 et l’autre signal qui montre une succession d’années sèches pendant la période 1968 jusqu’aux années 1990. Cependant la durée et l’amplitude de ces deux épisodes ne sont pas uniforme sur tout le pays. Dans chaque zone climatique du pays, On observe une amplitude et une période spécifiques de ces deux signaux [Costa et al 2002].

En effet, comme l’illustre les figure 1.2b, 1.2c et 1.2d, les trois zones climatiques ont sévèrement subit l’épisode de la sécheresse, marquée par un glissement des isohyètes vers le Sud, comme l’illustre la figure 1.3, avec des démarrages tardifs de la saison des pluies, une forte occurrence des pauses pluviométriques et des saisons courtes. Cependant, l’amplitude et la phase de ce signal de sécheresse montre une variabilité spatio-temporelle

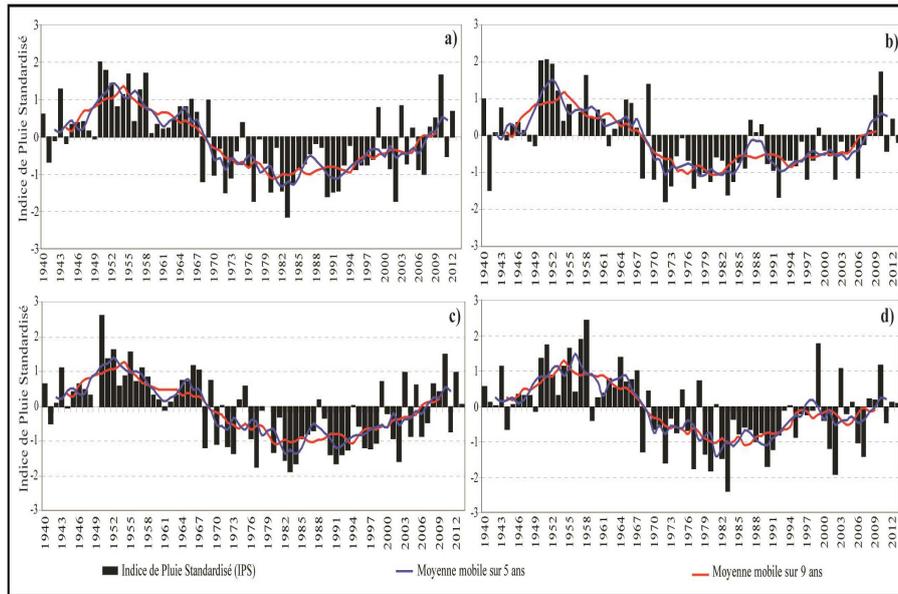


Figure 1.2: *a* : valeurs moyennes calculées par krigeage à partir de l'ensemble des stations. *b* : valeurs moyennes calculées par krigeage à partir des stations de la zone Sud-sahélienne. *c* : valeurs moyennes calculées par krigeage à partir des stations de la zone nord-soudanienne. *d* : valeurs moyennes calculées par krigeage à partir des stations de la zone Sud-soudanienne [Bodian 2014]

d'une zone à une autre. En effet Dans la zone Sud-soudanienne la période sèche a été plus courte par rapport aux zone centre et nord. Dans les années 2000 on a assisté à un retour à des meilleures conditions pluviométriques au Sahel, en particulier au Sénégal où nous observons une forte variabilité interannuelle des précipitations, qui rend difficile la planification agricole.

A ces tendances observées, viennent s'ajouter les tendances futures du climat dans un contexte de changement climatique. Face aux difficultés des modèles à reproduire les précipitations, particulièrement en Afrique de l'ouest. En effet, ces difficultés résident dans la complexité de la dynamique la mousson en particulier et les incertitudes liées à sa variabilité, l'incapacité des modèles à quantifier le rôle des aérosols sur les précipitations entre autres. Cette situation est traduite par des corrélations faibles entre les précipitations observées et celles simulées [Salack et al 2011a]. C'est dans ce contexte, que le troisième rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) avait considéré et classé les changements futures des précipitations au Sahel comme incertains dans son rapport de 2007. Les modèles de circulation générale, (GCM, general circulation models) montrent des réponses assez dispersées et des difficultés à dégager un consensus dans la prévision des changements de précipitation. Cependant les GCM ne nous perme-

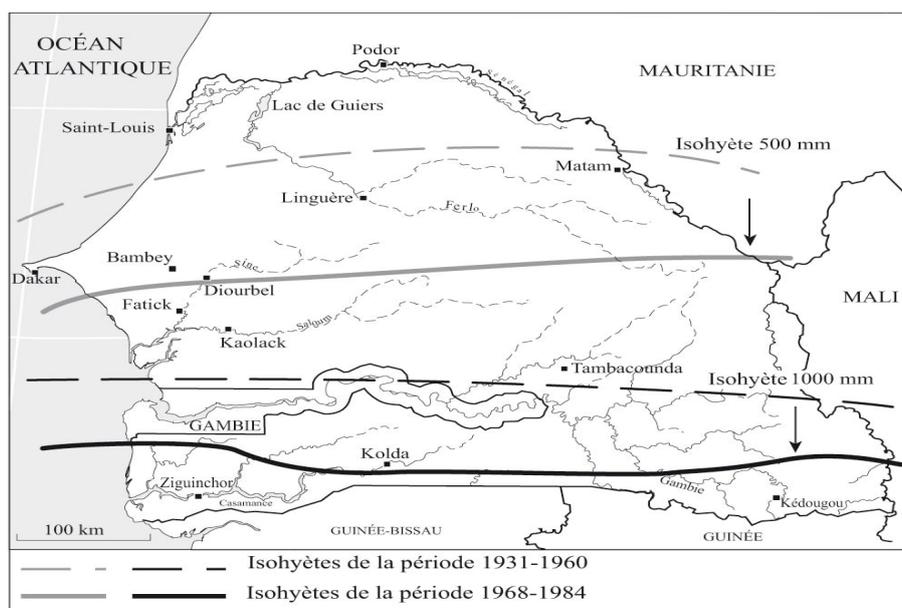


Figure 1.3: *Transition de la position des isohyètes entre 1931 et 1990* [Coline 2010]

ttent pas d'étudier des changements à petite échelle spatiale ou temporelle et entre autres des modifications de la variabilité haute fréquence des précipitations qui pourraient avoir un impact non négligeable sur le cycle de eau [d'Orgeval 2008]. Malgré ce manque de consensus, deux tendances se sont dégagées.

- Une zone de convergence inter-tropicale (ZCIT) moins large et plus haute ce qui sous-entend un retrait tardif du front inter-tropical.
- les épisodes de sécheresse locale seront plus nombreux puisque la saison des pluies sera concentrée sur une région plus étroite. Les épisodes de fortes pluies pourront également être plus fréquents si la ZCIT est plus intense, le tout résultant en une variabilité interannuelle des pluies accrue.

Le tableau 1.1 montre des réponses proposées par différentes modèles. Au Sénégal, le modèle 7 CGCM confirme la difficulté à reproduire les précipitations, avec une faible cohérence entre les modèles. Dans ce tableau, la zone soudano-guinéenne est considérée ici comme la zone entre 5° Nord et $10 - 12^{\circ}$ Nord et le Sahel entre $10 - 12^{\circ}$ Nord et 20° Nord [d'Orgeval 2008].

Les projections futures du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), montrent un réchauffement au Sahel, avec une augmentation des températures. Le scénario RCP 2.6 est plus optimiste que celle de RCP 8.5 qui prévoit un réchauffement plus important allant de $+4^{\circ}C$ à $+5^{\circ}C$ alors que le scénario RCP 2.6

Table 1.1: Précédentes études d'impact du changement climatique sur la pluviométrie en Afrique de l'Ouest [d'Orgeval 2008].

Modèles	Région	Signal	Remarques
7 CGCM	Soudano G Sahel(est) Senegal	+ + -	Faible cohérence inter-modèle
CNRM (Fr)	Soudano G Sahel	+ ++	Intensificatioion du cycle de l'eau
ECHAM3-4 (All)	Soudano G Sahel Sahara	++ ≈ --	Sahel zone frontière incertaine entre la Guinée plus humide et le Sahara plus sec
NCAR-CM2 (US)	Sahel	≈	Sécheresse plus fréquente
AGCM forcé (CNRM)	Soudano G Sahel	≈ ++	Cependant du scénario de GHG Forte ré évaporation
18 CGCM	Soudano G Sahel	≈ ≈	Pas d'accord entre les les modèles la présélection

prévoit un réchauffement de $+2^{\circ} C$. Une diminution des précipitations entre 5% à plus de 10% au sahel est prévue par le scénario RCP 8.5, alors que le scénario RCP 2.6 prévoit une diminution inférieure à 5%. Les résultats des modèles montrent une hétérogénéité de la prévision future de la pluviométrie au Sénégal [PAPSEN 2013]. Cependant, plusieurs modèles prévoient une baisse des précipitations avec une diminution du nombre de jours pluvieux et du nombre de pluies intenses [Gaye 2010].

1.1 La Pluviométrie au Sénégal

La pluviométrie représente le facteur le plus important du climat, notamment au Sénégal où près de 60% de la population vit et dépend des ressources tirées de l'agriculture pluviale et de l'élevage [Dieng et al 2008]. Ces précipitations sont enregistrées pendant quatre mois de l'année de Juin à Septembre. La saison des pluies est une conséquence de la migration de la zone de convergence intertropicale (ZCIT). Cette dernière résulte de la convergence de vents de Nord-Est chauds, secs et anticycloniques appelés Harmattan et des vents de Sud-Est plus frais, humides et océaniques qui deviendront des vents de Sud-Ouest à la traversée de l'équateur par l'effet de la force de Coriolis appelés Mousson Ouest Africaine [Redelsperger et al 2012]. Cette zone d'ascendance vers laquelle converge les flux d'énergies des basses couches, est le siège d'une forte activité convective avec la formation d'imposants nuages à fort développement vertical appelés cumulonim-

bus [Lafore et al 2011] avec un maximum de rayonnement infrarouge, de conduction et d'évaporation. Le déplacement de la ZCIT suit le mouvement apparent du soleil avec un décalage de 7 à 8 semaines [Janicot et al 2012]. Ce déplacement méridien est caractérisé par une transition entre deux positions d'équilibre. Une première position stable à 5° Nord correspondant à la première saison des pluies en région Guinéenne en Mai et en Juin. Ensuite, elle s'équilibre à 10° Nord en juillet-août correspondant à la saison humide en Afrique soudano-sahélienne [Sultan et Janicot 2004], comme l'illustre la figure 1.4. En

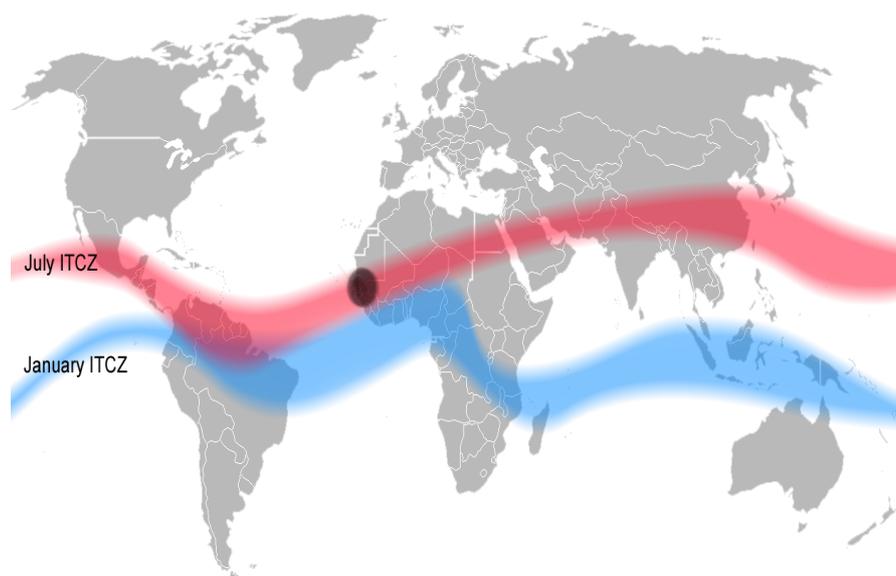


Figure 1.4: *Position de la ZCIT en janvier (en bleu) et en juillet (en rouge) source: <http://www.lethist.lautre.net/zcit.htm>*

Afrique de l'Ouest le front intertropical (FIT) est la trace de la ZCIT au sol, sa dynamique est fonction de la dépression thermique saharienne ou *Saharian Heat Low* (SHL) centré au 20° Nord soit environ 10° plus au Nord de la ZCIT. Les systèmes organisés se forment à partir de 100 km au Sud de ce front, sur l'arrière des Ondes d'Est Africaines (AEWs) qui sont des perturbations dans les couches moyennes de la troposphère du Jet d'Est Africain (AEJ) [Lafore et al 2011]. En effet, ces systèmes organisés notamment, les systèmes convectifs de méso-échelle (MCSs) et les lignes de grains ont une durée de vie déterminée et génèrent la majeure partie des précipitations dans cette région [Gaye 2002]. En dehors de ces systèmes organisés, des systèmes convectifs de moindre taille générés par des phénomènes locaux sont rencontrés dans la partie Ouest du Sahel, notamment au Sénégal [Dione et al 2013]. Ces systèmes couplés à des processus de surface, de microphysique, de couche limite atmosphérique et de circulations atmosphériques à petites

échelles contribuent de manière significative à la pluviométrie. Cependant, des difficultés résident sur la compréhension et la prévision du lieu et de l'heure de déclenchement de ces systèmes convectifs locaux [Dione 2013]. La figure 1.5 montre la dynamique atmosphérique en plein activité de la mousson. Les systèmes de mousson sont un couplage

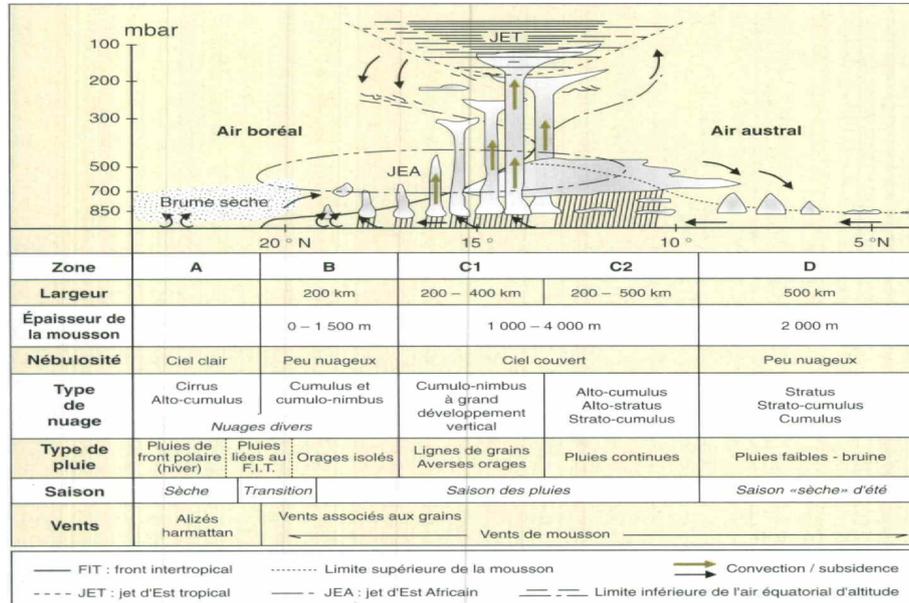


Figure 1.5: Coupe schématique de la troposphère ouest-africaine au mois d'Août le long du méridien [Diop 1996]

océan-atmosphère-continent. La mousson Ouest-Africaine fait partie des systèmes les plus étudiés dans le monde, à cause de ses fluctuations allant de l'intra-saisonnière à l'inter-décennale [Redelsperger et al 2012][Janicot et al 2012]. C'est dans ce cadre que des projets internationaux comme AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) ont été motivés par le besoin de comprendre le système de mousson africaine et les fortes variabilité des précipitations qui lui est associée. La mousson ouest africaine, comme toute zone de mousson découle en effet, d'un contraste de température et de pression entre une masse continentale et une masse océanique. Le vent qui va des zones de hautes pressions au dessus de l'océan vers celles de basses pressions au dessus du continent apportant ainsi, de l'humidité et de l'énergie. La circulation du système de mousson africaine s'organise à partir des zones de hautes pression situées de part et d'autre de l'équateur dans l'Atlantique tropicale en l'occurrence les anticyclones de Sainte-Hélène et des Açores, l'anticyclone de Libye et la dépression Saharienne. Cette différence de température va générer des vents de nord-est sec et des vents de Sud-est humide qui deviennent des vents de Sud-ouest à la traversée de l'équateur. Ces vents vont se rencontrer à

la zone des pressions minimales dans la dépression saharienne. Cette confluence des vents forme le front inter-tropical (FIT) [Janicot et al 2012]. Le Sénégal est dans une région où les précipitations sont engendrées par des systèmes convectifs de meso-échelle (MCS) et des lignes de grains [Gaye et al 2005]. Ces systèmes peuvent couvrir des centaines de *km* et leur dimension verticale peut atteindre la troposphère, ils se propagent sur cette région d'est en ouest. Dans cette région, la pluie montre une distribution spatiale à fine échelle très hétérogène. Cette variabilité se manifeste à l'échelle annuelle par des cumuls très contrastés sur des zones rapprochées même si que le gradient méridien apparaît avec des champs de précipitation sur de longues périodes [Peugeot et al 2011]. Des études ont montré que ces systèmes sont liés aux hétérogénéités de la température du sol qui jouent un rôle prépondérant dans la variabilité spatiale à plus fine échelle [Taylor et al 2011].

1.1.1 Variabilité interannuelle des précipitations

En Afrique de l'Ouest, les analyses spectrales des longues séries de précipitations montrent deux modes de variabilité interannuelle et décennale, pour le Sahel et la région guinéenne. Un mode entre 2 et 4 ans au Sahel, entre 2 et 8 ans en région guinéenne et un mode plus basse fréquence entre 8 et 16 ans au Sahel, entre 16 et 18 ans en région guinéenne [Fontaine et al 2011]. Des études ont montré que ces échelles de variabilité résultent en partie de l'influence de la température de surface de la mer, notamment le phénomène d'El-Nino au niveau de l'océan pacifique, de l'oscillation multi-décennale de l'atlantique (AMO) [Fontaine et al 2011] qui est reliée à la structure tripolaire de l'Atlantique Nord et celle dipolaire de l'Atlantique tropical par l'intermédiaire de téléconnexions atmosphériques [Fontaine et al 2011]. Le Sénégal qui a connu l'épisode des années humides (1950 – 1970) et celle des années sèches (1973 – 1990), deux épisodes spécifiques aux pays de l'Afrique de l'Ouest. Ces deux modes sont déterminés par la position et aux cisaillements du Jet d'Est Africain (AEJ). En effet, pendant la période de sécheresse l'AEJ était beaucoup plus au Sud, son intensité avait augmenté, la ZCIT était anormalement beaucoup plus au Sud, le Jet d'Est Tropical (TEJ) était faible, et le flux de mousson pénétrait faiblement dans le continent [Nicholson and Grist 2001]. Or pendant la période humide l'AEJ était beaucoup plus au Nord avec une intensité plus faible. Depuis le début des années 2000, la fin de la sécheresse se confirme de plus en plus mais avec une intermittence d'année pluvieuse qui peut générer des inondations dans plusieurs localités du pays et d'année

sèche avec de faibles cumuls annuels. Nous observons une forte variabilité interannuelle et une tendance à la baisse des précipitations, cette baisse est plus significative pendant l'épisode des années sèches, une forte corrélation est aussi observée entre un cumul annuel faible et une épisode d'El Niño, l'exemple de 1998 est une parfaite illustration.

1.1.2 Variabilité saisonnière des précipitations au Sénégal

Le Sénégal est un pays de l'Afrique de l'Ouest Sahélienne, où la distribution des pluies utiles à l'agriculture se concentre sur une courte période entre Juin et Septembre où Le maximum des précipitations est observé en Août-Septembre. Ces précipitations sont conditionnées par la dynamique du Front intertropical (FIT) En Mai nous observons le (FIT) à la latitude 15° nord, correspondant à la saison des pluies au Sud du Sahel. L'arrivée du FIT, à la fin juin, coïncide avec le saut de la ZCIT dans la troisième décade de Juin entre deux latitudes d'équilibre 5° Nord et à 10° Nord en Juillet-Août, cette deuxième position d'équilibre correspond à la saison des pluies soudano-sahélienne. Ce saut de mousson est observé en moyenne au 24 Juin avec un écart type de 8 jours [Sultan et Janicot 2004]. Cette installation s'accompagne de fluctuations qui impliquent une variabilité intra-saisonnière des précipitations. Ces fluctuations génèrent des phases actives ou inactives de la mousson pendant lesquelles, on observe une intensification ou un affaiblissement des précipitations. Pendant les phases de renforcement de la mousson, on observe une augmentation des précipitations, tandis que les phases d'affaiblissements de la mousson sont caractérisées par des pauses pluviométriques [Dieng et al 2008]. La figure 1.6 illustre une comparaison du cycle saisonnier des précipitations au Nord et au Sud du Sénégal entre les périodes des années sèches et humides avec la date des pauses pluviométriques générées par les fluctuations de la MOA. Une cohérence spatiale de ces pauses pluviométriques est observée notamment dans la phase intense de la MOA en Août-Septembre. Dans la zone Sud du pays, une première pause est observée entre le 19 Juin et le 23 juin et une deuxième pause entre le 29 juillet et le 02 août en moyenne. Dans la zone nord, une pause est observée entre le 03 août et le 07 août [Dieng et al 2008]. La relation entre les caractères précoces et tardifs de ces pauses pluviométriques, et le cumul saisonnier (JAS) est plus évidente au Nord du Sénégal où le caractère précoce de la pause peut favoriser un cumul saisonnier plus important alors qu'une pause tardive est bien corrélée à un cumul saisonnier moins important. Le déroulement de la saison

pluvieuse est presque opposé selon que la pause est précoce ou tardive, par contre au Sud du Sénégal cette relation est moins vérifiée [Dieng et al 2008].

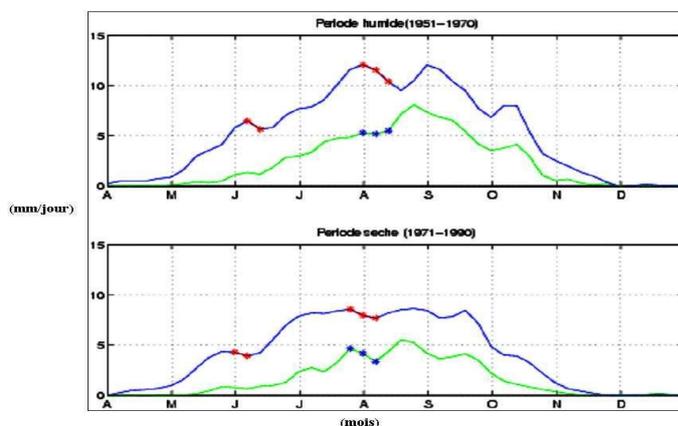


Figure 1.6: *Pauses et phases actives de la mousson durant la période pluvieuse (51-70) et la période sèche (71-90) au Sénégal. En bleu, l'indice Sud et en vert l'indice Nord. (*) indiquent les dates moyennes de pauses. Idem pour la figure 3, le libellé de la figure 5 commence aussi à partir du 15 avril afin d'éviter les pluies hors saison, et faire débiter notre étude uniquement sur la période de la saison à partir de laquelle la mousson commence à faire son entrée sur le territoire sénégalais notamment dans le Sud (mi-avril). Ainsi à part le mois d'avril, tous les autres mois utilisés ont un libellé qui comprend toute la durée du mois c'est-à-dire du 1^{er} au 31 pour les mois de mai, juillet, août, octobre, décembre, et du 1^{er} au 30 pour les mois de juin, septembre, novembre. [Dieng et al 2008]*

1.1.3 Variabilité spatiale des précipitations au Sénégal

La variabilité spatiale pluviométrique est analysée à partir de la dynamique des isohyètes, avec un gradient méridien des précipitations associé à la dynamique du FIT sur lequel se superpose un gradient est-ouest moins important généré par l'influence océanique [Coline 2010]. Ce gradient Nord-Sud se traduit par une décroissance quasi linéaire des pluies du Sud au Nord. Une transition non brutale est observée entre les régions Nord-soudanienne et Sud-sahélienne. Cependant, de forts écarts sont observés entre les régions Sud-sahélienne et Sud-soudanienne. Enfin, le transect oriental (Kedougou-Tamba-Bakel-Matam) qui correspond aux plus faibles variations des isohyètes en particulier Kedougou et Bakel [Costa et al 2002]. Cette variabilité des isohyètes englobe la variation d'autres paramètres de la saison des pluies, notamment la date de début de saison, la longueur de la saison, ainsi que les séquences humides et sèches au cours de la saison. Un gradient Nord-Sud du nombre de jours pluvieux est aussi observé passant de 70 *jours* au Sud à 25 *jours* au Nord. L'influence de l'océan qui par son inertie thermique engendre un début

de saison tardif sur le littoral mais avec des cumuls annuels plus important qu'à l'intérieur. La longueur de la saison définie comme la différence entre la date de début et celle de fin de la saison, montre une variation qui augmente en fonction du gradient Sud-Nord. La longueur de la saison varie de 155 à 170 *jours* au Sud alors qu'au Nord elle varie entre 70 à 85 *jours*. La variation de la longueur de la saison n'est pas importante au Sud. Ceci peut être expliqué par la différence entre les pluies qu'on a au Sud et celles qu'on a au Nord. En effet, au Sud les pluies sont plus régulières dans le temps, tandis qu'elles ont un caractère orageux au Nord et au centre et sont donc plus aléatoires. La figure 1.7 montre aussi que la variation de la longueur de la saison est liée à la dynamique du front inter-tropical (FIT). Ce dernier s'installe au Sénégal par le Sud-Est et se propage vers le nord-ouest et sont retraits plus linéaire. Ce qui fait que les régions du Sud et Sud-est subiront le FIT en premier et dernier lieu d'où des longueurs de saison beaucoup plus longues qu'au Sud. La longueur de la saison dépend plus de la date de début de saison que celle de fin de saison [Diop 1996]. Les travaux de [Diop et al 1996] montrent une corrélation entre ces deux paramètres pour différentes stations au Sud, Sud-Est, centre, Nord et Nord-Est pour deux bandes de fréquence. La première est celle de 5 sur 10 ans et l'autre est de 8 sur 10 ans. La date de début de saison est extrêmement variable d'une année à l'autre et d'un point à un autre. En effet, ces fluctuations génèrent des faux départs qui sont de longues pauses observées après une première pluie. Ces faux départs sont néfastes aux agriculteurs qui seront obligés de faire un double semis [Diop 1996]. Les travaux de [Diop 1996] ont abouti à une planification des dates de semis, en considérant une fréquence de 8 sur 10 ans.

Dans la partie Nord du pays, où nous observons des longueurs de saison moyennement égales à 60 *jours* et des débuts de saison tardifs, la période optimale de semis se situe dans la deuxième décennie du mois d'Août [Diop 1996]. Au centre du pays, dans le bassin arachidier, cette date de semis se situe entre la première décennie et la deuxième décennie du mois d'Août [Diop 1996]. Alors que cette date de semis se situe entre la troisième décennie de Juin et la fin de la première décennie de Juillet dans le Sud-Est du pays. Cependant, dans le Sud du pays, cette zone montre une date de semis dans la première décennie de Juillet. Cette date de semis est aussi la conséquence des longueurs de saison qui varient entre 110 *jours* et 140 *jours*, avec notamment des dates de démarrage de la saison précoces dans la zone [Diop 1996]. La forte variabilité spatiale des précipitations observée dans

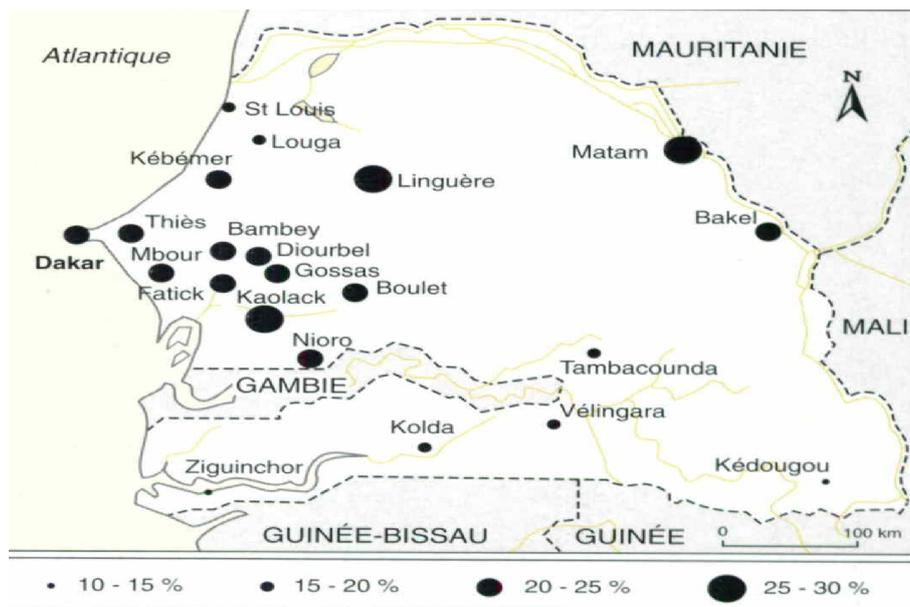


Figure 1.7: Répartition spatiale du coefficient de Variation de la longueur de la saison des pluies au Sénégal [Diop 1996]

le pays génère des dates de semi qui fluctuent d'une zone à une autre et des variétés de cultures en fonction des différentes zones climatiques du pays.

Chapter 2

Approche Méthodologique

L'objectif de l'étude est d'identifier les caractéristiques climatiques dans la zone centre du Sénégal englobant l'observatoire population santé de Niakhar. Pour cela, une approche statistique sera appliquée sur l'indice d'anomalie standardisée, la date de début et fin de saison, la fréquence temporelle et spatiale des pauses pluviométriques et des séquences sèches, l'impact de ces pauses sur le cumul journalier et les types de pluies observés dans la zone. Une analyse de ces différents paramètres de la saison des pluies permet d'estimer la répartition spatio-temporelle des précipitations dans le domaine d'étude.

Dans la première section, nous présentons le contexte et la Problématique de l'étude. Dans la deuxième section nous présentons les données utilisées pour l'étude. D'abord, nous présentons les données d'observation synoptique de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM), ensuite le réseau de pluviographes du Laboratoire Physique de l'Atmosphère et océanographie Simeon Fongan (LPAO-SF) sera présenté et enfin nous allons présenter le réseau de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) à Niakhar. Dans la troisième section, nous présentons la méthodologie statistique utilisée. La présentation de la zone d'étude sera faite dans la quatrième section.

2.1 Données

Afin de caractériser le climat de la zone d'étude, nous allons utiliser des données extraites du réseau synoptique de pluviomètres de l'ANACIM, de l'IRD et du réseau de pluviographes du LPAO-SF. Dans ce qui suit nous présentons les modes de collectes et de dépouillement des données utilisées.

2.1.1 Réseau d'observation synoptique de l'ANACIM

L'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM) possède un réseau assez diversifié d'observations météorologiques. Elle compte 4 stations synoptiques principales, 8 stations synoptiques secondaires, 13 stations climatologiques et de quelques centaines de postes pluviométriques, comme l'illustre la figure 2.1. Dans cette étude, nous allons utiliser des données d'observations synoptiques de précipitations.

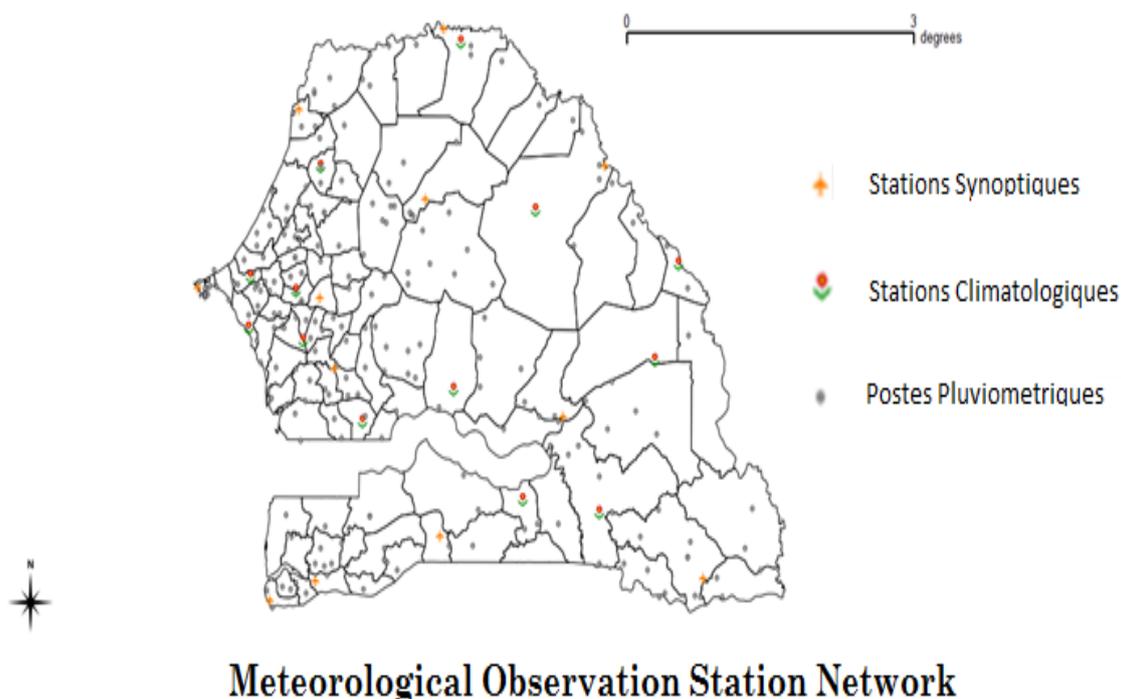


Figure 2.1: Réseau d'observation météorologique de l'ANACIM [www.ird.sn]

2.1.2 Réseau de Pluviographes de LPAO-SF

Dans le cadre du projet international AMMA, le Laboratoire Physique de l'Atmosphère et d'Océanographie Simeon Fongang a acquis un réseau de 33 pluviographes répartis sur trois zones: zone Nord, zone Sud et zone dense au centre-ouest du Sénégal. Ce réseau est installé de manière à couvrir l'espace centré sur le radar NPOL (-17.09804 Ouest, 14.65654 Nord) à Kawsara. Ce réseau est conçu pour bien documenter la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans l'extrême Ouest du continent Africain mais aussi la contribution des différents types de systèmes convectifs dans le cumul annuel des précipitations. La zone Nord est constituée de 8 pluviographes, la zone Sud de 9

pluviographes et la zone dense de 16 pluviographes. La zone dense est centrée dans le village de Ndiaganiao situé au niveau du bassin arachidier, proche de la zone d'étude de Niakhar.

La pluie est collectée par l'intermédiaire d'un cône de réception ou « impluvium ». A travers un orifice calibré, l'eau est recueillie dans un auget. Ce dernier bascule pour une masse d'eau donnée et permet ainsi le remplissage du second auget. Chaque basculement ferme un contact électrique. Les impulsions électriques émises sont horodatées et enregistrées (pas de temps variable). Pour une masse d'eau donnée, correspondant à une hauteur d'eau précipitée, une impulsion électrique est émise, horodatée et enregistrée. Le pluviographe présente des avantages, un coût relativement faible, très utilisé, forme en verre à pied moins sensible aux turbulences. Cependant il présente des inconvénients tels que l'obstruction de l'ajutage, sous-estimation des fortes intensités, étalonnage complexe, acquisition des données à pas de temps variable, risques de problème pour l'utilisation des données.

Figure 2.2: *Image d'un pluviographe de LPAO-SF*

La figure 2.2 illustre la position des pluviographes dans les différentes zones du réseau. Ce réseau enregistre des données depuis 2005. Cependant, après un contrôle de qualité, 50% des stations de la zone Nord sont extraites de 2005 à 2010. Dans la zone Sud 5 pluviographes sur 9 sont utilisés de 2006 à 2010, alors que dans la zone dense sur les 33 pluviographes seuls 6 sont opérationnels sur la période 2005 à 2010.

2.1.3 Base de Données de l'IRD sur l'Observatoire population santé de NIAKHAR

Des données de précipitations journalières ont été extraites de la base de données de l'institut de recherche pour le développement (IRD) de la station de la zone de Niakhar de 1998 à 2012. Ces données concernent 6 stations pluviométriques de l'observatoire population santé de Niakhar, comme l'illustre la figure 2.4. Il s'agit des stations de Niakhar, Ngayokhem, Toucar, Gadiack, Dihine et Kotiokh. Cependant, cette base de données est entachée de nombreuses lacunes. La résolution temporelle de ces données est de 1 jour. La station de Ngayokhem montre la série la plus complète, en enregistrant des données pour chaque année à l'exception de 2006 et 2007. La station de Niakhar montre

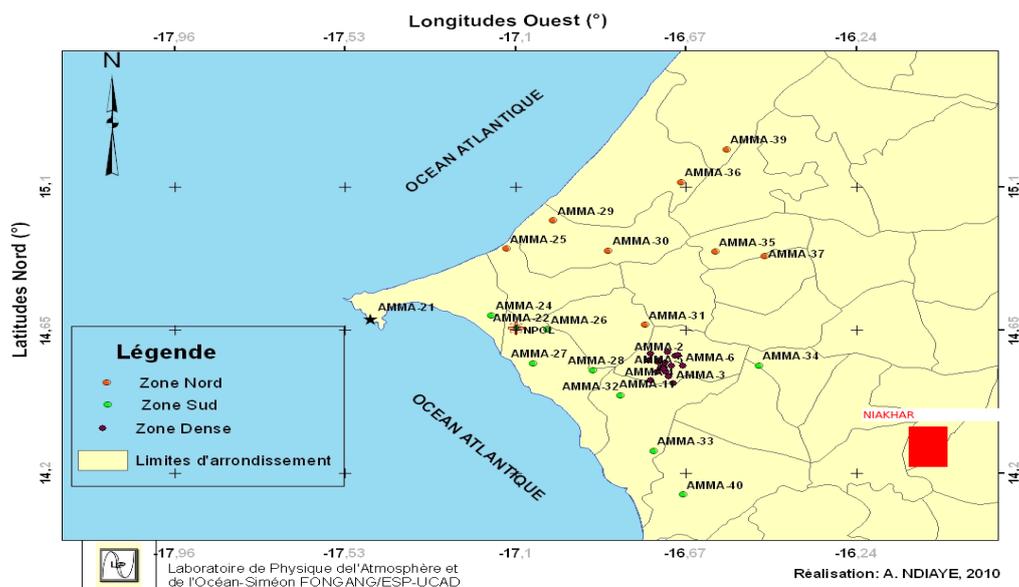


Figure 2.3: Réseau de pluviographes de LPAO-SF [Kucera et al 2006]

5 ans de données manquantes, notamment 2000, 2006, 2007, 2010 et 2011. La station de Gadiack montre 7 ans de données manquantes 1998, 1999, 2005, 2006 2007, 2008 et 2010. Ensuite, nous avons la station de Toukar qui n'a enregistré que 6 ans de données 2002, 2003, 2004, 2009 et 2011. La station de Diohine a enregistré 5 ans de données 2002, 2003, 2004, 2009 et 2011. Enfin, nous avons la station de Kotiokh qui n'a enregistré que 4 années de données 2002, 2003, 2004 et 2008. On remarque ainsi, une discontinuité temporelle avec des années lacunaires différentes pour les différentes stations, un manque de contrôle de qualité des données, une couverture spatiale incomplète de l'observatoire population santé de Niakhar.

2.2 Méthodologie Statistique Utilisée

2.2.1 Indice d'Anomalie Standardisée

Pour étudier la variabilité interannuelle des précipitations nous avons utilisé l'indices d'anomalies standardisées ou indices pluviométriques. Cet indice a été mis en place par Lamb en 1982. C'est une méthode très répandue permettant d'étudier la variabilité climatique des précipitations. Il exprime le caractère déficitaire ou excédentaire d'une

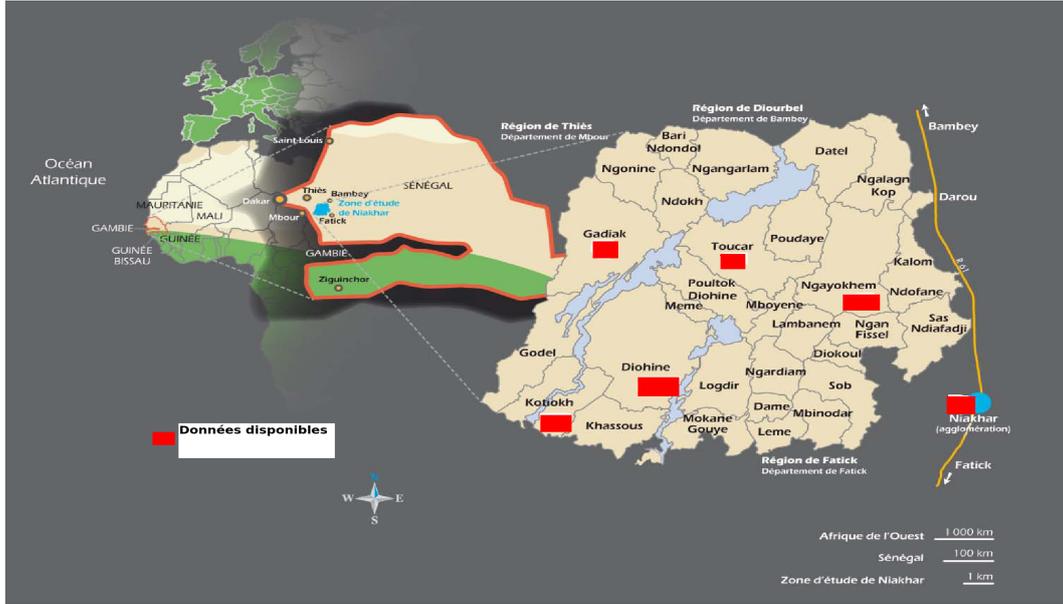


Figure 2.4: Réseau de pluviométrie de l'IRD à Niakhar [www.ird.sn]

année considérée. L'indice est donnée par l'équation 2.1.

$$X_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \frac{r_{ij} - \bar{r}_i}{\sigma_i} \quad (2.1)$$

où r_{ij} est la pluie mesurée en une année j à une station i , \bar{r}_i et σ_i sont les moyenne et écart-type des précipitations enregistrées à la station i et N_j est le nombre de stations présentant des valeurs pour l'année j .

2.2.2 Date de début et fin de saison et la longueur de la saison

La date de début de la saison (DDS) est un paramètre primordiale pour la caractérisation de la saison des pluies et la planification des opérations agricoles, particulièrement les dates de semis. Diverses méthodes sont établies pour identifier la date de début de la saison. Nous avons deux catégories de critère pour la date de début de la saison. Un critère basé sur la distribution de la pluie et un critère dynamique basé sur la dynamique atmosphérique, notamment de la mousson. Cependant ces méthodes sont élaborées sur la base de combinaison de critère statistique et dynamique. Pour la première catégorie, il existe une variété de méthodes, en fonction du caractère climatique du lieu où l'on se trouve [Camberlin and Diop 2003]. Dans ce travail, nous allons élaboré un critère pour définir la date de début de la saison, en cherchant un cumul de 15 mm sur trois jours consécutifs après le 1^{er} mai sans période sèche supérieure à sept jours dans les trente

jours qui suivent. La date de fin de la saison (DFS) est caractéristique de la saison des pluies, même si elle influence moins que la DDS [Diop et al 1996], son identification est incontournable pour la détermination de la longueur de la saison. Nous avons la date de fin de la saison comme, la dernière pluie supérieure ou égale à 0.1 mm avant le 1^{er} Novembre. Ainsi, la longueur de la saison est définie comme le nombre de jours entre la date de début de la saison et celle de la fin de la saison.

2.2.3 Séquence humide (WS) et pause pluviométrique (DS)

La saison des pluies est une intermittence de séquences pluvieuses et de séquences sèches. Ceci peut être expliqué par la mise en place de la mousson qui est caractérisée par la succession des phases de renforcement qui correspondent à des séquences humides et des phases d'affaiblissement qui correspondent à des pauses pluviométriques [Dieng et al 2008]. Pour déterminer une séquence humide et une pause pluviométrique, nous considérons un seuil de 0.1 mm . Ainsi, un événement pluvieux comme, toute pluie supérieur ou égale à seuil, et un jour non pluvieux est une pluie inférieure à ce seuil. ainsi la série de données journalières est transformée en une combinaison de 0 et de 1. Une séquence humide va correspondre aux nombres de jours entre deux événements non pluvieux consécutifs. Et une séquence sèche, la différence entre deux événements pluvieux consécutifs.

Pour les séquences humides nous les avons classé en quatre catégories. Les *WS1* correspondent aux séquences humides de 1 jour, les *WS2* aux séquences humides de 2 jours, les séquences humides comprises entre 3 et 4 jours correspondent aux *WS3* et celles supérieures ou égales à 5 jours correspondent aux *WS4*. Les pauses pluviométriques représentent une phase d'affaiblissement de la mise en place de la mousson [Dieng et al 2008], avec un accalmie des précipitations. Cependant, toutes les séquences sèches ne véhiculent pas la même information sur la saison des pluies. Les pauses de type *DS1* comprises entre 1 et 3 *jours*, expriment la pluviosité. Les pauses de type *DS2* comprises entre 4 et 7 *jours*, sont déterminantes lorsqu'elles apparaissent en début de la saison, pour le choix optimum des dates de semi. Ensuite, les pauses de type *DS3* qui sont comprises entre 8 et 14 *jours*. Enfin, nous avons les pauses de type *DS4* qui sont supérieures à 15 *jours*. Ces pauses longues peuvent être néfastes pour les cultures surtout lorsqu'elles sont observées dans la période Août-Septembre [Salack et al 2011a].

2.2.4 Présentation de la zone d'étude

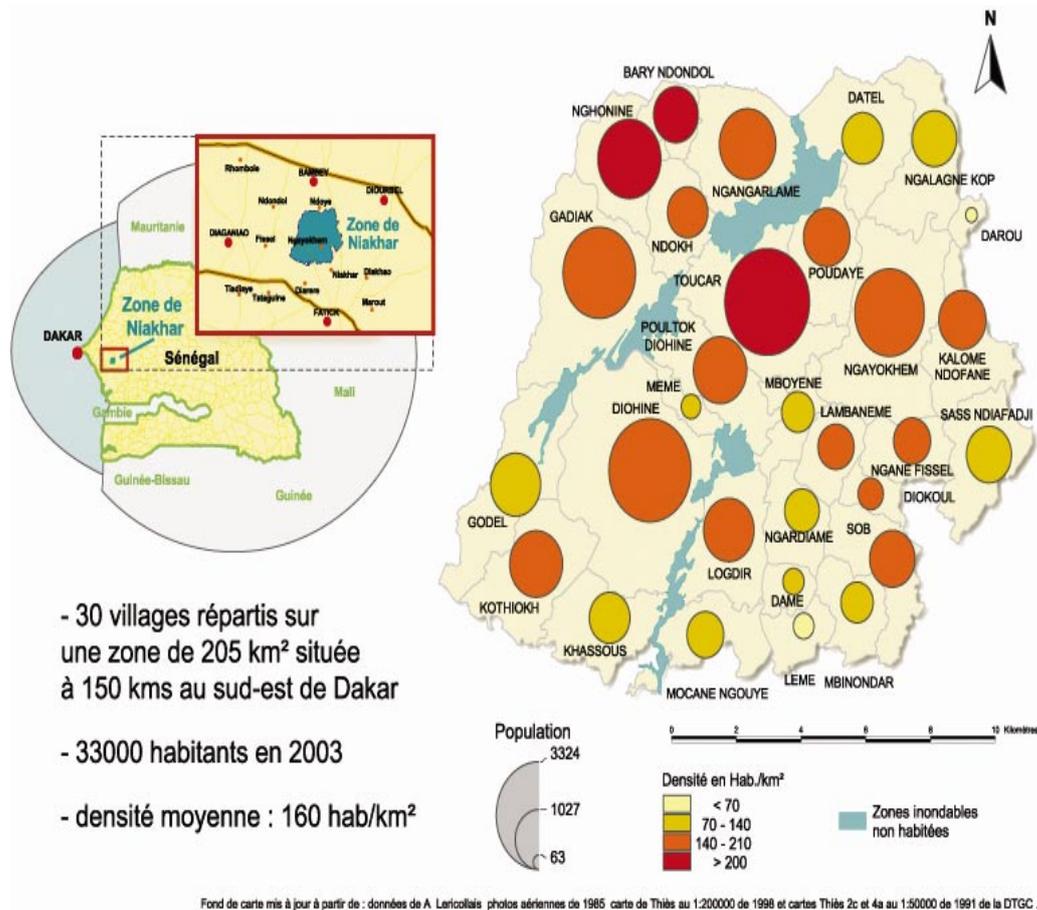


Figure 2.5: *La densité de la population dans la zone de Niakhar [www.ird.sn]*

L'observatoire population santé de Niakhar est le plus ancien système de suivi démographique (SSD) en Afrique. Il fut Fondé en 1962 par Pierre Cantrelle, médecin démographe de l'Orstom qui est devenu institut de recherche pour le développement (IRD). Initialement, l'objectif de cet observatoire était d'obtenir des données démographiques et épidémiologiques fiables sur une population africaine en milieu rural. L'observatoire est composé de 30 villages dont 8 sont suivis depuis 1962. Au départ les 8 villages étaient rassemblés dans une zone appelée Ngayokhem. C'est en 1983, que Michel Garenne a défini les limites de la zone d'étude de Niakhar qui s'est étendu à 30 villages [Delaunay et al 2003]. La zone d'étude de Niakhar est situé entre le 16° 4' – 16° 46' Ouest et le 14° 45' – 14° 6' Nord, dans le département de Fatick, dans la région de Fatick (Sine-Saloum). elle se situe à 155 km au Sud-est de Dakar, capitale du Sénégal. La zone couvre une superficie de 230 km² soit environ 15 km de large et 15 km de long. Le relief est relativement plat sur toute l'étendue de la zone d'étude, Le climat est continental et nord-soudanien,

avec des températures qui varient de $24^{\circ}C$ en Décembre-Janvier et $30^{\circ}C$ en Mai-Juin [Delaunay et al 2003]. La population de Niakhar est particulièrement jeune et est composée majoritairement de ruraux. Elle est passée de 20.000 à 44.000 habitants de 1983 à 2013. La figure 2.5 montre la répartition hétérogène de la population dans les 30 villages de l'observatoire avec une densité moyenne de $160\text{ hab}/\text{km}^2$. La population vit traditionnellement sur une culture vivrière du mil, combinée avec une culture commerciale de l'arachide, et aussi l'élevage de bétail. Cependant, depuis la sécheresse et la crise agricole qui a sévèrement affecté tout le bassin arachidier notamment la zone de Niakhar [Delaunay et al 2003]. les populations développent des stratégies pour mieux s'adapter à ce brusque changement climatique. Grâce à des programmes nationaux visant à améliorer les rendements agricoles, on assiste à l'introduction de cultures à cycle court. C'est dans le même contexte que le projet ANR CERAO a été créé avec comment objectif d'améliorer la production céréalières dans la zone de Niakhar.

Chapter 3

Caractéristiques pluviométriques dans la zone centre du Sénégal

3.1 Introduction

La zone centre du Sénégal est très sensible aux aléas climatiques. elle est à l'interface des domaines sahélien et soudanien. La saison des pluies est vitale pour la population composée majoritairement de ruraux. En Afrique de l'Ouest en général et au Sénégal en particulier, les précipitations montrent une forte variabilité spatio-temporelle marquée par d'importantes fluctuations des composantes de la saison des pluies telles que la date de démarrage de la saison, la longueur de la saison, la fréquence des pauses et des séquences humides ainsi que la tendance des types de pluies.

Dans la première section de ce chapitre, nous étudions la variabilité interannuelle des précipitations de 1961 à 2011. La deuxième section traite la variabilité spatio-temporelle de la date de début de saison. La troisième section présente d'abord la fréquence des pauses pluviométriques. Ensuite, la variabilité interannuelle, la densité de probabilité de présence et l'occurrence de ces pauses. La quatrième section présente d'abord, la fréquence des séquences humides. Ensuite, la variabilité interannuelle de ces séquences humides et enfin les types de pluies au cours de la saison.

3.2 Variabilité interannuelle des précipitations

Pour l'étude de la variabilité interannuelle des précipitations dans la zone centre du Sénégal, nous avons utilisé l'indice d'anomalie standardisée définie dans le chapitre précédent. La figure 3.1 illustre la variabilité interannuelle des précipitations pour les stations de Kaolack, Thies, Mbour, Fatick, Diourbel et Bambey. Nous observons trois périodes pour

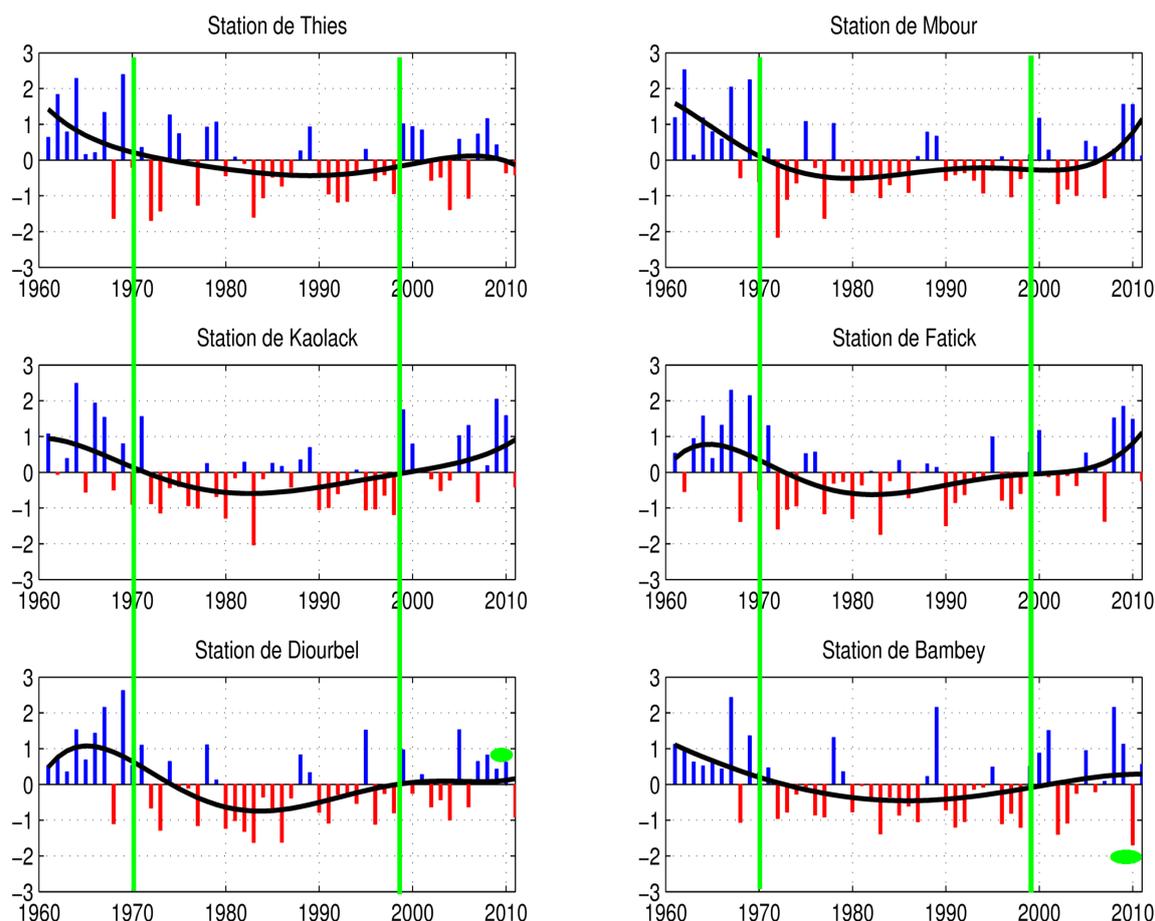


Figure 3.1: *Indice d'anomalie standardisée des précipitations de 1961 à 2011, la courbe noire représente la moyenne glissante sur 5 ans*

chaque station. Une succession d'années pluvieuses de 1961 jusqu'à la fin des années 60. Cette période humide est suivie d'une épisode de sécheresse de 1970 à 2000. Au milieu des années 2000, nous observons un retour des années humides. Cependant, ces trois périodes montrent une variabilité interannuelle et une incohérence spatiale. L'année 1962, était déficitaire pour Kaolack et Fatick, avec un déficit plus élevé à Fatick, tandis que, les autres stations ont enregistré un excédent pluviométrique. Nous observons que l'année 1965 était déficitaire pour Kaolack, alors que les autres stations étaient excédentaires. L'année 1972, était particulièrement déficitaire pour toutes les stations. En effet

cette année correspond à une année El Niño. Pour l'année 2010, la station de Bambey a enregistré un important déficit pluviométrique. Nous remarquons aussi, que ces stations qui ne sont séparées que de quelques dizaines de kilomètres n'ont pas subi de la même façon l'épisode des années sèches. Cependant une cohérence spatiale de ce signal est observée pour les stations de Bambey et de Diourbel, qui ont subi cette épisode de manière beaucoup plus sévère, ensuite celles de Thiès et de Mbour. Kaolack et de Fatick ont subi de manière plus modérée cette épisode, avec des déficits moins importants que les autres stations. Cette situation peut être expliquée par la position plus au Sud de ces stations. Vers 2006, une succession d'années pluvieuses est observée pour l'ensemble des stations, notamment Fatick et Kaolack qui montrent des excédents plus importants que les autres stations. En effet, ce retour à des années pluvieuses se fait plus difficilement à Bambey, avec une forte variabilité interannuelle. A Diourbel, on observe cette succession d'années pluvieuses mais avec de faibles excédents. Cette pluviosité faible de ces deux stations, en l'occurrence Bambey et Diourbel peut être expliquée par une position plus continentale par rapport aux autres stations. Thiès et Mbour ont la particularité d'être plus proches de la mer et donc peuvent être influencés par la convection diurne.

3.3 Variabilité spatio-temporelle de la date de début de la saison

La date de début de saison est très variable d'une année à l'autre, comme l'illustre la figure 3.2 dans la zone centre du Sénégal. La figure 3.2 montre une tendance de démarrage de la saison plus précoce à Kaolack. En effet, Kaolack est situé plus au Sud que les autres stations, cette position lui permet d'être traversé en premier lieu par le front inter-tropical (FIT). Cependant, nous observons pour la station de Fatick, un démarrage précoce de la saison durant les années 60. A partir de 1968, nous observons un glissement des dates de début de la saison vers la deuxième ou troisième décennie de Juillet et début Août. Ces démarrages tardifs de la saison peuvent être expliqués par l'épisode de la sécheresse qu' a subit l'Afrique de l'Ouest sur la période 1970 à 1990. L'année El Niño de 1972, qui a été déficitaire pour toutes les stations, est marquée par un démarrage simultané de la saison pour les stations de Bambey et de Fatick vers le 27 Juillet. Cette année était particulière pour Mbour car aucune date de début de saison n' a été enregistrée. Cette situation que

Mbour a subit peut être expliquée par sa position côtière. En effet elle est très exposée à l'influence du phénomène océanique El Niño. Cette démarrage simultanée de la saison est aussi observée en 1983 vers le 5 Août et en 1998 vers le 2 Août pour les stations de Bambey, Fatick et Mbour.

À Thiés, nous observons des démarrages tardifs en 1965, 1966, 1972, 1976, 1977, 1991, 1997. Donc une cohérence spatiale est observée sur l'influence du phénomène El Niño entre ces deux stations. Cependant pour Fatick, depuis 1995, nous observons une modification de cette tendance, avec un démarrage de la saison entre la deuxième décennie de Juin et la première décennie de Juillet. Cette forte variabilité interannuelle de la date de début de saison, est accompagnée d'une variabilité spatiale de ce paramètre caractéristique de la saison des pluies. L'analyse de la densité de probabilité permet de mettre en exergue cette variabilité spatiale. La figure 3.3 montre la densité de probabilité de la date de début de

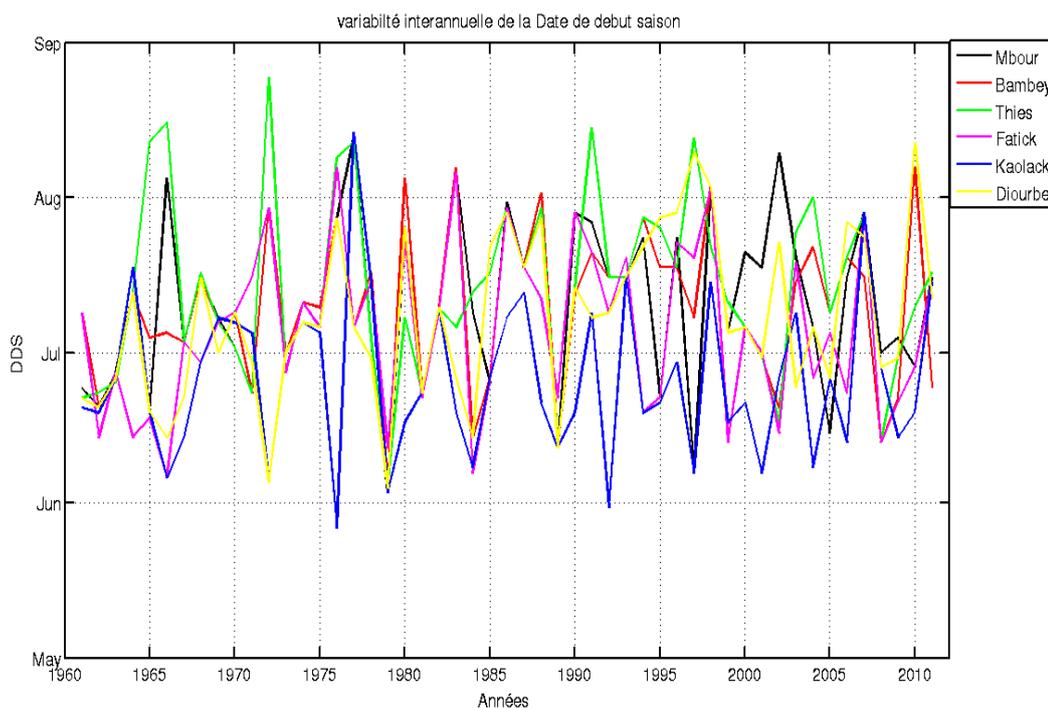


Figure 3.2: Variabilité interannuelle de la date de début de saison dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011

la saison des pluies dans les stations de la zone centre du Sénégal. Cette figure confirme ce qui est observé sur la figure 3.2, sur la tendance de Kaolack à débuter la saison en premier lieu. Nous observons des événements rares de démarrage de la saison des pluies en fin Mai et dans la première décennie de Juin, notamment à Kaolack où ces événements représentent

environ 14%. Tandis que, pour les autres stations, ces événements de démarrage précoces ne représentent pas plus de 5%. Ces démarrages précoces correspondent à l'année 1976 et 1992 pour Kaolack et 1979 pour les autres stations. Cependant, Deux modes de démarrage de la saison des pluies sont observés pour Kaolack. Un mode plus probable qui représente 24% d'avoir un démarrage de la saison le 19 Juin, et un autre mode de démarrage qui représente 17% de démarrage de la saison au 10 Juillet. En outre, nous avons 3% de cas d'avoir un démarrage de la saison en mis Août à Kaolack. Ces démarrages tardifs de la saison correspondent au cas de l'année El Niño de 1977. Le mode du 10 Juillet de Kaolack coïncide avec les modes principales de Thiés, Fatick et Bambey, avec respectivement 18%, 18.5% et 25%. La station de Mbour a tendance a démarré sa saison dans la troisième décade du mois de Juin vers le 27 Juin. un autre mode de 13% vers le 1^{er} Août. La station de Diourbel montre un mode de 10% en début Août. En effet, les faibles probabilités observées, montrent la forte variabilité de la date de début de la saison, en plus de la dispersion spatiale entre des stations séparées de quelques dizaines de kilomètres. Cette date de début de saison à un pouvoir explicatif important sur la longueur de la saison. Ainsi, nous allons analyser la variabilité spatio-temporelle de la longueur de la saison.

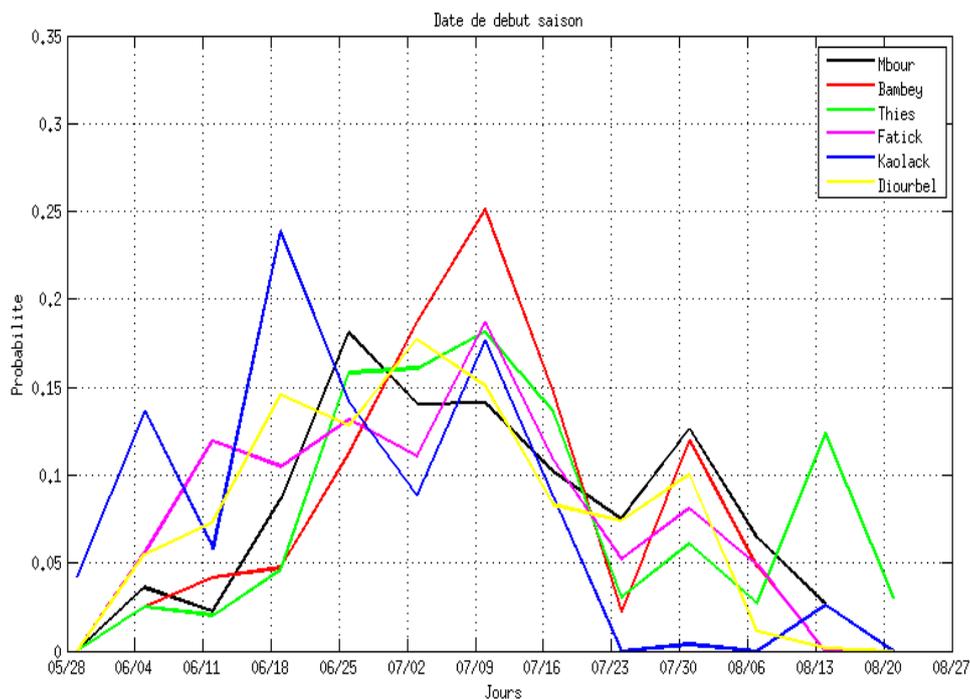


Figure 3.3: Densité de probabilité de la date de début de saison dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011

3.3.1 Variabilité spatio-temporelle de la longueur de la saison

La longueur de la saison des pluies (LDS) est définie comme la différence entre les date de début et fin de la saison. Des études ont montré l'aspect dominant du pouvoir explicatif de la date de début de la saison sur celle de la fin de la saison [Diop 1996]. Comme, nous l'avons observé pour la date de début de la saison, la longueur de la saison montre une forte variabilité interannuelle mais aussi spatiale, comme l'illustre la figure 3.4. L'année 1972 est marquée par un décalage de plus de 40 jours entre les stations de Kaolack et Thiés. Pour cette même année, la longueur de la saison s'étend sur 60 jours à Thiés, tandis que pour Kaolack la saison était longue de 145 jours. En effet grâce à sa position Kaolack subit en premier l'installation du FIT et en dernier son retrait. Ce qui pourrait expliquer les longues saisons des pluies observées à Kaolack par rapport aux autres stations.

La station de Fatick montre des saisons courtes pendant l'épisode de la sécheresse. Notamment, en 1983 où Fatick a enregistré la saison la plus courte durant toute cette période, avec moins de 2 mois d'hivernage. Ce qui confirme le lien étroit entre date de début de saison et la longueur de la saison car, pour cette même année le démarrage de la saison a été observé vers le 5 Août. Ce qui illustre l'impact de la sécheresse sur Fatick.

3.4 Fréquences des pauses pluviométriques au cours de la saison

Les pauses pluviométriques sont des conséquences directes des fluctuations qui accompagnent l'installation de la mousson Ouest-Africaine [Salack et al 2011a][Sultan et Janicot 2004] [Dieng et al 2008]. La figure 3.5 illustre l'occurrence des pauses pluviométriques, pour les stations de Fatick, Kaolack, Thiés, Diourbel, Mbour, Bambey. Nous observons une cohérence spatiale de la distribution des pauses, avec les pauses de 1 jour qui constituent des événements de hautes fréquences, pour toutes les stations. Cependant, ces pauses sont plus fréquentes à Mbour, ensuite Kaolack, Fatick, Diourbel, Bambey et Thiés. En effet, elles constituent avec les pauses de 2 jours, de 3 jours, la catégorie *DS1*, dont la fréquence élevée traduit la pluviosité d'une zone [Salack et al 2011a]. Les pauses de type *DS2* sont moins fréquentes que celles de type *DS1*. Cependant elles sont plus fréquentes à Thiés. Les pauses extrêmes de type *DS3* et *DS4* sont rares, notamment à Kaolack. Néanmoins,

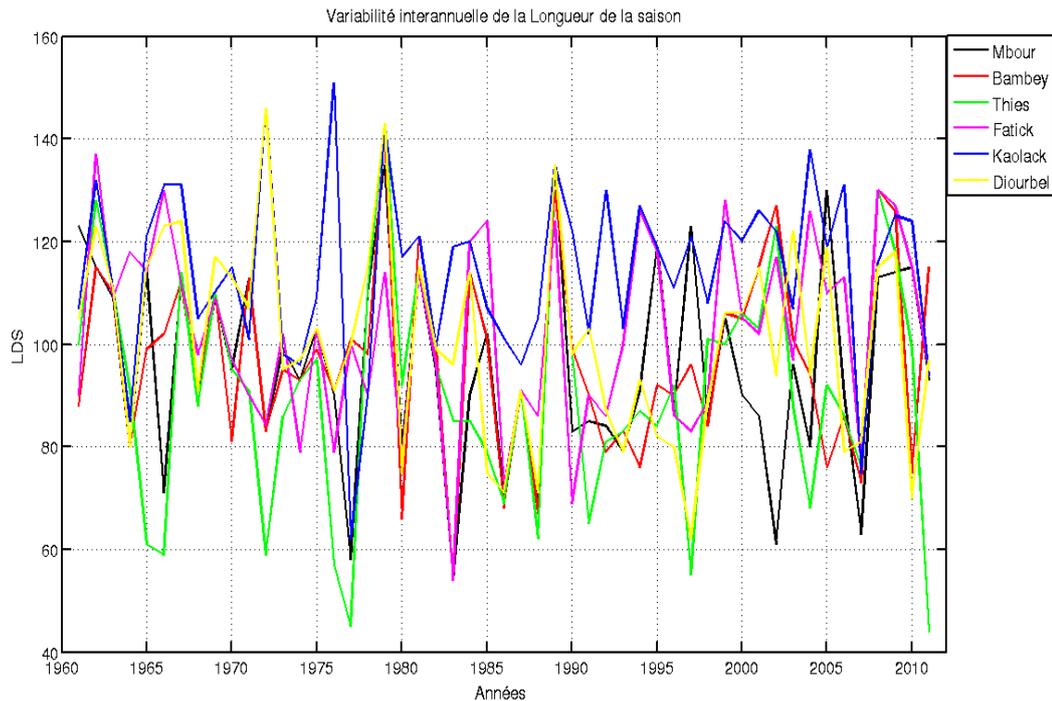


Figure 3.4: Variabilité interannuelle de la longueur de la saison (jours) dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011

de longues pauses sont observées à Diourbel (10 jours), à Fatick (12 jours) et à Bambey (15 jours).

3.4.1 Variabilité spatio-temporelle des pauses pluviométriques

La cohérence spatiale observée sur la fréquence des différents types de pauses, est sujette d'une forte variabilité spatio-temporelle de ces dernières, comme l'illustre la figure 3.6. Nous observons que pendant l'année 1972, toutes les stations ont enregistré une pause extrême soit de type $DS3$ ou $DS4$. La station de Kaolack a enregistré 5 pauses de type $DS3$, celle de Fatick a enregistré une pause de type $DS4$, Mbour a enregistré 2 pauses de type $DS4$. Ceci confirme l'année très déficitaire de Mbour marquée par une absence de date de début de saison qui n'a pas rempli le critère pour débiter la saison.

Bambey et Diourbel ont enregistré 1 pause de type $DS4$, tandis que, Thies a enregistré 2 pauses de type $DS3$. Cette situation semble confirmée, la corrélation entre les pauses extrêmes de type $DS3$ et $DS4$ avec le déficit pluviométrique. Cependant, l'année 1989, la station de Mbour a enregistré une pause de type $DS4$, alors qu'un excédent pluviométrique annuel a été observé. Une pause de type $DS3$ était observée à Bambey mais l'année était

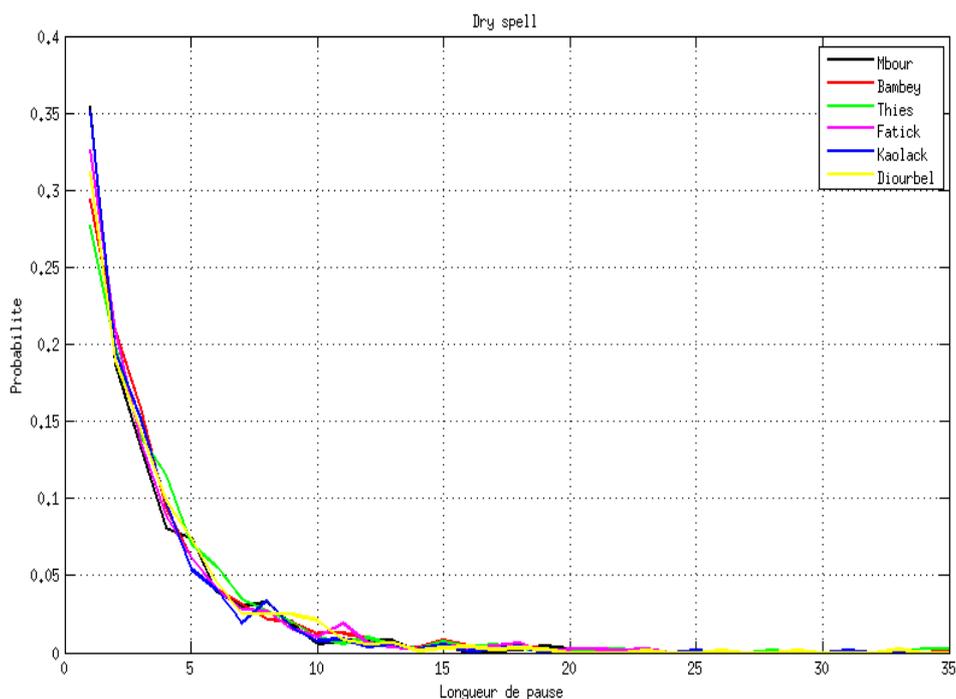


Figure 3.5: Occurrence des pauses pluviométriques dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011

excédentaire à cette station. Pendant l'épisode de la sécheresse, nous avons observé une augmentation de la fréquence des pauses extrêmes, notamment de type *DS3*. La station de Bambey, qui a été sévèrement touchée par la sécheresse, montre à partir de 1965 au minimum une pause de type *DS3* pour chaque année. La station de Kaolack où le nombre de pauses *DS3* ne dépassait pas 2 durant la période 1961 à 1967, voit une augmentation des pauses *DS4*.

Ces pauses extrêmes sont des événements de basses fréquences d'occurrence. En général, elles sont observées en début et fin de saison, comme l'illustre la figure 3.7. Cette figure montre une cohérence spatiale de l'occurrence de ces pauses. Elles ont tendance à exprimer des faux départs et des fins précoces de la saison des pluies. Cependant, elles peuvent apparaître dans la phase active de la saison, en Août-Septembre, une situation néfaste qui peut provoquer une baisse des rendements agricoles. C'est le cas de Mbour, où les pauses *DS4* sont observées en plein hivernage, l'événement observé sur la figure 3.7 peut correspondre en grande partie au cas de 1972. La station de Fatick a la fréquence d'occurrence la plus faible des pauses *DS3* en fin de saison.

Cette apparition des pauses longues en début et fin de saison, confirme les résultats

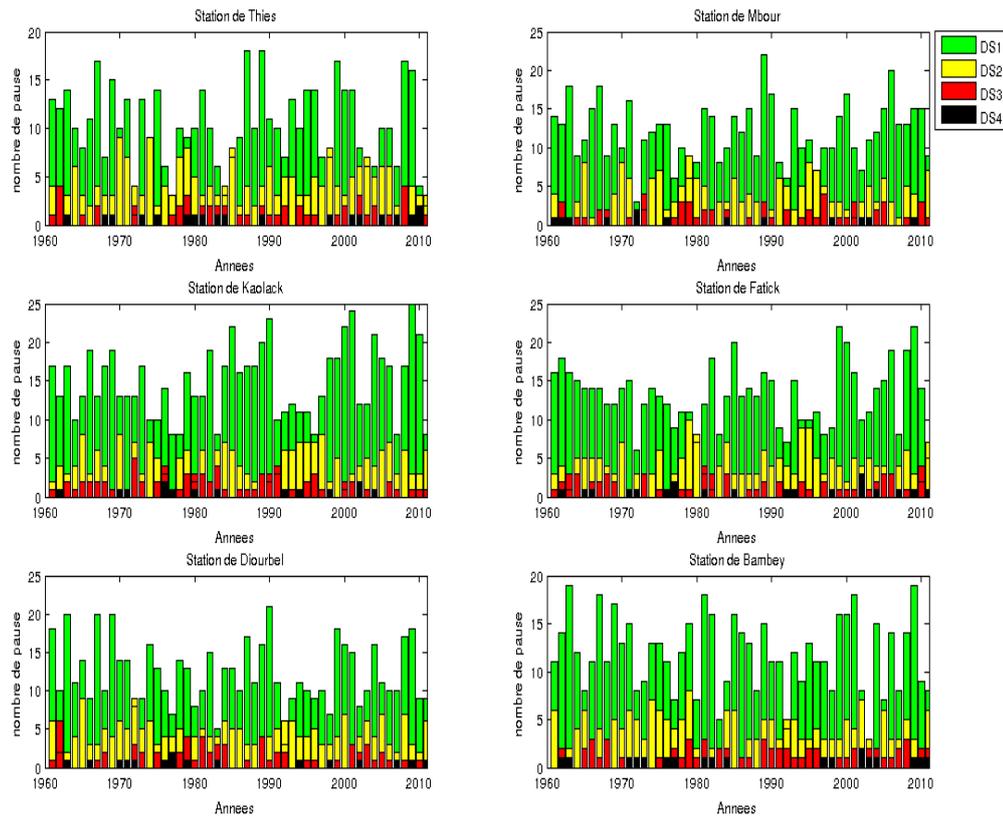


Figure 3.6: Variabilité interannuelle des pauses pluviométriques dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011

apportées par des études sur l'installation de la mousson Ouest-Africaine. Elles montrent que ces pauses dérivent des phases d'affaiblissements de la mousson lors de son installation et pendant son retrait [Dieng et al 2008]. La variation de l'intensité, l'étendue de la dépression thermique [Sultan et Janicot 2004] et les intrusions d'air sec extra-tropical dans la haute troposphère [Salack et al 2011a] peuvent aussi générer ces pauses.

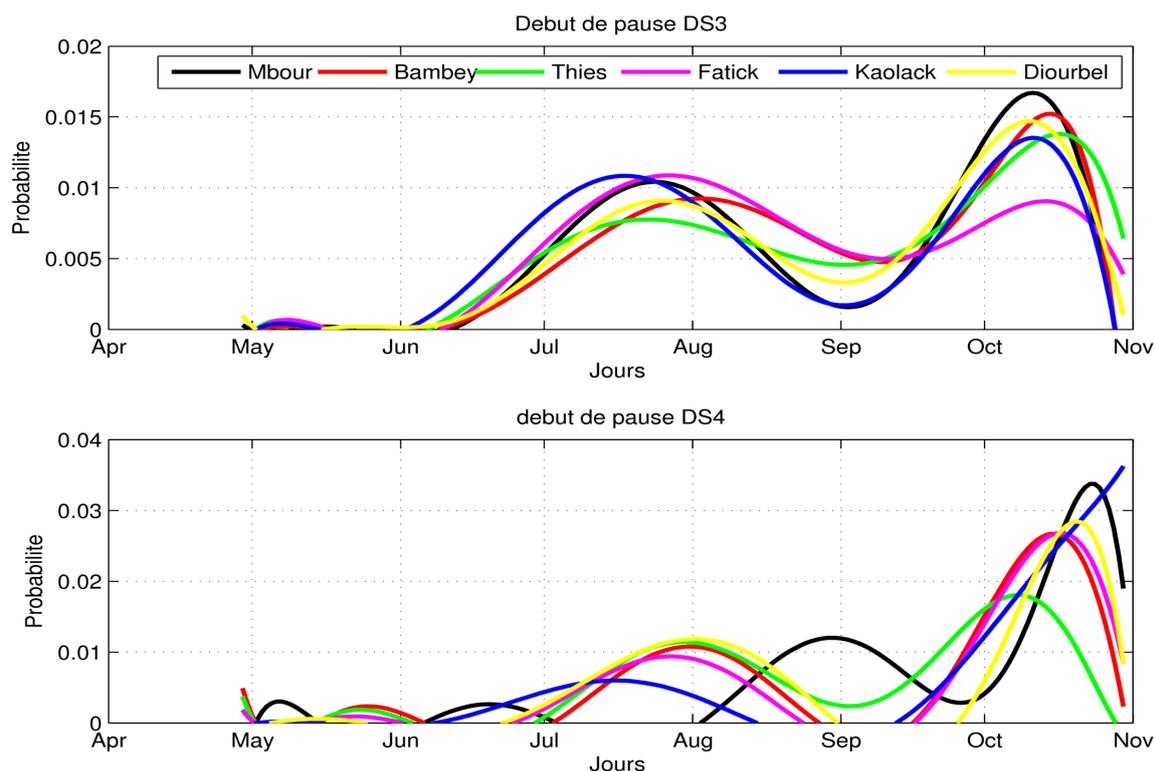


Figure 3.7: Occurrence des pauses extrêmes $DS3$ et $DS4$ dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011

3.4.2 Impacts des pauses pluviométriques sur le cumul journalier

Les études portées sur les pauses pluviométriques, se sont intéressées à leur variabilité intra-saisonnière [Dieng et al 2008][Diop 1996][Sultan et Janicot 2004], leur longueur, leur fréquence d'occurrence, leur date de début[Salack et al 2011a], il a été même démontré que l'occurrence de ces pauses pluviométriques était liée au caractère excédentaire, normale ou déficitaire de l'année. En effet, l'apparition des $DS1$ et $DS2$ en début, milieu et fin de saison a tendance à être corrélée aux excédents pluviométriques. Tandis que, les pauses $DS3$ et $DS4$ ont tendance à être corrélées aux années déficitaire.

La figure 3.8 montre la distribution du cumul pluviométriques après une séquence sèche. Elle montre une cohérence spatiale de la quantité de pluie observée après une pause pluviométrique dans les différentes stations. Après une pause $DS1$, nous avons tendance à avoir un cumul de l'ordre de 12 à 15 mm , avec des événements rares où on peut avoir des pluies de l'ordre de 70 mm . Après les $DS2$, ce cumul probable s'est glissé vers les faibles cumuls en dessous de 10 mm , avec des événements rares de fortes pluies moins

probables par rapport aux $DS1$. Ce cumul journalier diminue fortement, après les pauses extrêmes $DS3$ et $DS4$. En général, il ne pleut pas plus de 5 mm après un $DS3$ ou un $DS4$. Nous observons aussi que les événements rares de 40 mm de pluie observés après un $DS3$ tendent à disparaître après un $DS4$.

En effet, la durée de ces pauses extrêmes permet d'assécher le sol ce qui contribue à augmenter le flux sensible [Guichard et al 2011], qui va réchauffer l'atmosphère. Ainsi, les systèmes convectifs de meso-échelles (MCS) et les lignes de grain qui contribuent fortement à la pluviométrie au sahel, notamment au Sénégal [Gaye et al 2005], ne vont pas se développer et par conséquent ils vont se dissiper en donnant de petites averses.

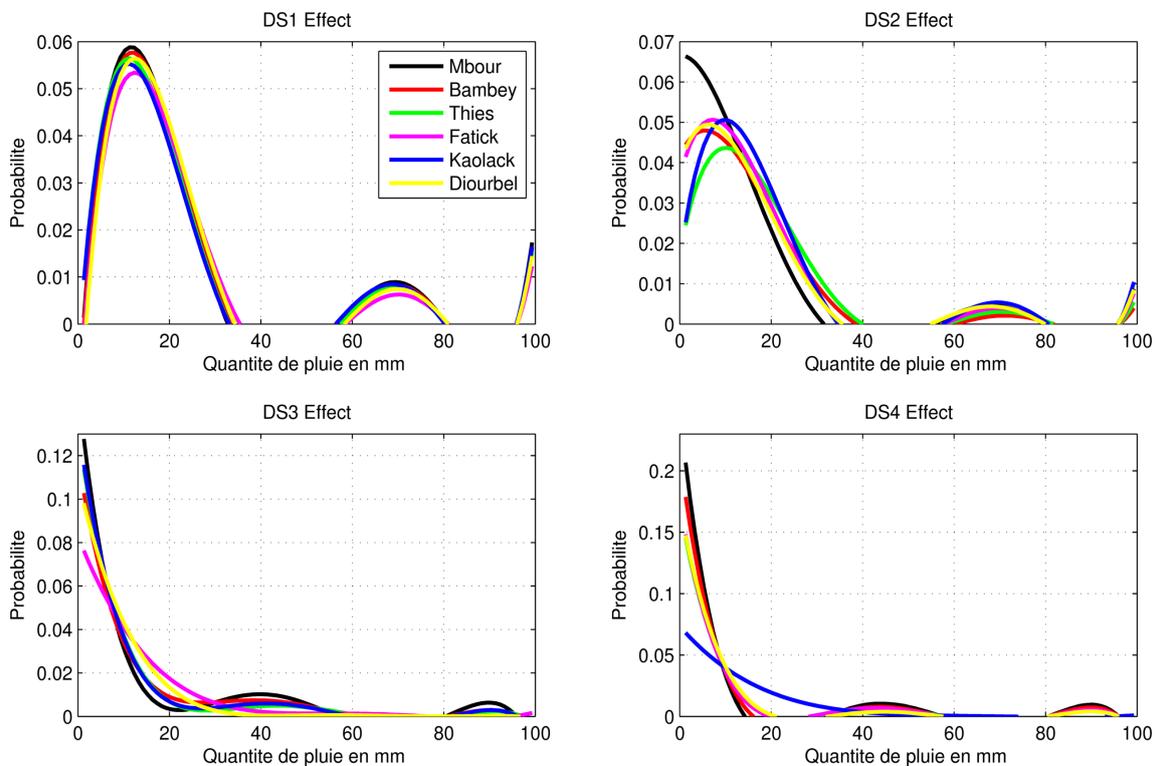


Figure 3.8: *Cumul journalier moyen observé après une pause $DS1$, $DS2$, $DS3$ et $DS4$ dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011*

3.5 Fréquences des séquences humides (WS)

La fréquence des séquences humides ou la succession de jours pluvieux (WS) est un paramètre permettant de caractériser la saison des pluies. La figure 3.9 montre la distribution des séquences humides dans la zone centre du Sénégal, avec une forte cohérence spatiale. Nous observons que dans toutes les stations, environ 50% des séquences humides

sont de 1 jour, celles de 2 jours représentent environ 20%, celles de 3 jours représentent environ 10%. Cependant, nous notons une rareté des séquences humides qui durent 4 jours ou plus. Les stations de Fatick, Thies et Diourbel montre une probabilité élevée des séquences humides de 1 jour. Tandis que, au niveau des stations de Kaolack et Mbour, on a un nombre plus élevé de séquences humides de 4 jours. Cette situation semble être liée au gradient nord-Sud de la pluviométrie au Sénégal et de la position côtier de Mbour. De plus, on remarque que Fatick semble montrer des caractéristiques intermédiaires entre les stations plus au Nord et continentales (Diourbel, Thies et Bambey) et celles plus au Sud et côtier (Kaolack et Mbour).

Cette observation nous permet de faire une classification des séquences humides. Ici, nous allons considérer les séquences humides de 1 jour comme des séquences de catégorie $WS1$, $WS2$ définissant celles de 2 jours, celle comprises entre 3 et 4 jours comme les $WS3$ et enfin les séquences qui durent 5 jours ou plus correspondent au $WS4$.

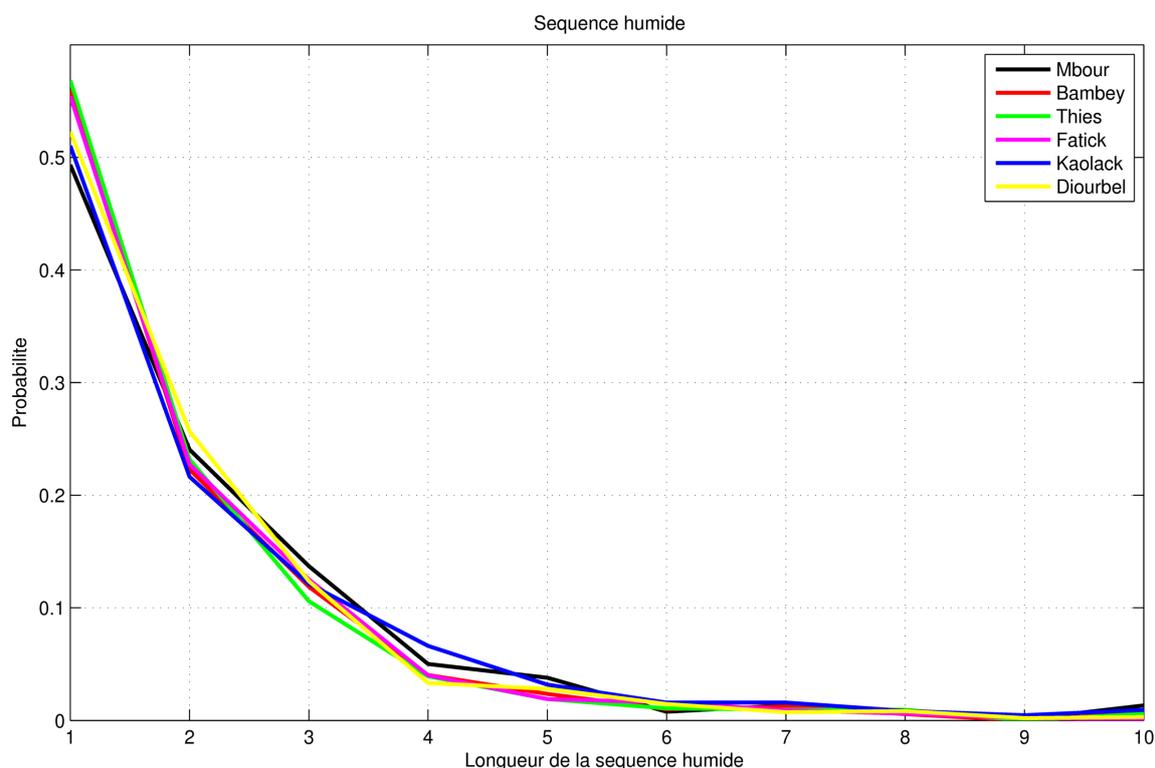


Figure 3.9: *Distribution des séquences humides dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011*

3.5.1 Variabilité spatio-temporelle des séquences humides

La figure 3.10 montre la variabilité interannuelle et spatiale de ces séquences humides. cette figure confirme ce que nous avons observé sur la distribution des séquences humides, c'est à dire une forte occurrence des $WS1$ et des $WS2$ pour l'ensemble des stations. La figure 3.10 montre également que l'occurrence des $WS3$ et $WS4$ est beaucoup plus important à Kaolack et à Mbour par rapport aux autres stations. Ce qui confirme le caractère pluvieux de ces deux stations. Cependant, nous observons que dans la saison, lorsqu'une station enregistre un $WS4$, l'occurrence des $WS1$ diminue. Une tendance semble être observée pour les stations de Thiés, Bambey, Fatick et Diourbel qui montre une correspondance entre l'occurrence des $WS4$ et le caractère excédentaire de la saison. Si une $WS4$ est observée durant la saison des pluies, il est rare que cette année soit déficitaire. Par contre, ce fait semble moins évident pour les stations de Kaolack et Mbour. En effet pour la station de Kaolack, une sequence humide $WS4$ peut être enregistrée malgré que l'année soit déficitaire. Le tableau 3.1 montre les cas d'années déficitaire où une $WS4$ est observée.

Table 3.1: Années déficitaires où une $WS4$ est enregistrée pour les différentes stations

Stations	Année déficitaire où $WS4$ est observée
Thiés	1980
Bambey	1977
Fatick	1962; 1996
Diourbel	1975; 1980; 1994
Mbour	1968; 1974; 1979; 1991
Kaolack	1962; 1965; 1975; 1976; 1979; 1992; 1995; 2003; 2011

En plus de la variabilité temporelle, le tableau 3.1 illustre aussi une variabilité spatiale de cette catégorie de séquences humides qui d'après la figure 3.10 contribue de manière significative sur la pluviométrie, surtout pour les stations de Thiés, Bambey, Fatick et Diourbel. Cependant, nous observons aussi que lorsque la catégorie $WS4$ est associée à la catégorie $WS3$ sur une même année, cette dernière sera probablement excédentaire. Une cohérence spatiale des types de pluies observés dans la zone centre est illustrée dans la

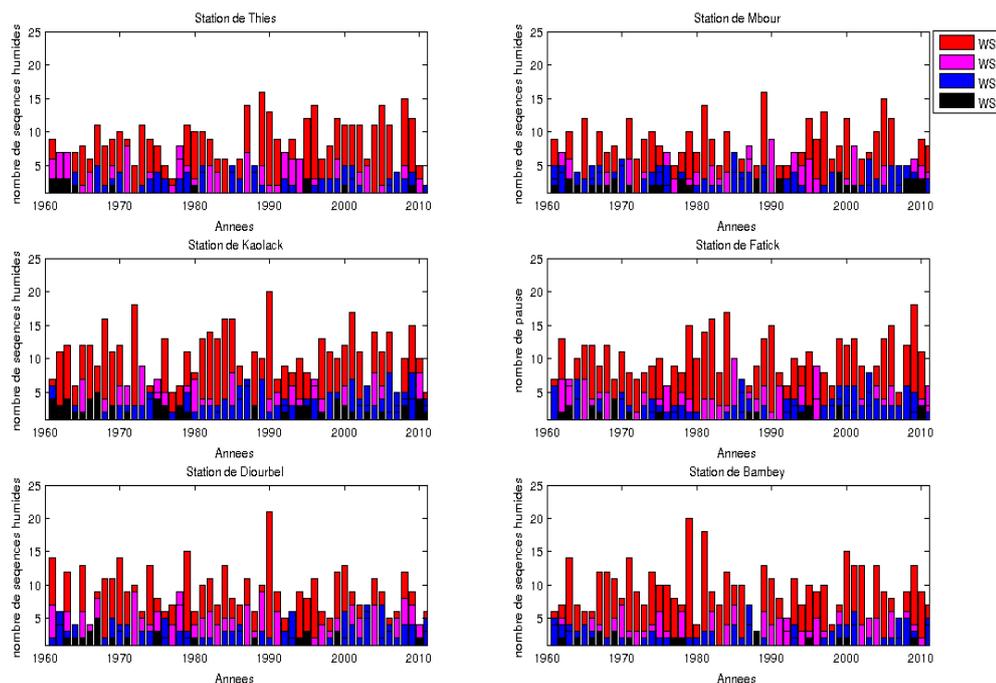


Figure 3.10: *Variation interannuelle des séquences humides dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011*

figure 3.11, avec les quantités de pluies comprises entre 10 et 20 *mm* qui constituent les événements les plus fréquents, suivi des quantités comprises entre 20 et 30 *mm* et celles comprises entre 30 et 40 *mm*. Cependant les événements comprises entre 40 et 50 *mm* sont de basses fréquences et montrent une variabilité spatiale importante.

La figure 3.11 illustre la forte occurrence des événements compris entre 40 et 50 *mm* à Fatick comparé même à Kaolack. L'année déficitaire de 1972, Mbour est mise en exergue dans la figure 3.11 avec des quantités de pluie comprises entre 10 et 20 *mm* durant la saison. La variabilité de ces types de pluie peut il nous renseigner sur l'apport des MCSs ou des lignes de grains et les systèmes locaux convectifs sur la pluviométrie au Sénégal? Cette question reste entière malgré que, plusieurs études ont montré l'apport important des MCSs et des lignes de grains aux précipitations au Sahel et au Sénégal en particulier.

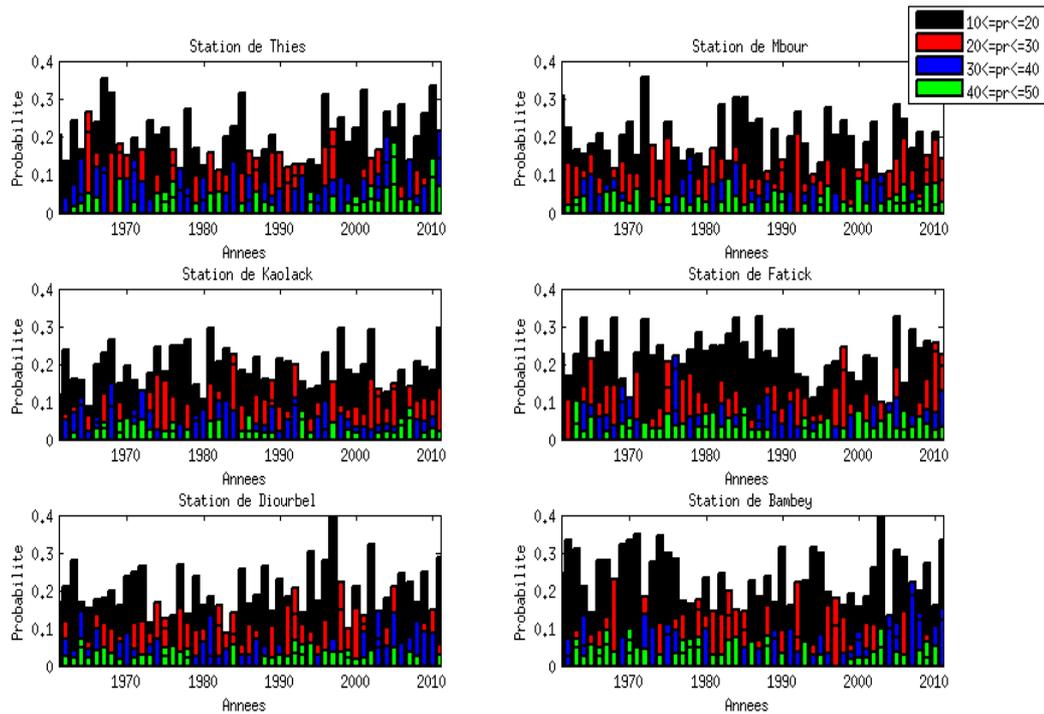


Figure 3.11: *Les types de pluies observées dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011*

3.6 Conclusion

La zone centre du Sénégal est très sensible à la variabilité à toutes les échelles spatio-temporelles des précipitations. L'analyse des tendances de précipitations montre deux épisodes: un épisode d'années humides et un épisode d'année sèches. Les stations plus au Nord et continentales, comme Bambey ont subit la sécheresse de manière plus sévère par rapport à des stations du Sud, telle que Kaolack. L'influence océanique semble être observé à Mbour avec une pluviosité par rapport à certaines stations comme Diourbel et Bambey. La date de début de saison suit un gradient méridien avec la station de Kaolack qui a tendance à observer les dates de démarrage les plus précoces. Les longues pauses sont rares et apparaissent en début et fin de saison. Cependant, la station de Mbour a observé une pause extrême en milieu de saison. Le cumul journalier après ces pauses est plus important si la pause est courte. Enfin, nous avons observé la forte occurrence des séquences humides courtes et la rareté des séquences humides longues.

Chapter 4

Caractéristiques climatiques de l’observatoire population santé de Niakhar

4.1 Introduction

L’observatoire population santé de Niakhar se situe dans la région de Fatick au milieu du bassin arachidier. Elle constitue le domaine d’étude du projet CERAO. Dans cette zone les précipitations constituent un facteur climatique vital pour la population composée majoritairement de ruraux. La variabilité spatiale et temporelle de ces précipitations influence fortement les rendements agricoles dans la zone. Pour des échelles plus petites que celles de la zone centre du Sénégal, nous allons combiner des stations pluviométriques du LPAO-SF proches de l’observatoire avec des stations pluviométriques de l’IRD se trouvant dans la zone de Niakhar. Ainsi, nous allons considérer 4 zones, une zone dense très proche de la zone d’étude et positionnée à l’ouest de la zone de Niakhar, constituée de 6 pluviographes (AMMA4, AMMA8, AMMA12, AMMA16, AMMA19, AMMA20), une zone Nord située au Nord-Ouest de la zone de Niakhar, constituée de 4 pluviographes (AMMA30, AMMA35, AMMA36, AMMA37), une zone Sud située à l’Ouest de la zone dense constituée de 5 pluviographes (AMMA24, AMMA26, AMMA28, AMMA32, AMMA32). Ces pluviographes vont être combinés au réseau de pluviomètres de l’IRD qui se trouve dans la zone de Niakhar, notamment à Niakhar, Ngayokhem, Toucar, Gadiack, Dohine, Kotiokh.

Dans la première section, nous présentons la variabilité interannuelle dans la zone de Niakhar et la zone dense, Sud et Nord du réseau de LPAO-SF. Dans la deuxième section, nous illustrons la variabilité spatiale de la date de début de saison dans la zone d'étude. Ensuite, nous présentons la densité de probabilité de la date de début de saison. La troisième section présente d'abord la fréquence des pauses pluviométriques. Ensuite, la variabilité interannuelle, la densité de probabilité de présence et l'occurrence de ces pauses. La quatrième section présente d'abord, la fréquence des séquences humides. Ensuite, la variabilité interannuelle de ces séquences humides et enfin les types de pluies au cours de la saison dans la zone de Niakhar.

4.2 Variabilité interannuelle des précipitations

La figure 4.1 montre la variabilité interannuelle du cumul annuel dans les 6 stations de la zone de Niakhar. Une cohérence spatiale est observée pendant l'année El Niño de 1998 avec un faible cumul annuel + d'environ 400 *mm*. Cette cohérence spatiale se confirme sur l'année très déficitaire de 2002 pour Niakhar et Ngayokhem environ 350 *mm*. L'année 2008 était particulièrement pluvieuse pour les stations de Niakhar, Ngayokhem et Kotiokh avec un cumul qui avoisine les 800 *mm*. Cependant, depuis l'année 2008 on assiste à un retour des cumuls de 500 *mm* pour Ngayokhem et Niakhar.

La figure 4.2 montre la variabilité interannuelle du cumul pluviométrique annuel moyen dans les trois zones du réseau de pluviographes de LPAO-SF. Nous observons une cohérence spatiale entre la zone dense et la zone de Niakhar, notamment pour les années pluvieuses de 2008 et 2009 avec des cumuls de 700 *mm*. Cette cohérence spatiale peut être expliquée par la proximité entre la zone dense et la zone de Niakhar. La figure 4.2 illustre aussi une variabilité spatiale entre les différentes zones, notamment la zone dense par rapport à la zone Sud et la zone Nord. Le cumul annuel des années 2007, 2008 et 2009 montre une différence de 100 *mm* entre la zone dense et Sud et 150 *mm* entre zone dense et Nord. Le gradient Nord-Sud de la pluviométrie apparaît entre la zone Sud et la zone Nord avec des cumuls plus importants dans la zone Sud. Cependant, une cohérence spatiale est observée durant l'année 2008 entre la zone Nord et la zone Sud, avec un cumul d'environ 480 *mm*, bien que la zone dense a enregistré 200 *mm* de plus. Cette différence semble être due à une erreur technique interne de certains pluviographes du réseau, même si d'autre

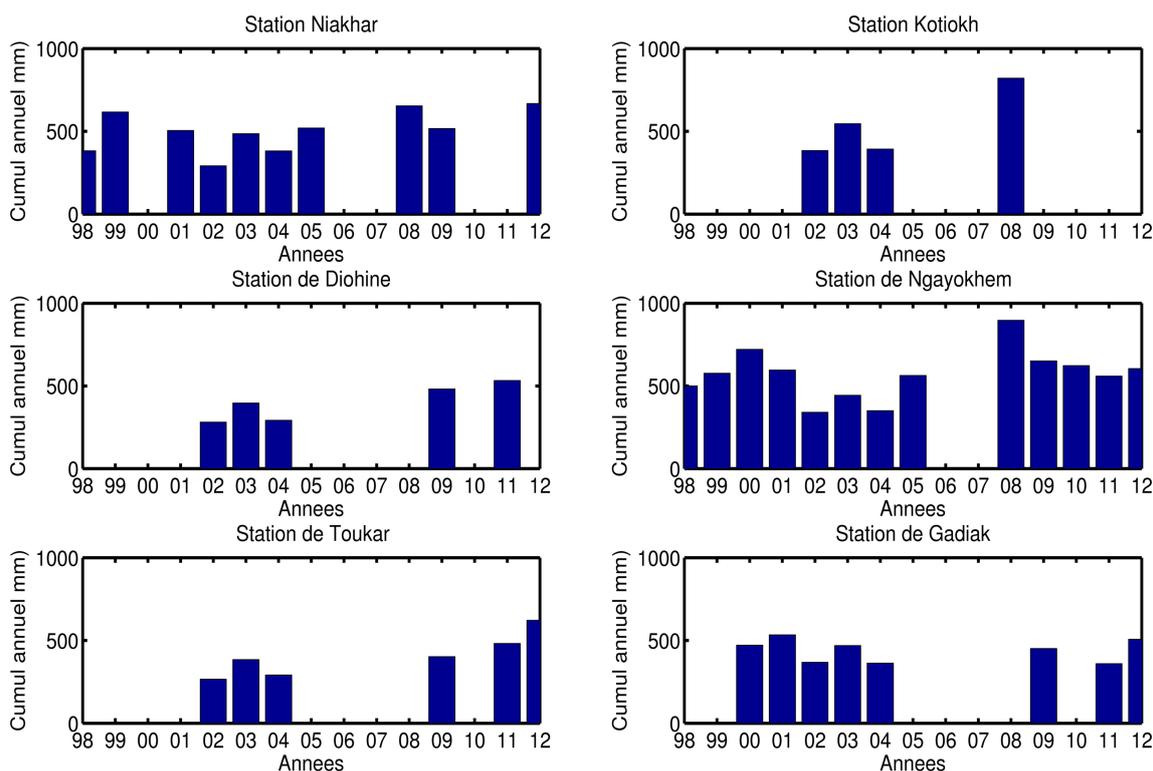


Figure 4.1: *Le cumul pluviométrique annuel de 1998 à 2012 pour les 6 stations de la zone de Niakhar*

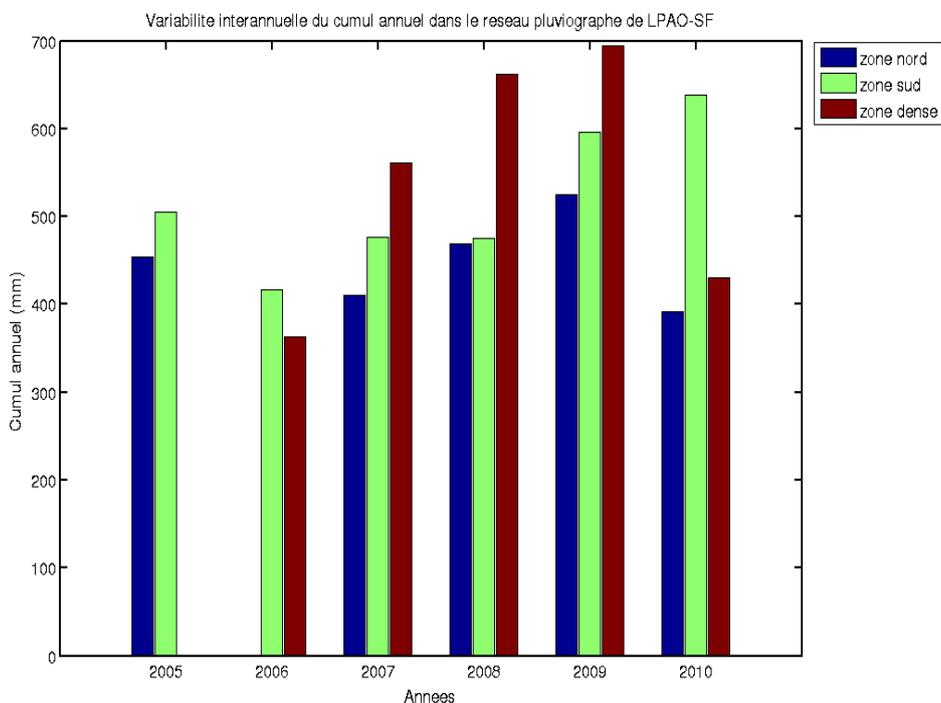


Figure 4.2: *Le cumul pluviométrique annuel dans le réseau de pluviographes de LPAO-SF 2005 à 2012*

part une variabilité spatiale est observée entre les différentes zones. Ces résultats montrent que les précipitations varient fortement d'une année à une autre et des stations proches. Cette variabilité de la pluie peut influencer la répartition des rendements agricoles. Afin de mieux comprendre cette variabilité spatio-temporelle, nous allons faire l'analyse d'un paramètre incontournable en l'occurrence la date de début de saison.

4.3 Variabilité spatio-temporelle de la date de début de saison

La figure 4.3 montre la variabilité spatio-temporelle de la date de début de saison dans notre zone d'étude de Niakhar. Dans cette figure nous avons superposé la date de début de saison moyenne dans la zone avec les dates de début de saison observées dans chaque station de la zone et l'écart type entre les stations pour observer la variabilité spatiale entre les différentes stations. Cette date fluctue d'une année à l'autre et d'une station à une autre entre la fin de la première décade de Juin et la première décade d'Août. La figure 4.3 illustre le démarrage tardif de la saison de l'année 1998 dans la première décade du mois d'Août avec une cohérence spatiale entre Niakhar et Ngayokhem. L'année 2002 a été très déficitaire au Sénégal notamment dans le bassin arachidier et se confirme sur la figure 4.3 avec un démarrage tardif de la saison vers le 10 Août, avec une cohérence spatiale entre les stations. Les résultats observés dans la zone centre du Sénégal qui traduisent une cohérence spatiale observée pendant les années déficitaires dans le centre Ouest du Sénégal semble se confirmer sur la figure 4.3 pour les années 1998 et 2002. De 1999 à 2001, Ngayokhem avait tendance à démarrer la saison avant les autres stations. Un décalage d'environ 20 jours est observé entre les stations de Niakhar et Ngayokhem en 1999 avec un démarrage dans la deuxième décade de Juin pour Ngayokhem et dans la première décade de Juillet pour Niakhar. Alors que Niakhar est plus au Sud que Ngayokhem. L'année 2000 est marquée par un démarrage de la saison dans la première décade de Juillet pour Ngayokhem et dans la troisième décade de Juillet pour Gadiack. Nous observons aussi pour la saison de 2001 un démarrage de la saison au 1^{er} Juillet à Ngayokhem et au 3^{er} Juillet à Niakhar alors que Gadiack a démarré la saison vers le 17 Juillet. Cependant, l'année 2003 est marquée par 3 dates de début de saison pour les 6 stations, avec Kotiokh, Dohine et Ngayokhem qui ont démarré la saison vers le 25 Juin, à Niakhar le début de la

saison est observé vers le 16 Juillet, tandis que Toukar et Gadiack ont démarré la saison vers le 21 Juillet.

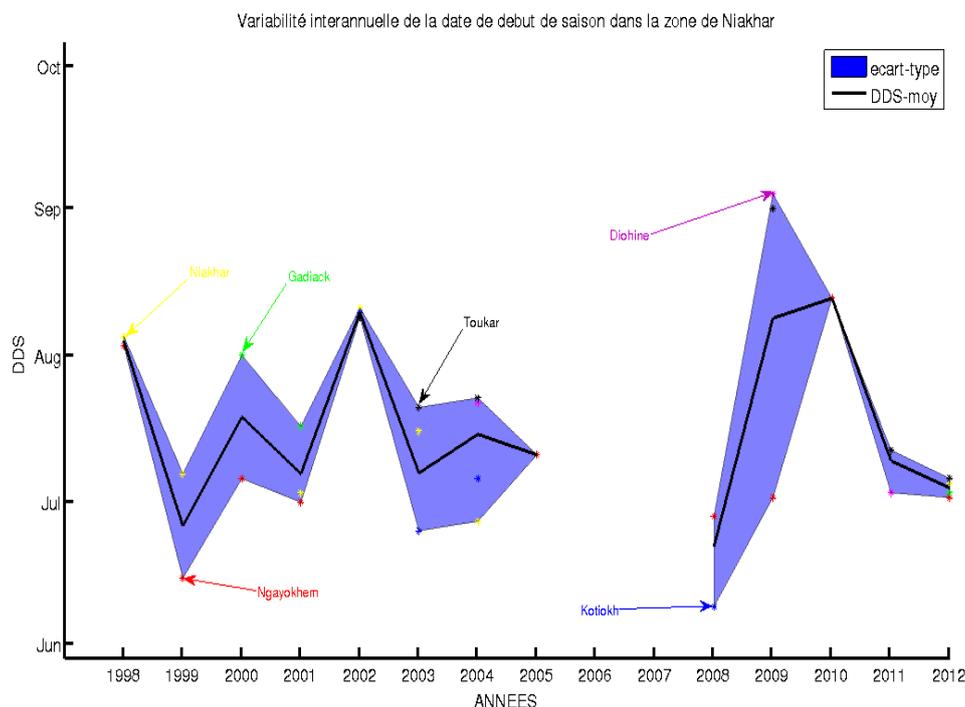


Figure 4.3: Variabilité interannuelle de la Date de début de saison dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012. L'enveloppe montre les dates extrêmes (tardives et précoces), la courbe noire montre la date de début de saison moyenne dans la zone

A l'ouest de la zone de Niakhar, dans la zone dense du réseau de pluviographes de LPAO-SF, nous pouvons observer les dates de début de saison illustrées par la figure 4.4. Cette figure montre l'effet de la proximité entre les pluviographes dans cette zone avec une cohérence spatiale des démarrages de la saison des pluies. L'année El Niño de 2006 a été marquée par un démarrage tardif de la saison observé dans la première décade du mois d'Août pour l'ensemble des stations. Le décalage le plus important est observé en 2007 avec un démarrage d'une part dans la fin de la deuxième décade de Juin vers le 18 Juin. Les années 2008 et 2009 comme dans la zone de Niakhar sont marquées respectivement par des démarrages vers le 11 Juin pour certaines stations et début Juillet pour d'autres stations.

La variabilité interannuelle de la date de début de saison dans la zone Nord est illustrée dans la figure 4.5. Comme dans la zone de Niakhar, nous observons le caractère fluctuant de la date de début de la saison d'une année à une autre. Nous observons aussi une variabilité spatiale de la date de démarrage de la saison dans la zone. Contrairement à la

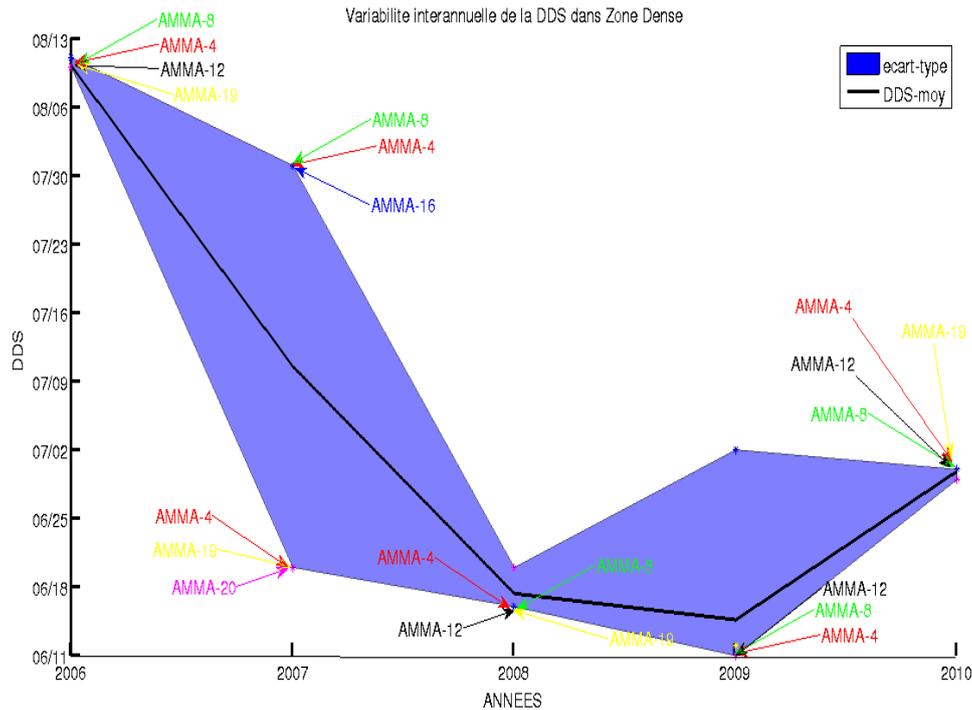


Figure 4.4: Variabilité interannuelle de la Date de début de saison dans la zone dense du réseau de LPAO-SF de 2006 à 2010. L'enveloppe montre les dates extrêmes (tardives et précoces), la courbe noire montre la date de début de saison moyenne dans la zone

zone dense la zone Nord est marquée par une coïncidence moins forte de la date de début de la saison entre les différentes stations. Comme dans la zone dense, le démarrage tardif de la saison pour l'année El Niño de 2006 est mis en exergue avec des débuts de saison dans la première décade d'Août. En 2007, contrairement à la zone dense, on a pas observé un fort décalage de la date de début de saison. Une différence de 15 jours est observée entre d'une part AMMA35, AMMA37 et d'autre part AMMA30, AMMA36. Cependant comme dans la zone dense, l'année 2009 est marquée par un démarrage précoce de la saison au début de la deuxième décade de Juin. Le décalage le plus important dans la zone Nord est observé en 2010 avec un démarrage de la saison entre la troisième décade de Juin et début Août.

La variabilité interannuelle de la date début de saison est aussi observée dans la zone Sud, comme l'illustre la figure 4.6. Contrairement, à la zone Nord où nous avons observé une cohérence spatiale du démarrage de la saison en 2005, la zone Sud a enregistré quatre dates de début de saison pour cinq stations. Seules les stations AMMA24 et AMMA27 ont démarré la saison en même temps vers le 10 Juillet. Alors que AMMA28 a démarré la saison un mois avant, AMMA33 10 jours avant et AMMA32 10 jours après. Comme,

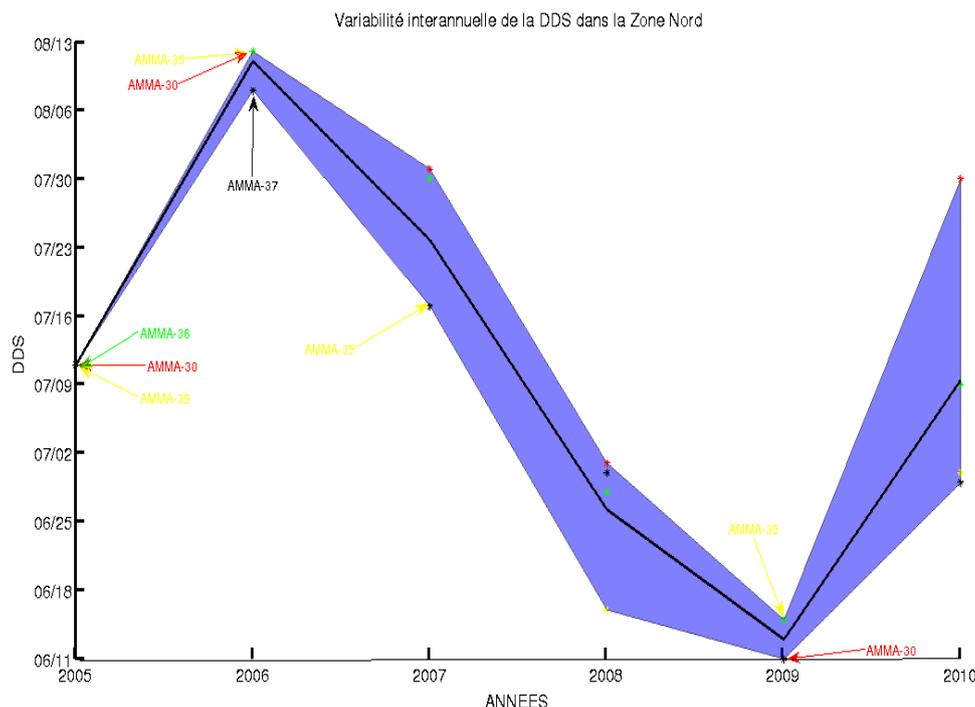


Figure 4.5: Variabilité interannuelle de la Date de début de saison dans la zone Nord du réseau de LPAO-SF de 2006 à 2010. L'enveloppe montre les dates extrêmes (tardives et précoces), la courbe noire montre la date de début de saison moyenne dans la zone

dans les zones dense et Nord, le démarrage tardif dans le premier décade du mois d'Août est observé pendant l'année El Niño de 2006. Le démarrage de la saison dans les stations de la zone Sud confirme le gradient nord-Sud de la date de début de saison.

La figure 4.7 montre l'occurrence de la date de début de la saison. Nous observons la tendance des zones couvertes par le réseau de LPAO-SF a démarré la saison en premier lieu que la zone de Niakhar. Nous avons 50% des démarrages de la saison, en début juillet dans la zone Sud. Cependant, nous avons 17% de démarrage de la saison dans la troisième décade de Juillet et dans la deuxième décade d'Août. La zone dense montre trois modes de démarrage de la saison, une premier mode dans la deuxième décade de Juin à 40%, un deuxième mode dans la première décade de Juillet à 40% et un troisième mode moins fréquent dans le premier décade d'Août à 20%. Alors que, la zone Nord montre des démarrages rares dans la première décade de Juin, dans la troisième décade de Juin et dans la troisième décade de Juillet, avec un mode vers le 10 Juillet à plus de 30%. Ce mode principal coïncide avec celui de la zone de Niakhar mais avec 30% d'occurrence. Un second mode est observé en début Août avec moins de 25% d'occurrence. Des dates rares de démarrage de la saison à moins de 10% d'occurrence sont observées dans la deuxième

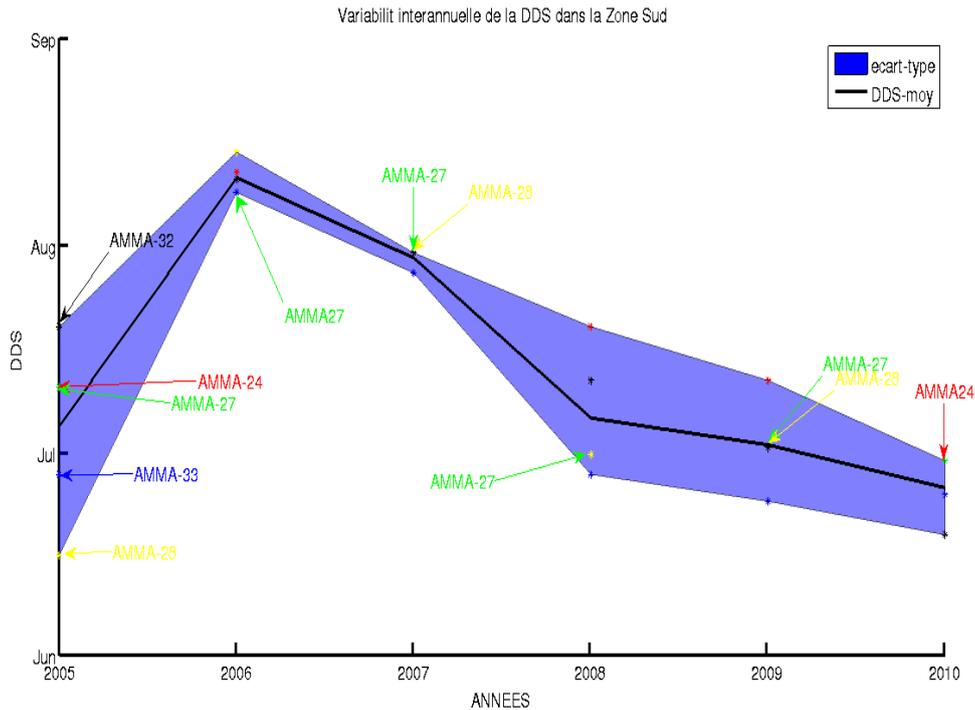


Figure 4.6: Variabilité interannuelle de la Date de début de saison dans la zone Sud du réseau de LPAO-SF de 2006 à 2010. L'enveloppe montre les dates extrêmes (tardives et précoces), la courbe noire montre la date de début de saison moyenne dans la zone

et la troisième décade de Juin.

4.4 Fréquences des pauses pluviométriques

La figure 4.8 illustre la distribution de la fréquence des pauses pluviométriques dans la zone de Niakhar et dans les zones couvertes par les observations du LPAO-SF. Nous observons la forte occurrence des pauses de 1 jour, comme nous l'avons observé dans la zone centre du Sénégal avec la figure 3.5. La zone Sud et la zone de Niakhar montrent une occurrence élevée de ces pauses de 1 jour qui sont des pauses de catégorie *DS1*. La distribution des pauses de 2 et de 3 jours dans la zone de Niakhar est similaire à celle de la zone Sud, la distribution des pauses de 7 jours dans la zone de Niakhar ressemble à celle de la zone nord, tandis que la distribution des pauses de 10 à 11 jours ou *DS3* est identique à celle de la zone dense. Les pauses longues ne sont pas très fréquentes, notamment les pauses extrêmes ou *DS4* dont la longueur est supérieure à 15 jours. Ces pauses extrêmes sont plus fréquentes dans la zone de Niakhar où nous observons des pauses de plus de 20 jours, alors que dans les zones du réseau du LPAO-SF, ces pauses extrêmes sont comprises entre

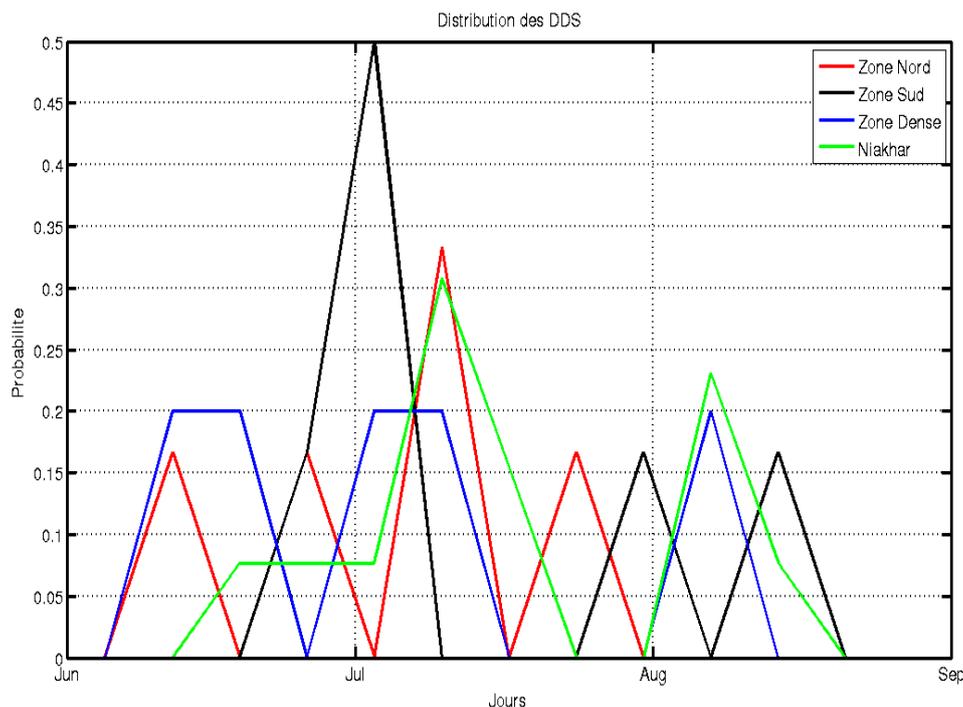


Figure 4.7: *Densité de probabilité de la date de début de saison dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012, la zone dense de 2006 à 2010, la zone Sud de 2005 à 2010 et la zone Nord de 2005 à 2010*

15 et 20 jours.

4.4.1 Variabilité interannuelle des séquences sèches

La figure 4.9 illustre la variabilité spatiale et temporelle des pauses pluviométriques et la rareté des pauses extrêmes de type $DS4$ qui ne sont observées que deux fois durant toute la période d'étude dans la zone de Niakhar. Une pause $DS4$ est observée pendant l'année 1998 où le cumul pluviométrique était faible et deux pauses pluviométriques $DS4$ pendant l'année 2002 qui a enregistré un faible cumul.

La zone dense a enregistré une pause $DS4$ en 2006. Par contre la zone Nord a enregistré une pause $DS4$ pendant l'année 2009, alors que la zone Sud a enregistré deux pauses $DS4$, l'une en 2007 et l'autre en 2009. Une variabilité spatiale est aussi observée pour les pauses $DS3$ avec la zone de Niakhar. En 2005, une cohérence spatiale a été observée entre la zone de Niakhar, la zone Nord et la zone Sud qui ont enregistré chacune 3 pauses $DS3$. En 2008, la zone de Niakhar, la zone Nord et la zone dense ont enregistré chacune une pause $DS3$ alors que la zone Sud n'a pas enregistré de pause $DS3$. Les pauses $DS1$

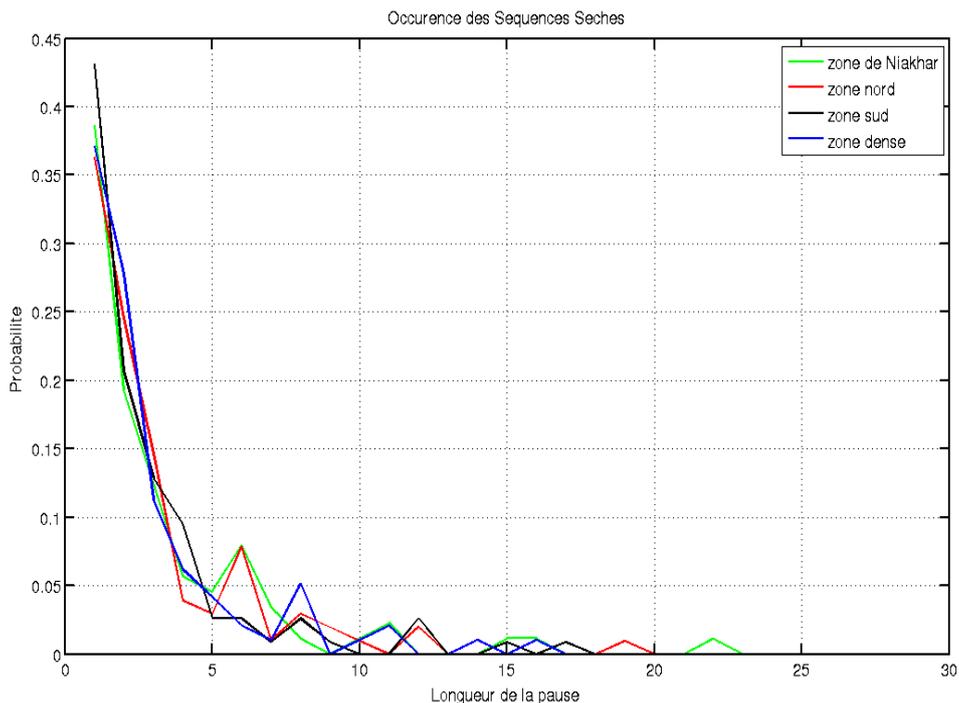


Figure 4.8: Occurrence des séquences sèches dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012, la zone dense de 2006 à 2010, la zone Sud et la zone Nord de 2005 à 2010

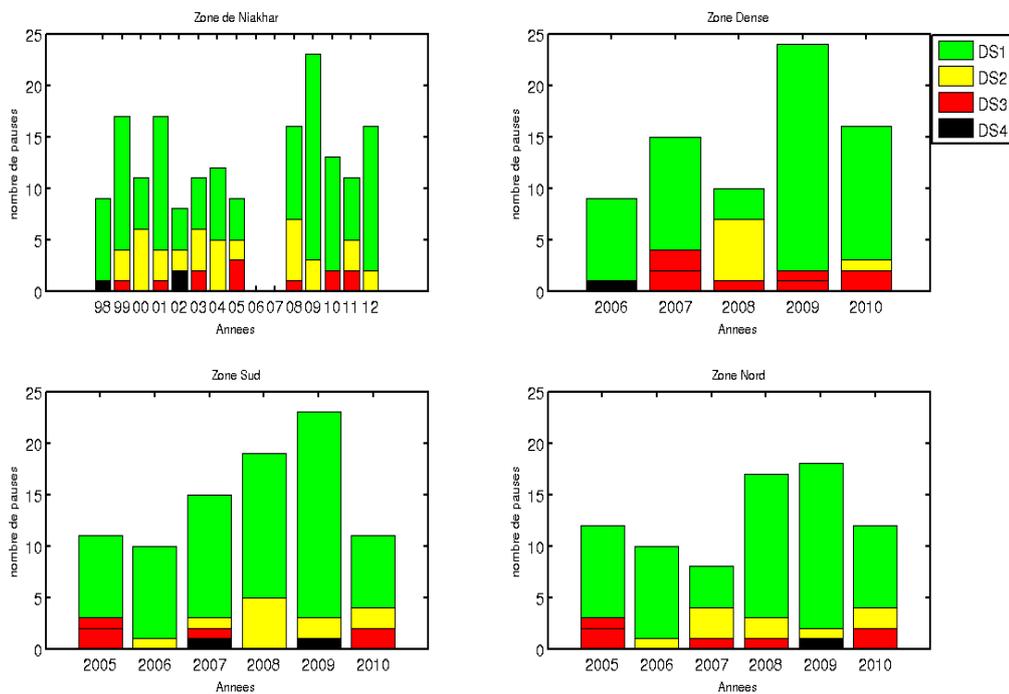


Figure 4.9: Variabilité interannuelle des séquences sèches dans la zone de Niakhar, la zone dense, la zone Sud et la zone Nord

et *DS2* qui sont des événements de hautes fréquences, ont été moins fréquentes pendant les années 1998 et 2002 où des pauses extrêmes ont été observées mais l'année 2009 a enregistré le plus grand nombre de pauses *DS1* dans les quatre zones.

Ces résultats confirment la corrélation qui existe entre l'occurrence des *DS1* et *DS2* et le caractère excédentaire de la pluviométrie. Ainsi, nous allons analyser la densité de probabilité de l'apparition de ces différentes catégories de pauses, pour mieux comprendre à plus petite échelle leur date d'occurrence.

4.4.2 Occurrence des séquences sèches

La figure 4.10 illustre l'occurrence des pauses de type *DS1* et *DS2* au cours de la saison. Nous observons que, les pauses *DS1* apparaissent tout au long de la saison des pluies avec une absence de cohérence spatiale. La zone de Niakhar montre une occurrence faible de ces *DS1* par rapport aux zones dense, Sud et Nord en début de saison. Alors qu'en milieu de saison, c'est la zone de Niakhar qui montre une forte occurrence de ces *DS1*. Cependant, ces pauses *DS1* diminuent avant de disparaître avec le retrait du front intertropical.

Les pauses *DS2* sont observées pendant toute la saison, avec une forte variabilité spatiale. La zone de Niakhar montre 3 modes d'apparition de ces pauses *DS2*, un mode en début de saison, et deux modes en Août. Tandis que, les zones dense et Sud montrent une forte occurrence en début de saison, en milieu de saison et en fin de saison, qui est plus évidente dans la zone dense. Ces résultats confirment le caractère pluvieux de ces pauses *DS1* et *DS2*, dont la forte occurrence durant la saison est souvent associées à un excédent pluviométrique de la saison.

La distribution saisonnière des pauses *DS3* comprises entre 8 et 14 jours et *DS4* supérieures à 15 jours, est représentée sur la figure 4.11. Contrairement aux pauses *DS1* et *DS2*, les pauses *DS3* et *DS4* sont rares et souvent observées en début et fin de saison comme l'illustre la figure 4.11, notamment les *DS3*. Dans la zone de Niakhar, nous observons des événements rares où les *DS3* sont observées au cœur de la saison des pluies, tandis que les zones dense, Sud et nord n'ont pas enregistré de pauses *DS3* entre la deuxième décennie de Juillet et la deuxième décennie d'Août. Tandis que pour les pauses extrêmes *DS4*, la zone de Niakhar a tendance à observer des pauses extrêmes en milieu de saison et en début de saison.

Cette tendance est probablement liée aux années déficitaires de 1998 et 2002, comme

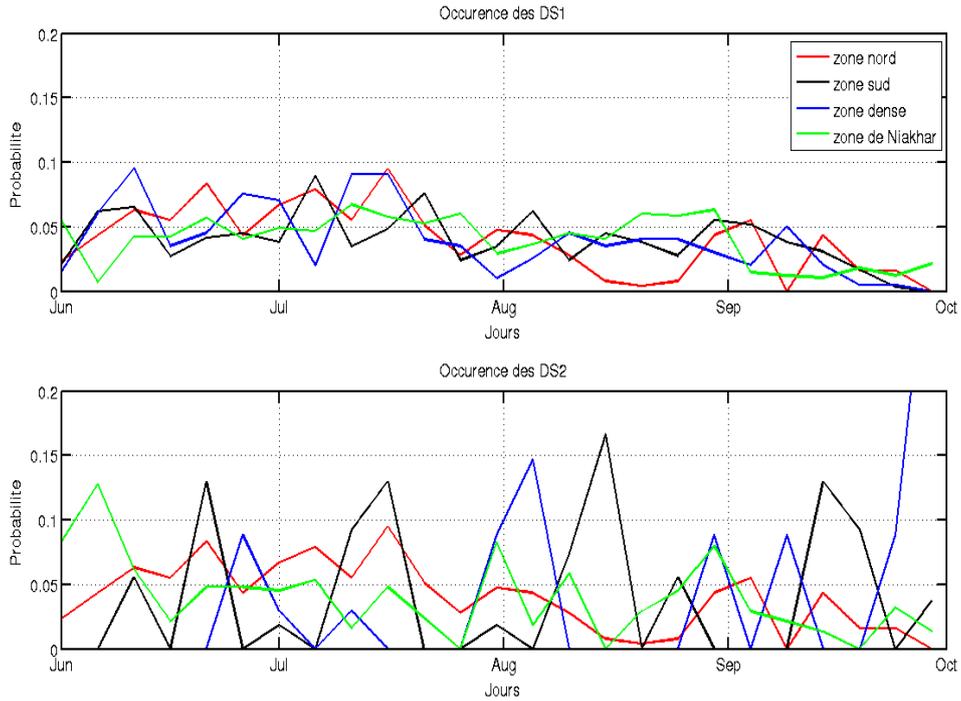


Figure 4.10: *Distribution saisonnière des pauses DS1 et DS2 dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012, la zone dense de 2006 à 2010, la zone Sud et la zone nord de 2005 à 2010*

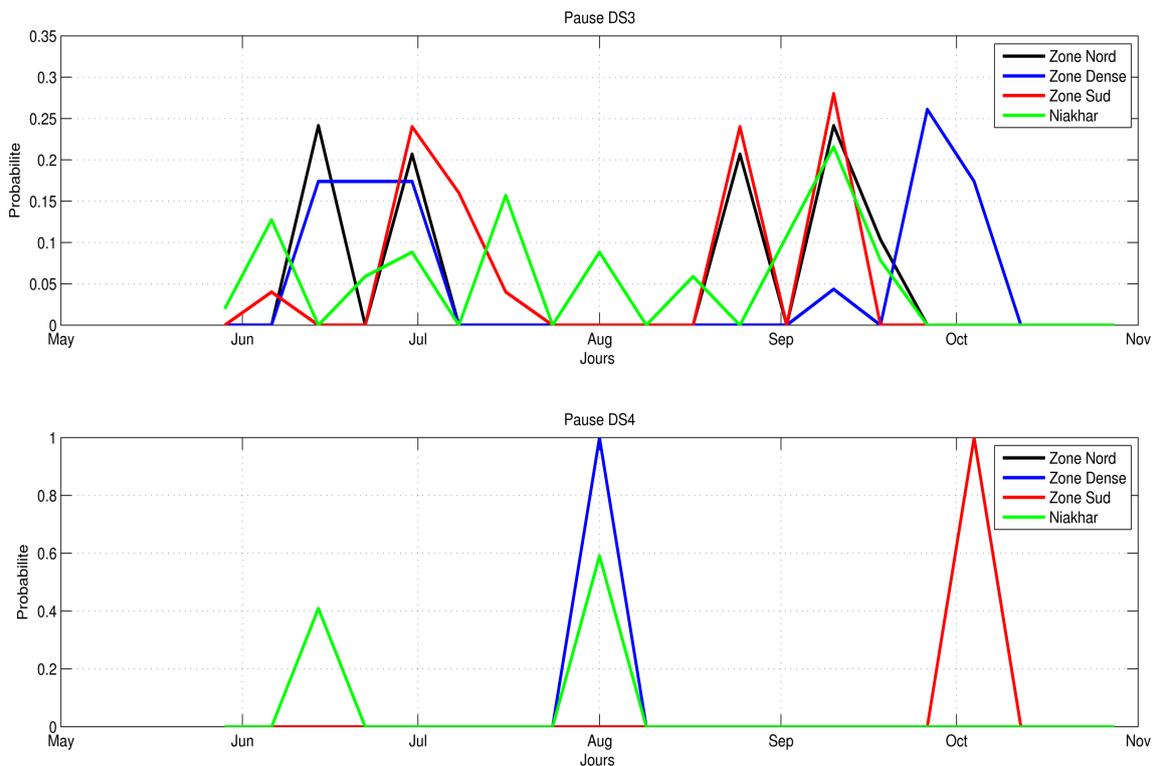


Figure 4.11: *Distribution saisonnière des pauses DS3 et DS4 dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012, la zone dense de 2006 à 2010, la zone Sud et la zone nord de 2005 à 2010*

l'illustre la figure 4.9. La zone dense enregistre ces pauses extrêmes en milieu de saison, alors que la zone Nord et la zone Sud les enregistrent en fin de saison.

4.4.3 Impacts des pauses pluviométriques sur le cumul journalier

Le cumul journalier moyen observé après une pause est représenté dans la figure 4.12. Dans la zone de Niakhar, nous observons un cumul journalier moyen après un $DS1$ à plus de 60% compris entre 8 et 11 mm et à plus de 30% compris entre 15 et 20 mm . Dans la zone dense, la distribution du cumul journalier moyen montre 3 modes. Un mode principal à plus de 30% de 12 mm et un mode secondaire à plus de 20% de 7 mm et un troisième mode à 20% de 14 mm . La zone Sud montre deux modes, un mode principal à 50% de 8 mm et des événements moins fréquents où ce cumul journalier est de 19 mm en moyenne. Alors qu'il pleut moins après une pause $DS1$ en zone nord, avec deux modes: un mode entre 4 et 6 mm et un mode principal entre 8 et 9 mm . Dans la zone de Niakhar, nous observons un cumul journalier moyen après un $DS2$ compris à plus de 80% entre 10 et 18 mm . Dans la zone dense, on a tendance à avoir un cumul plus important après un $DS2$ de 19 mm , alors qu'il pleut moins dans la zone Sud après une pause $DS2$, avec des événements de pluies rares compris entre 5 et 10 mm . Après une pause $DS2$, la zone nord montre un mode à 14 mm . En effet, une forte occurrence de ces pauses rend le sol humide. Ce qui implique une diminution du flux de chaleur sensible au profit du flux latent et donc garantir les conditions propices pour l'alimentation des systèmes convectifs organisés et les systèmes pluvio-orageux locaux.

L'analyse du cumul journalier moyen observé après une pause moyenne et extrême en l'occurrence $DS3$ et $DS4$, nous permet de comprendre l'effet et l'impact des longues pauses sur les conditions de surface du sol. Pour les pauses moyennes $DS3$, nous observons que le mode principal de la zone de Niakhar a subit un glissement vers les faibles cumuls journaliers moyens. Cette tendance est aussi observée dans la zone Sud, la zone dense et la zone Nord. La zone de Niakhar montre un mode principal à 40% de 1 mm , un mode secondaire à plus de 30% de 5 mm et des événements rares de 10 mm . une cohérence spatiale est observée entre les zones dense et Sud pour le mode principal à 90% de 1 mm . Dans la zone dense, on peut observer des événements rares de 8 mm et de 12 mm dans la zone Sud. La zone Nord montre un mode principal vers 40% de 6 mm , son second mode

correspond aux modes principaux de la zone de Niakhar, des zones dense et Sud avec 1 mm . Cependant, la zone Nord enregistre plus de 30% des événements dont le cumul est compris entre 20 et 25 mm .

Après une pause extrême $DS4$, la zone de Niakhar enregistre à 80% un cumul de 9 mm et pour 10% où ce cumul est de 6 mm . La zone dense qui a enregistré une pause $DS4$ pendant la saison 2006 a observé un cumul journalier juste après cette pause de 11 mm . Les zones dense et Sud observe un cumul journalier moyen de 1 mm . Dans la zone Nord, nous remarquons que les événements de 20 à 25 mm observés après une pause $DS3$ disparaissent après une pause extrême $DS4$. Cette observation sur le cumul observé après les pauses $DS3$ et $DS4$, montre que la longue durée de ces pauses participe à assécher le sol. Ainsi les systèmes convectifs organisés ne seront pas alimentés en humidité et vont se dissiper en donnant de petits averses.

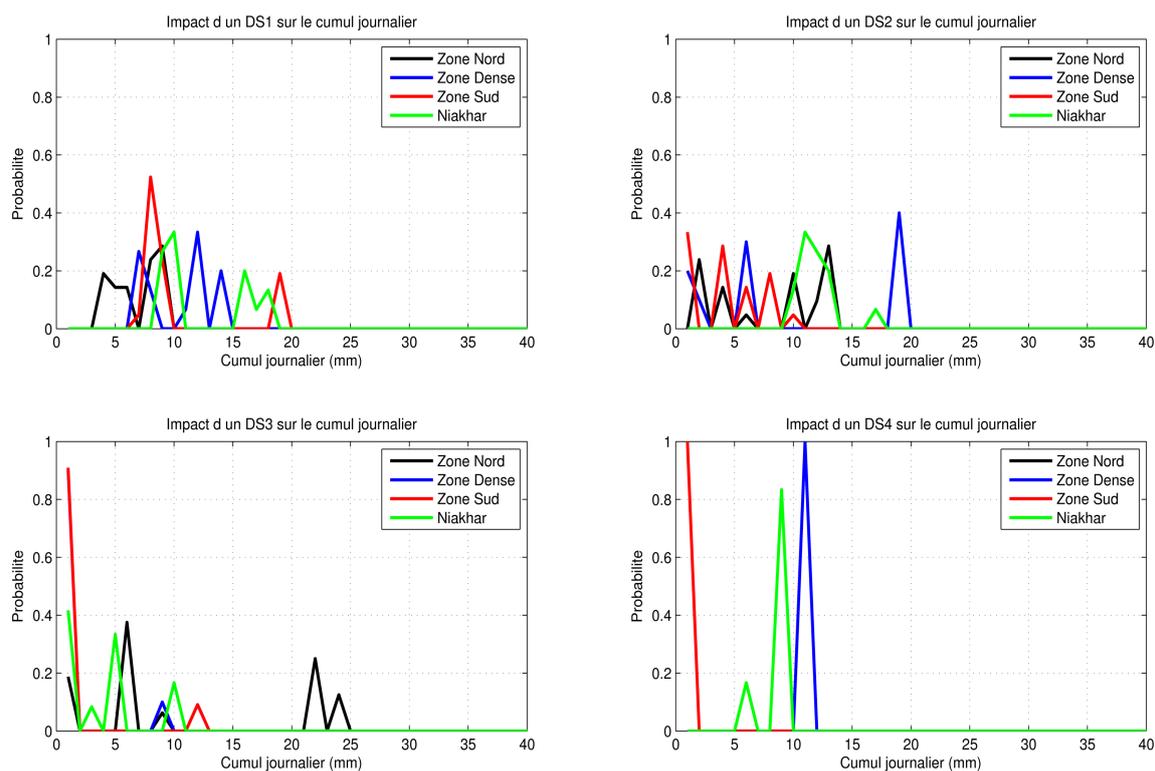


Figure 4.12: *Cumul journalier moyen après les différentes pauses DS1, DS2, DS3 et DS4 dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012, la zone dense de 2006 à 2010, la zone Sud et la zone nord de 2005 à 2010*

4.5 Fréquence des séquences humides

La fréquence des séquences humides est représentée dans la figure 4.13. Nous observons que les séquences de 1 jour sont plus fréquentes dans les différentes zones avec une variabilité spatiale. En effet, ces séquences humides de 1 jour sont plus fréquentes dans la zone Sud et la zone Nord avec plus de 40% d'occurrence. Une cohérence spatiale de la fréquence de ces séquences humides de 1 jour est observée entre la zone de Niakhar et la zone dense avec plus de 35%. Cette cohérence spatiale peut être liée à la proximité entre les deux zones. Les séquences humides de 2 sont plus fréquentes dans la zone de Niakhar par rapport aux autres zones avec 25% d'occurrence. Les séquences de 3 jours sont moins fréquentes dans la zone de Niakhar avec 12%, tandis que les séquences humides de 4 jours sont plus fréquentes dans la zone de Niakhar avec 13%. Les séquences humides supérieures à 4 jours sont très rares dans les différentes zones, notamment à Niakhar. Cependant, nous remarquons que les séquences de 6 jours sont plus fréquentes que les séquences de 5 jours. Ces changements de pente ne sont pas observés dans les zones

dense, Nord et Sud. Dans ces zones plus la séquence est longue moins elle est fréquente. Les séquences comprises entre 4 et 8 jours sont plus fréquentes dans la zone dense, alors que les séquences comprises entre 3 et 5 jours sont moins fréquentes dans la zone nord. Cette figure 4.13 un caractéristique d'une zone semi-aride, s'il pleut aujourd'hui il est fort probable qu'il ne pleut pas demain. Cette situation peut être reliée à la durée de vie des systèmes organisés qui contribuent de manière significative à la pluviométrie au Sahel notamment au Sénégal.

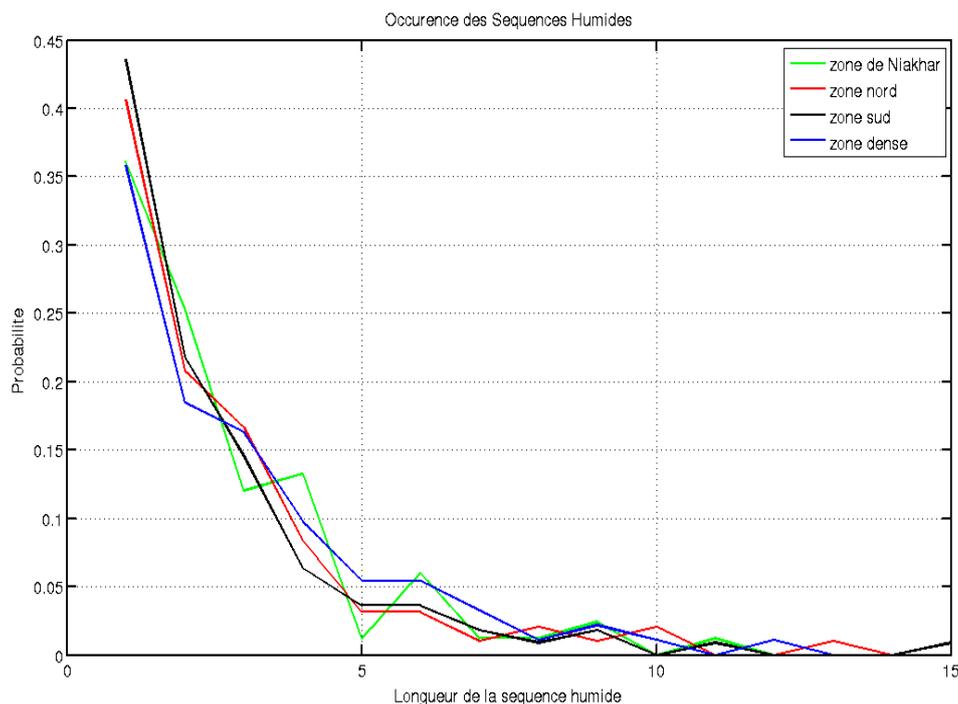


Figure 4.13: Fréquence des séquences humides dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012, la zone dense de 2006 à 2010, la zone Sud et la zone nord de 2005 à 2010

4.5.1 Variabilité interannuelle des séquences humides

Pour étudier la variabilité interannuelle nous allons considérer une classification de ces séquences humides en fonction de leur durée, nous allons classer les séquences humides en 4 catégories: séquences humides de 1 jour ($WS1$), de 2 jours ($WS2$), comprises entre 3 et 4 jours ($WS3$) et celles supérieures ou égales à 5 jours ($WS4$). La figure 4.14 représente la variabilité spatio-temporelle de ces séquences humides. Elle illustre la forte occurrence des séquences de 1 jour et la rareté des séquences supérieures à 5 jours dans les différentes zones. Dans la zone de Niakhar, le nombre de séquences de 1 jour est minimum pendant

l'année 1998 qui a enregistré un faible cumul pluviométrique dans plusieurs stations de la zone. Néanmoins, nous avons observé des *WS3* et des *WS4* pendant cette année. Dans la zone de l'observatoire de Niakhar, il est rare d'observer plus de 5 séquences humides *WS4*. Les séquences humides *WS3* dépassent rarement 7 fois au cours de la saison. On observe pas plus de 10 séquences de *WS2* dans la saison. Cependant les séquences humides *WS1* peuvent être observées plus de 10 fois. Les années 2005 et 2008 sont marquées par une forte occurrence des séquences humides *WS1*, avec 13 séquences humides de type *WS1* or ces deux années n'avaient pas enregistré les plus forts cumuls de la période d'étude. Nous observons que les années qui ont enregistré un fort cumul annuel, montrent un nombre élevé de séquences humides. Les zones couvertes par le réseau d'observations du réseau du LPAO-SF montrent la même distribution de ces séquences pendant la période d'étude. L'année 2006 qui a été déficitaire dans les différentes zones du réseau, n'a pas enregistré plus de 4 séquences humides *WS1* à l'exception de la zone nord mais des séquences *WS3* et *WS4* sont enregistrées. Les séquences humides longues dépassent rarement 5 fois. avec une basse fréquence dans la zone nord. Pour les séquences *WS3*, comme dans la zone de Niakhar, elle ne sont pas observées plus de 8 fois durant la saison et les séquences *WS1* sont de forte occurrence et peuvent être observées plus de 10 fois. C'est résultats montrent que l'occurrence de ces séquences humides peut notamment impacter sur la pluviométrie dans la zone mais il va falloir regarder l'intensité de la pluie pendant ces séquences.

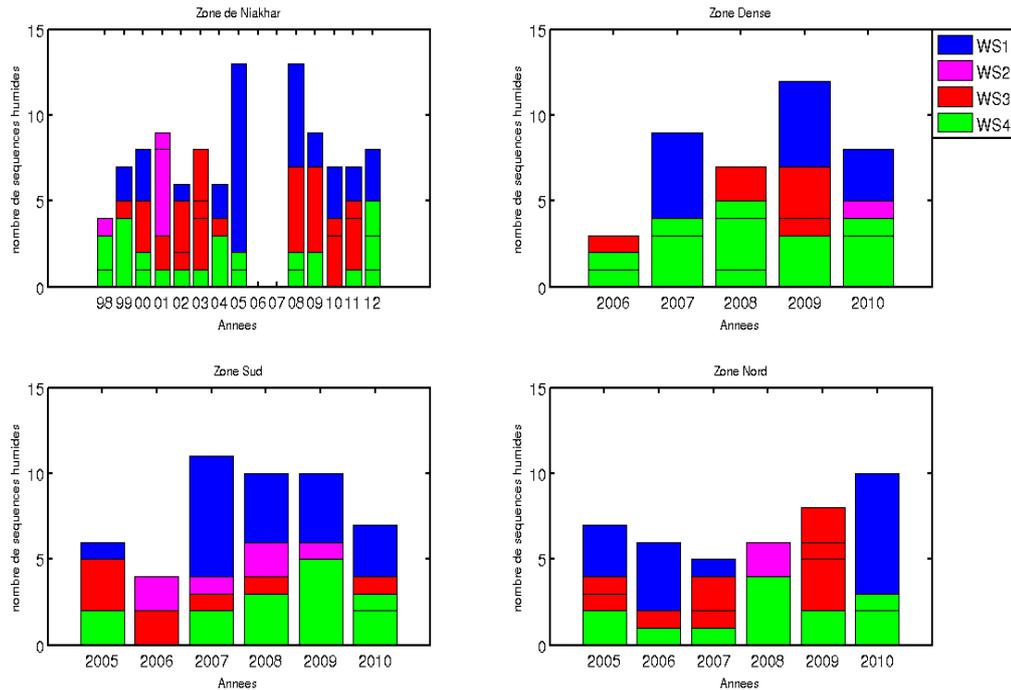


Figure 4.14: *La variabilité interannuelle des séquences humides dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012, la zone dense de 2006 à 2010, la zone Sud et la zone nord de 2005 à 2010*

4.5.2 Les types de pluies

La figure 4.15 illustre les types de pluies observés dans les zones de Niakhar, dense, Sud et Nord. Une cohérence spatiale est observée sur le caractère haute fréquence des événements pluvieux inférieures à 10 mm . Dans la zone de Niakhar, plus de 40% des événements pluvieux de la saison sont inférieurs à 10 mm , durant la période d'étude. Ces événements inférieurs à 10 mm de pluie peuvent être observés jusqu'à environ 70% pour certaines années. Cependant, les années 2000 et 2004, montrent une faible fréquence de 10% de ces événements compris entre 10 mm et 20 mm . Les années 2009 et 2011 ont été marquées par une faible occurrence de ces événements pluvieux inférieurs à 10 mm , avec environ 35%, alors que le plus grand nombre d'événements pluvieux compris entre 10 mm et 20 mm a été observé, avec 30%. L'année 2009 qui a enregistré 65% d'événements pluvieux inférieurs à 10 mm , a été marquée par 20% d'événements pluvieux compris entre 10 mm et 20 mm . Les précipitations comprises entre 20 mm et 30 mm dépassent rarement 20%, les rares années où moins de 10% de ces événements ont été observés, sont les années qui ont enregistré la plus forte occurrence d'événements inférieurs à 10 mm . Cependant, les événements

pluvieux compris entre 30 mm et 40 mm ne dépassent pas 5% dans la saison. L'année 2010 a été marquée par une occurrence de 10% de ces événements pluvieux. Dans la zone de Niakhar, nous observons aussi des événements pluvieux rares compris entre 40 mm et 50 mm mais dont la contribution sur le cumul saisonnier est significative. Des événements pluvieux compris entre 50 mm et 80 mm sont aussi observés à moins de 5% dans la zone à l'exception de 2002 et 2011. La même tendance est aussi observée dans les zones couvertes

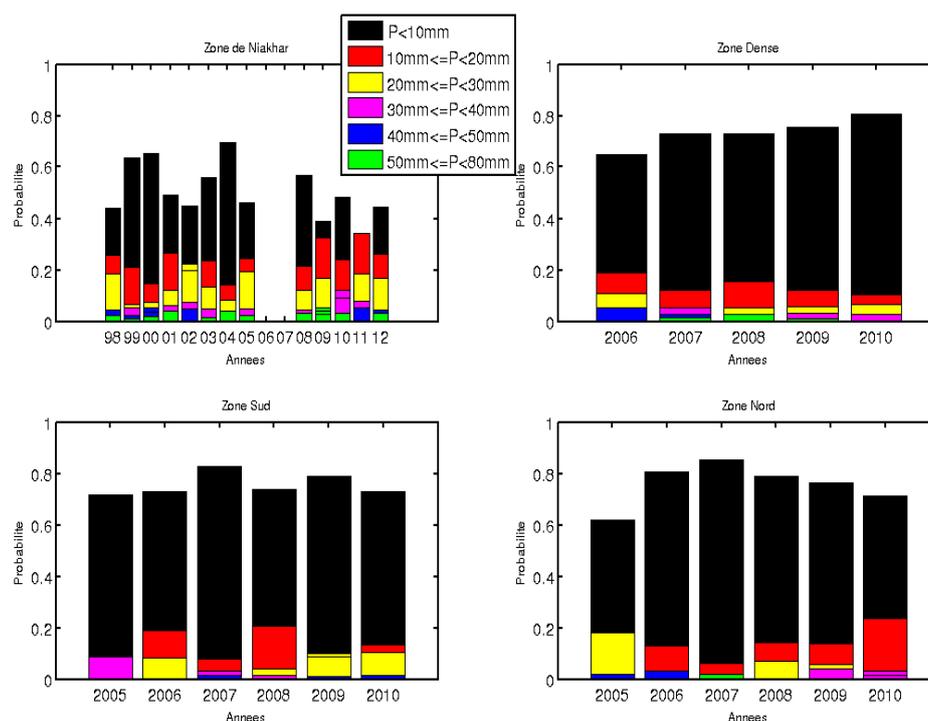


Figure 4.15: La variabilité interannuelle des types de pluie observés dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012, la zone dense de 2006 à 2010, la zone Sud et la zone nord de 2005 à 2010

par le réseau du LPAO-SF avec une occurrence plus élevée des pluies inférieures à 10 mm, par rapport à la zone de Niakhar, qui représentent environ 70% des événements pluvieux observés dans la saison. Dans la zone dense, l'année 2006 a enregistré le plus faible nombre d'événements inférieurs à 10 mm avec un pourcentage d'environ 65%. Dans la zone Nord et Sud, l'année 2005 a enregistré le plus faible nombre de ces types d'événements pluvieux avec 70%. Cependant une grande différence subsiste entre la zone de Niakhar et les zones dense, Nord et Sud. Avec une occurrence plus faible des événements pluvieux compris entre 10 mm et 20 mm qui dépassent rarement 20% comparée à la zone de Niakhar. Ces événements pluvieux n'ont pas été observés en 2005, dans la zone Sud et la zone Nord. Les événements pluvieux compris entre 20 mm et 30 mm, malgré leur faible occurrence de

moins de 10%, ils sont observés dans les différentes zones, à l'exception de l'année 2005 et 2007 dans la zone Sud, l'année 2007 dans la zone dense et 2006, 2007 pour la zone nord. Les événements pluvieux compris entre 30 *mm* et 40 *mm* n'ont pas été observés pendant l'année 2006 dans les différentes zones. Alors que les événements rares de pluies compris entre 40 *mm* et 50 *mm* montre une variabilité spatiale pendant cette année. Pendant l'année 2006, La zone dense en a enregistré environ 5%, la zone nord environ 2% et la zone Sud n'a pas enregistré. Les événements pluvieux les plus rares, dans la zone de Niakhar, correspondent aux précipitations comprises entre 50 *mm* et 80 *mm*. Cependant, dans la zone nord, ces types d'événements rares ne sont observés que pendant l'année 2007. Alors qu'en zone dense, elles ne sont observées pendant les années 2007, 2008 et 2009. Il est aussi important de noter que ces fortes averses ne sont pas observées dans la zone sud.

4.6 Conclusion

Une approche probabiliste de ces différents paramètres, nous a permis de caractériser la saison des pluies dans le domaine d'étude du projet CERAO. En effet, malgré les nombreuses discontinuités des données utilisées, nous pouvons observer des tendances sur la date de début de la saison. Le décalage entre les modes principaux de démarrage de la saison qui illustre la variabilité spatiale de ce paramètre déterminant de la saison des pluies. La distribution des pauses pluviométriques montre une variabilité spatiale. Bien qu'une cohérence spatiale est notée sur le caractère haute fréquence des pauses courtes et basse fréquence des pauses longues. Les résultats montrent que le cumul journalier après une pause diminue avec la longueur de cette pause. L'étude de la fréquence des séquences humides a montré que les séquences courtes sont très fréquentes, contrairement aux séquences longues qui sont très rares.

Conclusion Générale

Cette étude se focalisant sur la zone centre ouest du Sénégal montre des résultats intéressants sur la variabilité spatio-temporelle des précipitations à plus petite échelle. Ainsi à partir des données des stations climatologiques du réseau de l'ANACIM combinées avec le réseaux de pluviographes du LPAOSF et les pluviomètres de l'IRD installés dans la zone de Niakhar nous avons bien documenté le déroulement de la saison des pluies dans cette zone.

En effet, les résultats de cette étude montre une forte variabilité interannuelle de la pluie depuis la fin de la sécheresse, qui se superpose à une forte variabilité spatiale illustré dans la zone centre par des années déficitaires pour certaines stations et excédentaires pour d'autres. Comme le cas de l'année 2010 où la station de Thiés était déficitaire alors que la station de Mbour montre un fort excédent. Pour cette même année 2010 Diourbel a enregistré un fort excédent, alors que Bambey a connu un fort déficit pluviométrique. Dans la zone centre du Sénégal, la date de début de saison suit un gradient méridien avec la station de Kaolack qui montre un mode principal de démarrage de la saison dans la deuxième décennie de Juin. La fin de la première décennie de Juillet constituent une échelle de cohérence spatiale pour les différentes stations. Cependant dans la zone de l'observatoire population santé de Niakhar, ce gradient Sud-nord n'est pas vérifié, la date de démarrage de la saison est très variable d'une station à une autre mais pour une année particulière déficitaire, une cohérence spatiale semble être observée. Dans la zone, nous observons en moyenne deux modes de démarrage de la saison, un mode principal à la fin de la première décennie de juillet et un mode moins fréquent dans la première décennie d'août.

Dans la zone d'étude, les résultats montrent le caractère haute fréquence des pauses courtes $DS1$ et $DS2$. Alors que, les pauses $DS3$ et $DS4$ sont très rares. Elles sont plus observées en début et fin de saison, bien qu'elles peuvent apparaître en milieu de saison,

tandis que les pauses extrêmes $DS4$ peuvent être observées en milieu de saison dans la zone de Niakhar. Nous avons montré aussi que le cumul pluviométrique journalier après les pauses $DS1$ est plus important que celui après les pauses $DS2$. Cependant, ce cumul tend à devenir de plus en plus faible après les pauses $DS3$ et $DS4$. La forte occurrence des séquences humides de 1 jours $WS1$ est aussi montrée. La rareté des séquences humides longues $WS4$. Il est rare d'observer plus de 5 séquences humides $WS4$. Les séquences humides $WS3$ dépassent rarement 7 fois au cours de la saison. Les pluies inférieures à 10 mm constituent des événements de haute fréquence dans le domaine d'étude. Les événements pluvieux compris entre 50 mm et 80 mm sont aussi observé à moins de 5% dans la zone de Niakhar.

Cette caractérisation du climat de la zone d'étude par une analyse probabiliste des différentes paramètres de la saison des pluies, notamment la date de début de saison qui peut aider à un choix optimum de la date de semi dans la zone, ces résultats peuvent servir d'information aux assureurs agricoles et permettre d'élaborer des plans visant à augmenter les rendements agricoles. Ce travail montre à l'instar de ces résultats des problèmes liés à un réseau de pluviomètre pas assez dense dans la zone. Un contrôle de qualité défaillant, un manque de fiabilité des données et de plusieurs discontinuités observées dans la série de données. La modélisation pourrait aider à mieux prévoir le climat dans le domaine d'étude et de pouvoir expliquer la forte variabilité spatiale des précipitation dans la zone.

Bibliography

- Alhassane A., Salack S., Ly M., Lona I., Traore S. B. et Sarr B., 2013, "**Évolution des risques agroclimatiques associées aux tendances récentes du régime pluviométriques en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne**". *Sécheresse*, vol.24, n° 21, pp 283-293.
- Ali A. and Lebel T., 2009, "**The Sahelian standardized rainfall index revisited**". *International Journal Of Climatology*, vol.29, DOI: 10.1002/joc.1832, pp 1705-1714.
- Balme M., Galle S., Lebel T., 2005, "**Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger**". *Sécheresse* , vol.16, n° 1, pp 15-22.
- Bodian A., 2014, "**Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest)**". *Geographie Physique et Environnement*, vol.15, n° 4, pp 321-330.
- Camberlin P. and Diop M., 2003, "**Application of daily rainfall principal component analysis to the assessment of the rainy season characteristics in senegal**". *Climate Research*, vol.23, pp 159-169.
- Chippaux J. P., 2005, "**Recherche intégrée sur la santé des populations à Niakhar (Sahel sénégalais)**". Paris, IRD Éditions, ISBN: 2-7099-1585-5, pp 1-33.
- Dacosta A., Kandia K. Y., 2002, "**La variabilité spatio-temporelle des précipitations au Sénégal depuis un siècle**". *Friend*, vol.274, pp 499-506.
- Delaunay V., Marra A., Levi P. and Etard J-F, 2003, "**NIAKHAR DSS, Sénégal, IRD**". *INDEPTH Monograph*, Vol 1, Part C, pp 55-63.
- Dieng O., Pascal R., Samuel L., 2008, "**Variabilité intra-saisonnière des précipitations au Sénégal (1951-1996)**". *Centre de Recherche de Climatologie* .

- Dione C., 2013, "**Étude des facteurs et mécanismes d'initiation de la convection profonde locale au sahel pendant la période de la transition de la mousson**". These, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, ESP, LPAO 2013 , pp.124-144.
- Dione C., Lothon M., Badiane D., Campistron B., Couvreur F., Guichard F. et Sall S. M. 2013, "**Phenomenology of Sahelian convection observed in Niamey during the early monsoon**". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* , Soc.DOI:10.1002/qj.2149 , pp 1-17.
- Diop M., 1996, "**A Propos de la Durée de la Saison au Sénégal**". *Sécheresse*, vol.7 pp 7-15.
- Diop M., Houndenou C., Richard Y., 1996, "**Variabilité de la Date de Début et de Fin de l'Hivernage au Sénégal**". *Association Internationale de Climatologie* , vol.9, pp.430-436.
- Dorize L., 1989, "**La position du front intertropical en Afrique occidentale sahélienne et les causes probables de sa mobilité**". <http://books.openedition.org/iheal/1221>, pp. 53-61. [consulté le 15 janvier 2015](#).
- d'Orgeval T., 2004, "**Impact du changement climatique sur la saison des pluies en Afrique de l'Ouest: que nous disent les modèles de climat actuels ?**". *Sécheresse*, vol.19, n° 2, pp.79-85.
- Fabre C., 2008, "**L'adaptation des agriculteurs vivriers du Sénégal au changement climatique : cas de la communauté rurale de Sessène, région de Thiès**", Memoire, Université de Montréal, pp.16-22.
- Fontaine B., Roucou P., Camara M., Vigaud N., Konaré A., Sanda S. I., Diedhiou A., Janicot S., 2011, "**Variabilité Pluviométrique, Changement Climatique et Regionalisation en Region de Mousson Africaine**". *La Météorologie* , pp 41-48.
- Gaye A. T., Viltard A. et de Félice P., 2003, "**Lignes de grains et pluies en Afrique de l'Ouest : part des lignes de grains à la pluie totale des étés 1986 et 1987**". *Sécheresse*, 2003, vol.16, n° 4, pp 269-73.
- Gaye A. T., 2002, "**Caractéristiques dynamiques et pluviosité des lignes de grains en Afrique de l'ouest**". Thèse, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Senegal, pp 1-125.
- Gaye A. T., "**Changements Climatiques et Projections Futures**". *Science Policy Dialogue*, Dakar, 12-14 Avril 2010

"Scénarios climatiques pour le rapport du GIEC 2014"

- Guichard F., Kergoat L., Taylor C. M., Cappelaere B., Chong M., Cohard J-M., Couvreur F., Dione C., Gounou A., Lohou F., et Lothon M. 2012, **"Interaction entre Surface et Convection au Sahel"**. *La Météorologie* , pp 25-32.
- Janicot S., Redelsperger J-L., Lebel T., 2012, **"La Mousson Ouest-Africaine: Introduction à quelques Contributions du programme d'étude multidisciplinaire AMMA "**, *La Météorologie*, pp 2-7.
- Kucera P. A., Taffe M., Newman A. J., Foltz C., and Theisen A., 2006, **"NAMMA Rain Gauge Network Senegal, West Africa"**. *University of North Dakota*, pp 1-36.
- Lafore J. F., Ascencio N., Bouniol D., Couvreur F., Flamant C., Guichard F., Hall N., Janicot S., Kocha C., Lavaysse C., Leroux S., Poan E., Peyrillé P., Roca R., Roehrig R., Roux F., et Said F., 2011, **"Évolution De Notre Compréhension Du Système De Mousson Ouest-Africaine "**. *La Météorologie*, pp 11-16.
- J.B. Ndong, 2003, **"Caracterisation de la Saison des Pluies dans Le Centre-Ouest du Sénégal"**. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, Vol. 15, 2003, pp 326-332.
- Nicholson S.E. and Grist J.P., 2001, **"A Conceptual Model For Understanding Rainfall Variability In The West African Sahel On Interannual And Interdecadal Timescales"**. *International Journal Of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.648 n° 21, pp 1733-1757.
- Panthou G., Vischel T., Lebel T., Quantin G., Pugin A. F., Blanchet J., and Ali A., 2013, **"From pointwise testing to a regional vision: An integrated statistical approach to detect nonstationarity in extreme daily rainfall. Application to the Sahelian region"**. *Journal of Geophysical Research*, vol.118, pp 8222-8237.
- Peleg N., Ben-Asher M., and Morin E., 2013, **"Radar subpixel-scale rainfall variability and uncertainty: lessons learned from observation of a dense rain-gauge network"**. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol.17, pp 2195-2208.
- Pélissier P., 2008, **" Les paysans du Sénégal. Les civilisations agraires du Cayor à la Casamance**. Version électronique de l'ouvrage paru sous le même titre [Saint-Yrieix, Fabrique : 939 p.], 537 p., 74 figures et 64 planches. Dakar, UCAD - Département d'Histoire,

- juin http://www.histoireucad.org/archives/index.php?option=com_remository&Itemid=60&func=select&id=22
- Peugeot C., Bock O., Boone A., Cappelaere B., Gosset M., Meynadier R., Séguis L., Lebel T., Redelsperger J-L, 2011, "**Le cycle de l'eau dans le système de mousson d'Afrique de l'Ouest**". *La Météorologie* , pp 55-63.
- Redelsperger J-L., Diedhiou A., Flamant C., Janicot S., Lafore J.-P., Lebel T., Polcher J., Bourles B., Caniaux G., De Rosnay P., Desbois M., Eymard L., Fontaine B., Geneau I., Ginoux K., Hoepffner M., Kane C., Law K., Mari C., Marticorena B., Mougin E., Pelon J., Peugeot C., Protat A., Roux F., Sultan B. et Van Den Akker E., 2012, "**Amma, une étude multidisciplinaire de la mousson ouest-africaine**". *Meteorologie*, n° 54, pp 22-32.
- Salack S., Muller B., Gaye A. T., Hourdin F. et Cisse N., 2011, "**Analyses multi-échelles des pauses pluviométriques au Niger et au Sénégal**". *Sécheresse*, vol.23, n° 21, pp 3-13.
- Salack S., 2012, "**Analyse des pauses pluviométriques et évaluation des incertitudes de la pluie des modèles régionaux de climat à l'aide d'un modèle de culture**". These, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, ESP, LPAO, pp.30-40.
- Salack S., Sultan B., Oettli P., Muller B., Gaye A. T. et Hourdin F. 2011, "**Représentation de la pluie dans les modèles régionaux de climat et application a l'estimation des rendements du mil au Sénégal**". *Sécheresse*, vol.23, n° 1, pp 14-23.
- Sambou E., 2012, "**International Workshop on Data Rescue and Digitization of climate records for West Africa**". Accra, pp 19-23.
- Stocker T.F., 2013, "**Changements climatiques 2013; les éléments scientifiques**". *GIEC*, pp 3-34.
- Sultan B. et Janicot S., 2004, "**La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles saisonnière et intra-saisonnière I: mise en place de la mousson et variabilité intra-saisonnière de la convection**". *Sécheresse*, vol.8, pp. 297-312
- Sultan B., Roudier P., Quirion P., Alhassane A., Muller B., Dingkuhn M., Ciais P., Guimberteau M., Traore S. and Baron C., 2013, "**Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the anian and Sahelian savannas of West Africa**". *Environmental Research Letters*, online at stacks.iop.org/ERL/8/014040 9pp.

Taylor C. M., Parker D. J., Kalthoff N., Gaertner M. A., Philippon N., Bastin S., Harris P. P., Boone A., Guichard F., Agusti-Panareda A., Baldi M., Cerlini P., Descroix L., Douville H., Flamant C., Grandpeix J-Y., and Polcher J., 2011, "**New perspectives on land–atmosphere feedbacks from the African Monsoon Multidisciplinary Analysis**". *Atmospheric Science Letters*, vol.12, pp 38-44 ,DOI: 10.1002/asl.336 , pp 1-17.

www.ird.sn/activites/niakhar/indicateurs/index.htm, consulté le 30 Dec 2014

<http://web.fi.ibimet.cnr.it/papnia-sen/>

List of Figures

1.1	<i>les différentes régions climatiques du Sénégal [Coline 2010]</i>	5
1.2	<i>a : valeurs moyennes calculées par krigeage à partir de l'ensemble des stations. b : valeurs moyennes calculées par krigeage à partir des stations de la zone Sud-sahélienne. c : valeurs moyennes calculées par krigeage à partir des stations de la zone nord-soudanienne. d : valeurs moyennes calculées par krigeage à partir des stations de la zone Sud-soudanienne[Bodian 2014]</i>	6
1.3	<i>Transition de la position des isohyètes entre 1931 et 1990 [Coline 2010]</i> . .	7
1.4	<i>Position de la ZCIT en janvier (en bleu) et en juillet (en rouge) source: http://www.lethist.lautre.net/zcit.htm</i>	9
1.5	<i>Coupe schématique de la troposphère ouest-africaine au mois d'Août le long du méridien [Diop 1996]</i>	10
1.6	<i>Pauses et phases actives de la mousson durant la période pluvieuse (51-70) et la période sèche (71-90) au Sénégal. En bleu, l'indice Sud et en vert l'indice Nord. (*) indiquent les dates moyennes de pauses. Idem pour la figure 3, le libellé de la figure 5 commence aussi à partir du 15 avril afin d'éviter les pluies hors saison, et faire débuter notre étude uniquement sur la période de la saison à partir de laquelle la mousson commence à faire son entrée sur le territoire sénégalais notamment dans le Sud (mi-avril). Ainsi à part le mois d'avril, tous les autres mois utilisés ont un libellé qui comprend toute la durée du mois c'est-à-dire du 1er au 31 pour les mois de mai, juillet, août, octobre, décembre, et du 1^{er} au 30 pour les mois de juin, septembre, novembre. [Dieng et al 2008]</i>	13
1.7	<i>Répartition spatiale du coefficient de Variation de la longueur de la saison des pluies au Sénégal [Diop 1996]</i>	15

2.1	<i>Réseau d'observation météorologique de l'ANACIM [www.ird.sn]</i>	17
2.2	<i>Image d'un pluviographe de LPAO-SF</i>	18
2.3	<i>Réseau de pluviographes de LPAO-SF [Kucera et al 2006]</i>	19
2.4	<i>Réseau de pluviomètre de l'IRD à Niakhar [www.ird.sn]</i>	20
2.5	<i>La densité de la population dans la zone de Niakhar [www.ird.sn]</i>	22
3.1	<i>Indice d'anomalie standardisée des précipitations de 1961 à 2011, la courbe noire représente la moyenne glissante sur 5 ans</i>	25
3.2	<i>Variabilité interannuelle de la date de début de saison dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011</i>	27
3.3	<i>Densité de probabilité de la date de début de saison dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011</i>	28
3.4	<i>Variabilité interannuelle de la longueur de la saison (jours) dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011</i>	30
3.5	<i>Occurrence des pauses pluviométriques dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011</i>	31
3.6	<i>Variabilité interannuelle des pauses pluviométriques dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011</i>	32
3.7	<i>Occurrence des pauses extrêmes DS3 et DS4 dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011</i>	33
3.8	<i>Cumul journalier moyen observé après une pause DS1, DS2, DS3 et DS4 dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011</i>	34
3.9	<i>Distribution des séquences humides dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011</i>	35
3.10	<i>Variation interannuelle des séquences humides dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011</i>	37
3.11	<i>Les types de pluies observées dans la zone centre du Sénégal de 1961 à 2011</i>	38
4.1	<i>Le cumul pluviométrique annuel de 1998 à 2012 pour les 6 stations de la zone de Niakhar</i>	41
4.2	<i>Le cumul pluviométrique annuel dans le réseau de pluviographes de LPAO-SF 2005 à 2012</i>	41

4.3	<i>Variabilité interannuelle de la Date de début de saison dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012. L'enveloppe montre les dates extrêmes (tardives et précoces), la courbe noire montre la date de début de saison moyenne dans la zone</i>	43
4.4	<i>Variabilité interannuelle de la Date de début de saison dans la zone dense du réseau de LPAO-SF de 2006 à 2010. L'enveloppe montre les dates extrêmes (tardives et précoces), la courbe noire montre la date de début de saison moyenne dans la zone</i>	44
4.5	<i>Variabilité interannuelle de la Date de début de saison dans la zone Nord du réseau de LPAO-SF de 2006 à 2010. L'enveloppe montre les dates extrêmes (tardives et précoces), la courbe noire montre la date de début de saison moyenne dans la zone</i>	45
4.6	<i>Variabilité interannuelle de la Date de début de saison dans la zone Sud du réseau de LPAO-SF de 2006 à 2010. L'enveloppe montre les dates extrêmes (tardives et précoces), la courbe noire montre la date de début de saison moyenne dans la zone</i>	46
4.7	<i>Densité de probabilité de la date de début de saison dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012, la zone dense de 2006 à 2010, la zone Sud de 2005 à 2010 et la zone Nord de 2005 à 2010</i>	47
4.8	<i>Occurrence des séquences sèches dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012, la zone dense de 2006 à 2010, la zone Sud et la zone Nord de 2005 à 2010 .</i>	48
4.9	<i>Variabilité interannuelle des séquences sèches dans la zone de Niakhar, la zone dense, la zone Sud et la zone Nord</i>	48
4.10	<i>Distribution saisonnière des pauses DS1 et DS2 dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012, la zone dense de 2006 à 2010, la zone Sud et la zone nord de 2005 à 2010</i>	50
4.11	<i>Distribution saisonnière des pauses DS3 et DS4 dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012, la zone dense de 2006 à 2010, la zone Sud et la zone nord de 2005 à 2010</i>	50
4.12	<i>Cumul journalier moyen après les différentes pauses DS1, DS2, DS3 et DS4 dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012, la zone dense de 2006 à 2010, la zone Sud et la zone nord de 2005 à 2010</i>	53

4.13	<i>Fréquence des séquences humides dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012, la zone dense de 2006 à 2010, la zone Sud et la zone nord de 2005 à 2010</i>	54
4.14	<i>La variabilité interannuelle des séquences humides dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012, la zone dense de 2006 à 2010, la zone Sud et la zone nord de 2005 à 2010</i>	56
4.15	<i>La variabilité interannuelle des types de pluie observés dans la zone de Niakhar de 1998 à 2012, la zone dense de 2006 à 2010, la zone Sud et la zone nord de 2005 à 2010</i>	57

List of Tables

1.1	Précédentes études d'impact du changement climatique sur la pluviométrie en Afrique de l'Ouest [d'Orgeval 2008].	8
3.1	Années déficitaires où une <i>WS4</i> est enregistrée pour les différentes stations	36