

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

IMPACT DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE RÉCENTE SUR LES
ÉCOSYSTÈMES DES NIAYES DU SÉNÉGAL ENTRE 1950 ET 2004

THÈSE
PRÉSENTÉE
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

LAZAR AUGUSTIN A. AGUIAR

SEPTEMBRE 2008

In memoriam

*À ma mère **Odile Ndione**,*

*À mon père **Gabriel Odulamy Aguiar**,*

Que le tout puissant les accueille dans sa demeure éternelle.

***À ma famille**, je souhaite qu'elle comprenne pourquoi tout oiseau peut bien
avoir besoin un jour ou l'autre, de voler plus loin...d'un horizon à l'autre...*

REMERCIEMENTS

Il y a quatre ans, quand je quittais ma famille et mes amis au Sénégal pour venir au Canada, j'avais un seul rêve, présenter une thèse de doctorat. L'expérience, si intéressante qu'elle soit, ne fut pas des plus faciles en raison des chocs culturels, climatiques et même académiques. Cependant, elle a pu être facilitée grâce au soutien et à l'appui de nombreuses personnes que je tiens à remercier ici.

Je remercie tout d'abord mes deux directrices de thèse, Madame Michelle Garneau et Madame Anne-Marie Lézine, d'avoir accepté la lourde charge de diriger ce travail. Par leur exigence, leur rigueur scientifique, elles m'ont toujours guidé à l'essentiel des problèmes dans un souci marqué sans cesse par la clarté et la simplicité. Ce travail n'aurait jamais été mené à terme sans elles. J'adresse également ma reconnaissance aux membres de mon comité de thèse, le Dr. Philippe Gachon et le Professeur Benoît St-Onge qui ont accepté de suivre de près l'évolution de mon travail. Leurs conseils et leurs orientations ont été très précieux.

J'adresse une mention spéciale au Professeur Claude Hilaire-Marcel (Chaire en environnement à l'échelle du globe) qui a parrainé mon admission à l'UQAM. Les immenses qualités humaines que j'ai trouvées en lui, ni son temps, ni ses compétences et ses conseils dans les moments difficiles, ne m'ont jamais été ménagés.

Par ailleurs, tout travail de thèse ne peut s'accomplir sans le support d'un laboratoire d'accueil. A ce titre, je remercie le consortium Ouranos pour m'avoir accepté dans ses locaux et pour le support logistique dont j'ai bénéficié tout au long des ces trois dernières années. Au laboratoire GEOTOP de l'UQAM, au LSCE (Laboratoire de Science du Climat et de l'Environnement) à Gif-sur-Yvette (France), à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, au Service de la Gestion et de la Planification de Ressources en Eau du Sénégal, j'adresse mes sincères remerciements pour leur soutien technique et matériel.

De plus, je remercie ceux qui m'ont aidé de façon ponctuelle en n'hésitant pas à prendre sur leur propre temps de travail, en particulier les personnes suivantes : Dr. Mme Isabelle Niang et Dr. Sérigne Faye (Université Cheikh Anta Diop de Dakar) pour leur collaboration scientifique, Dr. Dominique Tapsoba pour ses conseils précieux et les données climatologiques, M. Dimitri Parishkura pour les codes Matlab, M. Pascal Maugis du CEA/LSCE (France) qui a suivi la partie hydrologique de ce travail, Dr. Jean Luc Saos (IRD, Montpellier) pour avoir partagé avec moi ses connaissances sur l'hydrologie des Niayes et M. Jean Jacques Chateaneuf et M. Henri Moussu du BRGM qui ont mis à ma disposition des données de couvertures aériennes et des rapports d'études sur les Niayes.

Ma gratitude va également aux personnes que j'ai contactées pour des questions spécifiques concernant la thèse; je pense au Dr. Jean Louis Blouin du Groupe Dryade, à M. André Parent du département de géographie de l'UQAM, au Professeure Marie Laroque du département des Sciences de la Terre et de l'Atmosphère de l'UQAM.

Merci également au Dr. Isabelle Niang et au Dr. Dominique Tapsoba pour avoir accepté de faire partie du jury d'évaluation de cette thèse.

Je ne saurais terminer sans manifester ma reconnaissance à l'endroit de tous mes amis de Montréal qui ont partagé avec moi des moments de peine et de joie. Ce travail est le vôtre, car c'est grâce à votre soutien moral qu'il a pu être ainsi.

Je tiens également à témoigner toute ma reconnaissance au programme de bourse de la **Fondation Ford** (International Fellowship Program), à la Chaire en environnement à l'échelle du Globe de l'UQAM (Professeur Claude Hilaire-Marcel), au CRSNG (Professeure Michelle Garneau) et au projet SahelP en France (coordonné par Dr. Anne-Marie Lézine) pour leur soutien financier.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES ILLUSTRATIONS	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS.....	xiii
AVANT-PROPOS	xv
RÉSUMÉ	xvii
SUMMARY	xix
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 Présentation de la zone d'étude et définition des Niayes.....	4
1.2 Problématique générale.....	10
1.3 Présentation des dossiers analytiques.....	12
1.3.1 Données climatologiques.....	12
1.3.2 Données piézométriques	15
1.3.2.1 Des mesures irrégulières et des pas de temps variés.....	15
1.3.2.2 Un réseau de stations de mesure de plus en plus réduit.....	16
1.3.3 Données cartographiques.....	19
CHAPITRE I: LA CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET LE CLIMAT MOYEN DE LA RÉGION DES NIAYES	21
1.1 Circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest	22
1.1.1 La Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT).....	22
1.1.2 Les masses d'air.....	23
1.2 Climat moyen de la région des Niayes.....	26
1.2.1 Les précipitations.....	26
1.2.2 Les autres paramètres climatiques	28
1.3 Les facteurs de la variabilité climatique.....	29
1.3.1 Les facteurs océaniques	30
1.3.1.1 Téléconnections: El Niño Southern Oscillation et précipitations.....	30

1.3.1.2 <i>Température de Surface Océanique et précipitations</i>	30
1.3.2 Les principaux facteurs continentaux	31
1.3.2.1 <i>Variation de la couverture du sol: l'albédo</i>	31
1.3.2.2 <i>Effets des poussières atmosphériques</i>	32
1.3.2.3 <i>L'orographie</i>	33
1.3.3 Conclusion partielle	33
CHAPITRE II: VARIABILITÉ DES PRÉCIPITATIONS ENTRE 1950 et 2004	35
Variabilités inter-annuelles et intra-saisonnières des précipitations le long du littoral nord du Sénégal entre 1950 et 2004.....	36
1.1 Résumé.....	37
1.2 Summary	38
1.3 Introduction	39
1.4 Région d'étude et données utilisées	40
1.5 Méthodologie	42
1.5.1 Indices de précipitations	42
1.5.2 Calcul des tendances et des anomalies inter-annuelles.....	43
1.6 Résultats	44
1.6.1 Tendances des indices de précipitations.....	44
1.6.2 Anomalies inter-annuelles normalisées des indices de précipitations	47
1.6.3 Année «humide» (1950) vs «sèche» (2004)	53
1.6.4 Contribution mensuelle à la précipitation annuelle	57
1.7 Conclusion	60
1.8 Références	63
CHAPITRE III: VARIABILITÉ HYDROGÉOLOGIQUE	67
Évolution de la Nappe des Sables Quaternaires dans la région des Niayes du Sénégal (1958 -1994): relation avec le climat et les impacts anthropiques.....	68
1.1 Résumé.....	69
1.2 Summary	70
1.3 Introduction	71

1.4	Région d'étude et données utilisées	72
1.5	Méthodologie	75
1.6	Résultats	76
1.6.1	Variabilité inter-annuelle des précipitations	76
1.6.2	Tendance inter-annuelle du niveau de la nappe	77
1.6.3	Dynamique morphologique de la NSQ	79
1.6.3.1	<i>Variations inter-annuelles</i>	80
1.6.3.2	<i>Variations saisonnières</i>	81
1.6.4	Contribution des activités anthropiques à l'évolution du niveau de la nappe	85
1.6.4.1	<i>Bilan hydrologique de l'année 1974</i>	85
1.6.4.2	<i>Influence possible du barrage de Diama</i>	88
1.7	Conclusion	89
1.8	Références	91
	Impacts de la variabilité des précipitations sur le niveau de la nappe phréatique de la région des Niayes du Sénégal en années de pluviométrie excédentaire et déficitaire: 1958 et 1974	95
1.9	Résumé	96
1.10	Summary	97
1.11	Introduction	98
1.12	Région d'étude	99
1.13	Données utilisées	100
1.14	Méthodologie	101
1.15	Résultats	103
1.15.1	Variabilité inter-annuelle des précipitations : 1950-2004	103
1.15.2	Variabilité saisonnière des précipitations : 1958 vs 1974	104
1.15.3	Année hydrologique et forme cyclique du niveau piézométrique en 1958 vs 1974	107
1.15.4	Taux d'infiltration	110
1.16	Conclusion	113
1.17	Références	115

CHAPITRE IV: CHANGEMENT D'OCCUPATION DU SOL :	
Évolution des zones humides	119
Analyse diachronique de l'évolution des zones humides dans la région des Niayes du Sénégal en relation avec la variabilité climatique récente entre 1950 et 2004	120
1.1 Résumé.....	121
1.2 Summary	122
1.3 Introduction	123
1.4 Région d'étude	124
1.5 Données utilisées.....	126
1.6 Méthodologie	127
1.6.1 Définition de la clé d'interprétation :.....	128
1.6.2 Géoréférencement :.....	130
1.6.3 Mosaïquage d'images :.....	131
1.6.4 Interprétation visuelle :.....	131
1.6.5 Digitalisation ou vectorisation :.....	131
1.7 Résultats	132
1.7.1 Contexte hydro-climatique	132
1.7.2 Évolution spatiale des zones inondées dans la région des Niayes	135
1.7.3 Le cas de la Niaye de Mboro (15°9 N - 16°54 W)	138
1.8 Conclusion	145
1.9 Références	147
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	150
RÉFÉRENCES.....	157
ANNEXE	164

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1.	Localisation de la région du Niayes, le long du littoral nord du Sénégal.	6
Figure 2.	Représentation schématique de la végétation d'une Niaye.....	7
Figure 3.	Coupe structurale de la région des Niayes	7
Figure 4.	Vue d'une Niaye.....	9
Figure 5.	Vue d'un puits traditionnel ou « Céane»..	9
Figure 6.	Localisation des stations météorologiques (principales et secondaires) et piézométriques utilisées avec la topographie.....	18

CHAPITRE I

Figure 1.	Fluctuations latitudinales de la ZCIT.....	23
Figure 2.	La circulation des vents sur le Sénégal.....	24
Figure 3.	Évolution des cumuls pluviométriques annuels de 1950 à 2004 à Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis.....	28

CHAPITRE II

Figure 1.	Localisation de la zone d'étude et des stations météorologiques.	41
Figure 2.	Anomalies normalisées de la moyenne saisonnière des précipitations d'avril à octobre (en mm/jr) par rapport à la période de référence 1961-1990.....	50
Figure 3.	Anomalies normalisées du nombre de jours avec précipitations (≥ 1 mm) (même légende que figure 2).	51
Figure 4.	Anomalies normalisées de l'Intensité moyenne par jour de pluie (≥ 1 mm) (même légende que figure 2).	51
Figure 5.	Anomalies normalisées du nombre maximum de jours secs (< 1 mm) consécutifs d'avril à octobre (même légende que figure 2).	52
Figure 6.	Anomalies normalisées du nombre d'événements avec précipitations $> 90^{\circ}$ centile d'avril à octobre (même légende que figure 2).	52
Figure 7.	Anomalies normalisées de la quantité de précipitations maximales sur 3 jours consécutifs (même légende que figure 2).	53

Figure 8.	Évolution intra-annuelle des indices de variabilité des précipitations en année de précipitations excédentaires 1950 (a) et en année de pluviométrie déficitaire 2004 (b), par rapport à la période de référence 1961-1990.	56
Figure 9.	Contribution moyenne mensuelle à la précipitation annuelle entre 1950 et 2004.....	57
Figure 10.	Variation inter-annuelle de la contribution mensuelle à la précipitation annuelle (%) entre 1950 et 2004.	59
Figure 11.	Corrélation entre les précipitations mensuelles du mois d'août vs les précipitations annuelles entre 1950 et 2004.....	60

CHAPITRE III

Figure 1.	Localisation de la zone d'étude et des stations météorologiques (principales et secondaires) et piézométriques.....	73
Figure 2.	Anomalies normalisées des cumuls pluviométriques entre 1950 et 2004.....	77
Figure 3.	Tendances de l'évolution annuelle du niveau moyen de la nappe entre 1958 et 2002	78
Figure 4.	Évolution morphodynamique de la NSQ entre 1958 et 1994 pour le début (mai-juin) et la fin (sept-oct) de la saison des pluies	84

CHAPITRE III (suite)

Figure 1.	Localisation de la zone d'étude, des stations météorologiques (principales et secondaires) et des piézomètres de référence.....	99
Figure 2.	Anomalies normalisées des cumuls pluviométriques entre 1950 et 2000.....	104
Figure 3.	Évolution intra-annuelle des indices de variabilité des précipitations pour les années 1958 et 1974.....	106
Figure 4.	Variation intra-annuelle du niveau piézométrique de la NSQ.....	109

CHAPITRE IV

Figure 1.	Localisation de la région des Niayes et du secteur de Mboro	125
Figure 2.	Étapes méthodologiques pour la cartographie des zones humides à partir	

du SIG (Arc GIS)	128
Figure 3. Anomalies normalisées des cumuls pluviométriques annuels entre 1950 et 2004.....	133
Figure 4. Évolution des cumuls pluviométriques annuels à Mboro (15°9 N - 16°54 W) et du niveau de la nappe au piézomètre de Ndeune (15°07 N - 16°53 W)	134
Figure 5. Corrélation entre la pluviométrie annuelle à Mboro et l'amplitude saisonnière du piézomètre de Ndeune entre 1958 et 2002.....	134
Figure 6. Dynamique spatiale des mares dans la région des Niayes pour les années 1954, 1974, 1982 (BRGM, 1984) et 2000.....	137
Figure 7. Superficies des mares dans la région des Niayes en 1954, 1974, 1982 et 2000.....	138
Figure 8. Cartographie de l'évolution des zones humides de la Niaye de Mboro (1954, 1974 et 2000)	139
Figure 9. Superficie des zones humides dans le secteur de Mboro en 1954, 1974 et 2000.....	140

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Description des séries et des stations pluviométriques.....	14
Tableau 2. Données hydrogéologiques utilisées.....	17
Tableau 3. Données cartographiques.....	19

CHAPITRE I

Tableau 1. Évolution des précipitations : 1950-1969 vs 1970-1989.....	27
Tableau 2. Paramètres climatiques à la station de Louga (1972-2001).....	29

CHAPITRE II

Tableau 1. Indices de variabilité de précipitations définis à partir des données quotidiennes.....	43
Tableau 2. Moyenne sur 30 ans et tendances décennales des indices de précipitations, établies sur la période de 1950 à 2004.....	45

CHAPITRE III

Tableau 1. Données hydrogéologiques utilisées.....	75
Tableau 2. Tendances et écarts décennaux du niveau de la nappe entre 1958 et 1994.....	79
Tableau 3. Amplitude (Δh en m) des variations du niveau de la nappe entre 1958 et 1994.....	79
Tableau 4. Bilan hydrologique moyen la NSQ de l'année 1974.....	85

CHAPITRE III (suite)

Tableau 1. Indices de précipitation définis à partir des données quotidiennes.....	102
Tableau 2. Calcul du taux d'infiltration.....	111

CHAPITRE IV

Tableau 1. Documents cartographiques et photographies aériennes.....	126
Tableau 2. Clé d'interprétation des photographies aériennes.....	130
Tableau 3. Pourcentage de couverture spatiale des zones humides.....	140

LISTE DES ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

ACDI:	Agence Canadienne pour le Développement International
AEP :	Alimentation en Eau Potable
BRGM:	Bureau de Recherche Géologique et Minière
CDD:	Nombre maximum de jours secs consécutifs (précipitation<1mm)
CEA :	Commissariat à l'Énergie Atomique
CNRS :	Centre National de Recherche Scientifique
CRSNG :	Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada
CSE :	Centre de Suivi Écologique
DGTC :	Direction des Travaux Géographiques et Cartographiques
DPS :	Division de la Prévision Statistique
ETCCDMI:	Expert Team on Climate Change Detection and Monitoring Indices
ETP:	Évapotranspiration
FAO:	Food Agriculture Organization
ICS :	Industries Chimiques du Sénégal
IGN :	Institut de Géographie Nationale (France)
IRD:	Institut de Recherche pour le Développement
LSCE:	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
NSQ :	Nappe des Sables Quaternaires
OMM:	Organisation Météorologique Mondiale
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
ORSTOM:	Office de Recherches Scientifiques et Techniques d'Outre-mer
OURANOS:	Consortium sur la Climatologie Régionale et l'Adaptation au Changement Climatique.
PNUD :	Programme des Nations Unies pour le Développement
Prép1:	Nombre de jours avec précipitations (seuil> 1mm)
R3days :	Maximum de la précipitation cumulée sur 3 jours consécutifs

R90N :	Nombre de jours avec une quantité de précipitations supérieure au 90 ^e centile
SDII :	Intensité moyenne de la précipitation calculée sur les jours avec précipitations
SGPRE :	Service de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau
SIG :	Systèmes d'Information Géographique
STARDEX:	Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions
UCAD :	Université Cheikh Anta Diop
UQAM :	Université du Québec À Montréal
UTM :	Universal Transverse Mercator
ZCIT :	Zone de Convergence InterTropicale

AVANT-PROPOS

L'impact du changement climatique sur les régions sèches de l'Afrique subsaharienne s'est illustré par les grandes sécheresses du Sahel¹. Au cours des 30 dernières années, la variabilité inter-annuelle des précipitations est marquée par une diminution des cumuls pluviométriques (Hulme *et al.*, 2001; Ali *et al.* 2005). L'étendue géographique du phénomène et sa durée ont conduit certains auteurs à parler de « rupture climatique » (Hubert *et al.*, 1989). Les déficits pluviométriques, marqués par deux phases aigües de sécheresse au début des années 1970 et 1980 ont engendré un appauvrissement généralisé des ressources en eau (Mahé & Olivry, 1999; Bricquet *et al.*, 1997; d'Orgeval, 2006; Vischel, 2006).

En raison de la faible capacité d'adaptation des populations et de son extrême pauvreté, l'Afrique est le continent le plus vulnérable aux changements du climat (Huq *et al.*, 2003). La vulnérabilité des pays sahéliens face aux fluctuations du climat est d'autant plus élevée que ces pays dépendent fortement des cultures pluviales et possèdent des ressources et des économies locales limitées et peu diversifiées dominées par le secteur primaire : 70 % de la valeur totale des exportations et 30 % du Produit Intérieur Brut (FAO, 2003).

Comme le suggère le dernier rapport de l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2007), la diminution des précipitations prédite par certains Modèles de Circulation Générale (MCG), si elle s'accompagne d'une forte variabilité inter-annuelle, pourrait nuire au bilan hydrologique du continent africain et perturber de façon majeure plusieurs activités économiques. Selon ce même rapport, les impacts majeurs en Afrique de l'Ouest affecteront plus spécifiquement le Sahel par la forte variabilité des précipitations, la rareté des ressources en eau, les conséquences sur les ressources végétales et animales et donc sur l'environnement global (milieu naturel et société). À cela, il faut ajouter la baisse des rendements de la production céréalière, la modification des écoulements des fleuves et de leurs affluents et l'accentuation de la désertification.

Au Sénégal, l'importance du climat se fait sentir sur pratiquement tous les aspects de la vie socio-économique que ce soit sur la disponibilité des ressources en eau, les rendements agricoles et la santé humaine et animale, pour ne citer que ces trois secteurs. La baisse continue des précipitations observée dans cette région depuis plus de trente ans a créé dans des zones jusque là considérées comme humides (Niayes), des conditions de milieux arides par la baisse de la disponibilité de la ressource en eau.

¹ Le Sahel désigne la zone aride située entre le désert du Sahara au nord et les régions tropicales où les pluies varient entre moins de 200 et 500 mm au sud. Il s'étend de l'Atlantique à la mer Rouge.

Cette sécheresse continue, qui a eu des conséquences dramatiques sur les ressources naturelles, affecte grandement les objectifs d'autosuffisance alimentaire du Sénégal et en accentue sa pauvreté. Au moment où la politique économique du pays repose sur l'agriculture (23 % du PIB), l'exploitation rationnelle des Niayes aux importantes potentialités naturelles (sols hydromorphes riches en matière organique), constitue une condition fondamentale pour le développement économique (agricole) et l'amélioration des conditions de vie des populations.

Dans ce contexte, comprendre comment la variabilité du climat actuel interagit avec le milieu naturel est devenu une nécessité pour anticiper ce que pourraient être les conséquences des changements climatiques futurs dans cette région et tenter de s'y adapter le mieux possible. Ce travail se situe à la croisée de trois disciplines (climatologie, hydrogéologie et environnement) qui par leur convergence impriment un caractère multidisciplinaire à l'étude.

RÉSUMÉ

Au cours des 50 dernières années, l'Afrique de l'Ouest a subi une des plus fortes variations de la pluviométrie observées à l'échelle du Globe. Ces fluctuations climatiques ont non seulement affecté le régime des précipitations mais elles ont également engendré des conséquences sur les ressources hydrologiques et végétales. Cette thèse traite de la variabilité climatique et de ses conséquences sur les ressources en eau et la dynamique des zones humides notamment des Niayes² du Sénégal au cours de la période comprise entre 1950 et 2004.

La thèse s'articule autour de trois volets. Le premier est une caractérisation inter-annuelle et quotidienne de la variabilité climatique par l'analyse de tendance de quelques indices de variabilité et d'extrêmes de précipitations. Le second volet porte sur la réponse des systèmes hydrogéologiques des Niayes à la variabilité pluviométrique par une analyse inter-annuelle (1958-2002) et intra-annuelle du niveau de la nappe. Deux exemples extrêmes sont analysés pour illustrer le phénomène: l'année excédentaire de 1958 et l'année déficitaire de 1974. Enfin, l'impact de la variabilité hydro-climatologique sur les zones humides a été estimé à partir d'un suivi de l'évolution des zones humides *via* l'analyse diachronique de photographies aériennes des années 1954, 1974 et 2000.

Les résultats de l'étude montrent que le déficit pluviométrique enregistré dans la région des Niayes depuis la fin des années 1960 est lié à une réduction du nombre de jours pluvieux (2j/10 ans en moyenne) et une hausse du nombre maximum de jours secs consécutifs (4j/10 ans en moyenne) au cours de la saison de mousson entre avril et octobre. Le nombre de jours dépassant les fortes valeurs de précipitations (par rapport au 90^e centile) a également subi une baisse. Par contre, les précipitations cumulées sur trois jours atteignent souvent le ¼ du cumul annuel ce qui confirme le rôle joué par les événements extrêmes sur l'intensité moyenne et les cumuls mensuels ou saisonniers des précipitations. En plus d'une réduction de la durée de la saison pluvieuse qui est passée de plus de cinq mois à près de trois mois entre 1950 et 2004, les précipitations ont davantage baissé au Sud qu'au Nord, induisant une réduction du gradient Sud-Nord.

La Nappe des Sables Quaternaires est actuellement à un niveau extrêmement bas résultant d'une longue période pluviométrique déficitaire. Le maximum piézométrique est passé, sur l'ensemble de la région, de +55 m en moyenne en 1958 à

² Les Niayes désignent des dépressions interdunaires où affleure la nappe phréatique. Elles sont localisées en arrière du cordon littoral du Nord du Sénégal entre Dakar et Saint-Louis. Sur les marges de ces dépressions se pratique la culture maraîchère qui fournit près de 80% de la production de légumes du pays.

+22 m en 1994 (au dessus du niveau 0 de la mer). Les plus fortes variations sont enregistrées au cours des années 1970 et 1980 - notamment au sud de la région des Niayes - avec -0.60 m tous les dix ans. Le bilan hydrologique de l'année 1974 suggère que les facteurs naturels sont les principales causes de destockage de la nappe avec 96% des sorties dont 89% par évapotranspiration. À l'échelle saisonnière, la recharge de la nappe dépend de la fréquence, de l'intensité et de la durée des précipitations et des séquences sèches à l'intérieur de la saison pluvieuse plus que du cumul annuel. En année de précipitations excédentaires (1958), le temps de recharge est de 5 à 7 mois contrairement en année «sèche» (1974) où les fluctuations piézométriques sont quasi nulles.

La dégradation actuelle des conditions hydro-climatiques se manifeste par un assèchement progressif de zones humides. Sur l'ensemble de la région des Niayes, la superficie des zones inondées en permanence est passée de plus de 1000 ha en 1954 à moins de 170 ha en 1974 pour atteindre environ 50 ha en 1982. En 2000, aucune zone inondée en permanence n'est perceptible. Dans le secteur de Mboro (15°9 N - 16°54 W) les zones inondées en permanence se sont transformées progressivement en sols à hydromorphie partielle. La «reprise pluviométrique» observée à la fin des années 1990 n'a pas initié une réparation en surface de la nappe qui subit un «effet mémoire» dû aux déficits pluviométriques répétés.

Mots clés : Sénégal, Niayes, Variabilité climatique, Précipitation, Hydrogéologie, Nappe des Sables Quaternaires, Zones humides, Changement climatique.

SUMMARY

During 50 last years, West Africa has been undergoing one of the most significant variations in rainfall observed around the globe. These climatic fluctuations have not only affected the characteristics of precipitations but also the hydrogeologic and forest resources considering their major effects on the agricultural ones of the area. This thesis examines climate variability and its consequences on water resources and the dynamic of wetlands, particularly Niayes³ in Senegal during the period between 1950 and 2004.

The thesis is based on three components. The first is an inter-annual and daily characterization of climate variability through a trend analysis of several variability indices and precipitation extremes. The second deals with the response of Niayes' hydrogeological systems' to rainfall variations through an inter-annual analysis (1958-2002) and an intra-annual analysis of the water table level. Two extreme examples are analyzed in order to illustrate the phenomenon: The excessive rainfall year of 1958 and the deficient rainfall year of 1974. Finally, the impact of hydro-climatological variability on wet zones is estimated based on monitoring of changes to soil use via an analysis of aerial photographs from 1954, 1974 and 2000.

The results show that the rainfall deficit recorded in the Niayes' since the end of the year 1960 is related to a reduction of the number of rainy days (2j/10 years on average) and a rise of the maximum number of consecutive dry days (4j/10 years on average) during the monsoon season between April and October. The number of days exceeding high precipitation values (compared to the 90th percentile) also decreased. However, cumulative three-day precipitation totals frequently reached $\frac{1}{4}$ of the annual total, which confirms the role played by extreme events on the average intensity and monthly or seasonal totals of precipitation. In addition to a reduction in the length of the rainy season from more than five months to close to three months between 1950 and 2004, precipitation decreased more substantially in the South than the North, resulting in a reduction of the South-North gradient.

The Quaternary water table is currently at an extremely low level, due to a long period of insufficient rainfall. The piezometric maximum for the region as a whole went from an average of +55 m in 1958 to +22 m in 1994 (above the sea level 0 value). The greatest variations were recorded in the 1970s and 1980s - particularly in the south of the Niayes region - with -0.60 m every 10 years. The hydrological total for 1974 suggests that natural factors are the main causes of depletion of the water

³ Niayes refer to interdune depressions in which free ground water comes to the surface. They are located behind the offshore bar in Northern Senegal between Dakar and Saint-Louis. The edges of these depressions host the farming that provides close to 80% of the country's vegetable production.

table with 96% of outflows, including 89% by evapotranspiration. On a seasonal scale, the water table recharge depends on the frequency, intensity and the length of precipitation and dry sequences within the rainy season more than the annual total. In a «rainy year» (1958), the recharge time was between 5 and 7 months compared to a «dry year» (1974) when piezometric fluctuations were nil.

The current degradation of hydro-climatic conditions is demonstrated by a progressive drying out of wetlands. For the entire Niayes region, the area of permanently flooded areas went from more than 1.000 ha in 1954 to less than 170 ha in 1974 to reach approximately 50 ha in 1982. In 2000, no ponds were noticeable in the region. In the Mboro area (15°9 N - 16°54 W) permanently flooded zones have gradually transformed into partial hydromorph soils. The «rain recovery» observed in the late 1990s did not lead to a surface reappearance of the water table which is undergoing a «memory effect» due to repeated rain deficits.

Key words: Senegal, Niayes, Climate variability, Precipitation, Hydrogeology, Quaternary water table, Wetlands, Climate change.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'histoire du continent africain est ponctuée de fluctuations climatiques ayant entraîné des conséquences sur l'environnement (sécheresses, inondations, désertification). Les modifications engendrées par ces événements de durée et d'intensité variables sont particulièrement remarquables dans la région intertropicale, notamment sous climat semi-aride, où les interactions entre la biosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la géosphère sont assez complexes (Mahé, 1993; Leroux, 2001; Nicholson, 2001). Plusieurs facteurs explicatifs de cette variabilité à grande échelle spatiale ont été évoqués. Des études ont permis de mieux comprendre la dynamique météorologique régissant la mise en place de la saison des pluies et les différentes perturbations liées aux interconnexions entre les températures de surface de l'océan, l'atmosphère et les écosystèmes naturels (Courel *et al.*, 1984; Xue & Shukla, 1993; Zheng & Eltahir, 1998; Zheng *et al.*, 1998; Prospero, 1996; N'tchayi Mbourou *et al.*, 1997; Janicot *et al.*, 1999; Rowell, 2003; Messenger *et al.*, 2004).

Au Sahel, les variations climatiques d'une année à l'autre, de même que les changements des conditions climatiques moyennes, sont souvent perçus à travers l'analyse des séries pluviométriques (Nicholson, 2001; Le Barbé *et al.*, 2002, Le Lay & Galle, 2005). En effet, la répartition inter-annuelle et intra-annuelle des précipitations est la résultante des variations de l'activité météorologique qui met en jeu; océan, continent et atmosphère (Mahé, 1993; Olivry, 1994; Le Barbé *et al.*, 2002; d'Orgeval, 2006). Dans cette thèse, les variations climatiques d'une année à l'autre sont effectivement perçues à travers l'analyse des séries pluviométriques, «facteur essentiel de différenciation en milieu tropical» (Arlery *et al.*, 1973; Mahé, 1993; Olivry, 1994). La pluviométrie constitue un facteur climatique fondamental dont l'importance se traduit bien par la recharge des nappes, la disponibilité des ressources en eau et par conséquent les retombées socio-économiques dont les rendements agricoles qui en dépendent (Sultan & Janicot, 2006; d'Orgeval, 2006).

La fréquence et l'intensité des événements pluvieux conditionnent, au moins autant que le cumul saisonnier, le renouvellement des ressources en eau et leur usage. En

effet, la masse nuageuse de la mousson n'est pas homogène et il existe à l'intérieur de chaque saison des pluies, et d'une année à l'autre, une répartition irrégulière importante des précipitations dans le temps et dans l'espace. L'irrégularité augmente d'autant plus que l'on est plus proche de la côte ou de la bordure du Sahara où un seul orage peut rendre une année excédentaire (Mathon & Laurent, 2001). Cette distribution irrégulière des précipitations à l'échelle de l'année peut avoir des conséquences graves sur la recharge de la nappe. Un total de 500 mm tombé en deux mois n'aura pas du tout le même impact sur la recharge des nappes et les écoulements selon qu'il provienne de 10 ou de 100 jours pluvieux. Une séquence sèche survenant à un stade de croissance critique d'une culture peut avoir un effet catastrophique sur les rendements, même si les précipitations sont globalement abondantes. Une analyse de la variabilité pluviométrique, pour être opérationnelle, doit donc faire la part entre les effets du nombre de jours pluvieux, de leur fréquence et de leur intensité et en préciser les variations saisonnières (Tapsoba, 1997; Le Barbé *et al.*, 2002; Neil *et al.*, 2005). Ceci explique l'utilisation, dans cette étude, d'indices de variabilité de précipitations à partir de cumuls quotidiens de précipitations observées.

Un des enjeux majeurs des recherches sur la variabilité climatique est de quantifier son impact sur les ressources en eau et le milieu naturel. Les ressources en eau dans les Niayes proviennent essentiellement des apports de la Nappe phréatique des Sables Quaternaires (NSQ) qui y affleure. Cette nappe est utilisée pour l'alimentation en eau des populations, de leurs animaux et de leurs besoins en production agricole. Ainsi, sans entrer dans le détail des processus hydrogéologiques, le suivi du niveau piézométrique peut permettre de préciser les tendances des variations climatiques ou le lien entre les précipitations et le niveau de la nappe superficielle. La période 1950-2004 a été choisie afin de caractériser le changement du régime des précipitations et l'évolution du niveau de la nappe entre la période «humide» (avant 1970) et la période «sèche» (après 1970) (Hubert *et al.*, 1989; Nicholson *et al.*, 2000) et leurs impacts sur les Niayes.

La compréhension des variations hydro-pluviométriques nécessite une approche globale et interdisciplinaire. Nous n'avons pas la prétention de traiter toutes les interactions concernant la variabilité climatique ainsi que leurs incidences sur la ressource en eau. Cette thèse est l'occasion de pousser les frontières de la compréhension de la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest en général et plus particulièrement dans la région du littoral du Sénégal et ses conséquences sur les ressources en eau et la dynamique des zones humides que sont les Niayes. La thèse s'organise comme suit :

- Dans le premier chapitre sont présentées la zone d'étude de la région des Niayes et les données utilisées pour décrire la variabilité hydro-climatique et ses impacts sur ces zones humides. Il s'agit de mesures de cumuls quotidiens, mensuels et annuels de précipitations, de relevés de niveaux piézométriques à l'échelle mensuelle et de données aéroportées (photographies aériennes). L'objectif est d'intégrer toutes ces données afin de mieux caractériser les interactions dynamiques entre les écosystèmes des Niayes du Sénégal et la variabilité climatique récente entre 1950 et 2004;
- Dans le deuxième chapitre, un bref rappel des connaissances sur la circulation atmosphérique générale dans la zone intertropicale ainsi que le climat moyen de la région des Niayes sont présentés afin de définir le contexte météorologique de la variabilité climatique dans le littoral nord du Sénégal. Ce chapitre fait la synthèse des principaux facteurs explicatifs de la variabilité des précipitations à grande échelle spatiale (Afrique de l'Ouest) et qui ont été décrits dans la littérature jusqu'à maintenant;
- Le troisième chapitre a fait l'objet d'un article soumis à *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques* et concerne la caractérisation de la variabilité climatique dans la région des Niayes entre 1950 et 2004 par l'analyse du régime des précipitations à l'échelle inter-annuelle et intra-annuelle. Au-delà des cumuls annuels de pluviométrie, la variabilité des précipitations a été étudiée à partir de cumuls de précipitations quotidiennes *via* l'analyse des tendances décennales et des anomalies de quelques indices de variabilité et d'extrêmes de précipitations ainsi que la contribution mensuelle à la précipitation totale annuelle;
- Le quatrième chapitre aborde l'évolution à long terme des fluctuations piézométriques par l'analyse de la variabilité spatiale et temporelle de la Nappe des Sables Quaternaires (NSQ) dont le régime annuel est fortement dépendant de la fréquence et de l'intensité des précipitations enregistrées dans la région et a fait l'objet de 2 articles scientifiques soumis à la revue *Sécheresse*. Le premier

met en relation les variations du niveau de la nappe avec celles des précipitations entre 1958 et 2002. Le second article porte sur le comportement hydrodynamique de la nappe en année de pluviométrie excédentaire (1958) et déficitaire (1974), pour lesquelles des mesures mensuelles sur toute l'année sont disponibles, a également été étudié;

- L'évolution spatio-temporelle de la superficie des Niayes est présentée au cinquième chapitre qui constitue le dernier article de la thèse à soumettre à la revue *African Journal of Science and Technology*. Le changement d'occupation du sol est présenté par la cartographie de la modification des superficies des zones humides. La cartographie a été réalisée à partir de photographies aériennes datant de 1954 (année de précipitations excédentaires), 1974 (année de précipitations déficitaires) et 2000 (année de précipitations normales⁴). Ces années correspondent à des événements climatiques susceptibles d'avoir engendré des changements sur le milieu.

1.1 Présentation de la zone d'étude et définition des Niayes

Le littoral nord du Sénégal se distingue par la richesse et la variété de ses ressources naturelles. Il est caractérisé par la présence d'un écosystème particulier composé de reliques forestières, qui colonise les bas fonds interdunaires riches en dépôts organiques, les Niayes. Depuis la période coloniale, cette région soulève des enjeux socio-économiques et stratégiques certains. Entourée d'agglomérations urbaines (Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis), elle est occupée par une population sans cesse croissante et constitue la principale zone pourvoyeuse de produits maraîchers du pays. Cette région a connu, au cours des dernières décennies, de profondes mutations que lui ont imposées des contraintes naturelles et anthropiques. Parmi ces contraintes, on peut citer la sécheresse qui, en provoquant l'abaissement du niveau de la nappe, a mis en péril les ressources environnementales vitales pour les populations locales.

La région des Niayes située entre 14°3' et 16°N, et entre 16° et 17°5'W s'étend sur plus de 180 km de longueur et 30 à 35 km de largeur, ce qui représente une superficie

⁴Valeur moyenne d'une donnée climatique calculée sur une période relativement longue d'au moins trois décennies consécutives. Dans cette étude, la normale correspond à la moyenne des précipitations entre 1961 et 1990.

d'environ 2300 km² (Dryade, 1990) (Figure 1). Elle correspond à la bordure occidentale du Sahel, même si elle est définie comme un ensemble phytogéographique particulier associé au domaine guinéen (Trochain, 1940). La proximité de l'océan favorise une température moyenne annuelle relativement basse (ex., 24.5°C à Saint-Louis) par rapport à la moyenne du Sénégal (28°C). Le régime pluviométrique est caractérisé par une saison pluvieuse qui s'étend entre les mois de mai-juin jusqu'au mois d'octobre avec des cumuls annuels d'environ 300 mm au Nord et 500 mm au Sud.

La région des Niayes est caractérisée par la présence de galeries forestières comprenant de nombreux arbres du domaine « guinéen » tels que le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.), le boiré (*Detarium senegalense* Gmel.) ou les euphorbes (*Alchornea cordifolia* Chumach. & Thonn.) (Trochain, 1940) (Figure 2). Cette végétation, azonale par rapport à la savane et la pseudo-steppe sahélienne qui l'entoure, est la relique d'une forêt humide mise en place au début de l'Holocène (Lézine, 1987) et qui perdure jusqu'à nos jours grâce aux conditions hydro-climatiques particulières qui l'influencent.

La topographie de la région des Niayes est marquée par la présence de dunes sableuses et du plateau de Thiès dont l'altitude maximale ne dépasse guère 130 m, au dessus du niveau moyen de la mer, au Sud-Est de la région. De la côte vers l'intérieur du continent, une succession de trois systèmes de dunes est observée: les dunes vives, les dunes semi-fixées par un couvert végétal herbacé et arbustif et les dunes de l'erg « Ogolien » (Figure 3), mises en place lors de la dernière période glaciaire et qui sont aujourd'hui fixées par une végétation arborescente semi-aride (Michel, 1973).



Figure 1. Localisation de la région du Niayes, le long du littoral nord du Sénégal.

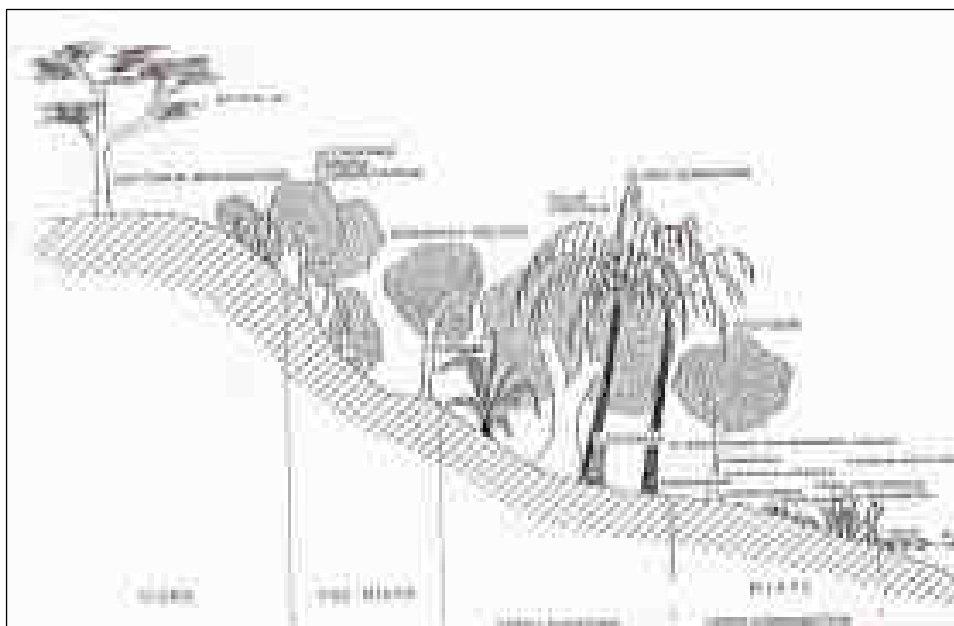


Figure 2. Représentation schématique de la végétation d'une Niaye (Lézine, 1987).

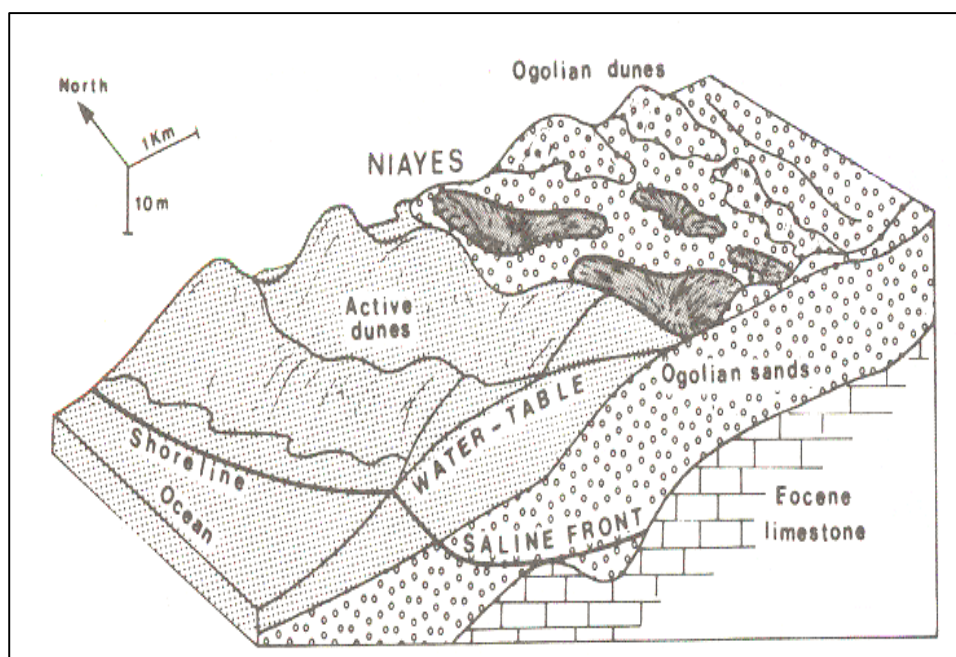


Figure 3. Coupe structurale de la région des Niayes (BRGM, 1984).

L'hydrogéologie de la zone des Niayes est caractérisée par des formations aquifères dans les sables. Ces sables reposent sur des formations sédimentaires plus anciennes datant du Tertiaire. Les formations de l'Éocène (marnes et calcaires), du Paléocène (argiles et sables surmontés de calcaires) et les plus anciennes remontant au Maestrichtien (grès et sables) se succèdent sous ces dépôts sableux. Les aquifères du littoral nord du Sénégal correspondent en profondeur à ces différentes formations (Fohlen & Lemordant, 1983).

Les Niayes sont des dépressions interdunaires très fertiles car elles sont comblées par du matériel organique provenant de la décomposition de plantes herbacées hygrophiles (Gramineae, Cyperaceae), suite au maintien d'une nappe phréatique près de la surface (Raynal, 1963; Sall, 1982; Lézine, 1987). Bien que certaines Niayes puissent atteindre plusieurs kilomètres de long, leur superficie moyenne est d'environ 5 hectares (Pernel & Gageonnet, 1992).

Les conditions bioclimatiques et hydriques sont particulièrement favorables à la culture maraîchère dans les Niayes. Sur les marges de ces dépressions se pratiquent aujourd'hui des cultures telles que l'oignon, la pomme de terre, la carotte, le navet et le chou (Aguar, 2002). L'assèchement progressif des dépressions humides a entraîné le déplacement des périmètres de cultures maraîchères des marges de celles-ci vers les pentes des dunes (Figure 4). L'irrigation des plants se fait à partir des « céanes », puits traditionnels qui varient entre 1 et 10 mètres de profondeur (Figure 5).

La production maraîchère de la zone des Niayes approvisionne en partie la capitale Dakar en plus des villes de l'intérieur (Thiès, Louga, Diourbel) voire certains pays limitrophes comme la Mauritanie (Nouakchot). L'intérêt socio-économique que représente cette zone est également lié au fait que plus de 100 000 personnes tirent l'essentiel de leur revenu de l'activité maraîchère qui y est pratiquée (Aguar, 2002). Cela s'exprime aujourd'hui par une forte pression anthropique qui, combinée à la vulnérabilité écologique et climatique, se traduit par une précarité qui risque à long terme de réduire voire anéantir leur potentiel existant.



Figure 4. Vue d'une Niaye.

Source : A-M. Lézine & L. A. A. Aguiar (décembre 2004).



Figure 5. Vue d'un puits traditionnel ou « Céane».

Source : A-M. Lézine & L. A. A. Aguiar (décembre 2004).

Du point de vue démographique, 53 % de la population du Sénégal vit dans la zone côtière. Cette concentration de la population dans les grandes villes du littoral (Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis) est le résultat d'un exode rural permanent et d'un taux de croissance démographique élevé atteignant 3.8 % dans les zones urbaines alors que celui-ci est de 2.7 % pour l'ensemble du pays. Selon les projections démographiques réalisées en 1997, la densité moyenne de la population de la région des Niayes était de 62.5 habitants au km² en 2000. Les plus fortes densités sont observées dans les secteurs sud et nord de la région (71 habitants au km²) (DPS, 1997).

La satisfaction des besoins vitaux de cette population (eau potable, produits agricoles, activité industrielle) impose une meilleure connaissance de l'évolution et de la disponibilité des ressources en eau et une gestion de plus en plus rigoureuse de celles-ci.

1.2 Problématique générale

Au cours des dernières décennies, l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest a subi une récurrence marquée de sécheresses (Le Barbé & Lebel, 1997; Nicholson *et al.*, 2000; Hulme *et al.*, 2001; Le Barbé *et al.*, 2002). Une diminution de la pluviométrie annuelle (Paturel *et al.*, 1997; Tarhule & Woo, 1997; Nicholson, 2000) et du nombre de jours de pluie, à l'échelle inter-annuelle, a été constatée (Houndénou & Hernandez, 1998; Le Barbé *et al.*, 2002). À l'échelle intra-annuelle, le mouvement latitudinal de la Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT) impose une dynamique saisonnière très différente suivant la persistance des périodes sèches ou humides notamment par la variation de l'intensité, de la durée et de la fréquence des événements pluvieux (Le Barbé & Lebel, 1997; Le Barbé *et al.*, 2002; Le Lay & Galle, 2005). Entre les périodes 1950-1960 et 1970-1980, les cumuls annuels des précipitations ont diminué de 30 à 50% au Sahel (Hulme *et al.*, 2001). Par conséquent, le déficit de recharge des réservoirs souterrains à partir des apports

pluviométriques a été de 13% et 27% au cours des décennies 1970 et 1980 (Bricquet *et al.*, 1997).

Dans la région des Niayes, le niveau de la Nappe des Sables Quaternaires (NSQ) est en nette régression favorisant, par endroit, l'avancée du biseau salé. Le front salé se situe à l'aplomb de la plage actuelle, le long de l'Atlantique, et n'excède pas 100 m de pénétration dans les terres, excepté dans la zone centrale (Mboro: 15°9 N - 16°54 W) et septentrionale des Niayes, où la présence du biseau salé dans les dépressions des Niayes a déjà été signalée par Dryade (1990).

Ce phénomène a engendré un dépérissement des groupements végétaux en place. Les communautés végétales des Niayes paraissent en transformation vers des formations de plus en plus ouvertes (xérophiles et halophiles), si bien que la survie des îlots de la flore forestière subguinéenne soit en danger de disparition (Anhuf *et al.*, 1992). La déperdition des espèces végétales ne date pas d'aujourd'hui. En effet, l'analyse pollinique faite par Lézine (1987) montre que les Niayes ont subi depuis 2500 ans BP (Before Present) d'importantes modifications paléoclimatiques transformant les communautés végétales en place.

Les conséquences économiques d'une telle évolution climatique et écologique sont dramatiques dans cette région principalement tournée vers l'agriculture. En dépit des progrès dans les pratiques agricoles, la production agricole au Sahel n'a augmenté que de 1.8 % par an au cours de la période 1961–1992 (FAO, 2003). Dans la région des Niayes, les revenus des paysans ont chuté d'environ 40% entre les décennies 1970 et 1980, ce qui tend à accentuer la pauvreté et le problème de l'exode rural (Aguiar, 2002).

Dans ce contexte, les questions suivantes ont été soulevées :

- Comment se caractérise la variabilité climatique dans la région des Niayes à l'échelle inter-annuelle versus annuelle et quelle a été la fréquence et l'intensité des événements pluvieux entre 1950 et 2004?

- Quelle est la réponse hydrologique à la distribution spatiale et temporelle des précipitations dans la région des Niayes et quel est le bilan hydrodynamique de la nappe en année de pluviométrie excédentaire versus déficitaire?
- Quel est l'impact de cette variabilité hydro-climatologique sur la dynamique des écosystèmes des Niayes du Sénégal et comment ces changements se sont-ils manifestés au cours du temps (1950-2004) en terme de superficie des zones humides?

L'objectif de la thèse est de comprendre les interactions dynamiques entre les précipitations, les ressources en eaux souterraines et les milieux humides dans un secteur particulier du Sahel sénégalais, la région des Niayes. Dans cette zone localisée le long du littoral nord du Sénégal, la sécheresse et l'augmentation croissante des contraintes anthropiques liées à l'agriculture, au pompage agricole, urbain et industriel ont profondément affecté la disponibilité des ressources en eaux. Le travail de cette thèse est principalement centré sur l'étude des variations climatiques et de ses conséquences sur le niveau des nappes et sur l'étendue des zones humides des Niayes entre 1950 et 2004. Les résultats ont permis de mieux comprendre la réponse des Niayes à la variabilité du climat.

1.3 Présentation des dossiers analytiques

Les résultats présentés dans cette thèse ont été obtenus à partir de l'analyse de bases de données climatologiques, piézométriques et cartographiques (photographies aériennes et cartes thématiques).

1.3.1 Données climatologiques

Les données pluviométriques sont issues de la base de données de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et de celle de la Direction de la Météorologie Nationale du Sénégal (DMNS) avec le concours de l'Agence pour la SECurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA).

Un des objectifs du présent travail était de constituer une seule et unique base de données de cumul mensuel et de cumul journalier des données pluviométriques. La fusion de ces données de différentes sources s'est faite à partir de la base de données de la Direction de la Météorologie Nationale du Sénégal à laquelle les autres ont été intégrées successivement. À chaque étape, une comparaison systématique des deux bases à fusionner était réalisée, pour les coordonnées des stations, comme pour les relevés des années communes. Cette étape a permis d'établir la correspondance entre les différentes séries de mesures et d'effectuer une première validation des données.

Une grande partie des données pluviométriques recueillies était constituée de relevés en 1/10° de mm et de coordonnées géographiques (longitude, latitude) exprimés en degrés sexagésimaux [(Degrés (°), Minutes ('), Secondes (")] ou en centièmes de degrés décimaux. Chaque relevé a été ramené en valeurs décimales en utilisant comme facteur de conversion la constante 0.1. Les coordonnées géographiques ont été traduites en UTM (Universal Transverse Mercator). Cette uniformisation a permis la comparaison des mesures entre elles et l'analyse statistique des données suivant la même échelle de mesure (millimètre) conformément aux études déjà réalisées dans la région.

Les dates de début et de fin des séries de mesures pluviométriques obtenues varient d'une station à une autre. Au total dix (10) stations pluviométriques, sur les 16 que compte la région, ont été retenues afin de constituer la base de données pluviométriques la plus complète et la plus représentative possible de l'ensemble de la région des Niayes (Tableau 1; Figure 6, p.21). Le choix des séries de mesures des stations à analyser a été effectué à partir de critères de longueur de la série et de la qualité des données avec le minimum de lacunes possible. Le seuil acceptable de lacune a été fixé à moins de 20% de données manquantes annuellement pour la période d'avril à octobre correspondant à la saison de mousson. Seules les stations ayant enregistré plus de 30 ans (normale climatique) de mesures pluviométriques ont été sélectionnées (Tableau 1). Deux catégories de stations ont ainsi été constitués :

- Une première catégorie regroupe les quatre **stations météorologiques principales** (synoptiques) de Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis. Leurs séries de mesures pluviométriques ont le double avantage d'être quotidiennes et complètes entre le 1^{er} janvier 1950 et le 31 décembre 2004 avec moins de 20% de données manquantes.
- Une deuxième catégorie concerne les **stations météorologiques secondaires** situées à l'intérieur de la zone des Niayes et dont les séries de mesures qui dépassent 30 ans ont été utilisées dans l'analyse de paramètres hydrogéologiques.

Tableau 1. Description des séries et des stations pluviométriques

Stations	Lat. (1/10)	Long. (1/10)	Cumul quotidien de janvier à décembre		Cumul mensuel De janvier à décembre
DAKAR-YOFF ^{1*}	1474	-1751	1947 à 1980	1950 à 2004	1947 à 2004
DAROU	1593	1585	-	-	1968 à 1986
DIOGO ^{2*}	1530	-1681	1960 à 1986	-	1960 à 1994
KAYAR	1485	-1733	-	-	1975 à 1996
KEBEMER ^{2*}	1536	-1645	1950 à 1987	2001 à 2004	1945 à 1975
LOMPOUL ^{2*}	1543	-1671	1960 à 1980	2001	1961 à 1974, 1979 à 1984
LOUGA ^{1*}	1562	-1622	1960 à 2000	1950 à 2004	1919 à 2004
M'BORO ^{2*}	1513	-1688	1950 à 1987	2000 à 2004	1956 à 1996
MECKHE	1512	-1660	1975 à 1980	-	1975 à 1991
MONT-ROLAND ^{2*}	1493	-1701	1951 à 1980	-	1950 à 1990
M'PAL	1591	-1626	1961 à 1987	2004	1962, 1966 à 1972, 1974, 1975, 1978, 1983 à 1994
PIRE GOUREYE	1500	-1656	1975 à 1980	-	1977 à 1996
SAINT-LOUIS ^{1*}	1601	-1651	1950 à 1980	1950 à 2004	1921 à 2004
TAIBA N'DIAYE	1503	-1688	1975 à 1980	-	1975 à 1995
THIÈS ^{1*}	1480	-1695	1930 à 1991	1950 à 2004	1930 à 2003
TIVAOUANE ^{2*}	1495	-1681	De 1950 à 1987	2003	1919 à 1994, 1996,

¹ : Stations météorologiques principales (synoptiques) utilisées dans l'analyse statistique de la variabilité climatique.

² : Stations météorologiques secondaires avec plus de 30 ans de mesures de précipitations.

* : Stations météorologiques retenues.

L'analyse de la variabilité des précipitations à l'échelle quotidienne est effectuée à partir des mesures enregistrées dans les 4 stations synoptiques de Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis. Ces stations situées au pourtour de la région de Niayes présentent un climat général et fait ressortir les contrastes climatiques latitudinaux et méridionaux du littoral nord du Sénégal.

Les données climatologiques comprennent également des valeurs de température, d'évaporation, d'évapotranspiration, d'insolation, d'humidité relative, ainsi que de la vitesse et de la direction des vents. Les mesures de ces paramètres climatiques sont très lacunaires avec souvent des mesures manquantes sur plusieurs années. Seules les données enregistrées à la station météorologique de Louga et qui présentent une chronique régulière sur une trentaine d'années étaient disponibles.

1.3.2 Données piézométriques

La base de données hydrologiques est principalement constituée de documents cartographiques (BRGM, 1984) et de mesures piézométriques réalisées entre 1958 et 2002. Les données piézométriques proviennent de la base de données du Service de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau du Ministère de l'hydraulique du Sénégal (2003), de la mission d'étude de l'Organisation Mondiale de la Santé (1975) et du Bureau de Recherche Géologique et Minière (1962) (Tableau 2). Cette base de données est très hétérogène car peu de piézomètres ont fait l'objet d'un suivi régulier tout au long de la période considérée. Selon les besoins, des mesures détaillées ont été réalisées au cours de certaines années (BRGM, 1962), ou au contraire, des mesures sur certains piézomètres ont été abandonnées. Les séries de niveaux piézométriques retenues dans cette étude sont caractérisées par les données suivantes :

1.3.2.1 Des mesures irrégulières et des pas de temps variés

Pour la période antérieure à 1976, les différentes mesures obtenues couvrent les périodes suivantes :

- juin 1958 à décembre 1959,
- mai et septembre 1965,
- juillet et octobre 1963,
- les 12 mois de l'année 1974.

Entre 1976 et 1980, les mesures ont été récoltées avec un pas de temps bimensuel. Après 1980, la plupart des mesures piézométriques sont relevées uniquement en juin et en octobre, soit avant et après la saison pluvieuse. Le niveau piézométrique mensuel relevé ne représente donc pas la moyenne journalière du mois considéré, mais celui d'un seul ou de quelques jours pendant ce mois. Ainsi, le niveau de la nappe phréatique n'a pu être reconstitué qu'à l'échelle mensuelle. Les mesures ont été interrompues entre 1995 et 2000.

1.3.2.2 Un réseau de stations de mesure de plus en plus réduit

L'étude du BRGM (BRGM, 1962) couvrant les années 1958 et 1959 et de l'OMS (OMS, 1975) pour la période entre 1965 et 1975, ont été basées sur respectivement 53 et 117 piézomètres. Ce réseau a été réduit à 44 après 1976 pour une nappe couvrant près de 2300 km², ce qui représente une moyenne d'environ 1 piézomètre par 52 km². Les mesures réalisées par le BRGM (1958-1969) et l'OMS (1965-1975) ont été faites à partir d'un réseau de piézomètres et de puits et où les niveaux dynamique et statique de la nappe ont été pris en compte. L'interprétation des mesures effectuées dans des puits villageois est toujours difficile car les variations dues au puisage (niveau dynamique) sont généralement supérieures aux fluctuations naturelles de la nappe (niveau statique). D'ailleurs les mesures effectuées dans les puits, montrent que les fluctuations journalières peuvent varier de 0.50 m à 2 m. Afin d'éviter des erreurs d'interprétation de la piézométrie locale en considérant le niveau dynamique, les données retenues pour la présente étude sont uniquement basées sur le niveau statique de la nappe à partir du réseau de piézomètres.

Tableau 2. Données hydrogéologiques utilisées

<i>Source</i>	<i>Type de document</i>	<i>Durée</i>	<i>Nombre de piézomètres</i>	<i>Années manquantes</i>	Résolution temporelle
BRGM, 1962	statistique	Juin 1958 à décembre 1959	53	0	mensuelle
OMS, 1975	cartographique	Juillet 1963 et octobre 1963	117	0	mensuelle
Fohlen & Lemordant, 1983	statistique	Mai 1965 et septembre 1965	118	0	mensuelle
OMS, 1975	statistique	Janvier 1974 à décembre 1974	104	0	mensuelle
SGPRE, 2003	statistique	1976 à 2002	45	1995 à 2000	bimensuelle et saisonnière (juin et octobre)
	statistique	Juillet 2002 et novembre 2002	41	0	mensuelle

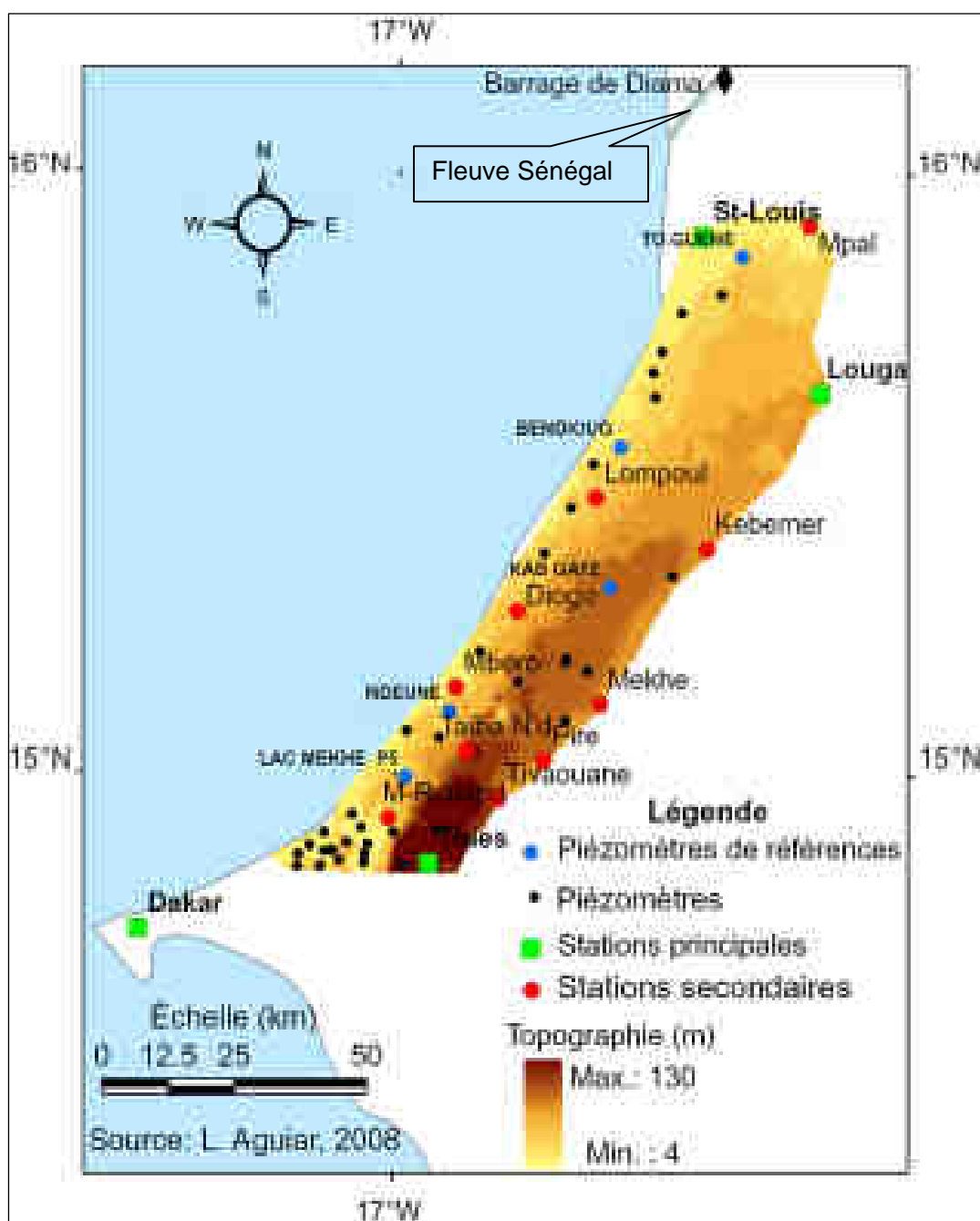


Figure 6. Localisation des stations météorologiques (principales et secondaires) et piézométriques utilisées avec la topographie.

1.3.3 Données cartographiques

Les données aéroportées sont constituées de séries de photographies aériennes panchromatiques et couleurs prises au cours des années 1954, 1974 et 2000 (Tableau 3). Le choix de ces années a été effectué suivant la disponibilité des données, mais aussi selon les événements climatiques susceptibles d'avoir engendré des conséquences sur le milieu. Les couvertures aériennes ont porté sur des années de pluviométrie: excédentaire (1954), déficitaire (1974) et normale (2000). Ces images traduisent l'état des Niayes suite à la période pluvieuse entre 1951 et 1954, à la période aride entre 1970 et 1974, puis suite à la reprise pluviométrique de la fin des années 1990, grâce à la couverture aérienne de 2000. L'année 1954 antérieure à la sécheresse du début des années 1970 a permis de dresser une situation de référence par rapport à l'occupation du sol au cours de cette période relativement « pluvieuse » (Nicholson *et al.*, 2001).

Tableau 3. Données cartographiques

Années	Nombre d'images	Prise de vue	Mode ou type	Échelle /	Date	Source
Photographie aériennes						
1954	62	Horizontale	Panchromatique	1 / 60000	04/1954	BRGM (1962)
1974	34	Horizontale	Hue-Saturation-Intensity	1 / 35000	03/1974	BRGM (1984)
2000	30	Horizontale	Panchromatique	1 / 20000	04/2000	CSE (2002)
Données cartographiques						
1962	4	-	Sols	1/10000	1954	Pereira-Barreto (1962)
1963	1	-	végétation	1/10000	1963	Raynal (1963)
1984	3	-	zones inondées	1/10000	1954, 1974, 1982	BRGM (1984)
1990	9	-	sol et végétation	1/20000	1989	Dryade (1990)
1996	3	-	occupation du sol	1/200000	1981	DTGC (1996)

Les données cartographiques proviennent des cartes de typologie des sols qui ont été réalisées par Pereira-Barreto pour le compte de l'ORSTOM (Pereira-Barreto, 1962) et par le groupe Dryade (1990). Les cartes de zones inondées de 1954, 1974 et 1982

réalisées par le BRGM (1984) ainsi que la carte d'occupation du sol de la DTGC (1996) (Feuille Louga ND-28-XX) ont également été utilisées. Elles ont été complétées par les cartes de végétation réalisées par Raynal (1963) et par le groupe Dryade (1990) (Tableau 3). Cette base de données aéroportées et cartographiques a permis de caractériser l'évolution spatio-temporelle des Niayes depuis le début des années 1950.

CHAPITRE I:

**LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE EN
AFRIQUE DE L'OUEST ET LE CLIMAT MOYEN
DE LA RÉGION DES NIAYES**

1.1 Circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest

La circulation atmosphérique intertropicale s'explique par l'inégalité de la répartition du rayonnement solaire entre les Pôles et l'Équateur. Le bilan radiatif de l'ensemble Terre-Atmosphère, c'est à dire la différence entre l'énergie reçue par la Terre et l'énergie rayonnée vers l'espace, est positif entre 35°N et 35°S (zone tropicale), et négatif au-delà (Leroux, 2001). Les transferts d'énergie de la surface vers l'atmosphère, des zones tropicales excédentaires vers les moyennes et hautes latitudes déficitaires s'effectuent par l'intermédiaire des cellules de Hadley (Citeau *et al.*, 1989). Ces transferts engendrent la formation de « centres d'action » d'origine thermique, dont les hautes pressions sub-tropicales et les basses pressions équatoriales ou Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT). Les flux d'alizé et de mousson constituent les principales composantes de la circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest, du moins dans les basses couches de l'atmosphère (Lambergeon *et al.*, 1981; Citeau *et al.*, 1989; Mahé, 1993; Leroux, 1996; 2001).

1.1.1 La Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT)

La ZCIT est définie comme la zone dans laquelle se déplacent les flux convergents issus des anticyclones subtropicaux: l'anticyclone de Sainte-Hélène (Hémisphère sud), et l'anticyclone des Açores et Saharo-Lybie (Hémisphère nord). La ZCIT correspond à l'aire dépressionnaire entre les ceintures anticycloniques subtropicales (Leroux, 2001). Elle marque le contact dynamique des circulations atmosphériques des deux hémisphères. Le déplacement latitudinal de la ZCIT détermine la pluviosité en Afrique de l'Ouest et plus spécifiquement au Sénégal (Figures 1 et 2). Sa migration dépend de l'organisation des champs de pression, elle-même commandée par le facteur thermique (soleil) (Citeau *et al.*, 1989).

En été, la ZCIT remonte vers le Nord, atteignant 20°N (Figure 1a). En hiver, l'anticyclone des Açores migre vers les Tropiques, maintenant ainsi la ZCIT vers l'Équateur géographique (Figure 1b). Cette période, marquée par l'arrivée de la mousson, correspond à la période pluvieuse au Sénégal. La durée de la mousson varie de 3 à 7 mois (avril à octobre) selon la position latitudinale de la ZCIT. Le reste de l'année (novembre à mars) correspond à la migration de la ZCIT vers le sud engendrant des conditions atmosphériques anticycloniques sur le Sénégal.



Figure 1. Fluctuations latitudinales de la ZCIT⁵.

- a :** En été, remontée de la ZCIT vers le nord: saison pluvieuse dans l'hémisphère nord.
- b :** En hiver, migration de la ZCIT vers le sud: saison pluvieuse dans l'hémisphère sud.

1.1.2 Les masses d'air

La région des Niayes appartient, dans son intégralité, au climat tropical où se déplacent les flux convergents issus des hautes pressions sub-tropicales : l'anticyclone des Açores (Atlantique nord), l'anticyclone Saharo-Lybien (Hémisphère nord) et l'anticyclone de Sainte-Hélène (Atlantique sud). Selon Leroux (1996), ces cellules de haute pression génèrent des vents de directions variables tels qu'exprimés à la figure 2:

⁵ Tiré de <<http://www.educnet.education.fr/obter/applied/circula/theme/atmos33.htm>> consulté le 10 juin 2008.

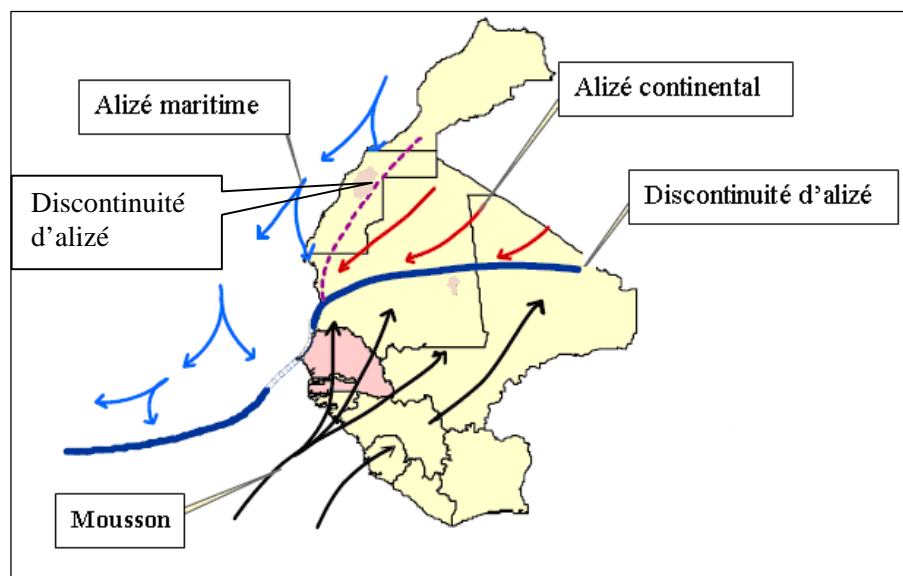


Figure 2. La circulation des vents sur le Sénégal (Garnier, 1976 dans Fall *et al.*, 2006).

L'alizé maritime, issu de l'anticyclone des Açores, est de direction N-O – S-E. Son parcours océanique lui donne une fraîcheur et une humidité qui abaissent les températures, tout en apportant du brouillard et de la rosée.

L'alizé continental ou harmattan est un flux d'air chaud et sec véhiculé par la cellule Saharo-libyenne de direction N-E – S-O. Ce vent qui souffle de novembre à mai est responsable des températures relativement élevées dans la partie continentale de la région des Niayes et du transport de poussières.

La mousson ouest-africaine est un flux d'air chaud et humide issu de l'anticyclone de Sainte-Hélène, centré dans l'Atlantique sud. Dans l'hémisphère nord, la mousson prend une direction S-E – N-O après sa traversée de l'équateur géographique sous l'effet de la force de Coriolis (Leroux, 1996; 2001). La mousson sévit entre avril et octobre et elle est caractérisée, jusqu'en fin juin, par une extension progressive des précipitations à partir de la bande côtière, située à 5°N environ. Le maximum de pluies côtières subit un déplacement abrupt jusqu'à 10°N appelé « saut de mousson »

(Le Barbé *et al.*, 2002). Le cycle saisonnier de précipitation en Afrique de l'Ouest est caractérisé par un changement à partir du régime de double saison pluvieuse sur la côte Guinéenne, au régime de saison pluvieuse unique au Sahel (Lebel *et al.*, 2003; Sultan & Janicot, 2003; Le Lay & Galle, 2005). Ces constats impliquent un besoin à reconsidérer le schéma classique du modèle fixe des zones de migration nord et sud de la mousson. Le reste de l'année (octobre à mars) est marqué par la descente vers le sud de la mousson. Cette période correspond à la saison sèche ou encore non pluvieuse. Dans la région des Niayes du Sénégal, le cycle saisonnier des précipitations est donc modulé par la migration nord-sud de la mousson.

Les Lignes de Grains Africains (LGA). En Afrique de l'Ouest, les précipitations sont généralement de trois types : précipitations régulières et abondantes ou pluies de mousson; précipitations plus rares et plus localisées se produisant à la faveur d'orages locaux ; et lignes de grain, masses orageuses se déplaçant d'est en ouest (Mahé, 1993). Les événements pluvieux les plus importants en dehors des pluies de mousson sont les lignes de grain (Lebel & Le Barbé, 1997; Tapsoba, 1997). Ce sont des intrusions du flux d'est dans le flux de mousson, soulevant l'air humide en un front mobile le long duquel se produisent orages et averses (Leroux, 1996; Gnamien, 1990).

Les lignes de grains peuvent parfois ne pas provoquer des pluies, car elles n'utilisent que le potentiel qu'elles trouvent sur place. Ainsi, avant sa pénétration dans le flux de mousson, les pulsations d'alizé peuvent être responsables des tempêtes de sables (Leroux, 1996). L'importance climatique des lignes de grain au Sénégal s'explique par le fait qu'elles constituent les principales utilisatrices de l'humidité du flux de mousson aux latitudes Sahéliennes qui correspond à la position la plus septentrionale de la ZITC (Mahé, 1993).

1.2 Climat moyen de la région des Niayes

La subdivision du Sénégal en plusieurs régions climatiques, proposée par Moral (1966) puis par Leroux (1979) et plus tard par Le Borgne (1988) classe le littoral nord du Sénégal dans le domaine climatique sahélien sous influence océanique. Son originalité repose surtout sur l'influence des alizés maritimes et des courants océaniques qui atténuent les contrastes thermiques saisonniers du climat sahélien zonal. La région des Niayes possède donc un climat à caractère azonal qui s'estompe au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la côte.

Avant d'aborder en détail la variabilité des précipitations le long du littoral nord du Sénégal, une brève description du climat moyen des Niayes est présentée *via* le régime des paramètres climatiques tels que : la pluviométrie, la température, l'évaporation et l'évapo-transpiration, l'humidité relative et le vent. Ces paramètres climatiques jouent un rôle prépondérant dans le bilan hydrologique; leur description s'appuie sur des valeurs moyennes mensuelles voire annuelles disponibles. L'évolution de la précipitation est analysée à partir des cumuls pluviométriques annuels enregistrés aux stations météorologiques de Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis entre 1950 et 2004. Par contre, l'analyse des autres paramètres climatiques susmentionnés est faite suivant les séries de mesures réalisées à la station de Louga qui sont les seules rendues disponibles.

1.2.1 Les précipitations

Dans la région des Niayes, les précipitations sont enregistrées entre mai-juin et octobre. Suivant un gradient latitudinal, les hauteurs de pluie enregistrées varient entre 500 mm au Sud et 300 mm au Nord. Le reste de l'année (octobre à mai) est caractérisé par une quasi-absence de précipitations. Les quelques pluies enregistrées ne dépassent guère 50 mm au total. Ces pluies sont connues sous le nom de « pluies hors saison » ou « pluies de heug » et elles sont dues à des advections froides modulées par la température de l'océan (De Felice, 1992; Tapsoba, 1997).

L'évolution inter-annuelle de la pluviométrie au cours de la période concernée par la présente étude (1950-2004) est marquée par deux séquences contrastées. Entre les décades 1950 -1969 et 1970-1989, la moyenne pluviométrique annuelle a chuté du Sud au Nord de : 46 % à Dakar, 39 % à Thiès, 43.7 % à Louga et 35 % à Saint-Louis, soit une baisse moyenne régionale de plus de 41% (Tableau 1). Entre ces deux périodes, les amplitudes maximales sont enregistrées sur la façade méridionale de la région des Niayes à Dakar et à Saint-Louis (Tableau 1). Au-delà de la tendance à la baisse, l'analyse inter-annuelle de la pluviométrie fait ressortir le caractère aléatoire et discontinu des précipitations dans la région. Des précipitations déficitaires peuvent succéder à des précipitations excédentaires par rapport à la normale de 1961-1990. Par exemple, en 1989 et 1990, la station de Dakar a enregistré respectivement 802 mm et 156 mm de précipitations (Figure 3).

Tableau 1. Évolution des précipitations: 1950-1969 vs 1970-1989

Stations	Thiès	Dakar	Louga	Saint-Louis	Régionale
P₁: Moy. (mm) 1950-1969	710.2	609.7	497.4	345.2	540.6
P₂: Moy. (mm) 1970-1989	430	326.9	280.3	224.1	315.3
Amplitude (mm)	280.2	282.8	217.1	121.1	225.3
Pourcentage (%)	39	46	43.7	35	41

$$\text{Amplitude (mm)} = \text{Moyenne}_{P_2} - \text{Moyenne}_{P_1};$$

$$\text{Pourcentage (\%)} = (\text{Moyenne}_{\text{Période 2}} - \text{Moyenne}_{\text{Période 1}}) * 100 / \text{Moyenne}_{\text{Période 1}}$$

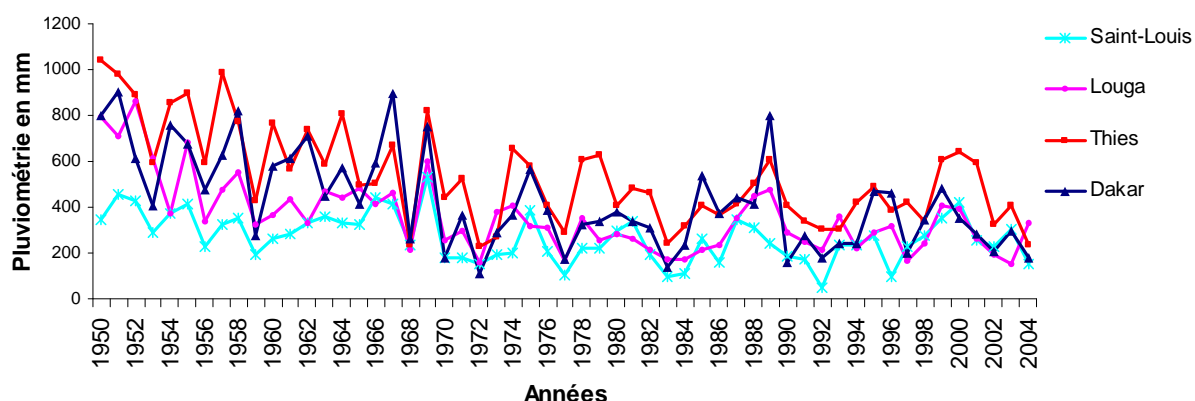


Figure 3. Évolution des cumuls pluviométriques annuels de 1950 à 2004 à Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis.

1.2.2 Les autres paramètres climatiques

La température moyenne annuelle dans la région des Niayes est marquée par un gradient longitudinal de la côte vers l'intérieur du pays passant de 24.5° C à Saint-Louis à 26.5° C à Louga. L'éloignement par rapport à l'océan Atlantique a pour conséquence l'augmentation des températures et des amplitudes thermiques. Les écarts de températures sont relativement faibles et ne dépassent rarement 7° C sur l'ensemble de l'année. Les températures minimums sont enregistrées au mois de janvier (22°C en moyenne dans la région). Les mois d'août, septembre et octobre correspondent en général aux mois les plus chauds, avec une moyenne de 30°C et coïncident avec l'arrivée de la mousson (Tableau 2).

L'humidité relative maximale varie entre 60 et 70% en juin, juillet et août alors que les valeurs minimales ne dépassent guère 30% entre décembre et février (Tableau 2). En raison de l'influence de l'alizé maritime, les valeurs d'humidité relative enregistrées dans les stations côtières sont relativement plus élevées que celles observées à l'intérieur du continent.

L'évaporation et l'évapotranspiration correspondent à des phénomènes de perte d'eau sous forme de vapeur. Les plus forts taux d'évaporation sont enregistrés pendant la

saison sèche et correspondent à la période de fortes insulations et de faible humidité relative. Les valeurs de l'évaporation oscillent entre 174 mm en septembre et 254 mm en mars.

Les variations de direction et de vitesse du vent découlent de la circulation générale de l'atmosphère dans la zone intertropicale. Selon les saisons, les vents soufflant sur le littoral sont d'origine et de direction variables. Le littoral nord est soumis aux vents de direction N-S d'origine océanique et continentale (harmattan) pendant la saison sèche, en opposition aux vents de secteurs S-N, d'influence guinéenne (mousson), pendant la saison des pluies. Les moyennes mensuelles de vitesses des vents mesurées à 2 m du sol sont faibles et ne dépassent pas 5 m.s^{-1} à Louga (Tableau 2).

La permanence et la vitesse des vents contribuent actuellement de façon active à la dégradation du milieu par l'ensablement progressif de la plupart des bas-fond des Niayes (BRGM, 1984). La fraîcheur et l'humidité de l'air de décembre à avril sont par contre très favorables à la production maraîchère et fruitière (Tall & Fall, 2001).

Tableau 2. Paramètres climatiques à la station de Louga (1972-2001)

	Années	Jan.	Fév.	Ma.	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy.
Température Moyenne (°C)	1972-2001	22	23	24	25	26	27	27	29	31	30	28	26	26.5
Évaporation (mm)	1991-2000	229	238	254	233	237	201	208	186	174	197	207	209	214.4
Humidité Relative (%)	1991-2000	27	25	32	43	52	63	66	68	65	49	31	28	46
Insolation (h)	1991-2000	6	7	8	9	8	5	6	7	7	8	7	6	7
Vitesse du vent (m.s^{-1})	1991-2000	4	4	5	5	5	5	5	4	4	4	3	4	4.33

1.3 Les facteurs de la variabilité climatique

Depuis la fin des années 1960, et surtout au début des années 1970, plusieurs théories ont été avancées pour expliquer l'occurrence et la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest et dans la bande Sahélienne. Certaines explications ont été d'ordre

purement météorologique ou océanique (Température de Surface Océanique) (Dhonneur, 1985; Janicot, 1992; Hastenrath *et al.*, 1987; Zheng *et al.*, 1998) *via* notamment le phénomène El Niño (Delecluse *et al.*, 1994; Nicholson & Kim, 1997; Janicot *et al.*, 1999; Rowell, 2003; Messenger *et al.*, 2004). D'autres études enfin ont mis l'accent sur les processus de rétroaction associés à la modification de la couverture du sol (albedo) (Charney, 1975; Norton *et al.*, 1979; Kandel & Courel, 1984; Xue & Shukla, 1993; Nicholson *et al.*, 1998; Zheng & Eltahir, 1998), à l'orographie (Semazzi & Sun, 1997) ou aux poussières atmosphériques (Pinker *et al.*, 1994; Prospero, 1996; N'tchayi Mbourou *et al.*, 1997).

1.3.1 Les facteurs océaniques

1.3.1.1 Téléconnections: El Niño Southern Oscillation et précipitations⁶

Plusieurs travaux, basés sur des Modèles de Circulation Générale atmosphérique (Trzaska *et al.*, 19962; Janicot *et al.*, 1999), ont testé l'impact des événements El Niño sur la mousson et donc sur les précipitations en Afrique de l'Ouest. D'après les résultats de ces études, un événement El Niño provoque un déficit de précipitations sur le Sahel suite à la réduction de l'advection de la vapeur d'eau qui accentue le déficit pluviométrique (Hastenrath *et al.*, 1987; Wolter, 1989; Ward, 1992; Janicot *et al.*, 1999). D'autres études ont au contraire montré l'absence de liens statistiquement significatifs entre le phénomène El Niño et la pluviométrie (Ropelewsky & Halpert, 1989; Nicholson & Kim, 1997).

1.3.1.2 Température de Surface Océanique et précipitations

Par son exposition le long de la côte Atlantique, l'Afrique de l'Ouest est très influencée par les masses d'air d'origine océanique. De nombreux auteurs ont tenté de relier directement les Températures de Surface Océanique (tant à l'échelle Globale

⁶ Réchauffement intermittent des eaux de surface dans la zone du Pacifique entraînant un déplacement

qu'au niveau de l'océan Atlantique tropical) aux variations des précipitations en Afrique (Trzaska *et al.*, 1996b; Zheng *et al.*, 1998). Plus spécifiquement, l'étude de la variabilité climatique, s'appuyant sur l'analyse régionale d'indices représentatifs de la pluviométrie a permis à Moron (1994) de construire des schémas spatio-temporels de déficits et d'excédents pluviométriques en Afrique de l'Ouest. Parmi les multiples facteurs évoqués pour expliquer la configuration des champs pluviométriques dans cette région, un rôle important a été accordé à l'océan Atlantique tropical. Selon Bah (1987) et Janicot (1992), l'apparition d'un déficit pluviométrique au Nord de 10°N et d'un excédent au Sud coïncide avec le réchauffement des eaux de surface du Golfe de Guinée. Dans ce contexte, un déficit pluviométrique observé le long du littoral nord du Sénégal pourrait correspondre à un refroidissement des eaux de surface de l'océan Atlantique tropical.

1.3.2 Les principaux facteurs continentaux

1.3.2.1 Variation de la couverture du sol : l'albédo

Selon le mécanisme de Charney (1975), l'accroissement de l'albédo au Sahel provoque des mouvements subsidents. Le déficit énergétique qui en découle favorise la descente des masses d'air au dessus de la région qui inhibe à son tour les précipitations. Il s'ensuit alors une baisse significative de la pluviométrie régionale. Ce schéma suggère un mécanisme de rétroaction positive par lequel la sécheresse pourrait s'auto-accélérer ou pourrait se produire suite à l'augmentation de la déforestation et du surpâturage (Kandel & Courel, 1984). Des recherches similaires ont été reprises par de nombreux auteurs (Xue & Shukla, 1993; Xue, 1997; Zheng & Eltahir, 1998) tendant à prouver que les changements de la couverture végétale provoqués entre autres par la déforestation, influencent une diminution des précipitations de mousson.

des précipitations vers l'est du pacifique et empêchant la remontée d'eau froide (Trzaska *et al.*, 1961).

En considérant que le potentiel précipitable issu de l'océan soit précipité puis évaporé par la végétation (évapotranspiration), il est alors possible de supposer qu'une densité moindre de la couverture végétale peut effectivement entraîner une baisse des précipitations dans la région des Niayes du Sénégal. Selon diverses estimations, le couvert forestier recycle entre 60 et 75% des pluies annuelles, tandis que les savanes ou les surfaces cultivées annuellement ne recyclent que 45 à 55% des pluies tombées (Pélissier, 1980).

1.3.2.2 Effets des poussières atmosphériques

Les travaux de Pinker *et al.* (1994) et N'tchayi Mbourou *et al.* (1997) ont mis en évidence une distribution saisonnière des poussières atmosphériques au dessus du Sahel. À partir de ces analyses, il apparaît (i) qu'il existe une croissance régulière de la fréquence des soulèvements de poussière en Afrique de l'Ouest depuis le début de la sécheresse actuelle (1970), (ii) que cette croissance est parallèle à la tendance à la baisse de la pluviométrie et (iii) que la durée (en jours) des saisons avec conditions poussiéreuses est de plus en plus longue. Selon Prospero (1996), il existe une corrélation entre la pluviométrie au Sahel, les poussières transportées à travers l'océan Atlantique tropical nord et la migration du panache de poussière. En utilisant un modèle méso-échelle, Karyampudi et Carlson (1988) ont réalisé des simulations de soulèvement de poussières. Selon leurs résultats, la couche poussiéreuse est importante pour le maintien et la croissance de quelques ondes de turbulence d'où son influence négative sur la pluviométrie au Sahel et plus précisément sur le littoral nord du Sénégal au dessus duquel transite le panache de poussière. La poussière est un véritable absorbant de radiation d'onde courte, pouvant provoquer un réchauffement de l'atmosphère de type Gaz à effet de serre au moins localement et ainsi modifier les dynamiques atmosphériques (Tengen *et al.*, 1996).

1.3.2.3 L'orographie

Les zones de relief constituent un terrain privilégié pour l'initiation de systèmes convectifs susceptibles d'évoluer en ligne de grains. C'est en s'opposant aux flux humides des basses couches qu'un relief peut créer des ascendances suffisantes pour empêcher ou générer des pluies (Tapsoba, 1997; Mathon & Laurent, 2001). Le flux de la mousson entraîne une organisation latitudinale des précipitations qui peut être localement perturbée par l'orographie. Cependant, dans la région du littoral nord du Sénégal, l'altitude maximale ne dépasse pas 130 m. Les perturbations d'origines orographiques sont donc quasi-inexistantes à l'échelle de la région des Niayes même si, à une plus petite échelle, le modèle de simulation proposé par Semazzi et Sun (1997) intègre le rôle possible des montagnes des Atlas (Maroc) et du massif du Hoggar (Sahara algérien) sur la circulation atmosphérique de la région sahélienne. Ces montagnes sont situées à des latitudes un peu éloignées de la branche descendante de la cellule de Hadley. Il n'est pas à exclure que ce trait unique de la topographie ouest-africaine (septentrionale) puisse interagir avec les conditions d'équilibre contrôlant la circulation de la mousson en cas de modification significative et durable de la circulation atmosphérique globale (Semazzi & Sun, 1997).

1.3.3 Conclusion partielle

La variabilité spatio-temporelle des précipitations le long du littoral nord du Sénégal découle de plusieurs facteurs à la fois externes (Température de Surface Océanique, El Niño) et internes (couverture végétale au sol, poussières atmosphériques, etc) au continent africain. Cependant, aux différentes échelles temporelle et spatiale, correspondent des phénomènes climatiques différents. À l'échelle ouest-africaine, les Températures de Surface Océanique peuvent jouer un rôle primordial dans la variabilité inter-annuelle des précipitations. Cependant, l'énergie associée à ce phénomène peut être perturbée à l'échelle du littoral nord du Sénégal par les facteurs

atmosphériques ou continentaux à l'exception de l'orographie. Toutefois, les relations entre les précipitations et un ou deux facteurs ne peuvent expliquer la totalité de la variabilité climatique. La compréhension de cette dernière nécessite l'analyse de plusieurs paramètres pour des situations pluviométriques contrastées. À l'heure actuelle, la communauté scientifique s'accorde pour dire que la variabilité décennale du climat en Afrique de l'Ouest serait pilotée par des variations de températures de surface de l'océan modulées par des processus de surface continentaux capables d'accentuer le signal climatique d'origine océanique. Les réponses à ces processus climatiques ainsi que leurs résultantes (les précipitations) interviennent à l'échelle régionale, voire locale, et nécessitent d'être étudiées avec précision afin de prendre en compte les nombreuses hétérogénéités de leur distribution spatiale et temporelle.

CHAPITRE II:

VARIABILITÉ DES PRÉCIPITATIONS

ENTRE 1950 ET 2004

Le chapitre précédent fait d'abord ressortir la particularité climatique du littoral nord du Sénégal qui se caractérise surtout par un climat à caractère azonal du fait de l'influence océanique. Par la suite, différents facteurs de variabilité climatique qui peuvent influencer la dynamique de la mousson et l'occurrence des précipitations dans cette région ont été présentés.

Afin de caractériser le régime pluvial du littoral nord Sénégalais dominé comme dans le reste du Sahel par de petits nombres d'événements pluvieux à caractère convectifs, une étude détaillée des précipitations à l'échelle quotidienne a été proposée. Elle est faite *via* l'analyse des tendances et des anomalies de quelques indices de variabilité de précipitation pour les quatre stations météorologiques dites synoptiques de la région des Niayes (Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis). Cette analyse a permis de mettre en évidence l'intensité, la durée et la fréquence des événements pluvieux, mais également les extrêmes de précipitations et de jours secs consécutifs compte tenu de leurs effets majeurs sur les ressources en eau de la région. La variation mensuelle des différents indices en année de pluviométrie excédentaire (1950) et déficitaire (2004) ainsi que la contribution de chaque mois à la précipitation totale annuelle ont également été étudiées.

L'étude de la variation saisonnière des précipitations, à l'échelle quotidienne, est d'autant plus intéressante que l'impact hydrologique de la variabilité climatique dans la région des Niayes est fortement dépendant de leur distribution spatio-temporelle. Une caractérisation fine du signal saisonnier des précipitations est donc un préalable indispensable à la quantification de la réponse hydrologique à la variabilité du climat.

Variabilités inter-annuelles et intra-saisonnières des précipitations le long du littoral nord du Sénégal entre 1950 et 2004.

Aguiar, Lazar A. A¹; Gachon, Philippe²; Garneau, Michelle¹;
Lézine, Anne-Marie³.

¹ Université du Québec à Montréal / GEOTOP-UQAM-Mc Gill / Ouranos,

² Environnement Canada @ Université Mc Gill,

³ CNRS-LSCE, Paris, France.

Article soumis à

Hydrological Sciences Journal

Le 21 juillet 2008

1.1 Résumé

Compte tenu des effets majeurs sur les ressources en eau, la sécurité alimentaire des populations et les écosystèmes de la région sahélienne d'Afrique de l'Ouest, les fluctuations actuelles du régime des précipitations sont essentielles à comprendre afin de tenter d'en appréhender la dynamique future. Ceci est d'autant plus important dans des régions ayant un rôle économique majeur, comme c'est le cas pour la zone des Niayes dans le littoral Nord du Sénégal, qui a été affectée par les sécheresses récentes, notamment *via* la variabilité et les extrêmes de précipitations. Afin d'établir les liens entre les fluctuations du régime hydrique et la dynamique des Niayes, une analyse détaillée de la variabilité inter-annuelle et intra-saisonnière du régime de précipitations sur la période 1950 à 2004 a été réalisée. Cette analyse a été faite à partir de l'utilisation de quelques indices permettant de déterminer les changements survenus dans l'intensité, la durée et la fréquence des événements pluvieux. À partir des séries quotidiennes de quatre stations d'observation, les tendances saisonnières et les anomalies inter-annuelles ont été analysées. Les résultats démontrent que le déficit pluviométrique enregistré dans la région depuis la fin des années 1960 est lié à une réduction significative du nombre de jours pluvieux de 2j/10 ans, et à une hausse concomitante du nombre maximum de jours secs consécutifs de 4j/10 ans au cours de la saison de mousson. Le nombre de jours dépassant les fortes valeurs de précipitations (par rapport au 90^e centile de référence) ainsi que les précipitations maximales cumulées sur trois jours, ont également subi une baisse, mais de façon moins nette et systématique que dans le cas des jours de pluie. De telles observations, en plus de la réduction de la durée de la saison pluvieuse qui passe en moyenne de cinq mois à trois mois, sont observables sur les anomalies calculées à l'échelle intra-annuelles de l'année.

Mots clés : Variabilité climatique, précipitations, indices, Sénégal, Niayes.

1.2 Summary

Taking into account their major effects on the water resources, the food security and the ecosystems of West Africa's Sahel region, it is essential to analyse the current rainfall regime fluctuations in order to understand the future dynamic. This is especially important in regions with an important economic and ecologic role, (like the Niayes area in the northern coast of Senegal) which has been affected by the recent drought, particularly in variability and precipitation extremes. In order to establish the relationship between the fluctuations in the water regime and the Niayes' dynamics, a detailed analysis of the inter-annual variability and intra-seasonal rainfall regime was carried out for the years 1950 to 2004. The analysis was made from the use of a few indices to determine what changes have occurred in the intensity, duration and frequency of rain events. The daily series of four observation stations were used to analyze seasonal trends and inter-annual anomalies. The results show that the rainfall deficit registered in the region since late 60's is linked to a significant reduction in the number of rainy days 2j/10 years, and a simultaneous increase in the maximum number of consecutive dry days 4j/10 years during the monsoon season. The number of days exceeding the strong values of precipitation (compared to the 90th percentile reference) and the maximum cumulative rainfall over three days, have also suffered a decline, but in a systematic way than in the case of rainy days. Such observations, in addition to reducing the duration of the rainy season which on average goes from five to three months, are remarkable on anomalies calculated at the intra-annual of the year.

Key words: Climate variability, Precipitations, Indices, Senegal, Niayes.

1.3 Introduction

Au cours des dernières décennies, le Sahel a subi une récurrence marquée des sécheresses entraînant une baisse des ressources en eau disponibles dont dépendent fortement les principales activités socio-économiques de la région (Le Barbé & Lebel, 1997; Nicholson *et al.*, 2000; Hulme *et al.*, 2001; Le Barbé *et al.*, 2002; Le Lay & Galle, 2005; Sultan *et al.* 2005; Gachon *et al.*, 2007). Les causes avancées sont associées aux changements dans l'occupation du sol ou la déforestation (Charney, 1975; Courel *et al.*, 1984; Xue & Shukla, 1993; Zheng & Eltahir, 1998), à la variabilité de la Température de Surface Océanique (TSO) dans l'Atlantique Nord et Sud ou dans le Pacifique *via* notamment les téléconnections potentielles avec le phénomène El Niño (Janicot *et al.*, 1999; Rowell, 2003; Messenger *et al.*, 2004), à la variation de la vitesse des courants jets atmosphériques (Kanamitsu & Krishnamurti, 1978; Sultan & Janicot, 2003) ou à la concentration de poussières atmosphériques (Pinker *et al.*, 1994; Prospero, 1996; N'tchayi Mbourou *et al.*, 1997).

Il s'en est suivi une baisse générale de la disponibilité des ressources en eau avec en particulier l'assèchement de certaines zones humides comme les Niayes dont dépendent les principales activités agricoles. Les revenus des paysans ont alors chuté d'environ 40% entre les décennies 1970 et 1980, accentuant les conditions de pauvreté endémique des populations et favorisant l'exode rural (Aguiar, 2002).

Même si certaines études ont permis d'analyser de façon détaillée la variabilité inter-annuelle et le cycle de la mousson africaine (Folland *et al.*, 1986; Le Barbé & Lebel, 1997; Sultan & Janicot, 2000; Janicot *et al.*, 2001; Le Barbé *et al.*, 2002; Lebel *et al.*, 2003; Sultan & Janicot, 2003; Neil *et al.*, 2005), les fluctuations intra-annuelles durant la saison des pluies et leurs influences sur le cycle hydrologique et les ressources en eau disponibles, ont été peu étudiées. En particulier, l'effet de la variabilité climatique issue de la distribution saisonnière des événements de précipitations sur le bilan hydrologique, non pas seulement fonction du cumul total à

l'échelle saisonnière ou annuelle, est encore à établir. Ceci requiert l'utilisation de données quotidiennes voire horaires et d'indices climatiques permettant de caractériser l'occurrence, l'intensité et la durée des événements de pluie, et notamment des extrêmes. L'objectif de cette étude est donc de mettre en évidence les fluctuations intra-saisonnières et inter-annuelles du régime pluviométrique sur le territoire des Niayes au Sénégal à partir des données quotidiennes et d'indices de variabilité de précipitation. Il s'agit d'analyser (i) les tendances observées de ces indices sur toute la période de mousson d'avril à octobre au cours des années 1950 à 2004, (ii) la variabilité inter-annuelle ou les anomalies normalisées de ces indices et (iii) la variabilité intra-saisonnière de ces indices établis sur une base mensuelle pour les deux années humide/sèche de 1950/2004, respectivement.

1.4 Région d'étude et données utilisées

Le littoral Nord du Sénégal qui correspond à la bordure occidentale du Sahel est situé entre 14.3° et 16°N et entre 16° et 17.5°W, et couvre une superficie d'environ 2300 km². La topographie est marquée par la présence de dunes sableuses et du plateau de Thiès dont l'altitude maximale ne dépasse pas 130 m au dessus de niveau moyen de la mer (Figure 1). Entre les dunes de sable, la présence d'une nappe phréatique dans des dépressions humides appelées « Niayes » combinée à un climat doux côtier, favorise le maintien de reliques forestières d'affinité phytogéographique guinéenne dominées par le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) (Trochain, 1940), mises en place dès le début de l'Holocène (Lézine, 1987). En dehors de ces zones humides, la végétation régionale se caractérise par la présence de savane et d'une pseudo-steppe sahélienne. La proximité de l'océan favorise la pénétration de masses d'air « fraîches » d'origine océanique, favorisant des températures moyennes annuelles relativement peu élevées le long du littoral (ex. 24.5°C à Saint-Louis) par rapport à l'hinterland (ex. 26.5°C à Louga). Le littoral nord du Sénégal possède donc un caractère climatique qui tranche avec le climat sahélien plus continental. Son

régime pluviométrique est caractérisé par une saison pluvieuse qui s'étale entre les mois de juin et octobre. Les cumuls annuels de précipitations diminuent du Sud vers le Nord, soit en moyenne de 500 mm à moins de 300 mm.

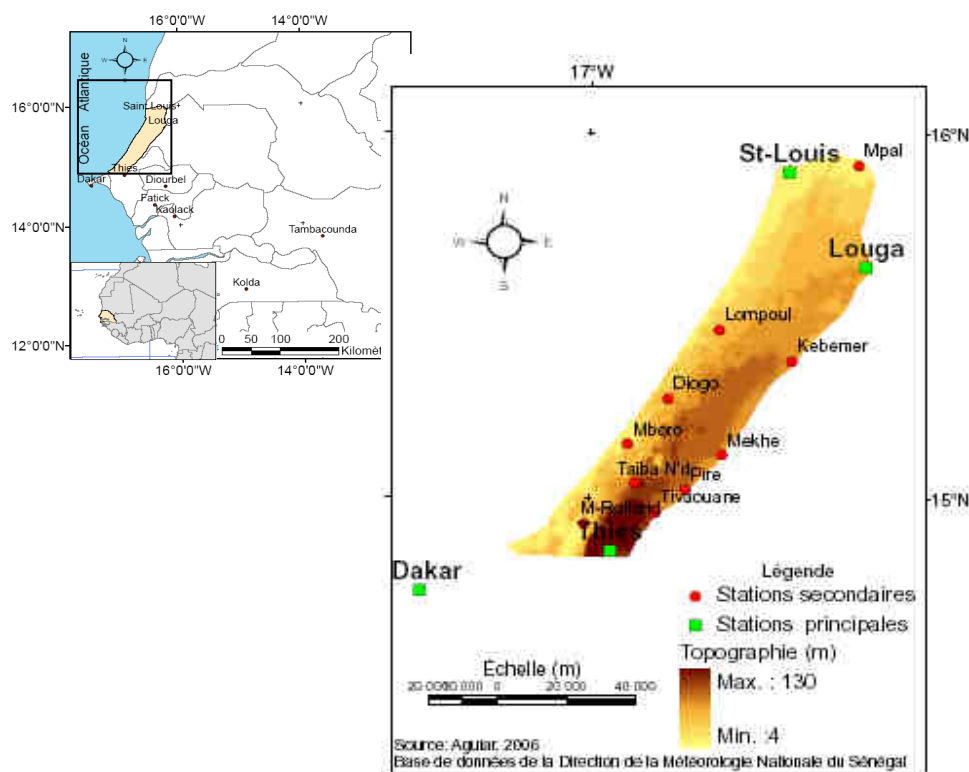


Figure 1. Localisation de la zone d'étude et des stations météorologiques.

Les données observées de précipitations quotidiennes utilisées proviennent de la Direction de la Météorologie Nationale du Sénégal (DMNS), qui en a assuré le contrôle de qualité (i.e. réduction le plus possible des données manquantes et suppression des valeurs aberrantes). Parmi les stations météorologiques disponibles (16), seules les quatre stations synoptiques de Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis ont été utilisées dans cette étude (Figure 1). Celles-ci ont enregistré moins de 20 % de données manquantes pour chacun des mois considérés entre avril et octobre. La

période 1950-2004 a été choisie afin de caractériser le changement du régime des précipitations entre la période «humide» (avant 1970) et la période «sèche» (après 1970), déjà identifiées dans diverses études (Hubert *et al.*, 1989; Aondover & Woo, 1998; Nicholson *et al.*, 2000).

1.5 Méthodologie

L'analyse de la variabilité des précipitations est faite suivant la période de référence 1961-1990 pour définir la « normale » climatique conformément aux analyses récentes sur la variabilité et les changements climatiques (OMM, 2003; IPCC, 2007). Cette période de référence fait également ressortir la variabilité climatique avant et après la période dite « de rupture climatologique de l'année 1970 » qui constitue une « année charnière » dans l'évolution récente du climat en Afrique de l'Ouest (Hubert *et al.*, 1989; Aondover & Woo, 1998). La précipitation moyenne saisonnière ou mensuelle est également analysée en terme de cumul moyen par jour, au seuil de 1 mm. Ce seuil est fixé pour définir les jours humides *vs* secs et éviter les erreurs sur les faibles valeurs de précipitations sans effet sur la recharge des nappes compte tenu de la forte évaporation / évapotranspiration en région sahélienne (Oguntunde, 2004).

1.5.1 Indices de précipitations

Six indices établis à partir des cumuls quotidiens de précipitations ont été retenus (Tableau 1, Annexe 1) parmi les indices régulièrement utilisés pour caractériser la variabilité et les extrêmes de précipitations dans différentes régions, soit en Europe, Asie, Afrique (Karl *et al.*, 1999; STARDEX, 2003; ETCCDMI, 2003; IPCC, 2007), et en particulier au Sahel (Gachon *et al.*, 2007). Ceux-ci sont utilisés pour mettre en évidence: (i) l'occurrence des jours de pluie ou la durée maximum des séquences sèches (Prcp1 et CDD, respectivement), (ii) l'intensité moyenne par jour de pluie (SDII) et (iii) la fréquence des extrêmes *via* le maximum de précipitations sur 3 jours consécutifs (R3days) et le nombre de jours qui dépassent le 90^e centile de référence

(calculé sur une période normale de 30 ans, R90N). Ces indices permettent de caractériser les événements de précipitation selon leur fréquence, leur intensité et la récurrence de certains extrêmes.

Tableau 1. Indices de variabilité de précipitations définis à partir des données quotidiennes.

Indice	Catégorie	Définition	Unité
Prcp1	Fréquence	Nombre de jours avec précipitations (seuil 1 mm)	%
SDII	Intensité	Intensité moyenne de la précipitation calculée sur les jours avec précipitation	mm/jour
CDD	Durée	Nombre maximum de jours secs consécutifs (précipitation < 1 mm)	jours
R3days	Extrême	Maximum de la précipitation cumulée sur 3 jours consécutifs	mm
R90N	Extrême	Nombre de jours avec quantité de précipitations supérieures au 90 ^e centile calculé sur la période climatologique de 1961-1990	%
MOY	Intensité	Précipitation moyenne quotidienne	mm/jour

1.5.2 Calcul des tendances et des anomalies inter-annuelles

Deux méthodes statistiques non paramétriques ont été utilisées pour identifier les tendances et quantifier celles-ci sur toute la période de 1950 à 2004: le test «tau» de Kendall (1968) afin de mettre en évidence la probabilité d'une tendance significative au seuil de 5%, et la méthode de Sen (1968) pour quantifier la tendance lorsque celle-ci est statistiquement significative. Le test tau de Kendall permet de mettre en évidence la liaison entre deux variables, soit dans notre cas, les indices considérés (Tableau 1) et le temps. Ce test est approprié pour l'identification des tendances sur les valeurs extrêmes que les tests paramétriques classiques (i.e moindres carrés), car les valeurs individuelles ne sont pas prises en compte, seulement la direction de la variation (positif ou négatif). Par conséquent, il est moins sensible aux valeurs singulières (Sen, 1968; Kendall, 1968; STARDEX, 2003).

Les tests statistiques de tendances sont réalisés sur la période d'avril à octobre. Bien que la saison de mousson s'étale du mois de mai à octobre, l'essentiel des précipitations s'observe généralement entre le mois de juin à septembre. Toutefois, de

rares événements de précipitations intenses peuvent ponctuer le début de la saison des pluies, notamment au cours du mois d'avril à Dakar (Gachon *et al.*, 2007). C'est pourquoi, les mois d'avril et mai sont considérés en plus des mois pluvieux de juin à octobre.

Pour chaque indice de précipitations défini au tableau 1, les anomalies inter-annuelles sont établies pour toute la période 1950 à 2004 et normalisées par rapport à la période de référence de 30 ans (1961-1990). L'utilisation de la valeur normalisée permet de comparer sur une même base les anomalies des indices entre eux et entre les stations, compte tenu de la forte variabilité temporelle et spatiale des précipitations (Rossel & Garbrecht, 2000). Par la suite, les fluctuations mensuelles des indices sont analysées sur deux années typiques d'excédent et de déficit pluviométrique, soit le début et la fin de la période d'analyse (1950 et 2004, respectivement).

Des « box-plots » ou « diagrammes à moustache » sont utilisés par la suite afin de mettre en évidence les variations de la contribution de chaque mois à la précipitation totale annuelle pour l'ensemble de la période de 1950 à 2004. Le niveau de corrélation entre le mois le plus pluvieux et le cumul annuel de précipitations est estimé à partir de la droite de régression et du coefficient de corrélation.

1.6 Résultats



1.6.1 Tendances des indices de précipitations

Le tableau 2 présente les valeurs moyennes climatologiques et les tendances décennales des indices pour les quatre stations, sur toute la période d'avril à octobre. Dans les stations du Sud (Dakar et Thiès), les valeurs des précipitations moyennes, des fréquences de jours de pluie, des intensités moyennes et maximum sur 3 jours, sont plus élevées que celles au Nord (Louga et Saint-Louis). Par exemple, les intensités moyennes par jour de pluie sont respectivement de 15.5 et 14.9 mm/jr de pluie à Thiès et Dakar, et de 14.2 et 13.5 mm/jr de pluie à Louga et Saint-Louis,

confirmant l'existence d'un gradient pluviométrique du Sud vers le Nord. Dans l'ensemble, les précipitations moyennes journalières indiquent une tendance significative à la baisse pour toutes les stations, variant entre -0.1 et -0.4 mm/j par décennie. Le pourcentage de jours humides subit également une diminution systématique de l'ordre de -1 % à -2 % par décennie du Nord vers le Sud et le maximum de jours secs consécutifs augmente de 3.7 à 4.7 jours, sauf pour la station de Saint-Louis où l'accroissement de plus de 2 jours/décennie est non significatif.

Tableau 2. Moyenne sur 30 ans et tendances décennales des indices de précipitations, établies sur la période de 1950 à 2004.

Stations	Lat. / Long.	MOY. (mm/j)		Prcp1 (%)		SDII (mm/j)		CDD (j)		R3days (mm)		R90N (%)	
		1961-1990	Tend. / 10 ans	1961-1990	Tend / 10 ans	1961-1990	Tend/ 10 ans	1961-1990	Tend / 10 ans	1961-1990	Tend / 10 ans	1961-1990	Tend/ 10 ans
Saint-Louis	16.10N - 16.30 W	1.2	-0.1	8.9	-1.2	13.5	0.3	90.8	2.3	68.3	-3.3	10.2	0
Louga	15.36N - 16.12 W	1.5	-0.3	10.4	-1	14.2	-0.8	81.5	3.7	71	-8.5	11.3	-1.3
Thiès	14.48 N - 16.55 W	2.3	-0.4	14.3	-2	15.5	-0.4	83.8	4.3	95.5	-8.8	10.2	-0.6
Dakar	14.39N - 17.25 W	1.9	-0.3	12.4	-2.1	14.9	-0.4	86.5	4.7	94.6	-11.7	10.5	-1.2
Moyenne		1.7	-0.3	11.5	-1.6	14.5	-0.3	85.7	3.8	82.4	-8.1	10.6	-0.8

Tendances significatives  et Tendances non significatives  au seuil de signification de 5%.

Ainsi, la sécheresse persistante observée ces trois dernières décennies se traduit non seulement par une baisse de la moyenne quotidienne des précipitations, mais également par une rareté des événements pluvieux au cours de la saison de mousson. Sur l'ensemble de la région, la quantité moyenne de précipitations quotidiennes, le pourcentage de jours de précipitations et le nombre maximum de jours secs consécutifs ont subi des changements plus marqués au Sud (Dakar et Thiès) qu'au Nord (Louga et Saint-Louis), réduisant ainsi les différences entre les extrémités méridionale et septentrionale de la région. Un «nivellement» progressif des hauteurs de précipitations est donc suggéré dans la région pour l'ensemble de la période analysée. Par ailleurs, le maximum de jours secs consécutifs tient compte des mois d'avril et de mai, durant lesquels les précipitations sont plutôt rares par rapport aux

mois généralement pluvieux de juin à octobre. Les fluctuations de cet indice reflètent donc les changements dans la longue séquence sèche qui précède la période des pluies proprement dite (85 jours environ sur le territoire, en moyenne climatologique). Par conséquent, les tendances positives du CDD, statistiquement significatives à Louga, Thiès et Dakar, suggèrent un retard dans l'avènement des premières pluies (>1 mm) au début de la période d'hivernage. Ceci semble confirmer l'hypothèse d'un recul progressif du début de la saison pluvieuse depuis la fin des années 1960. Par exemple en 1983, la station de Saint-Louis n'a enregistré sa première pluie que le 13 juillet. Toutefois, la prise en compte non seulement des quantités significatives de pluie au début de la saison de mousson, mais également de leur durée et de leur distribution au cours des premiers mois d'installation de la mousson, est nécessaire pour établir avec certitude un retard ou une dégradation majeure du début de la saison pluvieuse. Un indice qui intègre ces trois facteurs (intensité, durée et fréquence des événements pluvieux significatifs) est requis pour analyser la date de début/fin et la longueur de la saison des pluies, comme le suggèrent Liebmann et Marengo (2001) ou Parishkura (2008).

Quant à la baisse de l'intensité moyenne de pluie par jour, bien qu'observée pour trois stations, n'est statistiquement significative que pour deux d'entre elles (i.e. Louga et Thiès avec une diminution respective de -0.8 à -0.4 mm/jr de pluie). La station de Saint-Louis est la seule à présenter une légère augmentation de cet indice (i.e. SDII) toutefois non significative au seuil de 5% (0.3 mm/j). Contrairement à la baisse de la précipitation moyenne quotidienne et du pourcentage de jours pluvieux, la diminution de l'intensité des précipitations est donc moins systématique et homogène. Les changements dans l'intensité des précipitations ne correspondent pas à l'évolution spatiale du nombre de jours pluvieux du Sud vers le Nord. En effet, Louga a subi la plus forte baisse d'intensité moyenne par jour de pluie, alors que la fréquence de jours pluvieux y est moins importante. Pour la station de Saint-Louis, la baisse de la précipitation moyenne quotidienne et du nombre de jours de pluie ne coïncide pas avec une baisse de l'intensité moyenne.

La quantité maximum des précipitations cumulées sur trois jours consécutifs est également en baisse de -8.5 mm à Louga et -11.7 mm à Dakar. Seule la station de Saint-Louis a enregistré une tendance non significative (-3.3 mm par décennie). Les extrêmes de précipitation, exprimés en nombre de jours dépassant le 90^e centile de référence, varient peu avec deux tendances non significatives à Thiès et à Saint-Louis. Ailleurs, la baisse du nombre de jours de précipitations extrêmes est de l'ordre de -1.2 % par décennie (Tableau 2).

La baisse des précipitations observée au cours de la période 1950 à 2004 est donc liée à la diminution du nombre de jours de pluie, plutôt qu'à une baisse marquée des fortes précipitations. Toutefois, les tendances à la baisse des extrêmes (R3days et R90N) s'observent lorsque les tendances négatives sont les plus importantes pour la précipitation moyenne et l'intensité par jour de pluie. Les plus fortes baisses de ces indices sont généralement enregistrées dans le Sud de la région.

1.6.2 Anomalies inter-annuelles normalisées des indices de précipitations

Les Figures 2 à 7 montrent les anomalies inter-annuelles normalisées pour chaque indice, ainsi que la moyenne mobile sur 11 ans permettant d'évaluer les fluctuations décennales au cours de la période 1950-2004. La figure 2 présente l'évolution des anomalies de la moyenne saisonnière des précipitations quotidiennes, et suggère des anomalies majoritairement positives entre 1950 et 1970, et le plus souvent négatives au-delà. La moyenne mobile suggère également des moyennes décennales plus faibles au cours des trois dernières décennies. Entre les périodes 1950-1969 et 1970-1989, la pluviométrie moyenne quotidienne des quatre stations a baissé d'environ 40%. Seules les années 1975, 1989, 2000 et 2001 apparaissent comme étant les « plus pluvieuses » depuis la fin des années 1960. Comme en témoignent les fortes anomalies positives dans les années 1950 et 1960, les stations de Louga et de Thiès ont enregistré les plus forts excédents en terme de précipitation moyenne quotidienne. Toutefois, pour toutes les stations, la décennie 1990 correspond à une persistance des

années sèches surtout entre 1990 et 1994. Par conséquent, la «reprise pluviométrique» au cours des années 1990, avancée par certains auteurs (Ozer *et al.*, 2003), a été brève et ne semble se manifester qu'à la fin de celle-ci dans la région des Niayes. À ce sujet, L'Hôte *et al.* (2003) considèrent que la période sèche n'est actuellement pas terminée au Sahel, même si Balme *et al.* (2005) distinguent ces dernières années de la sécheresse généralisée des décennies 1970 et 1980.

Dans l'ensemble, les anomalies du nombre de jours pluvieux suivent de façon quasi-synchrone les fluctuations inter-annuelles des moyennes quotidiennes précédemment analysées (Figures 2 et 3). Les minima d'occurrence de jours pluvieux correspondent généralement aux années de pluviométrie moyenne déficitaire, en particulier pour les années 1972, 1977, 1984 et entre 1990 et 1994. Toutefois, comme le suggère la figure 4, les anomalies inter-annuelles de l'intensité moyenne par jour de pluie ne suivent pas nécessairement les fluctuations des cumuls quotidiens moyens et du nombre de jours de pluie. En particulier à Saint-Louis, les intensités moyennes enregistrées en 1989, 1995 et 2001 sont les plus fortes de toute la série, contrairement à la moyenne quotidienne et à l'occurrence des jours humides. Les anomalies de l'intensité moyenne par jour de pluie pour ces années sont par contre quasi inexistantes, dans les autres stations de la région des Niayes. Les moyennes mobiles confirment l'absence de tendances statistiquement significatives pour Dakar et Saint-Louis. Pour cette dernière, une légère tendance à la hausse semble due aux fortes anomalies positives des années 1989, 1995 et 2001 dans un contexte de forte diminution des intensités de précipitation à la fin des années 1980 et durant les années 1990. Les plus fortes anomalies négatives sont enregistrées à Louga et durant les années 1990 et de 2001 à 2003, alors que les plus fortes variations inter-annuelles positives l'ont été à la station de Saint-Louis. Ces résultats confirment que les tendances à la baisse des précipitations moyennes sont beaucoup plus la conséquence d'une diminution dans l'occurrence du nombre de jours pluvieux au cours de la saison de mousson, que d'une baisse dans l'intensité moyenne des jours de pluie.

La figure 5 montre l'évolution du nombre maximum de jours secs consécutifs. La moyenne mobile décennale fait ressortir des anomalies négatives avant les années 1970 et le plus souvent positives au-delà, confirmant la tendance à la hausse du nombre maximum de jours secs consécutifs entre 1950 et 2004. La durée des séquences sèches à l'intérieur de la saison pluvieuse est donc, de plus en plus longue, confirmant l'irrégularité du régime pluviométrique. Par exemple, en 1972 à Saint-Louis, la pluie du 8 juin fut suivie d'une autre le 15 juillet, puis une autre le 23 août, ce qui représente un écart de 47 et 39 jours sans précipitation. Le déficit pluviométrique des trois dernières décennies semble donc être lié à une augmentation de la fréquence de la durée des séquences sèches au cours de la saison pluvieuse, ainsi qu'à un recul de la date de début de la saison pluvieuse.

Les figures 6 et 7 montrent l'évolution des extrêmes de précipitations (R90N et R3days, respectivement). L'évolution du nombre de jours où la précipitation est supérieure au 90^e centile de référence n'indique peu ou pas de changement majeur pour Saint-Louis, et une faible diminution pour les autres stations. Les plus fortes anomalies positives de cet indice, enregistrées en 1981 et 1988 à Saint-Louis, correspondent à des années légèrement excédentaires en terme de moyenne quotidienne ainsi qu'une diminution de la fréquence des jours de pluie et à une forte anomalie positive de l'intensité moyenne par jour de pluie. Par conséquent durant ces années, les rares événements de précipitations intenses ont contribué fortement au cumul saisonnier et à l'intensité moyenne des précipitations, en dépit d'une raréfaction des jours de pluie. Les fluctuations de la quantité maximale sur trois jours suivent le plus souvent les anomalies de l'intensité moyenne par jour de pluie. À Saint-Louis en particulier, les plus fortes anomalies (R3Days) de 1970, 1988, 1995 et 2001 correspondent aux fortes anomalies positives de SDII, voire de R90N. Ceci confirme qu'en région sahélienne les rares événements de précipitations intenses contribuent fortement à l'intensité moyenne par jour de pluie ainsi qu'au cumul annuel ou saisonnier.

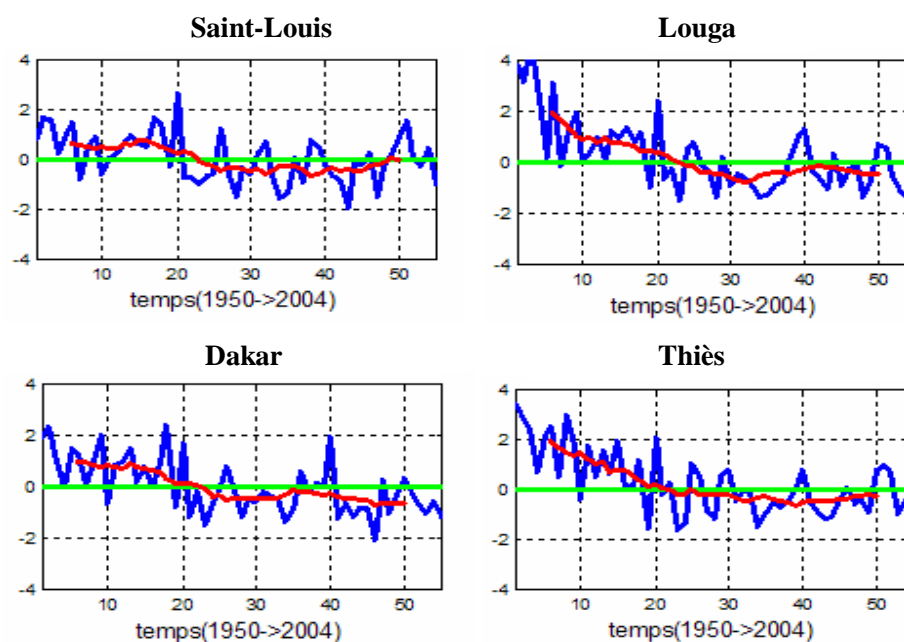


Figure 2. Anomalies normalisées de la moyenne saisonnière des précipitations d’avril à octobre (en mm/jr) par rapport à la période de référence 1961-1990 (ligne verte). La ligne bleue indique l’anomalie pour chaque année et la ligne rouge la moyenne mobile sur 10 ans (fenêtre glissante de $a - 5$ à $a + 5$).

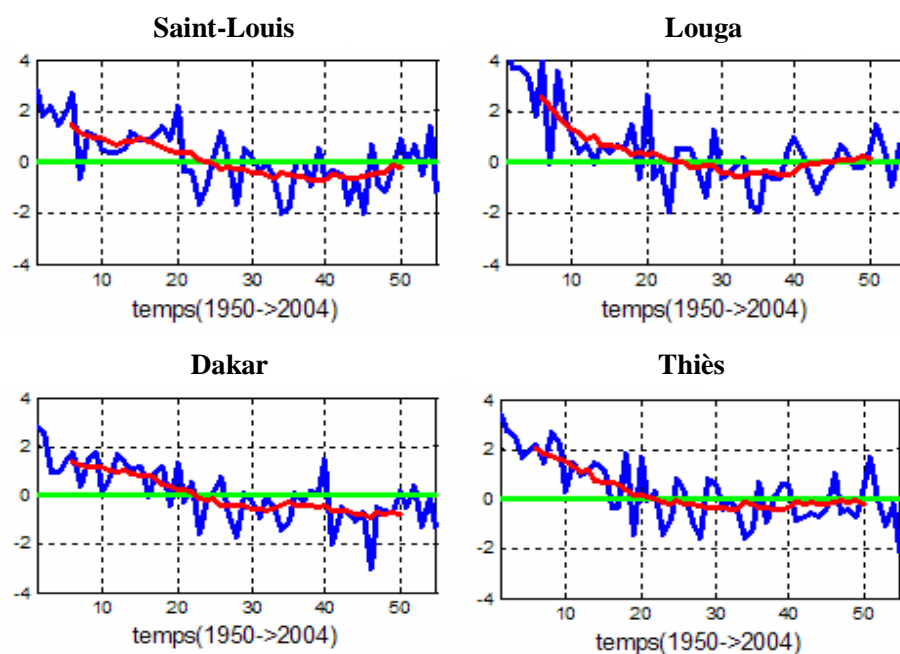


Figure 3. Anomalies normalisées du nombre de jours avec précipitations (≥ 1 mm) (même légende que figure 2).

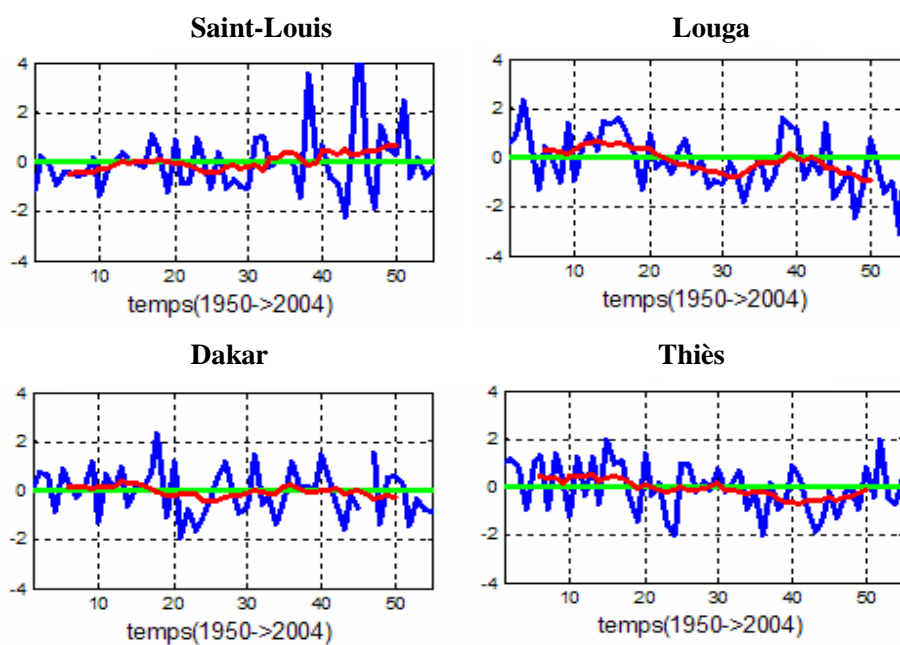


Figure 4. Anomalies normalisées de l'Intensité moyenne par jour de pluie (≥ 1 mm) (même légende que figure 2).

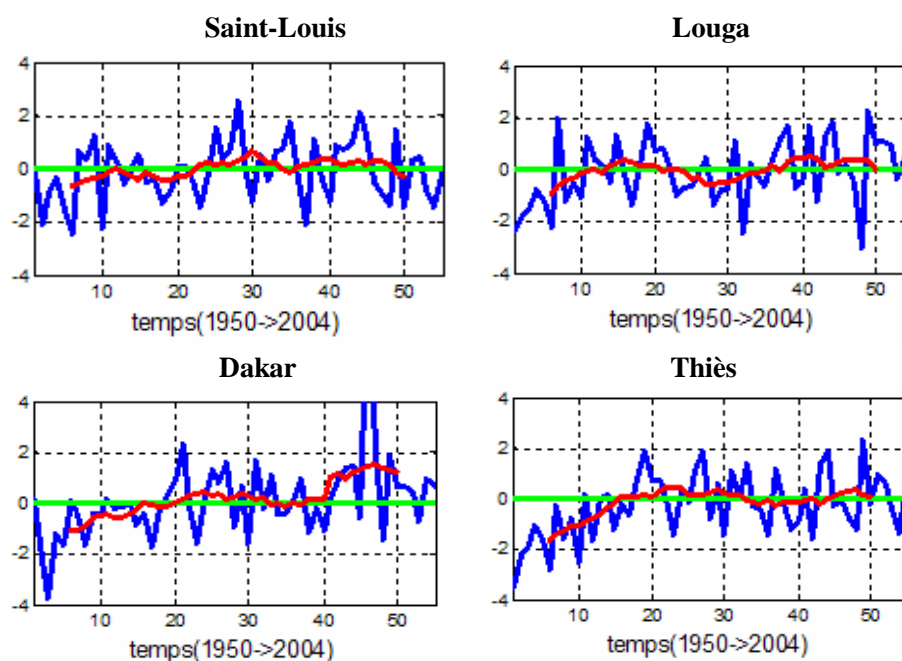


Figure 5. Anomalies normalisées du nombre maximum de jours secs (< 1 mm) consécutifs d'avril à octobre (même légende que figure 2).

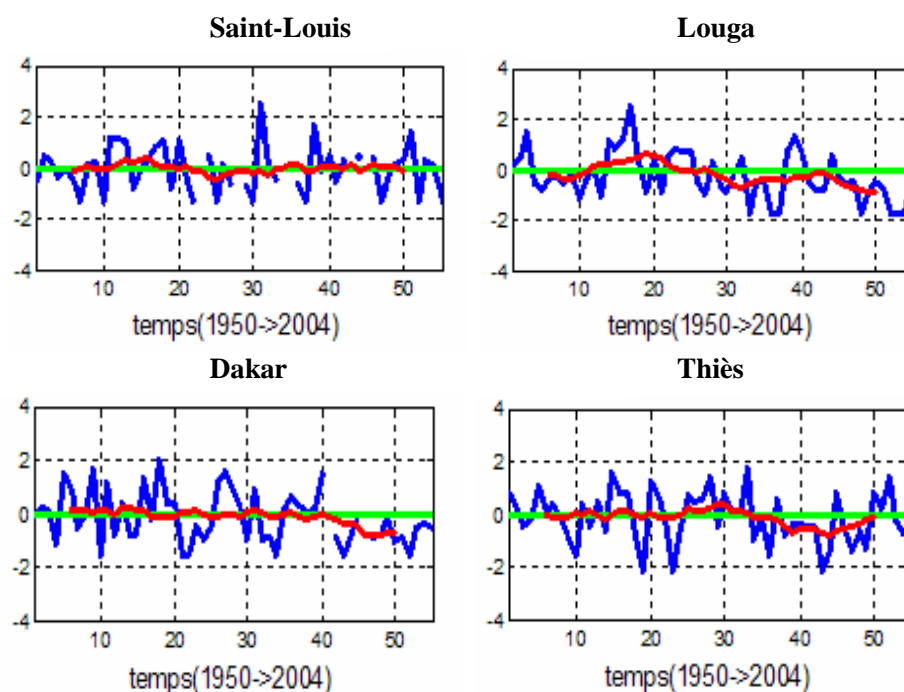


Figure 6. Anomalies normalisées du nombre d'événements avec précipitations > 90^e centile d'avril à octobre (même légende que figure 2).

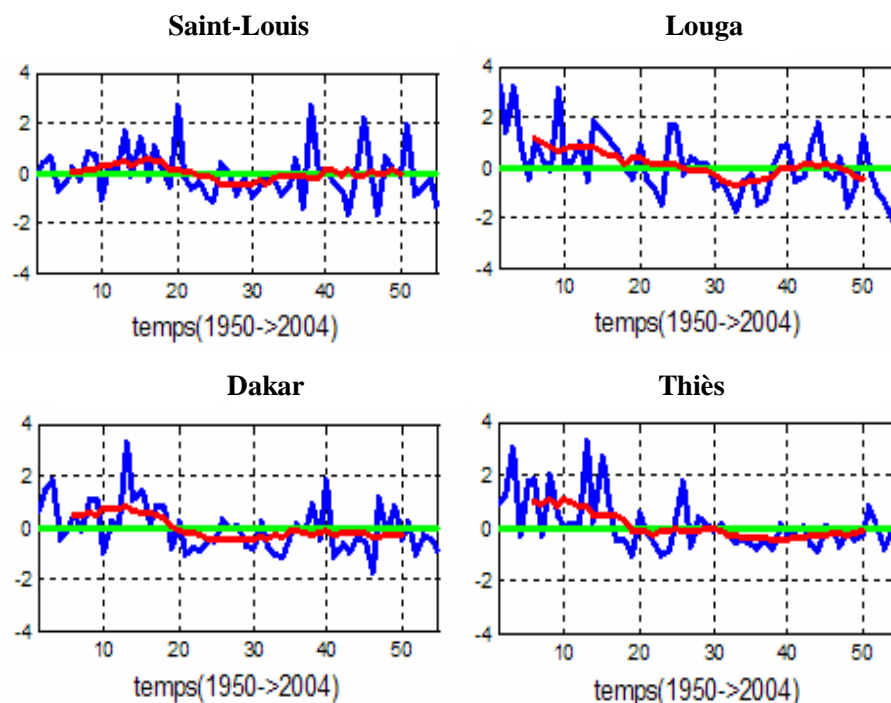


Figure 7. Anomalies normalisées de la quantité de précipitations maximales sur 3 jours consécutifs (même légende que figure 2).

1.6.3 Année «humide» (1950) vs «sèche» (2004)

Afin de mieux comprendre les manifestations des différents indices de précipitations en année de précipitations extrêmes «humide» et extrêmes «sèche», une analyse à l'échelle mensuelle a été effectuée pour les années 1950 (a) et 2004 (b) (Figure 8). Ces années correspondent respectivement au début et la fin de la période d'étude mais également à des années de précipitations excédentaires et déficitaires par rapport à la normale de référence (1961-1990) (Figure 2). La figure 8 présente l'évolution intra-annuelle de 5 des 6 indices de variabilité et d'extrême de précipitations (Tableau 1). Le 90^e centile de précipitations n'est pas retenu en raison de la rareté des événements pluvieux en 2004. Le minimum de jours pluvieux requis pour le calcul de cet indice

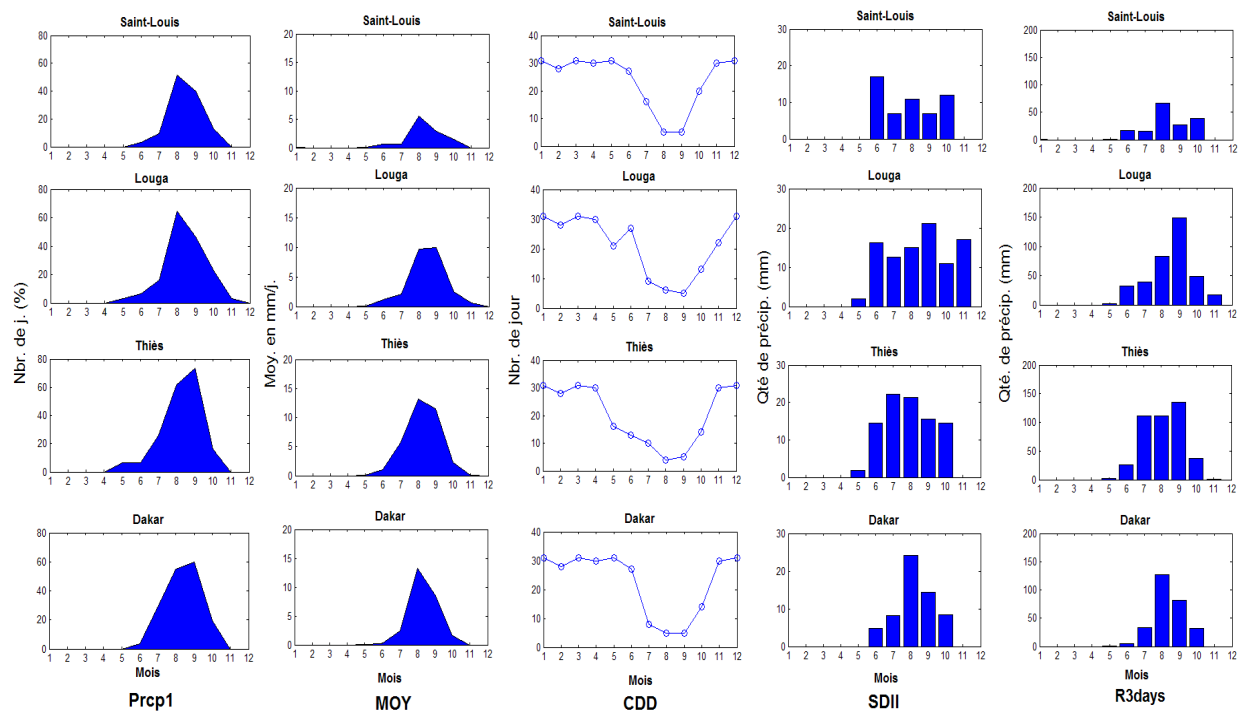
est de 10 jours de pluie par mois, ce qui n'a pas été rencontré durant la plupart des mois de la saison pluvieuse de 2004.

L'année 1950 est systématiquement excédentaire en terme de cumul moyen quotidien de précipitations et de pourcentage de jour avec précipitations, qui sont largement au dessus de la moyenne inter-annuelle pour les quatre stations (Figures 2 et 3). Le nombre de jours secs consécutifs est inférieur à 10 jours pour les mois de juillet (sauf à Saint-Louis), août et septembre. L'intensité moyenne par jour de pluie est légèrement plus élevée que la normale, surtout à Dakar, Louga et Thiès, et légèrement négative à Saint-Louis. Durant cette année humide (1950), l'installation de la saison pluvieuse est progressive et plus longue par rapport à l'année sèche (2004). En 2004, les quantités moyennes de précipitations enregistrées à Thiès et à Dakar ont diminué de façon significative coïncidant avec une réduction de la durée de la saison pluvieuse, surtout en septembre et en octobre. La durée de la saison pluvieuse est passée en effet de plus de 5 mois en 1950 à moins de 3 mois en 2004 (Figures 8a et 8b). Toutefois, en 1950, le maximum de jours pluvieux est atteint dès le mois d'août à Louga alors qu'il fut atteint après 3 à 5 mois de pluie dans le Sud (Dakar et Thiès). En 2004, les moyennes quotidiennes, toutes distribuées de façon unimodale, sont pratiquement identiques entre Dakar et Saint-Louis, et entre Louga et Thiès, contrairement à 1950 où les précipitations sont beaucoup plus abondantes au Sud qu'au Nord.

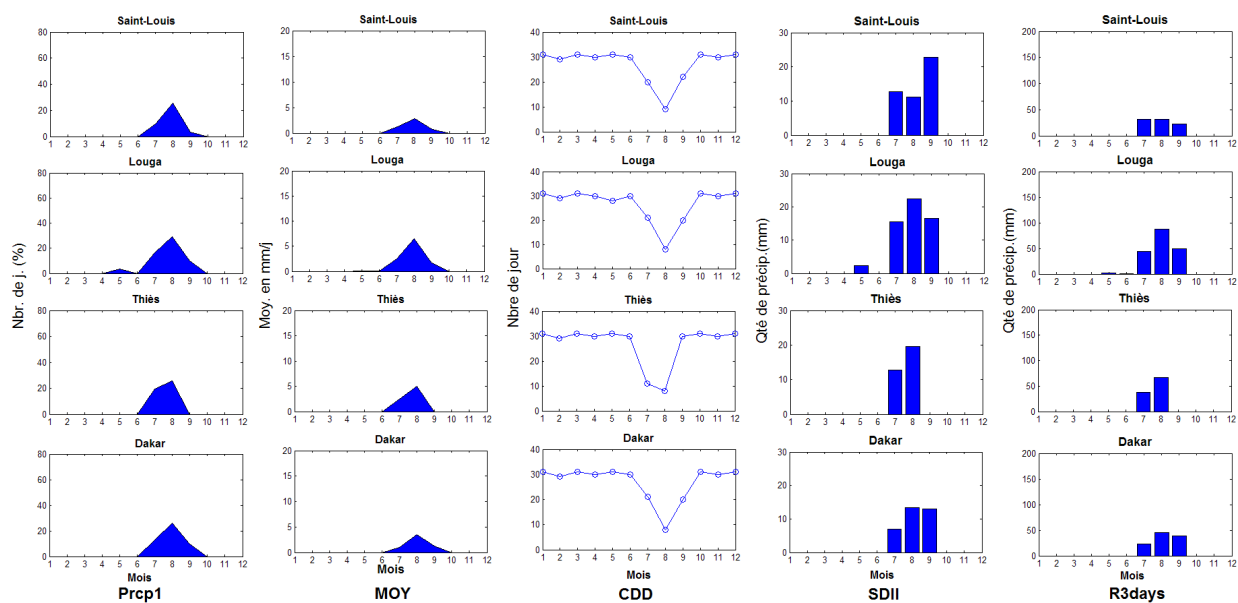
La réduction de la durée de la saison pluvieuse et des quantités moyennes est liée à la baisse du nombre de jours pluvieux avec des valeurs 3 fois inférieures en 2004 par rapport à 1950. Entre ces deux années humide et sèche, le nombre de jours pluvieux est passé en moyenne de 60% à 26% sur l'ensemble de la région, avec moins de 9 jours de pluie pour le mois d'août 2004, alors que celui-ci contribue à la moitié du cumul annuel (38%). En 2004, l'installation de la saison des pluies ne s'est pas faite avant le mois de juillet, alors qu'elle a débuté dès le mois de juin, voire le mois de mai 1950 à Thiès et Louga. La saison des pluies s'est terminée dès le mois de septembre avec un pourcentage de jours humides inférieur à 10%, ce qui représente

moins de 3 jours de pluie. La durée de saison pluvieuse est donc plus réduite, concentrée sur les mois de juillet à septembre. Toutefois, durant les trois mois qui ont constitué la saison pluvieuse de 2004 (juillet-septembre), bien que l'intensité moyenne par jour humide ait diminué, le mois de septembre indique des intensités moyennes plus fortes à Saint-Louis cette année là par rapport à 1950. Ainsi, Saint-Louis a connu en 2004 des intensités moyennes de précipitations 3 à 4 fois supérieures par rapport à celles de 1950. Même si les jours de précipitations sont plus rares (Figure 8b), les événements pluvieux ont été en moyenne beaucoup plus intenses. Toutefois, les quantités maximales cumulées sur trois jours sont largement inférieures en 2004, surtout à Dakar et Thiès en août et en septembre. En 1950, ces cumuls sur trois jours contribuent largement au cumul mensuel, comme à Louga où les fortes précipitations régulières sont responsables de plus de la moitié de la quantité mensuelle. Pour cette année, les maxima de précipitations sur trois jours suivent les maxima des intensités moyennes mensuelles, confirmant le rôle des précipitations extrêmes et de leurs durées sur l'intensité moyenne.

En résumé, le caractère excédentaire des précipitations en 1950 est surtout lié à la récurrence des événements pluvieux au cours de la saison avec moins de 10 jours secs consécutifs pour les mois de juillet, d'août et de septembre. Par contre, le déficit de l'année 2004 s'explique par l'action conjuguée de la diminution de la longueur de la saison des pluies, de l'occurrence des jours humides, de l'intensité par jour de pluie et des extrêmes de précipitations (cumulées sur trois jours). Ce déficit est aggravé en raison d'une mousson concentrée sur les seuls mois de juillet et août et à une réduction du nombre de jours de pluie. Toutefois, à Saint-Louis, les intensités moyennes des pluies sont plus élevées en 2004 qu'en 1950.



(a) 1950



(b) 2004

Figure 8. Évolution intra-annuelle des indices de variabilité des précipitations en année de précipitations excédentaires 1950 (a) et en année de pluviométrie déficitaire 2004 (b), par rapport à la période de référence 1961-1990.

1.6.4 Contribution mensuelle à la précipitation annuelle

La figure 9 montre le pourcentage de la contribution moyenne (1950 à 2004) des mois d'avril à octobre, au cumul annuel de précipitations pour les stations de Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis. L'essentiel des précipitations est enregistré aux mois d'août et de septembre qui contribuent respectivement pour plus de 38% et 32% à la précipitation totale annuelle. Le reste de l'année (novembre à mars) correspond à la saison « non pluvieuse » marquée par l'absence quasi absolue de précipitations. Seules quelques averses isolées peuvent ponctuellement se manifester entre les mois de décembre et février. Ces pluies « exceptionnelles » sont dues à des advections froides ou aux contrastes thermiques entre l'océan et le continent (De Felice, 1992). Elles n'engendrent que des accumulations le plus souvent inférieures à 10 mm/mois qui ne contribuent pas significativement aux cumuls annuels.

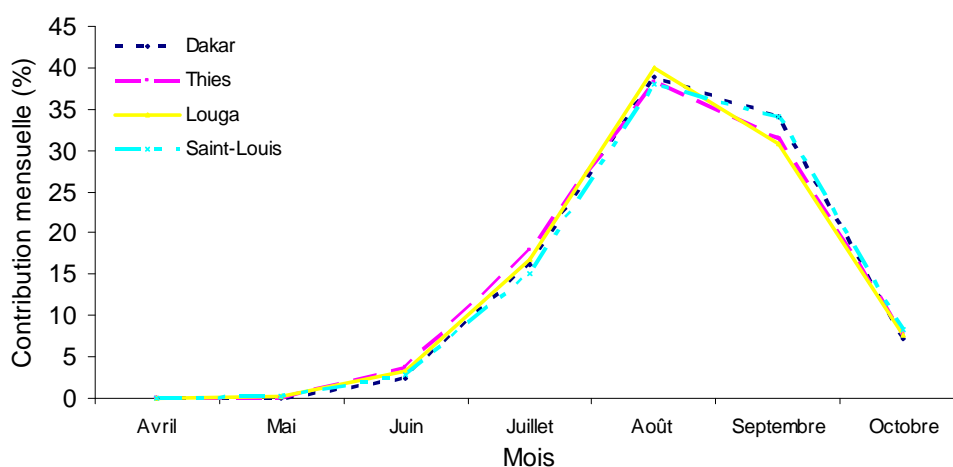


Figure 9. Contribution moyenne mensuelle à la précipitation annuelle entre 1950 et 2004.

D'une manière générale, la contribution moyenne mensuelle à la précipitation annuelle est proportionnellement égale dans toute la région. Même s'il existe un gradient décroissant des précipitations du Sud vers le Nord, le régime pluviométrique annuel de la région ne présente presque pas de contraste entre les pourcentages de

contribution moyenne mensuelle pour les quatre stations, les différences étant enregistrées dans les cumuls pluviométriques mensuels (Figures 9 et 10).

La figure 10 présente la distribution statistique (amplitude, écart interquartile, médiane) de la contribution mensuelle de chaque mois (entre avril et octobre) à la précipitation totale de chaque année pour l'ensemble de la période de 1950 à 2004. La contribution moyenne mensuelle du mois d'août varie entre 30 et 40% de la précipitation annuelle (Figure 9) mais elle peut dépasser 70% comme c'est le cas à Thiès en 1964, à Louga en 1960 et 1985, et à Saint-Louis en 1960 (Figure 10). Les mois de septembre et juillet occupent respectivement les 2^e et 3^e rangs dans le classement des mois les plus pluvieux. Cependant, qu'elle soit précoce (juillet) ou tardive (septembre), la place du maximum pluviométrique est surtout fonction de l'occurrence et de l'intensité des événements pluvieux dans le mois (Figures 8 et 10).

La figure 11 illustre le niveau de corrélation entre les cumuls pluviométriques annuels de 1950 à 2004 et les cumuls du mois d'août qui apparaît comme le mois le plus pluvieux de la saison. Le niveau de corrélation entre la précipitation du mois d'août et le cumul inter-annuel est relativement élevé avec un coefficient variant entre 0.57 à 0.79.

Ainsi, aux années déficitaires correspondent souvent une faible contribution du mois d'août. Une forte variabilité inter-annuelle de sa contribution entraîne donc une perturbation du régime pluviométrique annuel et partant de la distribution temporelle des précipitations. Par exemple au cours des années 1968 et 1990, caractérisées par une pluviométrie déficitaire par rapport à la normale (1961-1990), la contribution du mois d'août à la précipitation totale annuelle n'a guère dépassé 8%.

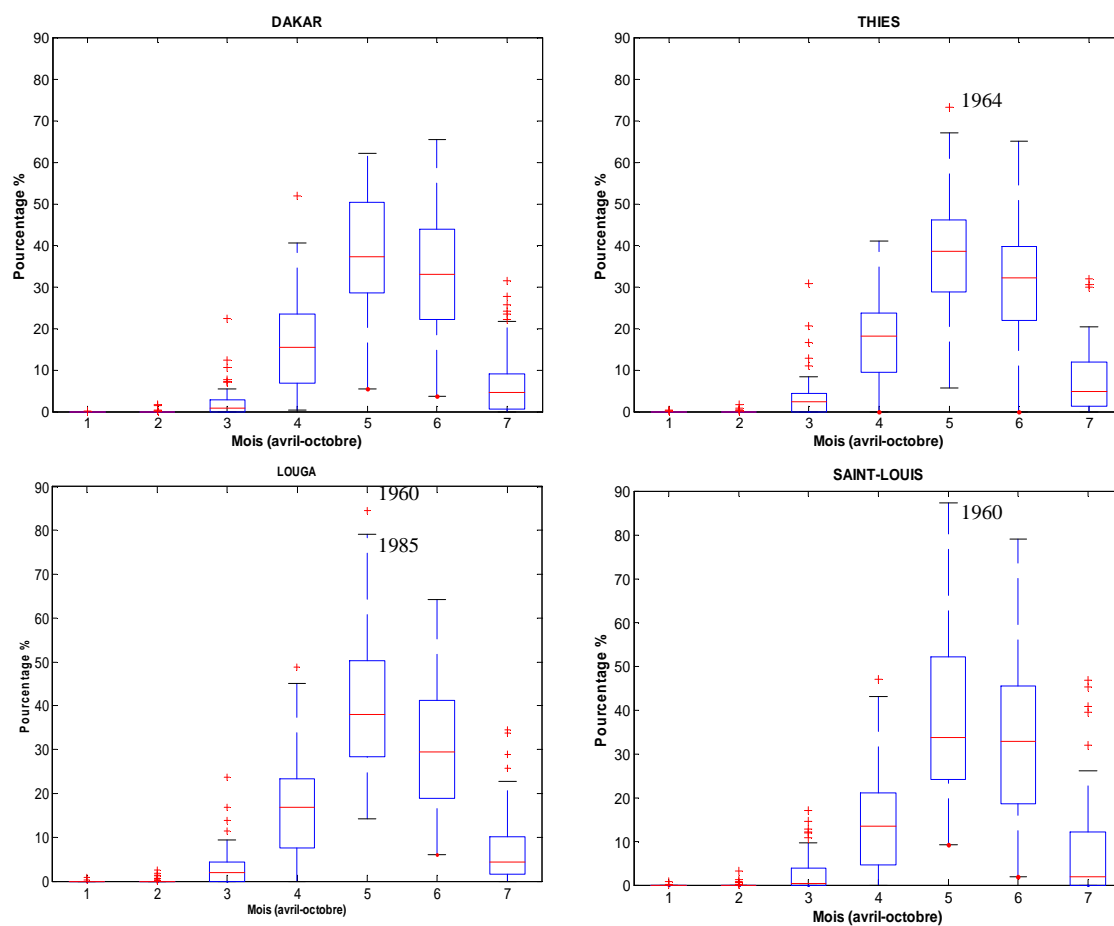


Figure 10. Variation inter-annuelle de la contribution mensuelle à la précipitation annuelle (%) entre 1950 et 2004.

Les écarts de variation de la contribution de chaque mois à la précipitation annuelle sont compris entre le rectangle (interquartile= 25% à 75%) et le tiré supérieur >75%, et le tiré inférieur <25%. Les années marquées sur les figures correspondent aux années où les plus fortes contributions ont été observées.

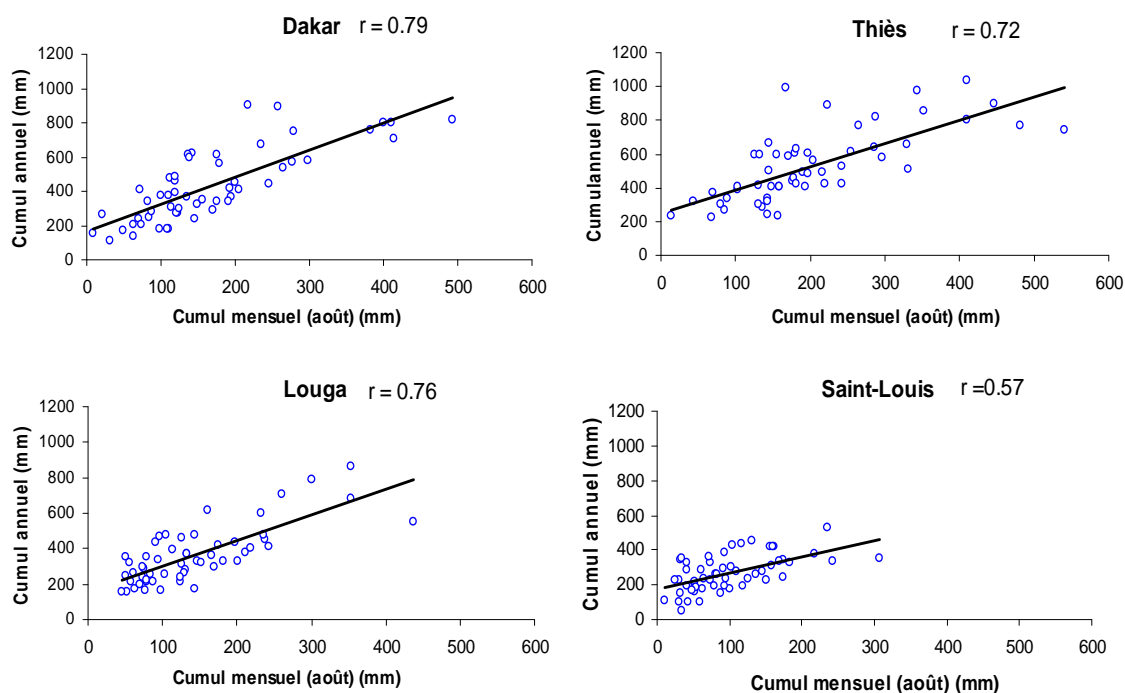


Figure 11. Corrélation entre les précipitations mensuelles du mois d'août vs les précipitations annuelles entre 1950 et 2004. r = coefficient de corrélation

1.7 Conclusion

L'objectif de cette étude était de caractériser la variabilité climatique *via* l'analyse des tendances décennales et des anomalies intra-saisonnières observées entre 1950 et 2004, en utilisant des indices calculés à partir des précipitations quotidiennes au cours de la saison de mousson (avril - octobre). Les résultats suggèrent que le déficit pluviométrique enregistré dans la région des Niayes depuis la fin des années 1960 est lié à une réduction du nombre de jours pluvieux (2j/10 ans en moyenne) et une hausse du nombre maximum de jours secs consécutifs (4j/10 ans en moyenne) au cours de la saison de mousson. Malgré les deux tendances significatives à la baisse enregistrées à

Thiès et à Louga, la diminution de l'intensité des précipitations ne reflète pas une baisse identique du nombre de jours pluvieux. Les tendances à la baisse des extrêmes (R3days et R90N) coïncident avec les tendances négatives les plus importantes pour la précipitation moyenne et l'intensité par jour de pluie.

Au cours des cinquante dernières années, les anomalies du nombre de jours pluvieux et les fluctuations inter-annuelles des moyennes quotidiennes sont quasi-synchrones. Toutefois, les anomalies inter-annuelles de l'intensité moyenne par jour de pluie ne suivent pas nécessairement les fluctuations des cumuls quotidiens moyens et du nombre de jours de pluie. Ceci confirme que la baisse des précipitations moyennes est le résultat d'une diminution dans l'occurrence du nombre de jours pluvieux au cours de la saison de mousson, plutôt que d'une baisse dans l'intensité moyenne des jours de pluie.

À l'échelle intra-saisonnière, le déficit des précipitations s'accompagne à la fois d'une réduction de la durée de la saison pluvieuse et d'une baisse du nombre de jours de pluie au cœur de la saison de mousson. Entre 1950 et 2004, la période pluvieuse est passée d'environ 5 mois à 3 mois et le pourcentage de jours pluvieux a régressé de plus de 30 %. Certes, les jours pluvieux sont de plus en plus rares mais les quelques pluies enregistrées peuvent être d'une intensité extrême. Par exemple en 1995, la précipitation totale maximale sur trois jours représentait plus du ¼ de la pluviométrie totale annuelle à Saint-Louis. Ces résultats confirment le rôle joué par les précipitations extrêmes sur les cumuls mensuels ou saisonniers. Les extrêmes de précipitations (maximum sur 3 jours) suivent par conséquent la distribution temporelle de l'intensité moyenne par jour de pluie.

En dépit d'une superficie relativement réduite (2300 km²), la région des Niayes ne semble pas avoir été touchée de façon homogène par la variabilité du régime de précipitation au cours des dernières décennies. La baisse de la quantité moyenne de précipitations quotidiennes et le nombre de jours pluvieux est plus marquée au Sud qu'au Nord réduisant ainsi le gradient latitudinal. La station la plus septentrionale (Saint-Louis), sans doute du fait de l'influence océanique et de sa position latitudinale

(Figure 1), n'a pas enregistré les mêmes anomalies d'intensité précipitations qu'ailleurs dans la région des Niayes. En effet, la mousson atteignant les latitudes 17° Nord a déjà perdu une bonne partie de son potentiel pluvieux d'où l'occurrence d'orage et de précipitations isolées dans cette partie du littoral nord du Sénégal (Sagna, 1988; Leroux, 1996). L'hétérogénéité dans la distribution spatiale des précipitations est liée entre autres à la nature aléatoire ou ponctuelle des systèmes convectifs qui produisent près de 80 % du couvert nuageux et de la pluie (Mathon & Laurent, 2001).

Contrairement au reste du Sahel, la région du littoral nord du Sénégal a connu une sécheresse locale au début des années 1990 (1990-1994) mettant en évidence la forte hétérogénéité spatiale des champs de précipitations en Afrique de l'Ouest. Par exemple, l'année 1994 reconnue comme une année « humide » en Afrique de l'Ouest (LeCompte *et al.*, 1994; Nicholson *et al.*, 1996, 2000; Le Lay & Galle, 2005) est déficitaire dans le littoral nord du Sénégal. Ceci ne semble pas coïncider avec la reprise pluviométrique suggérée sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest depuis le début de la décennie 1990 par certains auteurs (Ozer *et al.*, 2003). Cette reprise ne semble s'être manifestée qu'à la fin de la décennie 1990 dans la région étudiée.

Quoiqu'il en soit, la portée des conclusions obtenues reste limitée compte tenu du nombre restreint de stations météorologiques utilisées dans notre étude. Toutefois, l'analyse réalisée a montré que la baisse des jours de pluie ne signifie pas nécessairement une baisse concomitante des intensités de précipitations. L'analyse détaillée de la variabilité intra-saisonnière sur les périodes « sèches » vs « humides » devrait être poursuivie afin de mettre en évidence le rôle exercé par les événements de précipitations extrêmes sur la recharge des nappes. Ceci est d'autant plus important que la santé des écosystèmes Niayes, la production maraîchère et la sécurité alimentaire des populations dans cette région sahélienne en dépendent.

Remerciements. Les auteurs tiennent à remercier le programme de bourse de la fondation Ford, la chaire en environnement à l'échelle du globe de l'UQAM

(Université du Québec à Montréal) et le CRSNG (Conseil de recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada) pour leur soutien financier et le consortium Ouranos pour son soutien matériel. Ces remerciements s'adressent également à la Direction de la Météorologie Nationale du Sénégal et à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar pour leur collaboration scientifique et l'accès aux données. Un grand merci également au Dr. Dominique Tapsoba et à M. Dimitri Parishkura pour leur soutien technique et matériel.

1.8 Références

- Aguiar, L. A. A., 2002. Gestion des ressources naturelles et systèmes de production sur le littoral nord du Sénégal. *Presse universitaire*. Université Cheikh Anta Diop, Dakar (SEN), 96 p.
- Aondover, T. & Woo M., 1998. «Changes in rainfall characteristics in northern Nigeria». *Int. J. of Climatol.* 18: 1261-1271.
- 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*, 16: 15-22.
- Charney, J. G., 1975. «Dynamics of deserts and drought». *Q. J. R. Meteorol Soc.*, 101: 193-202.
- Courel, M. F., Kandel R. S. & Rasool S. I., 1984. «Surface albedo and the Sahel drought». *Nature*, 307: 528-538.
- De Felice, P., 1992. «Climatologie dynamique de l'Afrique de l'Ouest», dans *Les Climats Subtropicaux et leur Évolution*. CNRS (FRA), p.153- 169.
- ETCCDMI, 2003 (Expert Team on Climate Change Detection and Monitoring Indices), <http://cccma.seos.uvic.ca /ETCCDMI/indices.html>, consulté le 9 juin 2006.
- Folland, C. K., Palmer T. N, Parker D. E. 1986. «Sahel rainfall and worldwide sea temperature 1901-1985». *Nature*, 320: 602-607.
- Gachon, P., Gauthier N., Bokoye A., Parishkura D., Cotnoir A., Tremblay Y. & Vigeant G., 2007. Groupe de travail II : Variabilité, extrêmes et changements climatiques au Sahel : de l'observation à la modélisation, dans Rapport des contributions canadiennes au projet ACIDI – CILSS); appui aux capacités d'adaptation aux changements climatiques. Environnement Canada A030978-002.

- Hubert, P., Carbonnel J. P. & Chaouche A. 1989. «Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest». *J. of Hydrology*, 110: 349-367.
- Hulme, M., Doherty R., Ngara T., New M. & Lister D., 2001. «African climate change: 1900-2100». *Clim. Res.*, 17: 145-168.
- Janicot, S., Polcher J., Trzaska S. & Pocard I., 1999. «Decadal scale variability of summer Sahel-ENSO teleconnection». *Climate Dyn.*, 15: 451-473.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Janicot, S., Trzaska S., & Pocard I., 2001. «Summer Sahel-ENSO teleconnection and decadal time scale SST variations». *Climate Dyn.*, 18: 303-320.
- Kanamitsu, M. & Krishnamurti T. N., 1978. «Northern summer tropical circulations during drought and normal rainfall months». *Mon. Weath. Rev.*, 106: 331-347.
- Karl, T. R., Nicholls N. & Ghazi A., 1999. «CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary». *Climatic Change*, 42: 3-7.
- Kendall, M. G., 1968. *A course in multivariate analysis*. Griffin's Statistical Monograph, N°2, Hafner Publishing Co., New York, 185p.
- Le Barbé, L. & Lebel T., 1997. «Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990». *J. Hydrol.*, 188-189: 43-73.
- Le Barbé, L., Lebel T. & Tapsoba D., 2002. «Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990». *J. Climate*, 15: 187-202.
- Le Lay, M. & Galle S., 2005. «Seasonal cycle and interannual variability of rainfall at hydrological scales. The West African monsoon in a Sudanese climate». *Hydrological Sciences Journal*, 50: 509-524.
- Lebel, T., Diedhiou A. & Laurent H., 2003. «Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at the hydrological scales». *J. Geophys. Res.* 108 (D8). 8389 doi:10.1029.
- LeCompte, D., Tinker R., Dionne J., Halpert M., & Thiao, W., 1994. «Wettest rainy season in 30 years across African Sahel». *Special Climate Summary* 94/2, NOAA, Washington, DC, 5 p.
- Lézine, A-M. 1987. Paléoenvironnements végétaux d'Afrique nord-tropicale occidentale depuis 12000 B.P : Analyse pollinique de séries sédimentaires continentales Sénégal-Mauritanie, Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle, Université

d'Aix-Marseille II, 151 p.

Leroux, M., 1996. *La dynamique du temps et du climat*. Paris : Masson, 310 p.

L'Hôte, Y., Mahé G. & Some B., 2003. «Reply to the "Sahelian drought may have ended during the 1990s": the 1990s rainfall in the Sahel: the third driest decade since the beginning of the century». *Hydrol. Sci. J.*, 48: 493-496.

Liebman, B. & Marengo J. A., 2001. «Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin». *J. Climate*, 13: 4308-4318.

Mathon, V. & Laurent H., 2001. «Life cycle of Sahelian mesoscale convective cloud systems». *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 127: 377-406.

Messenger, C., Gallée H. & Brasseur O., 2004. «Precipitation sensitivity to regional SST in a regional climate simulation during the West African monsoon for two dry years». *Climate Dynamics*, 22 : 249-266.

Neil, H., Leduc C. & Dieulin C. 2005. «Caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle des précipitations annuelles sur le bassin du Lac Tchad au cours du 20^{ème} siècle». *Hydrol. Sci. J.*, 50: 223-243.

Nicholson, S. E., Some B., & Kone B. 2000. «An Analysis of Recent Rainfall Conditions in West Africa, Including the Rainy Seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña Years». *J. Climate*, 13: 2628-2640.

Nicholson, S. E., Ba M. B. & Kim J. Y., 1996. «Rainfall in the Sahel during 1994». *J. Climate*, 9: 1673-1676.

N'Tchayi Mbourou, G. M., Bertrand J. & Nicholson S. E., 1997. «The diurnal and seasonal cycles of wind-borne dust over Africa north of the equator». *J. Appl. Met.*, 36: 868-882.

Oguntunde, P. G., 2004. «Evapotranspiration and complementarity relations in the water balance of the Volta Basin: Field measurements and GIS-based regional estimates». *Ecology and Development Series*, N° 22, Cuvillier Verlag, Göttingen, Germany, 169 p.

OMM (Organisation météorologique mondiale) 2003: in Commission des systèmes de base, Session extraordinaire. *Rapport final abrégé, résolutions et recommandations*, OMM-N° 955, ISBN 92-63-20979, 62p.

Ozer, P., Erpicum M., Demarée G. & Vandiepenbeek M., 2003. «The Sahelian drought may have ended during the 1990s». *Hydrological sciences journal*, 48: 489-492.

Parishkura, D., 2008. Évaluation de méthodes de mise à l'échelle statistique: reconstruction des extrêmes et de la variabilité du régime de mousson au Sahel. Mémoire de maîtrise, Dept des Sciences de la terre et de l'atmosphère, UQAM, Montréal, en révision finale.

- Pinker, R.T., Idemudia G. & Aro T., 1994. «Characteristic aerosol optical depths during the Harmattan season in sub-Saharan Africa». *J. Geophys. Res.*, 21: 685-688.
- Prospero, J. M., 1996. «The Atmospheric transport of particles to the Ocean», In: *Particle Flux in the Ocean*, V. Ittekkot, P. Schäfer, S. Honjo and P.J. Depetris, (Éds) SCOPE Report 57, John Wiley & Sons, Chichester, 19-52.
- Rossel, F. & Garbrecht J., 2000. «Variations spatiales et temporelles des précipitations des neuf divisions climatiques de l'Oklahoma et implications pour l'utilisation locale de l'indice régional». *Rev. Sci. Eau*, 13: 175-183.
- Rowell, D. P., 2003. «The Impact of Mediterranean SSTs on the Sahelian rainfall season». *J. Climate*, 16: 849-862
- Sen, P. K., 1968. «Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau». *J. Am. Stat. Ass.*, 63: 1379-1389.
- STARDEX (Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions) (2003)
http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/deis/Diagnostic_tool.pdf, consulté le 8 juin 2006.
- Sultan, B., Baron C., Dingkuhn M., Sarr B. & Janicot S. 2005. «La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles saisonnières: Applications à la sensibilité des rendements agricoles au sahel». *Sécheresse*, 16: 23-33.
- Sultan, B. & Janicot S., 2000. «Abrupt Shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability». *Geophysical Research Letter*, 27: 3353-3356.
- Sultan, B. & Janicot, S. 2003. «The West African monsoon dynamics Part 2: The "preonset" and "onset" of summer monsoon». *J. Climate* 16: 3407-3427.
- Trochain, J. 1940. «Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal». *Mém. Inst. Fr. Afr. Noire*. Larose, Paris, 433 p.
- Xue, Y. & Shukla J., 1993. «The influence of land surface properties on Sahel climate». Part I: Desertification. *J. Climate*, 6: 2232-2245.
- Zheng, X. & Eltahir E. A. B., 1998. «The role of vegetation in dynamics of West African Monsoons». *J. Climate*, 11: 2078-2096.

CHAPITRE III:

VARIABILITÉ HYDROGÉOLOGIQUE

Dans le chapitre précédent, la variabilité des précipitations au cours des 50 dernières années dans la région des Niayes du Sénégal a été étudiée. Cette première étape de la thèse a permis non seulement de mettre en évidence les différentes fluctuations du régime de précipitations mais également de faire ressortir leurs variations dans l'intensité, la durée et la fréquence des événements pluvieux au cours de ces cinq dernières décennies. L'analyse de tendance des différents indices a montré à quel point les événements pluvieux sont aléatoires et discontinus dans la région du littoral nord du Sénégal.

Afin de mieux comprendre l'impact d'une telle variabilité des précipitations sur les ressources en eau, une analyse des fluctuations de la Nappe des Sables Quaternaires a été faite. Cette analyse a été effectuée en deux parties : d'abord une analyse de l'évolution inter-annuelle du niveau piézométrique entre 1958 et 2002, puis la mise en évidence du comportement hydrodynamique de la nappe à l'échelle annuelle (1974).

L'objectif plus précis de ce chapitre est de détailler la réponse hydrologique à la variabilité des précipitations. Sachant que le climat n'est pas l'unique facteur de régulation du niveau de la nappe, les impacts des facteurs anthropiques qui se manifestent par le pompage et les aménagements hydro-agricoles comme le barrage de Diama et le système de digues qui lui est associé ont aussi été étudiés. La part des facteurs naturels (évapotranspiration, écoulement vers la mer) et des facteurs anthropiques (pompages) a été quantifiée *via* le bilan hydrologique en régime permanent de l'année 1974 pour laquelle les données d'entrées sont disponibles.

**Évolution de la Nappe des Sables Quaternaires dans la région des Niayes du
Sénégal (1958 -1994): relation avec le climat et les impacts anthropiques.**

Aguiar, Lazar A. A¹; Maugis, Pascal²; Garneau, Michelle¹;
Lézine, Anne-Marie²; Gachon, Philippe³.

¹ Université du Québec à Montréal / GEOTOP-UQAM-Mc Gill / Ouranos,

² CNRS-LSCE, Paris,

³ Environnement Canada @ Université McGill.

Article soumis à la revue

Sécheresse

Le 11 août 2008

1.1 Résumé

Cet article étudie la variabilité au cours des cinquante dernières années de la Nappe des Sables Quaternaires (NSQ) dans la région des Niayes du Sénégal, et de déceler les liens possibles avec le climat mais aussi les activités anthropiques. L'analyse interannuelle de la morphologie de la nappe à partir des cartes piézométriques multi-dates montre que les plus fortes baisses piézométriques ont été enregistrées au cours de la sécheresse des décennies 1970 et 1980, avec une diminution progressive moyenne de près de 0.51 m tous les dix ans. À l'échelle saisonnière, les variations piézométriques sont plus prononcées à la fin de la saison pluvieuse. L'analyse du bilan hydrologique moyen pour l'année 1974, suggère que les causes naturelles constituent les principaux facteurs de déstockage de la nappe avec plus de 96% des sorties d'eau dont 89% par évapotranspiration. Les prélèvements anthropiques ne dépassent guère 4% des sorties. Toutefois, l'évolution de la NSQ est aussi perturbée par les activités anthropiques, via notamment les aménagements hydrauliques (barrages), dans le secteur Nord de la région des Niayes où le niveau de la nappe n'a baissé que de 0.11 m entre 1984 et 1994 nonobstant la persistance des déficits pluviométriques des années 1980 et 1990.

Mots clés : Hydrogéologie, Nappe des Sables Quaternaires, Variations des précipitations, Sénégal, Niayes.

1.2 Summary

The main objective of this study is to examine the variability of the groundwater level, and identify the possible links with the climate and human activities, in the past 50 years, in Senegal's region of the Niayes. The analysis of the water table morphology from multi-temporal piezometric maps shows that the biggest piezometric depletions were recorded in 70's and 80's with a gradual decline averaging almost -0.51 m every ten years. At the intra-annual scale, the piezometrics variations are more important at the end of the rainy season. The 1974 water balance analysis suggests that natural causes are the main water withdrawal factors with over 96% of water outlet among which 89% is lost through evapotranspiration. The water extracted for human activities is not more than 4% of all water leaving the Niayes' water system. However, the evolution of the groundwater level is also controlled by human activities, mainly through hydraulics infrastructures (dams) in the northern sector of the Niayes where the water only fell by 0.11 mm between 1984 and 1994 despite the continuing rainfall deficits of the years 80's and 90's.

Key words: Hydrogeology, Quaternary water table, Precipitation variability, Senegal, Niayes.

1.3 Introduction

Plusieurs travaux ont mis en évidence les liens entre la variabilité des précipitations et les perturbations hydrologiques qui en découlent, compromettant l'accès à la ressource en eau (Muzik, 2001; Christensen *et al.*, 2004; Xu & Singh, 2004) surtout en milieu aride ou semi-aride (Mahé & Olivry, 1991, 1999). Le Sahel a subi, au cours des dernières décennies, une récurrence marquée des sécheresses en particulier dans les années 1970, 1980 et 1990 au cours desquelles les précipitations ont diminué d'environ 40% (Hulme *et al.*, 2001, Aguiar *et al.*, (a) soumis). L'abaissement du niveau moyen de la nappe qui en découle a été de l'ordre de 1 à 5 m, soit de 7 à 30 cm/an depuis 1965 (SGPRE, 2003). Cette régression du niveau de l'aquifère compromet l'alimentation en eau potable des populations et éloigne les objectifs d'autosuffisance alimentaire pour une région cruciale pour l'économie sénégalaise : soit la région des Niayes⁷ qui produit plus de 80% des légumes du Sénégal (Tall & Fall, 2001).

Dans ce contexte, l'étude de l'évolution du niveau de la Nappe des Sables Quaternaires (NSQ) peut apporter un éclairage pour la compréhension de l'évolution de l'hydrosystème des Niayes sous contrainte climatique. Il s'agit d'étudier la dynamique hydrologique de la nappe au cours des cinquante dernières années, à partir de plusieurs bases de données piézométriques colligées. L'objectif est de mettre en évidence, suivant un pas de temps approximatif de 10 ans, entre 1950 et 2004, les variations du niveau de la nappe en relation avec la variabilité des précipitations et les activités anthropiques dans la région du littoral nord du Sénégal. Afin de quantifier la part des activités anthropiques dans la décharge de la nappe, un bilan hydrologique a

⁷ Les Niayes sont des dépressions interdunaires où affleure la nappe phréatique. Elles sont localisées en arrière du cordon littoral du Nord du Sénégal entre Dakar et Saint-Louis. Sur les marges de ces dépressions se pratique la culture maraîchère qui fournit près de 80% de la production de légumes du pays.

été calculé pour l'année 1974, pour laquelle des données climatiques (évapotranspiration, précipitation) et des données de pompages étaient disponibles.

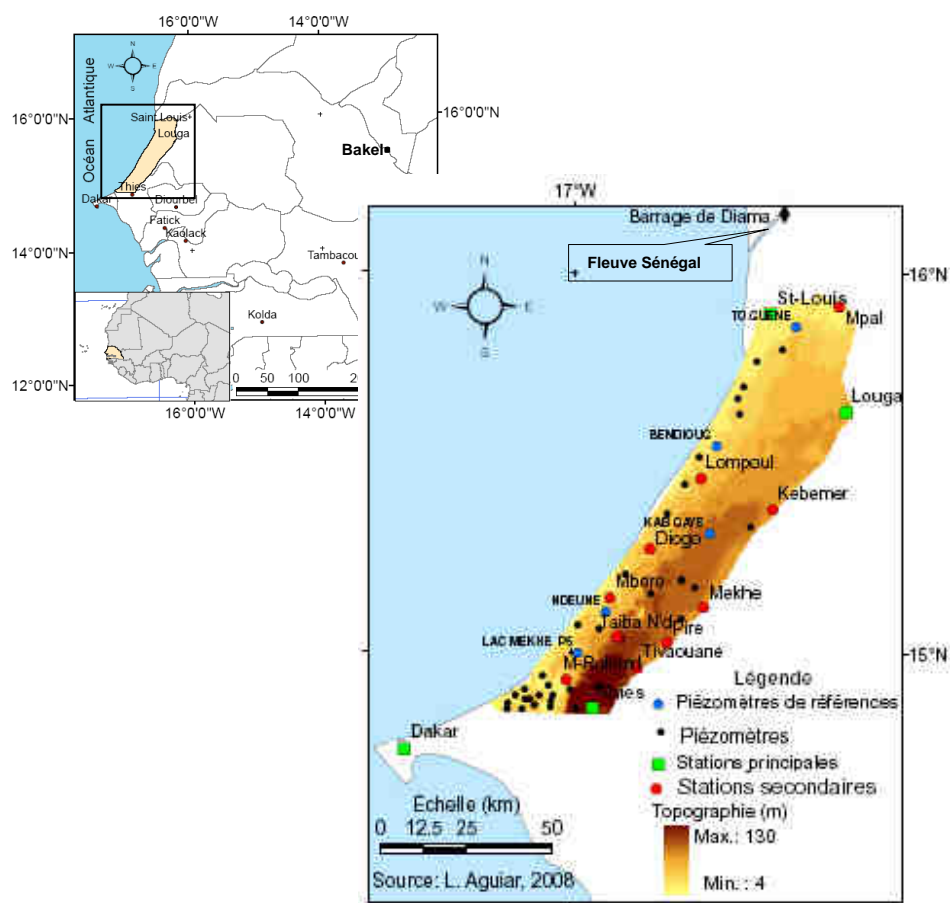
1.4 Région d'étude et données utilisées

La région d'étude est située entre 14°3' et 16° Nord, et entre 16° et 17°5' Ouest et couvre une superficie d'environ 2300 km². Elle est limitée au Nord par le Delta du fleuve Sénégal et à l'Ouest par l'océan Atlantique. La limite Est correspond à l'axe Thiès - Louga qui est parallèle à la côte et qui se situe à une vingtaine de kilomètres de celle-ci. La topographie est marquée par la présence de dunes sableuses et du plateau de Thiès dont l'altitude maximale ne dépasse pas 130 m au Sud de la région (Figure 1). Entre ces dunes s'étendent les Niayes qui sont des dépressions interdunaires comblées de matière organique où la NSQ est affleurante à sub-affleurante. Sur les marges de ces dépressions humides se pratiquent les cultures maraîchères. La végétation régionale est caractérisée par une pseudo-steppe sahélienne dans laquelle s'intègrent des reliques forestières d'origine sub-guinéenne (Trochain, 1940) mises en place dès le début de l'Holocène et alimentées par la Nappe des Sables Quaternaires (Lézine, 1987).

La présente étude porte sur la dynamique spatio-temporelle de la NSQ qui affleure au niveau des dépressions interdunaires des Niayes et qui repose sur un substratum marneux ou marno-calcaire d'âge Éocène (Fohlen & Lemordant, 1983; BRGM, 1984; Faye, 1995). Le fort coefficient de porosité totale (30 à 35%) des sables quaternaires et leur perméabilité relativement élevée assurent une accumulation rapide des eaux provenant de sources atmosphériques dans la zone souterraine saturée (BRGM, 1978; 1984).

Vers la côte, la NSQ est en contact direct avec le biseau marin formant une interface orientée vers l'hinterland. Le front salé se situe à l'aplomb de la côte excepté dans certains secteurs des zones centrale (par exemple à Mboro) et septentrionale, où la présence du biseau salé dans les dépressions des Niayes a déjà été signalée par

Dryade (1990). Le gradient piézométrique est-ouest, à partir du dôme piézométrique, constitue un barrage hydraulique naturel s'opposant à la progression du biseau salé (BRGM, 1984; Dryade, 1990; Gaye, 1990; Faye, 1995).



L'étude a été réalisée à partir de documents cartographiques et de mesures piézométriques qui couvrent la période de 1958 à 2002. Les données piézométriques proviennent des bases de données du Service de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau du Ministère de l'hydraulique du Sénégal (SGPRE, 2003), de

l'Organisation Mondiale de la Santé (1975) et du Bureau de Recherche Géologique et Minière (1962) (Tableau 1).

Afin d'éviter des erreurs d'interprétation de la piézométrie locale en utilisant le niveau dynamique des puits, seules les données sur le niveau statique de la nappe, obtenues à partir du réseau de piézomètres ont été retenues. Du fait de l'absence d'un réseau de mesure permanent du niveau de la nappe, les mesures obtenues sur plusieurs années à partir d'un même piézomètre sont rares. La réalisation de cartes piézométriques comparatives nécessite l'utilisation d'un réseau de mesures composé d'un même nombre de piézomètres. Afin de s'affranchir des erreurs induites par le changement des sites de mesures piézométriques, un nombre fixe de piézomètres a été sélectionné pour disposer d'un réseau de mesures synchrones. Ainsi, parmi tous les piézomètres recensés, seuls 38 points présentaient des données régulières correspondant à nos années d'études (1958, 1965, 1974, 1984, 1994).

Compte tenu de l'hétérogénéité des mesures piézométriques et du volume important de données pour chaque station de mesure, un choix des piézomètres de référence à analyser statistiquement a été fait suivant (i) la longueur de la série de mesures du piézomètre, et (ii) l'emplacement du piézomètre dans la couche géologique des sables quaternaires. Afin de mieux faire ressortir les effets de la sécheresse depuis 1970 et de la « reprise pluviométrique » de la fin des années 1990 (Aguiar *et al.*, (a) soumis), la série de mesures du piézomètre de référence doit débuter avant 1970 et dépasser l'année 2000. En outre, les piézomètres de référence doivent couvrir l'ensemble de la zone de façon homogène. Cinq piézomètres ont été ainsi retenus: Lac Mekhe (sud), Ndeune (centre sud), Kab Gaye (centre), Bendioug (centre nord), Touba Guene (nord) (Figure 1). Pour décrire les conditions climatiques de la zone d'étude, 4 stations météorologiques dites « synoptiques » (Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis; Figure 1) ont été retenues. Ces stations qui entourent la zone des Niayes enregistrent moins de 20% de données manquantes entre 1950 et 2004 (Aguiar *et al.*, (a) soumis).

Tableau 1. Données hydrogéologiques utilisées

<i>Source</i>	<i>Type de document</i>	<i>Durée</i>	<i>Nombre de piézomètres</i>	<i>Années manquantes</i>	<i>Résolution temporelle</i>
BRGM, 1962	statistique	Juin 1958 à décembre 1959	53	0	mensuelle
OMS, 1975	cartographique	Juillet 1963 et octobre 1963	117	0	mensuelle
Fohlen & Lemordant, 1983	statistique	Mai 1965 et septembre 1965	118	0	mensuelle
OMS, 1975	statistique	Janvier 1974 à décembre 1974	104	0	mensuelle
SGPRE, 2003	statistique	1976 à 2002	45	1995 à 2000	Bimensuelle et saisonnière (juin et octobre)
	statistique	Juillet 2002 et novembre 2002	41	0	mensuelle

1.5 Méthodologie

L'analyse statistique a porté parallèlement sur les séries de données pluviométriques et sur la piézométrie. Afin de déceler les anomalies de précipitation, les cumuls pluviométriques annuels, ont été normalisés par leurs moyennes sur la période 1961-1990, et par leurs écarts-types sur l'ensemble de la série (1950-2004) pour chaque station synoptique. L'utilisation de la valeur normalisée permet de comparer sur une base commune les anomalies entre eux et entre les stations. Cette étape s'impose dans le littoral nord Sénégalais où les précipitations annuelles varient en effet de 300 mm à 500 mm du Nord au Sud selon les années (Rossel & Garbrecht, 2000; Aguiar *et al.*, (a) soumis).

L'évolution interannuelle de la piézométrie a été analysée *via* la comparaison des valeurs enregistrées le même mois, en différentes années entre 1958 et 2002. Ceci permet de s'affranchir des fluctuations cycliques ou aléatoires de la nappe et d'évaluer la tendance fondamentale ou sous-jacente (Grais, 1998). Sachant que les précipitations constituent la plus importante source de recharge de la NSQ, cette

«correction de la saisonnalité» a été appliquée au début (juin) et à la fin (octobre) de la saison pluvieuse.

Les cartes piézométriques réalisées par le BRGM (Fohlen & Lemordant, 1983) ont été géoréférencées et numérisées suivant la même projection: UTM (Universal Transverse Mercator), calculée à partir des métadonnées de la carte d'occupation du sol de la zone (DTGC, 1996) à l'échelle du 1/20000. Cette série de cartes existantes a été complétée par d'autres réalisées dans le cadre de cette étude à partir de séries statistiques de piézométrie et suivant un pas de temps approximatif de 10 ans: 1958, 1965, 1974, 1984, 1994. Ces cartes ont été conçues pour les mois de mai/juin et septembre/octobre. La méthode d'interpolation utilisée fut le « krigage » qui estime les valeurs aux points non échantillonnés par une combinaison des données tenant compte de la distance entre les points de mesure, des valeurs et de leurs corrélations (Matheron, 1963; Dubrule, 1984; Isaaks & Srivastava, 1989; Chilès & Delfiner, 1999). Le « krigage » a été réalisé à partir de 38 points de mesures piézométriques (Figure 1). La validité de cette opération, et notamment de la valeur des paramètres d'interpolation, a été testée par comparaison avec les résultats déjà publiés (BRGM, 1962; OMS, 1975; Fohlen & Lemordant, 1983; BRGM, 1984, Annexe 3). Cette étape a permis de confirmer la présence de bombements ou de dépressions piézométriques.

1.6 Résultats

1.6.1 Variabilité inter-annuelle des précipitations

La variabilité inter-annuelle de la pluviométrie est marquée par deux séquences contrastées, avec une rupture en 1970. Entre les périodes 1950-1969 et 1970-1989, la moyenne pluviométrique annuelle a baissé de 39 % à Thiès, 46 % à Dakar, 35 % à Saint-Louis et 43.7 % à Louga, soit une variation régionale de plus de 41%. Les amplitudes de variation maximales entre ces deux périodes ont été enregistrées sur la façade méridionale de la région des Niayes : à Dakar (282.2 mm) et à Thiès (280 mm)

(Aguiar *et al.*, (a) soumis; Figure 2). Les précipitations ont ainsi davantage baissé au Sud qu'au Nord, induisant une réduction du gradient Sud-Nord et un « nivellement » progressif des hauteurs de précipitations dans toute la région.

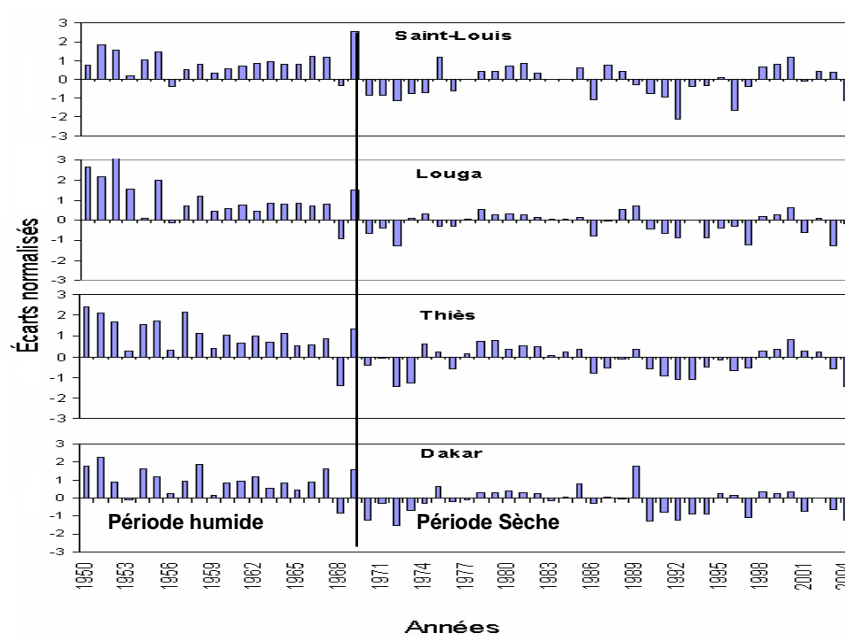


Figure 2. Anomalies normalisées des cumuls pluviométriques entre 1950 et 2004.

Les valeurs négatives (-) ou positives (+) indiquent respectivement une pluviométrie déficitaire ou excédentaire par rapport à la normale (1961-1990). Le trait noir vertical correspond la fin de la période humide et au début de la période sèche.

1.6.2 Tendance inter-annuelle du niveau de la nappe

La figure 3 montre un maintien de la nappe phréatique à un niveau élevé jusqu'au début des années 1970, et un affaissement rapide ensuite avec notamment une courte période de recharge à Touba Guene à la fin des années 1980. Les plus fortes baisses ont été enregistrées au cours des décennies 1970 et 1980 avec des maxima au mois de juin de 0.84 m à Kab Gaye (centre) et 1.03 m à Lac Mekhe (sud) respectivement, en contraste avec Touba Guene (extrême nord), qui semble relativement préservé

(Tableau 2). Avant 1970, l'évolution du niveau la nappe était en hausse dans les trois piézomètres les plus au sud de la région, alors qu'elle était déjà en baisse au Nord. Par la suite, la piézométrie s'abaisse plus rapidement au Sud qu'au Nord de la région. Ainsi, malgré cette réaction plus tardive, les variations piézométriques sur l'ensemble de la période d'étude ont crû du Nord vers le Sud avec un rabattement maximum de 2.70 m à Lac Mekhe (Tableau 2).

Le tableau 3 permet de comparer, pour un mois donné, la variabilité interannuelle de la piézométrie, illustrée par son écart-type sur la période 1958-2002. Le niveau de la nappe est ainsi très variable d'une année à l'autre avec un écart-type partout supérieur ou égal à 0.50 m. Les fluctuations piézométriques sont nettement plus prononcées à la fin de la saison pluvieuse qu'à la fin de la saison sèche. Cette variabilité peut trouver son explication dans la différence des apports pluviométriques annuels et de l'intensité des événements pluvieux mais aussi des extrêmes de précipitations qui semblent plus fréquents à la fin de la saison de mousson (Gachon *et al.*, 2007).

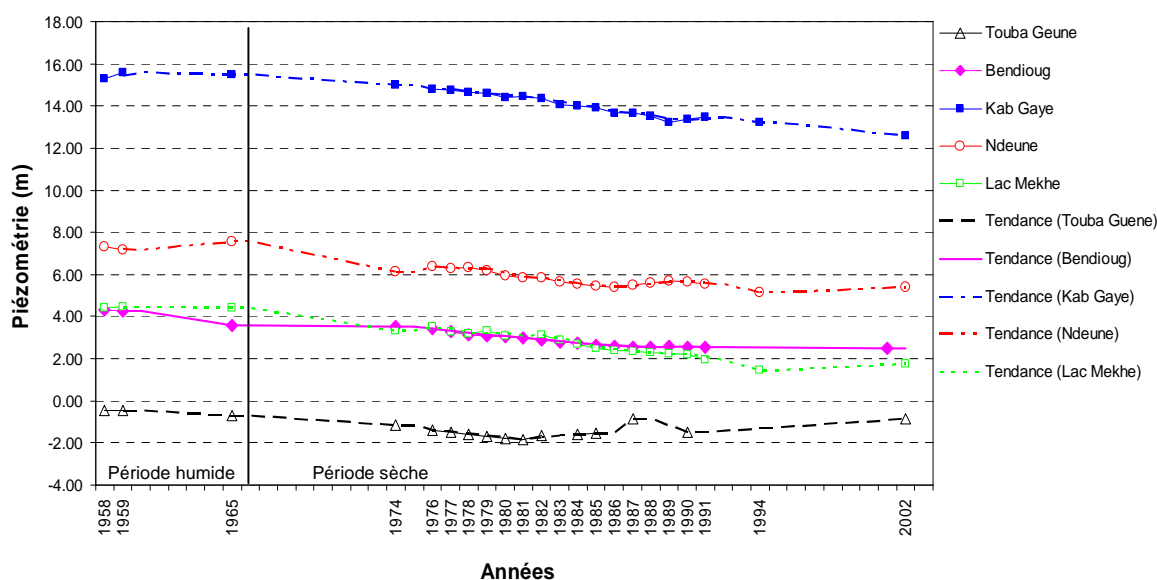


Figure 3. Tendances de l'évolution annuelle du niveau moyen de la nappe entre 1958 et 2002. La ligne noire verticale correspond à la fin de la période humide et au début de la période sèche.

Tableau 2. Tendances et écarts décennaux du niveau de la nappe entre 1958 et 1994

	Écarts piézométriques (m)				Cumul (m)	Moyenne (m / 10 ans)
Période	1958 - 1965	1965 - 1974	1974 - 1984	1984 - 1994	1958 - 1994	1958 - 1994
Durée (ans)	7	10	10	10	36	36
Touba Guene	-0.22	-0.38	-0.40	-0.11	-1.11	-0.30
Bendioug	-0.62	-0.03	-0.81	-0.26	-1.72	-0.47
Kab Gaye	0.40	-0.52	-0.84	-0.85	-1.81	-0.50
Ndeune	0.29	-1.25	-0.64	-0.38	-1.98	-0.55
Lac Mekhe	0.04	-0.96	-0.75	-1.03	-2.70	-0.75
Moyenne régionale	-0.02	-0.63	-0.69	-0.52	-1.86	-0.51

Tableau 3. Amplitude (Δh en m) des variations du niveau de la nappe entre 1958 et 1994

Piézomètre de référence	Touba Guene	Bendioug	Kab Gaye	Ndeune	Lac Mekhe
Δh (Juin)	-2.26	-1.70	-2.16	-2.45	-2.66
Écart-type	0.76	0.50	0.65	0.71	0.78
Δh (Octobre)	-2.61	-2.35	-3.4	-2.75	-3.37
Écart-type	0.88	0.63	0.99	0.79	0.96

(juin et octobre)

1.6.3 Dynamique morphologique de la NSQ

La figure 4 montre l'évolution morphologique du niveau de la nappe suivant un pas de temps approximatif de 10 ans (1958, 1965, 1974, 1984, 1994). La morphologie de la nappe est marquée par la présence d'un bombement piézométrique au Sud de la zone d'étude. À partir de ce secteur, les courbes isopièzes suivent un gradient latitudinal décroissant en direction du delta du fleuve Sénégal qui occupe la partie septentrionale de la zone, vers le Sud-Ouest où s'est créé brusquement un creux piézométrique local. Deux variations majeures peuvent être décelées : les variations inter-annuelles et les variations saisonnières.

1.6.3.1 Variations inter-annuelles

Le dôme piézométrique d'une hauteur maximale de près de 55 m au dessus du niveau de la mer, en septembre 1958, n'était plus que d'environ 19 m en octobre 1984, avant de remonter légèrement pour atteindre environ 22 m en octobre 1994. Un creux piézométrique s'installe progressivement au Sud-Ouest, dès les années 1960, pour devenir une véritable dépression locale atteignant -5.18 m en octobre 1994. Les morphologies de la NSQ de 1974 et de 1984 sont quasi semblables.

Au cours des trente dernières années, la morphologie de la nappe est donc marquée par un abaissement de la crête piézométrique entraînant son aplanissement progressif. Il en est résulté une déformation du dôme piézométrique se caractérisant par son déplacement vers le centre de la région. Cette modification de l'allure morphologique de la nappe s'est également manifestée par un rehaussement du plan d'eau dans la partie nord du littoral, où le niveau piézométrique est passé de -5.18 m en 1984 à -3.20 m en 1994. L'amoindrissement de ce dôme et le décalage de son maximum vers le Nord ont localement réorganisé les écoulements. Un nouveau gradient piézométrique vers le Sud est alors observé à partir du toit de la nappe localisé au centre de la région.

En effet, le niveau élevé de la crête piézométrique observé avant la sécheresse des années 1970 (55 m en 1958, 46 m en 1965) coïncide avec la séquence humide des années 1950 et 1960 (Figure 2). Au cours de cette période, le pourcentage de nombre de jours avec précipitation fut de 45% en moyenne au cours des mois de juillet, août et septembre. Les séquences sèches à l'intérieur de la saison pluvieuse furent relativement courtes avec un nombre de jours secs consécutifs inférieur à 10 jours (Aguiar *et al.*, (a) soumis). Cela suggère des apports pluviométriques assez importants qui ont pu assurer une recharge soutenue de la nappe à cette période.

Par contre l'affaissement rapide du niveau de la nappe, observé depuis le début des années 1970, est concomitant à la baisse des apports pluviométriques ces dernières décennies (Figure 2). Depuis 1950, le nombre de jours de précipitation a baissé en

moyenne de 2 jours tous les 10 ans et le nombre de jours secs consécutifs a augmenté d'environ 4 jours tous les 10 ans avec des maxima à Dakar et Thiès (Aguilar *et al.*, (a) soumis). Par conséquent, les précipitations en baisse ont favorisé une régression progressive du niveau de la nappe de près 0.51 m / 10 ans en moyenne entre 1958 et 1994.

Il semble par conséquent que l'explication de la présence d'un dôme piézométrique au centre de la région en 1984 et 1994 doit être recherchée préférentiellement dans l'épuisement de la nappe phréatique au Sud de la région où la baisse des précipitations a été plus marquée (Aguilar *et al.*, (a) soumis) et où les prélèvements ont été peut être plus élevés. Cependant, la non disponibilité de mesures de pompage sur plusieurs années ne permet pas de démontrer en détail l'impact des prélèvements sur la morphologie de la nappe (nous y reviendrons).

1.6.3.2 Variations saisonnières

Entre juin et septembre 1958, le niveau général de la nappe a évolué positivement entraînant un rehaussement autant du toit de la nappe que du fond de celle-ci avec une bonification respective de 8 et 5 m. Il en est résulté une extension du dôme sur toute la partie méridionale de la région et une disparition des isopièzes inférieures à -5 m à la faveur des isopièzes entre 0 m et -5 m au Nord. Entre mai et septembre 1965, l'évolution du niveau de la nappe est quasi stable avec une légère remontée de 0.04 m du fond de la nappe.

Au cours des années 1970 et 1980, l'évolution intra-annuelle de la nappe est généralement régressive. En 1974, le fond de la nappe a baissé de 0.50 m entre juin et octobre. Même constat pour l'année 1984 où le toit de la nappe a régressé de près de 3 m (2.99) entre le début et la fin de la saison pluvieuse. La carte du mois d'octobre 1994 laisse apparaître une hausse du niveau d'eau, au Nord et au Sud, marquée surtout par une remontée de la piézométrie dans la zone d'affaissement. La cote minimale passe de -5.18 m en juin à -3.20 m en octobre.

Le rehaussement du niveau de la nappe en 1958 peut s'expliquer par la contribution pluviométrique de cette année estimée en moyenne à 66% supérieure à la moyenne régionale de 1961-1990 (370 mm) avec des cumuls annuels pluviométriques de 818 mm à Dakar et de 771 mm à Thiès (Figure 2). Par contre, le faible cumul pluviométrique de l'année 1974 (324 mm), a favorisé une régression du fond de la nappe de plus de 0.50 m pour atteindre -3.35 m en octobre 1974. Les années 1970 à 1974, inclusivement, furent particulièrement marquées par une pluviométrie déficitaire d'où la persistance de la baisse du niveau piézométrique en 1974 (Figure 2). L'apport pluviométrique qui permet de relever le niveau statique de la nappe fut hydrogéologiquement quasi nul. En 1984, le déficit pluviométrique par rapport à la normale de 1961-1990 fut estimé à près de 76% à Dakar, 52% à Thiès, 85% à Louga, 95% à Saint-Louis, soit une moyenne de 77% sur toute la région des Niayes (Figure 2). En 1994, malgré le contexte pluviométrique déficitaire du début des années 1990 (1990-1994) un rehaussement du niveau de la nappe est observé dans la partie nord.

Les variations maximales du niveau de la nappe sont observables dans la zone centrale de la région des Niayes aux alentours de Kab Gaye. En effet, cette station est localisée dans la zone de forte transmissivité (T) et de perméabilité (K) estimées respectivement à $1.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ et 5.10^{-4} m/s (BRGM, 1984). Ces propriétés physiques du sol suggèrent une transition rapide des eaux de pluie vers la nappe souterraine. D'ailleurs, une analyse plus poussée des années 1958 et 1974 (Aguiar *et al.* (b) soumis) a montré une bonne réactivité de la NSQ aux fluctuations pluviométriques, au centre de la région des Niayes et avec un temps de réponse de la nappe de l'ordre du mois. Au sud, l'axe de bombement piézométrique se superpose à une zone de faible conductivité électrique inférieure à $200 \mu\text{s/cm}$ à 20°C témoignant d'un renouvellement préférentiel des eaux de pluie dans la nappe (BRGM, 1984). Donc, au-delà de la variabilité des apports pluviométriques, les pulsations hydrologiques peuvent être influencées par les propriétés physiques des sols. En l'absence d'analyse plus poussée, cette explication reste une hypothèse.

En résumé, les variations saisonnières ont été positives au cours des années 1958 et 1965, contrairement aux années 1974, 1984 et 1994 où la morphologie de la nappe fut quasi identique entre le début et la fin de la saison pluvieuse. Les précipitations enregistrées au cours de ces trois dernières années furent hydrologiquement nulles. Même si les propriétés physiques du sol induisent une différence de recharge entre les différents piézomètres, elles n'ont pas varié dans le temps, du moins à l'échelle annuelle, pour engendrer des fluctuations piézométriques saisonnières.

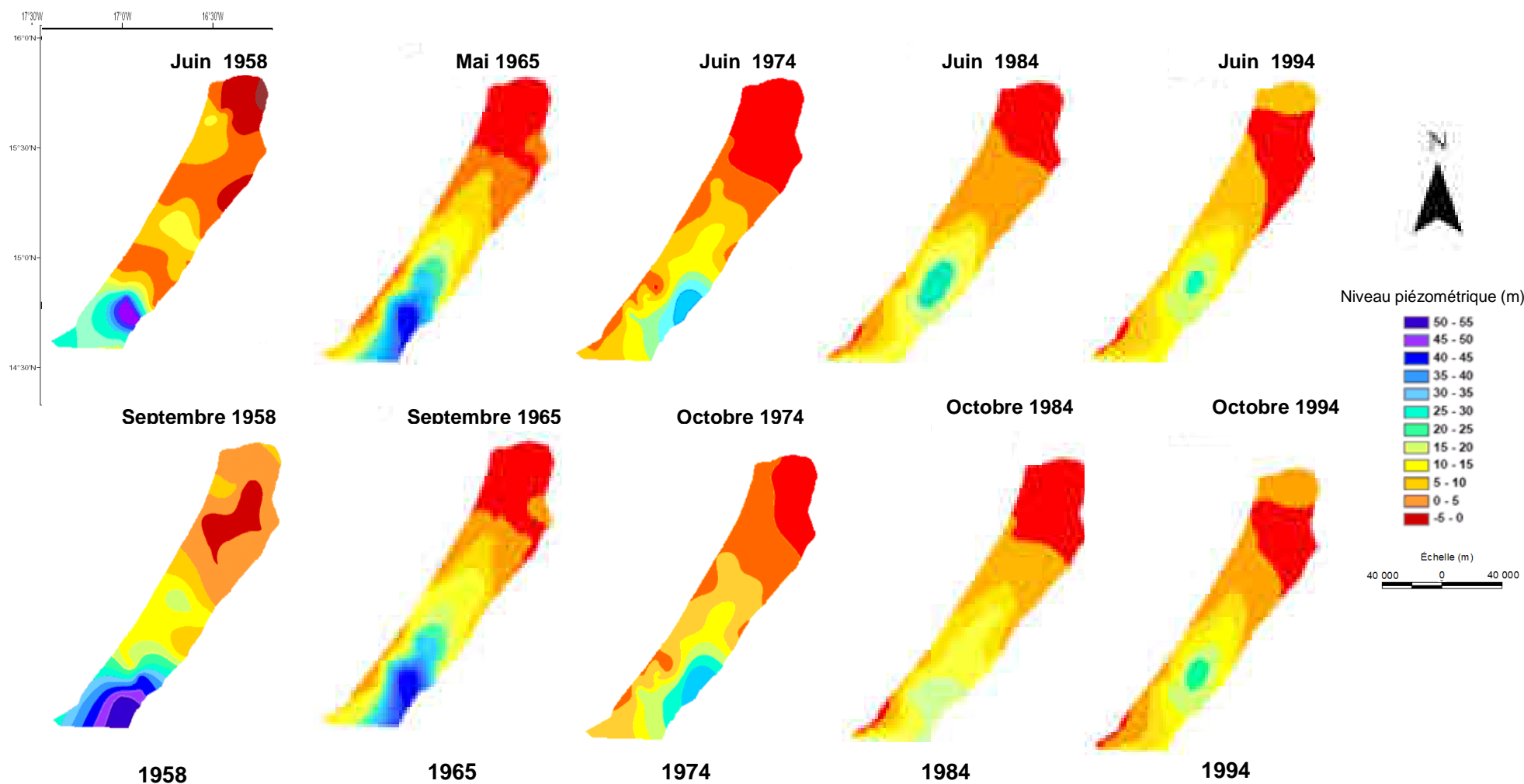


Figure 4. Évolution morphodynamique de la NSQ entre 1958 et 1994 pour le début (mai-juin) et la fin (sept-oct) de la saison des pluies.

1.6.4 Contribution des activités anthropiques à l'évolution du niveau de la nappe

1.6.4.1 Bilan hydrologique de l'année 1974

Le tableau 4 présente les termes et le résultat du bilan hydrologique moyen de la NSQ en année de pluviométrie déficitaire (1974) par rapport à la normale de référence 1961-1990. L'année 1974 est la seule pour laquelle des données de pompage relativement complètes (Alimentation en Eau Potable, pompage agricole et industriel) étaient disponibles (OMS, 1975).

Tableau 4. Bilan hydrologique moyen la NSQ de l'année 1974

DONNÉES DE BASE				
Surf. Bassin	Coef. d'infiltration	Δh moyen	Précipitation moyenne	Évapotranspiration
2300 km ²	25%	31.5 mm	314.52 mm	244.3 mm
ENTRÉES			SORTIES	
P. moyenne = 314.52 mm			Facteurs naturels	
			Évapotranspiration	244.3 mm
BILAN = entrées - sorties			Perte en mer	18 mm
314.52 mm - 273.64 mm		41.18 mm	Total	262.3 mm
			Facteurs anthropiques	
			AEP*	6.21 mm
			Agriculture	4.74 mm
Écart = bilan - Δh moyen = 9.68 mm			Industrielle (Taïba)	0.39 mm
			Total	11.34 mm
			Total sorties	273.64 mm

* AEP : Alimentation en Eau Potable

Les précipitations qui constituent la principale entrée hydrologique sont obtenues à partir du calcul de la moyenne des cumuls annuels des 4 stations synoptiques de la région (Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis; Figure 1). L'évapotranspiration est obtenue à partir du bilan hydrique calculé par la méthode de Thornthwaite (Tandia, 1990), et les pertes vers la mer sont calculées à partir du débit de l'écoulement vers

l'océan estimé entre 3.3 l/s/km et 4.2 l/s/km (Béture-Sétame, 1988; BRGM, 1984). Les débits de pompage sont calculés pour la période de juin à décembre et traduits en lame d'eau (mm) sur la l'étendue du bassin (2300 km²) (Gladima, 1992; Faye, 1995, Annexe 2). Pour les sables grossiers (0.05 - 2 mm), le coefficient de porosité efficace souvent utilisé varie entre 20 et 30% (Todd, 1980; BRGM, 1984; Banton & Lumony, 1999; Healy & Cook, 2002). Dans cette étude, le coefficient de porosité efficace est fixé à 25%. Le Δh moyen de 31.5 mm qui correspond à l'écart moyen obtenu à partir des piézomètres de référence est tiré des travaux d'Aguiar *et al.*, ((b) soumis).

Le tableau 4 suggère que l'évapotranspiration qui représente près de 89% des sorties et 93 % des pertes naturelles constitue le principal facteur de décharge de la nappe. Les pertes vers la mer constituent le deuxième facteur naturel de décharge avec environ 6 % de la totalité des pertes. Elles sont favorisées par la géomorphologie du substratum marneux sur lequel repose la NSQ et qui est incliné vers l'océan, facilitant ainsi un écoulement latéral vers celui-ci (BRGM, 1978). Un équilibre hydrostatique s'installe selon une différence de densité entre eaux douces et eaux salées. Suivant le plan de l'inclinaison du substrat et la quantité des précipitations enregistrée au cours de l'année, la quantité d'eau s'écoulant vers la mer a entraîné un rabattement de la nappe d'environ 18 mm en 1974 (BRGM, 1984; Béture-Sétame, 1988). Au total, les causes naturelles qui représentent plus de 96% des sorties constitueraient les principaux facteurs de déstockage de la nappe.

La quantité d'eau pompée ne représente qu'environ 4% de la totalité des eaux qui sortent du système hydrologique des Niayes. L'Alimentation en Eau Potable (AEP) constitue la première cause de prélèvement anthropique avec plus de 56% de la totalité des eaux pompées. Cette exploitation se fait par les puits et forages installés dans les communautés rurales et les grandes agglomérations (Gladima, 1992).

Les besoins agricoles constituent la deuxième cause anthropique de décharge de la nappe avec près 43% des eaux extraites par l'homme. Ces eaux sont prélevées *via* un système d'exhaure composé principalement de puits traditionnels appelés *céanes* (puits peu profond variant en 1 et 10 m environ), où le pompage se fait manuellement.

Ce type d'irrigation a l'avantage de retourner à la nappe une grande partie de l'eau puisée mais la quantité extraite est difficilement contrôlable. Pour maintenir une irrigation suffisante des cultures et subvenir à leur propre besoin en eau potable, les paysans doivent maintenant approfondir la plupart des *céanes*.

L'industrie d'exploitation des phosphates de Taïba sollicite également la NSQ. Depuis son installation en 1957 et jusque vers la fin des années 1970, l'usine des phosphates de Taïba exploitait la NSQ à un débit régulier d'environ 2480 m³/j (Faye, 1995). Ce débit est négligeable par rapport aux autres activités de pompage anthropiques et surtout à la totalité des pertes (facteurs naturels et anthropiques). Les prélèvements industriels représentaient moins de 4% des eaux pompées en 1974.

En définitive, les prélèvements anthropiques étaient encore minimes par rapport aux pertes d'origine climatique, mais peuvent actuellement accentuer la décharge hydrologique. Il faut noter qu'en 1974, la région des Niayes était très peu anthropisée, comparativement à la période postérieure à 1984 où le flux migratoire s'est accentué en même temps que se développait l'industrie et l'agriculture.

La densité moyenne de la population de la région des Niayes est passée de plus de 25.7 habitants au km² en 1950 à probablement 62.5 habitants au km² en 2000 selon les projections de la Direction de la Prévision Statistique (DPS, 1997). Les plus fortes densités se rencontrent dans les secteurs Nord et Sud (70 habitants au km²) contrairement au centre de la région (DPS, 1997). Cette différence de densité entre le sud et le centre de la région des Niayes qui suggère un moindre prélèvement dans le secteur centre, par rapport au secteur Sud, pourrait en plus expliquer le déplacement du dôme vers ce secteur de la région. L'abaissement du dôme piézométrique dans le secteur sud serait donc accentué par les nombreuses sollicitations pour la satisfaction d'une population sans cesse croissante.

En considérant la croissance de la densité de la population susmentionnée, on peut aisément comprendre l'augmentation des besoins qui peuvent en découler tant en terme d'alimentation en eau potable qu'en terme d'irrigation (agriculture, maraîchage). Au début des années 1990, les études de Gladima (1992) et de Faye

(1995) estimaient les débits extraits à 100 000 m³/j, alors que les ressources renouvelables étaient estimées à 115 000 m³/j. Selon ces auteurs, les besoins en eau consomment près de 5% de la ressource théorique exploitable de la nappe des sables de la zone des Niayes. Or, lorsque les prélèvements excèdent 5% de la réserve théoriquement exploitable, un épuisement progressif de la nappe est observé (Banton & Lumony, 1999). Donc, même si les facteurs naturels (baisse des précipitations et évapotranspiration) sont les principaux facteurs de destockage de la nappe en 1974, la baisse du niveau piézométrique est accentuée par les prélèvements anthropiques surtout au cours des 2 dernières décennies.

1.6.4.2 Influence possible du barrage de Diama

La station piézométrique de Touba Guene, située dans le secteur nord de la région des Niayes (Figure 1), a enregistré 3 grandes périodes de variations hydrologiques: (i) une première antérieure à 1965 (1958-1965) caractérisée par un niveau de nappe phréatique relativement stable avec une légère baisse de 0.22 m; (ii) une deuxième allant de mai 1965 à juin 1984, au cours de laquelle le niveau de la nappe a baissé de près de 0.40 m, et (iii) une troisième de juin 1984 à juin 1994 où le niveau de la nappe n'a régressé que de 0.11 m en dépit de la sécheresse enregistrée entre 1990 et 1994 (Figure 3). Ce ralentissement du rythme d'abaissement de la nappe dans le secteur nord de la région des Niayes, au cours des années 1980 et 1990, peut être attribué à l'apport pluviométrique mais peut-être aussi à l'alimentation par percolation latérale à partir des eaux du delta du fleuve Sénégal, qui restent les seules sources d'alimentation de la nappe dans cette zone. La première hypothèse est moins évidente en début de saison pluvieuse (juin) et en période de sécheresse (1990-1994). La nappe fut donc probablement alimentée, en cette période, par les eaux du fleuve Sénégal qui prend sa source à 3° au Sud (Guinée) où les précipitations, atteignant 2000 mm/an, débutent au cours du mois d'avril. En 1994, le débit moyen du fleuve à Bakel (Figure 1) a augmenté, atteignant 615 m³/s comparativement aux moyennes

décennales des années 1970 et 1980 qui étaient d'environ $421 \text{ m}^3/\text{s}$ (Olivry, 1994). Dans ce cas, il est possible que l'alimentation de la nappe fut favorisée par l'infiltration à partir des retenues d'eau des bouchons-barrages en 1983-1984 et des barrages de Diama (1985) et de Manantali au Mali (1987). Ces barrages et le système de digues qui leur est associé ont entraîné des changements environnementaux et une modification de l'hydrosystème naturel du fleuve Sénégal, modifiant par conséquent la relation pluie-débit-écoulement souterrain dans le delta du fleuve (Saos *et al.*, 1993).

Cependant, la mauvaise connaissance de la piézométrie dans la zone septentrionale du littoral nord, où les mesures piézométriques ne sont disponibles que pour un seul piézomètre de référence (Touba Guene), ne permet pas une quantification exacte et exhaustive de l'influence des aménagements hydrauliques sur le niveau de la nappe. La confirmation d'une telle hypothèse nécessite non seulement une étude plus poussée de l'évolution du débit du fleuve et du niveau piézométrique dans le delta du fleuve mais également une analyse isotopique des eaux de la nappe phréatique afin de déterminer l'origine fluviale, marine ou météoritique de sa recharge.

1.7 Conclusion

Au cours des 50 dernières années, la crête piézométrique est passé de près de 55 m en 1958 à moins de 20 m en 1984 avant d'atteindre 22 m au dessus du niveau 0 m de la mer en 1994, résultant d'une longue période déficitaire. Les plus fortes baisses piézométriques ont été enregistrées au cours des décennies 1970 et 1980 avec une baisse progressive moyenne de près de -0.51 m tous les dix ans après 1974 et de -0.45 m/10 ans sur toute la période (1958-1994).

En 2002, le niveau de la nappe semble avoir continué à s'abaisser malgré la stabilisation de la baisse des précipitations depuis la fin des années 1990 (1998, 1999 et 2000). En effet, le niveau de la nappe directement influencé par celui des précipitations subit ainsi un effet retard, appelé «effet mémoire» pluri-annuel, dû aux

déficits pluviométriques répétés. La reconstitution des stocks de réserves souterraines nécessitera probablement plusieurs années consécutives de pluviométrie abondante. Cependant, si la baisse de la nappe phréatique s'est accélérée depuis 1970, des observations anciennes montrent qu'il s'agit d'un phénomène antérieur, observé depuis 1883 (Henry, 1921).

Conformément à la baisse des précipitations qui a subi un gradient décroissant sud-nord, entre 1950 et 2004, le niveau de la nappe a d'avantage baissé dans le secteur Sud comparativement au Nord. L'évolution morphologique de la nappe semble donc très sensible à cette distribution spatiale des précipitations mais également aux prélèvements anthropiques qui seraient plus élevés au sud de la région. Toutefois, les variations maximales de la piézométrie sont observables dans la zone centrale de la région des Niayes, aux alentours de Kab Gaye, où les propriétés physiques du sol favorisent une bonne réactivité de la nappe aux précipitations. À l'Ouest, la nappe est protégée des invasions du biseau salé par le bombement piézométrique et le gradient piézométrique associé. Au Nord, par contre, elle semble vulnérable à la progression des eaux en provenance du delta du fleuve Sénégal. Depuis le milieu des années 1980, la recharge de la nappe dans le secteur nord de la région des Niayes semble avoir été régulée par la quantité d'eau infiltrée à partir du delta du fleuve Sénégal plutôt que par la hauteur des précipitations observées.

Les résultats du bilan hydrologique pour l'année 1974 suggèrent que les facteurs climatiques constituent la principale cause de variations du niveau de la nappe tant en terme d'entrées (précipitations) qu'en terme de sorties (évapotranspiration). L'évapotranspiration qui représente près de 90 % des sorties et 93 % des pertes naturelles constitue le principal facteur de décharge de la nappe. Toutefois, dans la zone de bombement, la profondeur de nappe peut atteindre plusieurs mètres. Il est clair que, dans ces conditions, l'évaporation à de telles profondeurs est réduite même si une remontée importante par capillarité peut être envisagée. Les fluctuations piézométriques ne renseignent que très peu à ce sujet. En définitive, même si les facteurs naturels sont les principales causes de déstockage de la nappe, la baisse du

niveau piézométrique serait accentuée par les prélèvements anthropiques surtout au cours des 20 dernières années pendant lesquelles la population de la région des Niayes a presque doublé.

Remerciements. Les auteurs tiennent à remercier le programme de bourse de la fondation Ford, la chaire en environnement à l'échelle du globe de l'UQAM (Université du Québec à Montréal) et le CRSNG (Conseil de recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada) pour leur soutien financier et le consortium Ouranos pour son soutien matériel. Ces remerciements sont également adressés au Service de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau du Sénégal, à l'équipe d'hydrologie du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (France). Un grand merci est également adressé au Dr. Serigne Faye et au Dr. Isabelle Niang de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar pour leur collaboration scientifique.

1.8 Références

- Aguiar L.A.A., Gachon P., Garneau M., Lézine A.-M. (a). «Variabilités inter-annuelles et intra-saisonnières des précipitations le long du littoral nord du Sénégal entre 1950 et 2004». Article soumis à *Hydrological Sciences Journal* le 21 juillet 2008.
- Aguiar, L.A.A, Maugis P., Garneau M., Lézine A.-M. & Gachon P. (b). «Impacts de la variabilité des précipitations sur le niveau de la nappe phréatique de la région des Niayes du Sénégal en années de pluviométrie excédentaire et déficitaire: 1958 et 1974». Article soumis à la revue *Sécheresse*, le 25 juillet 2008.
- Banton O. & Lumony M., 1999. *Hydrogéologie multiscience environnementale des eaux souterraines*. Presses Universitaires du Québec/ AUPELF, 460 p.
- Béture-Sétame, 1988. Renforcement de l'approvisionnement en eau de la région de Dakar. Ltd. Dakar (SEN) Tome 1.
- BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière), 1962. Hydrologie de la région des Niayes, sous la direction de J. Putallaz, rapport BRGM, Dak 62-A 12, 37 p. + annexes.

- BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière), 1978. Étude hydrogéologique des calcaires lutétiens entre Bambey et Louga (2^e phase), sous la direction d'Y. Noël, rapport projet 248/CD/74/VI/A12, 78 DAX 02, 82 p.
- BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière), 1984. Projet d'exploitation des tourbes des Niayes. Rapport de synthèse géologique prospection générale et certification des réserves, sous la direction de J.J Châteauneuf G. Pezeril, BRGM, rapport de synthèse, 89 p. + annexes.
- Chilès, J.P. & Delfiner P., 1999. «Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty. Wiley, New York, xi, 695 p.
- Christensen, N., Wood A., Voisin N., Lettenmaier D. & Palmer R., 2004. «Effects of Climate Change on the Hydrology and Water Resources of the Colorado River Basin». *Clim. Change*, 62: 337-363.
- DPS (Direction de la Prévision de la Statistique), 1997. *Enquête sénégalaise auprès des ménages, de mars 1994 à mai 1995 : la consommation, les dépenses et les activités*, rapport de synthèse, CILSS-UE, DIAPER III (Sénégal), 178 p.
- Dryade (Le Groupe), 1990. Inventaire Biophysique de la région des Niayes - Synthèse, document de recherche dans le cadre du Project Conservation des Terroirs du Littoral, Ministère du Développement Rural et de l'Hydraulique. Direction des eaux, Forêts, Chasses et de la Conservation des Sols, République du Sénégal, 262 p.
- DTGC (Direction Générale des Travaux Cartographiques), 1996. Carte d'occupation du sol de Louga au 1/200000. Projet Paddel – Coopération Française (Institut Géographique National), 5^{ème} éditions: ND-28-XX LOUGA.
- Dubrule, O., 1984. «Comparing splines and kriging». *Computers and Geosciences*, 10: 327–338.
- Faye, S., 1995. Modélisation hydrodynamique des nappes du littoral nord entre Kayar et Saint-Louis. Impact des futurs prélèvements envisagés dans le cadre de l'approvisionnement en eau de Dakar et de ses environs. Thèse de doctorat, dép. de Géologie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar. 176 p.
- Fohlen, D. & Lemordant Y., 1983. Étude hydrogéologique. Secteur Mboro-Lompoul, Sénégal. Compagnie des tourbières du Sénégal. Projet d'exploitation des tourbes. BRGM (Paris). Rapport 83AGE013, annexes 1, 2 et 3. 82p.
- Gachon, P., Gauthier N., Bokoye A., Parishkura D., Cotnoir A., Tremblay Y. & Vigeant G., 2007. Groupe de travail II : Variabilité, extrêmes et changements climatiques au Sahel : de l'observation à la modélisation, dans Rapport des contributions canadiennes au projet ACIDI – CILSS); appui aux capacités d'adaptation aux changements climatiques. Environnement Canada A030978-002.

- Gaye, C., 1990. Étude isotopique et géochimique du mode de recharge par les pluies et de décharge évapotranspiration des aquifères libres sous climat semi-aride au Nord du Sénégal. Thèse de doctorat, dép. des Sci., Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 245 p.
- Gladima, A. S. 1992. Bilan de la Nappe des Sables Quaternaires de la péninsule du Cap Vert, (Sénégal), Mémoire de maîtrise, dép. Géologie et minéralogie, Université Laval, Québec, Qc., Canada, 78p.
- Grais, B., 1998. *Méthodes Statistiques, Techniques statistiques*. 2. éd. Dunod, Paris 3^e édition. 402 p.
- Healy, R.W. & Cook P.G., 2002. «Using groundwater levels to estimate recharge». *Hydro. Journal*, 10: 91-109.
- Henry, H., 1921. Eaux superficielles et souterraines au Sénégal. *Larose*, Paris, 30 p.
- Hulme, M., Doherty R., Ngara T., New M. & Lister D., 2001. «African climate change: 1900-2100». *Clim. Res.*, 17: 145-168.
- Isaaks, E. H. & Srivastava R. M., 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York. 561p.
- Lézine, A.-M., 1987. Paléoenvironnements végétaux d'Afrique nord-tropicale occidentale depuis 12000 B.P. Analyse pollinique de séries sédimentaires continentales Sénégal Mauritanie, Thèse de doctorat Université de Luminy (FRA), 151 p.
- Mahé, G., & Olivry J.-C., 1991. «Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale, du mensuel à l'inter-annuel». *AISH*, Wallingford (GBR), 201:163-171.
- Mahé, G., & Olivry J.-C., 1999. «Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa». *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Séries IIa, 328: 621-626.
- Matheron, G., 1963. «Principles of Geostatistics». *Economic Geology*, 58: 1246-1268.
- Muzik, I., 2001. «Sensitivity of hydrologic systems to climate change». *Canadian Water Resources J.*, 26: 233-252.
- Olivry, J.-C., 1994. «De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies». *Rev. de geogr. Alpine* 12: 101-108.
- OMS (Organisation Mondiale de la Santé) 1975. Étude sur modèles mathématiques de la Nappe des Sables Quaternaires et calcaires lutétiens entre Tivaouane et

- Saint-Louis du Sénégal. Sous la supervision de Sauty, J. P., Rapport BRGM, 75/SGN/049/AME, 100p.
- Rossel, F. & Garbrecht J., 2000. «Analyse et amélioration d'un indice pluviométrique mensuel régional pour les grandes plaines du sud des États-Unis». *Revue des sciences de l'eau*, 13: 39-46.
- Saos, J.-L., Diagana A. & Thiebaut J.-P., 1993. Relations eaux de surface eaux souterraines dans la vallée alluviale du fleuve Sénégal, Projet CEE TS 2 0198 F EDB Tome 4, ORSTOM, Dakar, 42 p.
- SGPRE (Service de la Gestion et de la Protection des Ressources en Eau : 2001, 2002, 2003): Suivi piézométrique des nappes de la presqu'île du cap vert et du littoral Nord. Rapport de synthèse, *Ministère de l'hydraulique* (SEN), 22 p.
- Tall, S. & Fall A. S., 2001. *Cités horticoles en sursis? L'agriculture urbaine dans les grandes Niayes au Sénégal*. Centre de Rech. pour le Dév. Internat. CRDI. Ottawa (Canada).138 p.
- Tandia, A., 1990. Revue critique des méthodes d'évaluation de la recharge des nappes. Contribution de l'approche géochimique et isotopique - Louga-Nord Sénégal. Thèse de 3e cycle, Université Cheikh Anta Diop de Dakar (SEN), 138 p.
- Todd, D. K., 1980. *Groundwater hydrology*. John Wesley & Sons, New York. 535 p.
- Trochain, J., 1940. *Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal*. Paris, Larose, 433 p., 30 pl.
- Xu, C-Y. & Singh V. P., 2004. «Review on regional water resources assessment under stationary and changing climate». *Water Resources Management*, 18: 591-612.

**Impacts de la variabilité des précipitations sur le niveau de la nappe phréatique
de la région des Niayes du Sénégal en années de pluviométrie excédentaire et
déficitaire: 1958 et 1974.**

Aguiar, Lazar A. A¹; Maugis, Pascal² Garneau, Michelle¹;
Lézine, Anne-Marie²; Gachon, Philippe³.

¹ Université du Québec à Montréal / GEOTOP-UQAM-Mc Gill / Ouranos ;

² CNRS-LSCE, Paris;

³ Environnement Canada @ Université McGill.

Article soumis à la revue

Sécheresse

Le 11 août 2008

1.9 Résumé

Cet article porte sur l'impact de la variabilité des précipitations sur les ressources en eau dans la région des Niayes⁸ du Sénégal en années de pluviométrie excédentaire (1958) et déficitaire (1974). La variabilité saisonnière du niveau de la nappe a été mise en évidence *via* l'analyse des années hydrologiques et de la cyclicité des variations du niveau de la nappe à partir de cinq piézomètres de référence. Au delà de la variabilité inter-annuelle marquée par une baisse générale depuis le début des années 1970, les fluctuations piézométriques sont marquées par une variation intra-annuelle liée à la distribution des précipitations au cours de la saison pluvieuse. La recharge de la nappe est différente suivant la fréquence, l'intensité des précipitations et la durée des séquences sèches à l'intérieur de la saison. En année de précipitations excédentaires (1958), le temps de recharge est de 5 à 7 mois contrairement en année sèche (1974) où la recharge est quasi nulle. La comparaison des régimes annuels de la nappe en 1958 *vs* 1974 suggère un recul du début de l'année hydrologique et un rétrécissement de la période de recharge consécutifs à la variabilité intra-saisonnière des précipitations. La recharge nette est quasi nulle en année de pluviométrie déficitaire. Elle peut différer malgré un même cumul annuel de précipitations, marquant ainsi une plus grande sensibilité à l'occurrence et l'intensité des événements pluvieux.

Mots clés : Nappe des Sables Quaternaires, Recharge, Précipitations, Sénégal, Niayes.

⁸ Les Niayes désignent des dépressions interdunaires où affleure la nappe phréatique. Elles sont localisées en arrière du cordon littoral du Nord du Sénégal entre Dakar et Saint-Louis. Sur les marges de ces dépressions se pratique la culture maraîchère qui fournit près de 80% de la production de légumes du pays.

1.10 Summary

This article focuses on the impact of the variability of precipitation on water resources in the Niayes during «rainy» (1958) *vs* «dry» (1974) years. The intra-annual groundwater level variability has been demonstrated through the analysis of hydrological years and the cyclical variations in the water level from five piezometers references. The selection of those references was based on the length of their series measures and their geographical location. The water recharge depends on the frequency, intensity of rainfall and duration of dry sequences within the season. In «rainy» year (1958) the recharge time is 5 to 7 months, this contrasts with «dry» year (1974) where piezometric fluctuations are almost nil. The 1958 *vs* 1974 annual groundwater comparison shows a decline in the beginning of the hydrological year and shrinkage of the recharge period resulting from the intra-seasonal rainfall. The net recharge is almost zero during years of rainfall deficit. For the same accumulation of annual precipitation, the net recharge is very different. It is a function of the occurrence of events rain more than a year of rainfall.

Key words: Quaternary water table, Recharge, Precipitation variability, Senegal, Niayes.

1.11 Introduction

Le Sahel, soumis au flux de la mousson Africaine, subit depuis plus de trois décennies une diminution de la pluviosité, mise en évidence par de nombreux auteurs (Le Barbé & Lebel, 1997; Servat *et al.*, 1999; Nicholson *et al.*, 2000; Hulme *et al.*, 2001; Le Barbé *et al.*, 2002; Le Lay & Galle 2005; Aguiar *et al.*, (a) soumis). Le déficit de recharge des réservoirs souterrains à partir des apports pluviométriques fut respectivement de 13% et 27% au cours des décennies 1970 et 1980 (Bricquet *et al.*, 1997). La baisse de la pluviométrie s'est manifestée par un rétrécissement de la durée de la saison pluvieuse, une diminution du nombre d'événements pluvieux et un allongement de la durée des séquences sèches à l'intérieur de la saison pluvieuse plus que du cumul de pluie par événement (Le Barbé & Lebel, 1997; D'Amato & Lebel, 1998; Le Barbé *et al.*, 2002; Aguiar *et al.*, (a) soumis). Dans ce contexte, l'étude de l'impact de la variabilité des précipitations sur les aquifères nécessite une prise en compte non seulement de la fréquence, de l'intensité des événements pluvieux et des extrêmes de précipitations mais également de la durée des séquences sèches au cours de la saison pluvieuse. Cet article présente une analyse détaillée de la dynamique de la nappe en relation avec la variabilité des précipitations à l'échelle intra-annuelle dans la région des Niayes du Sénégal. L'analyse a été faite à partir de quelques indices de variabilité et d'extrêmes de précipitations (Aguiar *et al.*, (a) soumis) pour des années de pluviométrie excédentaire (1958) et déficitaire (1974) pour lesquelles des mesures piézométriques systématiques et complètes étaient disponibles. Pour ces deux années, une analyse comparative du fonctionnement hydrodynamique de la nappe a été effectuée *via* notamment la détermination de l'année hydrologique et la mise en évidence de la cyclicité des variations piézométriques. Par la suite, le calcul de la recharge nette à partir du rapport eau infiltrée/eau précipitée a été fait. Ceci a permis de comparer les fonctionnements de la nappe superficielle (recharge) suivant deux régimes pluviométriques extrêmes.

1.12 Région d'étude

La zone des Niayes qui s'étend sur plus de 2300 km² est située au Nord-Ouest du Sénégal entre 14°3' et 16°N, et entre 16° et 17°5'W (Figure 1). Le régime pluviométrique est caractérisé par deux saisons bien marquées: une saison des pluies (de juin à octobre) et une saison sèche (de novembre à mai). Entre 1950 et 2004, les cumuls annuels de précipitations ont varié entre environ 500 mm au Sud et moins de 300 mm au Nord. Les températures moyennes annuelles sont plus basses sur la côte (ex. 24.5 °C à Saint-Louis) que dans l'hinterland (ex. 26.5°C à Louga) (Dryade, 1990).

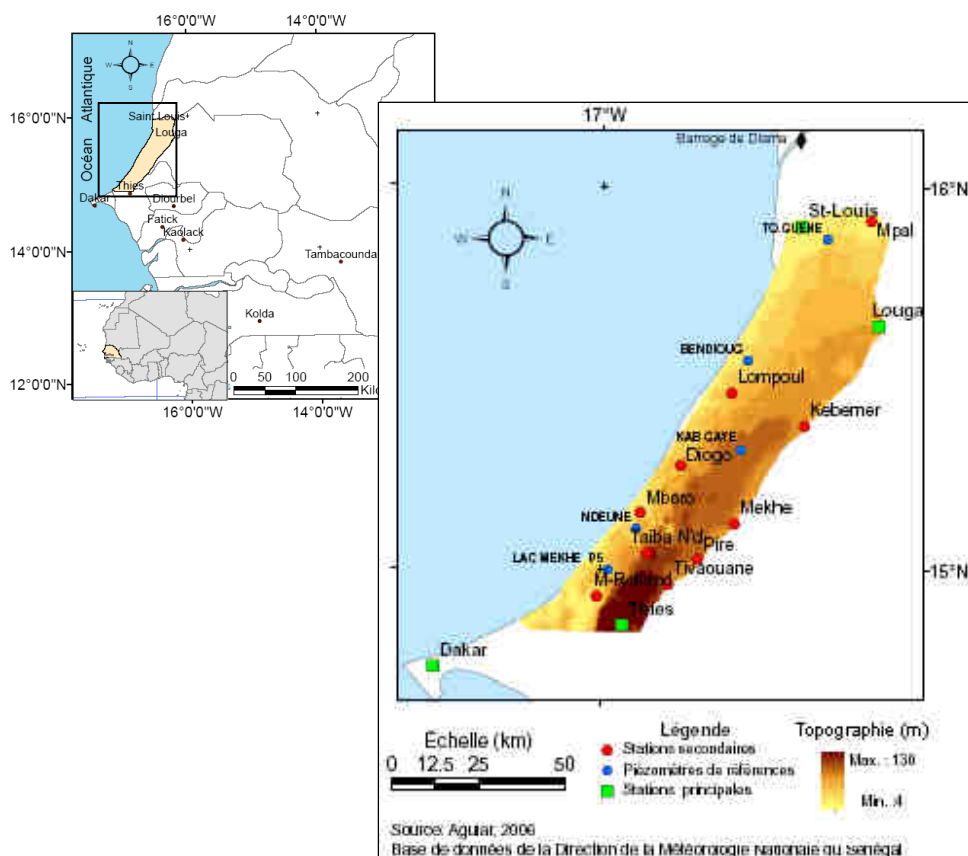


Figure 1. Localisation de la zone d'étude, des stations météorologiques (principales et secondaires) et des piézomètres de référence.

La particularité de la région des Niayes repose surtout sur l'influence des alizés maritimes et des courants océaniques qui atténuent les contrastes thermiques saisonniers du climat sahélien, zonal. La région des Niayes possède donc un climat à caractère azonal qui s'estompe au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la côte (Dryade, 1990).

La topographie est marquée par la présence de dunes sableuses et du plateau de Thiès dont l'altitude maximale ne dépasse pas 130 m (Figure 1). Entre les dunes s'étendent les Niayes qui sont des dépressions interdunaires riches en matière organique où la Nappe des Sables Quaternaires (NSQ) est affleurante à sub-affleurante. Cette nappe phréatique favorise le maintien d'une végétation relique d'origine subguinéenne (Trochain, 1940) mise en place dès le début de l'Holocène alors que les conditions climatiques étaient beaucoup plus humides (Lézine, 1987). Sur les marges des dépressions Niayes se pratiquent les cultures maraîchères qui produisent près de 80% des légumes du Sénégal (Tall & Fall, 2001).

La présente étude porte sur la dynamique hydrologique de la Nappe des Sables Quaternaires (NSQ) qui affleure dans le fond des dépressions inter-dunaires que sont les Niayes. La NSQ est un aquifère côtier, d'où localement, la présence d'un front salé le long de la côte (Dryade, 1990; Dasylva *et al.*, 2003).

1.13 Données utilisées

Les données de cette étude proviennent de mesures piézométriques effectuées entre 1958 et 2002. Elles ont été obtenues à partir de la base de données du Service de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau du Ministère de l'hydraulique du Sénégal (SGPRE, 2003), de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 1975) ainsi que du Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM, 1962).

Afin d'éviter des erreurs d'interprétation de la piézométrie locale en utilisant le niveau dynamique des puits, seules les données sur le niveau statique de la nappe à partir du réseau de piézomètres ont été retenues. Les variations quotidiennes dues au

puisage sont généralement très supérieures aux fluctuations naturelles de la nappe et peuvent atteindre jusqu'à 2 m (Meyanga Meyanga, 1987). Le niveau altitudinal de référence des mesures piézométriques est le niveau 0 de la mer fixé par l'Institut Géographique Nationale de France en 1969 (SGPRE, 2003).

Des piézomètres de référence ont été choisis en fonction de leur localisation spatiale et de leurs séries temporelles. Ces dernières devaient débiter avant 1970 (début de la sécheresse) et dépasser l'année 2000 (reprise pluviométrique) (Aguilar *et al.*, (a) soumis). De plus, la distribution géographique des piézomètres de référence devait couvrir l'ensemble de la zone des Niayes. Ainsi cinq piézomètres ont été retenus: Touba Guene (nord), Bendioug (centre nord), Kab Gaye (centre), Ndeune (centre sud) et Lac Mekhe (sud) (Figure 1).

Les données climatologiques analysées dans cette étude proviennent des stations dites «synoptiques» de Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis pour lesquelles des mesures quotidiennes, indispensables au calcul des indices de variabilité de précipitations, sont disponibles. Afin de comparer les mesures piézométriques à celles des précipitations, d'autres stations météorologiques situées dans un rayon de moins de 30 km autour des piézomètres de référence ont été sélectionnées : Mont-Rolland, Mboro, Kebemer, Lompoul et Saint-Louis (Figure 1). Pour ces dernières seules les données mensuelles voire annuelles sont disponibles.

1.14 Méthodologie

Afin de mettre en évidence la forte hétérogénéité spatiale et temporelle des événements pluvieux, une analyse intra-annuelle du régime pluviométrique a été réalisée à partir de quelques indices de variabilité de précipitations (Aguilar *et al.*, (a) soumis; Tableau 1). Cinq des indices les plus fréquemment utilisés pour caractériser la variabilité et les extrêmes climatiques dans différentes régions du monde (Karl *et al.*, 1999; STARDEX, 2003; ETCCDMI, 2003; Gachon *et al.*, 2005 et 2007) ont été choisis. Ces indices (Tableau 1) ont permis de caractériser l'intensité et la fréquence

des précipitations mais aussi la durée des séquences sèches au cours de la saison pluvieuse compte tenu de leurs effets majeurs sur la recharge de la nappe.

L'analyse intra-annuelle a été faite pour chacune des 4 stations synoptiques (Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis) et pour les années de pluviométrie excédentaire (1958) et déficitaire (1974) pour lesquelles des mesures piézométriques mensuelles étaient disponibles (Aguiar *et al.*, (b) soumis).

Tableau 1. Indices de précipitation définis à partir des données quotidiennes.

Indice	Catégorie	Définition	Unité
Prcp1	Fréquence	Nombre de jours avec précipitations (seuil 1mm)	%
SDII	Intensité	Intensité moyenne de la précipitation calculée sur les jours avec précipitation	mm/j.
CDD	Durée	Nombre maximum de jours secs consécutifs (précipitation <1mm)	jours
R3days	Extrêmes	Maximum de la précipitation cumulée sur 3 jours consécutifs	mm
MOY	Intensité	Précipitation moyenne quotidienne	mm/j.

Afin de déterminer le temps de réponse de la nappe aux apports pluviométriques ainsi que les variations saisonnières du niveau piézométrique, l'année hydrologique et la cyclicité annuelle de la nappe ont été mis en évidence pour les années 1958 et 1974. Le taux d'infiltration, calculée à partir du rapport: Recharge nette (R) / Précipitation (P), a permis de quantifier la contribution des apports pluviométriques en année de pluviométrie excédentaire (1958) et déficitaire (1974).

Plusieurs méthodes sont généralement utilisées pour calculer la recharge de la nappe (R) notamment celle permettant le calcul de la recharge à partir de l'amplitude (Δh) des variations saisonnières de la piézométrie (Banton & Lumony, 1999; Scanlon *et al.*, 2002). Puisque cette étude est basée sur des mesures piézométriques, seule cette méthode a été utilisée. De plus, elle convient mieux aux aquifères non confinés dans

les régions ayant des nappes peu profondes qui montrent de fortes fluctuations des niveaux d'eau (Scanlon *et al.*, 2002) comme c'est le cas pour la NSQ. La recharge nette est calculée à partir de l'équation $R = n_d * \Delta h$, où n_d est la porosité efficace (Healy & Cook, 2002). L'aquifère des sables quaternaires est constitué pour l'essentiel de sables grossiers (50 - 500 μ m) (BRGM, 1984). Pour ces derniers, des coefficients de porosité totale variant entre 30% et 38% environ ont été utilisés (BRGM, 1984; Béture-Sétame, 1988) alors que n_d varie entre 20 et 30% (Todd, 1980; BRGM, 1984; Banton & Lumony, 1999; Healy & Cook, 2002). Dans la présente étude, la valeur intermédiaire de 25% pour n_d a été retenue tout en reconnaissant son incertitude, sa variabilité ainsi que son influence sur l'estimation de la recharge nette.

1.15 Résultats

1.15.1 Variabilité inter-annuelle des précipitations : 1950-2004

À l'échelle inter-annuelle, les anomalies de précipitations calculées pour les 4 stations dites synoptiques de Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis indiquent une pluviométrie déficitaire depuis la fin des années 1960 (Figure 2). Au cours des 50 dernières années la variabilité des précipitations fut marquée par deux périodes contrastées : «humide» vs «sèche». Entre les décennies 1950-1960 et 1970-1980, la pluviométrie annuelle a baissé en moyenne de plus de 41% (Aguiar *et al.*, (a) soumis).

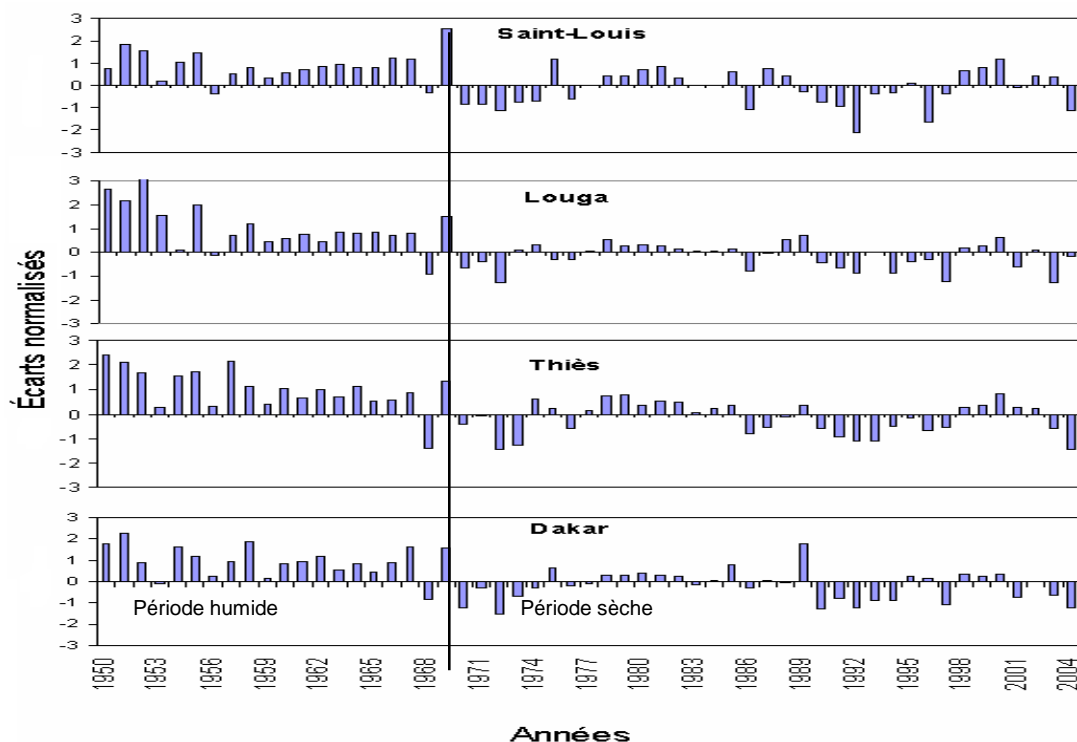


Figure 2. Anomalies normalisées des cumuls pluviométriques entre 1950 et 2004.

Les valeurs négatives (-) ou positives (+) indiquent respectivement une pluviométrie déficitaire ou excédentaire par rapport à la normale (1961-1990). Le trait noir indique la fin de la période humide et le début de la période sèche.

1.15.2 Variabilité saisonnière des précipitations : 1958 vs 1974

Les précipitations sont enregistrées au cours de la saison de mousson entre avril et octobre marquée par l'arrivée de la Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT) dans la région. L'essentiel des précipitations est enregistré aux mois d'août et de septembre et contribuent respectivement pour 38 et 32% à la quantité de précipitations totales annuelles (Aguiar *et al.*, (a) soumis). Le reste de l'année (novembre à mars) correspond à la saison «sèche» marquée par une absence quasi-absolue de précipitation. Seulement quelques averses ou pluies «hors saison» surviennent entre décembre et février.

La figure 3 présente l'évolution saisonnière des indices de variabilité des précipitations en 1958 et 1974. Pendant l'année « humide » de 1958, la saison pluvieuse s'étale sur plus de 5 mois. La fréquence des jours pluvieux est relativement élevée avec une moyenne de plus de 30 % pour les mois de juillet, août et septembre. Le maximum d'occurrence des jours pluvieux correspond au maximum des précipitations moyennes quotidiennes confirmant le rôle du nombre de jours pluvieux sur la précipitation moyenne. Entre 1958 et 1974, le nombre de jours de précipitations et la moyenne quotidienne des précipitations ont baissé respectivement de 20% et de 5 mm/j, pour le mois le plus pluvieux (août). Le nombre élevé de jours secs consécutifs au cours de la saison pluvieuse de 1974 indique une fréquence des événements pluvieux de plus en plus espacée dans le temps et un retard dans le début de la saison pluvieuse.

Cependant, même si les événements pluvieux sont de plus en plus rares, leur intensité calculée par la moyenne des précipitations sur les jours pluvieux ne varie presque pas entre 1958 et 1974. Les précipitations sont donc plus rares mais peuvent être aussi intenses. En 1974, la quantité de précipitations cumulée en trois jours (R3days) est de plus de 100 mm pour le mois d'août qui contribue à près de 40% du cumul annuel des précipitations. Les mois de précipitations intenses correspondent souvent aux mois de précipitations extrêmes confirmant le rôle des précipitations extrêmes sur l'intensité moyenne. Une telle variabilité dans la distribution mensuelle des événements pluvieux en année de pluviométrie excédentaire vs déficitaire peut affecter la capacité de recharge de la nappe.

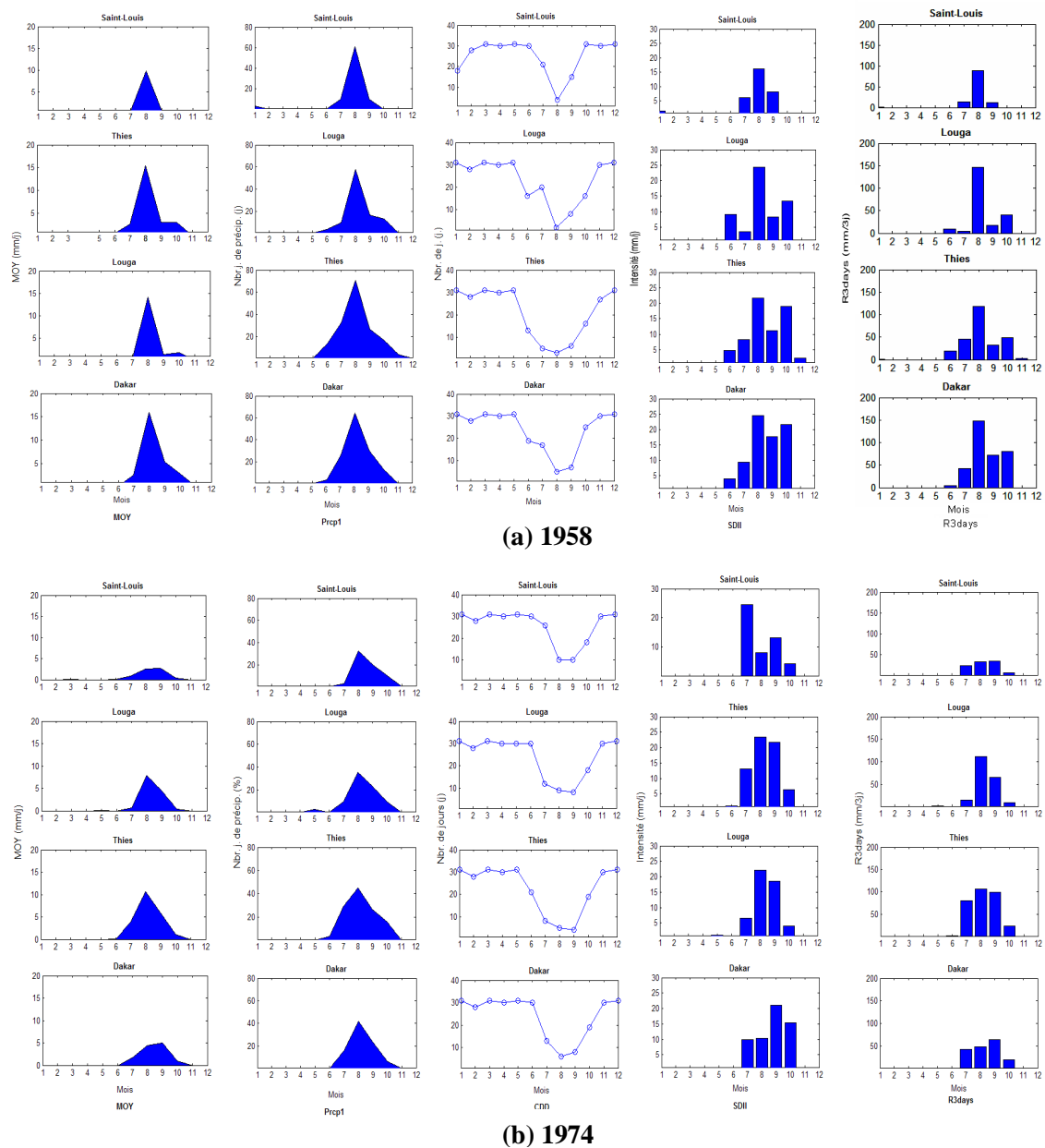


Figure 3. Évolution intra-annuelle des indices de variabilité des précipitations pour les années 1958 et 1974. (a) 1958 année de pluviométrie excédentaire et b) 1974 en année de pluviométrie déficitaire. Les mois de l'année sont représentés en abscisse et la valeur de l'indice correspondant à chaque courbe est en ordonnée.

1.15.3 Année hydrologique et forme cyclique du niveau piézométrique en 1958 vs 1974

La figure 4 met en évidence le caractère saisonnier des fluctuations piézométriques. Le début de l'année hydrologique est le premier mois où la variation piézométrique est positive (Banton & Lumony, 1999). Les apports pluviométriques mensuel à la nappe sont alors supérieurs à la totalité des pertes. Le début de l'année hydrologique se situe généralement en juillet pour l'année 1958 et entre août et septembre pour 1974. Ce seuil est atteint d'autant plus tôt si d'importantes averses se produisent au courant du mois de juin ou de juillet. C'est le cas à Kab Gaye en juillet 1974 où le niveau de la nappe s'est rehaussé de 0.08 m (Figure 4b) suite aux extrêmes de précipitations cumulées en trois jours entre le 12 et le 15 juillet 1974. Pendant ces 3 jours, la station de Kebemer a enregistré un cumul de 96.8 mm.

Le recul du début de l'année hydrologique, entre 1958 et 1974, s'explique par l'augmentation du nombre de jours secs consécutifs de 4 jours tous les dix ans. Ceci entraîne un rallongement de la durée de la saison sèche et un raccourcissement de la saison pluvieuse. L'irrégularité du régime pluviométrique se traduit souvent par des événements pluvieux très espacés dans le temps. Les événements pluvieux sont de moins en moins « concentrés » au cours de la saison pluvieuse (Figure 3; Aguiar *et al.*, (a) soumis).

La figure 4a suggère qu'en 1958, la période de recharge de la nappe s'étale sur près de 3 à 7 mois entre juin et décembre alors que la phase de rabattement ne dépasse pas 7 mois dans toute la région. Les cumuls pluviométriques mensuels pour cette année ont entraîné une recharge de 0.67 m à Bendioug, 0.64 m à Kab Gaye, 0.56 m à Lac Mekhe et 0.40 m à Ndeune et Touba Guene.

En 1974 (Figure 4b), la courte période de recharge de la nappe explique le rallongement de sa phase de rabattement. Dans les zones centre nord (Bendioug) et centre sud (Ndeune) de la région des Niayes, la phase de décharge s'étale sur presque toute l'année. Elle est de 9 mois à Ndeune et de 12 mois à Bendioug entraînant une décharge totale respective de 0.13 m et 0.14 m. À Kab Gaye, la phase de rabattement

de la nappe est de 7 mois avec une hauteur totale d'eau rabattue de 0.39 m, soit une baisse moyenne de 0.05 m/mois (Figure 4b et Tableau 2). Par contre, les secteurs Sud (Lac Mekhe) et Nord (Touba Guene) ont connu, en dépit d'une courte période de recharge de 3 mois, un léger accroissement piézométrique. En cette année sèche de 1974, qui n'enregistre aucun pic piézométrique marqué, les pluies ne sont pas toujours suffisantes pour maintenir voire initier la recharge de la nappe dans la plupart des secteurs des Niayes.

Dans l'ensemble, le régime hydrologique de la nappe est directement influencé par celui des précipitations avec toutefois un retard observable d'environ un mois par rapport à ce dernier. Celui-ci pourrait résulter d'un «effet mémoire», dû (i) à la persistance de séquences sèches (sans pluie > 1mm), (ii) à la durée de percolation des eaux atmosphériques à travers la zone non saturée dont l'épaisseur est très variable d'un piézomètre à un autre et d'une année à une autre, suivant les fluctuations du niveau de la nappe ou (iii) à l'éloignement de la zone de recharge principale de la nappe, situé au niveau du plateau de Thiès, quelques kilomètres plus au Sud. Ce phénomène induit un décalage du maximum piézométrique qui se situe au mois d'octobre ou novembre, alors que le maximum pluviométrique se situe en août (Figures 4a et 4b). En période excédentaire, les variations saisonnières de la piézométrie indiquent une recharge de la nappe contrairement en année de précipitations déficitaires où les variations sont nulles.

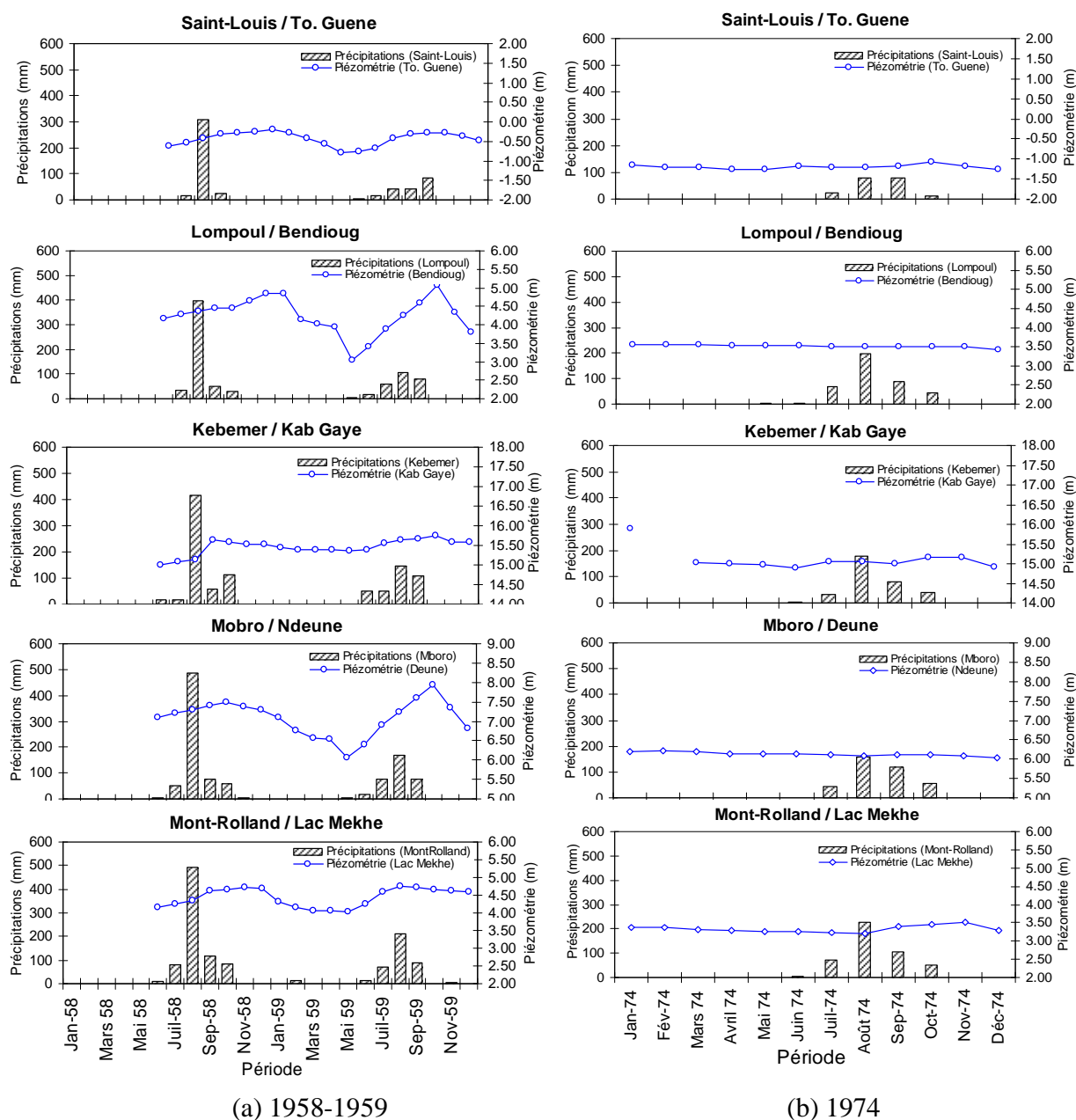


Figure 4. Variation intra-annuelle du niveau piézométrique de la NSQ.

(a) année de pluviométrie excédentaire (1958-1959) et (b) année de pluviométrie déficitaire (1974). Les histogrammes représentent la pluviométrie mensuelle et les courbes, la piézométrie mensuelle.

1.15.4 Taux d'infiltration

Dans la région des Niayes, la recharge de la nappe se fait directement par percolation à travers les sables dunaires, sans ruissellement (Fohlen & Lemordant, 1983; Gaye, 1990). La recharge nette (R) est ici définie comme la quantité d'eau circulant verticalement à travers la zone non-saturée et qui atteint la nappe (Aranyossy & Gaye, 1990; Banton & Lumony, 1999; Healy & Cook, 2002). Elle est calculée *via* l'amplitude de variation de charge Δh entre le minimum piézométrique du début de la saison pluvieuse (mai-juin) et le maximum piézométrique observé à la fin de celle-ci soit entre octobre et décembre pour les années 1958 et 1974. Elle n'inclut pas la fraction d'eau infiltrée puis re-évaporée au cours de la période considérée. Le tableau 2 présente la recharge nette en 1958 vs 1974.

Pour l'année 1958, le Δh est partout supérieur ou égal à 0.40 m contrairement à 1974 où il ne dépasse pas 0.26 m. Pour une quantité de précipitations relativement similaire (différence de 3.5 mm) entre les cumuls annuels des stations de Kebemer (Kab Gaye) et Mboro (Ndeune), la lame d'eau atteignant la nappe est de 160 mm à Kab Gaye et 100 mm à Ndeune. De plus, la lame d'eau infiltrée est de 160 mm à Kab Gaye (Kebemer) et de 140 mm à Lac Mekhe (Mont-Rolland) alors que le cumul annuel de précipitations est nettement moins élevé dans la localité de Kab Gaye qu'à Lac Mekhe avec respectivement 617.9 mm et 701.4 mm.

Pour l'année 1974, le pourcentage du volume d'eau précipitée atteignant la nappe ne dépasse guère le quart du cumul annuel des précipitations sauf à Kab Gaye. La recharge est relativement faible voire nulle comme c'est le cas à Bendioug. En effet, le niveau de la nappe regresse de -0.04 à Bendioug, la recharge nette y est nulle tout comme le taux d'infiltration efficace (Tableau 2). La totalité de l'eau précipitée est inférieure à la totalité des sorties (évapotranspiration, pompage, écoulement vers la mer).

Tableau 2. Calcul du taux d'infiltration.

Piezomètres	TOUBA GUENE		BENDIOUG		KAB GAYE		NDEUNE		LAC MEKHE	
Station météorologique la plus proche (< 30 km)	(Saint-Louis)		(Lompoul)		(Kebemer)		(Mboro)		(Mont-Rolland)	
Années	1958	1974	1958	1974	1958	1974	1958	1974	1958	1974
h_{\max} saison des pluies (m)	-0.21	-1.08	4.84	3.49	15.65	14.89	7.5	6.15	4.73	3.5
h_{\min} fin saison sèche (m)	-0.61	-1.19	4.17	3.53	15.01	15.15	7.1	6.1	4.17	3.25
Δh (m)	0.4	0.11	0.67	-0.04	0.64	0.26	0.4	0.05	0.56	0.25
$R = \Delta h * n_d$ (m)	0.10	0.02	0.16	-0.01	0.16	0.06	0.10	0.01	0.14	0.06
$R * 10^3$ (mm)	100	27.5	167.5	-10	160	65	100	12.5	140	62.5
P (mm/an)	352.7	196	527.4	206.8	617.9	338.3	614.4	377.5	701.4	454
Taux d'infiltration : R/P (%)	28.35	14.03	31.76	0.00	25.89	19.21	16.28	3.31	19.96	13.77

R : Recharge nette (en hauteur de lame d'eau), P : cumul annuel des précipitations,
 n_d : porosité efficace = 25 %

La recharge de la nappe n'est donc pas proportionnelle à la quantité d'eau précipitée annuellement. Ceci peut s'expliquer par l'hétérogénéité de la distribution spatiale et temporelle des événements pluvieux notamment par leur fréquence et leur intensité au cours de la saison (Figure 3; Aguiar *et al.*, (a) soumis). Au-delà des totaux pluviométriques annuels, la distribution des précipitations à l'échelle saisonnière est très aléatoire et discontinue. En effet, les précipitations sont pilotées par de gros systèmes convectifs notamment les lignes de grains qui produisent près de 80% du couvert nuageux et de la pluie (Tapsoba, 1997; Lebel & Amani, 1999; Mathon & Laurent, 2001, Aguiar *et al.*, (a) soumis). De fortes pluies peuvent ainsi faire suite à des pluies très faibles à quelques kilomètres de distance.

Toutefois, les chiffres présentés au tableau 2 nécessitent d'être interprétés avec attention. Par exemple, on pourrait trouver contradictoire qu'entre années humide et

sèche, le taux d'infiltration efficace baisse plus à Lac Mekhe qu'à Kab Gaye (31% contre 26%), alors que la pluviométrie baisse plus au second site qu'au premier (36% contre 46%). En fait, le taux d'infiltration s'appuie implicitement sur une relation linéaire entre recharge nette et pluviométrie, alors que la recharge dépend aussi de facteurs moins corrélés avec la pluie comme l'évapotranspiration potentielle. Ainsi, les amplitudes de variation pluviométrique entre les deux stations évoluent de concert avec les variations relatives de pluie (-77 cm contre -95 cm). D'autres facteurs entrent en ligne de compte également, comme la contribution des flux latéraux souterrains en provenance des zones de recharge au Sud et la distribution spatiale des précipitations. L'infiltrabilité du sol, en lien avec sa texture et avec son couvert végétal, est aussi un paramètre fondamental dans la capacité de recharge locale de la nappe (Favreau *et al.*, 2002). Enfin, l'hétérogénéité de la perméabilité hydraulique joue dans la faculté de percolation souterraine de l'eau de pluie, quoique Nguer et Rognon (1989) aient montré la grande homogénéité minéralogique des différentes formations sableuses de la zone des Niayes.

Il est dès lors difficile de fixer un seuil de précipitation annuelle à partir duquel la recharge serait positive. La recharge de la nappe est très locale et dépend autant de la distribution des précipitations au cours de la saison que des différentes propriétés physiques du sol (propriétés capillaires), de la géométrie de la piézométrie et de la nature du couvert végétal (Leblanc *et al.*, 2008). Cette dernière pouvant s'exercer notamment par un moindre prélèvement d'eau dans le sol et une accélération de ruissellement en créant des zones de recharge préférentielle dans les dépressions (Albergel *et al.*, 1992; Leduc & Loireau, 1997). D'ailleurs Favreau *et al.*, (2002) ont démontré que le déboisement au Sahel a favorisé une recharge de la nappe libre du continental terminal d'environ 20 mm an⁻¹ au cours des années 1990.

1.16 Conclusion

Cette étude suggère que pour l'année «humide» (1958) la période de recharge de la nappe varie de 3 à 7 mois contrairement à l'année «sèche» (1974) où les fluctuations piézométriques sont nulles. Pour cette dernière, l'hydrodynamisme de la nappe subit un retard, résultant en partie d'un « effet mémoire » dû au rallongement de la période de décharge au cours de la saison sèche et à la persistance des déficits pluviométriques. Ces phénomènes affectent les fonctions de recharge de la nappe de sorte que son temps de réponse peut durer de 1 à 3 mois. La recharge de la nappe est variable selon la récurrence des années de pluviométrie excédentaire vs déficitaire par rapport à la normale de 1961-1990 et selon la fréquence, l'intensité des événements pluvieux et des extrêmes ainsi que la durée des séquences sèches au cours de la saison. Ceci signifie que pour un même cumul de précipitations annuelles, la recharge nette peut être très différente comme l'indiquent les résultats des stations de Kab Gaye et Ndeune en 1958. De tels résultats démontrent que la recharge de la nappe ne dépend pas uniquement des totaux annuels ou mensuels des précipitations mais plutôt de la distribution saisonnière et de l'intensité des précipitations à l'échelle de l'événement pluvieux.

Au-delà de la variabilité des précipitations, la recharge de la nappe peut s'expliquer en partie par des pertes par évapotranspiration ou écoulement vers la mer (Aguiar *et al.*, (b) soumis) ou encore par plusieurs autres facteurs (perméabilité et épaisseur des diverses couches de sédiments, densité de la couverture végétale, importance du relief) dont les influences respectives sont difficiles à distinguer. Il faut noter que certains piézomètres présentent aussi un degré de sensibilité aux conditions climatiques et au système d'écoulement local de la NSQ beaucoup plus important que d'autres. Cependant, la hausse du niveau de la nappe immédiatement après certains événements pluvieux comme ce fut le cas à Ndeune en juillet 1974 indique que la recharge des eaux précipitées vers la zone saturée, se fait directement et

verticalement. Les précipitations apparaissent donc comme étant le premier facteur de régulation du niveau de la nappe.

Les difficultés liées à la méthode de calcul de la recharge résident dans la détermination d'une valeur représentative de la porosité efficace et aux difficultés que nous avons rencontrées dans cette étude à déterminer avec certitude si les fluctuations piézométriques sont dues seulement à la recharge et non pas aussi à des activités humaines comme le pompage, l'irrigation ou à d'autres phénomènes comme les variations atmosphériques (température, pression atmosphérique, humidité relative, vent).

Les variations du niveau de la NSQ sont étudiées à l'échelle mensuelle et saisonnière, d'où les difficultés rencontrées dans la détermination des maxima et des minima piézométriques. En effet, les données hydrogéologiques sont constituées de mesures mensuelles ou saisonnières (juin et octobre) alors que le niveau de la nappe est très variable selon la fréquence des événements pluvieux dans le mois. L'évolution hydrogéologique a donc été exprimée selon l'augmentation ou la diminution de la piézométrie mensuelle. Ces résultats quoique tout à fait pertinents, auraient pu être encore plus précis si des mesures à des échelles temporelles plus fines (quotidienne ou horaire) avaient été disponibles.

Remerciements. Les auteurs tiennent à remercier le programme de bourse de la fondation Ford, la chaire en environnement à l'échelle du globe de l'UQAM et le CRSNG (subvention à la découverte) pour leur soutien financier en plus du consortium Ouranos qui a apporté un soutien matériel à l'aboutissement de cette étude. Ces remerciements sont également adressés au Service de la Gestion et de la planification des ressources en eau du Sénégal, à l'équipe d'hydrologie du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement. Un grand merci est également adressé au Dr. Serigne Faye et au Dr. Isabelle Niang de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar pour leur collaboration scientifique.

1.17 Références

- Aguiar, L. A. A., Gachon P., Garneau M., Lézine A.-M. (a) «Variabilités inter-annuelles et intra-saisonnières des précipitations le long du littoral nord du Sénégal de 1950 à 2004». Article soumis à la revue *Hydrogeological Sciences Journal*, le 21 Juillet 2008.
- Aguiar, L. A. A., Maugis P., Garneau M., Lézine A.-M. & Gachon, P. (b). «Évolution à long terme de la Nappe des Sables Quaternaire dans la région de Niayes (1958-1994): relation avec le climat et les impacts anthropiques». Article soumis à la revue *Sécheresse*, le 25 Juillet 2008.
- Albergel, J., Casenave A., Ribstein P. & Valentin C., 1992. Aridité climatique, aridité édaphique: étude des composition de l'infiltrabilité en Afrique tropical sèche. Chap. In *L'aridité: une contrainte au développement: caractérisation, réponses biologiques, stratégies des société*. p.123-130. Paris (FRA), ORSTOM.
- Aranyossy, J. F. & Gaye C. B., 1992. «La recherche du pic de tritium thermonucléaire en zone non saturée profonde sous climat semi-aride pour la mesure de la recharge des nappes : première application au Sahel». *C.R. Acad. Sc.*, Paris, 315 p. série II: 637-643.
- Banton, O. & Lumony M., 1999. *Hydrogéologie multiscience environnementale des eaux souterraines*. Presse universitaire du Québec / AUPELF, Coll. Universités francophones, 460 p.
- Béture-Sétame, 1988. Renforcement de l'approvisionnement en eau de la région de Dakar. Ltd. Dakar (SEN). Tome 1.
- BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière), 1962. Hydrologie de la région des Niayes, sous la direction de J. Putallaz, BRGM rapport Dak 62-A 12, 37 p.
- BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière), 1984. Projet d'exploitation des tourbes des Niayes. Rapport de synthèse géologique prospection générale et certification des réserves, sous la direction de J.J Châteauneuf et G. Pezeril, BRGM, rapport de synthèse, 89 p.
- Bricquet, J.P., Bamba F., Mahé G., Toure M. & Olivry J.-C., 1997. «Variabilité des ressources en eau de l'Afrique Atlantique», *PHI-V*, 6: 83-95.
- D'Amato, N. & Lebel T., 1998. «On the characteristics of the rainfall events in the Sahel with a view to the analysis of climatic variability». *Int. J. Climatol.*, 18: 955-974.
- Dasylyva, S., Cosandey C., Orange D. & Sambou S., 2003. «Assèchement des «Niayes» (bas-fonds agricoles) de la Région de Dakar durant la période 1960 - 1990: variabilité spatiale et rôle joué par la pluviosité», *Sud Science et Technologie*, 11: 27-34.

- Dryade, (Le Groupe) 1990. Inventaire Biophysique de la région des Niayes - Synthèse, document de recherche dans le cadre du Project Conservation des Terroirs du Littoral, Ministère du Développement Rural et de l'Hydraulique, Direction des eaux, Forêts, Chasses et de la Conservation des Sols, République du Sénégal, 262 p.
- ETCCDMI, 2003 (Expert Team on Climate Change Detection and Monitoring Indices), <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/indices.html>, consulté le 9 juin 2006.
- Favreau, G., Leduc C., Marlin C., & Guero A., 2002. «A rising piezometric depression in the Sahel (southwestern Niger)». *C.R. Geosciences*, 334: 395-401.
- Fohlen, D. & Lemordant Y., 1983. Étude hydrogéologique. Secteur Mboro-Lompoul, Sénégal. Compagnie des tourbières du Sénégal. Projet d'exploitation des tourbes. Bureau de Recherche Géologique et Minière (Paris). Rapport 83AGE013, annexes 1, 2, 3. 82p.
- Gachon, P., Gauthier N., Bokoye A., Parishkura D., Cotnoir A., Tremblay Y. & Vigeant G., 2007. Groupe de travail II : Variabilité, extrêmes et changements climatiques au Sahel : de l'observation à la modélisation, dans Rapport des contributions canadiennes au projet ACDI – CILSS); appui aux capacités d'adaptation aux changements climatiques. *Environnement Canada, Rapport final*, A030978-002.
- Gachon, P., St-Hilaire A., Ourda T., Nguyen V.T.V., Lin C., Milton J., Chaumont D., Goldstein J., Hessami M., Nguyen T. D., Selva F., Nadeau M., Roy P., Parishkura D., Major N., Choux M. & Bourque, A. 2005. A first evaluation of the strength and weakness of statistical downscaling methods for simulating extremes over various regions of eastern Canada. Sub-component, Climate Change Action Fund (CCAF), *Environnement Canada, Final report*, 209 p.
- Gaye, C., 1990. Étude isotopique et géochimique du mode de recharge par les pluies et de décharge évapotranspiration des aquifères libres sous climat semi-aride au Nord du Sénégal. Thèse Fac. Sci. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 245 p.
- Healy, R. W. & Cook P. G., 2002. «Using groundwater levels to estimate recharge». *Hydrogeology Journal*, 10: 91-109.
- Hulme, M., Doherty R., Ngara T., New M. & Lister D., 2001. «African climate change: 1900-2100». *Clim. Res.*, 17: 145-168.
- Karl, T.R., Nicholls N. & Ghazi A., 1999. CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary. *Climatic Change*, 42: 3-7.

- Leblanc, M., Favreau G., Massuel S., Tweed S., Loireau M., & Cappelaere B., 2008. Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global and Planetary Change* (sous presse).
- Le Barbé, L. & Lebel T., 1997. «Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990». *J. Hydrol.*, 188-189: 43-73.
- Le Barbé, L., Lebel T. & Tapsoba D., 2002. «Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990». *J. Climate*, 15: 187-202.
- Leduc, L. & Loireau M., 1997. «Fluctuation piézométrique et évolution du couvert végétal en zone sahélienne (sud-ouest du Niger)». *IASH*, 240: 193-200.
- Le Lay, M. & Galle S., 2005. «Seasonal cycle and interannual variability of rainfall at hydrological scales. The West African monsoon in a Sudanese climate». *Hydro. Sc. Journal*, 50: 509-524.
- Lebel, T., & Amani A., 1999. «Rainfall estimation in the Sahel: what is the ground truth?» *J. of Applied Meteor.*, 38: 555-567.
- Lézine, A.-M., 1987. Paléoenvironnements végétaux d'Afrique nord-tropicale occidentale depuis 12000 B.P Analyse pollinique de séries sédimentaires continentales Sénégal – Mauritanie, Thèse Université de Luminy (FRA), 151 p.
- Mathon, V. & Laurent H., 2001. «Life cycle of Sahelian mesoscale convective cloud systems». *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 127: 377-406.
- Meyanga Meyanga, M., 1987. Caractérisation hydrochimique des eaux des tourbes et des sables encaissants dans la zone des Niayes (Relations entre ces eaux). Mémoire de DEA (Diplôme d'Études Approfondies), Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 87 p.
- Nguer, M. & Rognon P., 1989. «Homogénéité des caractères sédimentologiques des sables ogoliens entre Nouakchott (Mauritanie) et Mbour (Sénégal)», *Géodynamique*, 4: 119-133.
- Nicholson, S. E., Some B., & Kone B., 2000. «An Analysis of Recent Rainfall Conditions in West Africa, Including the Rainy Seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña Years». *J. Climate*, 13: 2628-2640.
- OMS (Organisation Mondiale de la Santé), 1975. Étude sur modèles mathématiques de la Nappe des Sables Quaternaires et calcaires lutétiens entre Tivaouane et Saint-Louis du Sénégal. Rapport BRGM, 75/SGN/049/AME, par Sauty, J. P., 100p.
- Scanlon, B. R., Healy R. W. & Cook P. G., 2002. «Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge». *Hydrogeology Journal*, 10: 18-39.

- Servat, E., Paturel J.-E., Lubes-Niel, H., Kouame, B., Masson, J.M., Travaglio, M. & Marieu, B., 1999. «De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne». *Revue des sciences de l'eau*, 12: 363-387.
- SGPRE (Service de la Gestion et de la Protection des Ressources en Eau : 2001, 2002, 2003). Suivi piézométrique des nappes de la presqu'île du cap vert et du littoral Nord. Rapport de synthèse, *Ministère de l'hydraulique* (SEN), n° 12, 22 p.
- STARDEX (Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions) (2003)
http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/deis/Diagnostic_tool.pdf, consulté le 8 juin 2006.
- Tapsoba, D., 1997. «Caractérisation événementielle des régimes pluviométriques Ouest Africains et de leur récent changement». Thèse de doctorat, Paris (FRA), Université Paris XI, 145 p.
- Tall, S. & Fall A. S., 2001. «Cités horticoles en sursis? L'agriculture urbaine dans les grandes Niayes au Sénégal. *Centre de Rech. pour le Dév. Internat.* CRDI. Ottawa (Canada).138 p.
- Todd, D. K., 1980. *Groundwater hydrology*. John Wesley & Sons Inc., New York. 535 p.
- Trochain, J., 1940. *Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal*. Paris : Éd. Larose, 433 p.

CHAPITRE IV:

CHANGEMENT D'OCCUPATION DU SOL :

ÉVOLUTION DES ZONES HUMIDES

Comme indiquée dans le chapitre précédant, l'évolution du niveau de la nappe dans la région des Niayes est fortement dépendante de la distribution spatio-temporelle des événements pluvieux au cours de la saison de mousson d'avril à octobre. Le déficit pluviométrique jumelé aux pressions anthropiques grandissantes ont enclenché une baisse rapide du niveau de la nappe et un assèchement progressif des Niayes au cours des trente dernières années.

Le présent chapitre propose de mettre en évidence - à l'aide de données spatiales et statistiques - les récentes modifications de la superficie des milieux humides des Niayes. La méthodologie d'analyse diachronique appliquée à la série de photographies aériennes a permis de quantifier l'évolution spatiale des zones humides depuis le début des années 1950. L'analyse a été effectuée en deux étapes : d'abord une analyse de l'évolution des zones inondées sur l'ensemble de la région des Niayes à partir des cartes réalisées par le BRGM (1984), puis une comparaison des photographies aériennes de 1950, 1974 et 2000 a été faite dans le secteur de Mboro (15°9 N - 16°54 W) pour suivre l'évolution des sols suivant un gradient d'humidité allant des mares aux sols à hydromorphie partielle.

Cette analyse de l'évolution des milieux humides a permis de mettre en évidence les sensibilités des écosystèmes Niayes aux variations hydro-climatologiques qui commandent leurs dynamiques actuelles. Loin d'être une étude exhaustive du milieu et des interactions dynamiques entre les différents facteurs à la fois physiques et humains, ce chapitre présente l'état des Niayes au cours de périodes climatiques contrastées.

**Analyse diachronique de l'évolution des zones humides dans la région des Niayes
du Sénégal en relation avec la variabilité climatique récente
entre 1950 et 2004.**

Aguiar, Lazar A. A¹; Garneau, Michelle¹; Lézine, Anne-Marie²

¹Université du Québec à Montréal / GEOTOP-UQAM-Mc Gill / Ouranos,

²CNRS-LSCE, Paris.

Article à soumettre à la revue

AJST

African Journal of Science and Technology

1.1 Résumé

La baisse continue des précipitations observée depuis plus de trente ans dans la région des Niayes¹, le long de la côte nord du Sénégal, a eu comme conséquence un assèchement progressif de ces zones humides. Cet article propose de mettre en évidence et de caractériser - à l'aide de données spatiales et temporelles - les récents changements de la superficie des zones humides dans la région des Niayes entre 1950 et 2004. L'objectif est de faire le suivi de l'étendue spatiale des zones humides des Niayes en relation avec la variabilité climatique récente. La méthodologie repose sur une analyse de photographies aériennes et de cartes selon un pas de temps approximatif de 20 ans entre 1954 et 2000. Les résultats montrent qu'au cours des 50 dernières années, l'évolution des Niayes a été caractérisée par un rétrécissement de la surface des zones humides et la disparition complète des zones inondées (mares). Dans le secteur de Mboro (15°9 N - 16°54 W), seuls les sols à hydromorphie partielle ont enregistré une extension spatiale alors que les sols à hydromorphie totale et les mares ont totalement disparu.

Mots clés : Sénégal, Niayes, Analyse diachronique, Hydrogéologie, Variabilité climatique, Zones humides.

¹ Les Niayes désignent des dépressions interdunaires occupées par une nappe phréatique affleurante ou sub-affleurante. Elles sont localisées en arrière du cordon littoral du Nord du Sénégal entre Dakar et Saint-Louis. Sur les marges de ces dépressions se pratique la culture maraîchère qui produit près de 80% des légumes du pays.

1.2 Summary

The ongoing decline in precipitation observed for more than 30 years in the Niayes region along the north coast of Senegal has resulted in a progressive drying out of these wet areas. This article proposes a presentation and characterization – using spatial and temporal data – of the recent changes in the size of wet areas in the Niayes region between 1950 and 2004. The objective is to monitor the spatial area of wet areas in the Niayes region in relation to recent climatic variability. The methodology is based on an analysis of aerial photographs and maps over a time lapse of approximately 20 years between 1954 and 2000. Results show that over the past 50 years, the evolution of Niayes has been characterized by a shrinking of the surface of wet areas and the complete disappearance of flooded areas (ponds). In the Mboro area, (15°9 N - 16°54 W), only the partial hydromorph soils saw an expansion in area, while total hydromorph soils and ponds disappeared completely.

Key words: Senegal, Niayes, Diachronic analysis, Hydrogeology, Climate variability, Wetlands.

1.3 Introduction

Au cours des 30 dernières années, l'évolution climatique du Sahel (Figure 1) a été marquée par une sécheresse persistante qui a affecté les ressources hydrologiques (Aguiar *et al.*, (a) soumis). Le déficit pluviométrique a engendré un assèchement des milieux humides et une progression de la désertification renforcée par la surexploitation accrue des terres de moins en moins productives (Rasmussen & Madsen, 2001). Il en résulte une réduction des espaces forestiers et une modification de leur composition végétale. Les conséquences économiques d'une telle évolution hydro-climatique sont dramatiques. En dépit de l'amélioration des pratiques agricoles, la production n'a augmenté que d'environ 1.8 % par an au cours de la période comprise entre 1961 et 2000. Il s'en suit une baisse des revenus des populations locales et une accentuation de la pauvreté dans la région (FAO, 2003, Aguiar, 2002).

Cet article présente les effets de la variabilité du régime des précipitations des 50 dernières années sur les zones humides (sols hydromorphes et végétation associée) de la région des Niayes du Sénégal qui assurent plus de 80% de la production maraîchère du pays. Puisque les zones humides comme les Niayes sont sensibles aux fluctuations hydro-climatiques, ce sont les limites de l'étendue spatiale de ces systèmes qui sont retenues pour en effectuer le suivi historique. Le suivi de la superficie des milieux humides permet de mettre en évidence leur sensibilité aux différentes pressions naturelles (climatiques et hydrologiques) et anthropiques. Il a été réalisé à partir d'une cartographie basée sur l'analyse des photographies aériennes correspondant à des années ayant enregistré des phénomènes climatiques majeurs : pluviométrie excédentaire (1954), déficitaire (1974) et normale⁹ (2000) (Aguiar *et al.*, (a)soumis).

⁹ Valeur moyenne d'une donnée climatique calculée sur une période relativement longue d'au moins trois décennies consécutives. Dans cette étude, la normale correspond à la moyenne inter-annuelle des précipitations entre 1961 et 1990.

Dans un premier temps, une caractérisation de la superficie des zones inondées sur l'ensemble de la région des Niayes a été faite à partir des données aéroportées et cartographiques de 1954, 1974, 1982 et 2000. Puis une analyse plus détaillée, à grande échelle a été effectuée pour les années 1954, 1974 et 2000 dans le secteur de Mboro (15°9 N - 16°54 W) où est située la plus importante Niaye de la région en terme de superficie. Le travail a été réalisé suivant la méthode définie par Pereira-Barreto (1962) et Dryade (1990) où le gradient d'humidité des sols depuis les secteurs inondés en permanence ou mares, aux sols à hydromorphie totale puis à ceux à hydromorphie partielle a été identifié et cartographié.

1.4 Région d'étude

La région des Niayes du Sénégal couvre une superficie d'environ 2 300 km². Elle est située entre 14°3' et 16°N, et entre 16° et 17°5'W (Figure 1). La proximité de l'océan à l'Ouest, favorise l'influence des masses d'air d'origine océanique sur les conditions climatiques, ce qui conduit à des températures moyennes annuelles relativement basses (ex. 24.5°C à St-Louis) par rapport à l'intérieur (ex. 26.5°C à Louga). Entre 1950 et 2004, les cumuls annuels de précipitation ont varié entre environ 500 mm au Sud et moins de 300 mm au Nord (Aguiar *et al.*, (a) soumis). La saison pluvieuse qui s'étale de mai-juin à octobre correspond à la migration vers le nord de la Zone de Convergence Intertropicale atteignant 20°N (Le Lay & Galle, 2005).

La géomorphologie de la région des Niayes se présente sous la forme d'une succession de dépressions interdunaires allongées perpendiculairement au rivage. De la côte vers l'intérieur du continent, une succession de trois systèmes dunaires est observée: les dunes vives actuelles, les dunes semi-fixées par la végétation herbacée et les dunes dites «ogoliennes» mises en place lors de la dernière période glaciaire, il y a 21 000 ans, et qui sont fixées par une végétation arborescente (Michel, 1973). Les Niayes sont des dépressions situées entre les dunes semi-fixées et l'erg ogolien. Elles sont associées à d'anciennes zones de lacs, aujourd'hui asséchés ou en cours

d'assèchement où sont accumulés des dépôts organiques provenant des plantes herbacées hygrophiles (Gramineae, Cyperaceae) (Raynal, 1963; Sall, 1982). La topographie maximale ne dépasse pas 130 m sur le flanc nord du plateau de Thiès au Sud-Est (Figure 1). La végétation actuelle est caractérisée par une savane arborée composée notamment de reliques forestières d'origine subguinéenne (*Elaeis guineensis* Jacq.), (Trochain, 1940) mises en place au début de l'Holocène lorsque les conditions climatiques étaient plus humides (Lézine, 1987). Cette étude s'intéresse à l'évolution spatiale des Niayes où la présence d'une nappe phréatique superficielle entretient une végétation hygrophile principalement composée de groupements végétaux humides à *Pycnus mundtii* (Nees), *Ampelopteris prolifera* (Retz.), *Cyclosorus gongylodes* (Schkuhr.) et *Microlepis speluncaen* (L. Moore) (Trochain, 1940; Raynal, 1963).

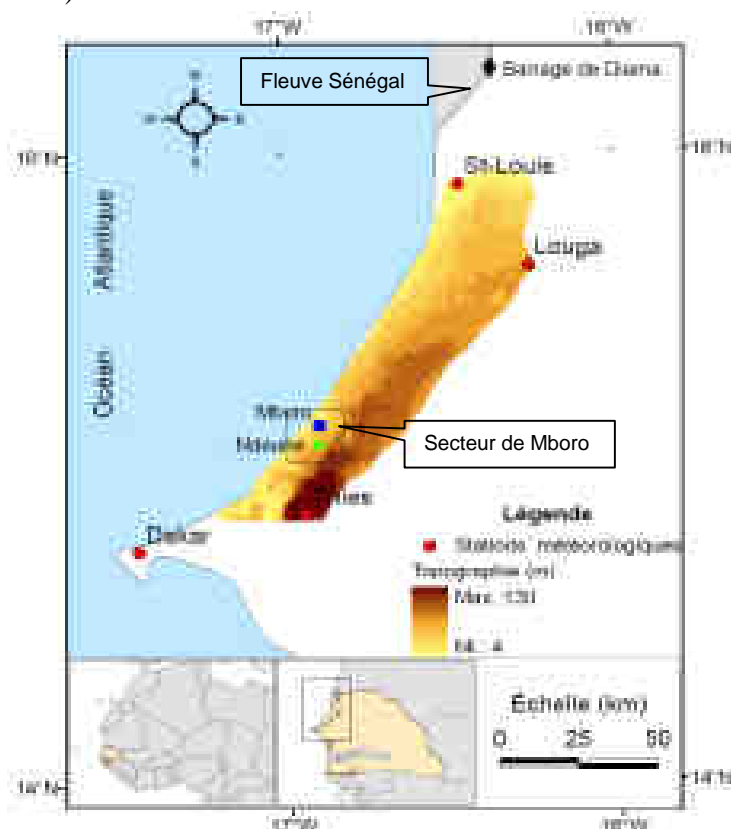


Figure 1. Localisation de la région des Niayes et du secteur de Mboro.

1.5 Données utilisées

La base de données à l'origine de cette étude est constituée de photographies aériennes panchromatiques et couleurs prises au cours des années 1954, 1974 et 2000 (Tableau 1), de cartes de sol (Pereira-Barreto, 1962; BRGM, 1984; Dryade, 1990) et de cartes de végétation (Raynal, 1963; Dryade, 1990). Le Modèle Numérique de Terrain (MNT), qui a permis de reconstituer la topographie naturelle de la zone d'étude, a été développé à partir de la carte topographique du Sénégal au 1/200000 (DTGC, 1996).

Tableau 1. Documents cartographiques et photographies aériennes

Années	Nombre d'images	Prise de vue	Mode et type	Échelle	Date	Source
Photographies aériennes						
1954	62	Horizontale	Panchromatique	1 / 60000	04/1954	BRGM (1962)
1974	34	Horizontale	Hue-Saturation-Intensity	1 / 35000	03/1974	BRGM (1984)
2000	30	Horizontale	Panchromatique	1 / 20000	04/2000	CSE (2002)
Données cartographiques						
1962	4	-	Sols	1/10000	1954	Pereira-Barreto (1962)
1963	1	-	végétation	1/10000	1963	Raynal (1963)
1984	3	-	zones inondées	1/10000	1954, 1974, 1982	BRGM (1984)
1990	9	-	sol et végétation	1/20000	1989	Dryade (1990)
1996	3	-	occupation du sol	1/200000	1981	DTGC (1996)

Les photographies aériennes de 1954 renseignent sur l'état des Niayes au cours de la période pluvieuse entre 1951 et 1954. Les photographies de 1974 traduisent l'état des Niayes suivant la période aride 1970-1974 alors que les images de 2000 illustrent l'état des Niayes suivant la «reprise pluviométrique» de la fin des années 1990. Les prises de vue des photographies aériennes ont été réalisées en saison sèche entre mars et avril. À ce moment, les zones temporairement humides sont déjà asséchées et la végétation herbacée saisonnière, associée à la saison pluvieuse, est quasi inexistante. Le tableau 1 présente la synthèse des données utilisé dans cette étude.

1.6 Méthodologie

La méthodologie est basée sur une cartographie multi-dates qui permet de fixer dans le temps et dans l'espace les différentes phases de transformation du milieu d'étude (Robert & Dick, 1993). Le logiciel Arc GIS (V. 9.1) permettant le stockage, le traitement et l'analyse de données cartographiques a été utilisé. La classification automatique a été d'emblée écartée car, en dehors d'une détection grossière sur les zones humides, elle aurait induit des biais importants liés à des divergences d'appréciation de celles-ci. En effet cette technique se base uniquement sur la différence de teinte. Or, suivant le tangage de l'avion et de la position du soleil, la même unité écologique peut être représentée en différentes teintes (Pornon, 1992; Robert & Dick, 1993). Néanmoins, cette méthode a permis d'identifier des sites d'entraînement (échantillons d'unité de sol à partir desquels la classification est faite) dont l'état était identique en 1954, 1974 et en 2000. Les différentes étapes de la démarche méthodologique sont résumées dans la figure 2.

Une première cartographie a été effectuée sur l'ensemble de la région des Niayes tout en évitant la région du Delta du fleuve Sénégal, dans le Nord de la région, qui peut être influencée par les crues du fleuve. Elle est basée sur les résultats du BRGM (1984) et regroupe les mares et les sols à hydromorphie totale (Figure 6). Par contre, la cartographie à grande échelle spatiale effectuée dans le secteur de Mboro a permis la distinction entre les deux unités. En effet, après la saison pluvieuse, certains sols à hydromorphie totale sont transformés temporairement en mares mais ne sont plus inondés à la fin de la saison sèche.

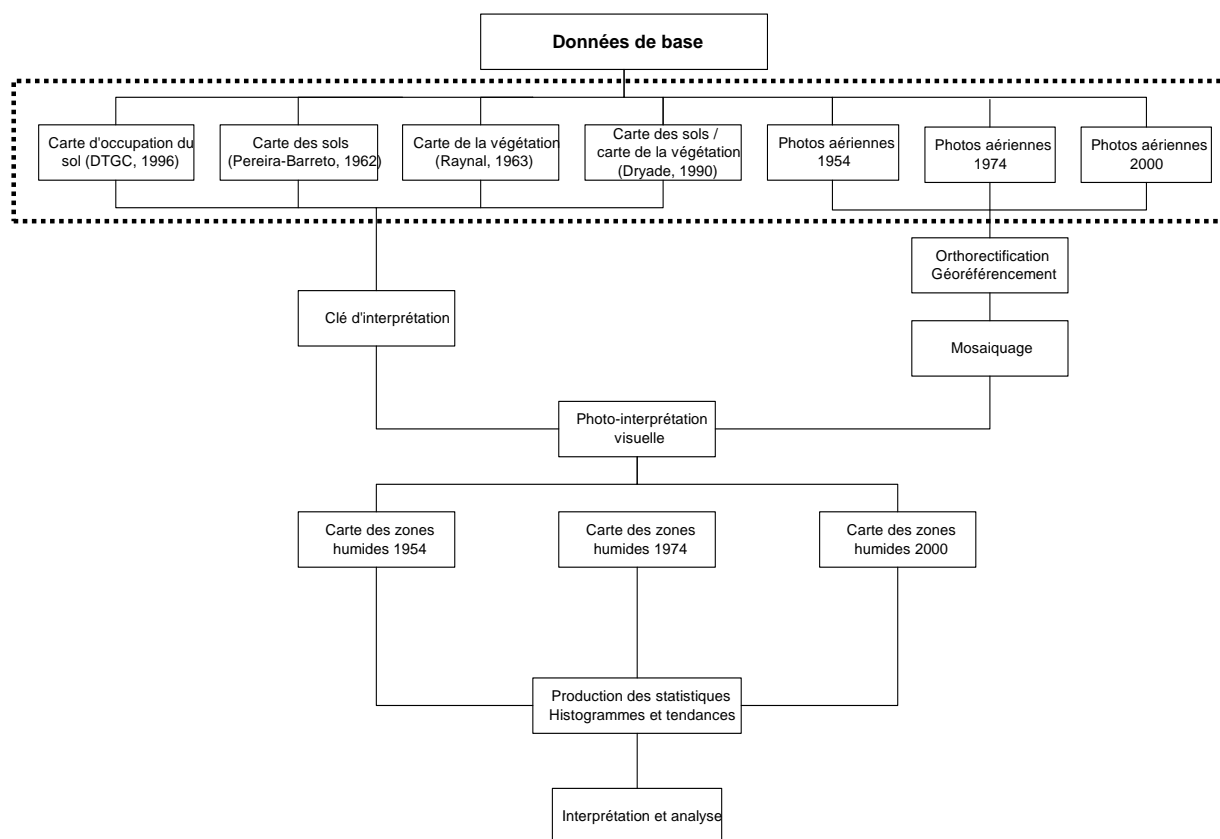


Figure 2. Étapes méthodologiques pour la cartographie des zones humides à partir du SIG (Arc GIS).

1.6.1 Définition de la clé d'interprétation :

En se basant sur les cartes et les définitions de Pereira-Barreto (1962), de Raynal (1963), de Dryade (1990) et de la DTGC (1996) plusieurs unités ont été identifiées en fonction des classes d'humidité sur chaque image (Tableau 2, Annexe 4,5,6,7). Ce sont:

Mare : Cette unité est identifiée surtout par sa couleur noir foncé et ses contours plus ou moins arrondis. Elle occupe les points bas des dépressions des Niayes où la nappe

est affleurante. La végétation de cette unité est dominée par le groupement à *Ampelopteris prolifera*, *Cyclosorus gongylodes* et *Microlepia speluncaen*.

Sols à hydromorphie totale: Cette unité est localisée entre les zones inondées en permanence ou mares et le bas des dunes. Elle est caractérisée par un engorgement permanent favorisé par une inondation sur plusieurs mois et par la proximité de la nappe à la surface du sol (< 1 m). Cette unité est dominée par le groupement à *Pycnus Mundtii* Naas de la famille des Cypéracées.

Sols à hydromorphie partielle : Cette unité est caractérisée par une humidité temporaire intervenant pendant la saison pluvieuse et les premiers mois de la saison sèche. Elle se rencontre généralement dans les milieux dépressionnaires aux pentes faibles à la périphérie des bas-fonds. Les sols qui ont une humidité de profondeur retiennent temporairement l'eau favorisant le maintien d'une végétation de graminées dominée par le groupement herbacé à *Imperata cylindrica* L.

Sols à hydromorphie totale avec salure : Ce groupe de sols regroupe les sols hydromorphes atteints en maints endroits par la salinité. Ils se particularisent par une inondation intervenant pendant la saison des pluies et les premiers mois de saison sèche entre octobre et décembre. Cette unité regroupe entre autres les groupements végétaux tels que le Paspale (*Paspalum vaginatum* Sw.) et l'Amarante-bord de mer (*Phloxerus vermicularis* L.).

Sols à hydromorphie partielle avec salure. Cette unité est régie par une humidité temporaire et par des efflorescences salines qui donnent, à la surface du sol, une couleur grise sur les images panchromatiques. Elle est composée de sols halomorphes et les sols hydromorphes salés. Elle est caractérisée une dominance de graminées du type *Sporobolus robustus* Kunth.

Tableau 2. Clé d'interprétation des photographies aériennes

Forme	Teinte	Structure et Texture	Localisation et Environnement	Groupe végétal associé	Unité de sol
Zonale	Grise	Lisse	Fonds des dépressions	<i>Ampelopteris prolifera</i> , <i>Cyclosorus gongylodes</i> , <i>Microlepia speluncae</i>	Mare
Zonale	Grise foncée à noire	Régulière	Marge des dépressions	<i>Pycnus mundtii</i>	Hydromorphie totale
Zonale	Grise foncée à noire avec taches grises	Hétérogène	Chenal principal	<i>Paspalum vaginatum</i> <i>Phloxerus vermicularis</i>	Hydromorphie totale avec salure
Zonale	Grise claire à grise foncée	Hétérogène	Variable	<i>Imperata cylindrica</i>	Hydromorphie partielle
Zonale	Grise claire avec taches noires	Hétérogène	Chenal principal	<i>Sporobolus robustus</i>	Hydromorphie partielle avec salure

1.6.2 Géoréférencement :

Le principe de redressement adopté est basé sur la substitution des points de la photographie aérienne présentant des distorsions aux points de contrôle ou points de calage qui ont été pris sur les cartes d'occupation du sol de la zone (DTGC, 1996). Ce processus a permis de ramener les coordonnées des photographies aériennes aux coordonnées réelles de la Terre (Robin, 1995). Pour cela, il a fallu choisir un référentiel à partir d'un système de projection UTM (Universal Transverse Mercator): Lazar UTM, calculé à partir des métadonnées de la carte IGN d'occupation du sol de la zone de 1978: Clark 1980, quadrillage de 10 sur 10 kilométriques, fuseau N° 28, avec comme méridien d'origine: 15° Ouest du méridien international. Au minimum, huit points de calage ont été utilisés par image avec une précision variable entre 0.04 et 1.22 m (*Residual Mean square*).

1.6.3 Mosaïquage d'images :

Dans le but d'obtenir une image unique du secteur d'étude, un assemblage d'images complémentaires et successives a été effectué. Une mosaïque a été obtenue pour les différentes années d'étude (1954, 1974 et 2000). La mosaïque de 1974 présente des différences au niveau du contraste et de la luminosité entre les images. En effet, chaque image est développée de façon à optimiser les contrastes et présente donc des teintes qui lui sont propres. Il a donc fallu procéder à l'homogénéisation des teintes.

1.6.4 Interprétation visuelle :

La reconnaissance des différentes unités décrites sur les cartes de base susmentionnées et sur les photographies aériennes a été faite à partir de certains critères dont la forme, la structure, la couleur et la localisation géographique (Robert & Dick, 1993). L'interprétation visuelle s'est faite en trois phases :

- Une première interprétation visuelle a d'abord été faite sur les cartes de base. Ceci a permis de reconnaître et de caractériser la typologie des zones humides et la végétation associée mais aussi de définir la clé d'interprétation;
- Une deuxième photo-interprétation a été faite sur la photographie aérienne de Mboro afin de retrouver les différentes unités pédologiques décrites sur les cartes de base conformément à la clé d'interprétation prédéfinie;
- Une troisième photo-interprétation a ensuite été effectuée sur la photographie aérienne de Kayar afin de retrouver les assemblages floristiques décrits par Raynal (1963). Cette étape a permis d'identifier les principaux groupements végétaux humides associées aux types de sols hydromorphes dans le secteur de Mboro.

1.6.5 Digitalisation ou vectorisation :

Cette approche a permis un découpage de l'espace en donnant une signification thématique aux unités identifiées conformément à la clé d'interprétation. En se basant sur les cartes de Pereira-Barreto (1962) et de Dryade (1990), cinq unités ont été

retenues pour représenter les différents types de sols humides sur chaque image (Tableau 2).

Il faut noter que les photographies aériennes montrent quelques limites liées à la difficulté à différencier des niveaux de gris proches mais représentant des réalités différentes. Un recours à l'amélioration de la qualité des images par le rehaussement de la valeur des pixels a été requise dans l'interprétation visuelle et dans l'opération de digitalisation. Cette étape a permis d'améliorer le contraste, de rehausser les niveaux de gris et de filtrer les images pour atténuer le bruit (Robert & Dick, 1993).

Le Système d'Information Géographique utilisé a permis de générer les données statistiques se rapportant aux différentes unités spatiales cartographiées. La table de chaque unité présente ainsi la superficie de tous les polygones dont la somme totale donne la superficie de l'ensemble de l'unité calculée en hectares.

1.7 Résultats

1.7.1 Contexte hydro-climatique

La normale pluviométrique régionale, calculée à partir de la précipitation moyenne inter-annuelle des quatre stations dites synoptiques de Dakar, Thiès, Louga et St-Louis, passe de 522 mm entre 1931 et 1960 à 370 mm entre 1961 et 1990, soit une baisse de près de 150 mm. Entre 1950 et 1970, les cumuls moyens annuels de précipitations sont généralement excédentaires par rapport à la normale de 1961-1990. Depuis le début des années 1970, la pluviométrie est relativement déficitaire sauf pour quelques années : 1989, 1999 et 2000 qui apparaissent comme les « plus pluvieuses » de la période postérieure à 1970, avec un cumul annuel respectif de 531.5 mm, 461.1 mm et 450.7 mm (Figure 3).

Les conséquences de la baisse des précipitations hydrogéologie se traduisent par un abaissement continu du niveau de la nappe superficielle. La figure 4 montre les cumuls annuels de précipitation à Mboro (15°9 N - 16°54 W) entre 1950 et 2004 et

l'évolution régressive du niveau de la nappe à Ndeune ($15^{\circ}07' N - 16^{\circ}53' W$) situé dans la même zone géographique (Figure 6). Depuis le début de la sécheresse (1970-1974), le niveau de la nappe baisse en moyenne de 0.51 m tous les 10 ans (Aguar *et al.*, (a) soumis). Les fluctuations inter-annuelles du niveau de la nappe sont concomitantes à celles de la pluviométrie avec des périodes de recharge importante calées entre les années 1975 et 1978, 1987 et 1989 et en 2002 considérées comme les moins déficitaires après 1970 (Figure 4). D'ailleurs, le coefficient de corrélation obtenu (0.77) indique que la tendance à la baisse du niveau de la nappe est liée à la diminution des cumuls pluviométriques (Figure 5).

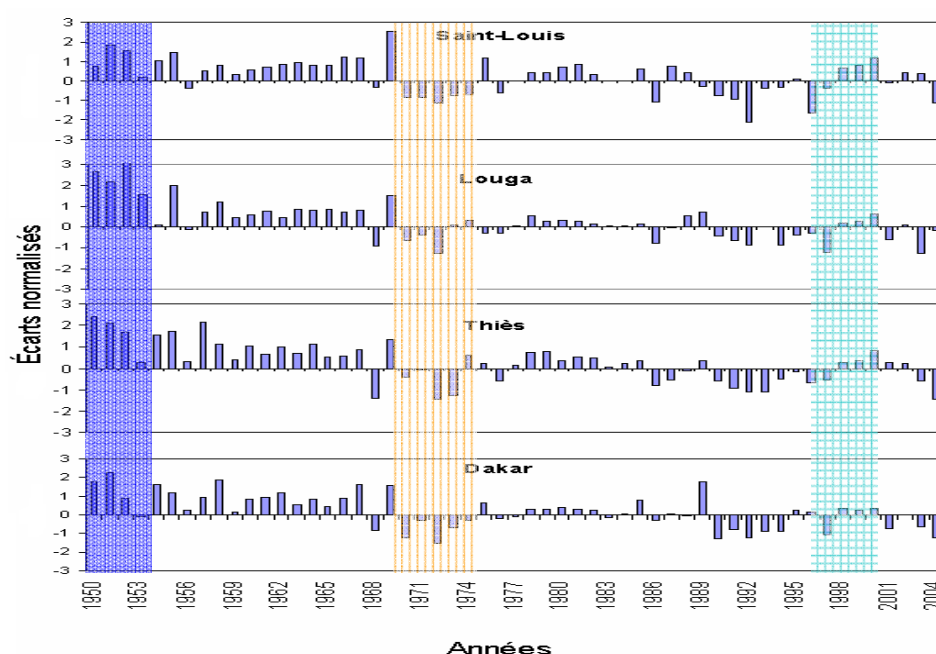


Figure 3. Anomalies normalisées des cumuls pluviométriques annuels entre 1950 et 2004.

Les valeurs positives (+) ou négatives (-) indiquent respectivement une pluviométrie excédentaire ou déficitaire par rapport à la normale (1961-1990).

■ Pluviométrie excédentaire ■■■ Pluviométrie déficitaire ■■■ Pluviométrie normale

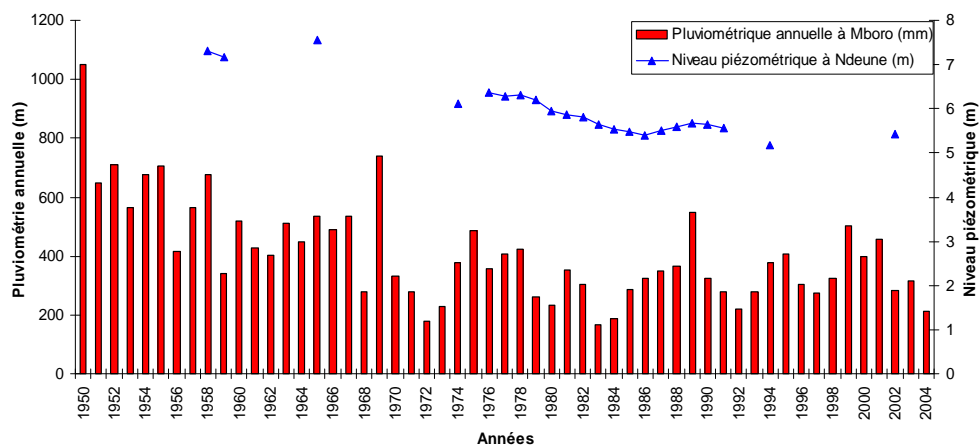


Figure 4. Évolution des cumuls pluviométriques annuels à Mboro (15°9 N - 16°54 W) et du niveau de la nappe au piézomètre de Ndeune (15°07 N - 16°53 W).

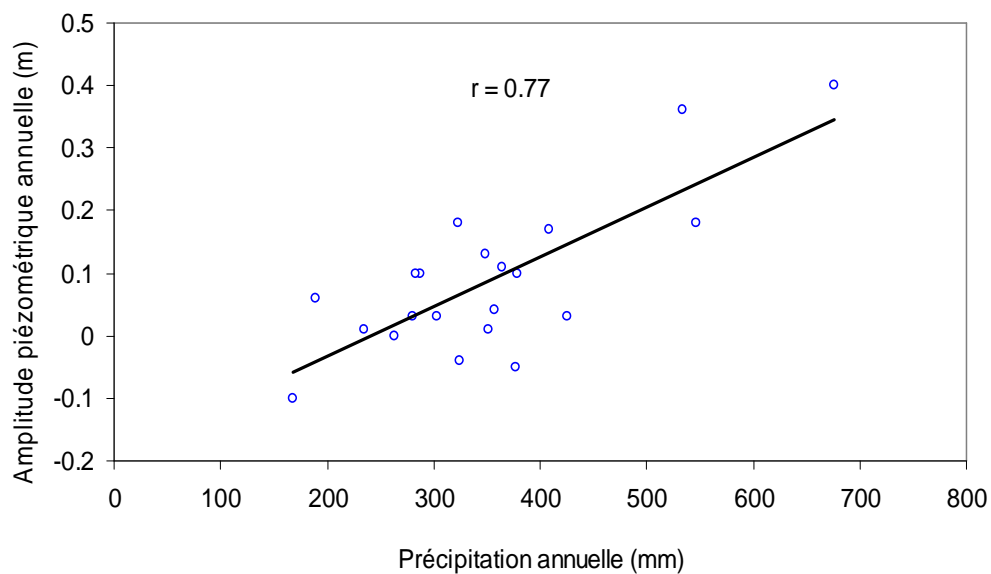


Figure 5. Corrélation entre la pluviométrie annuelle à Mboro et l'amplitude saisonnière du piézomètre de Ndeune entre 1958 et 2002. r = Coefficient de corrélation

1.7.2 Évolution spatiale des zones inondées dans la région des Niayes

La figure 6 présente l'évolution spatiale des zones inondées et du niveau de la nappe entre 1954 et 2000 dans la région des Niayes. Les zones inondées correspondent aux zones d'affleurement de la nappe où la cote topographique est moins élevée que la piézométrie. La superficie des mares passe de plus de 1000 ha en 1954 à moins de 170 ha en 1974 pour atteindre environ 50 ha en 1982. En 2000, aucune zone inondée n'est perceptible dans le paysage des Niayes (Figures 6 et 7).

L'inondation de certaines dépressions dépend de la hauteur de la nappe et le suivi de l'évolution piézométrique indique une baisse considérable des niveaux d'eau expliquée en partie par les défauts de recharge associés aux déficits pluviométriques (Aguiar *et al.*, (a) et (b) soumis). Sur la figure 6, le niveau le plus élevé de la nappe a baissé d'environ 10 m entre 1954 et 1982 dans le secteur sud-est de la région. En effet, les précipitations susceptibles de compenser la décharge de la nappe par évapotranspiration, écoulement vers la mer ou par le pompage sont en nette régression. Entre les périodes 1950-1969 et 1970-1989, la moyenne pluviométrique annuelle a baissé de plus de 41% dans l'ensemble de la région (Aguiar *et al.*, (a) soumis). Il en résulte un assèchement des points d'eau et la disparition progressive des zones jadis (en 1954) submergées par une nappe affleurante (Figures 6 et 7). La diminution de la superficie des zones inondées résulte donc en bonne partie de l'aridification progressive engendrée par les sécheresses des trois dernières décennies. Ce phénomène suggère la précarité des conditions hydro-climatiques dans la région des Niayes.

Malgré la reprise pluviométrique à la fin des années 1990, le niveau de la nappe reste toujours inférieur à la topographie naturelle. Cette amélioration des conditions pluviométriques n'a pas engendré une réapparition de zones inondées comme ce fut le cas en 1954. Le niveau de la nappe, directement influencé par celui des précipitations, subit aussi un effet retard, appelé «effet mémoire», dû aux déficits pluviométriques répétés (Aguiar *et al.*, (a) soumis).

À ce phénomène s'ajoute l'augmentation du niveau de pompage pour la satisfaction des besoins en irrigation et d'alimentation en eau potable d'une population sans cesse croissante. La densité moyenne de la population de la région des Niayes qui était estimée à environ 25.7 habitants au km² en 1950 a atteint 44.6 habitants au km² en 1988 et probablement 62.5 habitants au km² en 2000 (DPS, 1997). Cela suggère un pompage de plus en plus accru. Il a déjà été démontré que les débits extraits sont supérieurs au potentiel renouvelable de la Nappe des Sables Quaternaires, d'où son épuisement et sa décharge progressive surtout au cours des deux dernières décennies (Aguiar *et al.*, (b) soumis)

Par conséquent, la rareté des événements pluvieux et l'exploitation de la nappe pour des besoins d'alimentation et d'irrigation ne permettent pas une recharge de celle-ci, encore moins une reconstitution de la réserve d'eau souterraine. La réapparition de zones inondées nécessiterait probablement plusieurs années de précipitations excédentaires ainsi qu'une limitation des pompages eu égard au potentiel renouvelable de la nappe phréatique. Ce qui est loin d'être le cas actuellement.

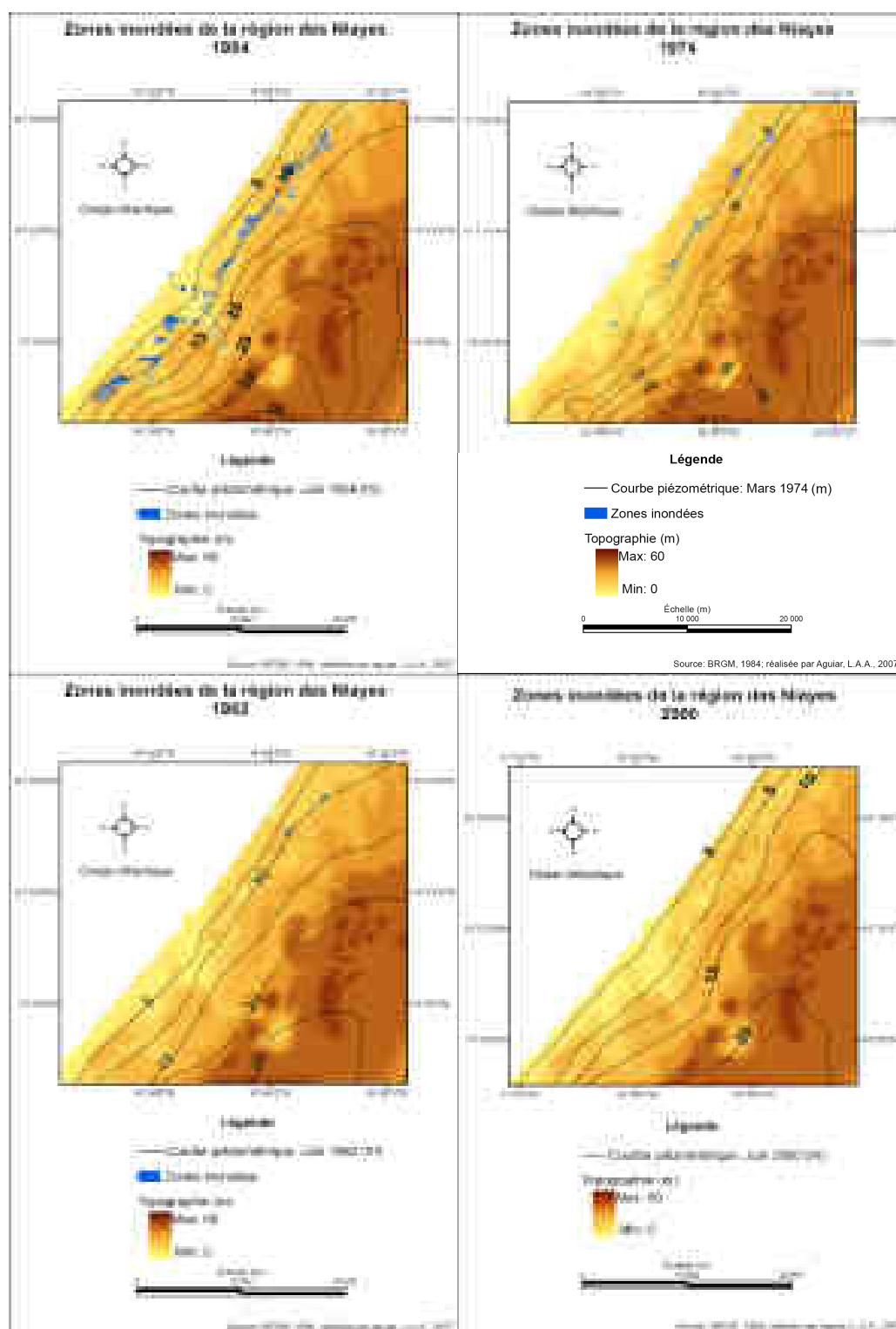


Figure 6. Dynamique spatiale des mares dans la région des Niayes pour les années 1954, 1974, 1982 (BRGM, 1984) et 2000.

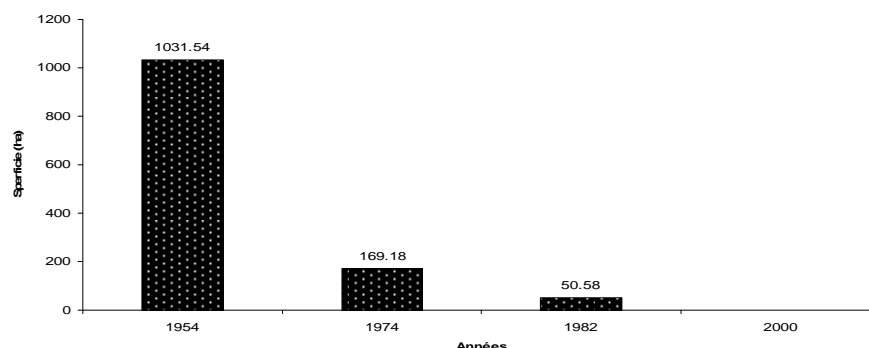


Figure 7. Superficies des mares dans la région des Niayes en 1954, 1974, 1982 et 2000.

1.7.3 Le cas de la Niaye de Mboro (15°9 N - 16°54 W)

La Niaye de Mboro est un ancien cours d'eau qui a été isolé de l'océan au cours des deux derniers millénaires par l'avancée des dunes littorales (Michel, 1973). À côté du grand chenal perpendiculaire à la côte existent plusieurs dépressions isolées de taille variables (Figure 8). Les figures 8 et 9 présentent les superficies respectives des différentes unités caractérisant la Niaye de Mboro. Au début des années 1950, la majeure partie de la Niaye de Mboro était couverte par les mares et les sols à hydromorphie totale. Ces unités occupent les points bas des dépressions où la nature du substrat sablo-argileux peut favoriser un piégeage local et temporaire de la nappe en surface (BRGM, 1984). Par contre en 2000, seuls les sols à hydromorphie partielle ont persisté.

Les résultats présentés au tableau 3 font ressortir la superficie couverte par chaque unité et sa valeur relative par rapport à la superficie totale de la dépression pour l'année correspondante. En considérant l'année 1954 comme année de référence, il est possible de quantifier le changement de la superficie des unités par rapport à cette date. En 1954, la superficie occupée par les mares était d'environ 300 ha soit 20% de la superficie totale de la Niaye de Mboro alors que les sols à hydromorphie totale couvraient 37%. La superficie cumulée de ces deux unités représentait donc plus de 57% de la superficie totale de la Niaye de Mboro.

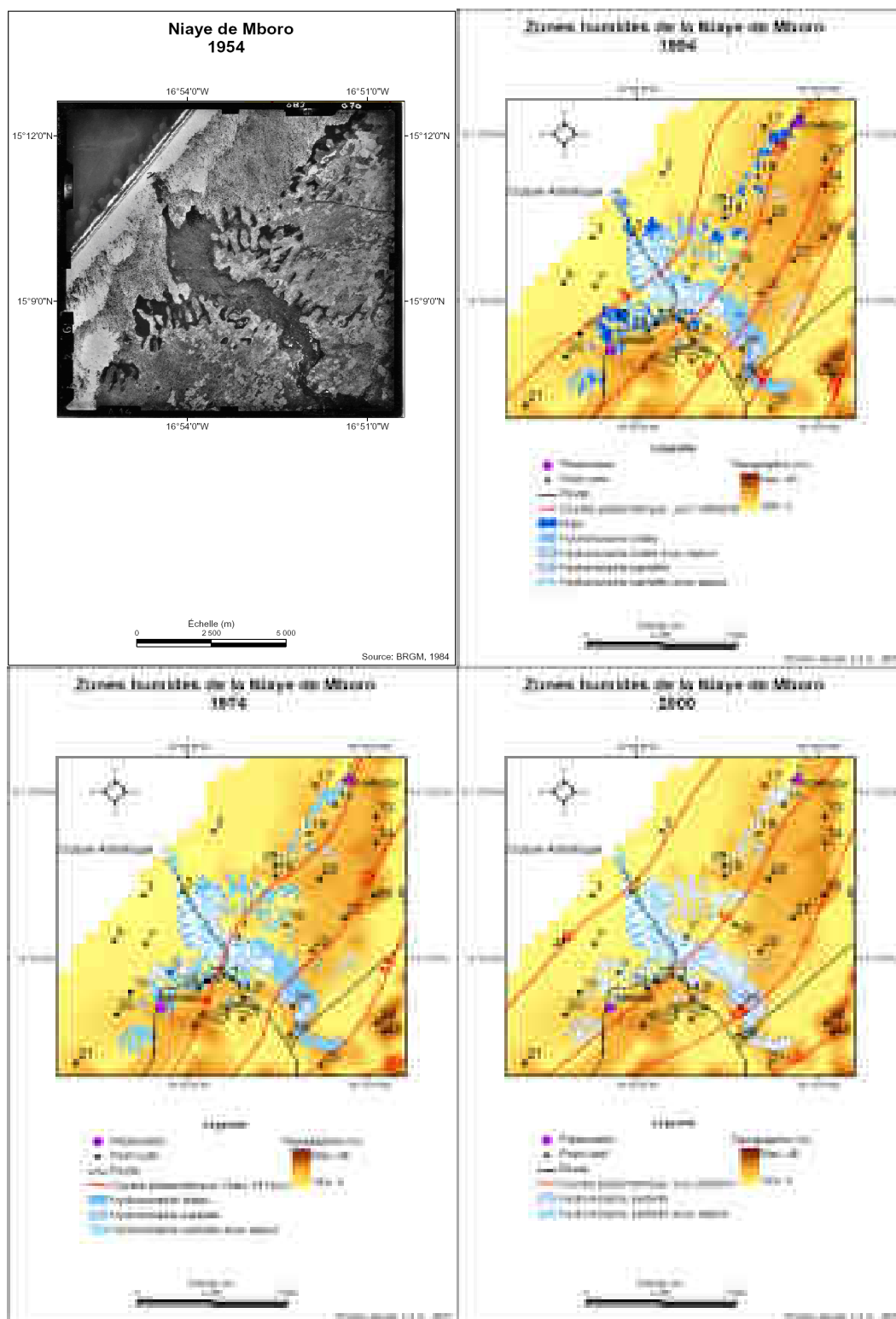


Figure 8. Cartographie de l'évolution des zones humides de la Niaye de Mboro (1954, 1974 et 2000).

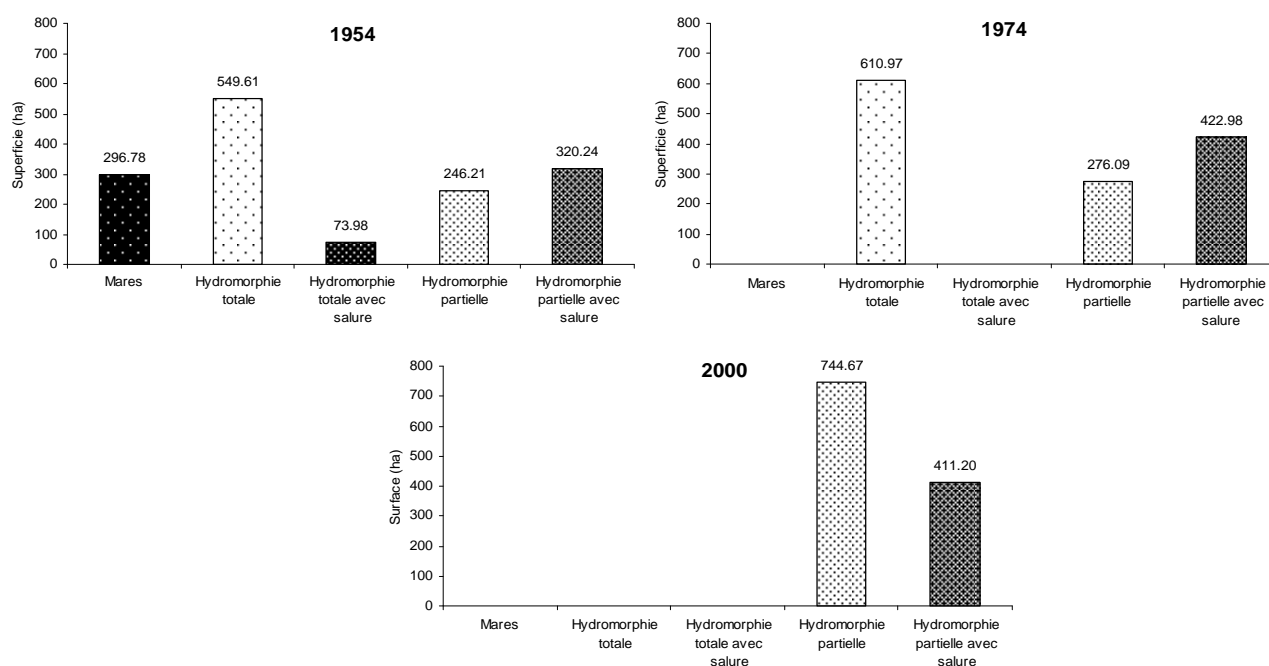


Figure 9. Superficie des zones humides dans le secteur de Mboro en 1954, 1974 et 2000.

Tableau 3. Pourcentage de couverture spatiale des zones humides.

Unité	Superficie		Superficie		Superficie	
	1954		1974		2000	
	(ha)	%	(ha)	%	(ha)	%
Mare	296.78	20	0	0	0	0
Sols à hydromorphie totale	549.61	37	610.97	47	0	0
Sols à hydromorphie totale avec salure	73.98	5	0	0	0	0
Sols à hydromorphie partielle	246.21	17	276.09	21	744.67	64
Sols à hydromorphie partielle avec salure	320.24	22	422.98	32	411.2	36
Superficies totales des unités	1486.82	100	1310.03	100	1155.87	100

Entre les années 1950 et 1970, les mares se sont transformées en sols à hydromorphie totale accroissant ainsi la superficie occupée par cette unité (Figures 8 et 9). Celle-ci est passée de 37% (549 ha) de la superficie totale en 1954 à 47% (610 ha) en 1974

représentant à elle seule près de la moitié de la superficie totale de la Niaye (Tableau 3). La même tendance est observée pour les sols à hydromorphie partielle et à hydromorphie partielle avec salure dont les superficies respectives ont augmenté de 12% et de 32% entre les deux dates. Ces deux unités sont passées respectivement de 22 à 64 % et de 32 à 36 % de la superficie totale entre 1974 et 2000.

Entre 1954 et 1974, l'extension spatiale des sols à hydromorphie totale s'explique par le fait que cette unité est un segment de transition entre les mares et les sols à hydromorphie partielle. Ainsi, les conditions d'assèchement se poursuivant, les sols à hydromorphie totale se sont transformés en sols à hydromorphie partielle. Ce processus explique que la totalité de l'étendue de la Niaye de Mboro soit recouverte par des sols à hydromorphie partielle avec ou sans salure en 2000.

Une telle évolution spatiale a été favorisée par les conditions hydro-climatiques de la période définie comme humide entre 1950 et 1970. En 1954, la station pluviométrique de Mboro a enregistré 675.3 mm de précipitation pour une normale de 371.4 mm entre 1961 et 1990 (Figures 3 et 4). Les années précédentes de 1950, 1951, 1952, 1953 ont aussi été marquées par une pluviométrie excédentaire respectivement de 1050.2, 647.4, 710.9 et 566.3 mm. Selon le BRGM (1984, p. 35) :

« À partir de 1950, à la suite de 3 années de pluies exceptionnelles à Mboro, le niveau d'eau dans les Niayes s'est maintenu à une cote pratiquement constante en saison humide comme en saison sèche jusqu'en 1956 avec une hauteur d'eau de l'ordre 1.5 m ».

Les niveaux les plus élevés de la nappe sont effectivement enregistrés au cours des années 1950 et 1960 (Figures 4 et 8; Aguiar *et al.*, (b) soumis). Dans le secteur de Mboro, le toit de la nappe avoisine 25 m au dessus du niveau 0 de la mer en juin 1958 (Figure 8). Ce niveau élevé de la nappe favorise l'immersion de certaines dépressions situées entre les izopièses 5 m et 10 m. À l'est de l'izopièse 10, la topographie est généralement supérieure à 10 m d'où l'absence de zones inondées dans ce secteur. Cependant, la nature sablo-argileuse du substrat dans les dépressions, explique le

maintien d'humidité en surface et la présence de sols à hydromorphie totale (Dryade, 1990).

Les figures 8 et 9 suggèrent que c'est au cours de la période entre 1970 et 2000 que la région des Niayes a enregistré les changements les plus importants en terme de superficie des zones humides. Ces changements sont liés aux déficits pluviométriques des années 1970 et 1980 qui sont considérées comme les plus arides du siècle (Nicholson, 2001; Hulme *et al.*, 2001). Depuis la fin des années 1960, la baisse du niveau de la nappe est estimée en moyenne à 0.60 m tous les dix ans (Aguiar *et al.*, (b) soumis). Le maximum piézométrique dans le secteur de Mboro est passé de 25 m en 1958 à 20 m en 1974 pour atteindre 15 m en 2000. Au même moment, le minimum piézométrique s'est abaissé de 5 m atteignant le niveau 0 de la mer le long de la côte. Par contre, au centre de la Niaye de Mboro, le niveau de la nappe est quasi stable, entre les izopièses 5 et 10 m, malgré le déficit de recharge induit par la sécheresse observée entre 1970 et 1974 (Figure 8; Aguiar *et al.*, (c) soumis). Cette «statibilité» du niveau de la nappe dans ce secteur pourrait s'expliquer par un relèvement du niveau d'eau favorisé par la percolation latérale du biseau salée sous-jacent suite à la baisse de la pression hydrostatique à partir du dôme piézométrique. Étant donnée la différence de densité, entre eaux douces et eaux salées, les eaux océaniques pénètrent vers l'intérieur du continent entraînant un relèvement du niveau de la nappe à la bordure du littoral. Ce réajustement hydrostatique constitue donc un biais important à prendre en compte dans les analyses du niveau de la nappe en bordure du littoral.

Au-delà de l'aridification progressive due surtout à une diminution des apports pluviométriques, les activités anthropiques, notamment le pompage, contribuent à l'accentuation du destockage de la nappe et à l'anéantissement de toute possibilité de recharge de celle-ci par les pluies. Au cours des deux dernières décennies, l'accroissement continu de la population dans la localité de Mboro a entraîné une plus grande exploitation des ressources en eau et une colonisation des dépressions par les puits maraîchers. En 1976, la population de Mboro était d'environ 8909 habitants.

Elle devrait atteindre 11 809 habitants en 2002 pour passer 12 289 habitants en 2007, selon les projections du recensement de 1997 (DPS, 1997).

Par ailleurs, la présence de sols à hydromorphie totale ou partielle avec salure (Figure 8) peut être due : (i) à la progression du biseau salé d'origine océanique de la côte vers l'intérieur des terres; (ii) à la remontée par capillarité des eaux salées sous-jacentes en raison de la baisse du niveau la nappe d'eau douce; ou (iii) à la concentration en surface des sels contenus dans le matériau d'origine (sable). En 2000, l'atteinte du niveau piézométrique 0 m qui correspond au niveau de la mer corrobore l'hypothèse d'une progression du biseau salé d'origine océanique de la côte vers l'intérieur des terres. Cependant, cette percolation latérale des eaux marines se limite à la frange côtière et ne dépasse pas 1 km à l'intérieur de la dépression de Mboro (Dryade, 1990). Cette hypothèse ne saurait donc expliquer les efflorescences salines observées en 1954 dans les sols à hydromorphie totale (avec salure), puis à hydromorphie partielle (avec salure) en 1974, à l'extrémité est de la dépression de Mboro (Figure 8). La contamination de ces sols hydromorphes pourrait donc s'expliquer par la baisse de la pression hydraulique suite à l'abaissement du niveau de la nappe favorisant la remontée par capillarité des eaux salées sous-jacentes ou encore par la présence de sels dans le matériau d'origine non entièrement lessivés par les pluies, pourtant abondantes au cours des années 1950. Dans ce dernier cas, la dépression évoluerait comme une vallée fossile qui, jadis, était en contact avec la mer. La salinité observée à l'intérieur des terres pourrait alors être liée à une intrusion de l'eau de mer ayant précédé les changements sub-actuels et actuels (Debuisson & Moussu, 1967; Seck, 1990). Quoi qu'il en soit, l'extension actuelle des sols atteints par la salinité est favorisée par les déficits pluviométriques et par le pompage qui compromet la recharge de la nappe.

L'assèchement et la salinisation des Niayes ont favorisé des changements dans la composition végétale des groupements hygrophiles à la faveur d'espèces xérophiles ou halophiles (Dryade, 1990). En effet, les sols à hydromorphie partielle avec salure s'étendent et remplacent les sols à hydromorphie totale entraînant une transformation

des groupements hygrophiles à *Pycreus mundtii* à des groupements halophiles dominés principalement par *Paspalum vaginatum*, *Philoxerus vermicularis* et *Sporobolus robustus* (Raynal, 1963; Dryade, 1990). D'ailleurs la zonation pollinique faite par Lézine (1987) montre que les Niayes ont subi depuis 12000 ans B.P. d'importantes modifications paléogéographiques touchant l'environnement végétal. Celles-ci se poursuivent de nos jours et se traduisent par la disparition progressive d'espèces végétales humides comme le palmerais (*Phoenix reclinata* Jacq., *Elaeis guineensis* Jacq.), l'Anacardier (*Anacardium occidentale* L.) et l'apparition d'espèces caractéristiques de climat semi-aride telle que l'Acacia (*Acacia seyal* Del.). La végétation des Niayes apparaît donc en évolution vers une formation de plus en plus ouverte et xérophile.

De plus, l'assèchement des Niayes accompagné d'une perte de la couverture végétale favorise la mobilisation de particules sableuses et l'accélération de la déflation éolienne. Les travaux du BRGM (1984) et de Dryade (1990) ont démontré que les dunes littorales sont sujettes à l'érosion éolienne, qui se manifeste par un ensablement progressif des Niayes. Celui-ci est plus remarquable aux pourtours des dépressions. Cette dynamique s'accompagne d'un processus de fractionnement, de développement de fente de retrait en surface et d'accumulation de sable dans les zones naguère inondées (BRGM, 1984).

Les conséquences d'une telle évolution du milieu est l'appauvrissement des sols qui conduit à leur inexploitableté et finalement à leur abandon. Le secteur agricole est notamment touché par le stress hydrique des cultures et il se traduit par une forte baisse de rendements. Par exemple, la production d'ognion dans le secteur de Mboro est passée de 11 867 en 1988/1989 à 10 154 tonnes en 1990/1991 (Aguar, 2002). Face à la baisse du niveau de la nappe, les paysans sont obligés d'approfondir les puits maraîchers. L'exploitation de l'eau de la nappe, de plus en plus mécanisée, se fait par des motopompes installées aux abords des puits traditionnels et des forages individuels dans les grandes exploitations. Ces nouvelles méthodes d'exploitation de la nappe réduisent davantage le volume d'eau exploitable. En 2000, la baisse du

niveau de la nappe qui s'est accompagnée d'une intrusion des eaux marines le long de la côte de Mboro, a rendu la nappe impropre à la consommation et à l'usage à des fins agricoles (SGPRE, 2003).

1.8 Conclusion

Les résultats obtenus dans cette étude ont démontré que l'évolution des zones humides de la région des Niayes a été marquée par trois grandes périodes hydro-climatiques:

- (1) Une période humide au début des années 1950 caractérisée par des précipitations excédentaires par rapport à la normale de référence 1961-1990. Au cours de cette période, l'analyse des photographies aériennes de 1954 indique la présence de zones inondées et de sols à hydromorphie totale permanente qui confirment des conditions hydro-climatiques favorables au maintien de l'humidité des sols et du niveau élevé de la nappe. La superficie de ces deux unités couvre plus de la moitié de l'aire de la dépression de la Niaye de Mboro (57%).
- (2) Une période sèche au cours des années 1970, 1980 et 1990 marquée par une baisse des apports pluviométriques. Au cours de cette période, l'évolution spatio-temporelle des Niayes est caractérisée par une diminution de la surface des zones humides notamment par une disparition des zones inondées en permanence en faveur d'une extension spatiale des sols à hydromorphie partielle et à hydromorphie partielle avec salure. De tels changements environnementaux sont le résultat d'une sécheresse persistante dont l'intensité, la durée et l'ampleur ont été uniques dans les registres climatiques des 50 dernières années.
- (3) Une période de pluviométrie normale au cours de laquelle les cumuls annuels de précipitations avoisinent ou excèdent la moyenne de 1961-1990. Cette «reprise pluviométrique» observée à la fin des années 1990 n'a pas été suffisante pour favoriser la reformation de mares ou sols à hydromorphie totale permanente. En effet, le niveau de la nappe est directement influencé par celui des précipitations mais il subit aussi un effet retard, dû aux déficits pluviométriques répétés des années précédentes et à la pression anthropique *via* le pompage.

Les changements environnementaux reconstitués à travers le suivi de l'évolution spatio-temporelle des zones humides au cours des 50 dernières années montrent la vulnérabilité des Niayes aux conditions hydro-climatologiques régionales. Cette évolution est le résultat de la variabilité des précipitations, altérant ainsi l'équilibre hydrologique des zones humides par la disparition des mares et des sols à hydromorphie totale. Toutefois, la dynamique des zones humides dans la région des Niayes est non seulement liée aux fluctuations climatiques mais aussi aux changements environnementaux (couvert végétal, érosion éolienne) et aux activités humaines (pompage) d'une population sans cesse croissante. Ces processus naturels et anthropiques mettent en péril l'équilibre écologique et engendrent des conséquences désastreuses sur l'agriculture.

Pour l'instant, l'origine des efflorescences salines n'est pas encore déterminée avec certitude, sauf en bordure du littoral. Quoiqu'il en soit, le défaut de recharge de la nappe lié au déficit pluviométrique, favorise l'extension spatiale des unités affectées par la présence de sel. Ce phénomène a entraîné l'apparition d'espèces végétales tolérant la salure comme le *Sporobolus robustus*.

Les résultats montrent que le suivi de l'évolution des milieux humides représente un bon indicateur des effets des fluctuations hydro-climatiques sur le milieu. Cependant, l'appréhension des impacts de la variabilité climatique sur l'état de surface des Niayes est complexe. Celle-ci nécessite une approche intégrée prenant en compte les différentes composantes des écosystèmes Niayes (couvert végétal, types de sol, topographie, activités anthropiques). Il ne s'agit pas seulement de quantifier les précipitations et la superficie des zones humides mais aussi comprendre les liens entre les variables climatiques et hydrologiques et les différents éléments naturels et anthropiques qui en dépendent. Les résultats présentés dans cette étude sont fragmentaires. Le manque de prises de vue régulières ainsi que les lacunes retracées dans les séries de mesures de piézométrie, de pompage et de précipitations constituent des limites à cette étude.

Remerciements. Les auteurs tiennent à remercier le programme de bourse de la fondation Ford, la chaire en environnement à l'échelle du globe de l'UQAM et le CRSNG (subvention à la découverte) pour leur soutien financier en plus du consortium Ouranos qui a apporté un soutien matériel à l'aboutissement de cette étude. Ces remerciements sont également adressés au Service de la Gestion et de la planification des ressources en eau du Sénégal, à l'équipe d'hydrologie du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (France). Un grand merci est également adressé au Dr. Serigne Faye et au Dr. Isabelle Niang de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar pour leur collaboration scientifique.

1.9 Références

- Aguiar, L. A. A., 2002. Gestion des ressources naturelles et systèmes de production sur le littoral nord du Sénégal. *Presse universitaire*. Université Cheikh Anta Diop, Dakar (SEN), 96 p.
- Aguiar, L. A. A., Gachon P., Garneau M., Lézine A.-M. (a). «Variabilités inter-annuelles et intra-saisonnières des précipitations le long du littoral nord du Sénégal entre 1950 et 2004». Article soumis à la revue *Hydrological Science Journal*, le 21 juillet 2008.
- Aguiar, L. A. A., Maugis P., Garneau M., Lézine A.-M. & Gachon P. (b). «Évolution de la Nappe des Sables Quaternaire dans la région de Niayes (1958-1994): relation avec le climat et les impacts anthropiques». Article soumis à la revue *Sécheresse*, le 25 juillet 2008.
- Aguiar, L.A.A, Maugis P., Garneau M., Lézine A.-M. & Gachon P. (c). «Impacts de la variabilité des précipitations sur le niveau de la nappe phréatique de la région des Niayes du Sénégal en années de pluviométrie excédentaire et déficitaire: 1958 et 1974». Article soumis à la revue *Sécheresse*, le 25 juillet 2008.
- BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière), 1962. Hydrologie de la région des Niayes, sous la direction de J. Putallaz, Dak 62-A 12, 37 p.
- BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière), 1984. Projet d'exploitation des tourbes des Niayes, rapport de synthèse géologique. Prospection générale et certification des réserves, *BRGM*, 89 p.
- CSE, 2002, Étude de la dynamique des unités d'occupation – utilisation des sols dans la zone d'intervention du Project d'Appui à l'Entreprenariat Paysan (PAEP) *ACDI, Centre de Suivi Écologique*, Direction de l'Environnement, 57 pages.

- Debuissou, J. & Moussu H., 1967. «Une étude expérimentale de l'intrusion des eaux marines dans une nappe côtière du Sénégal sous l'effet de l'exploitation». *Symposium of Haïfa Publ.* 72: 334-349.
- DPS (Direction de la Prévision de la Statistique), 1997. *Enquête sénégalaise auprès des ménages, de mars 1994 à mai 1995 : la consommation, les dépenses et les activités*, rapport de synthèse, CILSS-UE, DIAPER III (Sénégal), 178 p.
- Dryade (Le Groupe), 1990. Inventaire Biophysique de la région des Niayes - Synthèse, document de recherche dans le cadre du Project Conservation des Terroirs du Littoral, Ministère du Développement Rural et de l'Hydraulique, Direction des eaux, Forêts, Chasses et de la Conservation des Sols, République du Sénégal, 262 p.
- DTGC (Direction Générale des Travaux Cartographiques), 1996. Carte d'occupation du sol de Louga au 1/200000. Projet Paddel – Coopération Française (Institut Géographique National), 5^{ème} éditions. Feuille ND-28-XX LOUGA.
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2003. Annuaire statistique de la FAO. En ligne, <http://www.fao.org/es/ess/fr/index_fr.asp>, consulté le 28 octobre 2005.
- Hulme, M., Doherty R., Ngara T., New M. & Lister, D., 2001. «African climate change: 1900-2100». *Clim. Res.*, 17: 145-168.
- Le Lay, M. & Galle S., 2005. «Seasonal cycle and interannual variability of rainfall at hydrological scales. The West African monsoon in a Sudanese climate». *Hydrological Sciences Journal*, 50: 509-524.
- Lézine, A.-M., 1987. Paléoenvironnements végétaux d'Afrique nord-tropicale occidentale depuis 12000 B.P : Analyse pollinique de séries sédimentaires continentales Sénégal-Mauritanie. Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle, Université de Luminy (FRA), 151 p.
- Michel, P. 1973. Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Mémoire ORSTOM n°63, Paris 3, 752 p.
- Nicholson, S. E., 2001. «Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries». *Clim. Res.*, 17: 123-144.
- Pereira-Barreto, S., 1962. Étude pédologique des « Niayes » méridionales (entre Kayar et Mboro), rapport général CRP, Hann, Dakar (Sénégal), ORSTOM, 120 p.
- Pornon, H., 1992. *Les SIG, Mise en œuvre et applications*. Paris, Éd. Hermès, 172 p.
- Rasmussen, K., Fog B. & Madsen J. E., 2001. «Desertification in reverse? Observations from northern Burkina Faso». *Global Environmental Change*, 11: 271-282.
- Raynal, A., 1963. «Flore et végétation des environs de Kayar (Sénégal) de la côte au Lac Tanma». *Annales Fac. Sci. Univ. de Dakar, Sc. Végét.*, 2: 121-131.

- Robert, L. & Dick T., 1993. *Fundamentals of spatial information systems*, Academic Press, London, 680 p.
- Robin, M., 1995. *La télédétection, des satellites aux systèmes d'information géographiques*, Collect Fac, Nathan, Paris. 320p.
- Sall, M. .M., 1982. Dynamique et morphogenèses actuelles au Sénégal occidental. Thèse de doct. d'État es lettre. Université Louis Pasteur Strasbourg. 604 p.
- Seck, L., 1990. Inventaire Biophysique des Niayes. Composante hydrogéologique, CTL, MDR, Dakar, 42 p.
- Trochain, J., 1940. *Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal*. Paris : Larose, 433 p.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Rappel des objectifs et des étapes

L'objectif principal de la thèse était de comprendre les interactions dynamiques (espace et temps) entre les précipitations, les ressources en eaux souterraines et les milieux humides des Niayes, le long du littoral nord du Sénégal, qui sont d'une importance particulière tant sur le plan de la biodiversité que sur le plan économique. Pour atteindre cet objectif, l'étude s'est appuyée sur plusieurs bases de données (météorologiques, hydrologiques, aéroportées et cartographiques) et s'est déroulée en trois grandes étapes qui peuvent être résumées comme suit:

- Analyse des tendances décennales et des anomalies observées sur les indices de variabilité de précipitations quotidiennes au cours de la saison de mousson (avril - octobre) entre 1950 et 2004 et analyse de la contribution mensuelle à la précipitation totale annuelle,
- Analyse à long terme des fluctuations piézométriques de la Nappe des Sables Quaternaires (NSQ) entre 1958 et 2002, et étude du comportement hydrodynamique de la nappe en année de pluviométrie excédentaire (1958) vs déficitaire (1974),
- Analyse diachronique des changements d'occupation du sol notamment le suivi de l'évolution spatiale des zones humides à partir de l'analyse des photographies aériennes entre 1954 et 2000.

Synthèse des résultats

L'étude a démontré que la région de Niayes du Sénégal est localisée dans une zone de variations de précipitations significatives. Les tendances observées dans la plupart des indices de variabilité de précipitations, témoignent des changements depuis 50 ans, dans la fréquence des événements pluvieux mais également dans la durée des séquences sèches au cours de la saison de mousson d'avril à octobre.

Au-delà de la diminution des cumuls mensuels ou annuels des précipitations, la moyenne quotidienne des précipitations et le nombre de jours pluvieux calculés sur la période d'avril à octobre marquent des tendances décennales à la baisse. Les précipitations moyennes journalières indiquent une tendance significative à la baisse

qui varie entre -0.1 et -0.4 mm/j par décennie. Le pourcentage de jours humides subit également une diminution systématique de l'ordre de -1 % à -2 % par décennie du Nord vers le Sud et le maximum de jours secs consécutifs augmente de 3.7 à 4.7 jours, sauf pour la station de Saint-Louis où l'accroissement de plus de 2 jours/décennie est non significatif. Cependant, même si les événements pluvieux sont de plus en plus rares, leur intensité est restée quasi stable entre 1950 et 2004. Par conséquent, la sécheresse observée au cours des trente dernières années est surtout liée à la baisse du nombre d'événements pluvieux et à l'augmentation du nombre de jours secs consécutifs plutôt que du cumul par jour de pluie.

A l'échelle intra-saisonnière, le déficit pluviométrique se traduit par un rétrécissement de la durée de la saison pluvieuse qui est passée en moyenne de 5 à 3 mois entre 1950 et 2004. En dépit de sa taille réduite, on a pu mettre en évidence que la région des Niayes n'avait pas été touchée de façon homogène par la variabilité climatique de ces dernières décennies : la quantité moyenne de précipitations quotidiennes et le nombre de jours pluvieux ont diminué davantage au Sud qu'au Nord réduisant ainsi le gradient latitudinal. De plus, la station de Saint-Louis n'a pas enregistré les mêmes tendances décennales et anomalies de précipitations qu'ailleurs dans la région des Niayes, sans doute du fait de l'influence océanique et de sa position géographique la plus septentrionale. En effet, les vents d'origine océanique et continentale s'opposent à la progression vers le nord du vent de mousson porteuse de pluie. Ce dernier atteignant les latitudes 17° Nord a déjà perdu une bonne partie de son potentiel pluvieux d'où l'occurrence d'orage et de précipitations isolées dans cette partie du littoral nord du Sénégal (Leroux, 1996).

La variabilité spatiale et temporelle dans l'occurrence des événements pluvieux a affecté les possibilités de recharge des eaux souterraines et par conséquent a entraîné une baisse du niveau de la NSQ. L'étude des variations du niveau de la nappe entre 1958 et 2002 a mis en évidence la tendance à la baisse du niveau piézométrique. Celle-ci semble plus marquée dans la zone du bombement piézométrique au Sud de la région des Niayes. Il en résulte un déplacement de la zone de bombement

piézométrique de cette zone vers le centre de la région. Les plus fortes baisses piézométriques ont été enregistrées au cours des décennies 1970 et 1980 avec une régression progressive d'environ 0.60 m tous les dix ans.

Certes, la recharge de la nappe varie en fonction de l'occurrence et de la fréquence des événements pluvieux mais également en fonction des propriétés capillaires du sol (transmissivité, perméabilité). Elle n'est donc pas proportionnelle au cumul pluviométrique annuel. L'analyse du bilan hydrologique pour l'année 1974 suggère que les facteurs naturels sont les principaux responsables de l'abaissement du niveau de la nappe (96%), même si les activités humaines *via* notamment le pompage semblent avoir contribué au destockage rapide de la NSQ (4%). Par contre, au nord de la région des Niayes, les aménagements hydro-agricoles (barrage de Diama) mis en place au cours des années 1980, semblent avoir initié un relèvement du niveau de la nappe.

Les périodes de destockage de la nappe correspondent aux périodes de faible pluviosité. À l'échelle de l'année, la nappe réagit rapidement aux impulsions pluviométriques. En année de précipitations excédentaires, le temps de réponse de la nappe est inférieur à un mois alors que l'écart entre le maximum pluviométrique et piézométrique varie entre 1 à 4 mois lors de conditions de faible pluviométrie. La période de recharge est calée sur la saison pluvieuse (juillet à octobre voire décembre) mais peut être très différente en fonction de l'occurrence des événements pluvieux et des extrêmes associés. En année de précipitations déficitaires, caractérisée par la rareté des événements pluvieux et une saison pluvieuse réduite à trois mois, la recharge de la nappe est nulle ou quasi nulle et la lame d'eau atteignant la nappe ne dépasse guère le $\frac{1}{4}$ de la quantité d'eau précipitée.

À la surface du sol, la dégradation actuelle des conditions hydro-climatiques se manifeste par une altération progressive des zones humides entre 1954 et 2000. En effet, les déficits pluviométriques cumulés depuis le début des années 1970 ont provoqué l'assèchement des Niayes avec notamment la disparition des mares et des sols dites à hydromorphie totale. Ce phénomène a favorisé l'extension spatiale des

sols à hydromorphie partielle avec ou sans salure et par conséquent le remplacement des groupements végétaux humides par d'autres groupements moins exigeants en eau et plus tolérants au sel.

Limites et perspectives

Limites

Même si le réseau hydrométéorologique est relativement assez bien réparti dans l'espace, les mesures disponibles sont irrégulières avec des pas de temps variés. Seules les stations synoptiques à la périphérie de la région des Niayes donnent accès à l'ensemble des paramètres météorologiques avec une très haute précision. À l'intérieur de la région, les données uniquement pluviométriques, souvent lacunaires, ne donnent accès qu'à des cumuls mensuels.

Les lacunes détectées sur les séries de mesures piézométriques constituent également une limite à l'appréciation des effets de la variabilité climatique sur les ressources en eau. Lorsque ces mesures existent, leur résolution temporelle qui dépend de la date de prélèvement, n'en permet pas une analyse détaillée à l'échelle du jour ou de l'heure. Ainsi dans ce travail, le comportement de la nappe phréatique n'a pu être appréhendé au mieux qu'à une échelle mensuelle. Le niveau piézométrique mensuel déclaré n'est pas une moyenne journalière de l'ensemble des jours du mois considéré, mais celui d'un seul ou de quelques jours. De plus, la périodicité des mesures qui passent d'un relevé mensuel à un relevé tous les deux mois réduit davantage les possibilités d'exploitation surtout en terme d'analyse de la réponse hydrologique aux fluctuations pluviométriques à l'échelle quotidienne.

La forte hétérogénéité spatiale des données piézométriques représente aussi une limite majeure à l'étude des effets des changements climatiques sur les ressources en eau. Seules les études du BRGM (1962) et de l'OMS (1975) sont basées sur un réseau suffisamment dense de stations. Notre étude a montré la très forte hétérogénéité de la réponse du niveau piézométrique aux variations régionales des précipitations. Le

suivi actuel d'un nombre très restreint de piézomètres ne permet pas une représentation spatiale homogène de la morphologie de la nappe surtout dans le secteur Nord de la région des Niayes. Par ailleurs, l'accès difficile aux données de mesures de pompage agricole, urbain ou industriel sur plusieurs années n'a pas permis de dresser un bilan hydrologique en régime transitoire et ainsi de quantifier les impacts de telles activités sur le niveau de la nappe à l'échelle inter-annuelle.

Perspectives

Les résultats de cette étude montrent que depuis 50 ans l'évolution des précipitations est très variable et s'exprime par des périodes humides et sèches qui rendent encore hasardeuses les projections climatiques. Les perspectives de cette étude s'inscrivent dans ce que pourrait être la dynamique future du climat et ses conséquences sur les ressources hydrologiques dans la région des Niayes aux horizons des projections des scénarios climatiques de 2025 ou 2050. En Afrique, les prédictions issues des MCGs (Modèles de Circulation Générale) prévoient pour 2050 une augmentation des températures moyennes annuelles et une baisse des précipitations moyennes annuelles dans certaines sous-régions. Les scénarios climatiques des différents modèles globaux prévoient des diminutions de précipitations allant de 0.5 à 49 % pour l'horizon 2025 avec une moyenne se situant autour de 10-20 % pour l'horizon 2025. Plusieurs scénarios font aussi état d'une tendance générale à la baisse des écoulements et du niveau de recharge des nappes souterraines (IPCC, 2007).

La persistance du changement observé dans notre étude pourrait accentuer les conséquences négatives déjà entamées sur l'équilibre écologique des Niayes. En effet, le niveau de la nappe phréatique baisserait encore par rapport à sa position moyenne actuelle en raison d'un déficit de recharge dû à l'insuffisance des apports pluviométriques telle qu'annoncée par les différents scénarios des MCGs (IPCC, 2007). La tendance d'évolution des Niayes, observée au cours des cinquante dernières années, porte à croire qu'il est probable d'assister à une disparition totale de ces zones humides dans les prochaines décennies. Toutefois, l'absence de consensus

scientifique sur les projections climatiques et une hypothétique baisse des précipitations au Ssahel ne permet pas d'affirmer avec certitude l'état de santé des Niayes à l'horizon 2025 ou 2050.

Il est donc devenu fondamental d'anticiper le plus précisément possible les risques environnementaux associés à ces changements par la détermination du niveau de vulnérabilité des populations *via* celle des ressources naturelles desquelles dépendent les principales activités de production dans la région. Cette étude constitue donc une des premières approches dans la compréhension des interactions dynamiques entre le climat et les ressources en eau et pose les premiers jalons d'une réflexion sur les conséquences plausibles des changements climatiques futurs dans la région des Niayes dont l'importance tant sur le plan de la biodiversité que sur le plan économique n'est plus à démontrer.

RÉFÉRENCES

- Aguiar, L. A. A., 2002. Gestion des ressources naturelles et systèmes de production sur le littoral nord du Sénégal. *Presse universitaire*. Université Cheikh Anta Diop, Dakar (SEN), 96 p.
- Ali, A., Amani A. Diedhiou A. & Lebel T., 2005. « Rainfall estimation in the Sahel. Part 2: Evaluation of Raingauge Networks in the CILSS Countries and Objective Intercomparison of Rainfall Products». *J. of Applied Meteor.*, 44:1707-1722.
- Anhuf, D., Frankenberg P. & Neff C. 1992. «Evaluation of changes in the vegetation cover by photo-interpretation in Western Senegal - Cap Vert Region». Dans: *Bulletin de la Société d'étude des Sciences naturelles de Nimes et du Gard*, Nimes, 59: 27-36.
- Arlery, R., Grissolet H., & Guilmet B., 1973. *Climatologie : méthodes et pratiques*. 2e édit., Paris, Bruxelles, 434 p.
- Bah, A., 1987. «Towards the prediction of Sahelian rainfall from sea surface temperatures in the Gulf of Guinea ». *Tellus*, 39A: 39-48.
- BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière), 1962. Hydrologie de la région des Niayes, sous la direction de J. Putallaz, BRGM, Dak 62-A 12, 37 p.
- BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière), 1978. Étude hydrogéologique des calcaires lutétiens entre Bambey et Louga (2^e phase), sous la direction de Noël, rapport projet 248/CD/74/VI/A12, 78 DAX 02, 82 p.
- BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière), 1984. Projet d'exploitation des tourbes des Niayes. Rapport de synthèse géologique prospection générale et certification des réserves, sous la direction de J.J. Châteauneuf & G. Pezeril, BRGM, rapport de synthèse, 89 p.
- Bricquet, J.P., Bamba F., Mahé G., Touré M. & Olivry J-C., 1997. «Variabilité des ressources en eau de l'Afrique Atlantique», *PHI-V*, 6: 83-95.
- Charney, J. G., 1975. «The dynamics of deserts and drought». *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 101: 193-202.
- Citeau, J., Finaud L., Cammas J.P. & Demarq H., 1989. «Questions relative to ITCZ migrations over the tropical Atlantic ocean, sea surface temperature and Senegal river runoff». *Meteor. Atmos. Phys.*, 41: 181-190.
- Courel, M., Kandel R., & Rasool S., 1984. «Surface albedo and the Sahel drought». *Nature*, 307: 528-538.
- CSE, 2002, *Étude de la dynamique des unités d'occupation – utilisation des sols dans la zone d'intervention du Project d'Appui à l'Entreprenariat Paysan (PAEP)* ACDI, Centre de Suivi Écologique, Direction de l'Environnement, 57 pages.

- d'Orgeval, T., 2006. Impact du changement climatique sur le cycle de l'eau en Afrique de l'Ouest: Modélisation et incertitudes. Thèse de doctorat, Université Paris 6, Paris (FRA) 187 p.
- De Felice, P., 1992. «Climatologie dynamique de l'Afrique de l'Ouest». Chap. dans *Les Climats Subtropicaux et leur Évolution*, CNES (FRA), 153-169.
- Delecluse, P., Servain J., Levy C., Arpe K. & Bengtson L., 1994. «On the connection between the 1984 Atlantic warm event and the 1982-83 ENSO». *Tellus*, 46A: 448-464.
- Dhonneur, G., 1985. *Traité de météorologie tropicale. Application au cas particulier de l'Afrique Occidentale et Centrale*. Paris (FRA). Direction de la météorologie, 151 p.
- DPS (Direction de la Prévision de la Statistique), 1997. *Enquête sénégalaise auprès des ménages, de mars 1994 à mai 1995 : la consommation, les dépenses et les activités*, rapport de synthèse, CILSS-UE, DIAPER III (Sénégal), 178 p.
- Dryade, (Le Groupe) 1990. *Inventaire Biophysique de la région des Niayes - Synthèse, document de recherche dans le cadre du Project Conservation des Terroirs du Littoral*, Ministère du Développement Rural et de l'Hydraulique, Direction des eaux, Forêts, Chasses et de la Conservation des Sols, Rapport de recherche, République du Sénégal, 262 p.
- DTGC (Direction Générale des Travaux Cartographiques), 1996. Carte d'occupation du sol de Louga au 1/200000. Projet Paddel – Coopération Française (Institut Géographique National), 5^{ème} éditions: ND-28-XX LOUGA.
- Fall, S., Semazzi F. H. M., Dutta, D., Niyogi S., Anyah R. O., & Bowden J., 2006. «The spatiotemporal climate variability over Senegal and its relationship to global climate». *Int. J. of Climatology*, 26: 2057-2076.
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2003. Annuaire statistique de la FAO, 2003. En ligne, <http://www.fao.org/es/ess/fr/index_fr.asp>, consulté le 28 octobre 2005.
- Fohlen, D. & Lemordant Y., 1983. Étude hydrogéologique. Secteur Mboro-Lompoul, Sénégal. Compagnie des tourbières du Sénégal. Projet d'exploitation des tourbes. Bureau de Recherche Géologique et Minière (Paris). Rapport 83AGE013.
- Fontaine, B., 1996. «Global atmospheric response to specific linear combinations of the main SST modes. Part I: numerical experiments and preliminary results». *Ann. Geophys.*, 14: 1066-1077.
- Garnier, R., 1976. «L'Équateur météorologique». *La Météo*, VI série, 6: 113-136.
- Gnamien, B., 1990. Etude des Lignes de Grains Africaines par imagerie satellitaire, Thèse de l'Université de Paris 7 (FRA), 217p.

- IPCC, (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2007: *Climate Change 2007: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, 996 p.
- Hastenrath, S., de Castro L.C., & Aceituno P., 1987. «The Southern Oscillation in the Tropical Atlantic sector». *Beitr. Phys. Atmos.*, 60: 447-463.
- Houndénou, C. & Hernandez K., 1998. «Modification de la saison pluvieuse dans l'Atakora (1961-1990). Un exemple de sécheresse au nord-ouest du Bénin (Afrique occidentale)». *Sécheresse*, 9: 23-34.
- Hubert, P., Carbonnel J.P. & Chaouche A., 1989. «Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest». *J. of Hydrology*, 110: 349-367.
- Hulme, M., Doherty R., Ngara T., New M. & Lister D., 2001. «African climate change: 1900-2100». *Clim. Res.*, 17: 145-168.
- Huq, S., Rahman A., Konate M., Sokona Y. & Reid H., 2003. «Mainstreaming adaptation to climate change in least developed countries (LDCS)». *Russel. Press*, Nottingham, 38 p.
- Janicot, S., 1992. «Spatio-temporal variability of West African rainfall. Part II: Associated surface and air mass characteristics». *J. Climate*, 5: 499-511.
- Janicot, S., Polcher J., Trzaska S. & Pocard I., 1999. «Decadal scale variability of summer Sahel-ENSO teleconnection». *Climate Dyn.*, 15: 451-473.
- Kandel, R., & Courel M.F., 1984. «Le Sahel est-il responsable de sa sécheresse?». *La recherche*, 15: 1152-1154.
- Karyampudi, V.M., & Carlson T. N., 1988. «Analysis and numerical simulations of the Saharian air layer and its effect on easterly wave disturbances». *J. Atmos. Sci.* 45: 3102-3136.
- Lambergéon, D., Dziertara S. & Janicot S., 1981. «Comportement du champ du vent sur l'Afrique occidentale». *La Météorologie*, VI^{ème} série 25: 69-82.
- Le Barbé, L. & Lebel T., 1997. «Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950–1990». *J. Hydrol.*, 188: 43-73.
- Le Barbé, L., Lebel T. & Tapsoba D., 2002. «Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990». *J. Climate*, 15: 187-202.
- Le Borgne, J., 1988. «La dégradation actuelle du climat en Afrique, entre Sahara et Équateur». Dans: *La dégradation des paysages en Afrique de l'Ouest : points de vue et perspectives de recherches*, sous la dir. de Jean-François Richard (ed.) 17-35, Dakar (SEN): Pr. Univ. de Dakar .

- Le Lay, M. & Galle S., 2005. «Seasonal cycle and interannual variability of rainfall at hydrological scales. The West African monsoon in a Sudanese climate». *Hydro. Sci. Journal*, 50: 509-524.
- Lebel, T., Diedhiou A. & Laurent H., 2003. «Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at the hydrological scales». *J. Geophys. Res.* 108 (D8). 8389 doi:10.1029.
- Leroux, M., 1979. Le climat du Sénégal. Dans *Atlas du Sénégal*, P. Péliissier (éd.), Collection Atlas Jeune Afrique, Paris, 12-17.
- Leroux, M., 1996. *La dynamique du temps et du climat*. Paris : Masson, 310 p.
- Leroux, M., 2001. *The meteorology and climate of Tropical Africa*. Chichester (UK): Springer-Praxis, 548 p.
- Lézine, A.-M., 1987. Paléoenvironnements végétaux d'Afrique nord-tropicale occidentale depuis 12000 B.P : Analyse pollinique de séries sédimentaires continentales Sénégal-Mauritanie. Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle, *Université de Luminy*, 151 p.
- Mahé, G., & Olivry J.-C. 1999. Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Serie Ila, 328: 621-626.
- Mahé, G., 1993. «*Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique: étude des éléments du bilan hydrique et variabilité inter-annuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes*». Paris (FRA), Coll. ORSTOM, 439 p.
- Mathon, V., & Laurent H., 2001. «Life cycle of the Sahelian mesoscale convective cloud systems». *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127: 377-406.
- Messenger, C, Gallée H. & Brasseur O. 2004. Precipitation sensitivity to regional SST in a regional climate simulation during the West African monsoon for two dry years. *Climate Dynamics*., 22: 249-266.
- Michel, P., 1973. *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie: étude géomorphologique*. Mémoires ORSTOM (FRA). 752 p.
- Moral, P., 1966. «Le climat du Sénégal». *Rev. Géogr. de l'Afrique Occidentale*, Dakar (SEN) 1-2, 49-70 & 3, 4-35.
- Moron, V. 1994. «Trend, decadal and interannual variability in annual rainfall of subequatorial and tropical North Africa (1900-1994) ». *Int. J. of Climatology* 17: 785-805.
- Neil, H., Leduc C. & Dieulin C. 2005. «Caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle des précipitations annuelles sur le bassin du Lac Tchad au cours du 20^{ème} siècle». *Hydrol. Sci. J.*, 50: 223-243.

- N'tchayi Mbourou, G., Bertrand J. & Nicholson S. E., 1997. «The diurnal and seasonal cycle of wind-borne dust over Africa north of equator». *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 36: 868-882.
- Nicholson, S. E., 2001. «Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries». *Climate Research*, 17: 123-144.
- Nicholson, S. E., & Kim J., 1997. «The relationship of the El Niño-Southern Oscillation to African rainfall». *Int. J. Climatol.*, 17: 117-135.
- Nicholson, S. E., Tucker C. J., & Ba M. B., 1998. «Desertification, drought and surface vegetation: an example from the West African Sahel». *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79: 815-829.
- Nicholson, S., Some B., & Kone B. 2000. An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy season of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña years. *J. Climate*, 13: 2628-2640.
- Norton, C. C., Mosher F. R., & Hinton B., 1979. «An investigation of surface albedo variations during the recent Sahel drought». *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 18: 1252-1262.
- Olivry, J.-C., 1994. «De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies». *Rev. de geogr. Alpine*, 12: 101-108.
- OMS (Organisation Mondiale de la Santé), 1975. Étude sur modèles mathématiques de la Nappe des Sables Quaternaires et calcaires lutétiens entre Tivaouane et Saint-Louis du Sénégal. Rapport BRGM, 75/SGN/049/AME, par Sauty, J. P., 100p.
- Paturel, J. E., Servat E., Kouame B., Lubes H., Masson J. M., Boyer J. F., Travaglio M. & Marieu M., 1997. «Variabilité pluviométrique en Afrique humide le long du Golfe de Guinée, Approche régionale intégrée». *PHI-V*, 16: 1-31.
- Pélissier, P., 1980. «L'arbre dans les paysages agraires de l'Afrique Noire». *Coll. ORSTOM, Série Sc. Hum. (FRA)*, 17: 131-136.
- Pereira-Barreto, S., 1962. Étude pédologique des « Niayes » méridionales (entre Kayar et Mboro), rapport général CRP, Hann, Dakar (Sénégal), ORSTOM, 120 p.
- Pernel, F. & Gageonnet M., 1992. Réévaluation de la ressource en eau du littoral Nord: synthèse des données modélisation hydrodynamique et simulations prévisionnelles. BRGM, R35 030, 52 p.
- Pinker, R.T., Idemudia G. & Aro T., 1994. «Characteristic aerosol optical depths during the Harmattan season in sub-Saharan Africa». *J. Geophys. Res.*, 21: 685-688.

- Prospero, J. M., 1996. «The atmospheric transport of particle to the ocean». *SCOPE Report 57*, Chichester (UK), 19-20.
- Raynal, A., 1963. «Flore et végétation des environs de Kayar (Sénégal) de la côte au Lac Tanma». *Annales fac. sci. Univ. de Dakar*, Sc. Végét. 2: 121-131.
- Ropelewsky, C. F. & Halpert M. S. 1989. «Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation». *J. Climate*, 2: 268-284.
- Rowell, D. P., 2003. «The Impact of Mediterranean SSTs on the Sahelian rainfall season». *J. Climate*, 16: 849-862.
- Sall, M. M. 1982. Dynamique et morphogenèses actuelles au Sénégal occidental. Thèse de doct. d'État es lettres. Université Louis Pasteur Strasbourg, 504 p.
- Semazzi, F. H. & Sun L., 1997. «The role of orography in determining the Sahelian climate». *Int. J. Climatol.*, 17: 581-596.
- SGPRE (Service de la Gestion et de la Protection des Ressources en Eau : 2001, 2002, 2003). Suivi piézométrique des nappes de la presqu'île du cap vert et du littoral Nord. Rapport de synthèse, *Ministère de l'hydraulique* (SEN), n° 12, 22 p.
- Sultan, B., & Janicot S. 2003. «The West African monsoon dynamics Part 2: The "preonset" and "onset" of summer monsoon». *J. Climate*, 16: 3407-3427.
- Sultan, B. & Janicot S., 2006. «Climate and agriculture in West Africa», *Geoconnexion Int. Mag.*, 5: 50-51.
- Tall, S. & Fall A. S., 2001. «Cités horticoles en sursis? L'agriculture urbaine dans les grandes Niayes au Sénégal». *Centre de Rech. pour le Dév. Internat. (CRDI)*. Ottawa (Canada), 138 p.
- Tapsoba, D., 1997. Caractérisation événementielle des régimes pluviométriques Ouest Africains et de leur récent changement. Thèse de doctorat, Paris (FRA), Université Paris XI, 145 p.
- Tarhule, A. & Woo M-K., 1997. «Towards an interpretation of historical droughts in northern Nigeria», *Climatic Change*, 37: 601-616.
- Tengen, I., Lacis A. A. & Fung I., 1996. «The influence of mineral aerosols from disturbed soils on the global radiation budget». *Nature*, 380: 419-422
- Trochain, J., 1940. *Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal*. Paris, Larose, 433 p.
- Trzaska, S., Moron V. & Bjerknes J., 1996a. «El Niño, Study based on analysis of ocean surface temperatures 1935-57». *Bull. Inter-am. Tropic. Tuna Comm.* 5: 219-303.

- Trzaska, S., Moron V. & Fontaine B., 1996b. «Global atmospheric response to specific linear combinations of the main SST modes. Part I: numerical experiments and preliminary results», *Ann. Geophysicae*, 14: 1066-1077.
- Vischel, T. 2006. Impact de la variabilité pluviométrique de Mésos-échelle sur la réponse des systèmes hydrologiques sahéliens: Modélisation, Simulation et désagrégation, Thèse doctorat, Université Joseph Fourier (FRA), 257 p.
- Ward, M. N., 1992. «Provisionally corrected surface wind data, worldwide ocean-atmosphere surface fields, and Sahelian rainfall variability». *J. Climate*, 5: 454-475.
- Wolter, K., 1989. «Modes of tropical circulation, southern oscillation and rainfall pattern anomaly». *J. Climate*, 2: 149-172.
- Xue, Y. & Shukla J., 1993. «The influence of land surface properties on Sahel climate. Part I: Desertification». *J. Climate*, 6: 2232-2245.
- Xue, Y. 1997. «Biosphere feedback on regional climate in tropical north Africa». *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 123: 1483-1515.
- Zheng, X. & Eltahir E. A. B. 1998. «The role of vegetation in the dynamics of West African monsoons». *J. Climate*, 11: 2078-2096.
- Zheng, X., Eltahir E. A. B., & Emanuel K. A. 1998. «A mechanism relating tropical Atlantic spring sea surface temperature and West African rainfall». *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125: 1129-1163.

ANNEXE

Annexe 1

Méthodologie de calcul des indices de variabilité des précipitations

Tous les indices retenus ont été traduits en formule mathématique et programmés en Matlab. Afin de simplifier la compréhension, seules les formules mathématiques de ces indices sont présentées ci-dessous :

- *Jours avec précipitations (Wet days) (% jours)*

P_{ij} étant la quantité de précipitations totales pour le jour i durant la période j . Cet indice est rapporté en pourcentage pour éviter d'avoir des variations dues aux absents. Les jours avec précipitations pour la période j sont définis par:

$$Pr\ cp1_j = 100(\sum_{i=1}^I (P_{ij} \geq 1mm)) / njours$$

- *Indice d'intensité de précipitation (SDII) (mm/jours avec précip)*

P_{wj} étant la quantité de précipitations quotidiennes totales pour les jours avec précipitations w ($P \geq 1$ mm) durant la période j . L'intensité des précipitations est définie par:

$$SDII_j = \sum_{w=1}^W P_{wj} / W$$

- *Maximum de jours secs consécutifs (CDD) (jours)*

P_{ij} étant la quantité de précipitations totales pour le jour i durant la période j . Le nombre maximum de jours secs consécutifs est défini par :

$$CDD_j = \max(P_{ijcons} \leq 1mm)$$

- *Maximum de précipitations totales durant 3 jours consécutifs (R3d) (mm)*

P_{3j} étant la quantité de précipitations totales tous les 3 jours durant la période j. Le maximum de précipitations durant 3 jours est défini par:

$$R3d_j = \max(P_{3j})$$

- *Pourcentage de nombre de jours de précipitation > 90^e percentile de précipitation quotidienne (R90Nc) (days)*

P_{wj} étant la quantité de précipitations quotidiennes totales pour les jours avec précipitations w ($P \geq 1$ mm) durant la période j et P_{wn90} , le 90th percentile de précipitation des jours humides sur la même période. Le pourcentage de nombre de jours de précipitation > 90th percentile se définit par :

$$P_{wj} > P_{wn90}$$

- *Précipitation moyenne (mm/jour)*

P_{ij} étant la précipitation quotidienne pour le jour i de la période j et I le nombre total de jour pour cette même période. La précipitation moyenne est définie par :

$$PrecTOT_j = \frac{\sum_{w=1}^W P_{ij}}{I}$$

Webographie

http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/deis/Diagnostic_tool.pdf

http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/deis/Core_Indices.pdf

Annexe 2

Calcul des données de pompage pour l'année 1974

Pour calculer la quantité d'eau extraite pour l'AEP, l'agriculture et l'industrie, l'étude s'est basée sur une compilation de données de mesures de pompage tirées des études de Gladima (1992) et de Faye (1995).

Les sites de pompages ainsi que les quantités extraites annuellement (débit) sont répertoriés dans les tableaux ci-dessous (page suivante) .

Rangée	Colonne	Débit	Localité
27	27	0	ndiengue diao
28	14	-610	thiolom fall
25	14	-270	ndiayene bangoye (kelle
15	21	0	taiba seye
16	15	-360	mbediene
19	22	0	war cisse
7	21	-480	kebe ndeukta (nguidilé)
13	22	-410	ngagnakh dieng (niomré]
14	8	0	ndiam fall
7	3	-560	ndiambou fall (léona)
14	10	0	sam ndiaye
10	14	-300	nguene sarr
3	13	-584	sakal
46	43	-380	ndankh sene
49	36	-390	gade escale
45	39	-540	ndindy
49	39	-250	k.ngalgou
52	40	-460	taiba moutoupha
61	43	-620	ngohé (ndoulo)
66	41	-450	patar
56	3	-450	NIAYES 1
56	4	-450	NIAYES 1
55	3	-450	NIAYES 1
55	4	-450	NIAYES 1
54	3	-450	NIAYES 1
54	4	-450	NIAYES 1
54	5	-450	NIAYES 1
54	6	-450	NIAYES 1
54	7	-450	NIAYES 1
54	8	-450	NIAYES 1
53	3	-450	NIAYES 1
53	4	-450	NIAYES 1
53	5	-450	NIAYES 1
53	6	-450	NIAYES 1
53	7	-450	NIAYES 1
53	8	-450	NIAYES 1
52	3	-450	NIAYES 1
52	4	-450	NIAYES 1
51	3	-450	NIAYES 1
51	4	-450	NIAYES 1
50	3	-450	NIAYES 1
50	4	-450	NIAYES 1
49	3	-450	NIAYES 1
49	4	-450	NIAYES 1
48	3	-450	NIAYES 1
48	4	-450	NIAYES 1
47	3	-450	NIAYES 1
47	4	-450	NIAYES 1
46	3	-450	NIAYES 1
46	4	-450	NIAYES 1
45	3	-450	NIAYES 1
45	4	-450	NIAYES 1
44	3	-450	NIAYES 2
44	4	-450	NIAYES 2
43	3	-450	NIAYES 2
43	4	-450	NIAYES 2
42	3	-450	NIAYES 2
42	4	-450	NIAYES 2
41	3	-450	NIAYES 2
41	4	-450	NIAYES 2
40	3	-450	NIAYES 2
40	4	-450	NIAYES 2
39	3	-450	NIAYES 3
39	4	-450	NIAYES 3
38	3	-450	NIAYES 3
38	4	-450	NIAYES 3

37	3	-450	NIAYES 3
37	4	-450	NIAYES 3
36	3	-450	NIAYES 3
36	4	-450	NIAYES 3
35	3	-450	NIAYES 3
35	4	-450	NIAYES 3
34	3	-450	NIAYES 3
34	4	-450	NIAYES 3
33	3	-450	NIAYES 3
33	4	-450	NIAYES 3
32	3	-450	NIAYES 3
32	4	-450	NIAYES 3
31	3	-450	NIAYES 4
31	4	-450	NIAYES 4
30	2	-450	NIAYES 4
30	3	-450	NIAYES 4
29	2	-450	NIAYES 4
29	3	-450	NIAYES 4
28	2	-450	NIAYES 4
28	3	-450	NIAYES 4
27	2	-450	NIAYES 4
27	3	-450	NIAYES 4
26	2	-450	NIAYES 4
26	3	-450	NIAYES 4
25	2	-450	NIAYES 4
25	3	-450	NIAYES 4
24	2	-450	NIAYES 4
24	3	-450	NIAYES 4
23	2	-450	NIAYES 4
23	3	-450	NIAYES 4
22	2	-450	NIAYES 5
22	3	-450	NIAYES 5
21	2	-450	NIAYES 5
21	3	-450	NIAYES 5
20	2	-450	NIAYES 5
20	3	-450	NIAYES 5
19	2	-450	NIAYES 5
18	2	-450	NIAYES 5
17	2	-450	NIAYES 5
16	2	-450	NIAYES 6
15	2	-450	NIAYES 6
54	10	-620	TAIBA
54	11	-620	TAIBA
53	10	-620	TAIBA
53	11	-620	TAIBA

44	18	-20378	kelle
30	18	-9840	kabemer
12	19	-4100	louga (dilly mbaye[980]+SENPA[1
61	38	-615	banbey [ANP+CNRA(480)]
8	14	0	ndiock sall
62	27	-400	khonbole
47	14	-5855	tourda touna
53	10	-216	bilan taiba
53	11	-216	bilan taiba
54	10	-216	bilan taiba
54	11	-216	bilan taiba
56	4	0	nbore khondio
55	8	-860	daron khoudoss
46	6	-300	daron ndoye
54	5	-1400	nbore ouolof
45	14	0	daron mbaye ico 2
53	14	-875	mediane
47	17	0	sine tharick
50	19	-730	koul
48	23	0	diokoul tahi
43	17	0	kelle 1,1,4
45	21	-980	marina dakhar
38	28	0	ngnick
31	27	-660	pekouss
35	29	-310	nbayenne
31	27	0	ndiouki
39	15	-750	ngendiauf
36	22	0	thietour
42	31	-400	niakhene
41	36	-560	thilakha
85	14	-610	charif lo
55	10	-640	pire goudye
64	29	0	kaba diack
68	30	0	mbouane
67	29	-680	ndicyons mirakh
66	10	0	bangadji
64	22	-530	k.yaba diop (thienaba)
63	25	-1320	tourda toul
47	33	-430	dinguiraye
52	29	-600	kaba garaye
58	20	-730	k.samba kane
59	31	-900	lambaye
61	34	-700	ngoyon
52	10	-470	quwarc
61	27	-750	réfane
63	33	-690	ndangulaa
67	31	-480	ndondol
65	27	-945	ngobé
61	41	0	keur saer
45	38	0	koki ndiaguene
58	42	-730	thiakhar
32	15	-390	bandagane ouolof
19	12	0	nanthiou mbouguene
33	14	-170	diokoul ndiawrigne
33	12	0	nguer nguer
39	11	-290	kab gaye
37	17	0	ndande
38	16	-400	palmeo
34	11	-350	tourda
23	21	0	nhissie dia
25	20	-370	tiékene neck
22	20	-270	aguisbe penlh

30	31	-460	battai (sagatta)
32	31	0	kantar
29	19	0	kours abelgor
29	22	0	nata fall
27	27	0	ndiengue diao
28	14	-610	thiolom fall
25	14	-170	ndiayene bangoye (kelle guay
15	21	0	taiba seye
16	15	-360	mbodiene
19	22	0	war classe
7	21	-480	kebe ndeukta (nguidillé)
13	22	-410	ngagnakh dieng (niomré lo)
14	8	0	ndiam fall
7	3	-560	ndiambou fall (léona)
14	10	0	sas ndiaye
10	14	-300	nguene sarr
3	13	-584	sakel
46	43	-380	ndankh sene
49	36	-390	gade escale
45	39	-540	ndindy
49	39	-250	k.ngalgon
52	40	-460	taiba moutoupha
61	43	-620	ngohé (ndonin)
66	41	-450	patar
56	3	-450	NIAYES 1
56	4	-450	NIAYES 1
55	3	-450	NIAYES 1
55	4	-450	NIAYES 1
54	3	-450	NIAYES 1
54	4	-450	NIAYES 1
54	5	-450	NIAYES 1
54	6	-450	NIAYES 1
54	7	-450	NIAYES 1
54	8	-450	NIAYES 1
53	3	-450	NIAYES 1
53	4	-450	NIAYES 1
53	5	-450	NIAYES 1
53	6	-450	NIAYES 1
53	7	-450	NIAYES 1
53	8	-450	NIAYES 1
52	3	-450	NIAYES 1
52	4	-450	NIAYES 1
51	3	-450	NIAYES 1
51	4	-450	NIAYES 1
50	3	-450	NIAYES 1
50	4	-450	NIAYES 1
49	3	-450	NIAYES 1
49	4	-450	NIAYES 1
48	3	-450	NIAYES 1
48	4	-450	NIAYES 1
47	3	-450	NIAYES 1
47	4	-450	NIAYES 1
46	3	-450	NIAYES 1
46	4	-450	NIAYES 1
45	3	-450	NIAYES 1
45	4	-450	NIAYES 1
44	3	-450	NIAYES 2
44	4	-450	NIAYES 2
43	3	-450	NIAYES 2
43	4	-450	NIAYES 2
42	3	-450	NIAYES 2
42	4	-450	NIAYES 2
41	3	-450	NIAYES 2
41	4	-450	NIAYES 2
40	3	-450	NIAYES 2
40	4	-450	NIAYES 2

Annexe 3

Interpolation des données piézométriques

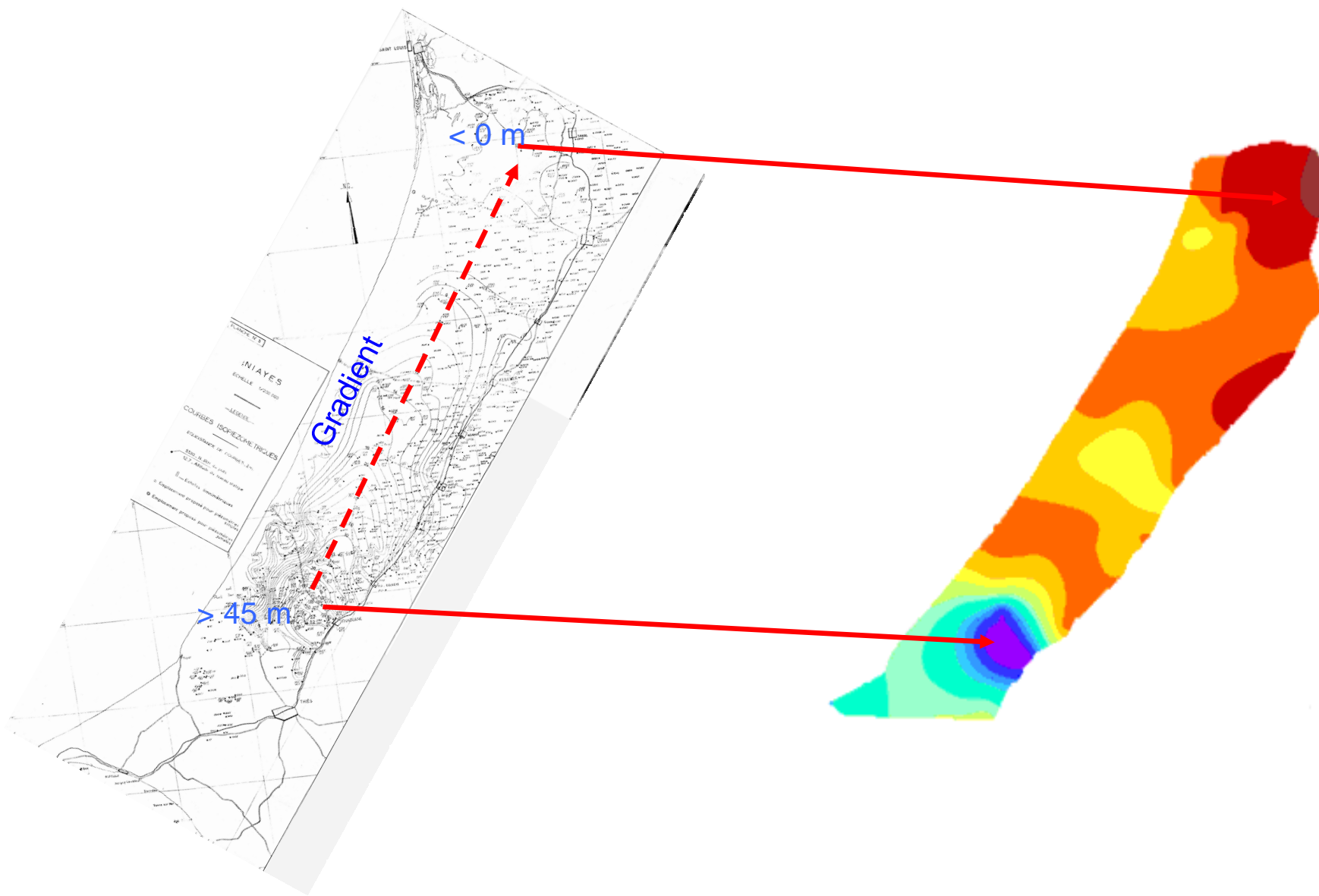
Dans la présente thèse, la méthode d'interpolation utilisée est le krigeage qui estime les valeurs aux points non échantillonnés par une combinaison des données tenant compte de la distance entre les points de mesure, des valeurs et de leurs corrélations (Matheron 1963; Dubrule, 1984; Isaaks et Srivastava, 1989; Chilès et Delfiner 1999). Elle est basée sur l'estimation d'une fonction $F(\mathbf{x})$, où $\mathbf{x} = (x,y)$, en un point \mathbf{x}_p du plan à partir de valeurs connues de F en un certain nombre, m , de points environnants \mathbf{x}_i :

$$F(\mathbf{x}_p) = \sum_{i=1}^m W_i \cdot F(\mathbf{x}_i) \quad (1)$$

Le problème consiste à déterminer la pondération, i.e. les W_i , de chacun des points environnants. Il existe plusieurs façons de choisir ces poids. Les deux méthodes les plus connues sont l'interpolation linéaire (en fonction de l'inverse de la distance) et la méthode des splines cubiques (ajustement de polynômes cubiques). La méthode d'interpolation retenue dans cette étude est le Krigeage ordinaire qui choisit plutôt les poids à partir du degré de similarité entre les valeurs de F , i.e. à partir de la covariance entre les points en fonction de la distance entre ces points. La seule condition indispensable pour utiliser le Krigeage ordinaire est que la moyenne et la variance de la fonction F soient stationnaires, c'est-à-dire qu'elles ne dépendent pas de la position des points, seulement de la distance entre les points. Ce qui n'est pas le cas pour la piézométrie de la région des Niayes.

Afin de valider l'exactitude des cartes piézométriques et de vérifier l'exactitude de nos paramètres d'interpolation, une comparaison est faite entre les cartes réalisées à partir des séries de mesures collectées et celles déjà existantes réalisées par d'autres études (Puttalaz, 1962; BRGM, 1963; 1974). Cette opération portait surtout sur l'identification des zones de bombements piézométriques et de zones d'affaissement d'une part, et des courbes isopièzes d'autre part. Cette démarche a permis de vérifier l'exactitude de nos paramètres d'interpolation.

- 1) Krige, D.G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. 1951. J. of Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa, 52, 119-139.



Carte piézométrique de Putallaz 1958

Carte piézométrique réalisée à partir des mesures interpolées

Schéma 1 : Comparaison des cartes piézométriques et validation des paramètres d'interpolation

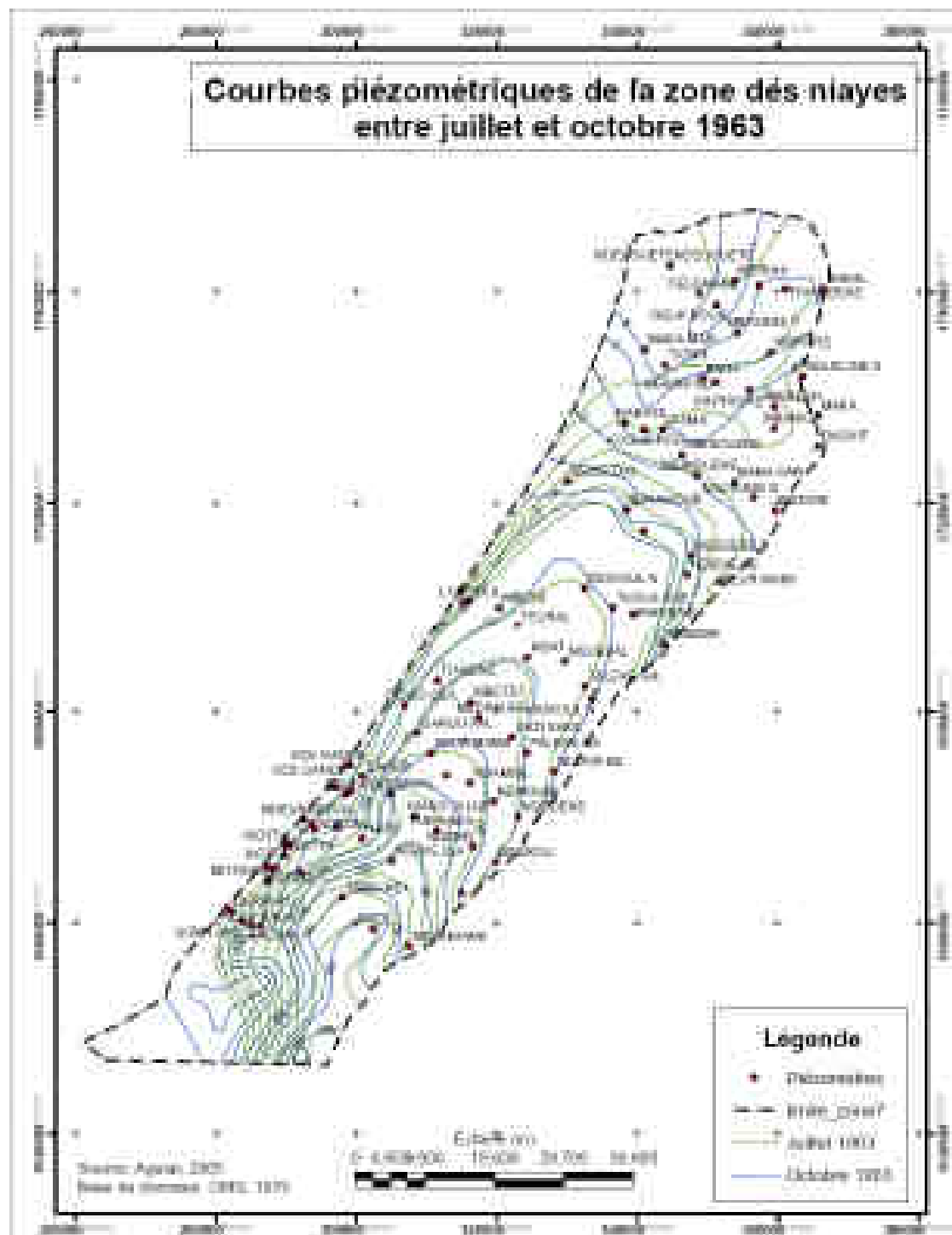


Schéma 2: Superposition des cartes numérisées: juillet et octobre 1963

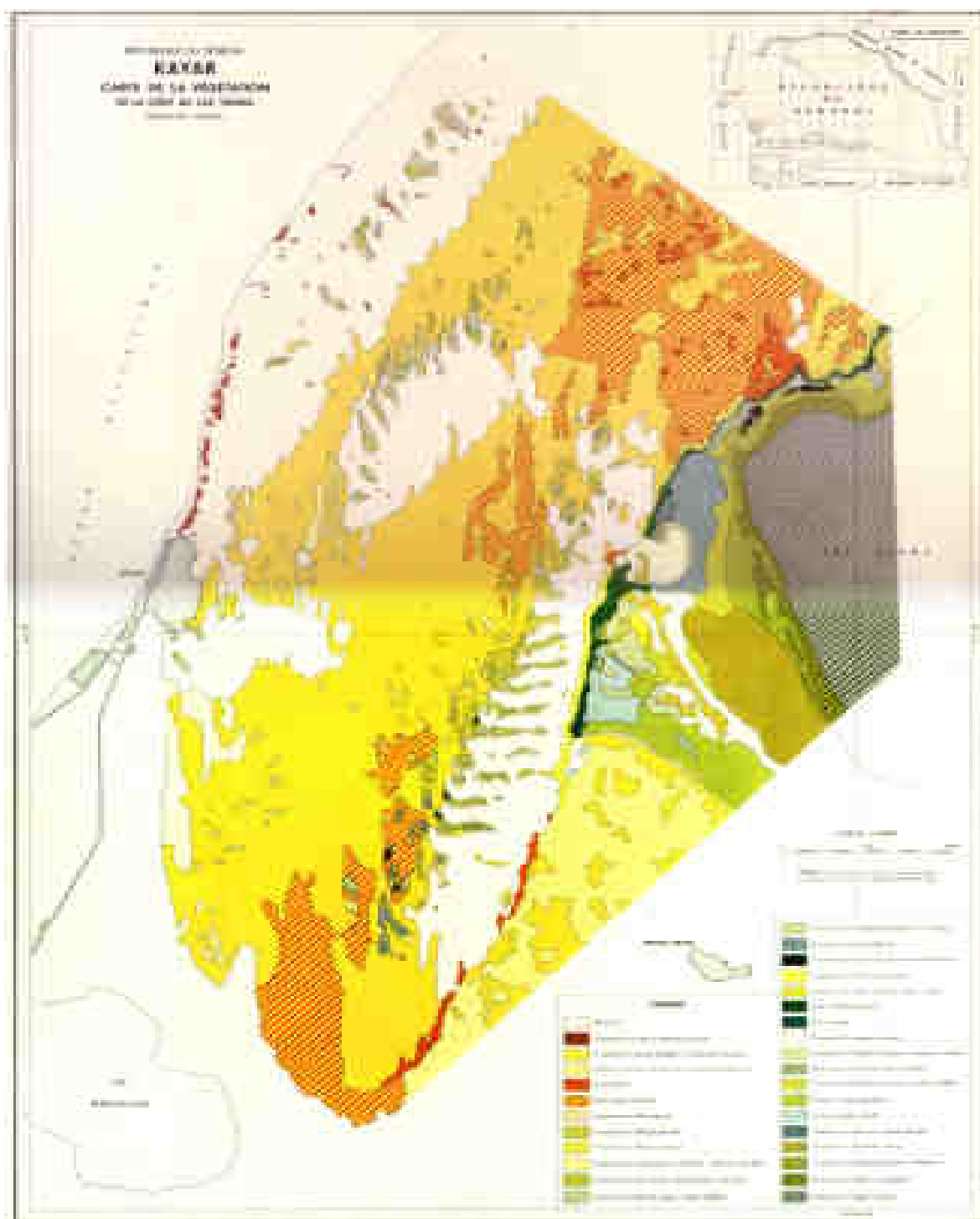
Annexe 4

Photographie aérienne de Kayar en 1954 (BRGM, 1962)



Annexe 5

Carte de la végétation de Kayar (Raynal, 1963)



Annexe 6

Photographie aérienne de Mboro en 1954 (BRGM, 1962)



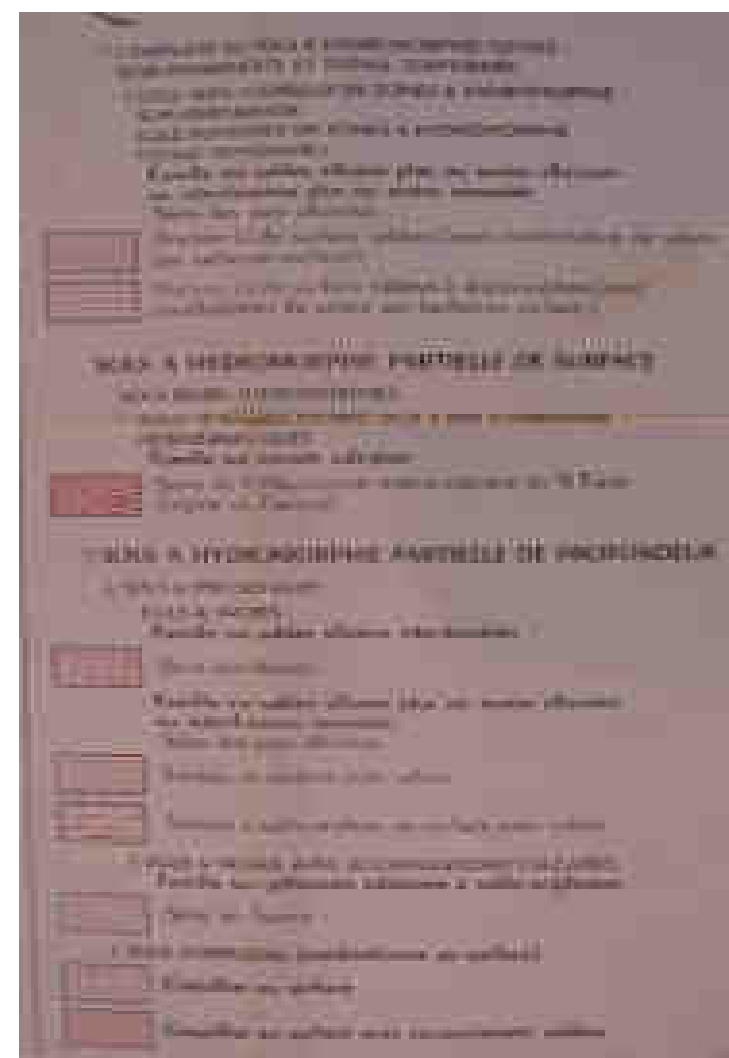
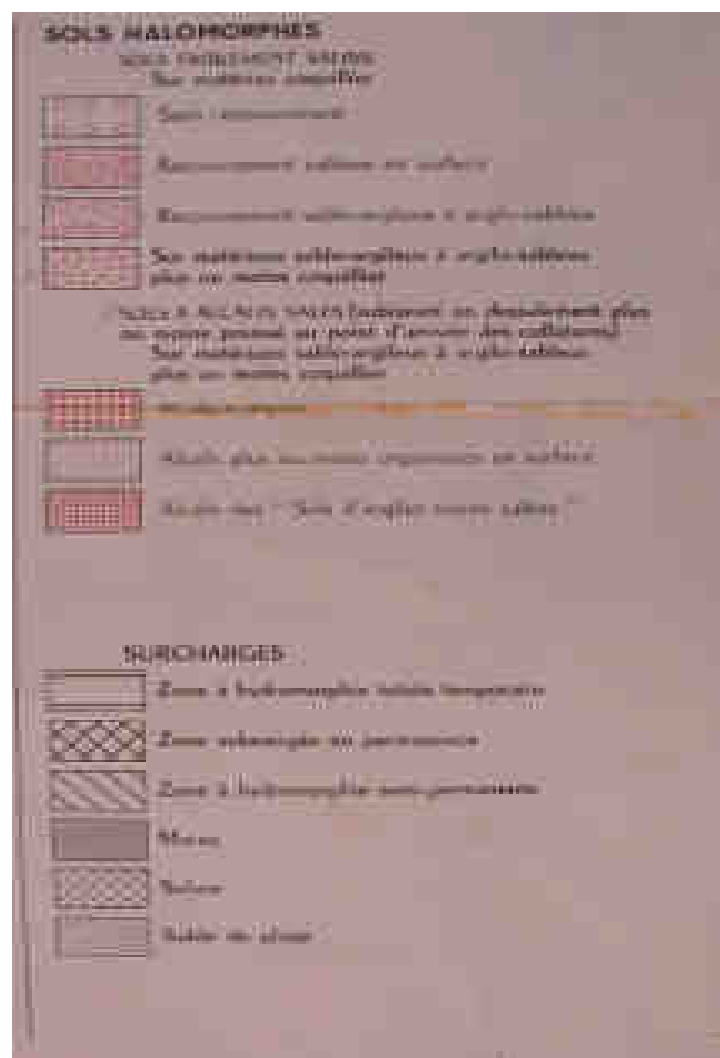
Annexe 7

Carte des sols de Mboro (Pereira-Barreto, 1962)



Légende de la carte des sols de Mboro (Pereira-Barreto, 1962)

Légende de la carte des sols de Mboro (Pereira-Barreto, 1962) (Suite)



Annexe 8

Base de données

(contacter l'auteur : lazaraguiar@yahoo.fr)