

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/337404376>

Outils d'évaluation des niveaux d'eau souterraine dans un contexte de variabilité pluviométrique et de hausse des pompages : cas des Niayes (littoral nord Sénégalais).

Article · November 2019

CITATIONS

0

READS

77

2 authors:



Cheikh Faye

Ziguinchor University, Ziguinchor

57 PUBLICATIONS 56 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Djibrirou Daouda Ba

Laboratoire Leïdi Dynamique des territoires et développement

7 PUBLICATIONS 5 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Projet de recherche [View project](#)



Projet de recherche [View project](#)

À H Ñ H Ñ



REVUE DE GEOGRAPHIE DU LARDYMES

**Laboratoire de Recherche sur la Dynamique
des Milieux et des Sociétés**

Faculté des Sciences de l'Homme et de la
Société

Université de Lomé

Sommaire

Narcisse ASSI-KAUDJHIS

Le conseil municipal face au défi de l'équipement socio-éducatif en milieu urbain à Gagnoa (Côte d'Ivoire) p. 1-14

Olivier Kokou OGNINGAMAL, Koudzo SOKEMAWU

Les banlieues de Lomé : de nouveaux espaces de prédilection d'insécurité p. 15-30

Tolla Koffi ALLOU, Yao Silvère KONAN

L'essor du concassage manuel de gravier dans la ville de Man (Côte d'Ivoire) dans un contexte post-crise p. 31-42

Cheikh FAYE, Djibrirou Daouda BA, Adama Cheikh DIOUF

Outils d'évaluation des niveaux d'eau souterraine dans un contexte de variabilité pluviométrique et de hausse des pompages : cas des Niayes (littoral nord Sénégalais) p. 43-55

Yandi MOUNDAKOM, Mbaïndogoum DJEBE, Beltolna MBAINDOH

Contribution à la connaissance du rôle du lac Tchad dans la dynamique agropastorale des Arabes Assala p. 56-64

Kouassi Guillaume N'GUESSAN

Compétition hévéaculture-cultures vivrières et sécurité alimentaire chez les producteurs d'hévéa à Mayo dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire p. 65-77

Adama TOURE, Hermann M. Kouakou KANGA, Paul Eric Dhede KOUAME, Joseph P. ASSI-KAUDJHIS

Résilience des exploitants rizicoles face à la dégradation des facteurs pédoclimatiques dans la région du Poro au nord de la Côte d'Ivoire p. 78-93

Céline Sylvie Zohonon SERI épouse YAPI, Joseph Eby BOSSON

Déterminants du choix des moyens de mobilité des commerçantes de vivriers du marché Cocovico de Cocody-Angré (Côte d'Ivoire) p. 94-108

Charles Sylvain Yao KAKOU

La communauté des pêcheurs béninois de l'Île Boulay face aux contraintes liées à leur métier ... p. 109-120

Carine Natacha KOUAME, Golly Mathieu KAKOU, Koffi ATTA

Bonoua : du village à la ville p. 121-133

Koba Yaovi AFOUDJI, Komi Sélom KLASSOU, Ernest AMOUSSOU

Impacts de la dynamique du méandre de Togbodji-Gatiglo sur les aménagements hydroagricoles d'Agomé-Glozou et urbains à Athiémé p. 134-149

Yembi KIENDREBEOGO, Joseph OLOUKOI, Ernest AMOUSSOU, Ismaïla TOKO IMOROU

Risque de sédimentation du barrage hydroélectrique de Kompienga, Burkina Faso p. 150-166

Romain GOUATAINE SEINGUE, Frédéric REOUNODJI

Conséquences de la variabilité pluviométrique sur l'écoulement hydrique dans le département du Lac Iro, Tchad p. 167-177

Hervé A. KOMBIENI

Importance socio-économique du parc archéologique d'Agongointo dans le développement de l'arrondissement d'Agongointo (Commune de Bohicon, Bénin) p. 178-192

Jean-Aimé Yao ASSUE, Léa Tehoua KOUADIO, Anne Marilyse KOUADIO

Pauvreté et stratégies d'adaptation des femmes de la ville de Bouaké (Côte d'Ivoire) p. 193-204

Achille Roger TAPE, Zady Edouard ZOGBO, Konan KOUASSI

Femmes et activités rizicole en côte d'ivoire : approche comparatiste entre les sous-préfectures d'Issia et de Yamoussoukro p. 205-219

Kadidiatou COULIBALY

Analyse démographique et socio-économique de l'émigration dans le cercle de Diéma, Région de Kayes au Mali p. 220-229

Isaac Yao KOUAKOU, Bertin Gahié KADET, Lazare Koffi ATTA

L'impact de l'exploitation d'une mine d'or sur le développement de la ville de Hiré dans le Sud-Ouest forestier ivoirien p. 230-242

Lyn Randy ESSONO MBEGHA, Marjolaine OKANGA-GUAY, Jean-Bernard MOMBO, Gilbert DAVID

Evaluation des changements de l'occupation du sol de la commune d'Owendo (Gabon) par imagerie satellitaire Landsat de 1990 à 2018 p. 243-264

Adéothy ADEGBINNI, Moïse CHABI, Parfait Cocou BLALOGOE

Diversité et participation des habitants de la région d'Adjarra et d'Avrankou (République du Bénin) aux opérations de lotissement p. 265-280

Issa SORY

Planification urbaine et logiques d'acteurs : vers la recomposition des rapports centre-périphérie p. 281-291

Mariam Myriam DAMA BALIMA, Mahamadi OUEDRAOGO, Soumabéré COULIBALY, Didier BALMA

Les variétés améliorées de niébé pour une meilleure intégration de l'agriculture burkinabè aux marchés intérieurs et extérieurs p. 292-304

Jules EBAH, Paul Kouassi ANOH

Pollution automobile dans la ville d'Abidjan : approche géographique d'un problème environnemental crucial p. 305-320

Nicaise TCHETCHE, Kouakou Abraham KOUADIO, Téré GOGBE

Développement du potentiel touristique dans la ville balnéaire de San Pedro (Côte d'Ivoire) p. 321-331

**OUTILS D'ÉVALUATION DES
NIVEAUX D'EAU SOUTERRAINE DANS
UN CONTEXTE DE VARIABILITÉ
PLUVIOMÉTRIQUE ET DE HAUSSE
DES POMPAGES : CAS DES NIAYES
(LITTORAL NORD SÉNÉGALAIS)**

Cheikh FAYE
Maitre-Assistant

*Département de Géographie, U.F.R. Sciences et
Technologies, UASZ
Laboratoire de Géomatique et d'Environnement,
Ziguinchor (Sénégal)
E-mail : cheikh.faye@univ-zig.sn*

Djibrirou Daouda BA
Docteur en géographie

*Chercheur associé au Laboratoire Leïdi «Dynamiques
des territoires et développement
Université Gaston Berger de Saint-Louis, Sénégal
E-mail : djibrirouba@yahoo.fr*

Adama Cheikh DIOUF
Docteur en géographie

*Chercheur associé au Laboratoire Leïdi «Dynamiques
des territoires et développement
Université Gaston Berger de Saint-Louis, Sénégal
E-mail : diouf.adama-cheikh@ugb.edu.sn*

Résumé : Le littoral nord sénégalais dispose d'une Nappe des Sables Quaternaires (NSQ) fortement utilisée pour l'irrigation agricole. Dans cette zone, l'agriculture irriguée connaît une croissance constante depuis plusieurs années. A partir des années 1970, les déficits pluviométrique et hydrologique ont suscité de plus en plus de craintes que le pompage non réglementé des eaux souterraines pour l'irrigation. Ceci nuirait à la disponibilité des eaux souterraines pour soutenir les eaux de surface et les utilisations domestiques. Cet article a pour objectif de caractériser la tendance de l'évolution de la nappe (NSQ) dans la région des Niayes du Sénégal et de déterminer l'impact de son pompage à long terme dans un contexte de variabilité pluviométrique. La méthodologie est d'abord basée sur des méthodes statistiques de quatre stations pluviométriques et piézométriques pour extraire les impacts des changements des précipitations et de l'irrigation sur les eaux souterraines.

Les résultats indiquent que la variabilité peut sembler exacerber ou masquer l'effet du pompage des eaux souterraines. Grâce à cette analyse statistique, une diminution significative des précipitations a été notée dans la région des

Niayes du Sénégal. A l'échelle annuelle, les nappes situées dans la zone ont affiché une baisse des niveaux d'eau 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. A l'échelle saisonnière, les variations piézométriques sont plus prononcées à la fin de la saison pluvieuse (Octobre). Malgré l'importance des causes naturelles, la nappe des Niayes subit l'impact des activités anthropiques.

Mots-clés: *Nappes, Impacts, Précipitations, Sénégal, Niayes.*

**TOOLS FOR EVALUATING
UNDERGROUND WATER LEVELS IN A
CONTEXT OF RAINFALL
VARIABILITY AND PUMP INCREASE:
THE NIAYES CASE (NORTHERN
SENEGAL COAST)**

Abstract : *Senegal's northern coastline has a Quaternary Sand Nappe (NSQ) heavily used for agricultural irrigation. In this zone, irrigated agriculture has been growing steadily for several years. Since the 1970s, rainfall and hydrological deficits have raised more and more fears than the unregulated pumping of groundwater for irrigation. This would undermine the availability of groundwater to support surface water and domestic uses.*

This article aims to characterize the trend of the evolution of the water table (NSQ) in the Niayes region of Senegal and to determine the impact of its long-term pumping in a context of rainfall variability. The methodology is primarily based on statistical methods of four rainfall and piezometric stations to extract the impacts of changes in rainfall and irrigation on groundwater.

The results indicate that the variability may appear to exacerbate or obscure the effect of groundwater pumping. Thanks to this statistical analysis, a significant decrease in rainfall was noted in the Niayes region of Senegal. On an annual scale, aquifers in the area showed a drop in water levels during the droughts of the 1970s and 1980s, with an average gradual decrease of nearly 0.51 m every ten years. At the seasonal scale, the piezometric variations are more pronounced at the end of the rainy season (October). Despite the importance of natural causes, the Niayes aquifer suffers the impact of human activities.

Keywords: *Tablecloths, Impacts, Precipitation, Senegal, Niayes.*

Introduction

Les ressources en eau sont une richesse sur laquelle s'exerce une pression de plus en plus forte, face au changement climatique préoccupant pour certaines zones du monde, dans un contexte de surexploitation de ces eaux, de prolifération des sources de pollution, etc. Les eaux souterraines sont considérées comme l'une de nos ressources naturelles les plus importantes. Depuis le début du milieu du XX^e siècle, les prélèvements d'eau souterraine ont considérablement augmenté en raison des changements de la technologie de l'irrigation (G. Kraft *et al.*, 2012, p. 309). L'augmentation de population et des demandes de l'industrie ont exercé des pressions supplémentaires sur les ressources en eau souterraine. En effet, l'extraction des eaux souterraines à travers le monde a triplé en cinquante ans (J. Margat *et al.*, 2012, p. 15), à laquelle s'ajoute la variabilité pluviométrique et ses impacts sur la recharge des nappes. Face à la baisse des eaux de surface, de nombreux usages s'effectuent sur les eaux souterraines. La quantification de l'impact des demandes multiples sur un aquifère dans un contexte de variabilité climatique demeure une tâche difficile (J. Haucke *et al.*, 2016, p. 1055), en plus du manque de données à long terme sur les eaux souterraines.

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% (L. A. Aguiar, 2009, p. 39). Les perturbations hydrologiques qui en découlent, compromettent l'accès aux ressources en eau. En effet, l'abaissement du niveau moyen de la nappe a été de l'ordre de 1 à 5 m, soit de 7 à 30 cm/an depuis 1965 (SGPRE, 2003, p. 13). Cette baisse du niveau des eaux souterraines est associée à un pompage accru et exacerbée par une recharge réduite. Cette régression du niveau de l'aquifère compromet l'alimentation en eau potable des populations et éloigne les objectifs d'autosuffisance alimentaire pour la région des Niayes cruciale pour l'économie sénégalaise car produisant plus de 80% des

légumes du pays (S. Tall et A. S. Fall, 2001, p. 123). Le pompage des eaux souterraines peut avoir un impact beaucoup plus important sur le déclin des eaux souterraines que les changements climatiques (H. Loáiciga, 2003).

Le problème de la prévision du niveau des nappes est difficile du fait du nombre élevé de facteurs (topographie, végétation, géologie) qui influent sur la recharge des eaux souterraines. Cela explique le manque considérable de données disponibles. L'approvisionnement en eau souterraine dans le littoral nord sénégalais est vital pour les besoins en eau domestique ainsi que pour l'agriculture et l'industrie (Taïba). En 1974 (qui est la seule année pour laquelle des données de pompage sont relativement complètes), l'Alimentation en Eau Potable, avec plus de 56% de la totalité des eaux pompées, constituait la première cause de prélèvement anthropique (OMS, 1975, p. 50). Cette exploitation se fait par les puits et forages installés dans les communes rurales et les grandes agglomérations (A. S. Gladima, 1992, p. 56). Les besoins agricoles constituaient 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 entre 1 et 10 m environ), où le pompage se fait manuellement (L. A. Aguiar, 2009, p.8). L'industrie d'exploitation des phosphates de Taïba sollicite également la nappe à un débit régulier d'environ 2480 m³/j entre 1957 et la fin des années 1970 (S. Faye, 1995, p. 30).

Dans le littoral nord sénégalais, les contraintes liées aux eaux souterraines se reflètent dans les déficits des eaux de surface. Cette baisse des niveaux d'eau de surface et souterraine est due au pompage intensif des eaux souterraines et à la sécheresse. Malgré le manque de données, les niveaux des eaux souterraines du littoral nord sénégalais ont fait l'objet d'études approfondies (S. Faye, 1995, p. 1 ; S. Tall et A. S. Fall, 2001, p. 123; SGPRE, 2003, p. 1 ; L. A. Aguiar, 2009, p. 1). Si dans ces études, la relation entre le déficit pluviométrique et la baisse des niveaux des eaux de surface et souterraines est bien établie, l'interaction entre les changements climatiques, les prélèvements

d'eau souterraine et la réponse de la nappe phréatique n'est pas aussi bien indiquée. La mesure directe de la réponse des eaux de surface et des eaux souterraines au pompage reste complexe compte tenu des variations des précipitations qui se sont produites dans la zone. Une diminution des précipitations a été notée au Sénégal à partir des décennies 1970 en 80 (A. A. Sow, 2007, p. 500 ; C. Faye, 2013, p. 50 ; C. Faye *et al.*, 2015, p. 3 ; D. D. Ba, 2018, p. 93. ; D. D. BA *et al.*, 2018, p. 67).

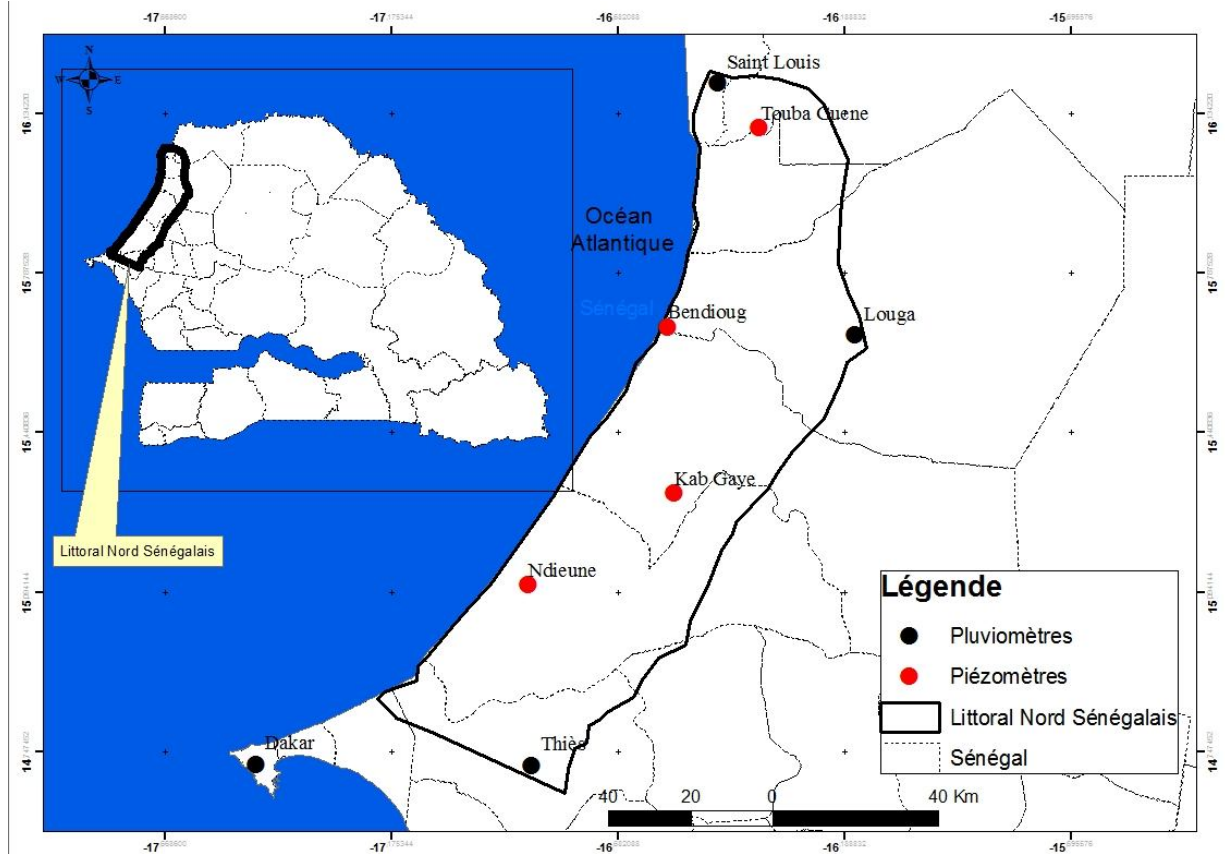
Cette diminution des précipitations peut masquer l'impact réel des pressions du pompage sur les eaux souterraines dans le littoral nord sénégalais. L'objectif de cette étude est donc de déterminer l'impact du pompage à long terme des eaux souterraines

dans un contexte de changement des conditions pluviométriques. Pour cela, nous avons utilisé des méthodes statistiques pour extraire les impacts de la variabilité pluviométrique et de l'irrigation sur les eaux souterraines.

1. Présentation de l'aire d'étude

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 (Carte n°1).

Carte n°1: Localisation de la zone d'étude et des stations météorologiques et piézométrique



La topographie est marquée par la présence de dunes sableuses entre lesquelles s'étendent les Niayes qui sont des dépressions interdunaires comblées de matière organique où la nappe est affleurante à subaffleurante. Sur les marges de ces dépressions humides se pratiquent les cultures maraîchères. La présente étude porte sur la dynamique spatio-temporelle de la nappe qui affleure au niveau des Niayes et qui repose sur un substratum marneux ou marno-

calcaire d'âge Éocène (C. Fohlen et Y. Lemordant, 1983, p. 10 ; S. Faye, 1995, p. 70). Dans cette zone, le gradient piézométrique est-ouest, à partir du dôme piézométrique, constitue un barrage hydraulique naturel s'opposant à la progression du biseau salé (C. Gaye, 1990, p. 77 ; S. Faye, 1995, p. 110; L. A. Aguiar, 2009, p. 73).

2. Données et méthodes

2.1. Données

2.1.1. Les données piézométriques

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, p.13). 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. 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 (L. A. Aguiar, 2009, p. 74). 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 la longueur de la série de mesures du piézomètre et l'emplacement du piézomètre dans la couche géologique des sables quaternaires. Des piézomètres de référence devant couvrir l'ensemble de la zone de façon homogène ont été choisis: Ndeune (centre sud), Kab Gaye (centre), Bendioug (centre nord), Touba Guene (nord) (Tableau n°1).

Tableau n°1 : Caractéristique des piézomètres retenus dans cette étude

Piézomètres	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Position	Moyenne 1958 - 1994 (m/10 ans)
Touba Guene	16 23 40	15 51 48	12,20	Nord	-0.30
Bendioug	16 35 20	15 35 10	13,27	Centre Nord	-0.47
Kab Gaye	16 37 25	15 18 50	50,29	Centre	-0.50
Ndeune	16 54 30	15 08 15	14,74	Centre Sud	-0.55

Source : ANACIM

2.1.2. Les données pluviométriques

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 a été proposée. Elle est faite *via* l'analyse des tendances et des anomalies de quelques indices de variabilité pluviométrique pour les quatre stations météorologiques dites synoptiques de la région des Niayes (Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis). Les valeurs annuelles ont été utilisées dans les analyses statistiques et ont été calculées à partir d'observations mensuelles. En plus des relevés annuels des précipitations, l'indice normalisé des précipitations (SPI) a été choisi comme principale variable de précipitation dans les modèles de régression multiple parce qu'il

représente le mieux le décalage entre les précipitations et la réponse dans le suivi des niveaux d'eau des puits. Le SPI est un indice normalisé qui quantifie les déficits de précipitation, qui peut être calculé pour une durée quelconque et qui prend en compte les échelles de temps dans l'analyse des périodes humides et sèches pour la disponibilité et l'utilisation de l'eau (N. B. Guttman, 1998, p. 115 ; T. D. Mayer et R. D. Congdon, 2008, p. 214). Le SPI a été utilisé pour cette étude du fait de sa moindre influence dans les équations de régression pendant les périodes normales de précipitation (T. D. Mayer et R. D. Congdon, 2008, p. 215). Dans cette étude, le SPI a amélioré la prédiction des fluctuations du niveau des nappes des piézomètres retenus dans les modèles (Tableau n°2).

Tableau n°2: Caractéristique des stations pluviométrique retenues dans cette étude.

Stations	Latitudes	Longitudes	Période étudiée
Dakar	14,74	-17,1	1960-2012
Thiès	15,62	-16,22	1960-2012
Louga	14,80	-16,95	1960-2012
Saint-Louis	16,01	-16,51	1960-2012

Source : ANACIM.

2.2. Méthodes : Analyses statistiques

Cet article indique comment l'évolution spatio-temporelle du niveau des nappes phréatiques peut aider à comprendre les tendances du climat. La pertinence de cette approche tient du fait que les pulsations du climat et ses tendances à long terme se marquent bien dans les chroniques des niveaux phréatiques (F. D. Ngom, 2000, p. 21 ; R. Malou, 2004, p. 95 p). Le pompage des eaux souterraines et les changements dans les précipitations ont été considérés comme les deux principales variables affectant les niveaux d'eau souterraine dans le littoral nord sénégalais. Les tests de tau de Kendall et de Mann-Whitney ont été utilisés pour déterminer si une baisse s'est produite. Le but principal des analyses statistiques était de prévoir, quantifier et expliquer les changements dans les niveaux d'eau souterraine dus au pompage, malgré l'absence de données de pompage.

2.2.1. Test de tau de Kendall

Les tendances des précipitations ont été évaluées pour déterminer si et où les changements dans les précipitations se sont produits dans la zone d'étude. De plus, une tendance à la baisse des précipitations au cours de la même période où une baisse de niveau des piézomètres est aussi noté, rend complexe l'évaluation des impacts de pompage potentiels. Le taux de Kendall, une technique statistique non paramétrique, a été régulièrement utilisé pour examiner les tendances linéaires des précipitations (M. Kendall, 1975, p. 100 ; R. M. Hirsch et J. R. Slack, 1984, p. 728). Ce test non paramétrique a été utilisé parce que les données sur les précipitations présentaient une distribution non normale. Les tendances ont été calculées pour les précipitations annuelles sur la période 1960-2012.

2.2.2. Test de Mann-Whitney

Le test de Mann-Whitney, une version non-paramétrique du test, a été utilisé pour déterminer la présence d'une baisse progressive des précipitations à partir des années 1970 (P. F. Juckem *et al.*, (2008, p. 125). Ce test a été utilisé pour les précipitations annuelles pour déterminer la différence dans les valeurs moyennes sur la période 1960-2012. Cela a produit un nombre

similaire de points de données de chaque côté de la pause de temps de 1970, 1971 (n = 38 ans) et a inclus les enregistrements les plus récents.

2.2.3. Analyse bivariée

Une analyse bivariée teste une différence dans les moyennes de deux séries de données linéairement corrélées (K. W. Potter, 1981, p. 2042). La technique bivariée utilise des mesures de séries chronologiques et a été couramment utilisée pour évaluer des données climatiques telles que la précipitation, l'évaporation et la température (T. A. Buishand, 1982, p. 13 ; A. Bucher et J. Dessens, 1991, p. 860 ; Kirono et Jones, 2007, p. 96). Dans cette étude, des analyses bivariées ont été utilisées pour évaluer les changements dans les niveaux d'eau souterraine des piézomètres. Pour répondre à l'exigence des données normales, des mesures annuelles moyennes du niveau de la nappe ont été utilisées dans l'analyse.

L'analyse bivariée a été utilisée pour déterminer l'impact du changement des conditions pluviométriques et du pompage potentiel sur les niveaux des nappes par l'examen de la non-stationnarité des séries. Les résultats de la technique bivariée ont déterminé l'année, la direction et l'ampleur du changement de moyenne causé par la non-stationnarité (K. W. Potter, 1981, p. 2042). L'analyse bivariée utilise une série stationnaire régionale qui se compose de plusieurs stations autour d'une station d'essai. La période de 1958 à 2002 a été utilisée sur la base des données des piézomètres du littoral nord sénégalais. L'analyse de la variance (ANOVA) est utilisée dans cette analyse bivariée. La principale raison de l'utilisation de cette technique était de voir si des variables indépendantes (diminution progressive des précipitations) pouvaient expliquer et prédire la variable dépendante (baisse de niveau des nappes) (J. R. Helsel et R. M. Hirsch, 2002, p. 117).

3. Résultats

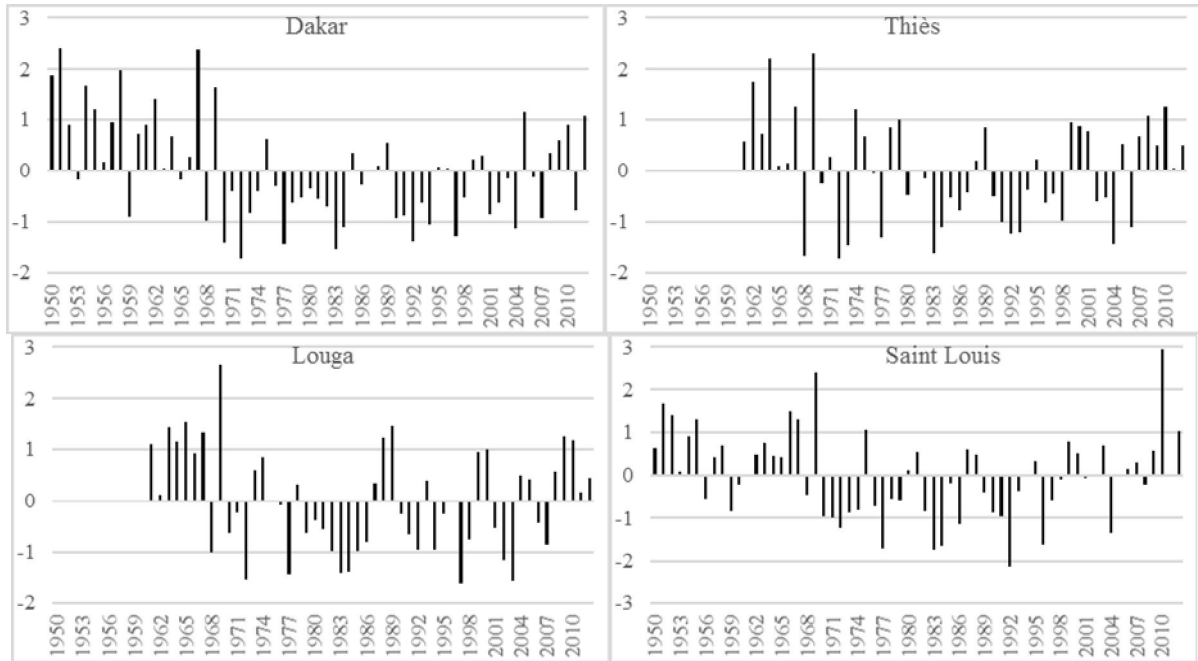
3.1. Tendances annuelles des précipitations

Les tendances des précipitations annuelles ont été examinées pour déterminer les périodes de

déficits pluviométriques sur la période 1960-2012. La figure 2 montre les tendances annuelles des indices normalisés de précipitations au niveau des quatre stations retenues pour l'étude. On constate des tendances à la baisse des précipitations annuelles notamment sur les décennies 1970, 80 et 90. Les précipitations varient d'une année à l'autre, une variation qui affecte les niveaux d'eau souterraine et les voies d'écoulement

hydrologiques, surtout si les totaux annuels ont été supérieurs ou inférieurs à la moyenne pendant de longues périodes. Les baisses à long terme des précipitations contribueraient à expliquer les diminutions des niveaux d'eau de surface et des eaux souterraines, mais pour J. Haucke *et al.* (2016, p. 1073) l'augmentation des précipitations pendant le temps pourrait masquer les impacts du pompage (Figure n°2).

Figure n°2: Indices normalisés des précipitations annuelles aux stations retenues de 1950 à 2012



Source : D'après le traitement des données de l'ANACIM.

Dans le littoral nord sénégalais, l'application du test de Mann-Kendall indique une tendance à la baisse des précipitations, en atteste un taux de Kendall négatif sur les quatre stations (Tableau n°3). Toutefois, seule la station de Dakar enregistre une baisse de façon significative avec une p-value (0,021) inférieur à 0,05. Pour les autres stations (Louga, Thiès et Saint Louis), la baisse est notée mais reste non significative, ce qui peut s'expliquer pour Louga et Thiès par l'absence de la décennie très humide 1950 sur les données utilisées.

3.2. Baisse progressive des précipitations

Dans le littoral nord sénégalais où les précipitations diminuaient de façon

significative durant les décennies 1970, 80 et 90, le test de Mann-Whitney a été utilisé pour déterminer si une diminution progressive des précipitations s'est produite durant la décennie 1970 dans les quatre stations climatiques retenues et dans la région. Les données de 1950 à 2012 ont été utilisées pour les stations de Dakar et Saint Louis, alors que pour Louga et Thiès, du fait de l'absence de la décennie très humide 1950, la période 1961-2012 a été utilisée. Pour chaque station, la série est subdivisée en deux sous-périodes de part et d'autre de la date de rupture 1970 (Tableau n°3).

Tableau n°3 : Valeurs P des tests de Mann-Kendall et équations de régression pour les précipitations annuelles dans les quatre stations de 1950 à 2012

Stations	Equations de régression	Test de Mann-Kendall	
		Tau de Kendall	p-value
Dakar	$y = -3,7747x + 563,96$	-0,199*	0,021
Thiès	$y = -1,2566x + 515,02$	-0,061	0,522
Louga	$y = -1,1687x + 350,89$	-0,078	0,416
Saint-Louis	$y = -0,7704x + 304,97$	-0,091	0,291

Source : ANACIM.

*Indique une valeur de p significative < 0,05 ; - Indique la direction de la tendance négative.

Les différentes stations ont montré une baisse significative des valeurs médianes des précipitations annuelles entre 1970 et 1971 (la valeur de p étant <0,05). La diminution des précipitations médianes annuelles dans le littoral nord sénégalais à partir des décennies 1070 et 80 peut masquer l'impact de

l'augmentation du pompage des eaux souterraines sur la baisse du niveau des nappes. Pour cette raison, les équations de régression pour surveiller le niveau de la nappe ont exigé une variable factice pour le changement des précipitations (Tableau n°4).

Tableau n°4 : Résultats des variations de la précipitation médiane annuelle selon le test de Mann-Whitney avant et après 1970

Stations	Période	Valeur médiane (mm)	Période	Valeur médiane (mm)	Différence médiane (mm)	p-value
Dakar	1950-1970	613,6	1971-2012	353,9	-259,7	0,0002*
Thiès	1961-1970	575,1	1971-2012	442	-133,1	0,029*
Louga	1961-1970	437,9	1971-2012	292,05	-145,85	0,007*
Saint-Louis	1950-1970	331,8	1971-2012	259,15	-72,65	0,0013*

Source : D'après le traitement des données de l'ANACIM.

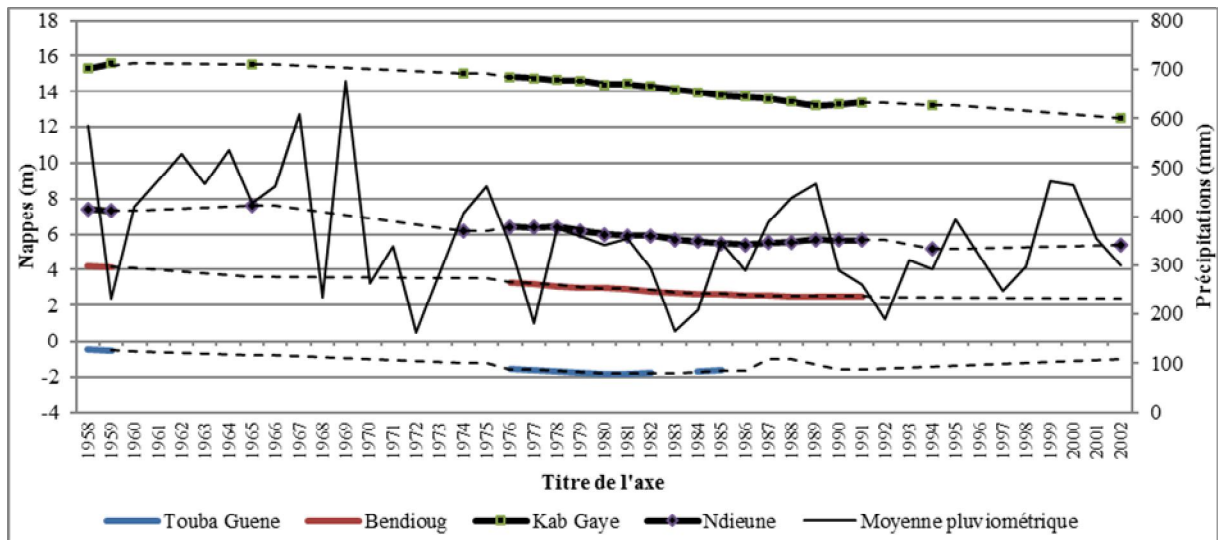
* Indique une valeur de p significative < 0,05 ; - Indique la direction de la tendance négative.

3.3. Impact de la baisse des précipitations sur les nappes par l'analyse bivariée

Le test bivarié détecte l'année, l'ampleur et la direction d'un changement systématique de la moyenne entre deux séries. Ce test a été initialement utilisé pour identifier une période de stationnarité entre les puits de contrôle.

Pour cette étude, l'analyse de la variante (ANOVA) a été choisie pour faire le test bivarié. L'analyse de la variante ou analyse factorielle permet de savoir si la variable dépendante, le niveau de la nappe, est en relation avec la pluviométrie qui est une variable indépendante (Figure n°3).

Figure n°3: Evolution compare des précipitations et des niveaux de la nappe de 1958 à 2002



Source : D'après le traitement des données de l'ANACIM.

A l'instar de la pluviométrie et des écoulements des surfaces, la dynamique hydrologique de 5 piézomètres sélectionnés dans le littoral nord sénégalais (Touba Guene, Kab Gaye, Bendioug, Ndieune) de 1958 à 2002 indique une nette tendance à l'épuisement des stocks au cours de la période de déficit pluviométrique (Figure 3). Le mouvement saisonnier des nappes est lié aux

paramètres climatiques (précipitation, évapotranspiration) et à la profondeur du plan d'eau. La variabilité pluviométrique caractérisée par une tendance baissière s'accompagne d'une régression niveau de la nappe à partir des années 1970 ayant favorisé une régression progressive du niveau de la nappe de près 0.51 m / 10 ans en moyenne entre 1958 et 1994 (Tableau n°5).

Tableau n°5 : Matrice de corrélation, coefficient de détermination et équation du modèle du test bivarié entre les piézomètres et la moyenne pluviométrique de 1958 à 2002

Variables	Matrice de corrélation	Coefficient de détermination (R ²)	Equation du modèle	p-value
Ndieune	0,3329	0,1108	5,27+0,0022*P	0,130
Kab Gaye	0,1660	0,0276	13,7+0,0014 P	0,460
Bendioug	0,2943	0,0866	2,43+0,0015*P	0,195
Touba Guene	0,4027	0,1622	-2,04+0,0019*P	0,121

Source : D'après le traitement des données de l'ANACIM.

P = Précipitations moyenne

Les résultats de l'analyse de la variante qui met en relation les niveaux de la nappe et la pluviométrie (moyenne des quatre stations) indiquent la non-stationnarité des séries qui s'est produite sur la décennie 1970 et ont indiqué que la diminution des précipitations a contribué à une baisse des niveaux d'eau souterraine. Le changement de stationnarité des niveaux d'eau souterraine se produit à peu près au même moment que la diminution des précipitations dans la région. La discontinuité moyenne des niveaux des nappes est associée à la diminution des précipitations sur la décennie 1970. Toutefois, les résultats de

l'analyse de la variante montrent une relation relativement faible (coefficient éloigné de 1) et les niveaux de la nappe et la pluviométrie, en attestent les valeurs du coefficient de détermination très faible et les valeurs de p supérieures à 0,05.

Les piézomètres Touba Guene et Ndieune ont, par rapport à la pluviométrie, les relations les plus élevées avec respectivement 0,1622 et 0,1108. Ce qui montre que 16% de la variabilité des niveaux de la nappe à Touba Guene (11% à Ndieune, 8% à Bendioug) sont expliqués par la variabilité de la pluviométrie.

Le reste de la variabilité des niveaux de la nappe est explicable par d'autres paramètres non mesurés. En d'autres termes, la baisse de la pluviométrie ne suffit pas à décrire la dynamique de la nappe. L'analyse bivariée a montré que la diminution progressive des niveaux de la nappe après 1970, concomitamment avec la pluviométrie, peut être influencée par le pompage. Une augmentation de l'ampleur du pompage des eaux souterraines peut avoir entraîné une baisse des niveaux d'eau souterraine du littoral nord sénégalais. Bien que le test bivarié ait été conçu pour détecter la non-stationnarité de la moyenne, il a permis d'avoir une idée sur les impacts potentiels du pompage.

3.4. Dynamique morphologique annuelle et saisonnière des nappes durant la sécheresse

La nappe des sables du littoral nord, se trouve dans un contexte topographique marqué par des cordons dunaires et des dépressions interdunaires dans lesquelles elle s'écoule par endroit. La Figure 4 indique la dynamique morphologique annuelle et saisonnière des nappes du littoral nord sénégalais durant la sécheresse. Elle fait ressortir deux types de variations du niveau des nappes:

- une tendance à l'épuisement des stocks du fait du déficit pluviométrique dans la zone sahélienne ;
- des fluctuations saisonnières dont l'importance est fonction de la profondeur de niveau initial de la nappe et de la hauteur de pluie annuelle reçue.

Ces deux mouvements de nappe montrent une forte vulnérabilité climatique des nappes d'eau souterraines du littoral nord sénégalais.

Il en est résulté une modification de l'allure morphologique de la nappe qui 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. Cet affaissement rapide du niveau piézométrique de la nappe, observé depuis le début des années 1970, est concomitant à la baisse des apports pluviométriques ces dernières décennies. La baisse des précipitations a favorisé une régression progressive du niveau de la nappe de près 0,51 m / 10 ans en moyenne entre 1958 et 1994 dans la zone. Cette baisse du niveau des nappes peut aussi être inhérente au pompage. 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.

A l'échelle saisonnière, les observations effectuées sur le littoral nord sénégalais ont montré une bonne signature phréatique du climat. Cette signature est marquée par l'évolution saisonnière des niveaux phréatiques qui traduisent les processus de recharge au cours de la saison pluvieuse puis de décharge au cours de la saison sèche (R. Malou *et al.*, 2008, p. 9). L'amplitude moyenne des variations du niveau de la nappe entre juin et octobre de 1974 à 1988 est tantôt négative à Kab Gaye (-0,07 m) et Bendioug (-0,03 m), tantôt positive à Touba Guene (0,04 m) et Ndieune (0,07 m). En effet, si le niveau piézométrique de la nappe a généralement connu une baisse entre juin et octobre à Kab Gaye et Bendioug. À Touba Guene et Ndieune par contre, c'est une hausse du niveau qui est notée entre juin et octobre. La hausse de niveau piézométrique de la nappe la plus importante est notée à Ndieune en 1975 (0,44 m) et la plus faible (0,01 m) en 1974, 1980 et 1981 à Ndieune, et en 1987 à Bendioug. Quant à la baisse de niveau piézométrique de la nappe, la plus forte est notée à Kab Gaye en 1986 (-0,31 m) et la plus faible (-0,01 m) est notée en 1982 et 1984 à Bendioug et 1982 à Kab Gaye (Tableau n°6).

Tableau n°6 : Amplitude (en m) des variations du niveau de la nappe entre juin et octobre de 1974 à 1988

Localités	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
Touba Guene	0,11	0,03	-0,03	0,02	0,00	0,08	0,03	0,12	0,05	-0,06	0,03	0,05	0,04	0,08	0,10
Kab Gaye	-0,08	0,00	-0,03	0,00	-0,10	0,10	-0,05	-0,09	-0,01	-0,25	-0,04	-0,07	-0,31	-0,06	-0,02
Bendioug	-0,04	-0,03	-0,06	-0,02	-0,05	0,03	-0,03	-0,04	-0,01	-0,12	-0,01	-0,03	0,00	0,01	0,02
Ndieune	0,01	0,44	-0,01	0,08	0,03	0,00	0,01	0,01	0,03	-0,10	0,06	0,10	0,18	0,13	0,11

Source : D'après le traitement des données de l'ANACIM.

Le signe – indique une baisse du niveau entre juin et octobre et le signe +une hausse du niveau entre juin et octobre

Les basses amplitudes des fluctuations de la nappe du littoral nord sénégalais s'expliquent par la faiblesse des précipitations, leur déficit récent leur manque d'efficacité. Cela se traduit par une tendance des nappes à l'épuisement. L'évolution du niveau piézométrique de cette nappe indique des fluctuations cycliques mais très dissymétriques avec une courte phase de remonté des niveaux et une longue et forte phase de descente. 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. C'est le même constat pour l'année 1984 où le toit de la nappe a régressé de près de 3 m (2,99 m) entre le début et la fin de la saison pluvieuse. 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.

Conformément à la baisse des précipitations qui a subi un gradient décroissant Sud-Nord, entre 1960 et 2012, le niveau de la nappe a davantage baissé dans le secteur Sud comparativement au Nord. Toutefois, les variations maximales de la piézométrie sont observables dans la zone centrale du littoral nord sénégalais, 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 son corollaire, le gradient piézométrique. 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 du littoral nord sénégalais 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. La baisse du niveau piézométrique est également accentuée par les prélèvements anthropiques.

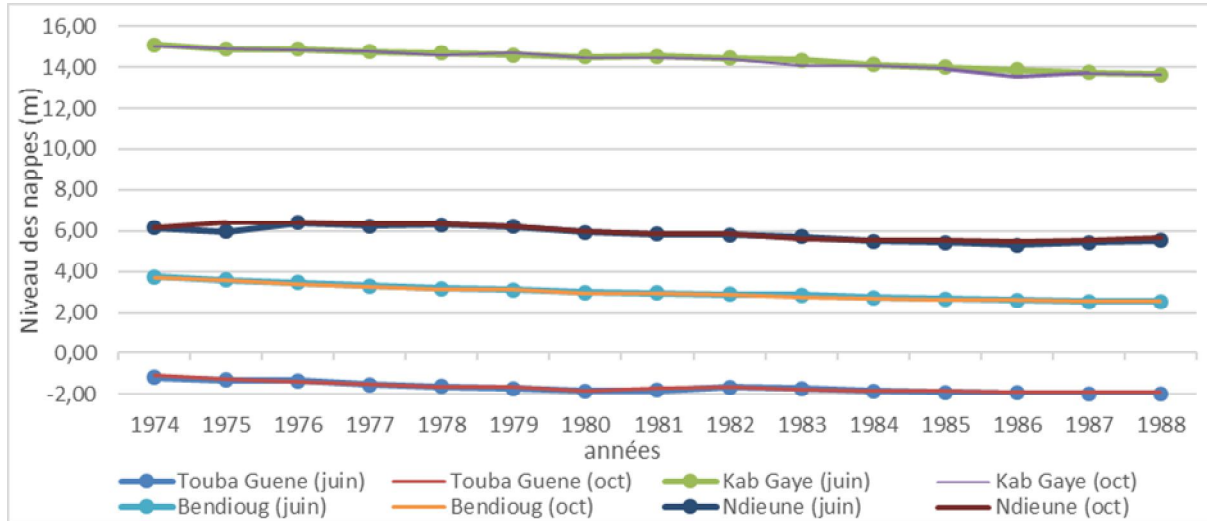
4. Discussion

Le Sahel a subi, au cours des dernières décennies, une récurrence marquée de sécheresses en particulier durant trois décennies (1970, 80 et 90) au cours desquelles les précipitations ont diminué d'environ 40% (M. Hulme *et al.*, 2001, p. 154). Nos résultats concernant les mouvements saisonniers des nappes conforte le rapport du SGPPE (2003, p. 13) qui note que l'impact des changements des conditions climatiques sur les ressources en eau souterraine est marqué par un bilan hydrologique déficitaire au cours des trente dernières années avec un abaissement du niveau moyen de la nappe qui en découle a été de l'ordre de 5 à 10 m depuis 1965 pour la nappe phréatique du littoral nord sénégalais. La tendance à la baisse des niveaux phréatiques au cours des trois décennies de sécheresse (1970, 80 et 90), avec un facteur temporel de 5.10^{-4} à 10^{-3} pour la nappe du littoral nord sénégalais (MEPN, 2008, 25 p) et comme l'a démontré L. A. Aguiar (2009, p. 82), la baisse des précipitations a comme corollaire celle du niveau de la nappe. Les mouvements de la nappe sont aussi en phase avec les travaux de R. Malou *et al.* (2008, p. 9) (Figure 4). Au cours de la saison sèche, la nappe présente une décrue régulière d'environ 5 mm/j. Compte tenu de l'emmagasinement de

5% des formations encaissantes. Ce déstockage correspond à une lame d'eau de 0.25 mm/j. Cet abaissement représente un débit spécifique d'environ 250 m³/km² d'eau que la nappe libère, par jour du fait de

l'évaporation et du drainage par les fonds alluviaux (R. Malou *et al.*, 2008, p. 11). Ce phénomène est mis en exergue par la figure n°4.

Figure 4 : Evolution annuelle et saisonnière du niveau de la nappe entre 1974 et 1988



Source : R. Malou *et al.*, (2008, p. 9).

L'évolution annuelle est marquée par une forte variabilité du niveau des nappes d'eau souterraines du littoral nord sénégalais avec une tendance à l'épuisement des stocks d'eau souterraine. Elle montre un niveau élevé de la crête piézométrique strictement observé avant la sécheresse des années 1970 (55 m en 1958, 46 m en 1965) et qui coïncide avec la séquence humide des années 1950 et 1960 (Figure 3). Durant cette période, les apports pluviométriques qui sont assez importants, ont pu assurer une recharge soutenue de la nappe. A partir des années 1970, la morphologie de la nappe est donc marquée par un abaissement de la crête piézométrique entraînant son aplanissement progressif (L. A. Aguiar, 2009, p. 89).

Les phases de remontée des niveaux sont très faibles, n'excédant pas 0,50 m alors que celles des baisses des niveaux sont très fortes, nettement supérieures au mètre, tout cela étant modulé par la profondeur de la nappe (R. Malou *et al.*, 2008, p. 9). 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 disparition des isopièzes inférieures à -5 m à la

faveur des isopièzes entre 0 m et -5 m au Nord (L. A. Aguiar, 2009, p. 81). 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 du littoral nord sénégalais (L. A. Aguiar, 2009, p. 88).

Conclusion

L'évaluation des variations du niveau des nappes d'eau souterraines dans un contexte de changements des précipitations et de hausse des pompages dans le littoral nord sénégalais a mis en évidence la tendance climatique actuelle à la sécheresse et corrélativement, les impacts des tendances climatiques dans le niveau des nappes d'eau souterraines. Les fluctuations des nappes phréatiques dans le littoral nord sénégalais revêtent trois caractéristiques essentielles que sont :

- la périodicité saisonnière des cycles de fluctuation ;
- la variation des amplitudes de fluctuation en fonction de la profondeur de la nappe et de la pluviométrie ;

- la prépondérance des phases de baisse des niveaux du fait du caractère sec du climat dans cette zone.

Les tendances annuelles et saisonnières ont révélé la baisse des précipitations dans la zone à partir des années 1970. Les fluctuations saisonnières du niveau de la nappe notées qui en ont résulté, correspondent à l'alternance des périodes de recharge et de décharge des eaux souterraines indiquant des phases de stockage et de déstockage de l'eau pluviale dans le réservoir souterrain au cours du cycle hydrologique. Toutefois, il s'agit de courtes phases de recharge dominées par de grandes phases de décharge. Ainsi, un lien étroit qui existe entre les précipitations et la reconstitution des réserves d'eau souterraine est une bonne illustration de l'impact du climat sur les ressources en eau souterraines. Même si les facteurs naturels sont les principales causes de la baisse du niveau piézométrique, la diminution des niveaux des nappes d'eau souterraines serait accentuée par les prélèvements anthropiques, compte tenu de la forte croissance démographique dans le littoral nord sénégalais. La baisse continue du niveau des nappes phréatiques et leur épuisement à long terme conduisent assurément à l'assèchement des zones humides qui constitue une véritable menace pour l'économie du pays basée fortement sur l'exploitation des ressources naturelles et l'agriculture.

Bibliographie

AGUIAR Lazar Augustin, 2009, *Impact de la variabilité climatique récente sur les écosystèmes des Niayes du Sénégal entre 1950 et 2004*, Thèse de doctorat, Université du Québec, Montréal, 208 p.

BA Djibrirou Daouda, 2018, *Sécheresse climatique, dynamique actuelle et perspectives des activités agropastorales dans le Ferlo et la Moyenne Vallée du fleuve Sénégal (Région de Matam)*, Thèse de doctorat unique de Géographie, Université Gaston Berger de Saint-Louis, 196 p.

BA Djibrirou Daouda, NDIAYE Pape Malick et FAYE Cheikh, 2018, «Variabilité pluviométrique et évolution de la sécheresse climatique dans vallée du Fleuve Sénégal», *Revue Togolaise des sciences (RTS)*, Vol 12, n°1, Lomé, p. 57-71.

BUCHER André and DESSENS Jean, 1991, «Secular Trend of Surface Temperature at an Elevated Observatory in the Pyrenees. *Journal of Climate*, 4, 859-868».

BUIHAND Tjerk Adriaan, 1982, «Some Methods for Testing the Homogeneity of Rainfall Records», In: *Journal of Hydrology*, 58, p. 11-27.

FAYE Cheikh, 2013, *Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité hydroclimatique : cas du bassin versant de la Falémé*, Thèse (PhD), Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 309 p.

FAYE Cheikh, SOW Amadou Abdoul et NDONG Jean Baptiste, 2015, «Étude des sécheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal ». *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, 9, 17-35.

FAYE Serigne., 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, Département de Géologie, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 176 p.

FOHLEN Claude et LEMORDANT Yves., 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, 82 p.

GAYE Cheikh Bécaye, 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, Département des Sciences, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 245 p.

GLADIMA Aïssatou Sophie, 1992, *Bilan de la Nappe des Sables Quaternaires de la péninsule du Cap Vert, (Sénégal)*, Mémoire de maîtrise, Département de Géologie et minéralogie, Université Laval, Québec, Qc., Canada, 78 p.

- HAUCKE Jessica, CLANCY Katherine and KRAFT George, (2016), «Tools to Estimate Groundwater Levels in the Presence of Changes of Precipitation and Pumping». In: *Journal of Water Resource and Protection*, 8, p. 1053-1077.
- HELSEL Dennis and HIRSH Robert, 2002, *Statistical Methods in Water Resources Techniques of Water Resources Investigations*, Book 4, Chapter A3. U.S. Geological Survey, 522 p.
- HIRSH Robert M. and SLACK James R., 1984, «A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence», *Water Resources Research*, 20, p. 727-732
- HULME Mike, DOHERTY Ruth, NGARA Todd, NEW Mark & LISTER David, 2001, «African climate change: 1900-2100». *Clim. Res.*, 17, p. 145-168.
- JUCKEM Paul, HUNT Randall, ANDERSON Mary and ROBERTSON Dale, 2008, «Effects of Climate and Land Management Change on Streamflow in the Driftless Area of Wisconsin», *Journal of Hydrology*, 355, p. 123-130.
- KENDALL Maurice, 1975, *Multivariate Analysis*, Charles Griffin & Company, London, 202 p.
- KRAFT George, CLANCY Katherine, MECHENICH David and HAUCKE Jessica, 2012, «Irrigation Effects in the Northern Lake States: Wisconsin Central Sands Revisited». *Groundwater*, 50, p. 309-318.
- LOAICIGA HUGO, 2003, *Climate change and ground water*, <https://doi.org/10.1111/1467-8306.93103>
- MALOU Reymond, 2004, *Impact du climat sur les ressources en eau en zones soudano-sahélienne*, Thèse de doctorat d'état, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 152 p.
- MALOU Reymond, NGOM Fatou Diop, DACOSTA Honoré., SAOS Jean-Luc et AKPO Léonard Elie, 2008, «Influence du climat sur les ressources en eau souterraine en zone soudano-sahélienne» 13^{ème} congrès mondial de l'eau, du 1 au 4 septembre 2008, Montpellier, France, p. 1-13.
- MARGAT Jean, FOSTER Stephen and DROUBI Ahmed, 2006, «Concept and Importance of Non-Renewable Resources». In: Foster, S. and Loucks, D.P., Eds., *Non-Renewable Groundwater Resources: A Guidebook on Socially-Sustainable Management for Water-Policy Makers*, IHP-VI, Series on Groundwater No. 10, UNESCO, Paris, p. 13-24.
- MAYER Timothy .D. and CONGDON Roger, 2008, «Evaluating Climate Variability and Pumping Effects in Statistical Analysis». *Journal of the Association of Ground Water Scientists and Engineers*, 46, p. 212-227.
- Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature, 1998, *Programme d'action national de lutte contre la désertification*. République du Sénégal, 152 p.
- NGOM Fatou Diop, 2000, *Caractérisation des transferts hydriques dans le bassin de la Néma au Sine Saloum*, Géologie. Dakar (Sénégal), Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 130 p.
- 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, 100 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), N° 12, 22 p.
- SOW Amadou Abdoul, 2007, *L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses Confins guinéo-maliens : les bassins de la Gambie et de la Falémé*, Thèse (PhD). Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 1232 p.
- TALL Safietou et FALL Abdou Salam, 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.