



Évolution de la nappe des sables quaternaires dans la région des Niayes du Sénégal (1958-1994): relation avec le climat et les impacts anthropiques

Lazar a.A. Aguiar, Michelle Garneau, Anne-Marie Lézine, Pascal Maugis

► To cite this version:

Lazar a.A. Aguiar, Michelle Garneau, Anne-Marie Lézine, Pascal Maugis. Évolution de la nappe des sables quaternaires dans la région des Niayes du Sénégal (1958-1994): relation avec le climat et les impacts anthropiques. Science et changements planétaires / Sécheresse, 2010, 21 (2), pp.97-104. <10.1684/sec.2010.0237>. <hal-03199870>

HAL Id: hal-03199870

<https://hal.science/hal-03199870v1>

Submitted on 18 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Évolution de la nappe des sables quaternaires dans la région des Niayes du Sénégal (1958-1994) : relation avec le climat et les impacts anthropiques

Lazar A.A. Aguiar¹
Michelle Garneau¹
Anne-Marie Lézine²
Pascal Maugis²

¹ Université du Québec à Montréal
GEOTOP-UQAM-Mc Gill
201 Président-Kennedy
H2X 3Y7 Montréal
Canada
<lazaraguiar@yahoo.fr>
<garneau.michelle@uqam.ca>
² CNRS-LSCE
CEA-Orme des Merisiers
Bâtiment 701
91191 Gif-sur-Yvette
France
<anne-marie.lezine@lsce.ipsl.fr>
<pascal.maugis@cea.fr>

Résumé

Cet article étudie la variabilité au cours des 50 dernières années de la nappe des sables quaternaires (NSQ) dans la région des Niayes au Sénégal, afin de déceler les liens possibles de cette variabilité avec le climat mais aussi les activités anthropiques. L'analyse interannuelle de la morphologie de la nappe à partir des cartes piézométriques multitudes 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 10 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 90 % 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 mm entre 1984 et 1994 en dépit de la persistance des déficits pluviométriques des années 1980 et 1990.

Mots clés : climat, eau souterraine, facteur anthropique, hydrogéologie, pluviométrie, Sénégal.

Abstract

Evolution of the quaternary water table level in Senegal's Niayes region (1958-1994): Relationship with climate and human activities

The main objective of this study is to examine the variability of groundwater level over the past 50 years in the Niayes region of Senegal and identify possible links with the climate and human activities. The analysis of the water table morphology from multi-temporal piezometric maps shows that the biggest piezometric depletions were recorded in the 1970's and 1980's with a gradual decline averaging almost -0.51m every ten years. At the intra-annual scale, the piezometric variations are more substantial 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 90% is lost through evapotranspiration. The water extracted for human activities represents no 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 hydraulic infrastructures (dams) in

the northern sector of the Niayes where the water level fell by only 0.11 mm between 1984 and 1994, despite the continuing rainfall deficits of the 1980's and 1990's.

Key words: anthropic factor, climate, ground water, hydrogeology, rainfall, Senegal.

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 % [1-3]. Le déficit de recharge des réservoirs souterrains à partir des apports pluviométriques est de 13 et 27 % au cours, respectivement, des décennies 1970 et 1980 [4]. Cette régression du niveau des aquifères compromet l'alimentation en eau potable des populations et éloigne l'objectif d'autosuffisance alimentaire pour une région cruciale pour l'économie sénégalaise. La région des Niayes¹ produit, en effet, plus de 80 % des légumes du Sénégal [5]. Cet article étudie la dynamique hydrologique de la nappe au cours des 50 dernières années. L'objectif est de mettre en évidence, sur un pas de temps approximatif de 10 ans, entre 1950 et 2004, les variations relativement importantes du niveau de la nappe en relation avec la variabilité des précipitations et les activités anthropiques le long du littoral nord du Sénégal. Un bilan hydrologique a été fait pour l'année 1974, pour laquelle des données climatiques (évapotranspiration, précipitations) et des données de pompages étaient disponibles.

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 2 300 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 Sud (figure 1). La végétation est caractérisée par une pseudo-steppe sahélienne dans laquelle s'intègrent des reliques forestières d'origine subguinéenne [6], mises en place dès le début de l'Holocène et alimentées par la nappe des sables quaternaires (NSQ) [7]. La présente étude porte sur cette nappe phréatique, qui affleure au niveau des Niayes et qui traduit le mieux son

¹ 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.

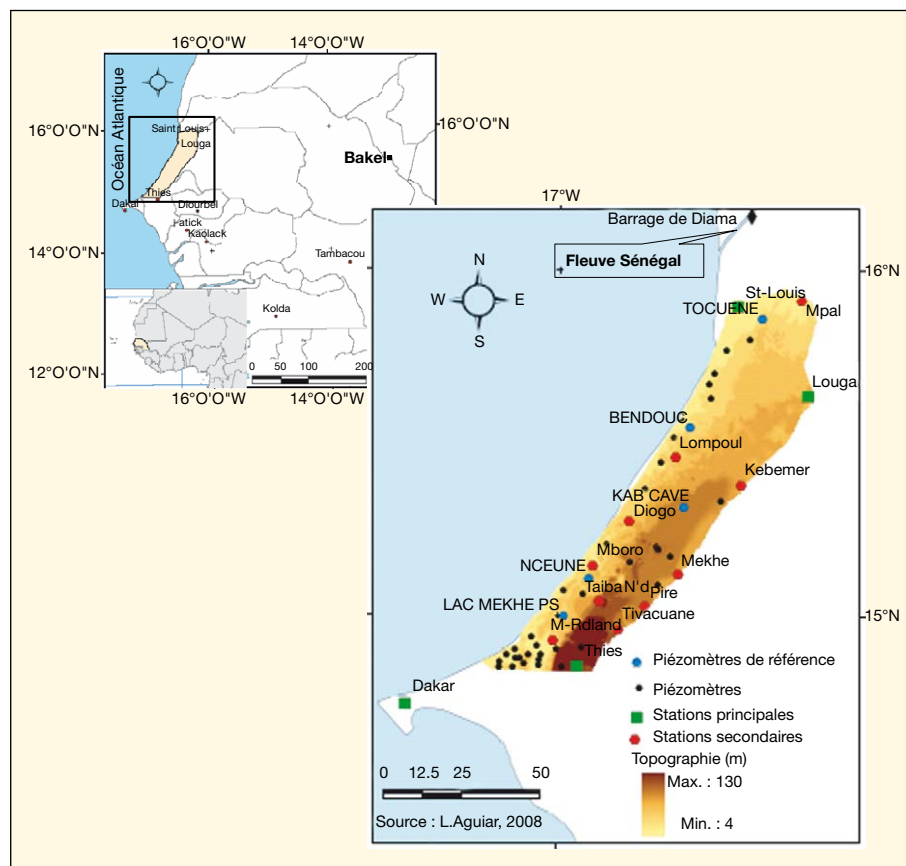


Figure 1. Localisation de la zone d'étude et des stations météorologiques (principales et secondaires) et piézométriques.

hydrogéologie. Le gradient piézométrique est-ouest constitue un barrage hydraulique naturel s'opposant à la progression du biseau salin océanique excepté dans certains secteurs des zones centrale (par exemple à Mboro) et septentrionale [8-10].

Les données piézométriques proviennent des bases de données du Service de la gestion et de la planification des ressources en eau (SGPRE) du ministère de l'Hydraulique du Sénégal [11], de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) [12] et du Bureau de la recherche géologique et minière (tableau 1) [13]. Seuls 38 points présentaient des données régulières correspondant aux années d'études (1958, 1965, 1974, 1984, 1994). Compte tenu de l'hétérogénéité des mesures piézométriques dans la NSQ et du volume important de données pour chaque station de mesures, un choix de piézomètres de référence à analyser statistiquement a été fait suivant : i) la

période 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 [3], la série de mesures du piézomètre de référence devait débuter avant 1970 et dépasser l'année 2000. Cinq piézomètres ont ainsi été retenus : Lac Mekhe (sud), Ndeune (centre sud), Kab Gaye (centre), Bendioug (centre nord) et Touba Guene (nord) (figure 1).

Pour décrire les conditions climatiques de la zone d'étude, quatre stations météorologiques, dites « synoptiques » (Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis – figure 1) ont été retenues. Ces stations qui entourent la zone des Niayes disposent de séries presque complètes avec moins de 20 % de données manquantes entre 1950 et 2004 [3].

Tableau 1. Données hydrogéologiques utilisées.

Source	Type de document	Durée	Nombre de piézomètres	Années manquantes	Résolution temporelle
BRGM [13]	statistique	Juin 1958 à décembre 1959	53	0	mensuelle
OMS [12]	cartographique	Juillet 1963 et octobre 1963	117	0	mensuelle
Fohlen & Lemordant [17]	statistique	Mai 1965 et septembre 1965	118	0	mensuelle
OMS [12]	statistique	Janvier 1974 à décembre 1974	104	0	mensuelle
SGPRE [11]	statistique	1976 à 2002	45	1995 à 2000	Bimensuelle et saisonnière (juin et octobre)
	statistique	Juillet 2002 et novembre 2002	41	0	mensuelle

BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières ; OMS : Organisation mondiale de la santé ; SGPRE : Service de la gestion et de la planification des ressources en eau du ministère de l'Hydraulique du Sénégal.

Méthodologie

Afin de déceler les anomalies climatiques, la pluviométrie annuelle cumulée aux stations synoptiques a été normalisée par ses moyennes sur la période 1961-1990, et par ses écarts types sur l'ensemble de la couverture temporelle (1950-2004) [3, 14]. L'évolution interannuelle de la piézométrie a été analysée via la comparaison des valeurs enregistrées au début (juin) et à la fin (octobre) de la saison pluvieuse entre 1958 et 2002. Cela permet de s'affranchir des fluctuations cycliques ou aléatoires de la nappe et d'évaluer la tendance fondamentale ou sous-jacente [15]. Des cartes piézométriques ont été réalisées à partir de séries statistiques de piézométrie, 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, suivant le protocole décrit plus haut. 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 [16]. 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 [13, 17]. Cette étape a permis de confirmer la présence de bombements ou de dépressions piézométriques.

Résultats

Variabilité interannuelle des précipitations

La variabilité interannuelle de la pluviométrie est marquée par deux séquences contrastées, avec une rupture en 1970 [18]. 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 44 % à Louga, soit une variation régionale de plus de 41 %. Les amplitudes de variations 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) (figure 2) [3]. Les précipitations ont ainsi davantage baissé au sud qu'au nord, induisant une réduction du gradient sud-nord et un « nivellement » progressif dénivellant partiellement les hauteurs de précipitations annuelles dans toute la zone.

Tendance interannuelle 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 sont observées au cours des décennies 1970 et 1980 avec des maxima au mois de juin de 0,84 m à Kab Gaye (centre) et de 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 de 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

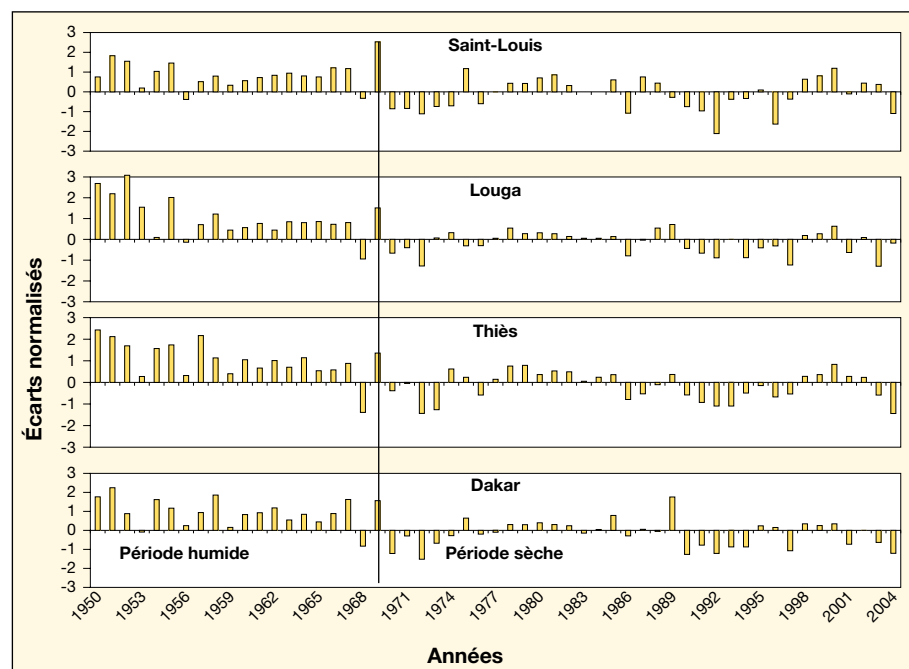


Figure 2. Anomalies normalisées des cumuls pluviométriques entre 1950 et 2004.

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.

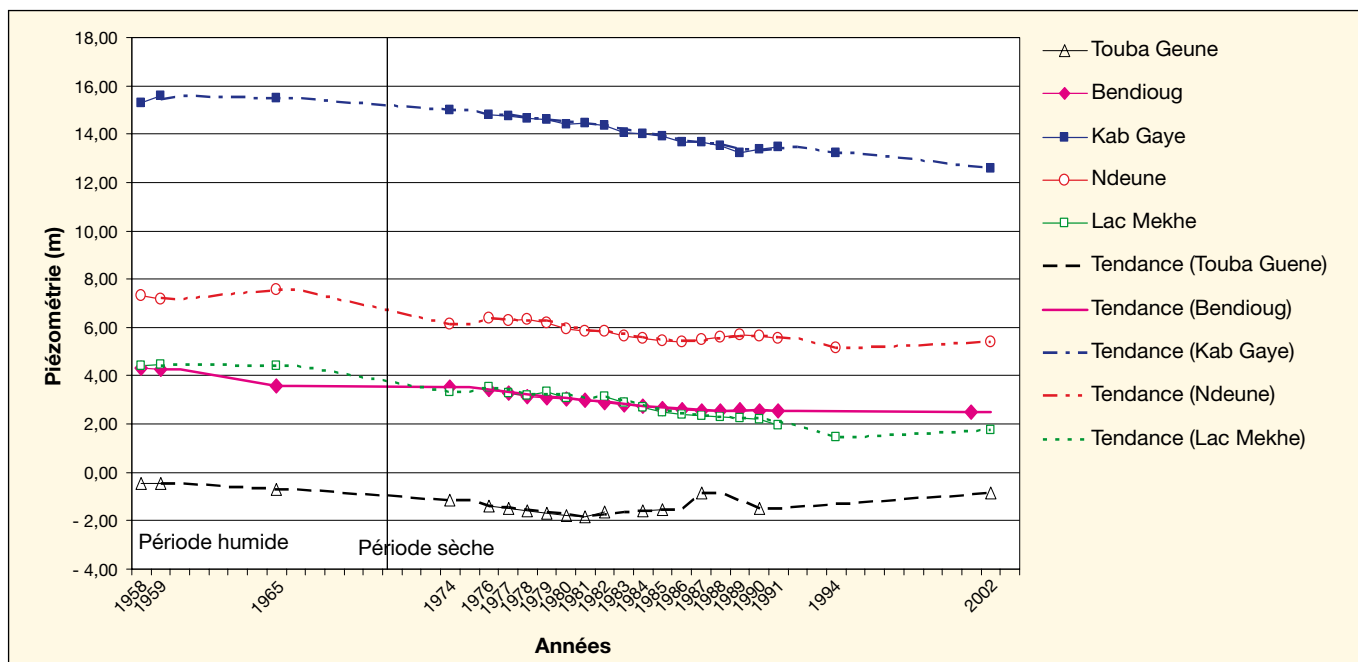


Figure 3. Tendances de l'évolution annuelle du niveau moyen de la nappe entre 1958 et 2002. La ligne noire verticale correspond à la fin de la période humide et au début de la période sèche.

un rabattement maximum de 2,70 m à Lac Mekhe (tableau 2). Toutefois, l'absence de mesures piézométriques entre 1965 et 1974 ne permet pas de situer avec exactitude la rupture hydrogéologique entre la période relativement humide et sèche.

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 [19].

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 au nord, à l'ouest en direction de la côte, et également au sud-est vers l'intérieur des

terres pour alimenter les dépressions piézométriques continentales vestiges du dernier âge glaciaire [20]. Ce régime hydrogéologique subit des variations à deux échelles de temps.

• Variations interannuelles

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. Il en est résulté une déformation de la crête piézométrique se caractérisant par son déplacement vers le centre de la région ainsi qu'un rehaussement du plan d'eau dans la partie nord du littoral, où le niveau piézométrique est passé de -5,18 m

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

Période	Écarts piézométriques (m)				Cumul (m)	Moyenne (m/10 ans)
	1958-1965	1965-1974	1974-1984	1984-1994	1958-1994	1958-1994
Durée (ans)	7	9	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. Variabilité (amplitude et écart type) du niveau de la nappe entre 1958 et 2002 (juin et octobre).

Piézomètre de référence	Touba Guene	Bendioug	Kab Gaye	Ndeune	Lac Mekhe
<i>h (juin)</i>	- 2,26	- 1,70	- 2,16	- 2,45	- 2,66
Écart type	0,76	0,50	0,65	0,71	0,78
<i>h (octobre)</i>	- 2,61	- 2,35	- 3,4	- 2,75	- 3,37
Écart type	0,88	0,63	0,99	0,79	0,96

en 1984 à - 3,2 m en 1994. Un creux piézométrique s'est installé progressivement au sud-ouest, dès les années 1960, pour devenir une véritable dépression locale atteignant - 5,18 m en octobre 1994. L'amoindrissement de ce dôme de près de 36 m et le décalage de son maximum vers le centre ont localement réorganisé les gradients de charge hydrologique et par conséquent les transferts d'eau souterraine autrefois dirigés presque exclusivement vers le nord.

En effet, au cours de la période humide comprise entre 1950 et 1960, le pourcentage de nombre de jours avec précipitations 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 [3]. Cela suggère des apports pluviométriques assez importants

qui ont pu assurer une recharge soutenue de la nappe à cette période.

En revanche, 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). En effet, la moyenne pluviométrique annuelle a baissé de plus de 41 % entre les périodes 1950-1970 et 1970-1990. Depuis 1950 (d'avril à octobre), le nombre de jours de précipitations a baissé en moyenne de 2 à 4 jours tous les 10 ans et le nombre de jours secs consécutifs a augmenté d'environ 2 à 5 jours tous les 10 ans avec des maxima dans le secteur sud à Dakar et Thiès [3]. Par conséquent, les précipitations en baisse – surtout au sud de la région des Niayes – ont favorisé une régression progressive du niveau de la nappe de près 0,51 m/10 ans entre 1958 et 1994.

• Variations saisonnières

Entre juin et septembre 1958, le niveau général de la nappe a évolué positivement, entraînant un rehaussement autant du niveau le plus élevé que du niveau le plus bas 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 en faveur des isopièzes comprises 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 niveau le plus bas. Au cours des années 1970 et 1980, l'évolution intra-annuelle de la nappe fut généralement régressive. En 1974, le niveau le plus bas 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 d'environ 2 m de la piézométrie dans la zone d'affaissement (nord). La cote minimale est passée 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 de 66 % supérieure à la moyenne régionale de 1961-1990 (370 mm) avec des cumuls annuels pluvio-

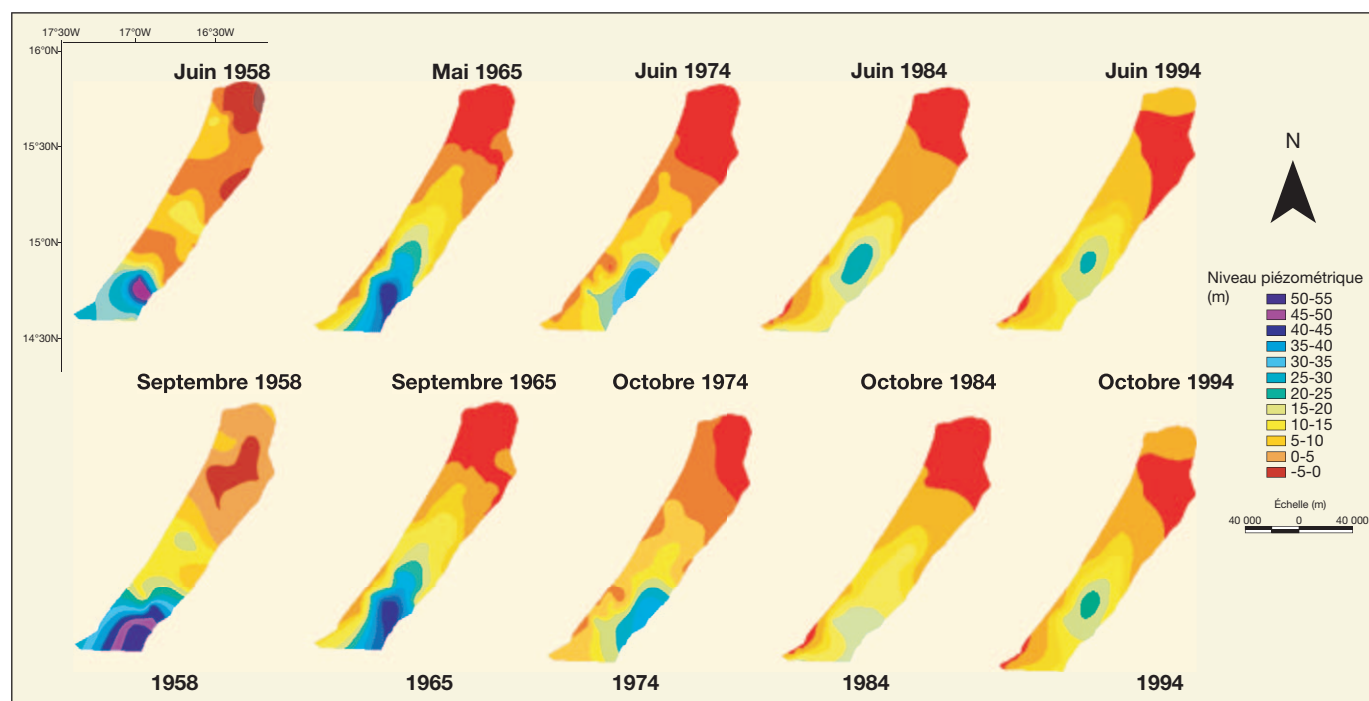


Figure 4. Évolution morphodynamique de la nappe des sables quaternaires entre 1958 et 1994 pour le début (mai-juin) et la fin (septembre-octobre) de la saison des pluies.

métriques de 818 mm à Dakar et de 771 mm à Thiès (figure 2) [3]. En revanche, le faible cumul pluviométrique de l'année 1974 (324 mm), a favorisé une régression du niveau le plus bas de la nappe de plus de 0,50 m pour atteindre -3,35 m en octobre 1974. Les années de 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 de la piézométrie sont observables dans la zone centrale de la région des Niayes – aux alentours de Kab Gaye – où les fortes valeurs de transmissivité ($1,102 \text{ m}^2/\text{s}$) et de perméabilité (5.10^{-4} m/s) [21] suggèrent une transition rapide des eaux de pluie vers la nappe souterraine. D'ailleurs, une analyse plus poussée des années 1958 et 1974 [22] a montré une bonne réactivité de la NSQ aux fluctuations pluviométriques, au centre de la région des Niayes avec un temps de réponse de la nappe de l'ordre du mois. Au sud, l'axe de bombement piézomé-

trique se superpose à une zone de faible conductivité électrique inférieure à $200 \mu\text{s}/\text{cm}$ à 20°C , témoignant d'un renouvellement préférentiel des eaux de pluie dans la nappe [21]. 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.

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

• 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. Les précipitations qui constituent la principale entrée hydrologique ont été obtenues à partir du calcul de la moyenne des cumuls annuels des quatre stations synoptiques de la région (Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis – figure 1) [22]. L'évapotranspiration a été obtenue à partir du bilan hydrique calculé par la méthode de Thornthwaite [23] entre juin et décembre, et les pertes vers la mer ont été calculées à partir du débit de l'écoulement souterrain vers l'océan estimé entre $3,3 \text{ L/s/km}$ et $4,2 \text{ L/s/km}$ [21, 24]. Les débits de pompage ont été estimés pour la période de juin à décembre et traduits en lame d'eau (mm) sur la superficie du bassin ($2\,300 \text{ km}^2$) [10, 25]. Pour les

sables grossiers ($0,05\text{-}2 \text{ mm}$), le coefficient de porosité efficace souvent utilisé varie entre 20 et 30 % [21, 26-28]. Dans cette étude, le coefficient de porosité efficace a été fixé à 20 %. Ce coefficient de 20 % a donné un Δh moyen de 19,22 mm qui correspond à l'écart moyen obtenu à partir des piézomètres de référence et qui est tiré des travaux d'Aguiar *et al.* [22].

Le tableau 4 suggère que l'évapotranspiration qui représente près de 90 % des sorties et 93 % des pertes naturelles constitue le principal facteur de décharge de la nappe en dépit des incertitudes induites par la méthode de calcul de Thornthwaite [3]. Les pertes vers la mer constituent le second 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 [20]. Il est incliné vers l'océan, favorisant ainsi un écoulement latéral vers celui-ci. Suivant le plan d'inclinaison du substrat et selon la quantité des précipitations enregistrées au cours de l'année, la quantité d'eau s'écoulant vers la mer correspond à une lame d'eau de la nappe d'environ 18 mm en 1974 [21, 24].

En 1974, la quantité d'eau pompée ne représentait 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 [25].

Tableau 4. Bilan hydrologique moyen de la nappe des sables quaternaires (NSQ) en 1974.

DONNÉES DE BASE				
Surf. zone	Porosité efficace	Δh saisonnier moyen	Précipitations moyennées	ETR Thonthwaite
2 300 km ²	20 %	19,22 mm	314,52 mm	264,6 mm
ENTRÉES			SORTIES	
Précipitations moyennes = 314,52 mm			Facteurs naturels	
			ETR Thonthwaite	264,6 mm
BILAN = entrées - sorties			Perte en mer	18 mm
			Total	282,6 mm
314,52 mm - 293,94 mm		20,58 mm	Facteurs anthropiques	
			AEP*	6,21 mm
Bilan - Δh moyen = -1,36 mm			Agriculture	4,74 mm
			Industrielle (Taïba)	0,39 mm
			Total	11,34 mm
			Total sorties	293,94 mm

* AEP : alimentation en eau potable ; ETR : évapotranspiration.

Les besoins agricoles constituent la seconde 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 profonds variant entre 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. 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 $2\,480\text{ m}^3/\text{j}$ [10]. Ce débit était négligeable par rapport aux autres activités de pompage (facteurs anthropiques) et surtout à la totalité des pertes (facteurs naturels et anthropiques). Les prélèvements industriels représentaient moins de 4 % des eaux pompées.

En définitive, les prélèvements anthropiques restent toujours minimes par rapport aux pertes naturelles, mais peuvent par moments accentuer la décharge hydrologique. Il faut noter qu'en 1974, la région des Niayes était très peu anthropisée, comparativement à la période postérieure à 1976² où le flux migratoire s'est accentué en même temps que se développaient l'industrie et l'agriculture. La densité moyenne de la population de la région des Niayes est passée de plus de 25 habitants au kilomètre carré en 1950 à probablement 62 habitants au kilomètre carré en 2000, selon les projections de 1997 [29]. La différence de densité entre le secteur sud ($70\text{ hab}/\text{km}^2$) et le secteur centre suggère un moindre prélèvement dans ce dernier, par rapport au secteur sud, et pourrait en plus expliquer l'origine du déplacement du dôme vers le centre de la région. Au début des années 1990, les études de Gladima [25] et de Faye [10] estimaient les débits extraits à plus de $100\,000\text{ m}^3/\text{j}$, alors que les ressources renouvelables étaient estimées à $115\,000\text{ m}^3/\text{j}$. 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 [27]. Donc, même si les facteurs naturels (baisse des précipitations et évapotranspiration) étaient les principaux facteurs de destockage de la nappe en 1974, la baisse du niveau piézométrique

a été accentuée par les prélèvements anthropiques surtout au cours des deux dernières décennies.

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 [3] et où les prélèvements seraient normalement plus élevés. Cependant, les données disponibles ne permettent pas d'évaluer avec précision l'effet de la variation démographique sur la morphologie de la nappe et notamment d'expliquer la migration du dôme piézométrique vers le centre de la région des Niayes.

• 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 trois grandes périodes de variations hydrologiques :

- une première période, antérieure à 1965 (1958-1965), caractérisée par un niveau de nappe phréatique relativement stable avec une légère baisse de $0,22\text{ m}$;
- une deuxième période allant de mai 1965 à juin 1984, au cours de laquelle le niveau de la nappe a baissé de près de $0,40\text{ m}$;

- une troisième période, allant de juin 1984 à juin 1994, où le niveau de la nappe n'a régressé que de $0,11$ en dépit de la sécheresse enregistrée entre 1990 et 1994 (figure 3). Ce ralentissement du rythme d'abaissement de la nappe, dans les années 1980 et 1990, dans le secteur nord de la région des Niayes peut être attribué à l'apport pluvio-métrique ou à l'alimentation par percolation latérale à partir des eaux du delta du fleuve Sénégal (figure 1), 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 $2\,000\text{ mm}/\text{an}$, débutent au cours du mois d'avril. L'onde de crue de ces premières pluies atteint la région de Saint Louis au début du mois de juin. En 1994, le débit moyen du fleuve à Bakel (figure 1) a augmenté, atteignant $615\text{ m}^3/\text{s}$, comparativement aux moyennes décennales des années 1970 et 1980 qui étaient d'environ $421\text{ m}^3/\text{s}$ [30]. Dans ce cas, il est possible que l'alimentation de la nappe ait été favorisée par l'infiltration à partir des retenues d'eau des bouchons-barrages en 1983-1984 et des barrages

de Diama (1985) et 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 notamment la relation pluie/débit/écoulement souterrain dans son delta [30, 31]. Cependant, les mesures piézométriques qui ne sont disponibles que pour un seul piézomètre de référence (Touba Guene), ne permettent pas une quantification exacte et exhaustive de l'influence des aménagements hydrauliques sur le niveau de la nappe dans la zone septentrionale du littoral nord. 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 mais également une analyse isotopique des eaux de la nappe phréatique afin de déterminer l'origine fluviale, marine ou météorique de sa recharge.

Conclusion

Au cours des 50 dernières années, la crête piézométrique est passée de près de 55 m en 1958 à moins de 20 m en 1984 avant d'atteindre 22 m au-dessus du niveau de la mer en 1994, résultant d'une longue période pluvio-métrique déficitaire. Les plus fortes baisses piézométriques ont été enregistrées au cours des décennies 1970 et 1980 avec une baisse progressive moyenne de près de $-0,50\text{ m}$ tous les 10 ans après 1974 et de $-0,45\text{ m}$ tous les 10 ans sur toute la période allant de 1958 à 1994.

En 2002, le niveau de la nappe semble avoir continué à s'abaisser alors que la baisse des précipitations a semblé se stabiliser à 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 retard, appelé « effet mémoire », dû aux déficits pluvio-métriques répétés depuis les années 1970. La reconstitution des stocks de réserves souterraines nécessitera probablement plusieurs années consécutives de pluvio-métrie 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 [32].

Conformément à la baisse des précipitations qui a subi un gradient décroissant sud-nord, entre 1950 et 2004 [3], le niveau de la nappe a davantage baissé dans le secteur sud qu'au nord. 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

² Date de création des Industries chimiques du Sénégal qui a entraîné un flux migratoire vers la région des Niayes.

favorisent une bonne réactivité de la nappe aux précipitations. 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 constitueraient la principale cause de variations du niveau de la nappe tant en termes d'entrées (précipitations) qu'en termes de sorties (évapotranspiration). L'évapotranspiration qui représente près de 90 % des sorties et 93 % des pertes naturelles constituerait le principal facteur de décharge de la nappe. Toutefois, dans la zone de bombement, la profondeur de nappe, sous le dépôt de sol, peut atteindre plusieurs mètres. Il est bien clair que, dans ces conditions, une 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 en 1974, la baisse du niveau piézométrique a pu aussi être accentuée au-delà des capacités de renouvellement de la nappe, par les prélèvements anthropiques surtout au cours des 20 dernières années pendant lesquelles la population de la région des Niayes a presque doublé [29]. ■

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'université du Québec à Montréal (UQAM) et le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) 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 (Ucad) de Dakar pour leur collaboration scientifique.

Références

1. Mahé G, Olivry JC. Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale, du mensuel à l'inter-annuel. *AISH* 1991 ; 201 : 163-71.
2. Hulme M, Doherty R, Ngara T, New M, Lister D. African climate change: 1900-2100. *Clim Res* 2001 ; 17 : 145-68.
3. Aguiar LAA, Gachon P, Garneau M, Lézine A-M. Variabilités inter-annuelles et intra-saisonnières des précipitations dans le littoral nord du Sénégal entre 1950 et 2004. *Hydrol Sc J* (sous presse).
4. Bricquet JP, Bamba F, Mahé G, Touré M, Olivry JC. Variabilité des ressources en eau de l'Afrique Atlantique. *PHI-V* 1997 ; 6 : 83-95.
5. Tall S, Fall AS. *Cités horticoles en sursis? L'agriculture urbaine dans les grandes Niayes au Sénégal*. Ottawa (Canada) : CRDI, 2001.
6. Trochain J. *Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal*. Paris : Larose, 1940.
7. Lézine AM. *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, 1987.
8. Dryade. *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. Dakar : Direction des eaux, Forêts, Chasses et de la Conservation des Sols, 1990.
9. Gaye C. *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 A Diop (Dakar) 1990; 245 p.
10. Faye S. *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 de Dakar 1995.
11. Service de la gestion et de la protection des ressources en eau (SGPRE). *Suivi piézométrique des nappes de la presqu'île du cap vert et du littoral nord*. Rapport de synthèse. Dakar : ministère de l'hydraulique 2001, 2002, 2003.
12. OMS. *Étude sur modèles mathématiques de la nappe des sables quaternaires et calcaires lutétiens entre Tivaouane et Saint-Louis du Sénégal*. Sauty JP, ed, Rapport BRGM 75/SGN/049/AME. Dakar : OMS, 1975.
13. BRGM. *Hydrologie de la région des Niayes*. Putallaz J, ed. Rapport BRGM, Dak 62-A 12. Dakar : BRGM, 1962.
14. Rossel F, Garbrecht J. Analyse et amélioration d'un indice pluviométrique mensuel régional pour les grandes plaines du sud des États-Unis. *Revue des sciences de l'eau* 2000; 13: 39-46.
15. Grais B. *Méthodes Statistiques, Techniques statistiques*. 2. Paris : Dunod, 1998.
16. Chilès JP, Delfiner P. *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. New York : Wiley, 1999.
17. Fohlen D, Lemordant Y. *Étude hydrogéologique. Secteur M'Boro-Lompoul, Sénégal*. Compagnie des tourbières du Sénégal. Projet d'exploitation des tourbes. BRGM (Paris). Rapport 83AGE013, annexes 1, 2 et 3. Paris : BRGM, 1983.
18. Hubert P, Carbonnel JP, Chaouche A. Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J Hydrol* 1989 ; 110 : 349-67.
19. Gachon P, Gauthier N, Bokoye A, et al. *Variabilité, extrêmes et changements climatiques au Sahel: De l'observation à la modélisation*. Rapport Environnement Canada. Montréal : Environnement Canada, 2007.
20. Dieng B, Ledoux E, de Marsily G. Palaeohydrogeology of the Senegal sedimentary basin: A tentative explanation of the piezometric depressions. *J Hydrol* 1990 ; 118 : 357-71.
21. BRGM. *Projet d'exploitation des tourbes des Niayes*. Rapport de synthèse géologique prospection générale et certification des réserves. Châteauneuf JJ, G. Pezeril G, eds, BRGM, rapport de synthèse. Dakar : BRGM, 1984.
22. Aguiar LAA. *Impact de la variabilité climatique récente sur les écosystèmes des Niayes du Sénégal entre 1950 et 2004*. Thèse, université du Québec à Montréal, Montréal (Québec, Canada), 2009.
23. Tandia A. *Revue critique des méthodes d'évaluation de la recharge des nappes. Contribution de l'approche géochimique et isotopique - Louga-Nord Sénégal*. Thèse de troisième cycle, université Cheikh Anta Diop de Dakar, 1990.
24. Béture-Sétame. *Renforcement de l'approvisionnement en eau de la région de Dakar*. Rapport d'étude, Tome 1. Dakar : Béture-Sétame, 1988.
25. Gladima AS. *Bilan de la nappe des sables quaternaires de la péninsule du Cap Vert, (Sénégal)*. Mémoire de maîtrise, département de géologie et minéralogie, université Laval, 1992.
26. Todd DK. *Groundwater hydrology*. New York : John Wesley & Sons, 1980.
27. Banton O, Lumony M. *Hydrogéologie multiscience environnementale des eaux souterraines*. Québec : Presses Universitaires du Québec; Aupelf, 1999.
28. Healy RW, Cook PG. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeol Journal* 2002 ; 10 : 91-109.
29. Direction Prévision Statistique du Sénégal. *Enquête sénégalaise auprès des ménages, de mars 1994 à mai 1995 : la consommation, les dépenses et les activités*. Rapport de synthèse. Dakar : CILSS-UE, DIAPER III, 1997.
30. Olivry JC. De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies. *Revue de Géographie Alpine* 1994 ; 12 : 101-8.
31. Saos JL, Diagana A, Thiebaut JP. *Relations eaux de surface eaux souterraines dans la vallée alluviale du fleuve Sénégal*. Projet CEE TS 20198 FED, Tome 4. Dakar : Orstom, 1993.
32. Henry H. *Eaux superficielles et souterraines au Sénégal*. Paris : Larose, 1921.