

Application des méthodes statistiques à la caractérisation hydrochimique des eaux souterraines dans le secteur de Thiaroye / Lac Mbeubeuss, Dakar, Sénégal

Olivier Florent ESSOULI¹, Timothée MIYOUNA¹, Aïssatou Sophie GLADIMA-SIBY²,
Laurent MATINI^{3*} et Serigne FAYE²

¹ *Université Marien NGOUABI, Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire de Géosciences,
BP 69 Brazzaville, Congo*

² *Université Cheikh Anta Diop, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie,
BP 743 Dakar-Fan, Sénégal*

³ *Université Marien NGOUABI, Ecole Normale Supérieure, Laboratoire de Chimie, BP 69 Brazzaville, Congo*

* Correspondance, courriel : matinilaurent@yahoo.fr

Résumé

La physico-chimie de l'aquifère des sables quaternaires dans le secteur de Thiaroye/lac Mbeubeuss, montre que les eaux sont moyennement à fortement minéralisées avec une conductivité électrique comprise entre 228 et 9990 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en juillet 1998 ; 215 et 4720 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en juillet 2002 puis 235 et 5560 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en mars 2003. Le diagramme de Piper des trois campagnes de prélèvement met en évidence les eaux qui sont dominées par les familles chimiques chlorurées sulfatées calciques et magnésiennes et chlorurées sulfatées sodiques et potassiques. Deux faciès chimiques prédominent : le chloruré sodique et potassique et le chloruré calcique. L'étude de la qualité chimique des eaux souterraines révèle des concentrations élevées en chlorures, sulfates, nitrates et phosphates dans les puits proches de la décharge publique. Les teneurs de ces éléments chimiques atteignent des valeurs maximales de 2064,50 mg/L pour les chlorures en juillet 1998, 1576,49 mg/L pour les sulfates en mars 2002, 221,42 mg/L pour les nitrates en juillet 2002 et 3,47 mg/L en phosphates en juillet 2002. Ces teneurs en éléments chimiques dépassent largement les concentrations maximales admissibles définies pour l'eau de boisson par l'Organisation Mondiale de la Santé. Celles-ci témoignent d'une contribution de la décharge publique à la contamination des eaux souterraines dans le secteur de Thiaroye / lac Mbeubeuss. L'analyse en composante principale confirme la contamination de ces eaux souterraines par les éléments chimiques précités.

Mots-clés : *Thiaroye, Lac Mbeubeuss, décharge, aquifère, hydrochimie, pollution.*

Abstract

Application of statistical methods for the hydrochemistry characterization of groundwater in the Thiaroye / Mbeubeuss lake area, Dakar, Senegal

The physico-chemistry of the quaternary sands aquifer of the sector of Thiaroye/lac Mbeubeuss, shows that waters are average to highly mineralized with an electric conductivity understood between 228 and 9990 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in July 1998; 215 and 4720 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in July 2002 then 235 and 5560 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in March 2003. The piper

diagram from the three sampling campaigns reveal waters dominated by the chloride sulphite calcic and magnesium and chloride sulphite sodium and potassium. Two chemical facies prevail: chloride sodium and potassium; chloride calcic. The study of the chemical quality of the groundwaters reveals high concentrations in chlorides, sulphates, nitrates and phosphates in the wells near of the public discharge. The contents of these chemical elements reach maximal value of 2064.50 mg/L for chlorides in July 1998; 1576.49 mg/L for sulphates in March 2002; 221.42 mg/L for nitrates in July 2002 and 3.47 mg/L in phosphates in July 2002. These contents are over the admissible maximal concentrations define for drink water by the World Health Organization. These facts reveal the contribution of the public discharge to the contamination of the groundwaters in the sector of Thiaroye/Lac Mbeubeuss. The analysis in main component confirms the contamination of these ground waters by the aforementioned chemical elements.

Keywords : *Thiaroye, Mbeubeuss/Lac, discharge, aquifer, hydrochemistry, pollution.*

1. Introduction

La pollution des eaux souterraines en milieu urbain et/ou sous une décharge publique non contrôlée par lessivage au cours de l'infiltration des eaux de pluies, avait déjà été observée par Durand-Claye à la fin du 19^{ème} siècle [1]. Depuis, les spécialistes s'accordent sur la présence dans ces eaux, des métaux lourds, des produits azotés, des phosphates, des hydrocarbures et d'autres produits chimiques. Les eaux de ruissellement pluvial peuvent donc avoir un effet dommageable, aussi bien sur l'homme (par la contamination des eaux souterraines qui servent à l'alimentation en eau potable, ou de la chaîne alimentaire), que sur l'environnement c'est à dire sur la faune et la flore qui subissent la pollution des sols, des nappes, des cours d'eau. La croissance, le développement et l'amélioration du niveau de vie des populations, seront impossibles à long terme si les cours d'eau et les nappes souterraines, sont chargés de produits chimiques toxiques dangereux pour l'homme et nuisibles à la vie.

Cette étude tient du fait que la pollution de l'aquifère des sables quaternaires de Thiaroye/Beer Thialane par les nitrates a fait l'objet de plusieurs études [2-4]. Cependant, la décharge publique du site du lac Mbeubeuss, n'a fait l'objet d'aucune étude sur son impact sur la ressource en eau de l'aquifère des sables quaternaires dans le secteur de Thiaroye/lac Mbeubeuss. Excepté l'étude des impacts de la décharge publique sur l'environnement commanditée par le Ministère Sénégalais de l'Environnement entre janvier et février 1991, qui avait montré que la décharge publique du site du Mbeubeuss renfermait un fort potentiel de contamination et représentait dès lors une menace réelle pour les populations et pour l'environnement. Dans le monde plusieurs études sur les impacts des décharges publiques sur la qualité des ressources en eau ont été menées [5 - 15]. L'urbanisation anarchique et les rejets de déchets urbains et industriels non traités sur et/ou dans le sol, conduisent à des concentrations de polluants dépassant parfois les concentrations maximales admissibles définies pour l'eau de boisson par les organismes internationaux. La pollution des eaux souterraines peut limiter sérieusement les quantités d'eaux exploitables, mais peut surtout être à l'origine de graves ennuis pour la santé de l'homme. Dans ce contexte de dégradation des ressources naturelles au Sénégal, le maintien de sa qualité est une préoccupation majeure pour une société qui doit subvenir à des besoins en eau de plus en plus importants [16 - 17]. Ce présent travail a pour objectif l'étude la qualité physico-chimique des eaux de l'aquifère des sables quaternaires aux abords de la décharge publique de Mbeubeuss et de ses environs en considérant comme des indicateurs de pollution la conductivité électrique, les teneurs en chlorures, sulfates, nitrates et phosphates.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation générale de la zone d'étude

La région de Dakar représente l'extrême pointe occidentale de l'Afrique de l'ouest et l'extrême ouest du Sénégal. Le secteur de Thiaroye/lac Mbeubeuss est situé à une trentaine de kilomètres de la ville de Dakar, entre les latitudes $14^{\circ}47'$ et $14^{\circ}50'$ Nord et les longitudes $17^{\circ}16'$ et $17^{\circ}20'$ Ouest tel que présenté à la **Figure 1**. La région de Dakar est caractérisée par un microclimat particulier de type intertropical influencé par les alizés maritimes de novembre à juin et la mousson de juillet à octobre suivant des directions N-NW et S-SE. La pluviométrie avec un maximum autour des mois d'août et septembre, décroît légèrement de la côte vers l'intérieur du continent avec une moyenne annuelle comprise entre 300 et 400 mm. La région de Dakar appartient au bassin sénégalo-mauritanien, le plus vaste des bassins côtiers existants au niveau de la marge nord-ouest de l'Afrique Sa structure est simple et caractérisée par un socle qui s'enfonce d'est en ouest. Sur le plan structural, la région de Dakar a été affectée par des failles verticales de directions NE-SW à NNE-SSW qui sont à l'origine de la mise en place des horsts de Dakar et de Ndiass et du graben de Rufisque-Sangalkam [18].

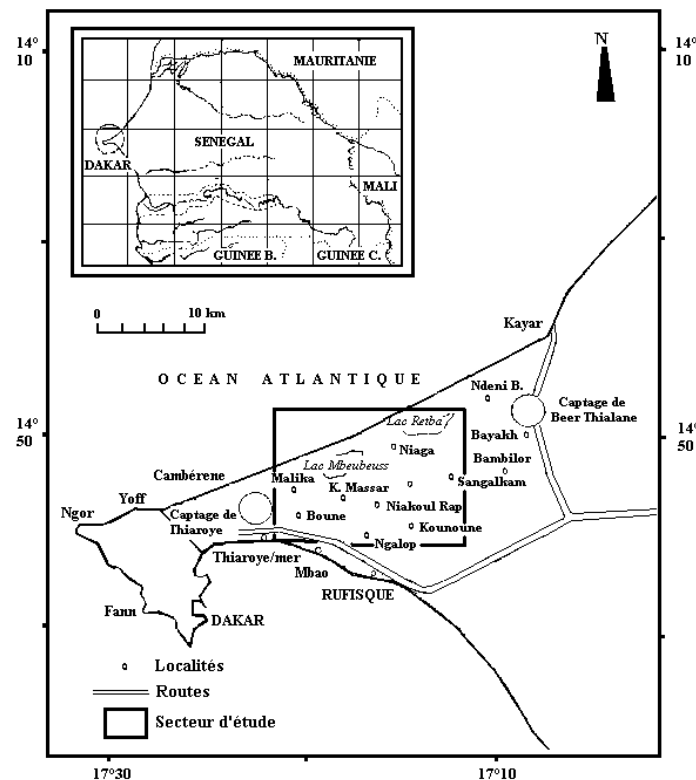


Figure 1 : Situation du secteur de Thiaroye/lac Mbeubeuss

La stratigraphie locale est connue grâce aux forages pétroliers et hydrauliques et met en évidence des formations datées du Crétacé supérieur (Maastrichtien) au Quaternaire (**Figure 2**) dont seules les formations du Quaternaire présentent un intérêt hydrogéologique [19]. Le système aquifère des sables quaternaires s'étend de la grande Niaye de Pikine jusqu'au lac Tanma. Les sables quaternaires reposent sur un substratum marno-argileux du Tertiaire, dont la configuration va influencer l'écoulement des eaux souterraines. Par ailleurs, l'interruption de la sédimentation des dépôts sableux par la formation de sables argileux et argiles sableuses issues des transgressions marines, fait que l'aquifère des sables quaternaires

soit subdivisé en plusieurs couches. L'aquifère en totalité libre, présente quelques poches très limitées de semi captive. La morphologie du mur de l'aquifère est relativement tourmentée, globalement le toit des marnes s'enfonce vers la côte nord dans la zone de Thiaroye /lac Mbeubeuss et vers le lac Retba, alors qu'il remonte entre le Cap des Biches et Niakoul Rap [19 - 20]. L'épaisseur des sables aquifères est très variable, suivant les variations de la morphologie du substratum. Les épaisseurs importantes des sables mouillés dans les dépressions modelées par l'érosion suivent les grandes lignes tectoniques et on observe des vallées fossiles et des cuvettes lacustres dont les plus importantes, la cuvette de Thiaroye et la dépression de Beer Thialane constituent les principaux centres de captages pour l'exploitation de cet l'aquifère [20].

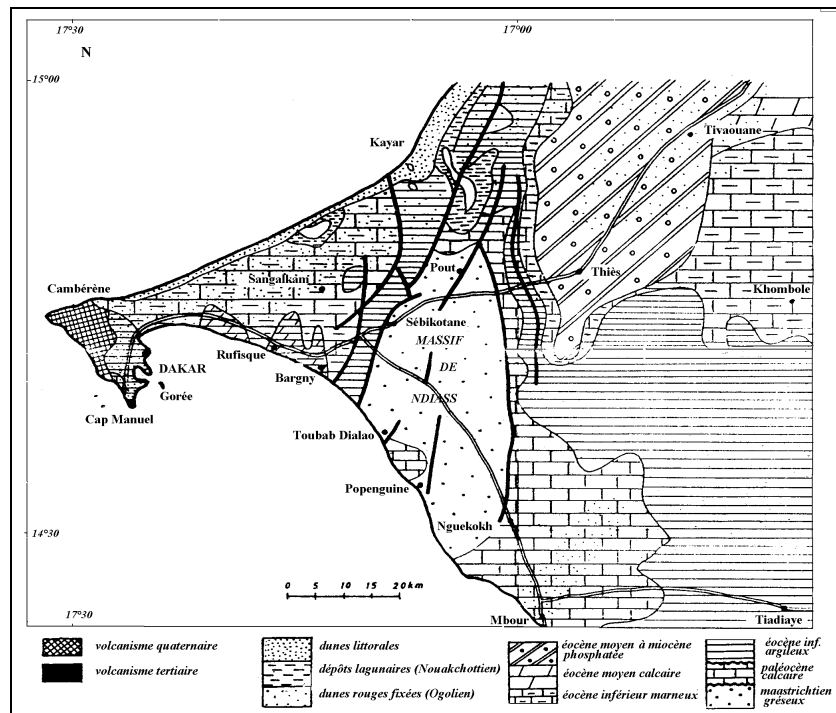


Figure 2 : Carte géologique des régions de Dakar et de Thiès [19]

Du fait de la grande variabilité de la géométrie de l'aquifère des sables quaternaires, les paramètres hydrodynamiques présentent également une variabilité spatiale. Les transmissivités varient de $2,45$ à $6,75.10^{-4}$ m²/s, les perméabilités de l'ordre de $0,40$ à $7,40.10^{-4}$ m/s et le coefficient d'emménagement allant de $1,06$ à $2,51$ % [2]. La piézométrie dans le secteur d'étude présente également des variations au cours de l'année et d'une année à l'autre suivant l'intensité de la pluviométrie et les conditions d'exploitation de la nappe. Les cartes piézométriques dans le secteur de Thiaroye/lac Mbeubeuss dressées à partir des données de mars 2003 et juillet 2002, montrent un sens d'écoulement global en direction de l'océan, des lacs intérieurs (Mbeubeuss et Retba) et des dépressions piézométriques (**Figures 3 et 4**). Cet écoulement est conditionné par la remontée du substratum marno-calcaire de l'Eocène vers le sud-est, conséquence des mouvements tectoniques ayant conduit à la mise en place des horsts de Dakar et de Ndiass et du graben de Rufisque-Bargny [20]. La distribution des niveaux piézométriques dans le secteur de Thiaroye/lac Mbeubeuss, se caractérise par la présence d'une aire d'alimentation de l'aquifère des sables quaternaires (ou dôme piézométrique) au puits (Pts-202).

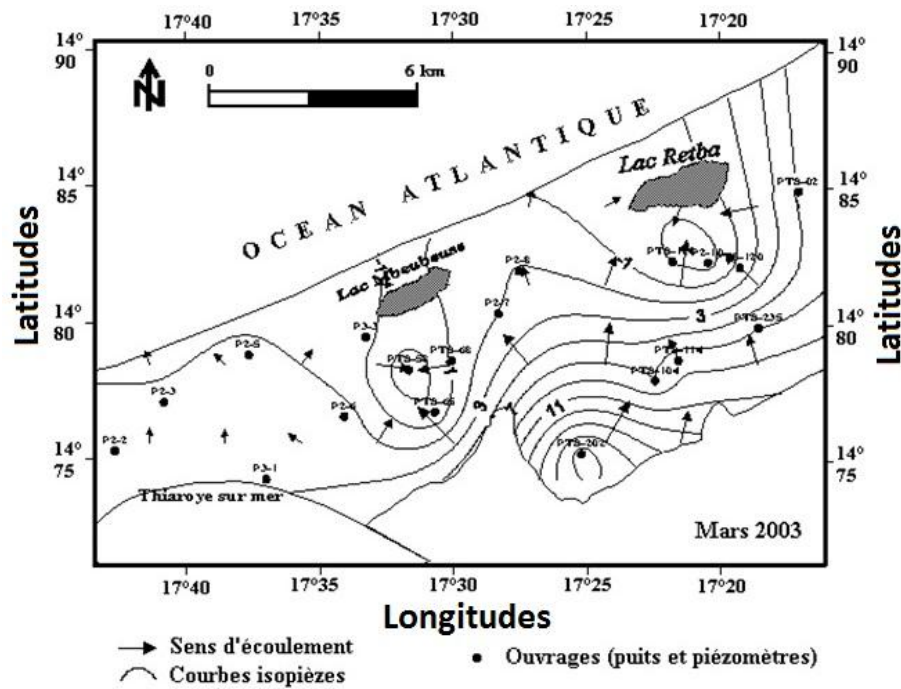


Figure 3 : Piézométrie de l'aquifère dans le secteur de Thiaroye/lac Mbeubeuss [21]

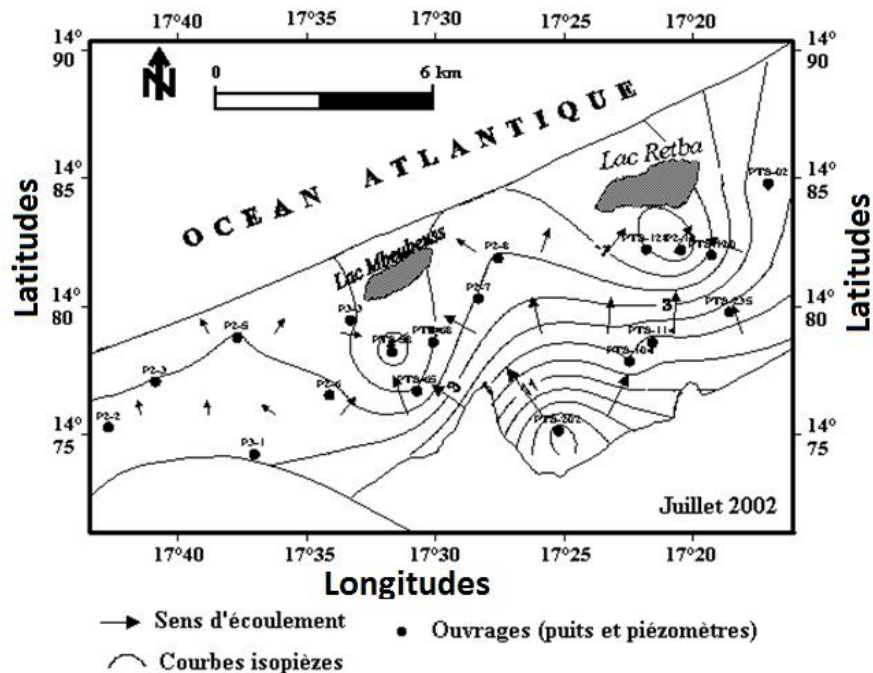


Figure 4 : Piézométrie de l'aquifère dans le secteur de Thiaroye/lac Mbeubeuss [21]

On remarque aussi l'existence de deux aires de vidange de la nappe des sables quaternaires (ou dépressions piézométriques), l'une englobant le puits (Pts-58, Pts-65 et Pts-68) dans la zone du lac Mbeubeuss / Keur Massar et l'autre autour des points d'eau (Pts-120, Pts-128 et P2-10) dans la zone du lac Retba. Les gradients hydrauliques sont généralement faibles et ne dépassent guère 1 % dans le secteur étudié [21].

2-2. Collecte et analyses chimiques des données

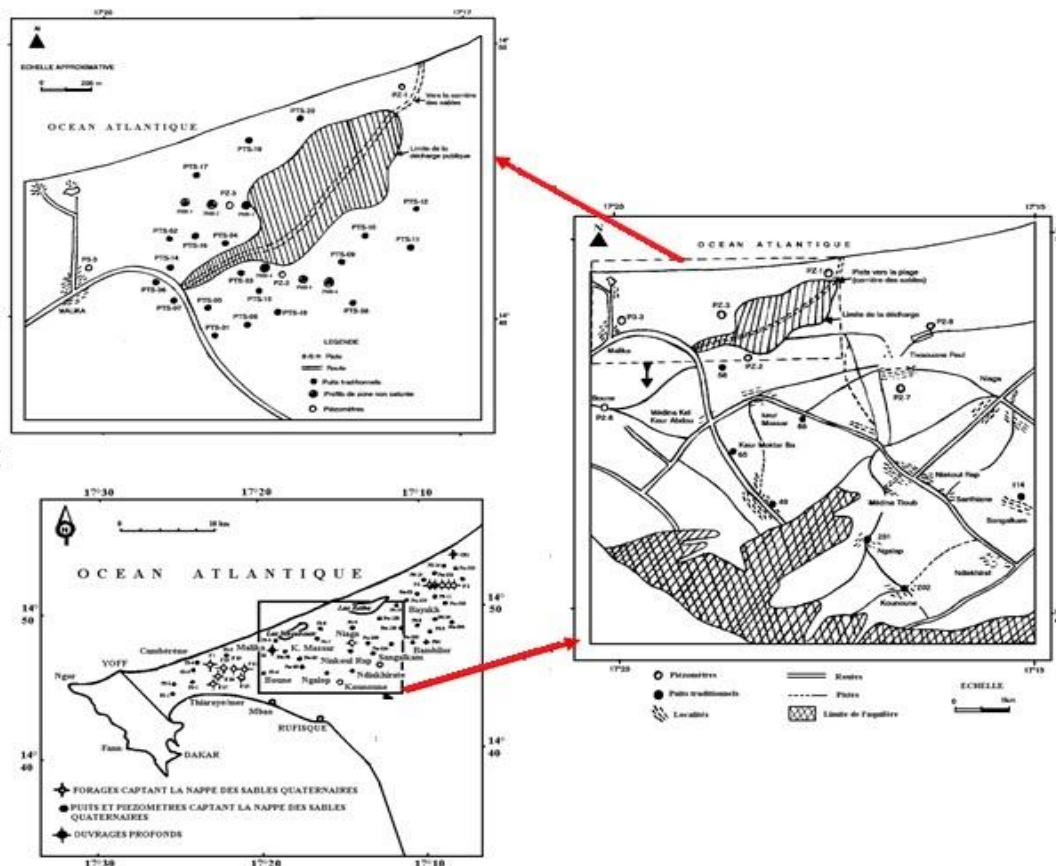


Figure 5 : Localisation des points d'eau échantillonnés [21]

De nombreux points d'eau (Forages, piézomètres et puits villageois) exploitant l'aquifère des sables quaternaires de Thiaroye / lac Mbeubeuss ont été réalisés suite aux différents programmes d'études concernant l'alimentation en eau potable de la région de Dakar. Ces points d'eau sont placés sous la responsabilité de la Direction de Gestion et Planification des Ressources en Eau (DGPRE) du Ministère Sénégalais de l'Hydraulique (Forages et piézomètres) et des maraîchers (Puits traditionnels). Pour cette étude, des prélèvements sur une trentaine de points d'eau dans le secteur de Thiaroye / lac Mbeubeuss, ont été réalisés les 16 et 17 juillet 1998 pour la première campagne, du 22 au 24 juillet 2002 pour la deuxième campagne et du 05 au 07 mars 2003 pour la troisième campagne. La localisation géographique des piézomètres et puits villageois échantillonnés pendant les campagnes de prélèvements, est matérialisée par la **Figure 5**. Sur le terrain les niveaux statiques de la nappe et les hauteurs des margelles par rapport au sol des piézomètres et puits villageois ont été mesurés à l'aide d'une sonde lumineuse et sonore. Parallèlement au suivi piézométrique, des paramètres physiques *in-situ* (température, pH et conductivité électrique) ont été mesurés et des échantillons d'eaux prélevés dans des bouteilles en polyéthylène bien étanches pour des fins d'analyses chimiques au laboratoire d'hydrologie et d'hydrochimie du département de Géologie de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar au Sénégal. Au laboratoire, les analyses chimiques des ions chlorures (Cl^-), sulfates (SO_4^{2-}), nitrates (NO_3^-), sodium (Na^+), magnésium (Mg^{2+}) et calcium (Ca^{2+}) ont été effectuées par chromatographie ionique au Dionex 100S, celles des ions carbonates (CO_3^{2-}) et bicarbonates (HCO_3^-) par titrimétrie et celles des ions phosphates (PO_4^{3-}) par chromatographie à la flamme. Un contrôle systématique des erreurs relatives ($|\varepsilon|$) sur les balances

ioniques des résultats des analyses chimiques a été réalisée pour l'ensemble des points d'eau analysés au laboratoire. Les erreurs relatives sont inférieures ou égales à 10 %, ce qui témoigne d'une bonne qualité des analyses chimiques et peuvent être traitées sans restriction à l'aide des différents logiciels de traitement des données hydrochimiques comme Diagramme développé par le laboratoire d'hydrogéologie de l'université d'Avignon en France, Microsoft Excel et XLSTAT pour l'analyse en composantes principales.

3. Résultats et discussion

3-1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines

Les paramètres statistiques (minimum, maximum, écart-type et coefficient de variation) qui caractérisent la distribution, ont été calculés pour chacune des variables physico-chimiques (**Tableau 1**). Le coefficient de variation (CV) est le rapport de l'écart type (S) sur la moyenne arithmétique. C'est un paramètre de mesure de la dispersion d'une série d'observations d'une variable autour de sa moyenne arithmétique. Si la valeur du CV est inférieure ou égale à 15 %, la variable observée a une distribution homogène autour de sa moyenne arithmétique et si la valeur du CV est supérieure ou égale à 15 %, la variable observée a une distribution hétérogène autour de sa moyenne arithmétique.

Tableau 1 : Paramètres statistiques des données physico-chimiques des eaux souterraines

(Campagne de juillet 1998)												
	T °C	pH	CE (μ S/cm)	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻
Min	26,84	5,03	218,00	07,00	02,25	11,50	03,16	36,00	02,18	07,32	00,00	-
Max	33,50	08,57	9990	1261	63,38	445,84	258,30	2064,45	2191	457,50	136,19	-
S	01,39	0,79	2176,84	277,63	14,83	106,29	60,13	452,97	521,77	92,99	44,11	-
CV(%)	05,00	11,95	131,52	187,21	115,23	75,08	167,17	186,55	185,99	87,65	87,26	-
Normes OMS	25	9,60	2000	100	12	100	50	200	250	-	50	2,20
(Campagne de juillet 2002)												
	T °C	pH	CE (μ S/cm)	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻
Min	27,60	3,18	215	26	2,37	15	1,35	33,33	4,85	0	0	0,12
Max	31,40	9,82	4720	603,80	35,55	225	104,44	963,94	966,64	250,1	221,42	3,47
S	1,01	1,22	95,874	112,48	8,22	61,37	22,82	204,37	213,22	67,19	57,73	0,70
CV (%)	3,37	17,66	92,49	116,91	90,03	83,74	111,43	111,54	174,80	70,81	83,74	94,59
Normes OMS	25	9,60	2000	100	12	100	50	200	250	-	50	2,20
(Campagne de mars 2003)												
	T °C	pH	CE (μ S/cm)	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻
Min	22,50	4,39	235	20,21	2,18	18,38	3,87	27,38	5,18	9,15	0,00	0,05
Max	29,20	9,96	5560	694,67	47,33	331,62	117,9	730,23	1576,49	289,75	221,22	1,58
S	1,69	0,86	1063,88	132,28	11,48	70,57	26,63	153,17	316,91	76,26	61,03	0,36
CV(%)	6,59	11,83	97,03	121,94	98,80	93,59	116,59	98,11	242,43	77,71	85,40	87,81
Normes OMS	25	9,60	2000	100	12	100	50	200	250	-	50	2,20

Les valeurs de température sont homogènes ($CV < 15 \%$) et comprises entre 26,84 (Pts-202) et 33,50 (Pts-17) pour la campagne de juillet 1998, entre 27,60 (Pts-58) et 31,40 (Pts-04) pour la campagne de juillet 2002 et entre 22,50 (Pts-10) et 29,20 (Pts-2) pour la campagne de mars 2003. Ces valeurs de températures des eaux sont très proches de celles des températures atmosphériques ambiantes. Ces résultats laissent penser à l'ouverture du système aquifère vis-à-vis des agents de surface et donc d'où sa vulnérabilité vis-à-vis de la pollution de surface. Les valeurs de pH sont homogènes ($CV < 15 \%$) et comprises entre 5,03 (Pts-65) et 8,57 (Pts-20) pour la campagne de juillet 1998, entre 3,18 (Pts-03) et 9,82 (Pts-68) pour la campagne de juillet 2002 et entre 4,39 (Pts-03) et 9,96 (Pts-68) pour la campagne de mars 2003. Ces valeurs de pH indiquent que les eaux souterraines sont acides à légèrement basiques. Les valeurs de conductivité électrique des eaux souterraines sont hétérogènes ($CV > 15 \%$) pour les trois campagnes. Elles varient de 218 $\mu S/cm$ (P3-3) à 9990 $\mu S/cm$ (Pts-14) pour la campagne de juillet 1998, de 215 $\mu S/cm$ (P3-3) à 4720 $\mu S/cm$ (Pts-03) pour la campagne de juillet 2002 et de 235 $\mu S/cm$ (P3-3) à 5560 $\mu S/cm$ (Pts-03) pour la campagne de mars 2003. Ces valeurs de conductivité électrique sont moyennes ($< 2000 \mu S/cm$) au niveau des points d'eau plus éloignés de la décharge et fortes ($> 2000 \mu S/cm$) [22] au niveau des points d'eau plus proches de la décharge (*Figure 6*).

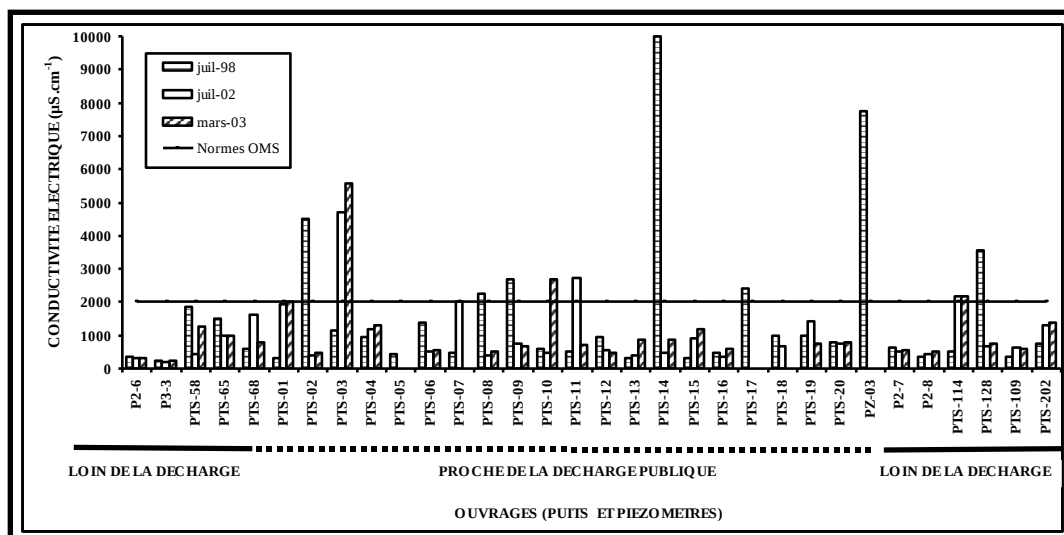


Figure 6 : Comparaison aux normes OMS des conductivités électriques dans le secteur de Thiaroye/lac Mbeubeuss

Les teneurs en ions majeurs présentent une distribution semblable à celle de la conductivité électrique. Ces ions montrent d'ailleurs une corrélation significative avec celle-ci. Les paramètres chimiques ont des valeurs maximales au-dessus de la valeur limite potables des eaux [22]. Elles indiquent que les eaux souterraines présentent de fortes différences de qualité chimique d'un point à l'autre. Les teneurs en chlorures sont très importantes d'un point à un autre. Elles varient de 36 mg/L (P3-3) à 2064,50 mg/L (Pts-14) pour la campagne de juillet 1998, de 33,33 mg/L (Pts-13) à 963,94 mg/L (Pts-03) pour la campagne de juillet 2002 et de 27,38 mg/L (P3-3) à 730,23 mg/L (Pts-03) pour la campagne mars 2003 et dépassent la concentration maximale admissible de 250 mg/L définie pour l'eau de boisson [22]. L'évolution des teneurs en chlorures (*Figure 7*) montre une distribution similaire à celle de la conductivité électrique. Elle est caractérisée par des zones de concentrations élevées dans les secteurs situés aux alentours de la décharge publique.

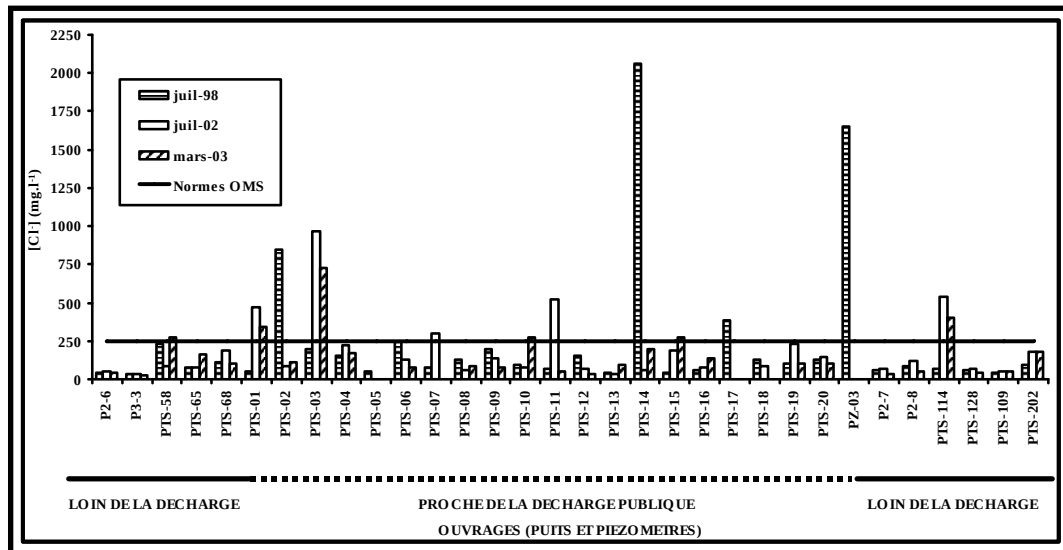


Figure 7 : Comparaison aux normes OMS des teneurs en chlorures dans le secteur de Thiaroye/lac Mbeubeuss

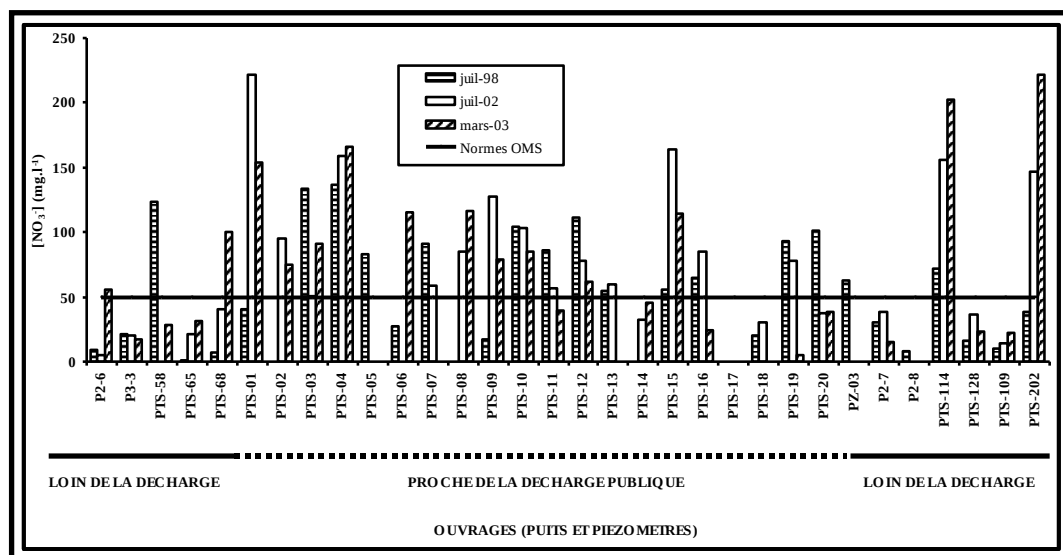


Figure 8 : Comparaison aux normes OMS des teneurs en nitrates dans le secteur de Thiaroye/lac Mbeubeuss

En effet, les déchets des ordures ménagères renferment des teneurs importantes en chlorures. La dégradation de ces déchets au niveau des décharges produit des percolats très chargés en chlorures. L'ion chlorure est un élément très mobile, qui migre facilement vers les nappes sous-jacentes. Il n'est pas affecté par les phénomènes d'adsorption ou d'échanges d'ions, il n'intervient pas dans les équilibres acido-basiques ou d'oxydoréduction et il n'est pas retenu par les complexes argilo-humiques des sols. C'est pourquoi il est fréquemment utilisé comme un bon traceur conservatif qui permet de mettre en évidence l'impact des lixiviats sur la qualité physico-chimique des nappes phréatiques [23 - 25]. Les eaux naturelles non polluées ne contiennent généralement que des concentrations faibles en nitrates. Les nitrates comme les chlorures sont également un indice de la pollution des eaux souterraines par les activités anthropiques. Les concentrations

en nitrates dans les puits sont hétérogènes ($CV > 15 \%$) pour les trois campagnes. Elles varient de 0 mg/L (Pts-08) à 136,19 mg/L (Pts-03) pour la campagne de juillet 1998, de 0 mg/L (Pts-06) à 221,42 mg/L (Pts-01) pour la campagne de juillet 2002 et de 0 mg/L (Pts-13) à 221,22 mg/L (Pts-202) pour la campagne de mars 2003. Les eaux des puits P2-6, Pts-58, Pts-68, Pts-01, Pts-02, Pts-03, Pts-04, Pts-05, Pts-06, Pts-07, Pts-08, Pts-09, Pts-10, Pts-11, Pts-12, Pts-13, Pts-15, Pts-16, Pts-19, Pts-20, Pz-03, Pts-114 et Pts-202, situés aux alentours de la décharge publique et dans les villages à forte concentration de population, ont des teneurs en nitrates qui dépassent largement la limite admissible de potabilité (50 mg/L) [22] (*Figure 8*). Ces résultats correspondent à ceux des études antérieures menées dans cette région qui corrélient les fortes concentrations en nitrates à l'occupation des sols [2 – 5].

Les teneurs en phosphates sont comprises entre 0,12 mg/L (Pts-16) et 3,47 mg/L (Pts-03) pour la campagne de juillet 2002 ; 0,05 mg/L (Pts-109) et 1,58 mg/L (Pts-12) pour la campagne de mars 2003. Les teneurs en phosphates sont supérieures à la valeur limite de potabilité (2,20 mg/L)[22]. Les teneurs les plus élevées sont enregistrées dans les puits (Pts-03 et Pts-11) qui sont proches de la décharge publique (*Figure 9*).

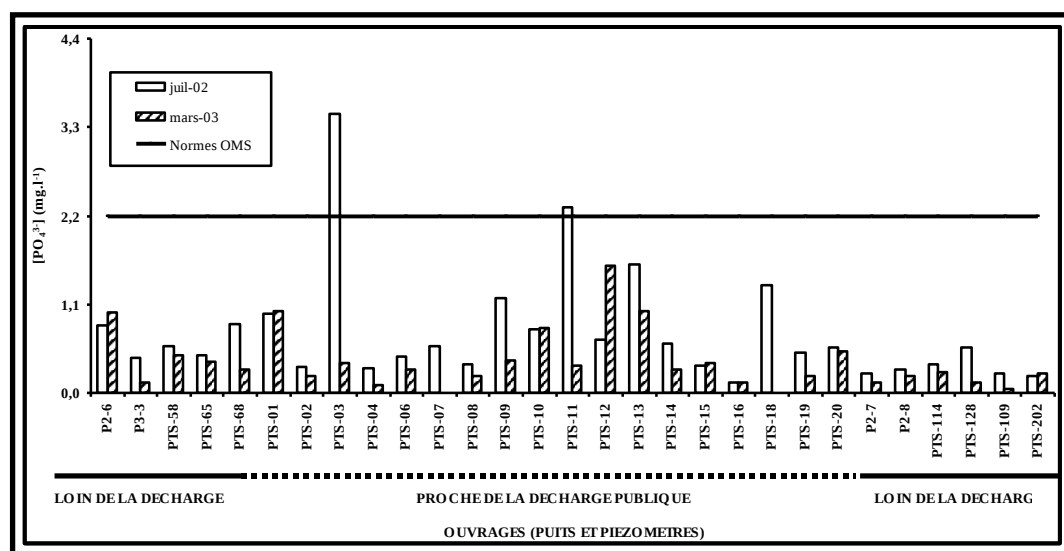


Figure 9 : Comparaison aux normes OMS des teneurs en phosphates dans le secteur de Thiaroye/lac Mbeubeuss

Les données des analyses chimiques de juillet 1998, juillet 2002 et mars 2003 sont reportées sur les diagrammes triangulaires de Piper pour déterminer les familles et faciès géochimiques des eaux de l'aquifère des sables quaternaires dans le secteur de Thiaroye/lac Mbeubeuss (*Figure 10*). L'interprétation des résultats du diagramme de Piper montre que pour les trois campagnes de prélèvement, les eaux de l'aquifère des sables quaternaires sont dominées par les familles chimiques chlorurées sulfatées calciques et magnésiennes et chlorurées sulfatées sodiques et potassiques. Les faciès chimiques sont chloruré sodique et potassique et chloruré calcique.

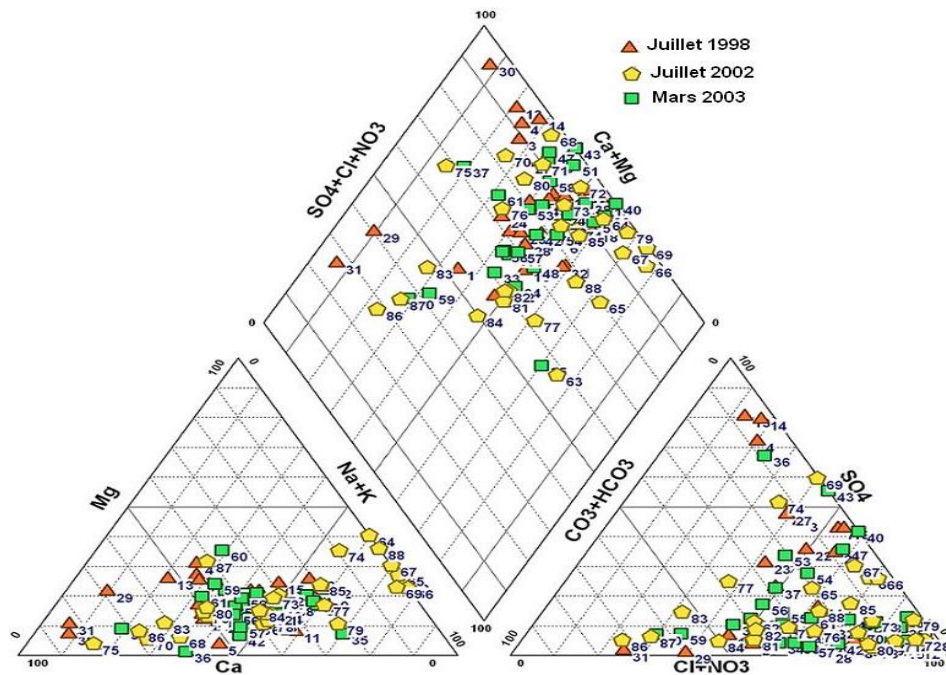


Figure 10 : Diagramme de Piper des eaux souterraines

Dans les détails, l'évolution chimique des eaux souterraines au cours des différentes campagnes de prélèvement, se présente comme suit :

- ✓ pour la campagne de juillet 1998, le diagramme triangulaire des anions, présente une prédominance des points à évolution vers le pôle chloruré (76 %) et 24 % des points d'eau sont décalés vers le pôle sulfaté et le centre du triangle, où l'on ne note aucune prédominance d'un anion sur l'autre. Cependant, dans le diagramme triangulaire des cations, les points d'eaux se répartissent en trois groupes : le premier à évolution vers le pôle sodique (39 %), le deuxième vers le pôle calcique (18 %) et le troisième vers la zone centrale mixte de non prédominance des différents cations (43 %). Dans le diagramme quadrangulaire, les eaux sont réparties en plusieurs faciès : les eaux chlorurées sodiques ; les eaux chlorurées calciques et les eaux sulfatées calciques ;
- ✓ alors que pour la campagne de juillet 2002, dans le diagramme triangulaire des anions, on distingue toujours trois groupes de points : le premier proche du pôle chloruré (72 %), le deuxième à évolution vers le pôle sulfaté (8 %) et le troisième vers la zone centrale mixte (20 %). Dans le diagramme triangulaire des cations, il y a toujours trois groupes de points d'eau : le premier à évolution vers le pôle sodique (36 %), le deuxième vers le pôle calcique (8 %) et le troisième vers la zone centrale mixte de non prédominance des différents cations (56 %) et dans le diagramme quadrangulaire, on peut distinguer les faciès suivants : les eaux chlorurées sodiques ; les eaux chlorurées calciques et les eaux sulfatées calciques ;
- ✓ pour la campagne de mars 2003, dans le diagramme triangulaire des anions, les points d'eau se répartissent en quatre groupes : le premier proche du pôle chloruré (73 %), le deuxième groupe proche du pôle sulfaté (9 %), le troisième vers le pôle bicarbonaté (9 %) et dernier groupe au centre du triangle des anions (9 %). Dans le diagramme triangulaire des cations, on distingue toujours trois groupes de point d'eau : le premier à évolution vers le pôle sodique (39 %), le deuxième vers le pôle calcique (P2-7) et le troisième vers la zone mixte de non prédominance des différents cations (57 %). Cependant, dans le diagramme quadrangulaire, les eaux sont réparties en plusieurs faciès : les eaux chlorurées sodiques ; les eaux chlorurées calciques et les eaux sulfatées calciques et les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes.

Les points d'eau qui se répartissaient d'une manière générale en deux faciès chimiques (chloruré sodique et chloruré sulfaté calcique) en juillet 1998 et en juillet 2002, se répartissent en trois faciès chimiques (chloruré sodique, chloruré sulfaté calcique et bicarbonaté calcique) pour la campagne de mars 2003. Cette séparation est le résultat au cours de la dernière campagne d'une augmentation des teneurs en bicarbonates et en calcium et d'une diminution de teneurs en sodium au niveau des piézomètres (P2-7 et P2-8). Le **Tableau 2** présente les matrices de corrélation entre les différentes variables chimiques analysées des eaux souterraines pour les trois campagnes de juillet 1998, juillet 2002 et mars 2003. Il indique que les ions majeurs (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- et SO_4^{2-}) sont bien corrélés avec la conductivité électrique (CE). Toutefois, la bonne corrélation entre les teneurs en ions majeurs (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- et SO_4^{2-}) montre que la minéralisation totale des eaux est essentiellement due à ces éléments et dès lors, ils participent significativement à l'augmentation de la charge saline.

Tableau 2 : Matrices de corrélations des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines

(Campagne de juillet 1998)											
	pH	CE	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	
pH	1,00										
CE	0,11	1,00									
HCO_3^-	0,26	0,68	1,00								
Cl^-	0,16	0,98	0,69	1,00							
SO_4^{2-}	-0,03	0,93	0,52	0,84	1,00						
NO_3^-	0,18	-0,26	-0,07	-0,21	-0,45	1,00					
Na^+	0,14	0,99	0,67	1,00	0,87	-0,24	1,00				
K^+	0,08	0,96	0,73	0,93	0,91	-0,25	0,94	1,00			
Mg^{2+}	0,01	0,96	0,73	0,92	0,92	-0,20	0,93	0,96	1,00		
Ca^{2+}	0,04	0,90	0,64	0,81	0,97	-0,30	0,83	0,90	0,92	1,00	
(Campagne de juillet 2002)											
	pH	CE	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	PO_4^{3-}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
pH	1,00										
CE	-0,53	1,00									
HCO_3^-	0,68	0,10	1,00								
Cl^-	-0,57	0,97	-0,15	1,00							
SO_4^{2-}	-0,65	0,92	-0,26	0,85	1,00						
NO_3^-	-0,14	0,16	-0,22	0,23	-0,07	1,00					
PO_4^{3-}	-0,48	0,77	-0,11	0,76	0,74	-0,09	1,00				
Na^+	-0,63	0,94	-0,23	0,97	0,87	0,19	0,75	1,00			
K^+	-0,59	0,88	-0,20	0,87	0,83	0,27	0,63	0,84	1,00		
Mg^{2+}	-0,64	0,97	-0,23	0,97	0,88	0,24	0,75	0,94	0,89	1,00	
Ca^{2+}	-0,18	0,85	-0,20	0,75	0,74	0,09	0,56	0,65	0,66	0,75	1,00
(Campagne de mars 2003)											
	pH	CE	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	PO_4^{3-}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
pH	1,00										
CE	-0,65	1,00									
HCO_3^-	0,20	0,01	1,00								
Cl^-	-0,67	0,95	-0,14	1,00							
SO_4^{2-}	-0,64	0,98	-0,02	0,90	1,00						
NO_3^-	-0,24	0,31	-0,35	0,35	0,21	1,00					
PO_4^{3-}	-0,02	0,08	0,25	0,03	0,09	0,05	1,00				
Na^+	-0,69	0,98	-0,11	0,97	0,96	0,33	0,04	1,00			
K^+	-0,46	0,84	0,12	0,77	0,77	0,53	-0,01	0,80	1,00		
Mg^{2+}	-0,58	0,96	0,06	0,94	0,94	0,29	0,15	0,91	0,79	1,00	
Ca^{2+}	-0,59	0,98	0,13	0,97	0,97	0,26	0,13	0,95	0,82	0,96	1,00

3-2. Analyse en composantes principales

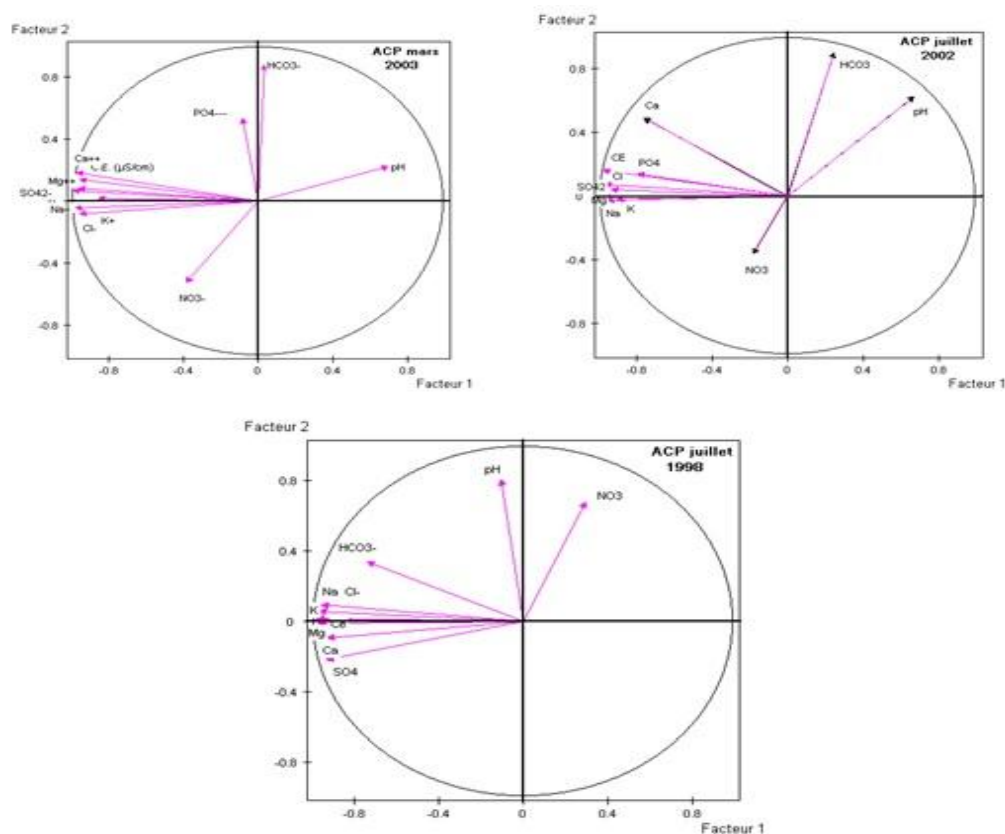


Figure 10 : *Représentation des variables chimiques dans le plan des deux premiers axes F1 et F2 des eaux souterraines*

Les analyses en composantes principales (ACP) sont largement utilisées pour interpréter les données hydrochimiques des hydrosystèmes [26 - 28]. L'ACP est une méthode statistique essentiellement descriptive. Elle permet d'apprécier les relations entre les variables quantitatives et la répartition des individus en les représentant dans des espaces réduits à deux dimensions (plans factoriels). Ces espaces sont obtenus par combinaisons linéaires des variables quantitatives initiales, qui donnent des indices synthétiques représentant chacun une variance maximale des individus tout en étant non corrélé aux autres : ce sont les composantes principales ou axes principaux [29 - 30]. Les vecteurs propres sont des coefficients des combinaisons linéaires des variables initiales. Les variables possédant le plus grand coefficient en valeur absolue, contribuent le plus à la définition de l'axe. L'information donnée par ces axes diminue au fur et à mesure, à partir du premier axe, de telle sorte que seuls les plans construits avec les composantes les plus représentatives seront considérés. Ces dernières sont déterminées avec les valeurs propres (variances sur les axes principaux) exprimées en pourcentage de contribution à la variation totale. Aussi le plan principal (1-2) constitué par les deux premiers axes sera en général suffisant pour expliquer l'essentiel de la variance du nuage de points. Le premier axe factoriel (F1) est celui qui explique le plus grand pourcentage de cette variance totale (axe du réservoir), le second (F2) explique ensuite le plus grand pourcentage de variance résiduelle (axe anthropique) [31 - 32]. Le premier axe factoriel (F1) explique 71,35 % pour la campagne de juillet 1998, 65,72 % pour la campagne de juillet 2002 et 63,96 % pour la campagne de mars 2003 et le deuxième axe factoriel (F2) 12,96 % pour la campagne de juillet 1998,

14,77 % pour la campagne de juillet 2002 et 13,31 % pour la campagne de mars 2003. Le plan associé à ces deux axes prend ainsi en compte 84,31 % pour la campagne de juillet 1998, 80,49 % pour la campagne de juillet 2002 et 77,27 % pour la campagne de mars 2003 et restitue en conséquence une information assez proche des données hydrochimiques initiales. L'interprétation des résultats peut donc être limitée aux deux premiers axes et on obtient des diagrammes factoriels (*Figure 11*) qui montrent :

- la conductivité électrique, le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, les sulfates et les chlorures qui sont bien corrélés à l'axe factoriel (F1) (axe du réservoir). L'axe factoriel F1 correspond à la minéralisation totale des eaux souterraines ;
- les bicarbonates qui sont liés surtout à la dégradation anthropique de la qualité de l'eau et ayant une abscisse importante sur l'axe factoriel (F2) (axe anthropique).

4. Conclusion

La caractérisation hydrochimique des eaux de l'aquifère des sables quaternaires dans le secteur de Thiaroye / lac Mbeubeuss montre que :

- les eaux souterraines ont des pH acides à légèrement basiques, la température des eaux souterraines est proche de la température ambiante. Ceci suggère que cet aquifère constitue un système ouvert avec son environnement, d'où sa vulnérabilité vis-à-vis de la pollution de surface ;
- les eaux sont moyennement à fortement minéralisées ;
- le diagramme de Piper des trois campagnes de prélèvement met en évidence les eaux qui sont dominées par les familles chimiques chlorurées sulfatées calciques et magnésiennes et chlorurées sulfatées sodiques et potassiques. Deux faciès chimiques prédominants : le chloruré sodique et potassique et le chloruré calcique.

L'aquifère des sables quaternaires dans le secteur de Thiaroye/lac Mbeubeuss présente une vulnérabilité à la pollution anthropique à cause de la faible profondeur de la nappe par rapport au sol et de la nature du réservoir aquifère constitué essentiellement de matériaux sableux très perméables facilitant le transfert des polluants de la surface du sol vers la nappe. L'étude de la qualité chimique des eaux souterraines révèle des concentrations élevées en chlorures, sulfates, nitrates et phosphates dans les puits proches de la décharge publique. Celles-ci témoignent d'une contribution de la décharge publique à la contamination des eaux souterraines dans le secteur de Thiaroye / lac Mbeubeuss. L'analyse en composante principale confirme la contamination de ces eaux souterraines par les éléments chimiques précités.

Références

- [1] - X. CHOCAT, "Encyclopédie de l'hydrogéologie urbaine et de l'assainissement", *Edition Lavoisier*, Paris (France), (1997) 1124 p.
- [2] - S. CISSE FAYE, "Nappe libre des sables quaternaires Thiaroye/Beer Thialane. Etude de la contamination par les nitrates sur la base d'un système d'information géographique (PC ARC/INFO)", *Thèse de Doctorat*, Université C.A.D., (Sénégal) / IAAG, (Allemagne), (2000)
- [3] - A. A. TANDIA, "Origine, évolution et migration des formes de l'azote minéral dans les aquifères situés sous environnement périurbain non assaini : cas de la nappe des quaternaires de la région de Dakar", *Thèse doctorat d'Etat*, Université C.A.D., (Sénégal), (2000)
- [4] - S. CISSE FAYE, S. FAYE, S. WOHLICH and C. B. GAYE, "An assessment of the risk associated with urban development in the Thiaroye area (Senegal)", *Environ Geol*, 45, (2004) 312-322

- [5] - O. O. OGUNDIRAN and T. A. AFOLABI, "Assessment of the physicochemical parameters and heavy metal toxicity of leachate from municipal solid waste open dumpsite", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 5(2), (2008) 243-250
- [6] - N. RAMAN and D. SATHIYA NARAYANAN, "Impact of solid waste effect on ground water and soil quality nearer to pallavaram solid waste landfill site in Chennai", *Rasayan J. Chem.* Vol.1, n°4 (2008) 826 - 836
- [7] - P. VASANTHI, S. KALIAPPAN and R. SRINIVASARAGHAVAN, "Impact of poor solid waste management on groundwater", *Journal of Environment Monitoring and Assessment*, Springer, (Netherlands), 143(1-3), (2008) 227-238
- [8] - E. AL SABAHI, S. ABDUL RAHIM, W. Y. WAN ZUHAI, F. AL NOZAILY, F. ALSHAEBI, "The characteristics of leachate and groundwater pollution at municipal solid waste landfill of Ibb City, Yemen", *American Journal of Environmental Sciences*, 5 (2009) 256-266.
- [9] - E. O. LONGE and M. R. BALOGUN, "Groundwater quality assessment near a municipal landfill, Lagos, Nigeria, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Lagos, Nigeria", *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2(1) (2010) 39-44
- [10] - E. O. LONGE, M. R. BALOGUN, "Groundwater quality assessment near a municipal landfill, Lagos, Nigeria", *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2 (2010) 39-44
- [11] - T. M. ALSLAIBI, Y. K. MOGHEIR and S. AFIFI, "Assessment of groundwater quality Due to Municipal solid waste landfills leachate", *Journal of Environmental Science and Technology*, 4(4) (2011) 419 - 436
- [12] - C. O. AKINBILE, "Environmental Impact of Landfill on Groundwater Quality and Agricultural Soils in Nigeria", *Soils and Water Res.*, 7(1), (2012) 18 - 26
- [13] - GUNJAN BHALLA, P. K SWAMEE, ARVIND KUMAR, AJAY BANSAL, "Assessment of groundwater quality near municipal solid waste landfill by an Aggregate Index Method", *International Journal of Environmental Sciences*, Volume 2, n° 2 (2012) 1492-1503
- [14] - A. C. OYELAMI, O. A. OLABANJI, A. J. ABIMBOLA, A. OLAMIDE, "Assessing the Effect of a Dumpsite on Groundwater Quality: A Case Study of Aduramigba Estate within Osogbo Metropolis", *Journal of Environment and Earth Science*, Vol. 3, n°1 (2013) 120-131
- [15] - M. M. ABD EL-SALAM, G. I. ABU-ZUID, "Impact of landfill leachate on the groundwater quality : A case study in Egypt", *Journal of Advanced Research*, 6, (2015) 579 - 586
- [16] - S. HAOUCHINE, "Recherche sur la qualité faunistique et l'écologie des Macroinvertébrés benthiques des cours d'eau de Kabylie", *Mém. Magister Sciences Bio.* 216X Vol.55, n°2 (2011) 291-300
- [17] - M. S FOTO, T. S. H. ZEBAZE, T. N. L NYAMSI, G. A. AJEAGAH et T. NJINE, "Evolution Spatiale de la Diversité des Peuplements de Macroinvertébrés Benthiques dans un cours d'eau Anthropisé en Milieu Tropical (Cameroun)" *European Journal of Scientific Research* ISSN 1450-216X Vol.55, n°2 (2011) 291-300
- [18] - Y. J. BELLION, "Histoire géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudenni, Iullemeden, Tchad)". *Thèse de Doctorat ès-Sciences*, Université d'Avignon, (France), (1987)
- [19] - A. FAYE, "Recharge et paléorecharge des aquifères profonds du bassin du Sénégal. Apport des isotopes stables et radioactifs de l'environnement et implication paléohydrogéologique et paléoclimatique". *Thèse doctorat d'Etat es-Sciences*, Université C.A.D., Sénégal, (1994)
- [20] - A. MARTIN, "Les nappes de la presqu'île du Cap Vert. Leur utilisation pour l'alimentation en eau de Dakar", *Publ. BRGM*, (1970)
- [21] - O. F. ESSOULI, "Impact de la décharge publique du lac Mbeubeuss sur les ressources en eau de l'aquifère des sables quaternaires de Thiaroye (Dakar, Sénégal)", *Thèse de doctorat 3^{ème} cycle*, Université C.A.D., Sénégal, (2005)
- [22] - OMS/WHO, "Guidelines for drinking water quality". Suisse, (2004)

- [23] - C. A. J. APPELO, D. POTSMAN, "Geochemistry, groundwater and pollution", *A. A. Balkema*, Rotterdam, (1993) 540 p
- [24] - H. KHATTABI, A. LOTFI, J. MANIA, "Evolution temporelle de la composition du lixiviat d'une décharge à ciel ouvert : effet des précipitations", *Déchets, Sciences et Techniques*, 21 (2001) 7-10
- [25] - H. KHATTABI, A. LOTFI, J. MANIA, "Evaluation de l'impact des lixiviats d'une décharge d'ordures ménagères sur la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux d'un ruisseau de Franche-Comté". *Déchets, Sciences et Techniques*, 24 (2002) 1- 4
- [26] - M. MAKHOUKH, M. SBAA, A. BERRAHOU, M. VAN CLOOSTER, "Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'oued Moulouya (Maroc oriental)", *Larhyss Journal* ISSN 1112-3680, n° 09 (2011) 149-169
- [27] - D. LAMRI, D. BELGHITI, "Bio-évaluation de la qualité des eaux par application des indices biotiques : Cas de l'Oued Moulouya (Maroc)", *Science Lib Editions Mersenne* Vol. 3, n ° 110905, ISSN, (2011) 2111-4706
- [28] - M. L. BELGHITI, A. CHAHLAOUI, A. BENGOUNI, "Caractéristiques physico-chimiques des eaux de certains puits utilisés comme source d'eau potable en milieu rural dans la région de Meknès (Maroc)", *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 14 (2013) 21-36
- [29] - J. GROLIER et J. RISS, "Mathématiques pour les Sciences de la Terre", *Ed. Masson*, (Paris), (1997)
- [30] - G. PHILIPPEAU, "Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales", (1986)
- [31] - S. DADI, M. RAZACK, F. LAZIRI, M. BOUTALEB. & A. M. EL BOUKHARI, "Synthèse hydrogéologique et caractérisation hydrogéologique des eaux souterraines du massif cristallophyllien d'Oulmès (Maroc)". *Hydrogéologie*, 1998
- [32] - Y. TRAVI & J. MUDRI, "Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitraté dans les aquifères de socle de la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest", *Hydrogéologie*, 1997