

Evolution spatio-Temporelle Des Teneurs en Nitrates Des Eaux Souterraines De La Ville d'Abidjan (CÔTE D'IVOIRE)

*AHOUSI Kouassi Ernest¹, LOKO Solange², KOFFI Yao Blaise¹, SORO Gbombélé¹, OGA Yéi Marie Solange¹, SORO Nagnin¹

¹Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, Unité de Formation et de Recherche (UFR) des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM) ; 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

²Université Technologique et Tertiaire Loko (UTTLOKO), Laboratoire de chimie et de Microbiologie, 05 BP 671 Abidjan 05 Côte d'Ivoire

*Corresponding Author Email: ahoussi@gmx.fr

RESUMÉ

Cette étude se propose de suivre l'évolution temporelle des teneurs en nitrates des eaux souterraines et de cartographier leur distribution spatiale. Les teneurs en nitrates observées dans les eaux de la ville d'Abidjan diffèrent d'un aquifère à l'autre. En effet, les eaux de la nappe du Quaternaire sont les plus riches en nitrates, avec des teneurs qui varient de 0,05 mg/L à 196,20 mg/L, pour une moyenne de 49,42 mg/L. Ces teneurs sont supérieures à la norme OMS (50 mg/L) pour une eau de consommation. Au niveau des eaux de la nappe du Continental Terminal (CT), les teneurs en nitrates varient de 0 à 120 mg/L, avec une moyenne de 13,07 mg/L. Dans le Continental Terminal, les teneurs excessives en nitrates sont observées dans les localités du Plateau, d'Adjamé et de Yopougon Zone Ouest. La distribution spatiale des nitrates dans les eaux de la nappe du Quaternaire montre que la majorité des points de captage de cette nappe est soumise à une pollution nitratée. Cette étude montre que dans les eaux de la nappe du Continental Terminal, la pollution nitratée évolue selon deux grands foyers. Le premier foyer est Sud-Nord, ce qui signifie du Plateau vers Adjamé. Le second est Est-Ouest, en progression vers Yopougon Zone Ouest. La distribution temporelle des teneurs en nitrates des eaux de la nappe du Continental Terminal dans la ville d'Abidjan a montré que depuis des décennies, les teneurs en nitrates ont subi une hausse. Cette augmentation des teneurs en nitrates est en rapport avec la croissance démographique et l'urbanisation galopante de la ville d'Abidjan.

Mots clés : Activités anthropiques, eaux souterraines, environnement, nitrates, pollution.

ABSTRACT

This study proposes to follow the temporal evolution of nitrate in groundwater and map their spatial distribution. Nitrate levels observed in the waters of the city of Abidjan differ from one aquifer to another. Indeed, the waters on the Quaternary contain high values of nitrate, with grades ranging from 0.05 mg / L to 196.20 mg / L, with an average of 49.42 mg / L. These levels are higher than the WHO standard (50 mg / L) for drinking water. The water of the Continental Terminal (CT) has nitrate levels range from 0 to 120 mg / L, with an average of 13.07 mg / L. In the Continental Terminal, excessive nitrate levels are observed in the areas of Plateau, Adjamé and Yopougon West Zone. The spatial distribution of nitrate in the waters of the quaternary layer shows that the majority of catchments of this sheet is subject to nitrate pollution. This study shows that in the waters of the Continental Terminal water, the nitrate pollution along two major outbreaks. The first area is South-North, which means to Adjamé-Plateau. The second is East-West up to Yopougon West Zone. The temporal distribution of nitrate in water from the Continental Terminal in Abidjan showed that for decades, nitrate levels have been rising. This increase in nitrate is related to population growth and rapid urbanization of the city of Abidjan.

Keywords: Human activities, groundwater, environment, nitrate pollution.

INTRODUCTION

L'accès à l'eau potable constitue l'une des préoccupations de toute l'humanité. Pour cette raison, depuis des décennies, les États et les gouvernements d'Afrique en général et de la Côte d'Ivoire en particulier, s'attellent à doter leur population d'infrastructures hydrauliques adéquates. A Abidjan, la croissance démographique et l'urbanisation de la ville ont contribué à rendre inefficaces les énormes efforts fournis par l'État ivoirien. Ainsi, la quantité des ressources en eau fournie aux populations est restée insuffisante. En plus, la décennie de crise militaro-politique qu'a connue le pays depuis les années 2002 a provoqué un déplacement massif des populations depuis les villes de l'intérieur du pays vers la ville d'Abidjan. Cela a provoqué l'augmentation des besoins en eau des populations, qui jusque là n'avaient pas été comblés par les nombreux forages implantés par l'état de Côte d'Ivoire, à Abidjan dans l'aquifère du Continental Terminal (CT). En effet, l'accroissement des besoins en eau des populations a entraîné l'augmentation des débits des forages, ce qui est à l'origine des nombreuses pannes des forages. En plus de ces nombreux problèmes, les études de Soro *et al.* (2006) ont mis en évidence une variabilité pluviométrique dans la région. Cette variation des amplitudes pluviométriques dans la région a pour conséquence la réduction des précipitations efficaces à l'origine de la recharge des nappes d'eau souterraine de la ville d'Abidjan. Les dernières études réalisées sur la qualité des eaux de la nappe phréatique de la région d'Abidjan par Jourda *et al.* (2006), Ahoussi *et al.* (2008 ; 2010) ont relevé que ces eaux étaient confrontées à une pollution anthropique. De même, certains forages qui captent la nappe du Continental Terminal (CT) au niveau de la ville d'Abidjan sont également confrontés à une pollution liée aux activités anthropiques. En outre, les études menées par Coulibaly *et al.* (2008) ; Soro *et al.* (2009) ; Soro *et al.* (2010) ; Ahoussi *et al.* (2012) montrent que les ressources en eau d'Abidjan sont confrontées à une pollution d'origine anthropique. Cette pollution a dégradé la qualité des eaux et provoqué l'abandon de plusieurs forages de la ville d'Abidjan. C'est le cas des forages des stations de captage du Plateau et d'Adjamé. En effet, le prix de vente de l'eau fixé par l'Etat ivoirien est amorti par les eaux souterraines de la ville d'Abidjan car le traitement de ces eaux est facile et à faible coût. Ce qui permet à l'état ivoirien de compenser le prix global de vente d'eau en Côte d'Ivoire. Les pollutions annoncées partout dans les eaux souterraines du bassin peuvent contribuer à une perturbation et entraîner une augmentation du prix de l'eau sur toute l'étendue du territoire ivoirien. Cette étude a pour objectif d'identifier les différents sites touchés par la pollution et de faire une cartographie spatiale de la pollution nitratée des eaux souterraines de la ville d'Abidjan à partir d'analyses physico-chimiques.

Cadre géographique, géologique et hydrogéologique

La zone d'étude, représentée par la ville d'Abidjan, est située au Sud de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 5°00' et 5°30' N et les longitudes 3°50' et 4°10' W. Elle est composée de dix communes et s'étend sur une superficie de 57 735 hectares dont 8 981 hectares de lagune, soit 16% de la superficie (**Figure 1**). La ville d'Abidjan, représente la capitale économique du pays et regroupe la majeure partie des activités industrielles et administratives du pays.

Le climat est de type équatorial, avec une pluviométrie interannuelle moyenne supérieure à 1800 mm. Elle est caractérisée par quatre saisons dont deux saisons pluvieuses comprenant une grande saison de pluie d'avril à juillet et une petite saison de pluie d'octobre à novembre. Ces deux saisons sont entrecoupées par deux périodes sèches qui s'étendent de décembre à mars et d'août à septembre. La température moyenne mensuelle mesurée à la station d'Abidjan au cours de la période 1984-2000 varie de 24 °C à 30 °C, avec une valeur moyenne de 26 °C. L'insolation moyenne relevée à Abidjan pendant la période 1984-2000 dure en moyenne 6 à 7 h/j, à l'exception des mois de juin, juillet, août et septembre où elle est en-dessous de 6 h/j.

L'humidité relative (Hr) varie de 75% à 80%, avec une moyenne de 83% pour la période 1984 à 2000. Celle-ci reste supérieure à 70% toute l'année. La végétation varie de la forêt claire sur le littoral au Sud à

la forêt dense sempervirente et ombrophile vers le Nord de la région. Cette forêt est largement dégradée suite à la croissance de l’habitat humain, des cultures de rente et de son exploitation abusive.

La géologie de la zone d’étude s’identifie à celle du bassin sédimentaire côtier de la Côte d’Ivoire. En effet, le bassin sédimentaire côtier au niveau de la ville d’Abidjan se représente sous la forme d’un croissant dont les pointes sont tournées vers la mer. Il s’étend sur 400 km de long et 40 km de large et ne représente que 2,5 % de la superficie du pays.

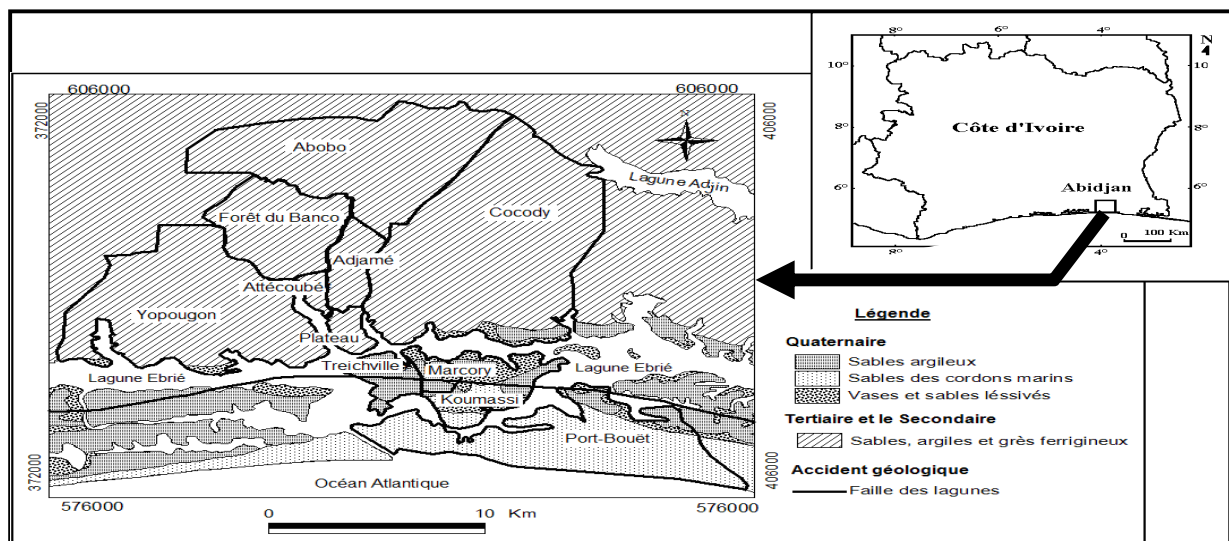
La lithostratigraphie du bassin sédimentaire est marquée par des formations d’âge crétacé-quaternaire, avec d’importantes variations latérales et verticales de toutes les formations lithologiques. Au Nord, on rencontre les terrains du Continental Terminal, formations d’âge mio-pliocène caractérisées par une stratification lenticulaire, des sables grossiers, des argiles bariolées, des grès ferrugineux et des minerais de fer. Les vases et les sables lessivés sont rencontrés vers les bordures lagunaires. Au Sud, ce sont les sédiments du Quaternaire constitués de sables des cordons marins, de sables, d’argiles et de grès ferrugineux avec des vases et des sables lessivés.

Sur le plan paléogéographique, du Crétacé au Quaternaire actuel, trois épisodes de transgression sont bien connues: Albo-Aptien : argiles et grès du Crétacé inférieur ; Maestrichtien-Eocène inférieur: argiles glauconieuses, argiles et sables et Miocène inférieur : marnes noires à reliques de requins, argiles bariolées et lignites. Au niveau tectonique, le bassin sédimentaire ivoirien est traversé par une grande faille Est-Ouest appelée faille des lagunes de pendage Sud, avec un rejet qui atteint 5000 m.

Du point de vue hydrogéologique, sur ce bassin, sont dénombrés trois principaux aquifères. L’aquifère du Quaternaire qui contient la nappe la plus vulnérable de la ville d’Abidjan. Il présente les formations généralement marno-argileuses et imperméables, sauf rares exceptions. Il recèle deux types de nappes phréatiques dont la nappe de l’Oogolien qui se développe essentiellement dans les sables fins à grossiers et celle du Nouakchottien qui loge dans des sables marins grossiers. Selon Aghui et Biémi (1984), le niveau piézométrique de la nappe est peu profond et varie de 0 à 1 m. Les sources provenant des dépôts du Quaternaire sont assez nombreuses le long des rives de la lagune Ebrié, ce qui met en évidence les conditions favorables d’évacuation d’une partie de l’excès d’eau apporté par les précipitations.

Plus en profondeur, on rencontre l’aquifère du Continental Terminal qui abrite la nappe d’Abidjan, captée par la Société de Distribution d’Eau de Côte d’Ivoire (SODECI) et destinée à l’alimentation en eau potable de la population abidjanaise. Dans cette nappe, l’eau s’y trouve à des profondeurs décroissantes du Nord au Sud. Après l’aquifère du Continental Terminal, on rencontre l’aquifère du Maestrichtien situé à 200 m de profondeur.

Figure 1. Carte géologique de la ville d’Abidjan



MATÉRIEL ET MÉTHODES

DONNÉES HYDROCHIMIQUES

Les données hydrochimiques utilisées dans le cadre de cette étude sont de sources multiples. Certaines d'entre elles ont été fournies par la Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire (SODECI). En effet, dans le cadre d'un suivi continu de la qualité des eaux de la région, cette société a réalisé des campagnes d'analyses chimiques sur les eaux souterraines. Les échantillonnages ont été faits sur les forages des différentes stations de pompage de la ville d'Abidjan et les analyses chimiques réalisées au laboratoire de ladite société pendant la période de 1999 à 2001. Par ailleurs, la Direction des Eaux et Forêts en collaboration avec l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (A.I.E.A.), a réalisé en août 2002, une campagne d'analyse chimique sur les ressources en eau de la région dans le cadre du projet IVC 8002. Les paramètres physiques de l'eau ont été mesurés *in situ* et les échantillons prélevés sur le terrain, analysés au laboratoire du Centre Ivoirien Anti-pollution (C.I.A.POL). Ensuite, des missions d'échantillonnages ont également été organisées en septembre 2006 pour la collecte des données physico-chimiques des eaux sur le terrain.

MÉTHODES D'ÉCHANTILLONNAGE

La collecte des données physico-chimiques sur les eaux souterraines a permis de fournir des informations utiles pour la réalisation de cette étude et de mesurer les paramètres physico-chimiques des eaux. Les paramètres physiques tels que la température, le pH, la conductivité, le taux de solides dissous (TDS), le potentiel d'oxydo-réduction (Eh) et la salinité (Sal.) de l'eau ont été mesurés *in situ* à l'aide d'un pH-mètre et d'un conductimètre de marque WTW 330. Les échantillons d'eau ont été recueillis dans des bouteilles en polyéthylène, conservés à 4°C et transportés au laboratoire du Centre Ivoirien Antipollution (C.I.A.POL) pour des analyses chimiques. Un total de 85 échantillons d'eau ont été prélevés, dont 35 au niveau des puits et 50 pour les forages. Sur le terrain, les coordonnées ainsi que l'altitude des différents points d'eau ont été prises à l'aide d'un Global Positioning System (GPS) de type Garmin. Pour observer l'évolution de la composition nitrée des eaux, nous avons également utilisé des données d'Oga (1998).

TRAITEMENT DES DONNÉES

L'ensemble des données collectées sur les eaux souterraines de la zone d'étude a fait l'objet d'une étude hydrochimique et statistique. La combinaison de toutes ces méthodes a permis de caractériser les teneurs en nitrates et de suivre leur évolution dans les eaux souterraines de la ville d'Abidjan. Le traitement des données a nécessité un travail de laboratoire, avec des logiciels tels qu'Arc view 3.2 pour la cartographie et statistica 6.0 pour les traitements statistiques. Les différents matériels utilisés dans la recherche et la collecte des données nous ont permis d'acquérir de nombreuses informations utiles à la réalisation de cette étude.

RÉSULTATS

Les composés azotés qui ont été dosés dans le cadre de cette étude concernent les nitrates, les nitrites et l'ammonium.

Nitrates

Dans la région d'Abidjan, les eaux présentent des teneurs en nitrates variables. Les teneurs en nitrates varient de 0 à 196,2 mg/L (**tableau I**). Ces teneurs sont fonction de la nature de l'aquifère qui recèle les nappes.

Tableau I. Variation des teneurs en nitrates en mg/L des eaux de la ville d'Abidjan

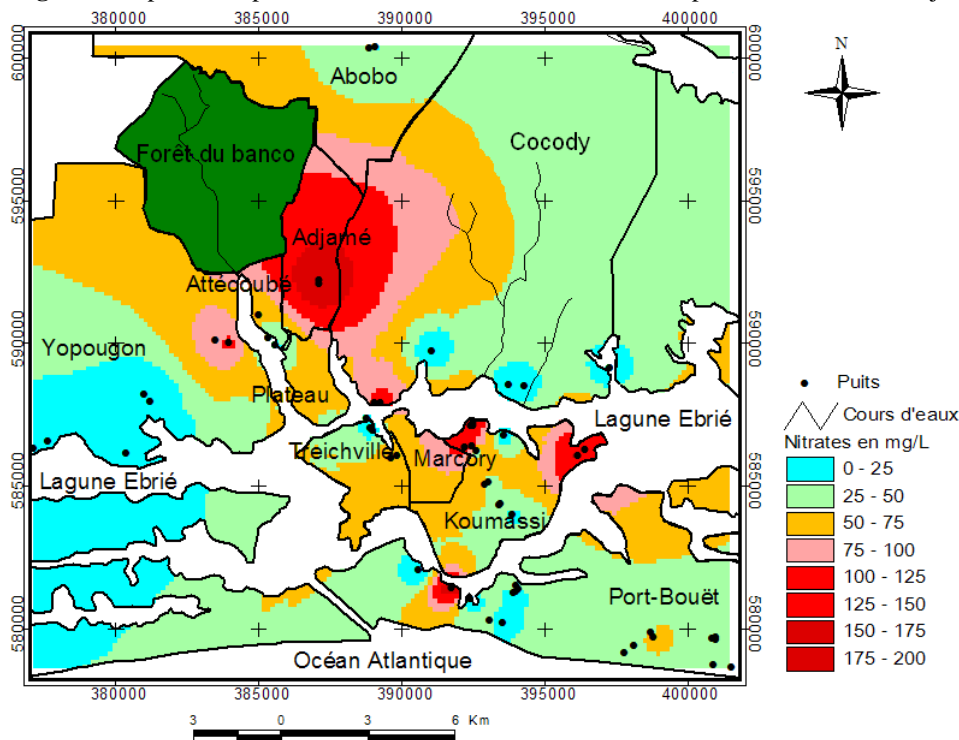
	<i>Aquifère</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Écart-type</i>
Bassin sédimentaire	<i>Quaternaire</i>	49,42	0,05	196,2	46,31
	<i>Continental</i>	13,07	0	120	21,56
	<i>Terminal</i>				

Les eaux du Quaternaire présentent des valeurs extrêmement élevées en nitrates. Celles-ci oscillent entre 0,05 mg/L et 196,2 mg/L, avec une moyenne de 49,42 mg/L. Les puits riches en nitrates sont ceux de Marcory Anoumambo 1 et 2 (124,40 mg/L et 129 mg/L), Marcory Citelcom (154 mg/L), Adjamé Latin 1 et 2 (196,20 mg/L et 186,90 mg/L), Blockauss 1 et 2 (105 mg/L et 145,40 mg/L) ; Petit Bassam (192,40 mg/L) et Mossikro 1 (109,30 mg/L). Ainsi, 27,27% de ces eaux présentent des teneurs en nitrates supérieures à la directive OMS (50 mg/L) pour une alimentation en eau potable de la population. Les eaux du Continental Terminal présentent des teneurs en nitrates faibles dans l'ensemble (0 à 40 mg/L), avec une moyenne de 13,07 mg/L. Cependant, certaines valeurs extrêmes sont observées dans les stations de pompage de la ville d'Abidjan. Les localités concernées sont : Plateau-Ifan (120 mg/L) et Plateau-C4 (110 mg/L), Adjamé F7 (72 mg/L), F8 (76 mg/L), F9 (100 mg/L) et Yopougon Zone Ouest F6 (60 mg/L). Ces fortes teneurs en nitrates rendent les eaux de ces différents forages inaptes pour la boisson humaine, vue la directive OMS (50 mg/L) pour une eau de boisson.

Évolution spatiale des nitrates dans les eaux des nappes du Quaternaire

La carte de distribution spatiale des teneurs en nitrates des eaux de puits est présentée par la figure 2. Celle-ci montre que dans la ville d'Abidjan, les teneurs en nitrates sont très importantes dans toute la partie Sud de la ville. Ce sont les communes de Treichville, Marcory, Koumassi et Port-Bouët qui sont les plus touchées. Le centre de la ville, notamment les communes d'Adjamé et du Plateau, qui sont des anciens quartiers fortement urbanisés sont également marquées par un fort taux de nitrates.

Figure 2. Répartition spatiale des teneurs en nitrates des eaux de puits de la ville d'Abidjan

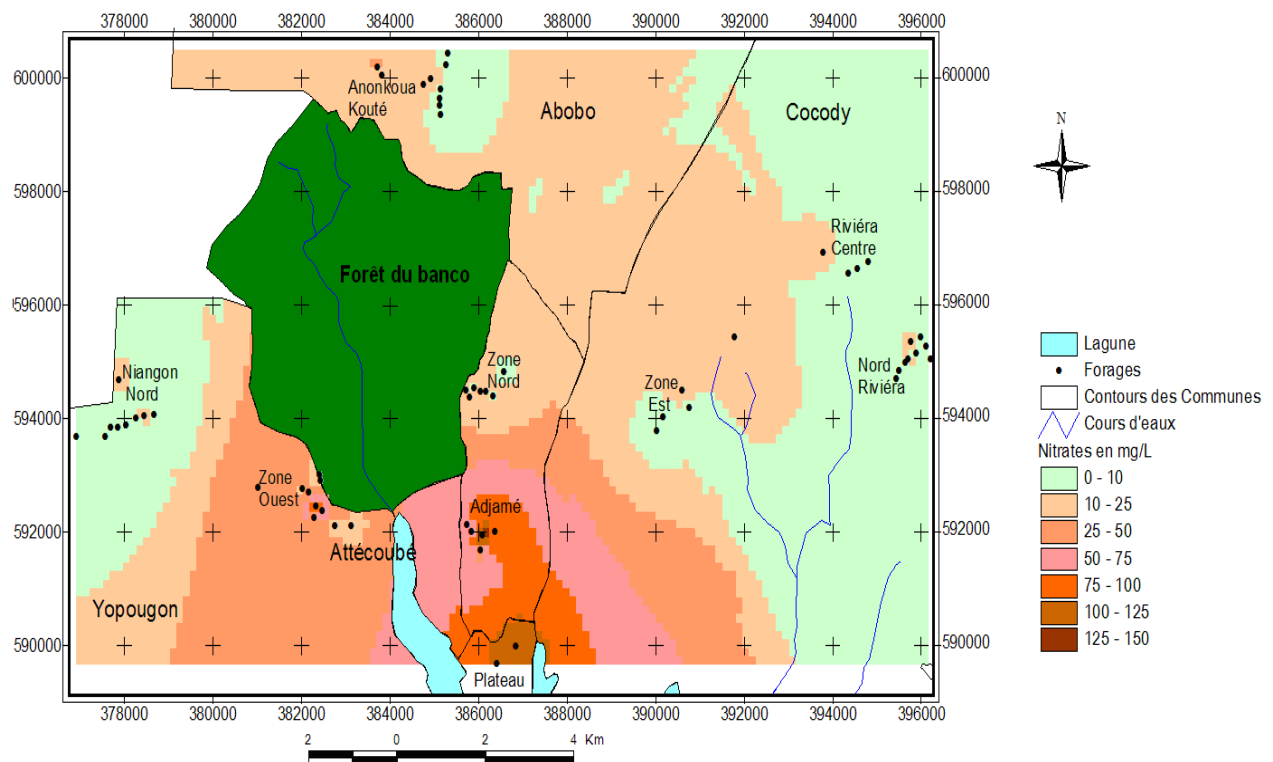


Évolution spatiale des nitrates dans les eaux de forages

Les eaux de forages étudiées sont celles du Continental Terminal à Abidjan. La carte réalisée à l'aide des résultats des analyses chimiques de 2006 montre la répartition spatiale des nitrates dans les eaux de la nappe d'Abidjan (Figure 3). Elle met en évidence une progression Sud-Nord du front de pollution par les nitrates. Les stations du Plateau et d'Adjamé, situées au Sud de la ville d'Abidjan, sont les plus touchées par la pollution nitratée. Actuellement, la Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire a mis en arrêt tous les forages qui exploitent la nappe dans ces différents champs captants, notamment au Plateau.

A la station d'Adjamé, 80% des forages sont en arrêt pour cause de pollution due aux nitrates. Dans ces différentes stations, les teneurs de 120 mg/L en nitrates sont couramment rencontrées dans les eaux. La pollution observée dans la zone d'Adjamé et du Plateau progresse vers l'Ouest de la ville comme l'indique la carte. Elle a atteint certains forages de la station de pompage de la Zone Ouest de la commune de Yopougon. Au niveau du secteur Nord et Est de la ville (Abobo, Cocody et Riviera), aucune pollution n'a été signalée. Ces zones recèlent les eaux potables de la ville d'Abidjan qu'il faut protéger pour assurer une alimentation en eau durable de la population abidjanaise.

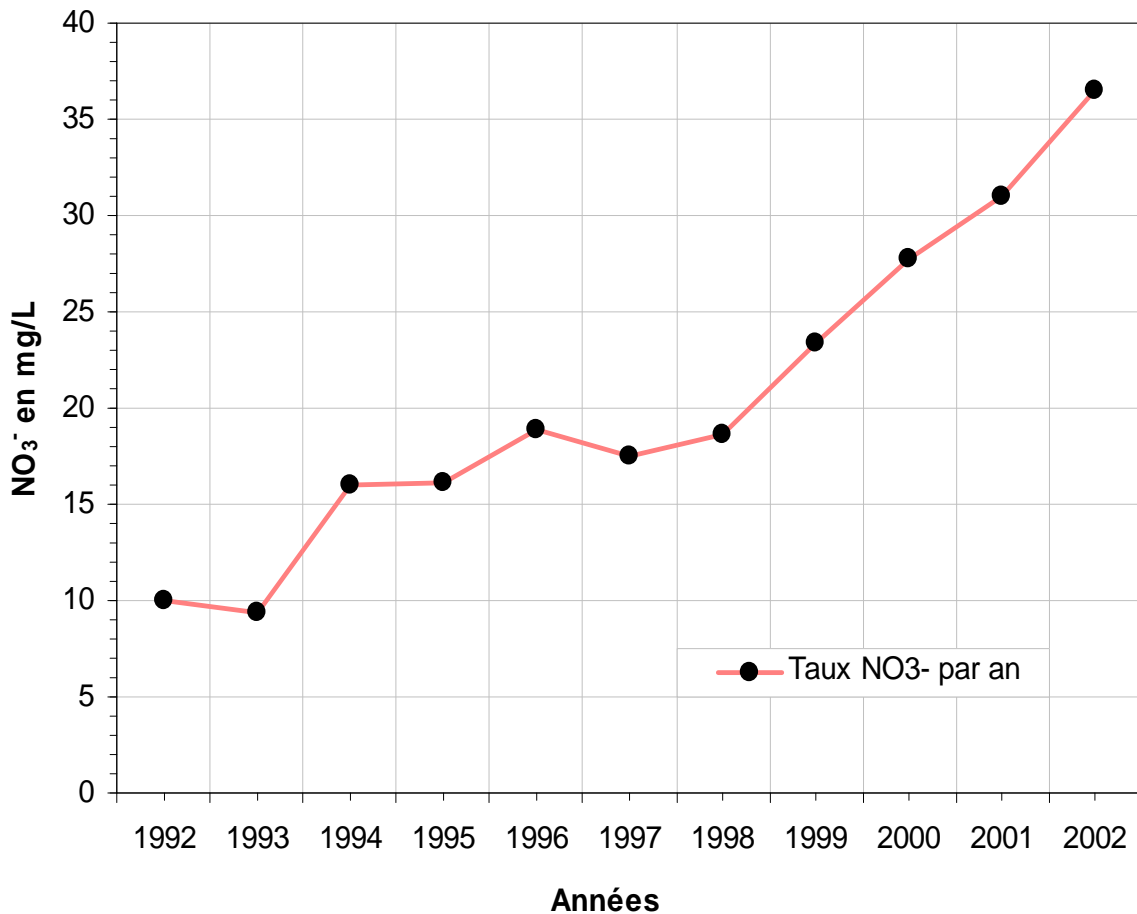
Figure 3. Carte de distribution spatiale des nitrates dans la zone de captage de la nappe d'Abidjan en 2006



Évolution temporelle des nitrates

L'observation de l'évolution des teneurs moyennes annuelles en nitrates des eaux de forages de la ville d'Abidjan (**Figure 4**) indique une augmentation régulière de celles-ci depuis 11 ans (1992 à 2002). Cette augmentation est fonction des champs captants. Ainsi :

- pour la station du Plateau, les teneurs moyennes varient de 44 mg/L en 1994 à 145 mg/L en 2001, soit une augmentation de 101 mg/L en 8 ans et une croissance de 12,63 mg/L par an ;
- à la station d'Adjamé, on observe une augmentation de 30 mg/L en 1992 à 83,50 mg/L en 2002, soit une augmentation de 53,21 mg/L en 11 ans et une croissance moyenne de 4,84 mg/L/an ;
- pour la station de la Zone Ouest de la commune de Yopougon, la tendance à la hausse des nitrates est de 0,72 mg/L/an ;
- pour la station de la Zone Est à Cocody, l'augmentation moyenne est de 0,65 mg/L/an ;
- à la station de Niangon Nord, l'augmentation moyenne est de 0,54 mg/L/an.

Figure 4. Évolution des teneurs moyennes en nitrates des eaux de forages de la ville d'Abidjan

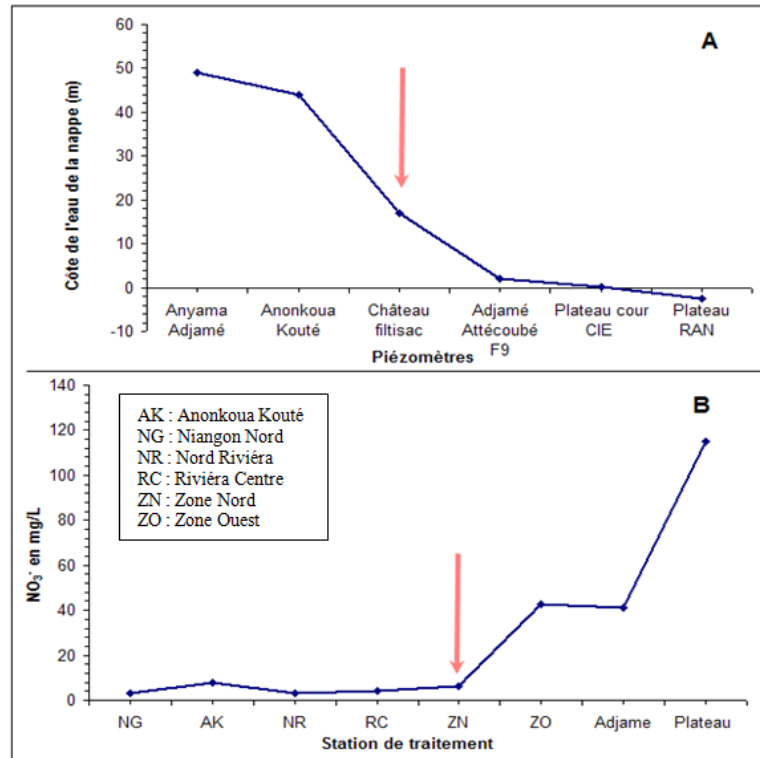
Les autres stations de pompage présentent une croissance en nitrates faible. Elle est de 0,48 mg/L/an à la Zone Nord, de 0,35 mg/L/an à Anonkoua Kouté, de 0,36 mg/L/an à Nord Riviéra et de 0,38 mg/L/an à la Riviéra Centre. Les stations d'Anonkoua Kouté, de Nord Riviéra et de Riviéra Centre présentent les plus faibles taux d'accroissement en nitrates dans les eaux naturelles. Cela montre que ces eaux sont de bonne qualité chimique et plus protégées contre la pollution. Les plus forts taux d'accroissement en nitrates (12,63 mg/L/an et 4,84 mg/L/an) concernent les secteurs les plus touchés par la pollution nitratée (teneurs supérieures à 50 mg/L au Plateau, Adjamé et Zone Ouest).

Causes probables de l'évolution des teneurs en nitrates des eaux souterraines

Évolution des teneurs en nitrates en fonction de la côte des forages

L'analyse de l'évolution des teneurs moyennes en nitrates mesurées dans les eaux de forages du CT comparée à la variation de la côte de l'eau de cette nappe révèle que les teneurs en nitrates sont plus élevées dans les forages des stations du Plateau et d'Adjamé où la côte de l'eau de la nappe est faible (**Figure 5**). En effet, la côte de l'eau de la nappe du CT au niveau du Plateau varie de -2 m à 0,99 m. Celle-ci est de 2,54 m à Adjamé et 46 m à Anonkoua Kouté au Nord.

Figure 5. Évolution comparée de la côte de l’eau de la nappe du Continental Terminal en 2006 et des teneurs en nitrates.

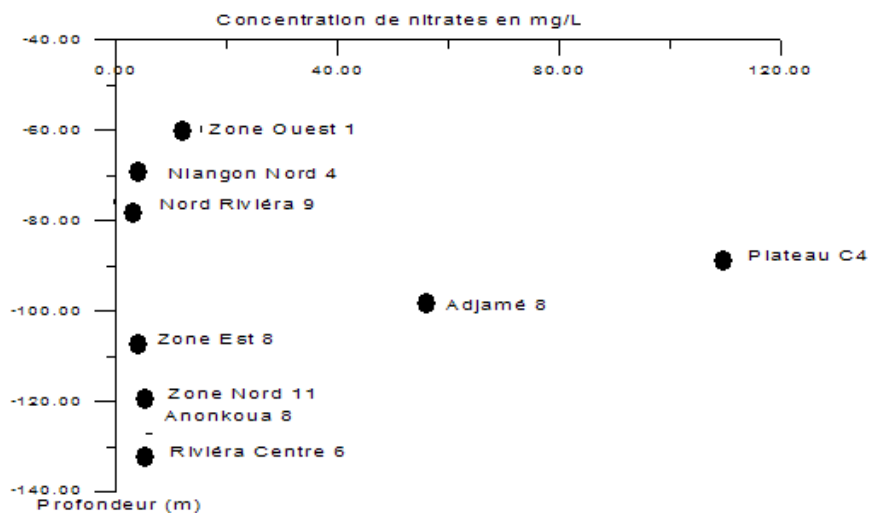


Les teneurs moyennes en nitrates diminuent avec l’augmentation de la côte de l’eau de la nappe.

Évolution des teneurs en nitrates en fonction des profondeurs des forages

Les teneurs en nitrates observées dans les eaux du Continental Terminal ne présentent pas une répartition liée à la profondeur des forages (**Figure 6**).

Figure 6. Répartition des teneurs en NO₃⁻ des eaux en fonction de la profondeur des forages

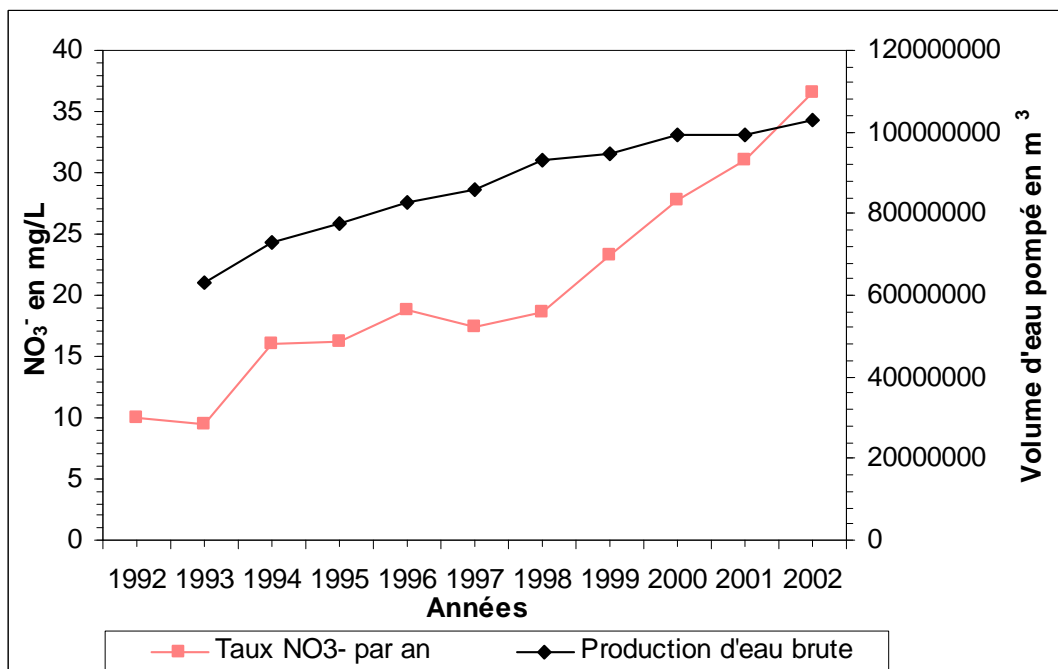


En effet, certains forages de près de 100 m de profondeur (Adjamé et Plateau) présentent des teneurs en nitrates supérieures à 50 mg/L (directive OMS), alors que les forages de Niangon, de Nord Riviéra de moins de 80 m ont des teneurs largement inférieures à 50 mg/L.

Évolution des teneurs en nitrates en fonction des volumes d'eau pompés

L'évolution du taux de nitrates annuel des eaux souterraines en fonction de la production d'eau brute par la SODECI pendant ces dernières années est présentée par la **figure 7**. Celle-ci montre que la teneur moyenne annuelle en nitrates des eaux souterraines augmente en fonction du volume d'eau produit par la SODECI. Cette augmentation de la production d'eau brute s'est faite suite à l'accroissement des besoins en eau de la population de la ville. Cela a entraîné une augmentation du débit de pompage des forages pouvant atteindre par endroits 360 m³/h (Plateau Ifan). L'accroissement des teneurs en nitrates, suite à la hausse du débit de pompage des différents forages de la ville, laisse penser à des appels d'eaux extérieures riches en nitrates qui ne sont que des eaux d'origine superficielle.

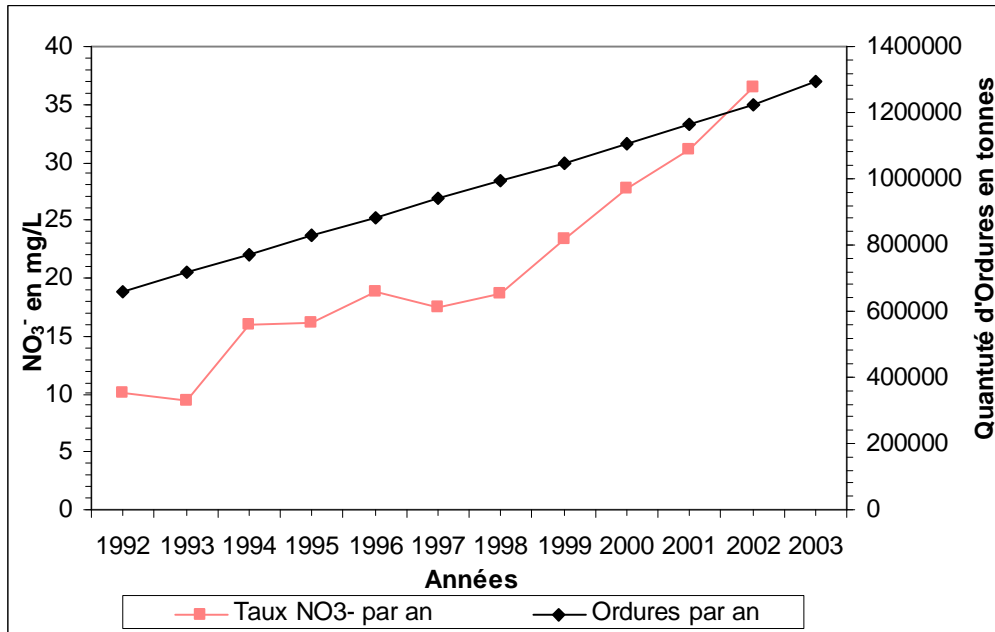
Figure 7. Évolution comparée des teneurs en nitrates moyennes annuelles et du volume d'eau pompé de la ville d'Abidjan



Évolution des teneurs en nitrates en fonction de la quantité d'ordures produites

La ville d'Abidjan produit d'importantes quantités d'ordures ménagères. La production d'ordures ménagères de la ville qui était de 994 043 tonnes en 1998 est passée à 1,44 millions de tonnes en 2005, soit une augmentation de 444 734 tonnes d'ordures en 8 ans. Cette augmentation est estimée à 55 592 tonnes d'ordures par an. Sur cette énorme quantité d'ordures produites, le Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement (BNETD) a estimé en 2002, les ordures non ramassées dans la ville d'Abidjan à 535 655 tonnes. Toutes ces ordures non collectées se retrouvent dans les ravins, les bas-fonds, les canalisations d'eaux usées et pluviales, les puits abandonnés et les baies lagunaires. Ces baies sont devenues aujourd'hui des décharges d'ordures et de matières organiques issues des eaux de ruissellement de la ville d'Abidjan. En effet, la teneur moyenne annuelle en nitrates des eaux souterraines de la ville d'Abidjan s'accroît avec l'augmentation de la quantité d'ordures produites par année (**figure 8**), ce qui suggère une implication des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines.

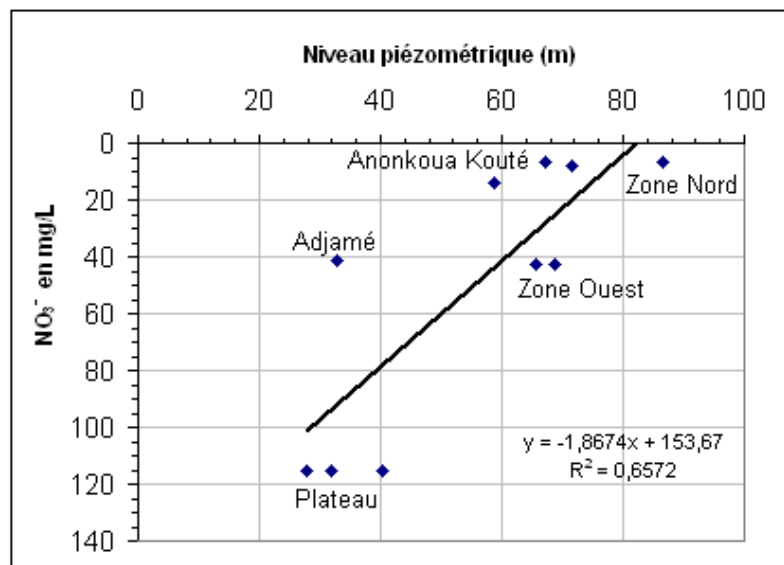
Figure 8. Évolution comparée des teneurs en nitrates moyennes annuelles et de la quantité d’ordures produites à Abidjan



Évolution des teneurs en nitrates en fonction du niveau piézométrique de la nappe

Par ailleurs, nous avons observé la variation des teneurs en nitrates des eaux en fonction du niveau piézométrique de la nappe (**Figure 9**). Le niveau piézométrique de la nappe varie respectivement de 27,78 m au Plateau RAN ; 32,75 m au Plateau cour CIE et de 41,22 m à Adjamé Attécoubé F9 en septembre 2006. Cette figure montre une variation du taux de nitrates des eaux avec le niveau piézométrique de la nappe. Dans les zones où le niveau piézométrique est faible, le taux de nitrates est élevé dans l’eau des forages. Il s’agit des quartiers comme Plateau, Adjamé et Zone Ouest. Cette variation est mise en évidence par la bonne corrélation qui existe entre taux de nitrates et niveau piézométrique (0,66). Cette variation du niveau piézométrique de la nappe avec la teneur en nitrates nous amène à penser à une infiltration verticale des nitrates dans ces différents quartiers.

Figure 9. Évolution de la teneur moyenne en nitrates dans les stations en fonction du niveau piézométrique de la nappe.



Nitrites

Dans le cycle de l'azote, les nitrites s'insèrent entre les nitrates et l'ammonium. Les nitrites sont très solubles et par conséquent très peu présents dans les eaux souterraines, sauf en cas de pollution. Les nitrites constituent donc de bons indices de contamination organique et bactériologique des eaux. L'OMS indique le seuil admissible de potabilité pour les nitrites à 0,1 mg/L pour une eau de boisson. Les teneurs en nitrites des eaux varient de 0 à 11 mg/L, avec une moyenne de 0,62 mg/L (**tableau II**).

Tableau II. Variation des teneurs en nitrites en mg/L des eaux de la ville d'Abidjan

	<i>Aquifère</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Écart-type</i>
Bassin	<i>Quaternaire</i>	0,99	0,01	11	1,72
sédimentaire	<i>Continental</i> <i>Terminal</i>	0,02	0	0,08	0,02

Dans le bassin sédimentaire, les teneurs les plus élevées en nitrites se retrouvent au niveau des eaux de puits, avec une moyenne de 0,99 mg/L. Les fortes valeurs en nitrites ont été mesurées à Bingerville (11 mg/L), Adjamé Latin 1 et 2 (2,8 mg/L et 2,7 mg/L), Koumassi Campement 1 et 2 (1,6 mg/L et 2,2 mg/L) et Anoumambo 1 et 2 (1,63 mg/L et 1,7 mg/L). Ainsi, près de 86% des eaux de puits du bassin sédimentaire ont des teneurs en nitrites supérieures à la directive OMS (0,1 mg/L). Les eaux de forages sont les plus pauvres en nitrites, avec des teneurs qui varient de 0 à 0,08 mg/L, pour une moyenne de 0,02 mg/L.

Ammonium

La teneur maximale recommandée par l'OMS pour une eau de boisson est de 0,5 mg/L pour l'ammonium (NH_4^+). Les points d'eau de la région présentent des teneurs qui oscillent entre 0 et 32,2 mg/L. Ces teneurs diffèrent également d'un aquifère à l'autre (**tableau III**).

Tableau III. Variation des teneurs en ammonium en mg/L des eaux de la ville d'Abidjan

	<i>Aquifère</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Écart-type</i>
Bassin	<i>Quaternaire</i>	4,35	0,02	32,20	6,99
sédimentaire	<i>Continental</i> <i>Terminal</i>	0,27	0	4,99	0,77

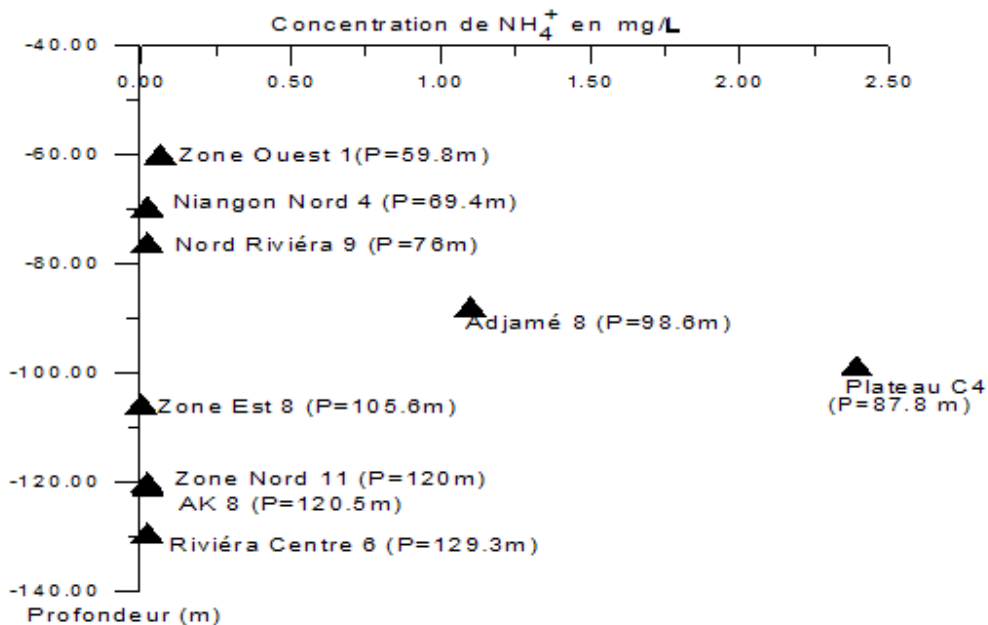
La teneur moyenne en ammonium des eaux souterraines est de 1,18 mg/L. Cette moyenne est inégalement répartie entre les deux types d'aquifères présents dans la zone d'étude. Les eaux du Quaternaire constituent les plus riches en ammonium, avec des valeurs de 32,20 mg/L. Les eaux de la nappe du C.T. présentent les plus faibles teneurs, avec une moyenne de 0,27 mg/L. Cependant, des valeurs importantes d'ammonium ont été observées au niveau des forages d'Adjamé (4,99 mg/L) et du Plateau (3,47 mg/L). Ces pics sont en conformité avec les teneurs en nitrates observées dans ces mêmes secteurs. Ces teneurs montrent que ces différentes zones sont exposées à une pollution azotée.

Évolution spatiale de l'ammonium dans les eaux de puits et de forages de la ville d'Abidjan

L'évolution de l'ammonium est identique à celle des nitrates dans les eaux des aquifères superficiels. La partie Nord de la région présente les plus faibles teneurs en ammonium, alors que le Sud est caractérisé par de fortes teneurs en ammonium. Ces teneurs sont largement importantes (21,10 mg/L et 20,10 mg/L à

Adjamé Latin 1 et 2) et sont au-dessus de la directive OMS. L’ammonium étant un composé azoté dérivé des nitrates, dans les eaux des forages, les secteurs riches en nitrates sont ceux qui présentent les fortes teneurs en ammonium. Dans les eaux de forages du CT, la distribution de l’ammonium n’est pas, tout comme les nitrates, liée à la profondeur des forages (**Figure 10**).

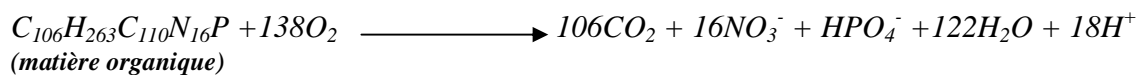
Figure 10. Répartition des teneurs en NH₄⁺ en fonction de la profondeur des forages



DISCUSSION

Les nitrates constituent l’un des composés azotés dominants dans les eaux de la ville d’Abidjan, en particulier les eaux du bassin sédimentaire. Les teneurs en nitrates observées dans les eaux de la ville diffèrent d’un aquifère à l’autre. Cette variabilité spatiale des teneurs en nitrates des eaux traduit également une diversité dans leur origine. Dans une eau naturelle, la minéralisation nitratée peut avoir plusieurs origines. En effet, en Afrique de l’Ouest, les travaux qui signalent des excès en nitrates dans les eaux souterraines sont de plus en plus fréquents (Travi et Mudry, 1997 ; Tandia *et al.*, 1999). L’origine des nitrates dans une eau souterraine peut être multiple. Les nitrates sont très souvent issus des activités agricoles (engrais, élevage industriel). Ils peuvent avoir une origine urbaine et aussi provenir de la décomposition de la matière organique (déforestation). Les nitrates peuvent être également issus de l’azote apporté par les eaux météoriques. Les fortes teneurs en nitrates rencontrées dans les eaux de la nappe du Quaternaire ont une origine urbaine liée à une infiltration des eaux usées domestiques dans le sol, des eaux des égouts, des fosses septiques, des latrines et de la décomposition de la matière organique. Selon Oga (1998), les teneurs élevées en nitrates observées dans les quartiers Plateau et Adjamé seraient liées au degré d’urbanisation. En effet, ces différents quartiers sont des anciens quartiers fortement urbanisés et qui existaient avant l’indépendance.

Les ordures ménagères peuvent participer à la dégradation de la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines de la ville. En effet, toutes ces matières organiques se décomposent en nitrates et s’infiltrent dans le sol selon l’équation suivante (Biémi, 1992) pour se retrouver plus tard dans les eaux souterraines.



Dans la ville d'Abidjan, seulement 29,11% des ménages sont connectés au réseau d'assainissement collectif et le reste (66,07%) dispose d'un système d'assainissement individuel (**tableau IV**). Les quartiers tels que Adjamé ont une population qui utilise à 77,01% un système d'assainissement individuel. Ce type d'assainissement est basé sur des puits perdus et des fosses septiques. A ce faible taux de raccordement de la population au réseau d'égout, s'ajoutent le dysfonctionnement et la dégradation de la quasi-totalité des ouvrages (réseau d'égout et système d'assainissement individuel) ; les réseaux d'égouts et les canalisations pluviales sont devenus des collecteurs d'ordures ménagères.

Tableau IV. Situation de l'assainissement de l'agglomération d'Abidjan en 1996 (Kouamé, 2003)

Communes	Réseau collectif (%)	Assainissement individuel (%)	Autre (%)
Abobo	14,26	85,23	0,51
Adjamé	22,98	77,01	0,01
Attécoubé	0,01	98,24	1,75
Cocody	45,96	50,4	3,64
Koumassi	27,69	72,3	0,01
Marcory	42,89	57,11	0
Plateau	53,4	46,51	0,09
Port-Bouët	24,2	24,7	49,1
Treichville	1,89	98,11	0
Yopougon	59,31	40,43	0,26
Ville d'Abidjan	29,11	66,07	4,82

Les dysfonctionnements du réseau d'assainissement laissent infiltrer directement dans le sol les eaux usées. Cette infiltration verticale des nitrates peut être accélérée ou retardée par la nature géologique de la zone non saturée. Les nitrates sont des sels très solubles, qui sont difficilement retenus lors de leur transfert dans l'aquifère. Dans les quartiers tels que Plateau, Adjamé et Zone Ouest, les nitrates proviendraient d'une infiltration superficielle des eaux.

Les teneurs en nitrites des eaux souterraines sont négligeables. Cependant, certains puits du Quaternaire présentent des teneurs très élevées en nitrites. Les nitrites ne sont pas directement transformés en N_2 selon Mariotti *in* Mennessier (1994). Ils sont successivement transformés d'abord en nitrite (NO_2), en monoxyde d'azote (NO), en N_2O et enfin en N_2 selon les réactions suivantes :



Les fortes teneurs en nitrites rencontrées dans les eaux du Quaternaire traduisent une contamination superficielle issue des eaux usées des égouts, des fosses septiques et des puits perdus de la ville.

L'ammonium dans l'eau a une origine naturelle. Cependant, certaines eaux du Continental Terminal (Plateau Ifan, Adjamé F9 et F2) et la majeure partie des eaux du Quaternaire présentent des teneurs en ammonium très élevées et largement supérieures à la directive OMS. L'ammonium est un composé azoté dont la présence dans une eau souterraine résulte d'une contamination de surface liée essentiellement aux rejets d'effluents domestiques et industriels ou d'un phénomène de réduction naturelle des nitrates. L'ammonium contenu dans ces eaux souterraines est issu d'une contamination d'origine superficielle. Il provient des rejets d'effluents domestiques, de la réduction naturelle des nitrates et de la dégradation incomplète de la matière organique.

La pollution des eaux souterraines provoque une réduction de l'espace de captage au niveau de la ville d'Abidjan car la SODECI est obligée d'abandonner les forages contaminés. Celle-ci est plus accentuée au

niveau des nappes superficielles situées en zone urbaine. En effet, les eaux de puits de la ville d'Abidjan présentent les teneurs en nitrates les plus importantes.

Le phénomène de pollution des eaux souterraines n'est pas observé uniquement au niveau de la ville d'Abidjan en Côte d'Ivoire. Elle constitue un réel danger en Afrique en général et dans toutes les grandes villes africaines en particulier. Ainsi, d'importantes teneurs en nitrates, supérieures à la directive OMS ont été mises en évidence dans les eaux souterraines du Nigéria par Adelan (2006) et du Maroc par Bricha *et al.* (2007). Au Bénin, les travaux de Boukari *et al.* (2006) ont donné des teneurs en nitrates qui atteignent les valeurs de 96,60 mg/L dans les eaux de puits de la ville de Cotonou. La ville de Ouagadougou n'est pas restée en marge de cette pollution. Des teneurs en nitrates supérieures à 100 mg/L sont obtenues dans les eaux de certains forages de la ville par Yaméogo *et al.* (2006). Concernant les eaux souterraines de la ville de Dakar au Sénégal, Deme *et al.* (2006) ont obtenu des teneurs en nitrates de 790,50 mg/L. Ils ont montré que plus de 30% des eaux échantillonnées ont des concentrations en nitrates supérieures à la directive OMS et 30% des eaux ont des teneurs en nitrates qui excèdent 100 mg/L. Les teneurs élevées en nitrates constituent un véritable problème pour les eaux souterraines du Botswana où des teneurs de 442 à 888 mg/L ont été mesurées dans les eaux de certains forages des localités de Ramostswa et Selebi-Phikwe par Vogel *et al.* (2006).

CONCLUSION

Les teneurs en nitrates observées dans les eaux de la ville d'Abidjan diffèrent d'un aquifère à l'autre. En effet, les eaux de la nappe du Quaternaire sont les plus riches en nitrates. Celles-ci, compte tenu de leur faible profondeur, sont les plus vulnérables. Dans ces eaux, les teneurs varient de 0,05 mg/L à 196,20 mg/L, avec une moyenne de 49,42 mg/L. Ces teneurs sont supérieures à la directive OMS (50 mg/L) pour une eau de boisson. Au niveau des eaux du Continental Terminal, les teneurs en nitrates varient de 0 à 120 mg/L, avec une moyenne de 13,07 mg/L. Dans le Continental Terminal, les teneurs excessives en nitrates sont observées dans les localités telles qu'Adjamé, Yopougon Zone Ouest et Plateau.

La distribution spatiale des nitrates dans les eaux de la nappe du Quaternaire montrent que la majorité des points qui captent cette nappe est soumise à une pollution nitratée. Dans la nappe du Continental Terminal (CT), les études montrent une évolution de la pollution nitratée selon deux grands foyers. Le premier foyer est Sud-Nord (du Plateau vers Adjamé). Le second est Est-Ouest en progression vers Yopougon Zone Ouest. La distribution temporelle des teneurs en nitrates des eaux de la nappe du Continental Terminal a montré que depuis des décennies, les teneurs en nitrates ont subi une hausse. Cette augmentation des teneurs en nitrates est en rapport avec la croissance démographique et l'urbanisation galopante de la ville d'Abidjan. Cela met en évidence la grande pression exercée par les activités anthropiques sur les eaux souterraines de ladite ville; ce qui participe à la dégradation de leur qualité.

RÉFÉRENCES

1. Aghui N. et Biémi J. Géologie et Hydrogéologie des nappes de la région d'Abidjan et risques de contaminations. *Annales de l'Université de Côte d'Ivoire, série C (Sciences)*, tome 20, pp. 313-347 (1984)
2. Adelan S. M. A Nitrates pollution of groundwater in Nigeria. *Groundwater pollution in Africa*, Editors Yongxin Xu and Brent Usher, Taylor & Francis/Balkema, Great-Britain, pp. 37-45 (2006)
3. Ahoussi K. E., Soro N., Soro G., Lasm T., Oga M. S. et Zade S. Groundwater Pollution in Africans Biggest Towns: Case of the Town of Abidjan (Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, 20: No 2 pp. 302-316 (2008)
4. Ahoussi K. E., Soro N., Kouassi A. M., Soro G., Koffi Y. B. et Zade S. P. Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de l'origine des Métaux lourds (Cu²⁺,

- Mn²⁺, Zn²⁺ et Pb²⁺) dans les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **4 (5)**: pp. 1753-1765 (2010)
5. Ahoussi K. E., Koffi Y. B., Kouassi A. M., Soro G., Soro N. et Biémi J. Caractérisation Physico-Chimique et Bactériologique des Ressources en eau des Localités Situées Aux Abords de la Lagune Ébrié Dans la Commune de Marcory (District d'Abidjan, Côte d'Ivoire): Cas du Village d'Abia Koumassi. *European Journal of Scientific Research*, **89 (3)**: pp.359-383 (2012)
 6. Biémi J. Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants Subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). *Thèse de Doctorat d'Etat, Université Nationale de Côte d'Ivoire*, 480 p. (1992)
 7. Bnetd. Contrôle du service public de gestion et d'exploitation du balayage, de la précollecte, de la collecte et de la mise en décharge des ordures ménagères de la ville d'Abidjan. *Rapport d'activité de l'année 2002*, pp. 1-22. (2002)
 8. Bricha S., Ounine K., Oulkheir S., El haloui N. et Attarassi B. Etude de la qualité physicochimique et bactériologique de la nappe phréatique M'nasra (Maroc). *Afrique Science*, **03(3)**: pp. 391-404 (2007)
 9. Boukari M., Alassane A., Azonsi F., Dovonou F. A. L., Tossa A. et Zogo D. Groundwater pollution from urban development in Cotonou City, Benin. *Groundwater pollution in Africa, Editors Yongxin Xu and Brent Usher, Taylor & Francis/Balkema, Great-Britain*, pp. 125-138 (2006)
 10. Coulibaly A. S., Mondé, Wognin V. A. et Aka K. State of anthropic pollution in the estuary of Ebrié lagoon (Côte d'Ivoire) by analysis of the metal elements traces. *European Journal of Scientific Research*, **19**: n°2 pp. 372-390 (2008)
 11. Deme I., Tandia A. A., Faye A., Malou R., Dia I., et Diallo M. S. Management of nitrate pollution of groundwater in African cites : The case of Dakar, Sénégal. *Groundwater pollution in Africa, Redactors Yongxin Xu and Brent Usher, Editors Taylor & Francis/Balkema, Great-Britain*, pp. 181-192 (2006)
 12. Jourda J. P., Kouamé K. J., Saley M. B., Kouadio B. H., Oga Y. S. et Deh S. Contamination of the Abidjan Aquifer by sewage : An assessment of extent and strategies for protection. *Groundwater pollution in Africa, Redactors Yongxin Xu and Brent Usher, Editors Taylor & Francis/Balkema, Great-Britain*, pp. 291-300 (2006)
 13. Kouamé K. J. Apports d'un système d'information géographique à la réalisation de la carte de vulnérabilité de la nappe du Continental Terminal au niveau de l'agglomération d'Abidjan. *Mémoire de DEA des Sciences de la terre option hydrogéologie, Université de Cocody*, 63p. (2003)
 14. Mennessier M. Des bactéries dévoreuses de nitrates. *Sciences & Vie*, n° 923, pp. 86-90 (1994)
 15. Oga M. S. Ressources en eaux souterraines dans la région du Grand Abidjan (Côte d'Ivoire) Approche Hydrochimique et Isotopique. *Thèse de Doctorat de l'Université de Paris Orsay*, 240 p. (1998)
 16. Soro G., Métongo S. B., Soro N., Ahoussi K. E., Kouamé Koffi F., Zédé S. G. P. et Soro T. Métaux lourds (Cu, Cr, Mn et Zn) dans les sédiments de surface d'une lagune tropicale africaine : cas de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **3 (6)**: pp. 1408-1427 (2009)
 17. Soro N., Lasm T., Kouadio B. H., Soro G. et Ahoussi K. E. Variabilité du régime pluviométrique du Sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan. *Sud Sciences Technologie* n° 14, pp. 30-40 (2006)

18. Soro N., Ouattara L., Dongo K., Kouadio K. E., Ahoussi K. E., Soro G., Oga Y. M.-S., Savane I. et Biémi J. Déchets municipaux dans le District d'Abidjan en Côte d'Ivoire : sources potentielles de pollution des eaux souterraines. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **4 (6)** pp. 364-384 (2010)
19. Tandia A. A., Diop E. S. et Gaye C. B. Pollution par les nitrates des nappes phréatiques sous environnement semi-urbain non assaini : exemple de la nappe de Yeumbeul, Sénégal. *Journal of African Earth Sciences*, **29(4)**: pp. 809-822 (1999)
20. Travi Y. et Mudry J. Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères du socle de la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest. *Revue d'Hydrogéologie*, 1 pp. 13-21 (1997)
21. Vogel H., Keipeile K., Kgomanyane J., Zwikula T., Pontsho M., Mafa B., Matthes L., Staudt M., Berger K. et Güth T. Groundwater quality case studies in Botswana. *Groundwater pollution in Africa, Redactors Yongxin Xu and Brent Usher, Editors Taylor & Francis/Balkema, Great-Britain*, pp. 253-263 (2006)
22. Yaméogo S., Savadogo A. N., Nakolendousse S. et Koussoube Y. Spatial and temporal variations of groundwater pollution in Ougadougou city, Burkina Faso. *Groundwater pollution in Africa, Redactors Yongxin Xu and Brent Usher, Editors Taylor & Francis/Balkema, Great-Britain*, pp. 157-167 (2006)