

Évolution spatio-temporelle de la qualité des eaux de la nappe d'Abidjan entre Juillet 2018 à Mars 2019

Métangbo DIOMANDE^{1,2*}, Ciba Joelle KOUASSI², Kouakou Eric Germain KOUASSI²,
Yao Blaise KOFFI³, Brama KONE^{1,2} et Guéladio CISSE⁴

¹ Centre Suisse de Recherches Scientifiques, Groupe de recherche Environnement et Santé,
01 BP 1303 Abidjan 01, Côte d'Ivoire

² Université Peleforo Gon Coulibaly, UFR des Sciences Biologiques, Départements des Géosciences,
BP 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire

³ Université Félix Houphouët Boigny, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM),
Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE),
22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

⁴ Swiss -TPH, Department of Epidemiology and Public Health

(Reçu le 15 Avril 2022 ; Accepté le 05 Septembre 2022)

* Correspondance, courriel : metangbo@yahoo.fr

Résumé

Cette étude a pour objectif de faire un suivi de la qualité physico-chimique des eaux de la nappe d'Abidjan au niveau de soixante-quinze (75) ouvrages servant de contrôle de la qualité des eaux souterraines entre juillet 2018 et Mars 2019. Le niveau piézométrique a été mesuré à l'aide d'une sonde piézométrique OTT (150 m) sonore et lumineuse. Les profondeurs d'eau dans chaque forage et les altitudes ont été mesurées à l'aide de GPS et de cartes topographiques au 1/50 000. La température, la conductivité et le taux de sels dissous analysés ont été comparés aux normes de l'OMS. Les résultats montrent que les rabattements des piézomètres situés à proximité des champs captant oscillent entre 14 m et 30 m. Les valeurs diminuent sont faibles pour les forages éloignés de ces ouvrages de captages d'eau. La conductivité électrique varie entre 89,06 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 3201 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pendant la saison sèche (novembre et mars) et entre 89,06 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 3537 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les mois pluvieux. Les températures varient entre 25,6 et 29,7 °C. Les analyses ont montré que 95,65 % des forages suivis ont un taux de sels dissous < 600 mg/L (norme de l'OMS). Ces résultats démontrent la faible minéralisation et l'excellente qualité de l'eau de la nappe du District Autonome d'Abidjan.

Mots-clés : *Conductivité, District Autonome d'Abidjan, niveau piézométrique, taux de sels dissous, température.*

Abstract

Spatio-temporal evolution of the water quality of the Abidjan aquifer between July 2018 and March 2019

The objective of this study is to monitor the physico-chemical quality of the waters of the Abidjan groundwater at the level of seventy-five (75) structures used to control the quality of groundwater between July 2018 and

March 2019. piezometric level was measured using an OTT piezometric probe (150 m) sound and light. The water depths in each borehole and the altitudes were measured using GPS and 1: 50,000 topographic maps. The temperature, conductivity and rate of dissolved salts analyzed were compared to the standards of the WHO. The results show that the drawdowns of the piezometers located near the collecting fields oscillate between 14 m and 30 m. The values decrease are low for boreholes far from these water catchment works. The electrical conductivity varies between 89.06 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to 3201 $\mu\text{S}/\text{cm}$ during the dry season (November and March) and between 89.06 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to 3537 $\mu\text{S}/\text{cm}$ for the rainy months. Temperatures vary between 25.6 and 29.7°C. The analyzes showed that 95.65 % of the boreholes monitored have a level of dissolved salts < 600 mg/L (WHO standard). These results demonstrate the low mineralization and excellent water quality of the Abidjan Autonomous District aquifer.

Keywords : *Conductivity, Autonomous District of Abidjan, piezometric level, rate of dissolved salts, temperature.*

1. Introduction

La sollicitation des ressources en eau, les impacts du changement climatique et les activités anthropiques ont pour conséquence la diminution et la détérioration de la qualité des réserves mondiales d'eau disponible. Selon la FAO [1], de 1950 à 2000, la disponibilité en eau par habitant a baissé dans plusieurs régions du monde. En Afrique, la disponibilité en eau est passée de 20600 m³ / habitants / an en 1950 à 5100 m³ / habitants / an en 2000. De nombreuses études sur la variabilité climatique [2 - 8], ont été entreprises dans plusieurs régions de l'Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. Ces études ont montré qu'une tendance à la sécheresse s'est manifestée à partir de la fin de la décennie 1960 et le début des années 70. Les résultats des études menées sur les fluctuations climatiques montrent que la pluviométrie, qui est la source principale de recharge des réserves en eau, a baissé de 10 % à 30 % selon les zones [9]. Cette sécheresse a provoqué un tarissement des cours d'eau et une baisse des niveaux piézométriques des nappes en Côte d'Ivoire [8, 10]. Par ailleurs, la restriction des surfaces d'infiltrations provoquée par l'urbanisation galopante, couplée aux effets du changement climatique met à mal le renouvellement de cette ressource. La Côte d'Ivoire, plus singulièrement le District d'Abidjan en particulier n'échappe pas à cette réalité mondiale. En effet, Abidjan, la plus grande ville ivoirienne et la quatrième plus grande ville d'Afrique, abrite plus de 30 % de la population ivoirienne, avec un taux d'accroissement annuel de 3,9 % [11]. Cette métropole est essentiellement alimentée en eau potable à partir des eaux souterraines de la nappe du Continental Terminal. Cette importante nappe a fait l'objet de plusieurs études notamment celles de [12, 13]. Ces travaux ont exploré la géométrie et la lithologie du bassin, déterminé la recharge, les limites d'exploitation et les paramètres hydrodynamiques par endroits sur la nappe d'Abidjan. Ces travaux ont montré que cette nappe est menacée du fait de certaines activités anthropiques, de l'usage de certains produits phytosanitaires, l'extraction de sable lagunaire, avec pour corollaire l'avancée du biseau salé ainsi que l'insuffisance d'infrastructures d'assainissement et de drainage. Malgré son importance pour l'alimentation en eau potable de la ville d'Abidjan d'une part et les menaces croissantes auxquelles elle fait face d'autre part, les études portant sur l'évolution la qualité de cette nappe sont quasiment inexistantes. Cette étude se propose d'analyser les fluctuations spatio-temporelles du niveau piézométrique, de la conductivité, du taux de sels dissous (TDS) et de la température de la nappe d'Abidjan.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation de la zone d'étude

L'étude a été réalisée dans le district d'Abidjan situé au Sud-Est de la Côte d'Ivoire, dans la région des lagunes (**Figure 1**). Il est situé entre $05^{\circ} 19' 59''$ de latitude Nord et $04^{\circ} 01' 23''$ de longitude Ouest [14]. Avec une superficie de 2119 km^2 , cette agglomération est administrativement limitée au nord par le département d'Agboville, au sud par l'océan Atlantique, à l'ouest par les départements de Jacqueville et de Dabou et à l'est par les départements d'Alépé et de Grand Bassam. Elle regroupe dix (10) communes (Abobo, Adjamé, Attécoubé, Cocody, Koumassi, Marcory, Plateau, Port-Bouët, Treichville, Yopougon) et trois (3) sous-préfectures (Bingerville, Songon, Anyama). Très arrosée, cette zone reçoit annuellement une précipitation moyenne de 1890 mm. Elle est gouvernée par un climat de type équatorial de transition marqué par quatre saisons dans le cycle annuel : une grande saison sèche entre décembre et avril, une grande saison des pluies de mai à juillet, une petite saison sèche de juillet à septembre et une petite saison des pluies d'octobre à novembre [15]. La ville est drainée par un réseau hydrographique, relativement dense, est principalement de lagunes (l'Aghien, l'Ebrié et le Potou) et d'un chevelu de huit (la Mé, le Banco, le Gbangbo, Anguédédou, l'Agnéby et son affluent le Niéké, la Djibi et le Bété). La végétation appartient au faciès des forêts sempervirentes constituées d'espèces exigeant une grande quantité d'eau et pouvant se développer sur un sol pauvre en argile [16]. Sur le plan géologique, la ville d'Abidjan appartient au bassin sédimentaire d'âge Crétacé-Quaternaire, long de 400 km et large de 40 km [17]. L'aperçu hydrogéologique du bassin sédimentaire d'Abidjan (**Figure 2**) révèle l'existence de trois types d'aquifères : le Quaternaire, le continental terminal et le crétacé supérieur [18].

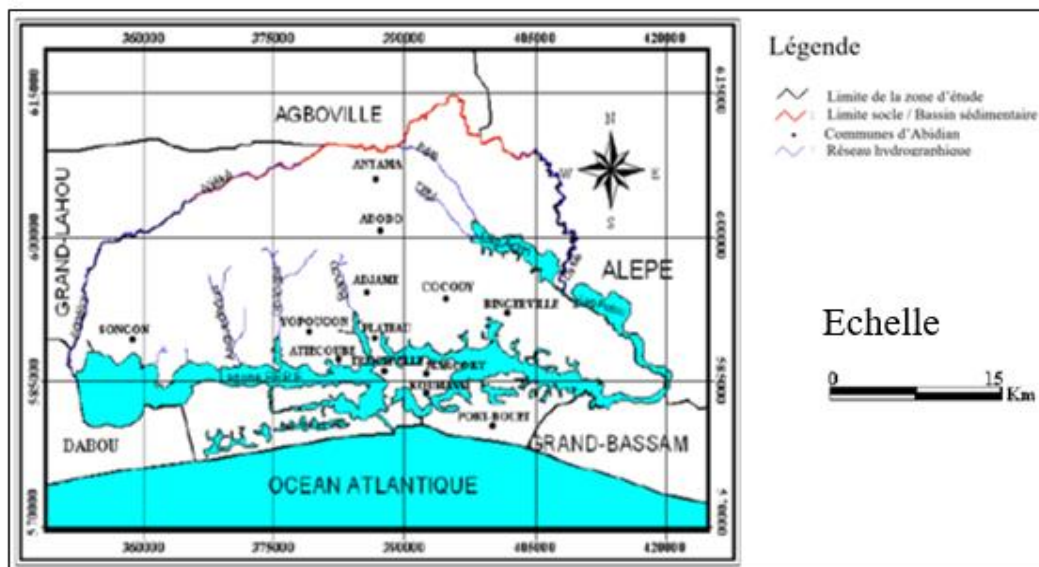


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude [19]

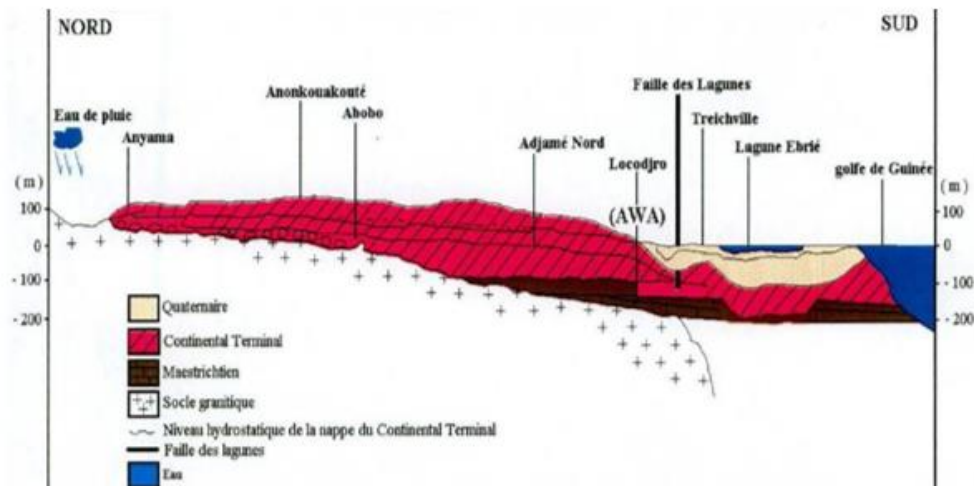


Figure 2 : Coupe Nord-Sud du bassin sédimentaire côtier de la Côte d'Ivoire [18]

2-2. Sélection des forages

La sélection des forages à retenir pour la campagne piézométrique et les points de collecte des données a débuté par l'inventaire de tous les forages de la zone d'étude captant la nappe du Continental Terminal, la principale source d'alimentation en eau potable dans le District Autonome d'Abidjan. Cet inventaire a été effectué à partir des informations issues de la Banque des données de l'Office National de l'Eau Potable (ONEP). Soixante-quinze (75) ouvrages servant de contrôle de la qualité des eaux souterraines, dont 33 anciens et 42 nouveaux (*Figure 3*), ont été présélectionnés. Des échanges avec les agents de l'ONEP ont été réalisés pour juger de leur accessibilité, de leur état et de la qualité des données disponibles, ce qui a réduit considérablement le nombre de forages retenu pour la réalisation de la présente étude. Par ailleurs, sur la base de la qualité des données 46 piézomètres dont 42 nouveaux et 4 anciens ont été retenus pour l'étude.

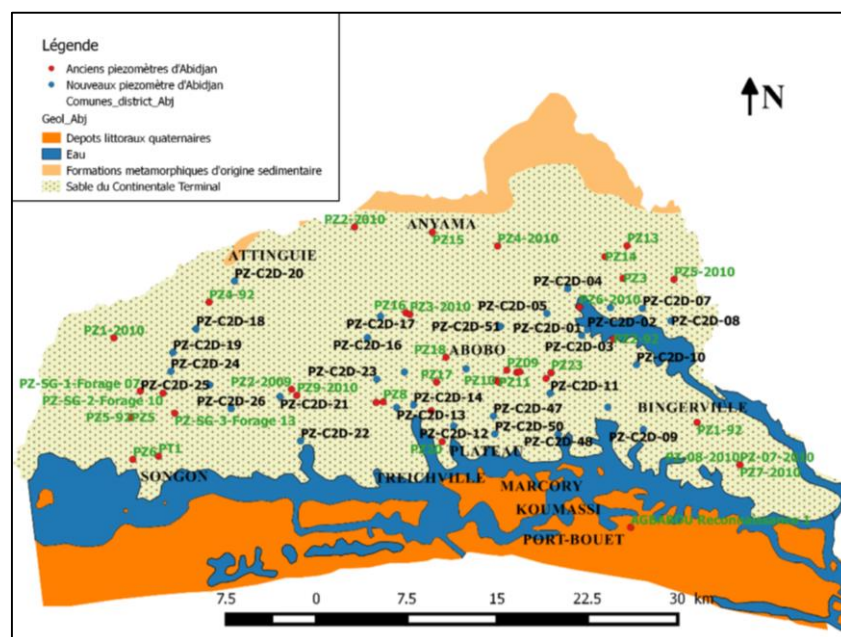


Figure 3 : Carte de la répartition des piézomètres du District d'Abidjan

2-3. Etablissement des cartes piézométriques

La campagne piézométrique a été effectuée de juillet 2018 et mars 2019. Cette période inclut notamment 3 mois pluvieux (juillet-septembre) et 6 mois secs (Octobre-Mars). L'ONEP s'est chargé de l'organisation de la campagne et de son bon déroulement. Pour chaque point visité, le niveau piézométrique a été mesuré à l'aide d'une sonde piézométrique OTT (150 m) sonore et lumineuse. Les profondeurs d'eau dans chaque forage et les altitudes ont été mesurées à l'aide de GPS et de cartes topographiques au 1/50 000. L'erreur de mesure admise pour cet outil est le demi-centimètre [20]. Entant donnée la précision attendue pour la carte piézométrique, les résultats des mesures ont été arrondis au centimètre près comme proposé par [19]. Pour éviter les biais d'ordre technique, il a été demandé de procéder à l'arrêt du pompage plusieurs heures avant les visites afin de réaliser une mesure du niveau statique fiable. Les données collectées ont permis de déterminer le niveau piézométrique (H) en fonction de la côte absolue du terrain naturel (Z) et le niveau statique (h_p) à l'aide de la **Formule** proposée par [21] pour les nappes libres :

$$H = Z - h_p \tag{1}$$

Dans la **Formule**, le niveau piézométrique, la côte absolue du terrain naturel et le niveau statique s'expriment en mètre.

2-4. Caractérisation de la qualité des eaux souterraines

L'appréciation de la qualité des eaux souterraines s'est appuyée sur l'étude des paramètres de pollution : la température et la conductivité électrique. Elles ont été mesurées *in situ* pendant la campagne piézométrique. En effet, la détermination précise de la température *in situ* des eaux souterraines est souvent importante pour la détermination de la recharge des eaux souterraines [22 - 24], la quantification du temps de parcours des eaux souterraines et la surveillance de l'assainissement [25]. Les données de température peuvent être particulièrement utiles dans les études d'interaction eau souterraine-eau de surface, axées sur la connectivité entre eau souterraine - eau de rivières [26] et l'interaction eau souterraine - eau marine. En 1994, l'OMS a proposé une classification des eaux souterraines selon leur température (**Tableau 1**) qui a servi de référence. Dans la présente étude, la température des eaux contenues dans les piézomètres a été mesurée à l'aide d'un lecteur de terrain TDS de marque RECON ou data logger et un GPS pour la géolocalisation des points d'échantillonnage.

Tableau 1 : Classification des eaux souterraines selon leur température [27]

Classe de température	Qualité de l'eau souterraine
$20^{\circ}\text{C} < T < 22^{\circ}\text{C}$	Excellente
$22^{\circ}\text{C} < T < 25^{\circ}\text{C}$	Passable / acceptable
$25^{\circ}\text{C} < T < 30^{\circ}\text{C}$	Médiane
$T > 30$	Pollution excessive

La conductivité électrique désigne la capacité de l'eau à conduire un courant électrique. Elle est déterminée par la teneur en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation, la mobilité et la température de l'eau [28]. Par conséquent, la conductivité électrique renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau [29]. Ainsi, plus la concentration en minéraux et en oligo-éléments dissous est importante, plus la conductivité sera élevée. Il existe également une relation avec la dureté de l'eau : une eau douce affiche normalement

une conductivité basse, et une eau dure une conductivité élevée [30]. L'interprétation des résultats de la conductivité s'est appuyée sur la base de la classification proposée par [31] (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Classification des eaux en fonction de leur conductivité selon [31]

Classe de conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Degré de minéralisation	Qualité de l'eau souterraine
$C < 400$	Très faible	Excellente
$400 < C < 600$	Faible	Excellente
$600 < C < 1000$	Moyen	Bonne
$C > 1000$	Excessif	Utilisable

3. Résultats

3-1. Variation spatio-temporelle du niveau piézométrique

La campagne de mesure piézométrique a permis de distinguer trois groupes de forages selon le niveau statique dans le District Autonome d'Abidjan. Constitué de 12 forages, le premier groupe se distingue par des niveaux statiques qui s'étalent entre 3 m et 20 m. Ils sont localisés dans la zone septentrionale de la zone d'étude. Le second groupe de forages occupe la zone centrale. Les niveaux statiques oscillent de 22 m à 40 m. Les vingt-deux forages restants forment le troisième groupe. Les nappes sont plus profondes et le niveau statique varie entre 45 et 90 m. Les résultats révèlent que de juillet à mars, le niveau de l'eau dans les forages prospectés, varie entre 0,1 m et 1,7. Cependant, pour le mois de mars correspondant à la fin de la saison sèche et pour trois points situés dans les champs captant, les baisses des niveaux statiques ont été de 14 m pour les forages PZ44 et PZ46 et même de 30 m pour le forage PZ26. L'analyse piézométrique (**Figure 4**) montre que l'écoulement de la nappe se fait préférentiellement dans trois directions : Nord-Sud, Nord-Est et Sud-Ouest. Ces écoulements se font dans plusieurs compartiments hydrogéologiques. En effet, les eaux convergeraient à partir des aires d'alimentation de la nappe situées dans la partie Nord à Anyama et Songon comme l'indique les cartes. La courbure des lignes de courant indique une montée des eaux dans la partie Nord dans la période d'octobre et novembre, synonyme d'une recharge de la nappe. En outre, une diminution des côtes du Nord au Sud est observée dans les périodes de Mars et Août, ce qui signale une diminution des eaux de la nappe.

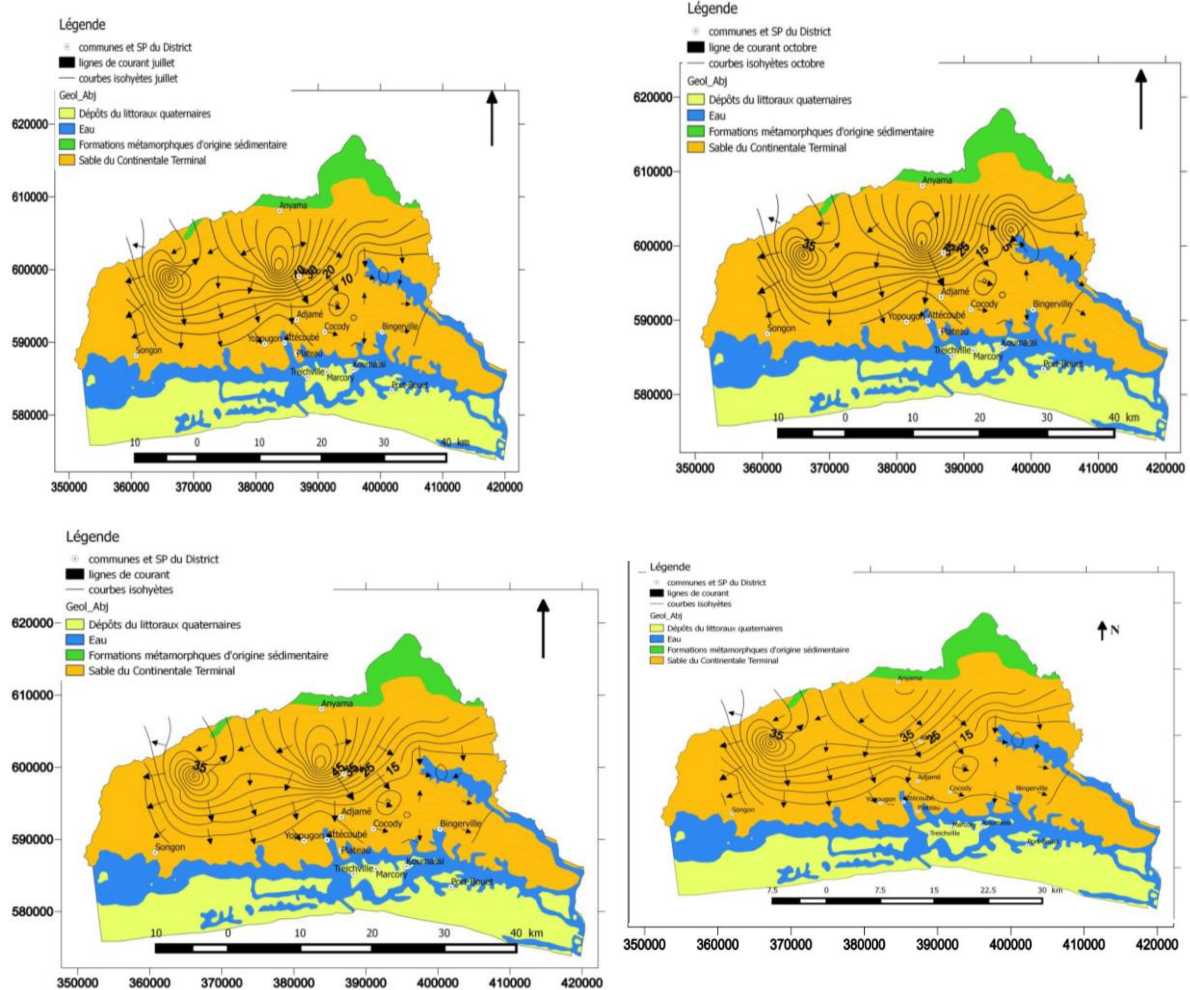


Figure 4 : Carte piézométrique de la nappe du District Autonome d'Abidjan des mois de (a) Août 2018, (b) Octobre 2018, (c) Novembre 2018 et Mars 2019

3-2. Variabilité spatio-temporelle de la conductivité

La distribution spatiale de la conductivité de la période de juillet 2018 à mars 2019 est présentée par la **Figure 5**. Les valeurs enregistrées durant la période d'étude ont varié de 89,06 à 3537 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Au cours de la saison sèche (novembre et mars), les valeurs de la conductivité électrique ont varié de 89,06 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 3201 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de 391,81 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En saison pluvieuse, elles ont varié de 89,06 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 3537 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dans l'ensemble, les eaux caractérisées par des valeurs de conductivités inférieures à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (41 forages, soit 89,13 %) pendant la période d'étude. La répartition spatiale montre que les zones de fortes conductivités se rencontrent au Centre-Nord du District d'Abidjan, plus précisément dans la commune d'Abobo et au Sud-Est dans la commune de Port-Bouët. Pour les autres communes, les valeurs de conductivité sont inférieures à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

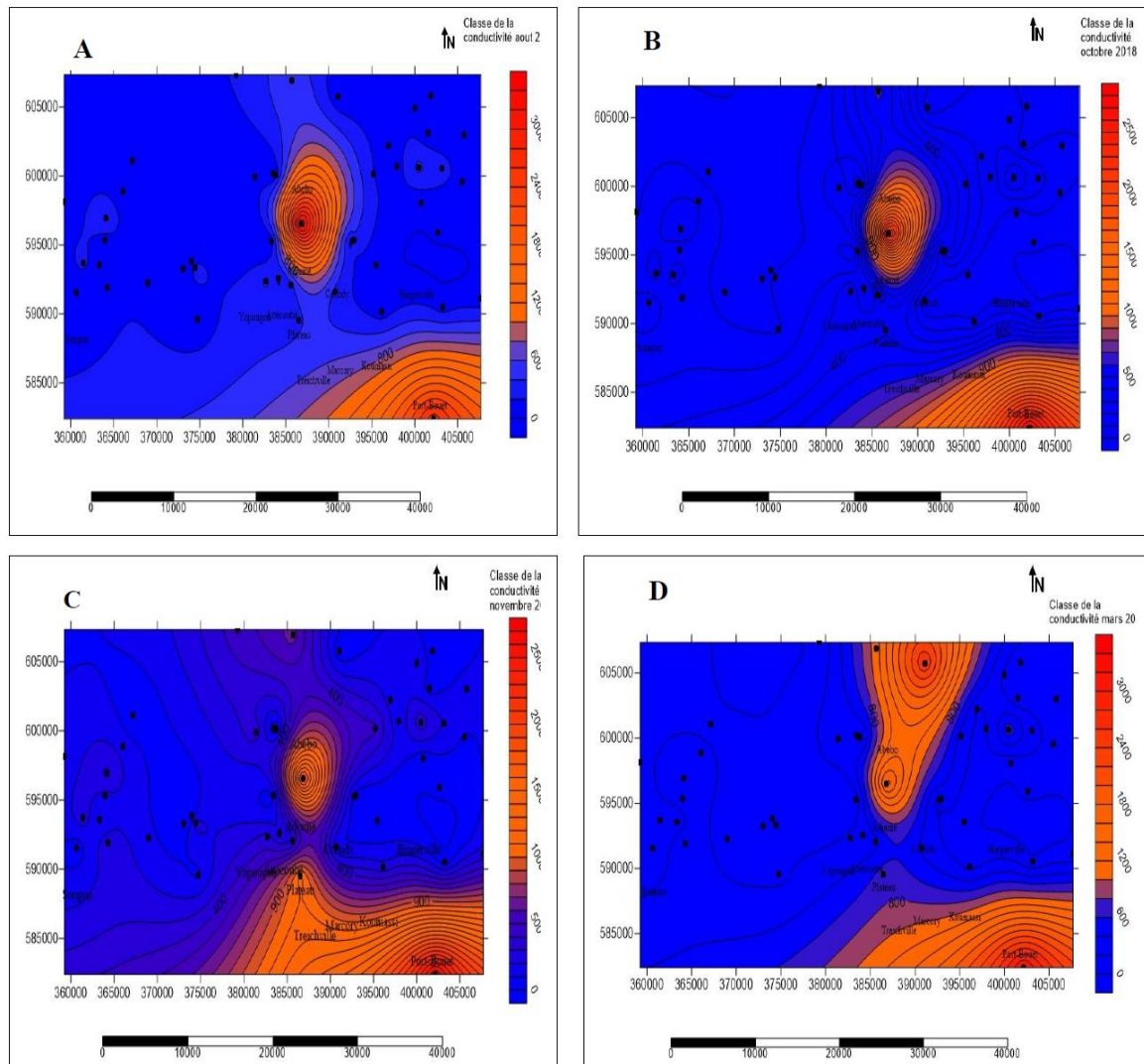


Figure 5 : Évolution spatio-temporelle de la conductivité de la nappe pendant les mois de (A) juillet, (B) Octobre, (C) Novembre et (D) Mars

3-3. Évolution spatio-temporelle des taux de sels dissous (TDS)

L'analyse des taux de sels dissous montre que 95,65 % des eaux des 46 piézomètres ont un taux de sels dissous < 600 mg/L (norme de l'OMS) pour le mois de juillet 2018, 93,5 % pour le mois d'octobre 2018, 95,65 % pour le mois de novembre 2018 et 91,3 % pour le mois de mars. L'on observe donc une baisse des fréquences des classes principales au niveau du mois d'octobre 2018 et mars 2019. En revanche, trois piézomètres sur 46 ont des valeurs qui dépassent cette norme de l'OMS quel que soit le mois. Ces piézomètres sont le PZ22, PZ27 et le PZ38. Les mois de mars et novembre montrent des valeurs de TDS élevées sur trois piézomètres (PZ22, PZ25, PZ27). Les mois de juillet et d'octobre présentent deux piézomètres (PZ22 et PZ27), qui ne respectent pas les normes fixées par l'OMS. La **Figure 6** que les zones de forts TDS se rencontrent au Centre-Nord du District Autonome d'Abidjan plus précisément dans la commune d'Abobo et au Sud-Est dans la commune de Port-Bouet. Concernant les autres communes de la zone d'étude, les valeurs de TDS respectent la valeur normes de l'OMS. L'analyse des courbes d'isovaleurs révèle que la conductivité et les TDS évoluent dans le même sens.

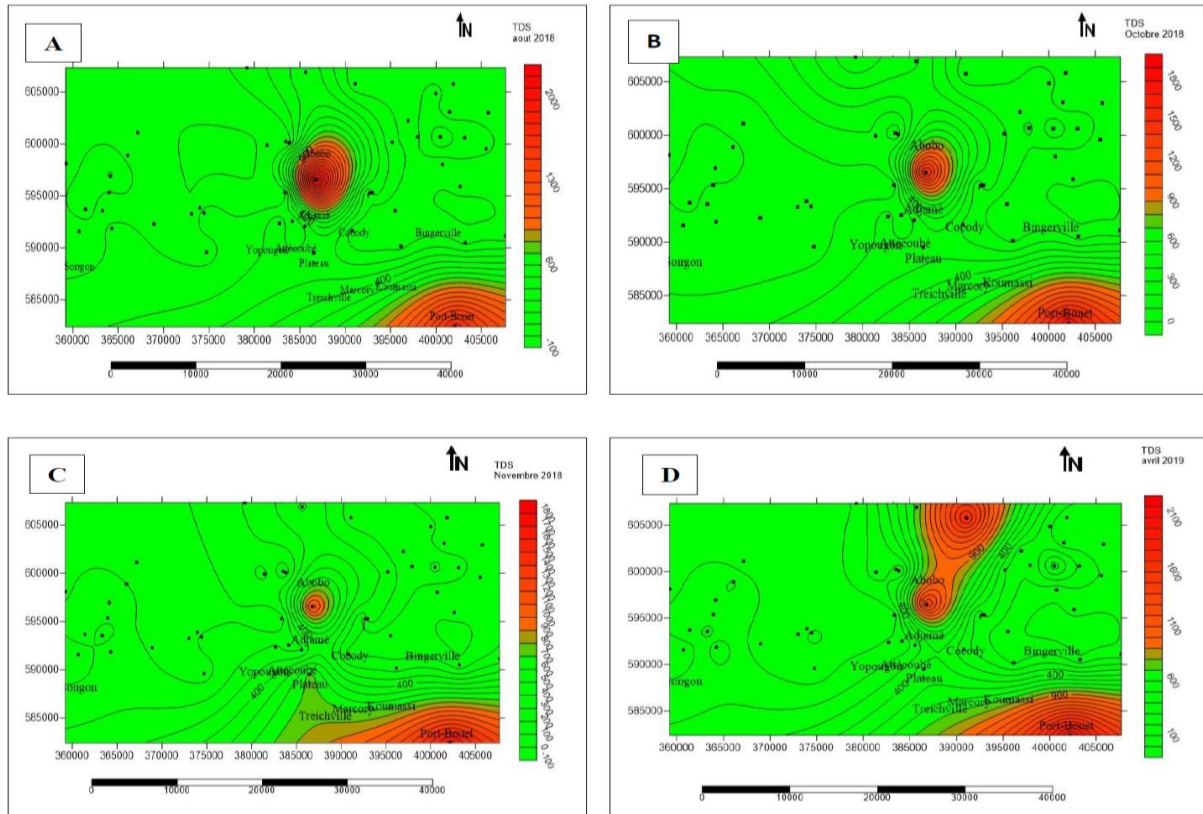


Figure 6 : Évolution spatio-temporelle des taux de sels dissous de la nappe pendant les mois de (A) juillet, (B) Octobre, (C) Novembre et (D) Mars

3-4. Évolution de la température de la nappe souterraine

Le **Tableau 3** montre une faible variation temporelle de température minimale des eaux dans les puits échantillonnés. Les valeurs enregistrées en Juillet, Octobre et Novembre sont quasi identiques et varient entre 25,6 °C et 25,7 °C. Cependant, les températures maximales de la nappe sont supérieures à 28 °C pour l'ensemble de la période d'observation hormis le mois de Juillet qui présente une température maximale de 27 ; 8 °C. De façon spécifique, les températures maximales sont enregistrées pendant le mois de Mars avec un maximum de 29,7 °C. Ces valeurs sont toutes supérieures au seuil de 25 °C, la norme préconisée par l’OMS. Cependant, il faudra relever que certains puits ont enregistré de fortes des températures pendant toute la durée de la campagne piézométrique. Il s’agit notamment des piézomètres PZ28, PZ29, PZ30 et PZ31.

Tableau 3 : Variation saisonnière de la température de la nappe d'eau souterraine de juillet 2018 à Mars 2019

	T° Mini (°C)	T° Max (°C)	T° Moyenne (°C)
Fin de la grande saison des pluies (Juillet)	25,6	27,8	26,7
Fin de la petite saison des pluies (Octobre)	25,6	28,0	26,8
Début de la grande saison sèche (Novembre)	25,7	28,4	27,1
Fin de la grande saison sèche (Mars)	27,7	29,7	28,7
Moyenne	26,2	28,5	27,3

4. Discussion

4-1. Variation spatio-temporelle du niveau piézométrique

La campagne piézométrique a mis en évidence des rabattements importants de la nappe en fin de la saison sèche, pour trois piézomètres (PZ26, PZ44 et PZ46) avec une baisse de 14 m du niveau statique pour les forages PZ44 et le PZ46 ainsi qu'une baisse de 30 m pour le PZ26. Cela s'explique par leur présence dans les champs captant composé de nombreux forages qui sert à approvisionner la ville d'Abidjan [4]. En effet, la croissance de la population du District d'Abidjan qui est passée de 3 125 890 habitants en 1998 à 4 707 404 d'habitants [32, 11] a engendré d'une croissance des besoins en eau potable. Dès lors depuis la fin des années 90, la ville d'Abidjan est alimentée en eau potable à partir des eaux souterraines de la nappe du Continental Terminal, appelée aussi «Nappe d'Abidjan» [32]. Des travaux ont rapporté déjà une potentielle surexploitation de la nappe d'Abidjan due à cette forte croissance de la population [33 - 35]. Cette nappe avec ses 1160 km², compte 13 principaux champs captants [36]. Les eaux souterraines des différents forages situées à une profondeur comprise entre 60 et 130 m, sont inégalement réparties dans les communes d'Abobo, Adjamé, Attécoubé, Cocody, Yopougon, Anguédédou, Songon et Bingerville. Selon le Ministère des Infrastructures Economique [37], la production journalière totale cumulée de tous ces ouvrages de captage est d'environ 350 000 m³/jour alors que les besoins de la population abidjanaise en eau potable sont estimés à 500 000 m³/jour soit un déficit journalier de 150 000 m³.

4-2. Variabilité spatio-temporelle de la conductivité et du taux de sels dissous

Les résultats ont montré que 95,65 % des forages du District Autonome d'Abidjan ont un taux de sels dissous < 600 mg/L. Ce niveau de TDS est généralement considéré comme bon selon les normes de l'OMS [27]. L'eau de boisson devient significativement et progressivement imbuvable quand les niveaux de TDS dépassent environ 1000 mg/L [27]. Par ailleurs, les résultats ont montré que la conductivité électrique des étudiées se situait entre 89,06 et 3537 μ S/cm. En outre, les résultats ont révélé que les eaux de 89,13 % forages étaient caractérisées par des valeurs de conductivités inférieures à 500 μ S/cm. Cette valeur de la conductivité électrique indique une bonne minéralisation de l'eau des eaux étudiées. Cette forte minéralisation semble résulter de la nature de la roche encaissante, à prédominance d'argile. Elle pourrait également se rattacher à la faible infiltration des eaux de ruissellement du fait de forte urbanisation. Aussi, constate-t-on une minéralisation croissante au Nord précisément dans la commune d'Abobo et au sud dans la commune de Port-Bouët. La minéralisation des eaux se fait par l'intrusion des eaux lagunaires et ou par infiltration des eaux de ruissellement en période de pluie [38, 39]. Cette infiltration des eaux superficielles apporte dans la nappe plusieurs minéraux. Les eaux de ruissellements en milieu urbain pourraient aussi constituer des sources de minéralisation [40]. La minéralisation très élevée des eaux du forage PZ22 situé dans la commune de Port-Bouët, serait due à l'intrusion des eaux de l'océan Atlantique [41]

4-3. Évolution de la température de la nappe souterraine

La température moyenne des eaux de forage du District Autonome d'Abidjan est comprise entre 25,6 et 27,8 °C. Cette valeur est acceptable car l'OMS fixe la limite inférieure à 25°C. En effet, les températures supérieures à 25°C jouent un rôle important dans la solubilité des sels et des gaz, la croissance et le développement les micro-organismes, les réactions chimiques et biochimiques, la densité, la viscosité, la solubilité des gaz dans l'eau, la solubilité des sels et surtout des gaz [30, 42, 43]. Les valeurs de températures relevées sont en accord avec ce qui est rapporté dans la littérature. En effet, les eaux souterraines sont moins sensibles aux variations de température que les eaux superficielles [30].

5. Conclusion

Au terme de cette étude, les caractéristiques physico-chimiques des eaux des forages ont été déterminées dans le District Autonome d'Abidjan. Ces eaux peuvent être classifiées selon les valeurs du niveau piézométrique, de conductivité, du taux de sels dissous et de température. Ce travail a aussi démontré que la baisse du niveau piézométrique est un phénomène qui est susceptible d'occasionner une contamination des eaux par des sels inorganiques (TDS). Les paramètres étudiés de ces eaux des forages sont conformes aux directives de l'OMS. Elles peuvent ainsi constituer une ressource alternative en eau de boisson pour les populations de l'agglomération Abidjan.

Remerciements

Cette recherche a bénéficié d'un énorme soutien de l'Office National de l'Eau Potable (ONEP). Les auteurs de l'article adressent un grand remerciement à cette institution le temps investi dans la campagne piézométrique et la logistique. Elle a bénéficié également de l'appui financier du Programme d'Appui Stratégique pour la Recherche Scientifiques (PASRES).

Références

- [1] - FAO (Organisation pour l'alimentation et l'agriculture). La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture : relever le défi de l'eau dans l'agriculture, (2020) 200 p
- [2] - S. E. NICHOLSON, J. KIM and J. HOOPINGARNER, *Atlas of African rainfall and its interannual variability*, Department of Meteorology, the Florida State University, (1988) 237 p
- [3] - A. A. AKA, H. LUBES, J. M. MASSON, É. SERVAT, J. E. PATUREL and B. KOUAME, Analyse de la variabilité temporelle des écoulements en Côte d'Ivoire : approche statistique et caractérisation des phénomènes. *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol. 41, (6) (1996) 959 - 970
- [4] - N. SORO, T. LASM, B. H. KOUADIO, G. SORO, K. E. AHOUSI, Variabilité du régime pluviométrique du Sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan, *Sud Sciences et Technologies*, N°14 (2006) 30 - 40
- [5] - J. E. PATUREL, E. SERVAT et M. O. DELATTRE, Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique, *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol. 43, (6) (1998) 937 - 945
- [6] - M. OUEDRAOGO, Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : Normes hydrologiques et modélisation régionale. Doctorat, Université de Montpellier II, France, (2001) 257 p.
- [7] - S. ARDOIN, H. LUBÈS-NIEL, E. SERVAT, A. DEZETTER AND J. F. BOYER, Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest : caractérisation de la situation de la décennie 1990, *IAHS Publication*, Vol. 278, (2003) 223 - 228
- [8] - S. BIGOT, Y. T. BROU, Y. OSZWALD et A. DIEDHIOU, Facteurs d'explication de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales, *Sécheresse*, Vol. 16, (1) (2005) 5 - 13
- [9] - J. E. PATUREL, E. SERVAT, B. KOUAMÉ, N. H. LUBES, J. FRITSCH and J. M. MASSON, Manifestations d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'ouest et centrale, *International Association of Hydrology Sciences*, Vol. 240, (1997) 21 - 30

- [10] - Y. T. BROU, F. AKINDÈS and S. J. C. A. BIGOT, La variabilité climatique en Côte d'Ivoire: entre perceptions sociales et réponses agricoles, *Cahiers Agricultures*, Vol 14, (6) (2005) 533 - 540
- [11] - INS (Institut National de la Statistique), Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) 1998. Données socio-démographiques et économiques des localités, résultats définitifs par localités, région des lagunes, (2014) 26 p.
- [12] - N. AGHUI, et J. BIEMI, Géologie et hydrogéologie des nappes de la région d'Abidjan et risques de contamination, *Annales de l'Université Nationale de Côte d'Ivoire série C*, Vol. 20, (1984) 313 - 347
- [13] - SOGREAH, " Etude de la gestion et de la protection de la nappe assurant l'alimentation en eau potable d'Abidjan. Direction et Contrôle des Grands Travaux, Abidjan ", 30 (1984)
- [14] - A. S. KOUAMÉ, G. A. BAKAYOKO, K. F. KOUAMÉ, I. J. IPOU et K. E. N'GUESSAN, Flore adventice des cultures vivrières de la zone périurbaine du district d'Abidjan (Côte d'Ivoire), *Journal of applied Biosciences*, Vol. 118, (2017) 11744 - 11753
- [15] - S. A. TAPSOBA, Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Dabou (Sud de la Côte d'Ivoire) : Hydrochimie, isotopie et indice cationique de vieillissement des eaux souterraines. Thèse de Doctorat, Université nationale de Côte d'Ivoire, (1995) 200 p.
- [16] - J. L. GUILLAUMET, et E. ADJANOOUN, Végétation de la Côte d'Ivoire : Milieu naturel de la Côte d'Ivoire, Mémoire ORSTOM, Vol. 50, (1971) 163 - 391
- [17] - B. F. E. LOROUX, Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier de Côte d'Ivoire. Doctorat, Université de Bordeaux I, France, (1978) 93 p.
- [18] - K. A. KOUASSI, Modélisation hydrodynamique en milieu poreux saturé par approche inverse via un échelle : cas de l'aquifère du Continental Terminal d'Abidjan (Côte d'Ivoire), Thèse unique de Doc Abrogoua, (2013) 266 p.
- [19] - D. B. KOUAKOU, Les mutations de la grande distribution à Abidjan, métropole ivoirienne, *Revue canadienne de géographie tropicale/Canadian journal of tropical geography [En ligne]*. En ligne le 25 décembre 2020, Vol. 7, (2) (2020) 34 - 43
- [20] - D. NGUYEN-THE, S. OLLAGNIER et M. PETRIGNET, Carte Piézométrique de la nappe des grès du Trias inférieur en 2010, (2010) 30 p.
- [21] - G. CASTANY, Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Edition Dunod. Paris, France, (1998) 236 p.
- [22] - M. TANIGUCHI, D. R. WILLIAMSON et A. J. PECK, Disturbances of temperature-depth profiles due to surface climate change and subsurface water flow : 2. an effect of step increase in surface temperature caused by forest clearing in southwest Western Australia, *Water Resources Research*, Vol. 35, (1999) 1519 - 1529
- [23] - J. CONSTANTZ, S. W. TYLER AND E. KWICKLIS, Temperature profile methods for estimating percolation rates in arid environments, *Vadose Zone Journal*, Vol. 2, (2003) 12 - 24
- [24] - G. FERGUSON, A. D. WOODBURY and L. D. MATILE, Estimating deep recharge rates beneath an interlobate moraine using temperature logs, *Ground Water*, Vol. 41, (2003) 640 - 646
- [25] - J. PUHAKKA, K. JÄRVINEN, J. LANGWALDT, E. MELIN, M. MÄNNISTÖ, J. SALMINEN and M. J. W. SJÖLUND, On-site and in situ bioremediation of wood-preserved contaminated groundwater, *Water Sci Techno*, Vol. 42, (5-6) (2000) 371 - 376
- [26] - S. E. SILLIMAN, J. RAMIREZ and R. L. MCCABE, Quantifying downflow through creek sediments using temperature time series: one-dimensional solution incorporating measured surface temperature, *Journal of Hydrology*, Vol. 167, (1 - 4) (1995) 99 - 119
- [27] - OMS (Organisation Mondiale de la Santé), Directives de qualité pour l'eau de boisson. Genève, Suisse, (2017) 564 p.

- [28] - N. BOUDERKA, A. K. SOUID, F. LAKHILI, A. LAHRACH and M. BENABDELHADI, Evaluation de l'impact de la pollution agricole sur la qualité des eaux souterraines de la nappe du Gharb, *European Scientific Journal*, Vol. 12, (11) (2016) 509 - 524
- [29] - H. HADDAD and H. GHOUALEM (2014). "Caractérisation physico-chimique des eaux du bassin hydrographique côtier algérois." *Larhyss*, Vol. 1, (18) (2014) 155 - 167
- [30] - J. RODIER, Analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer, Dunod : 9ème édition, Paris, (2009) 134 p.
- [31] - J.-L. POTELON and K. ZYSMAN, Guide des analyses d'eau potable, (1993) 153 p.
- [32] - DHH (Direction de l'Hydraulique Humaine en Côte d'Ivoire), Ministère des Infrastructures Economiques, Direction de l'hydraulique Humaine, Rapport annuelle, (2001) 66 p.
- [33] - J. P. JOURDA, J. KOUAMÉ K, M. B. SALEY, B. H. KOUADIO et Y. S. OGA, Contamination of the Abidjan aquifer by sewage : An assessment of extent and strategies for protection, *Groundwater Pollution in Africa*, 1st Edition, (2006) 291 - 300
- [34] - K. J. KOUAMÉ, Contribution à la Gestion Intégrée des Ressources en Eaux (GIRE) du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) : Outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution. Doctorat Thèse unique, Université Félix Houphouët Boigny, (2007) 229 p.
- [35] - K. DONGO, K. F. KOUAMÉ et B. KONÉ, Analyse de la situation de l'environnement sanitaire des quartiers défavorisés dans le tissu urbain de Yopougon à Abidjan Côte d'Ivoire, *Vertigo*, Vol. 8, (3) (2008) 17 p.
- [36] - SODECI, Etude de la gestion et de la protection de la nappe d'Abidjan. Actualisation des études hydrogéologiques SOGREHAH de 1997, (2015) 78 p.
- [37] - MIE (Ministère des Infrastructures Economiques), Etude stratégique pour la gestion des déchets solides dans le District d'Abidjan. Programme d'Urgence d'Infrastructures Urbaines, Rapport d'étude, (2001) 176 p.
- [38] - D. G. AHOULE, M. J. A. OHOU-YAO, O. B. YAPO, A. E. J. E. Y. GNAGNE, V. MAMBO, Caractérisation hydrochimique de la nappe phréatique de la ville d'Abidjan : cas des communes d'Abobo, d'Attécoubé, de Koumassi et de Yopougon ; *Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie*, Vol. 44, (2017) 51 - 57
- [39] - K. E. AHOUSI, Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le Sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région Abidjan-Agboville. Thèse Unique de Doctorat, Université de Cocody : Abidjan, (2008), 270 p.
- [40] - C. GUILLEMIN, and J. C. ROUX, Pollution des eaux souterraines en France : bilan des connaissances, impacts, et moyens de prévention, Acte de colloque, L'avenir de l'eau. Quelques réponses des sciences hydrotechniques à une inquiétude mondiale. Vingt deuxièmes journées de l'hydraulique. Paris, 15 - 17 septembre 1992. Tome 3, (1992) 262 p.
- [41] - Y. M. S. OGA, K. Y. A. KOFFI, J.-P. Y. N'GORAN, O. J. G. K. KPAN, Y. KOUAMÉ and J. BIÉMI, "Caractéristiques hydrogéologiques de l'intervalle 177-79m du forage d'Abouabou (Abidjan, côte d'Ivoire) : paramètres physico-chimiques, *International Journal of Innovation and Scientific Research*, Vol. 21, (1) (2016) 81 - 91
- [42] - WHO, Protecting groundwater for Health, (2006) 697 p.
- [43] - P. B. MWANZA, J. P. KATOND and P. HANOCQ, Evaluation de la qualité physico chimique et bactériologique des eaux de puits dans le quartier spontané de Luwowoshi (RD Congo), *Tropicultura*, Vol. 37, (2) (2019) 15 p.