



## HYDROCHIMIE, QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE ET BACTERIOLOGIQUE DES EAUX DE LA PARTIE NORD DE BRAZZAVILLE (REPUBLIQUE DU CONGO)

Olivier Florent ESSOULI

Université Marien NGOUABI, Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire de Géosciences, B.P. 69 Brazzaville, Congo

DOI: <http://dx.doi.org/10.24327/ijrsr.20241511.0953>

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received 10<sup>th</sup> September 2024

Received in revised form 25<sup>th</sup> September, 2024

Accepted 15<sup>th</sup> October, 2024

Published online 28<sup>th</sup> November 2024

#### Key words:

Hydrochemistry, physico-chemistry, microbiology, chemical families, water quality.

### ABSTRACT

The present study is based on the evolution of the physico-chemical and microbiological quality of surface and groundwater used for the daily needs of populations in the northern part of the Brazzaville region. The physico-chemical study of groundwater and surface water revealed that these waters are soft, weakly mineralized and that the alkalinity of these waters would be essentially dominated by bicarbonate ions ( $\text{HCO}_3^-$ ). These waters are also characterized by two (2) chemical families (chemical family of chloride and sulfate calcium and magnesium waters and chemical family of calcium and magnesium bicarbonate waters).

On the qualitative side, the good potability of water is called into question by the presence of certain minor chemical elements such as total iron ( $\text{Fe}_{\text{Tot}}$ ), hexavalent chromium ( $\text{Cr}^{6+}$ ), lead ( $\text{Pb}^{2+}$ ) and aluminum ( $\text{Al}^{3+}$ ) whose contents sometimes would exceed the values of the maximum admissible concentrations for drinking water defined by the WHO.

On the microbiological level, surface and groundwater in the northern part of Brazzaville would indicate fecal contamination. These surface and groundwater indicate a fecal contamination and a deterioration of the bacterial quality. This study would show that the water resources in the northern part of Brazzaville would be subject to significant anthropogenic pollution. The consumption of this type of water without any treatment would expose populations who consume it to health risk.

Copyright© The author(s) 2024, This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### INTRODUCTION

Les ressources en eau souterraine de la République du Congo n'ont jamais fait l'objet d'une évaluation complète ou systématique (MOUKOLO *et al.*, 1992). L'eau souterraine au cours de son séjour et de son circuit dans les formations géologiques perméables, subit des échanges géochimiques avec celles-ci. Les interactions eau-roche modifient les caractéristiques de l'eau (CASTANY, 1982).

Ainsi, les caractéristiques physico-chimiques dépendent entre autres de la composition chimique et minéralogique des terrains traversés. Les eaux souterraines constituent une part importante du patrimoine hydraulique du pays, du fait de son exploitation relativement facile. Les eaux souterraines sont traditionnellement les ressources en eau privilégiées pour l'eau potable, car plus à l'abri des polluants que les eaux de surface.

\*Corresponding author: **Olivier Florent ESSOULI**  
Université Marien NGOUABI, Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire de Géosciences, B.P. 69 Brazzaville, Congo

L'accès à l'eau potable constitue un problème majeur en République du Congo et particulièrement à Brazzaville sa capitale politique. En effet, à Brazzaville, les populations souffrent d'une pénurie en eau en dépit des sommes importantes disposées par l'état pour régler ce problème sociétal. De plus, la qualité de l'eau de boisson consommée par cette population laisse à désirer. Dans la zone couverte par cette étude, notamment le nord de Brazzaville, la qualité physico-chimique et microbiologique des sources d'approvisionnement en eau est d'une préoccupation grandissante. En effet, les eaux de surface et souterraines sont sujettes à des pollutions. Le manque d'assainissement collectif ainsi que la forte croissance démographique présentes dans la ville de Brazzaville, exercent de multiples contraintes sur les eaux de surface et souterraines. Les réseaux d'égouts, les fosses septiques, les eaux usées des hôpitaux et les déchets solides sont les sources principales de pollution des eaux de surface et souterraines dans les zones urbaines et périurbaines. L'agriculture à travers les intrants agricoles contribue également à cette pollution. L'usage de ces eaux à des fins alimentaires en particulier et de satisfaction quotidienne en général, représente un danger pour la santé des populations usagères.

Le présent travail s'intéresse à l'étude hydrochimique, de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de surface et souterraines exploitées par les populations au nord de la ville de Brazzaville, en République du Congo, dans le but de satisfaire leurs besoins quotidiens.

## MATERIELS ET METHODES D'ETUDES

### Présentation générale de la zone d'étude

La ville de Brazzaville est située au Sud-Est de la République du Congo, sur la rive droite du fleuve Congo, entre les latitudes 4°10' et 4°17' Sud et les longitudes 15°16' et 15°45' Est (Figure 1). Elle s'étend sur 30 km avec une superficie de 264 km<sup>2</sup> et est limitée au nord-est par le plateau Batéké et la rivière Djiri, au sud et à l'est par le fleuve Congo, à l'ouest par la rivière Maloto. Brazzaville, la capitale politique de la République du Congo compte 9 arrondissements : Makélékélé, Bacongo, Poto-poto, Moundali, Ouenzé Talangaï, Mfilou, Madibou, Djiri (GHENASSIA *et al.*, 1974).

Le relief de Brazzaville est représenté par deux ensembles morphologiques façonnés par l'érosion : les plateaux qui occupent les 2/3 de la superficie totale de l'agglomération et les plaines qui occupent les 1/3.

La région de Brazzaville est soumise à un climat de type bas-congolais, caractérisé par une longue saison sèche très marquée de 4 à 5 mois (de mai à septembre), encadrée par deux saisons de pluies de 7 à 8 mois (d'octobre à mai). La température moyenne annuelle oscille entre 25 et 26 °C et les précipitations sont modérées, assez constantes oscillant entre 1270 et 1370 mm (Figure 2). Les facteurs géographiques comme l'altitude, le relief, le courant de Benguela, la végétation ainsi que les

eaux continentales jouent un rôle important sur le climat du Congo et en particulier de Brazzaville. Car ces facteurs sont à l'origine des différentes saisons qu'on retrouve au Congo et à Brazzaville ; en d'autres termes, ils sont le moteur du climat du Congo (MOUKOLO *et al.*, 1992 et VENNETIER, 1977).

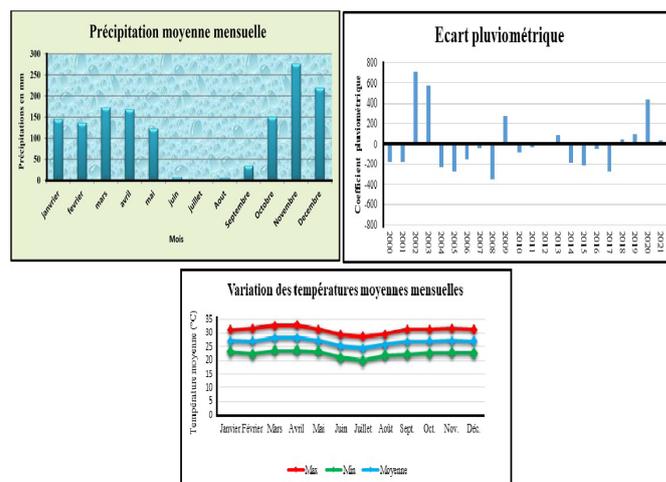


Figure 2. Variation des paramètres climatiques à Brazzaville (station synoptique de l'aéroport international de Maya-Maya : 2000 à 2022) (MPANDZOU MALOZI, 2022).

Figure 2. Variation of climate parameters in Brazzaville (synoptic station of Maya-Maya Airport: 2000 – 2022) (MPANDZOU MALOZI, 2022)

### Contexte géologique

La géologie du nord de Brazzaville est constituée par la série du Stanley-Pool et celle des Plateaux Batéké (Figure 3).

La série du Stanley-Pool est constituée des formations

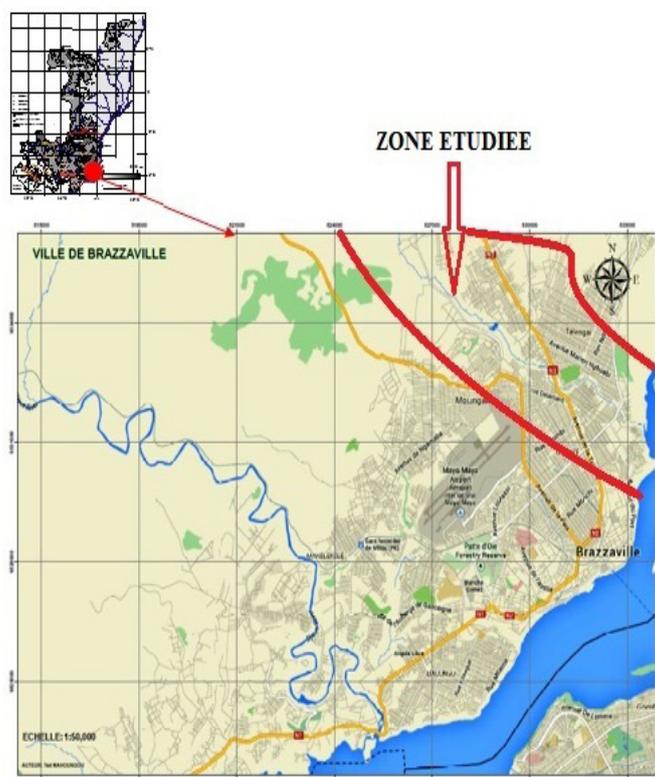


Figure 1. Situation géographique de la région de Brazzaville (ESSOULI *et al.*, 2020).  
Figure 1. Geographic localisation of the Brazzaville region (ESSOULI and *al.*, 2020).

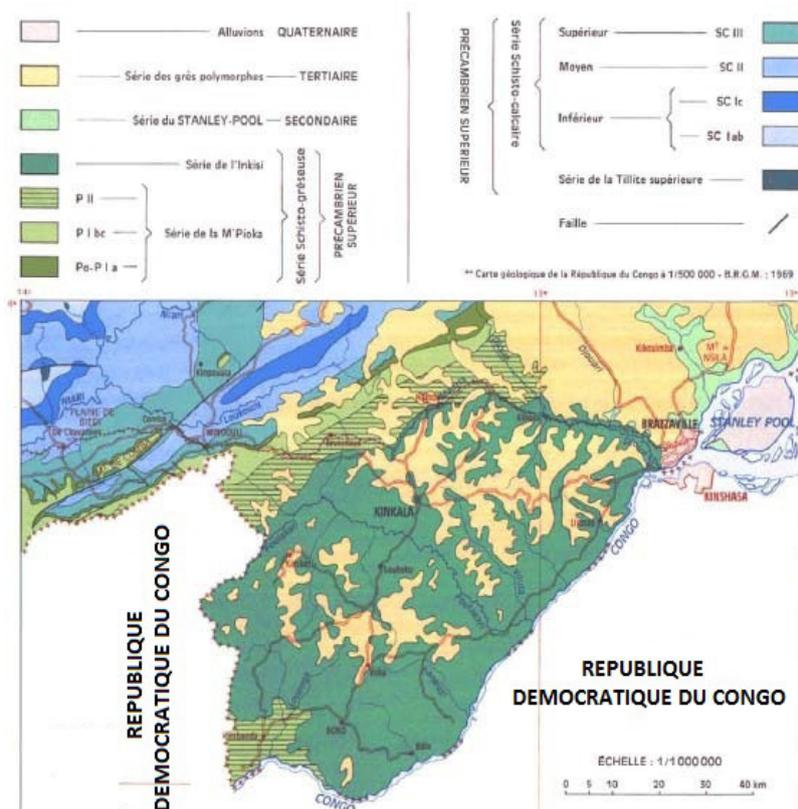


Figure 3. Carte géologique de Brazzaville (DADET, 1969).

Figure 3. Geological map of Brazzaville (DADET, 1969).

sédimentaires continentales silico-clastiques d'âge Jurassique supérieur à Crétacé. Elle affleure dans plusieurs ravins et repose en discordance de ravinement sur les grès arkosiques de couleur lie-de-vin d'âge Paléozoïque du Groupe de l'Inkisi (GIRESE, 1990, MOUYOUNGOU, 1990).

Selon COSSON (1955), GIRESE (1990), DESTHIEUX (1993), DESTHIEUX *et al.* (1993), la série du Stanley-Pool est subdivisée en trois niveaux : le niveau inférieur (SP1) d'environ 10 m est connu par sondage au port de Kinshasa et dans le ravin de Makélékélé. Ce niveau fossilifère comporte des argilites rouges à passées gréseuses abondantes vers le haut, superposé à des marnes plus ou moins sableuses de teinte analogue. Ces argilites sont silteuses et stratifiées (alternance de lits rouges et de lits jaunes ocres (*In* : BOUDZOU MOU, 1986) ; le niveau moyen (SP2), d'une épaisseur d'au moins 20 m (GIRESE, 1990), est constitué de grès tendres blancs localement indurés à stratifications entrecroisées. Ce niveau est riche en feldspaths et est silicifié dans sa partie supérieure formant des dalles silicifiées. Les niveaux 1 et 2 constituent l'aquifère dans toute la ville de Brazzaville ; le niveau supérieur (SP3), d'environ 90 m de puissance est formé de grès blanc silteux très tendres, riches en kaolinite et à stratifications entrecroisées (GIRESE, 1990).

La série des plateaux Batéké surmonte la série du Stanley-Pool par une discordance de ravinement parfois difficile à mettre en évidence (LE MARECHAL, 1966). Elle est constituée de sables éoliens localement silicifiés. Cette série comprend deux niveaux : le niveau inférieur (Ba1) et le niveau supérieur (Ba2). Le niveau inférieur est constitué de grès tendres d'âge paléogène. Le niveau supérieur est constitué des sables fins, argileux et silteux, jaune ocre d'âge Néogène. Le sable jaune ocre argilo-silteux est actuellement stratigraphiquement séparé

de la série des Plateaux Batéké, et est appelé la «Formation de couverture» (THIEBLEMONT, 2013 ; MIYOUNA *et al.* 2015). Le sable fin jaune ocre, argilo-silteux constitue la couverture de toutes les formations anciennes dans notre zone d'étude.

### Hydrologie et hydrogéologie

L'étude stratigraphique laisse entrevoir a priori une succession hydrogéologique d'ensemble assez simple où les aquifères non confinés (nappes libres) sont principalement constitués d'alluvions quaternaires, de sable et grès tendres des séries Batéké et de grès continentaux du Stanley Pool (MOUKOLO *et al.*, 1992).

En effet, la région de Brazzaville fait partie du vaste ensemble hydrogéologique des plateaux Batéké. C'est un véritable château d'eau d'où sont issus bon nombre des grands cours d'eau du Congo et du Gabon (Niari, Léfini, Ogooué, etc.). Les niveaux aquifères sont constitués par les sables fins, graviers et grès tendres. Leur épaisseur, très variable, peut atteindre 100 m en certains endroits. L'aquifère est par endroit interrompu par des lentilles d'argile ou des bancs de grès silicifiés donnant naissance à quelques sources de contact très localisées. Sa limite supérieure est constituée par la surface piézométrique de la nappe. Les débits sont généralement très faibles (de l'ordre de 0,01 L/s). Cette nappe alimente plusieurs cours d'eau pérenne, et de nombreux puits traditionnels la captent dans les banlieues de Brazzaville. L'alimentation directe de la nappe par la pluie se fait sur toute sa superficie (MOUKOLO *et al.*, 1992).

Cependant, l'exploitation des fiches techniques des forages d'eau fournies par les sociétés de réalisation des forages (CBTBP, SOPEX CONGO et FORECO) laisse entrevoir une

succession hydrogéologique assez simple, dont on dispose de la base vers le sommet des grès, des sables et enfin des argiles. Les sables sont pour la plupart argileux et les argiles sont sableuses. Les fiches techniques des forages d'eau décrites permettent de dire que : le substratum du système aquifère de la région de Brazzaville est formé par les argilites de la série du Stanley-Pool inférieure et les grès arkosiques de l'Inkisi. En outre, les forages les plus profonds sont observés dans les quartiers périphériques (Nkombo, Massengo, Kintélé) où les profondeurs forées peuvent dépasser 180 m.

### Méthodologie utilisée

#### Stérilisation du matériel de prélèvement au laboratoire

Avant de faire le prélèvement sur le terrain, tous les flacons en verre devant servir pour les échantillons d'eaux des analyses microbiologiques sont stérilisés au laboratoire. Les flacons en plastique ont été stérilisés par la méthode Pasteur. Cette méthode consiste à chauffer l'eau dans un récipient propre à une température de 100 °C et à y plonger pendant quelques minutes, les flacons en plastique. Les flacons en verre, quant à eux, ont été stérilisés dans l'étuve de type THEMOSI-SR 1000 à une température de 160 °C à 180 °C pendant 10 à 15 minutes (PRESCOTT *et al.*, 2003). Nous avons utilisé des flacons en plastique pour le prélèvement des échantillons d'eaux des analyses physico-chimiques et en verre pour le prélèvement des échantillons d'eaux des analyses microbiologiques de capacité respective 1,5 Litre et 200 mL.

#### Prélèvement des échantillons d'eaux sur le terrain

Le prélèvement des échantillons d'eaux de surface et souterraines s'est effectué en trois campagnes : janvier 2014 ; mai 2015 ; et décembre 2016 ; Deux types d'eaux ont été prélevés : les eaux de surface (rivières) et les eaux souterraines (forage, puits). Un total de vingt-six (26) a été prélevé. Les points d'eau échantillon ont été localisés en coordonnées géographiques à l'aide d'un GPS et sont situés sur la carte de localisation (Figure 4). L'échantillonnage a été réalisé sur les eaux souterraines captées par les forages, les puits traditionnels et les eaux de surface (Figure 5).

Pour le prélèvement de l'eau de forage, un réchaud à gaz a été utilisé, ce réchaud nous a servi pour flamber le robinet afin d'éviter toute contamination de l'échantillon. Cependant, pour l'eau de puits, le matériel de prélèvement a été composé d'un flacon stérilisé auquel on a fixé au corps une masse. Cette masse a pour but de faciliter la descente du flacon dans le puits (NF EN ISO 19458, 2006).

#### Transport et stockage des échantillons au laboratoire

Les échantillons d'eaux prélevés ont été transportés dans une glacière à une température environ de 4 °C à 8°C au laboratoire pour être analysés dans les heures qui suivent le prélèvement pour la microbiologie et les échantillons sont ensuite stockés dans un réfrigérateur à la même température environ pour la physico-chimie (RODIER & COLL, 1996).

#### Méthodes d'analyses des eaux au laboratoire

##### Analyses physico-chimiques

Au laboratoire, nous avons procédé à la détermination du pH et de la conductivité électrique ainsi qu'à l'analyse chimique des éléments chimiques suivants :  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $HCO_3^-$ ,

$PO_4^{3-}$ ,  $F^-$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Pb^{2+}$ , Fer total ( $Fe_{Tot}$ ),  $Cr^{6+}$ . Le pH, et la conductivité électrique ont été déterminés grâce à l'hannaprobe. Les analyses chimiques des ions  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $F^-$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Pb^{2+}$ , Fer total ( $Fe_{Tot}$ ) et  $Cr^{6+}$  des eaux échantillonnées ont été effectuées par chromatographie ionique et celles des ions bicarbonates ( $HCO_3^-$ ) par titrimétrie.

##### Analyses microbiologiques

Elles consistent à rechercher les micro-organismes responsables de la pollution et la dégradation de la qualité des eaux consommées. La présence de ces germes pathogènes engendre diverses maladies et met en danger la santé humaine.

##### a). Milieux de culture et germes recherchés

Un milieu de culture permet aux bactéries, levures et moisissures de se développer afin de les étudier (LOUIS, 2007).

Les milieux de culture utilisés sont Plat Court Aga et Mac Conkey. Avant l'ensemencement il faut préparer ces milieux dans l'autoclave à 121°C, pendant environ 15 minutes. Pour la recherche des bactéries, plusieurs milieux de cultures solides près à l'emploi dans des boîtes de pétri à usage unique ont été utilisés (Tableau I). Les paramètres recherchés lors de ce dénombrement sont :

##### - Les germes totaux

Ce sont des germes banaux qui ne sont pas pathogènes et qui poussent sur la gélose nutritive à 37 °C pendant 24 heures. On les rencontre dans la nature (eaux, sols, végétaux etc.).

##### - Les coliformes

Les coliformes totaux constituent un groupe de bactéries d'origine fécale et environnementale. Elles se présentent naturellement dans le sol, la végétation et dans le tube des humains et des animaux. Ce sont des bactéries servant d'indicateurs de pollution ou de contamination microbiologique. Leur présence dans l'eau indique une dégradation de la qualité de l'eau. Les coliformes totaux sont facilement éliminés par la désinfection. Elles désignent les colibacilles responsables d'infection urinaire et intestinale. Leur recherche et leur dénombrement permettent de déceler une éventuelle contamination fécale.

##### b). La technique d'ensemencement direct

Cette technique a consisté à prélever 1 mL de l'échantillon à l'aide d'une micro seringue, puis injecter ce dernier dans la boîte de pétri, ensuite verser 2 à 3 mL environ du milieu de culture dans la boîte de pétri, puis homogénéiser le mélange.

Après coagulation, les boîtes de pétri sont ensuite incubées dans l'étuve de type THERMOSI-SR 3000, à un couple optimal temps/température des organismes recherchés. L'observation se fait 24 heures ou 48 heures après incubation (MAKOUTODE, 1999).

##### c). Dénombrement des germes

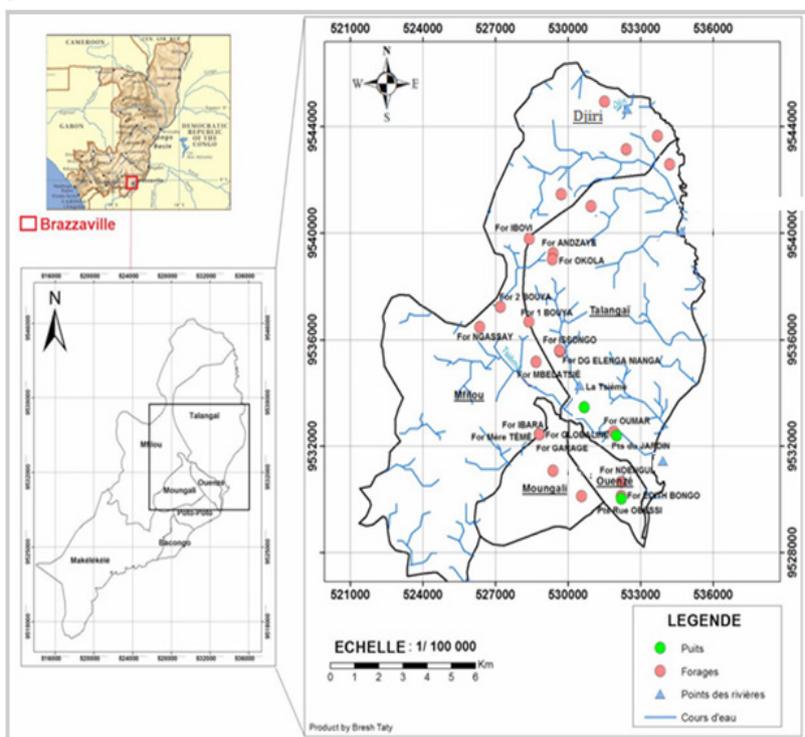
Le dénombrement a été effectué par un comptage simple de colonies bactériennes qui ont poussé selon les normes de l'UEMOA, en observant différentes couleurs visibles à l'œil nu (Tableau I ci-dessus) sur les boîtes de pétri.



**Traitement des données hydrochimiques**

Le traitement des données collectées sur les eaux de surface et souterraines de la partie nord de Brazzaville a été réalisé à l'aide de la méthode hydrochimique. L'étude hydrochimique des eaux a nécessité l'utilisation du diagramme de Piper pour la classification hydrochimique des eaux.

L'évaluation de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de surface et souterraines s'est faite en comparant les teneurs des différents paramètres chimiques et microbiologiques avec les valeurs de concentrations maximales admissibles définies pour l'eau de boisson par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2017).



**Figure 4.** Localisation des points d'eau échantillonnés (ESSOULI et al., 2020).  
**Figure 4.** Localisation of sampled water points (ESSOULI and al., 2020).



**Figure 5.** Différents points d'accès aux ressources en eaux dans la partie nord de Brazzaville.  
**Figure 5.** Different access points to water resources in the northern part of Brazzaville

La fiabilité des analyses chimiques est liée aux méthodes analytiques et aux concentrations des différents paramètres chimiques des eaux. Les méthodes utilisées et les limites de détection varient selon le laboratoire d'analyse. L'écart relatif entre la somme des cations et la somme des anions permet de vérifier la précision des méthodes analytiques mises en œuvre et la validité des déterminations chimiques (KIRCHMER, 1983 ; FETTER, 1994). Son expression s'écrit :

Avec  $\varepsilon$  : erreur sur la balance ionique

L'écart relatif sert de critère principal pour l'évaluation de la qualité des résultats de l'analyse chimique de l'échantillon d'eau souterraine. Il est possible de classer les différentes situations rencontrées selon trois types de cas :

- Si  $0 \leq |\varepsilon| \leq 5\%$ , les analyses sont de très bonnes qualités. On peut donc les traiter.
- Si  $5 \leq |\varepsilon| \leq 10\%$ , les analyses sont acceptables. On peut également les traiter.
- Si  $|\varepsilon| > 10\%$ , les analyses sont de mauvaises qualités et sont donc rejetées. On ne peut pas les traiter car il y a eu des erreurs au moment du prélèvement.

Un contrôle systématique des erreurs relatives ( $|\varepsilon|$ ) sur les balances ioniques des résultats des analyses chimiques a été fait pour l'ensemble des points d'eau analysés au laboratoire (Kirchmer, 1983). Les valeurs des erreurs relatives sur les balances ioniques sont inférieures ou égales à 10 %, ce qui témoigne d'une bonne qualité des analyses chimiques, et celles-ci peuvent être traitées sans restriction à l'aide des logiciels de traitement des données hydrochimiques comme le logiciel diagramme développé par Roland Smiler du laboratoire d'hydrogéologie de l'université d'Avignon et Microsoft Excel.

## RÉSULTATS INTERPRÉTATION ET DISCUSSIONS

Les analyses physico-chimiques et microbiologiques au laboratoire ont porté essentiellement sur les ions majeurs, les éléments traces, les germes totaux, les coliformes totaux et fécaux.

moyenne arithmétique et si la valeur du CV est supérieure à 50 %, la variable observée a une distribution hétérogène autour de sa moyenne arithmétique (ESSOULI, 2005).

Les résultats obtenus montrent que les variables physico-chimiques comme  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{NO}_3^-$  ont une distribution géographique hétérogène ( $\text{CV} > 50\%$ ) au cours des trois campagnes et peuvent être interprétés en tenant compte des valeurs minimales et maximales de ces paramètres. Par contre les variables physiques (pH, CE et TDS) et les ions majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$ ) ont une distribution homogène ( $\text{CV} < 50\%$ ) au cours des trois campagnes et peuvent être interprétés en termes de moyennes.

Les valeurs de pH sont comprises entre 4,88 (F-15) et 8,01 (F-08, F-17) avec une moyenne de 6,15 pour la campagne de décembre 2016 ; entre 4,12 (F-09) et 5,58 (PTS-02) avec une moyenne de 4,75 pour la campagne de mai 2015 et de 4,01 (ES-02) à 6,8 (F-04) avec une moyenne de 4,79 pour la campagne de janvier 2014. Ces valeurs de pH enregistrées indiquent que les eaux sont dans l'ensemble acides.

La minéralisation d'une eau peut être évaluée par sa conductivité électrique (CE en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) ou par le taux de solides dissous (TDS en  $\text{mg}/\text{L}$ ). Ces deux paramètres dépendent de la quantité d'ions contenus dans cette eau.

En fonction des valeurs de la conductivité électrique, on peut classer les eaux: eaux de très faible minéralisation ( $\text{CE} < 100 \mu\text{S}/\text{cm}$ ); eaux de minéralisation faible ( $100 < \text{CE} < 200 \mu\text{S}/\text{cm}$ ); eaux de minéralisation moyenne ( $200 < \text{CE} < 333 \mu\text{S}/\text{cm}$ ); eaux de minéralisation moyenne accentuée ( $333 < \text{CE} < 666 \mu\text{S}/\text{cm}$ ); eaux de minéralisation importante ( $666 < \text{CE} < 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) et eaux de minéralisation élevée ( $\text{CE} > 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) (RODIER, 1996). Les valeurs de la conductivité électrique oscillent entre 18  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (F-19) et 41  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (ES-03) avec une moyenne de 23,84  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour la campagne de décembre 2016 ; entre 14  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (F-09) et 40  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (F-03, F-04, F-15, F-21) avec une moyenne de 34,10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour la campagne de mai 2015 et entre 2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (ES-03) et 360  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (PTS-01) pour

**Tableau I.** Germes, milieux de culture spécifiques, temps d'incubation et différentes colorations observées.

**Table I.** Germs, specific culture media, incubation time and different colorations observed.

Germes Recherchés	Milieux de culture	Température d'incubation (°C)	Temps d'incubation	Identification des germes
Germes totaux	PCA	37	24h	Colonies jaunes
Coliformes totaux	MC	37	24h	Colonies rouges
Coliformes fécaux	MC	37	48h	Colonies rouges foncées

## Résultats et interprétation

### Caractéristiques générales des eaux de surface et souterraines

Les paramètres statistiques (minimum, maximum, moyenne, écart-type et coefficient de variation) qui caractérisent la distribution, sont calculés pour chacune des variables physico-chimiques (Tableau II). Le coefficient de variation (CV) est le rapport de l'écart type sur la moyenne arithmétique. C'est un paramètre de mesures de la dispersion d'une série d'observations d'une variable autour de sa moyenne arithmétique. Si la valeur du CV est inférieure à 50 %, la variable observée a une distribution homogène autour de sa

la campagne de janvier 2014. Ces valeurs sont très hétérogènes pour la campagne de janvier 2014. Aussi, les teneurs mesurées durant cette campagne se différencient de celles mesurées lors des campagnes de mai 2015 et décembre 2016. Ces valeurs de la conductivité électrique des eaux indiquent que celles-ci sont faiblement à moyennement minéralisées.

Par contre, sur la base des valeurs du TDS, on peut distinguer : les eaux douces ( $\text{TDS} < 1000 \text{mg}/\text{L}$ ) ; les eaux saumâtres ( $1000 < \text{TDS} < 10\,000 \text{mg}/\text{L}$ ) ; les eaux salines ( $10\,000 < \text{TDS} < 100\,000 \text{mg}/\text{L}$ ) et les saumures ( $\text{TDS} > 100\,000 \text{mg}/\text{L}$ ) (BANTON *et al.*, 1997). Les valeurs de la minéralisation totale des eaux varient de 82  $\text{mg}/\text{L}$  (F-13) à 170  $\text{mg}/\text{L}$  (F-03) avec



une moyenne de 100,58 mg/L pour la campagne de décembre 2016 ; de 91 mg/L (F-14) à 148 mg/L (F-17) avec une moyenne de 117,84 mg/L pour la campagne de mai 2015 et de 76 mg/L (ES-02) à 154 mg/L (F-08) avec une moyenne 115,55 mg/L pour la campagne de janvier 2014. On pourrait donc dire que les eaux analysées sont très faiblement minéralisées et sont, dans l'ensemble, douces (TDS < 1000 mg/L).

Les teneurs en calcium des eaux sont comprises entre 3,87 mg/L (ES-02) et 23 mg/L (F-02) avec une moyenne de 13,79 mg/L pour la campagne de décembre 2016 ; entre 9 mg/L (F-11, F-14, F-23) et 22 mg/L (F-06) avec une moyenne de 14,60 mg/L pour la campagne de mai 2015 et entre 2 mg/L (F-10) et 17 mg/L (F-16) avec une moyenne de 10,86 mg/L pour la campagne de janvier 2014.

Les teneurs en magnésium oscillent entre 2 mg/L (F-08) et 15 mg/L (PTS-03) avec une moyenne de 9,70 mg/L pour la campagne de décembre 2016 ; entre 6 mg/L (F-05) et 14 mg/L (F-21) avec une moyenne de 9,88 mg/L pour la campagne de mai 2015 et entre 10 mg/L (ES-02, PTS-02, F-01, F-09, F-13) et 19 mg/L (F-08) avec une moyenne de 13,50 mg/L pour la campagne de janvier 2014.

Les teneurs en sodium dans les eaux vont de 0,03 mg/L (F-08) à 2,14 mg/L (PTS-03) avec une moyenne de 0,22 mg/L pour la campagne de décembre 2016 ; de 0,1 mg/L (F-04, F-06, F-08, F-11 et F23) à 0,9 mg/L (F-13) avec une moyenne de 0,28 mg/L pour la campagne de mai 2015 et de 0,05 mg/L (F-13) à 0,26 mg/L (F-15) avec une moyenne de 0,14 mg/L pour la campagne de janvier 2014. Dans ce cas-ci, les teneurs très faibles sensiblement nulles montrent que la nappe n'est pas exposée aux différentes activités de surface (maraîchage, abattoir).

Les analyses chimiques mettent en évidence des teneurs en potassium comprises entre 0,64 mg/L (PTS-01) et 8,9 mg/L (F-07) avec une moyenne de 4,89 mg/L pour la campagne de décembre 2016 ; entre 1,9 mg/L (F-04) et 8,2 mg/L (F-02) avec une moyenne de 5,02 mg/L pour la campagne de mai 2015 et entre 0,9 mg/L (F-01) et 6,6 mg/L (F-01) avec une moyenne de 3,53 mg/L pour la campagne de janvier 2014. D'une manière générale, les eaux souterraines présentent rarement des teneurs en potassium supérieures à 10 mg/L (CHERY, 2006).

Les teneurs en chlorures des eaux varient entre 0,02 mg/L (F-07) et 18,52 mg/L (F-20), avec 2,94 mg/L de moyenne pour la campagne de décembre 2016 ; entre 3,98 mg/L (F-01) et 24,50 mg/L (F-20), avec 12,63 mg/L de moyenne pour la campagne de mai 2015 et entre 2 mg/L (F-14) et 21,1 mg/L (F-02) avec 10,60 mg/L de moyenne pour la campagne de janvier 2014.

Les teneurs en sulfates des eaux évoluent de 4,98 mg/L (ES-02) à 48,37 mg/L (F-06) avec une moyenne de 26,76 mg/L pour la campagne de décembre 2016 ; de 10,81 mg/L (F-18) à 64,63 mg/L (F-17) avec une moyenne de 23,68 mg/L pour la campagne de mai 2015 et de 5,1 mg/L (F-03) à 37,5 mg/L (F-05) avec une moyenne 16,86 mg/L pour la campagne de janvier 2014.

Les teneurs en bicarbonates des eaux oscillent entre 10,8 mg/L (ES-02) et 88,54 mg/L (F-10) ; entre 30,39 mg/L (F-23) et 72,92 mg/L (F-06) ; entre 22,8 mg/L (ES-03) et 85,9 mg/L (ES-01) avec des moyennes de 51,12 mg/L et de 44,44 mg/L respectivement pour les campagnes de décembre 2016, de mai

2015 et de janvier 2014. Le bicarbonate est l'élément le plus abondant dans tous les échantillons.

Les teneurs en nitrates sont très faibles dans les eaux étudiées. Elles s'alternent entre 0,4 mg/L (PTS-03) et 7,56 mg/L (F-02) pour la campagne de décembre 2016 ; entre 2,09 mg/L (F-19) et 24,92 mg/L (F-17) pour la campagne de mai 2015 et entre 0,1 mg/L (ES-01, ES-02, PTS-01, F-01, F-02 et F-08) et 3,2 mg/L (F-04) pour la campagne de janvier 2014.

Les teneurs en fer total fluctuent entre 0,02 mg/L et 0,17 mg/L pour la campagne de décembre 2016 ; entre 0,1 mg/L et 0,8 mg/L pour la campagne de mai 2015 et entre 0 et 0,7 mg/L pour la campagne de janvier 2014. La présence de fer dans l'eau peut favoriser la prolifération de certaines souches de bactéries qui précipitent le fer ou corrodent les canalisations.

Les teneurs en manganèse vont de 0,008 mg/L à 1,12 mg/L pour la campagne de décembre 2016 ; de 0,010 mg/L à 0,022 mg/L pour la campagne de mai 2015 ainsi que de 0,01 à 0,023 mg/L pour la campagne de janvier 2014.

La teneur en fluor dépend beaucoup du temps de contact de l'eau avec les minéraux fluorés de l'aquifère. Elle est plus élevée dans les nappes captives. Dans les eaux étudiées, les teneurs en fluor sont très faibles pour les trois campagnes. Elles sont comprises entre 0,02 mg/L et 0,17 mg/L pour la campagne de décembre 2016 ; entre 0,1 mg/L et 0,8 mg/L pour la campagne de mai 2015 et entre 0 et 0,7 mg/L pour la campagne de janvier 2014.

Des corrélations établies (Tableau III) entre les différentes variables chimiques des eaux de la nappe montrent que les ions majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$ ) sont bien corrélés avec la minéralisation totale (TDS). Toutefois, la bonne corrélation entre les teneurs en ions majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$ ) indique 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. Par ailleurs, les teneurs en  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{Cl}^-$  n'augmentent pas avec la charge saline, et ne sont donc pas très déterminantes dans la minéralisation des eaux:

Chaque cellule de la matrice de corrélation (Tableau III) présente une valeur correspondant à la force et le sens du lien entre la variable de la ligne où la cellule se trouve et la variable de la colonne où la cellule se trouve. La valeur positive ou négative fournit des informations sur le sens du lien et en valeur absolue c'est-à-dire sans tenir compte du signe + ou - ; cette valeur fournit des informations sur la force du lien. Ainsi, lorsque la valeur est positive, il y'a existence d'un lien direct entre deux (2) variables c'est-à-dire si une variable augmente, l'autre variable augmente aussi. Lorsque la valeur est négative, il y'a existence d'un lien inverse entre deux (2) variables c'est-à-dire si une variable augmente, l'autre diminue.

**Tableau III.** Matrices de corrélation des données physico-chimiques des eaux (ESSOULI *et al.*, 2020).

**Table III.** Correlation matrices of physico-chemical water data (ESSOULI *et al.*, 2020).

Pour déterminer les familles et faciès géochimiques des eaux de surface et souterraines exploitées dans la partie nord de



**Tableau II.** Paramètres statistiques des données physico-chimiques en mg/L des eaux (ESSOULI *et al.*, 2020).**Table II.** Stastical parameters of physico-chemical data in mg/L of water (ESSOULI *et al.*, 2020).

Campagne de décembre 2016												
	pH	THt	TDS	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Mini	4,88	2	82	18	3,87	2	0,64	0,03	10,8	0,02	4,98	0,4
Maxi	8,01	11	170	41	23	14	8,9	2,14	88,54	18,52	48,37	7,6
Moy	6,15	7,54	100,58	29,65	13,79	9,70	4,89	0,22	51,12	2,94	26,76	3,11
Ecart-type	0,82	2,10	34,13	7,07	5,34	3,28	2,09	0,43	17,54	4,70	9,90	2,28
CV (%)	13,33	27,85	33,93	23,84	38,72	33,81	42,74	195,45	34,31	159,86	37	73,31
Campagne de mai 2015												
	pH	THt	TDS	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Mini	4,12	6	91,48	14	9	6	1,9	0,1	30,39	3,98	10,81	2,09
Maxi	5,58	10	148	40	22	14	8,2	0,9	72,92	24,5	64,63	24,92
Moy	4,75	7,76	117,84	25,6	14,60	9,88	5,02	0,28	44,44	12,63	23,68	5,10
Ecart-type	0,45	1,13	16,24	8,73	3,83	2,14	1,45	0,26	10,13	6,51	11,18	4,59
CV (%)	10,05	14,56	13,78	34,10	26,23	21,66	28,88	92,86	22,79	51,54	47,21	90,00
Campagne de janvier 2014												
	pH	THt	TDS	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Mini	4,01	6	102	58	2	9	0,9	0,08	22,8	2	5,1	0,1
Maxi	6,8	11	154	338	17	19	6,6	0,3	95,1	32	37,5	3,2
Moy	4,79	8,27	115,55	135,14	10,86	13,50	3,53	0,14	58,60	10,60	16,86	0,5
Ecart-type	0,85	1,24	19,04	114,92	3,43	2,74	1,61	0,06	17,94	7,60	9,94	0,72
CV (%)	17,74	14,99	16,48	85,04	31,58	20,30	45,61	42,86	30,61	71,70	58,96	69,44

Brazzaville, les données des analyses chimiques sont projetées sur les diagrammes triangulaires de Piper (Figure 6).

- pour la campagne de décembre 2016, dans le diagramme quadrangulaire, nous avons d'une part une prédominance des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes et d'autre part les eaux chlorurées et sulfatées. Cependant, dans le diagramme triangulaire des anions, les points d'eaux montrent une prédominance des points à évolution vers le pôle bicarbonaté où la quasi-totalité des points d'eau sont concentrés, des points qui sont décalés vers le pôle sulfaté (F-06, F-07) et des points d'eau à évolution vers le pôle à faciès mixtes (aucune prédominance d'un anion sur l'autre) (ES-02, F-19, F-20). Enfin, dans le diagramme triangulaire des cations, les points d'eaux se répartissent en trois groupes : le premier vers le pôle magnésien où la quasi-totalité des points d'eaux sont concentrés, le deuxième vers le pôle calcique, et le troisième vers la zone centrale mixte de non prédominance des différents cations (ES-02).
- alors que pour la campagne de mai 2015, les eaux étudiées sont à prédominance chlorurées et sulfatées, et qu'elles sont faiblement minéralisées. Dans le diagramme triangulaire des anions, les points d'eau montrés évoluent vers le faciès mixte (aucun anion n'est dominant sur l'autre) et dans le diagramme triangulaire des cations, les points d'eaux sont à prédominance magnésiennes.

- Le faciès chloruré-sulfaté peut s'expliquer par la présence des chlorures, sulfates, sodium et potassium liée certainement au lessivage de ces ions, contenus dans le sol, par l'eau de pluie au cours de l'infiltration et/ou à la dissolution de minéraux évaporitiques.
- Le faciès bicarbonaté calcique magnésien peut s'expliquer par la présence des formations calcaires et dolomitiques dans l'aquifère. En effet, la dissolution de la calcite et/ou de la dolomite entraîne la solubilisation des ions Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.
- pour la campagne de janvier 2014, dans le diagramme quadrangulaire, les eaux se répartissent en deux grandes familles : nous avons d'une part les eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes et d'autre part les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes. Dans le diagramme triangulaire des anions, il y a une prédominance des points d'eau vers le pôle bicarbonaté, certains points d'eau sont décalés vers le pôle chloruré. Toutefois, on ne remarque aucune prédominance d'un anion sur l'autre des points d'eau à évolution vers le pôle à faciès mixtes. Enfin, dans le diagramme triangulaire des cations, les points d'eau se répartissent en trois groupes : le premier groupe à évolution vers le pôle magnésien où la quasi-totalité des points d'eau sont concentrés, le second à évolution vers le pôle calcique,

le troisième à évolution vers la zone centrale mixte de non prédominance des différents cations.

La comparaison des trois diagrammes de Piper des eaux permet de constater qu'il y a eu changement de classification de faciès chimiques des anions et des cations au cours des trois campagnes de prélèvement. Les points d'eau qui se répartissaient d'une manière générale en deux faciès (bicarbonaté calcique et magnésien d'une part et d'autre part chloruré et sulfaté) sur les diagrammes triangulaires de Piper en janvier 2014 et en décembre 2016. L'évolution du faciès bicarbonaté calcique et magnésien vers le faciès chloruré et sulfaté pour la campagne de mai 2015, serait liée, au cours

de la dernière campagne, à une augmentation des teneurs en sulfate ainsi qu'à une diminution de teneurs en bicarbonates et en calcium.

### Qualité des eaux de surface et souterraines

#### Qualité physico-chimique des eaux

D'après l'Organisation Mondiale de la Santé, l'eau de boisson ou l'eau potable peut être définie comme une eau ne renfermant en quantités dangereuses ni substances chimiques, ni germes nocifs pour la santé (GOUDMAN et GILMAN, 1975). Les résultats des paramètres physico-chimiques des différentes campagnes représentés dans le tableau IV,

<b>Campagne janvier 2014</b>									
	TDS	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
TDS	<b>1,00</b>								
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0,78</b>	<b>1,00</b>							
Cl <sup>-</sup>	-0,44	-0,66	<b>1,00</b>						
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,41	-0,10	-0,29	<b>1,00</b>					
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,23	0,29	-0,08	0,19	<b>1,00</b>				
K <sup>+</sup>	0,25	0,37	-0,02	0,26	-0,12	<b>1,00</b>			
Na <sup>+</sup>	-0,16	0,39	-0,15	0,11	-0,11	0,21	<b>1,00</b>		
Mg <sup>2+</sup>	<b>0,61</b>	0,00	-0,08	0,32	0,27	-0,09	-0,08	<b>1,00</b>	
Ca <sup>2+</sup>	<b>0,55</b>	0,02	-0,18	0,22	0,03	0,13	-0,24	-0,20	<b>1,00</b>
<b>Campagne de mai 2015</b>									
	TDS	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
TDS	<b>1,00</b>								
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0,61</b>	<b>1,00</b>							
Cl <sup>-</sup>	0,01	-0,05	<b>1,00</b>						
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,49	-0,13	-0,52	<b>1,00</b>					
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,06	-0,19	-0,20	-0,05	<b>1,00</b>				
K <sup>+</sup>	0,35	0,17	0,37	0,30	0,2	<b>1,00</b>			
Na <sup>+</sup>	0,45	0,24	-0,08	0,31	-0,04	0,24	<b>1,00</b>		
Mg <sup>2+</sup>	0,40	0,05	0,34	0,35	-0,24	0,17	0,36	<b>1,00</b>	
Ca <sup>2+</sup>	<b>0,70</b>	<b>0,50</b>	-0,16	-0,11	0,17	0,06	0,10	-0,33	<b>1,00</b>
<b>Campagne de décembre 2016</b>									
	TDS	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
TDS	<b>1,00</b>								
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0,94</b>	<b>1,00</b>							
Cl <sup>-</sup>	-0,44	-0,50	<b>1,00</b>						
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<b>0,82</b>	<b>0,61</b>	-0,56	<b>1,00</b>					
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0,56</b>	<b>0,63</b>	-0,55	0,33	<b>1,00</b>				
K <sup>+</sup>	0,16	-0,06	0,12	0,28	0,06	<b>1,00</b>			
Na <sup>+</sup>	-0,41	-0,35	0,11	-0,38	-0,05	-0,36	<b>1,00</b>		
Mg <sup>2+</sup>	<b>0,67</b>	0,09	0,05	0,40	0,20	-0,11	-0,39	<b>1,00</b>	
Ca <sup>2+</sup>	<b>0,83</b>	<b>0,73</b>	-0,60	<b>0,82</b>	0,13	0,18	-0,27	0,18	<b>1,00</b>

présentent les maximums et minimums des concentrations de chaque paramètre comparé à la norme recommandée par l'OMS (2017). Il en ressort de ces deux tableaux que toutes les valeurs des ions majeurs dans l'ensemble respectent les limites fixées par l'OMS à l'exception de certains métaux lourds tels que le chrome, fer total, plomb, l'aluminium pour toutes les campagnes et du manganèse et de la silice analysée en Mai 2023, qui dépassent largement les normes recommandées.

La qualité de potabilité de ces eaux peut être remise en question à cause des ETM ou métaux lourds qui dépassent largement les valeurs limites fixées par l'OMS (2017).

Excepté les teneurs en  $Pb^{2+}$  ainsi que celles de l' $Al^{3+}$  qui sont supérieures aux concentrations maximales admissibles définies pour l'eau de boisson par l'OMS dans certains points d'eau, pour les trois campagnes, les autres éléments traces métalliques comme le zinc ( $Zn^{2+}$ ), le cuivre ( $Cu^{2+}$ ), le fer total ( $Fe^{2+} + Fe^{3+}$ ), le manganèse ( $Mn^{2+}$ ) et le fluor ( $F^-$ ) présentent des teneurs inférieures aux valeurs de concentrations maximales définies pour l'eau de boisson par l'OMS (Tableau IV).

#### Qualité microbiologique des eaux souterraines et de surface

Les analyses microbiologiques ont porté uniquement sur la recherche des germes indicateurs de la pollution fécale

(coliformes totaux et fécaux). En effet, les eaux contiennent toujours une multitude de microorganismes (virus, parasites, bactéries) de sources diverses telles que le sol et la végétation, dont l'estimation globale fournit des informations utiles pour l'évaluation et la surveillance de leur qualité. L'idéal serait que l'eau de boisson ne contienne aucun microorganisme pathogène. Le tableau V ci-dessous, présente la qualité des analyses microbiologiques effectuées pendant les campagnes de décembre 2016 et de mai 2015 en UFC/mL.

#### a). Les germes totaux

Pour la campagne de décembre 2016, la figure 7 fait ressortir une forte présence des germes totaux dans les eaux de surface (ES-01, ES-02, ES-03), des puits traditionnels (PTS-01, PTS-02, PTS-03) et de forages (F-01, F-02, F-03, F-04, F-05, F-07, F-08, F-09, F-10, F-11, F-12, F-14, F-15, F-16, F-17, F-18, F-19, F-20). Par contre, l'eau du forage F-06 est exempte des germes totaux, donc d'une qualité hygiénique appréciable concernant ces germes. Cependant, pour la campagne de mai 2015 (Figure 7), l'analyse des eaux souterraines révèle des concentrations élevées des germes totaux dans les forages F-01, F-02, F-03, F-04, F-05, F-06, F-07, F-09, F-10, F-11, F-13, F-14, F-15, F-17, F-18, F-19, F-20, F-21, F-22, F-23 (supérieurs à 30 UFC) : taux ne respectant pas les normes de

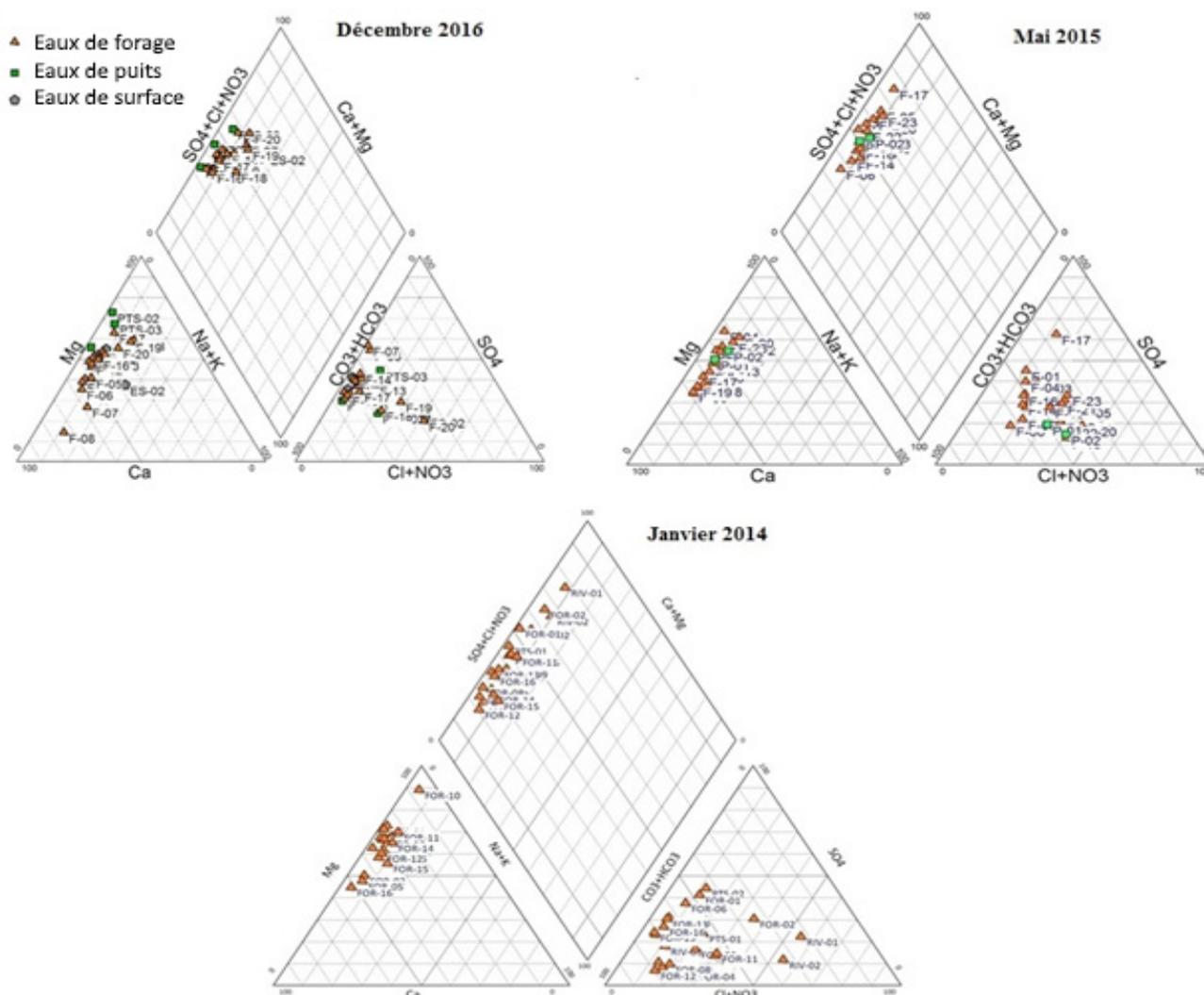


Figure 6. Classification dans le diagramme de Piper des eaux de surface et souterraines.

Figure 6. Piper diagram classification of surface water and groundwater.

l'OMS qui varient de 0 à 30 UFC. Seuls les forages F-08 ; F-12 et F-16 sont dans les normes.

### b). Les coliformes totaux

Pour la campagne de décembre 2016, la figure 7 indique que la présence des coliformes totaux est plus remarquable dans les eaux de surface (ES-01, ES-02, ES-03), de puits (PTS-01, PTS-02, PTS-03), de forage (F-01, F-02, F-03, F-04, F-05, F-07, F-08, F-09, F-10, F-11, F-12, F-14, F-15, F-16, F-17, F-18, F-19, F-20) que dans les forages F-06 et F-07 qui ne renferment pas des coliformes totaux. Nonobstant les résultats de la campagne de décembre 2016, les forages F-05 ; F-09 ; F-10 ; F-12 ; F-13 ; F-15 ; F-16, pour la campagne de prélèvement de mai 2015, obéissent aux normes de l'OMS. En effet, les critères microbiologiques exigent que les concentrations en coliformes totaux dans les eaux de boisson doivent être égales

**Tableau IV.** Valeurs de concentrations maximales admissibles de l'OMS et teneurs des paramètres chimiques des eaux de surface et souterraines de la partie nord de Brazzaville.

**Table IV.** WHO maximum admissible concentration values and levels chemical parameters in surface water and groundwater in the northern part of Brazzaville.

Campagne de décembre 2016												
	pH	THt	TDS	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Mini	4,88	2	82	18	3,87	2	0,64	0,03	10,8	0,02	4,98	0,4
Maxi	8,01	11	170	41	23	14	8,9	2,14	88,54	18,52	48,37	7,6
Moy	6,15	7,54	100,58	29,65	13,79	9,70	4,89	0,22	51,12	2,94	26,76	3,11
Normes OMS	9,5	--	<1000	800	160	50	--	--	500	250	500	50
Campagne de mai 2015												
	pH	THt	TDS	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Mini	4,12	6	91,48	14	9	6	1,9	0,1	30,39	3,98	10,81	2,09
Maxi	5,58	10	148	40	22	14	8,2	0,9	72,92	24,5	64,63	24,92
Moy	4,75	7,76	117,84	25,6	14,6	9,88	5,02	0,28	44,44	12,63	23,68	5,10
Normes OMS	6,5-	---	<1000	800	160	50	---	---	500	250	500	50
Campagne de janvier 2014												
	pH	THt	TDS	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Mini	4,01	6	102	58	2	9	0,9	0,08	22,8	2	5,1	0,1
Maxi	6,8	11	154	338	17	19	6,6	0,3	95,1	32	37,5	3,2
Moy	4,79	8,27	115,55	135,14	10,86	13,5	3,53	0,14	58,60	10,60	16,86	0,5
Normes OMS	6,5	---	<1000	800	160	50	---	---	500	250	500	50

à 0 UFC.

### c). Les coliformes fécaux

Pour la campagne de décembre 2016 (Figure 7), la présence des coliformes fécaux est uniquement prononcée dans les eaux de surface (ES-01, ES-02, ES-03) et du forage F-02 (Tableau 10). Ces eaux ne respectent pas la norme de l'OMS qui est de 0 UFC. Pour la campagne de mai 2015, les analyses

bactériologiques effectuées sur les eaux de forages montrent dans l'ensemble des taux normaux de coliformes fécaux. Seuls les forages F-09 (2 UFC) et F-14 (1 UFC) ne respectent pas les normes de l'OMS pour les eaux qui sont de 0 UFC.

## DISCUSSIONS

### Du point de vue physico-chimique

L'étude des paramètres physico-chimiques issus de la campagne d'échantillonnage de décembre 2016 des eaux de surface et souterraines de la partie nord de Brazzaville, a révélé que ces eaux ont des valeurs de pH qui oscillent entre 4,88 (F-15) à 8,01 (F-08 et F-17), avec une moyenne de 6,15. Ces valeurs de pH enregistrées, indiquent que les eaux de surface et souterraines de la partie nord de Brazzaville sont acides à légèrement basique et que l'alcalinité de ces eaux est dominée par les ions bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Ce résultat est en accord avec celui obtenu par ANDZAYE OSSANA (2015) et ESSOULI

KESSIMPOU (2017), respectivement lors des campagnes de janvier 2014 et de mai 2015. L'acidité de ces eaux déjà relevé par (MOUKOLO et al., 1992 ; AKOULI, 2009 ; OPO, 2009 ; LOEMBA, 2014 ; MPANDZOU MALOZI, 2022), serait probablement en relation avec la nature des sols de la zone qui sont réputés acides.

La minéralisation totale des eaux de surface et souterraines de la partie nord de Brazzaville, évaluée par les mesures de la



conductivité électrique et du total en solides dissous (TDS) a montré que ces eaux sont douces car leurs TDS s'échelonnent de 82 mg/L (F-13) à 170 mg/L (F-03) et faiblement minéralisées car leurs conductivités électriques sont comprises entre 18 µS/cm (F-19) à 41µS/cm (ES-03). Ces deux (2) résultats concordent avec ceux obtenus par ANDZAYE OSSANA (2015) et ESSOULI KESSIMPOU (2017), respectivement lors des campagnes de janvier 2014 et de mai 2015.

Du point de vue familles chimiques, les eaux de surface et souterraines de la partie nord de Brazzaville de la campagne de décembre 2016, sont caractérisées par deux (2) familles

de mai 2015 où les eaux souterraines étaient bicarbonatées calciques et magnésiennes. Ce passage de faciès Chloruré sodique au faciès bicarbonaté calcique et magnésien montre qu'il y a eu un enrichissement en carbonates solubles, ceci est sans doute lié à l'influence du climat (ESSOULI, 2005).

L'évolution des familles chimiques bicarbonatées sodiques et potassiques et chlorurées sodiques et potassiques ou sulfatées sodiques vers la famille chimique des chlorurées-sulfatés calciques et magnésiennes, serait probablement due à un enrichissement en chlorures, sulfates, calcium et en magnésium et à un appauvrissement en bicarbonates, sodium et potassium

**Tableau V.** Qualité des analyses microbiologiques des eaux en UFC/mL dans la partie nord de Brazzaville.

**Table V.** Quality of microbiological analyzes of water in CFU/mL in the northern part of Brazzaville.

Ouvrages (Libellé)	Paramètres et Résultats					
	Germe totaux (24 heures à 37 °C)		Coliformes totaux (24 heures à 37 °C)		Coliformes fécaux (48 heures à 44 °C)	
	Normes de l'OMS					
	0 - 30 Ufc		0 Ufc		0 Ufc	
	Campagne 2015	Campagne 2016	Campagne 2015	Campagne 2016	Campagne 2015	Campagne 2016
ES-01	-	100	-	100	-	66
ES-02	-	100	-	100	-	100
ES-03	-	100	-	66	-	100
PTS-01	-	100	-	100	-	0
PTS-02	-	100	-	100	-	0
PTS-03	-	100	-	100	-	0
F-01	100	100	100	33	0	33
F-02	100	100	30	100	0	0
F-03	100	100	5	66	0	0
F-04	100	100	22	33	0	0
F-05	100	100	0	0	0	0
F-06	-	0	-	0	-	0
F-07	100	100	100	66	0	0
F-08	30	100	0	66	0	0
F-09	100	100	60	100	2	0
F-10	100	100	0	100	0	0
F-11	100	100	21	100	0	0
F-12	0	100	0	66	0	0
F-13	100	100	0	0	0	0
F-14	100	100	100	100	1	0
F-15	100	66	0	0	0	0
F-16	1	100	0	0	0	0
F-17	100	100	100	33	0	0
F-18	100	100	100	0	0	0
F-19	100	100	4	100	0	0
F-20	-	100	-	33	-	0

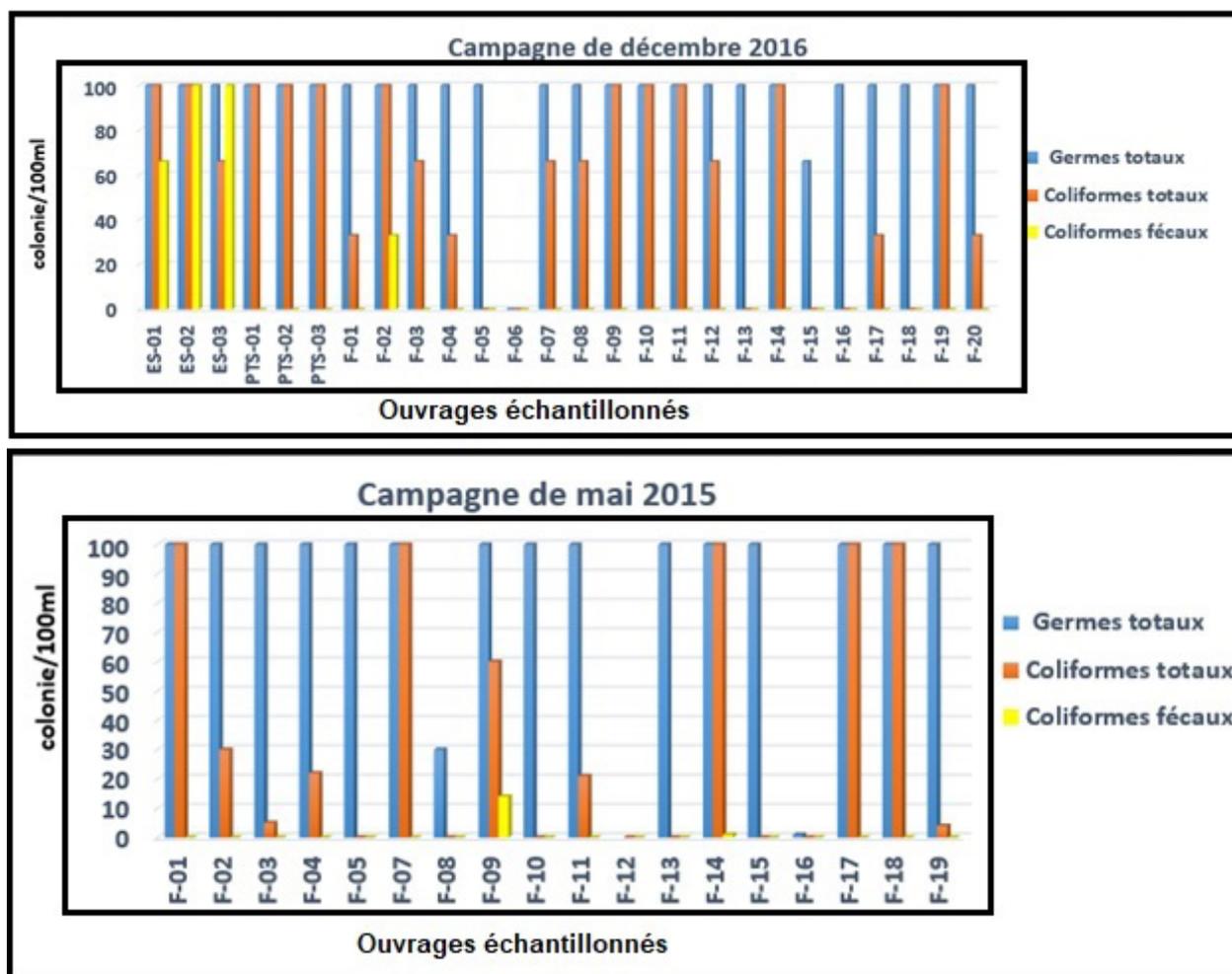
chimiques : les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes et les chlorurées et sulfatées). Ces résultats concordent avec ceux obtenus par ANDZAYE OSSANA (2015) (Figure 6), lors de la campagne de janvier 2014 et différent avec ceux obtenus par ESSOULI KESSIMPOU (2017), lors de la campagne

de ces eaux entre les trois (3) campagnes. L'enrichissement en chlorures et en sulfates serait probablement le résultat de la dissolution pendant la saison des pluies (période des hautes eaux) des minéraux évaporitiques [halite (NaCl) et sylvite (KCl)] et des minéraux sulfatés comme le gypse (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O)



et l'anhydrite (CaSO<sub>4</sub>). L'enrichissement en calcium et en magnésium serait probablement dû aux échanges entre les alcalins (sodium et potassium) de la nappe contre les alcalino-terreux (calcium et magnésium) des permutolites (formations argileuses) c'est-à-dire qu'il y'a une fixation des alcalino-terreux (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) et une solubilisation des alcalins (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>).

Le nombre de coliformes totaux dans les eaux de puits et de surface analysées dépasse de très loin la recommandation de l'OMS (0 coliformes totaux dans 100 ml d'échantillon). Le nombre très important de coliformes totaux peut s'expliquer en partie par manque d'entretien de ces eaux. En effet, ces puits et forages sont pour la plupart mal entretenus. Néanmoins, les eaux des forages F-05 et F-06 sont exemptes de coliformes



Les résultats des analyses chimiques des différentes campagnes d'échantillonnage montrent que les teneurs en Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, et NO<sub>3</sub><sup>-</sup> sont inférieures aux valeurs de concentrations maximales admissibles pour l'eau de boisson définies par l'OMS, suggérant que la majorité des points d'eau sont potables. En outre, certaines analyses ont révélé des concentrations élevées en fer total (Fer tot), aluminium (Al<sup>3+</sup>), chrome (Cr<sup>6+</sup>), plomb (Pb<sup>2+</sup>), phosphate (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), silice (SiO<sub>2</sub>) et manganèse (Mn<sup>2+</sup>), indiquant une contamination par des métaux lourds. Les métaux lourds présents dans l'eau peuvent être d'origine naturelle (altération des roches) ou anthropique.

#### Du point de vue microbiologique

Les indices de pollution microbiologique que nous avons retrouvés au cours de l'analyse révèlent une contamination fécale et une dégradation de la qualité bactérienne des eaux de surface et souterraines. Cette dégradation de la qualité de l'eau peut entraîner des maladies d'origine hydrique qui se manifestent le plus souvent par des troubles gastro-intestinaux (nausées, vomissement et diarrhée) (NZILA, 1993 ; SASSOON, 2005).

totaux, lors de la campagne de décembre 2016. Le nombre de coliformes fécaux dans les eaux de surface et forage analysées, dépasse la norme de l'OMS (0 coliformes fécaux dans 100 ml d'échantillon). Par contre, l'élévation de ce nombre dans certaines eaux de surface et forage pendant la même période s'explique par leurs expositions directes aux eaux de ruissellements qui viennent y tomber chargées de nombreuses substances contaminantes. La présence des coliformes d'origine fécale et leur quantité dépassant les normes admises pour l'eau de consommation attestent une pollution de ces eaux.

La quasi-totalité des eaux analysées au cours de cette étude présentent des coliformes en très forte quantité (coliformes totaux et coliformes fécaux). Ces résultats concordent avec ceux obtenus par ESSOULI KESSIMPOU (2017), lors de la campagne de mai 2015. Selon les valeurs indicatives de l'Organisation Mondiale de Santé (OMS) une eau de forage doit être exempte de contamination fécale, c'est-à-dire ne doit pas contenir de coliforme fécal. Seules les eaux des forages F-06 (campagne de décembre 2016) F-12 et F-16 (campagne de mai 2015) ne renferment aucun germe donc propre à la

consommation humaine.

## CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'étude hydrochimique a mis en évidence que les eaux sont douces avec des minéralisations variantes de 82 mg/L (F-13) à 170 mg/L (F-03). La corrélation entre les concentrations des ions majeurs et le TDS indique que la minéralisation des eaux de la nappe est surtout liée aux ions  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{Na}^+$  et que les ions  $\text{K}^+$   $\text{Cl}^-$  et  $\text{NO}_3^-$  agissent très peu dans la charge saline des eaux souterraines. En outre, l'étude des paramètres physico-chimiques des eaux de surface et souterraines de la partie nord de Brazzaville a révélé les informations ci-dessous :

- les eaux de surface et souterraines sont douces, faiblement minéralisées avec des valeurs de pH acides à légèrement basique et l'alcalinité de ces eaux est dominée par les ions bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ).
- d'un point de vue qualité chimique, la comparaison des teneurs des paramètres physico-chimiques des eaux de surface et souterraines de la partie nord de Brazzaville avec les valeurs de concentrations maximales admissibles de l'OMS, a montré que la bonne potabilité des eaux, est remise en cause par la présence de certains éléments tels que le manganèse ( $\text{Mn}^{2+}$ ), le plomb ( $\text{Pb}^{2+}$ ) et l'aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ) dont les teneurs dépassent parfois les valeurs maximales admissibles pour l'eau de boisson définies par l'OMS. A ces éléments, on peut également ajouter la présence du fluor et des nitrates qui, ont certes des teneurs admissibles aux normes de l'OMS, mais peuvent causer à la longue, des conséquences néfastes sur la santé des populations de la partie nord de Brazzaville. Les analyses microbiologiques ont décelé une contamination d'origine fécale et une dégradation de la qualité bactérienne des eaux de surface et l'eau du forage F-02. Cette dégradation de la qualité de l'eau peut entraîner des maladies d'origine hydrique qui se manifestent le plus souvent par des troubles gastro-intestinaux (nausées, vomissement et diarrhée).

Face aux problèmes de santé publique et d'environnement auxquels sont assujetties les populations de la partie nord de Brazzaville qui utilisent cette ressource sans aucun traitement, nous suggérons que :

- la surveillance des eaux des puits et des forages se fasse régulièrement afin de lutter contre les agents pathogènes et réduire ainsi le risque sanitaire associé au contact direct ou indirect avec de l'eau contenant des microbes ;
- l'établissement des procédures de surveillance et de contrôle des différents points d'eau, notamment dans le domaine microbiologique en interdisant des pratiques néfastes ou toutes les autres activités susceptibles de générer des polluants ;
- le soutien de l'Etat à la mise en place des infrastructures d'assainissement et des programmes de contrôle régulier de la qualité chimique et microbiologique des ressources en eaux souterraines que les populations exploitent pour subvenir à leurs besoins quotidiens.

## References Bibliographiques

- AKOULI (2009). Qualité des eaux des puits et des forages dans les quartiers périphériques nord de Brazzaville : Cas des Arrondissements Ouenzé, Talangaï et Mfilou. Mémoire DEA, Faculté des Sciences et Techniques, Univ. Marien NGOUABI : 79 p.
- ANDZAYE OSSONA A. (2015). Contribution à l'étude hydrochimique des aquifères exploités dans la partie nord de la région de Brazzaville : entre l'avenue de la paix et la rivière DJIRI. Mémoire de Master Géosciences, Faculté des Sciences et Techniques, Université Marien NGOUABI de Brazzaville (Congo).
- BANTON O., BANGOY L. M., CHEVALIER S., HOUENOU P., LAFRANCE P. et RIVARD C. (1997). Hydrogéologie : Multisciences environnementales des eaux souterraines. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, 460 p.
- BOUDZOU MOU F. (1986). La chaîne ouest Congolienne et son avant pays au Congo : Relation avec le Mayombien, Sédimentologie des séquences d'âge protérozoïque supérieur : Thèse doctorat 3<sup>ème</sup> cycle, Univ. D'Aix Marseille II : pp. 182-183
- CASTANY G. (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Edit. Dunod, Paris, 236 p.
- CHERY L. (2006). Qualité naturelle des eaux souterraines. Méthode de caractérisation des états de référence français.
- COSSON J. (1955). Notice explicative sur les feuilles Pointe-Noire et Brazzaville. Carte géologique de reconnaissance au 1/500.000. Direct. Mines et Géol. A.E.F. Brazzaville, 56 p.
- DADET P. (1969). Notice explicative de la carte géologique de la République du Congo-Brazzaville au 1/500 000e. Mémoire du BRGM N°070. pp. 44-45.
- DESTIEUX F. (1993). Notice explicative de la carte géologique du Congo au 1/1000000, MINE, ISBN 062-1599, 1-3, 27 p.
- DESTHIEUX F., BOUDZOU MOU F., MOMPOSSA F., AKIAOUE E., MISSAMO A., MALERA M., KIBA V. (1993). Carte géologique de la République du Congo à 1/100.000. Ministère des Mines et de l'Energie.
- ESSOULI KESSIMPOU P. (2017). Contribution à l'étude hydrochimique des eaux souterraines exploitées dans la partie nord de Brazzaville : Origine de la minéralisation et qualité physico-chimique et bactériologique. Mémoire de Master Géosciences, Faculté des Sciences et Techniques, Université Marien NGOUABI de Brazzaville (Congo).
- ESSOULI O. F., MIYOUNA T., ESSOULI KESSIMPOU P., BOUDZOU MOU F., MATINI L., FAYE S. (2020). Hydrochimie des eaux de surface et souterraines de la partie nord de Brazzaville : Origine et processus de minéralisation, RAMReS 2020 - Published Online 2020- <http://publication.lecames.org/> Vol. 2(1), pp. 1-15.
- ESSOULI O. F. (2005). Impact de la décharge publique du lac MBEUBEUSS sur la ressource en eau de l'Aquifère des sables quaternaires de THIAROYE (Dakar, Sénégal) : Thèse de doctorat 3<sup>ème</sup> cycle, Faculté des Sciences et Techniques, Univ. Cheikh Anta Diop (Dakar-Sénégal).

- FETTER C. W. (1994). Applied hydrogeology. Prentice Hall Inc., New Jersey (USA), 691 p.
- GHENASSIA J. C., TATI L., RENAUDEAU M., DE LA CHANONIE H. (1974). Visage du Congo. Paris : p. XXVII.
- GIRESE P. (1990). Paleoclimatic and structural environment at the end of the Cretaceous along the western Flank of the Congo Basin, with application of underground microdiamonds around Brazzaville. Journal of African Earth Sciences 10 : 399-408 p.
- GOUDMAN L. et GILMAN A. (1975). The pharmacological basis of therapeuties 5ème édition. Mac Milan Publishing Company, 170 p.
- KIRCHMER J. C. (1983). Quality control in water analyses. Environmental Science and Technology, 17 (4), pp 178-181.
- LE MARECHALA. (1966). Contribution à l'étude des plateaux Batékés (Géologie, géomorphologie, hydrogéologie). Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Centre de Brazzaville, Service Géologique, Rapport, 78 p.
- LOEMBA D. P. (2015). Contribution à l'Etude hydrochimique des eaux souterraines exploitées dans la partie Sud de Brazzaville. Mémoire de Master Géosciences, Faculté des Sciences et Techniques, Université Marien NGOUABI (Brazzaville, Congo).
- LOUIS J. (2007). Contrôle microbiologique des aliments. Microbiologie alimentaire, Université de Montpellier 2, 119 p.
- MAKOUTODE M., ASSANI A. K., OUENDO E-M., AGUE V. D. & DIALLO P. (1999). Qualité et mode de gestion de l'eau de puits en milieu rural au Bénin. Médecin d'Afrique Noire, 46 (11), 7 p.
- MPANDZOU MALOZI A. G. P. (2022). Origines et mécanismes de minéralisation des eaux de surface et souterraines de la région de Brazzaville (République du Congo). Mémoire de Master Géosciences, Faculté des Sciences et Techniques, Université Marien NGOUABI (Brazzaville, Congo).
- MIYOUNA T., MALOUNGUILA-NGANGA D. M., ESSOULI O. F., KINGA MOUZELO, KAYA F., SOW E. H., BOUDZOU MOU F. (2015). Evidence of deltaic system, type Colorado, in the middle term of the Proterozoic basin of Sembe-Ouessou: Northwest part of Republic of Congo. Asian Academic Research Journal of Multidisciplinary. [www.asianacademicresearch.org](http://www.asianacademicresearch.org) : 79 - 94.
- MOUKOLO N, SAMBA-KIMBATA M. J., MPOUNZA M., NZALABAKA J., MAZIEZOULA B. et OSSETE J. M. (1992). Hydrogéologie du Congo», document du BRGM n° 210. Editions du BRGM (France), 142 p.
- MOUYOUNGOU J. (1990). Les silicifications mésozoïques et cénozoïques de la bordure occidentale du Bassin de Paris et de la région de Brazzaville au Congo. Thèse 3ème cycle, Université d'Angers. UFR Sciences de l'environnement. 242 p.
- NF EN ISO 19458. (2006). Techniques de prélèvement.
- OMS (2017). Les lignes directrices de l'OMS en ce qui concerne la qualité de l'eau potable, mises à jour en 2006 sont la référence en ce qui concerne la sécurité en matière d'eau. (<http://www.lenntech.fr/applications/potable/normes/normes-oms-eau-potable.htm#ixzz3g33OyKts>)
- NZILA J. de D. (1993). La qualité des eaux et les maladies d'origine hydrique au Congo. Mémoire D. U. environnement et santé publique, Université de Montpellier 1, 33 p.
- OPO U. F. (2009). Qualité des eaux souterraines dans les quartiers périphériques de l'Arrondissement I de la ville de Brazzaville sud. Mémoire DEA, Faculté des Sciences et Techniques, Univ. Marien NGOUABI, 108 p.
- PRESCOTT M. L., JOHN P. H. & DONALD A. K. (2003). Microbiologie, 2<sup>ème</sup> Édition française, 6-8 p.
- RODIER J. (1996). Analyse de l'eau (Eaux naturelles, Eaux résiduaires, Eau de mer). 8ème Edition DUNOD, Paris, 1384 p.
- RODIER J. et COLL (1996). Analyse de l'eau. Paris, 9<sup>ème</sup> édition, Dunod, Paris (France)..
- THIEBLEMONT D. (2013). Evidence for an aeolian origin of the Holocene lateritic surface cover of Gabon. Quat. Int. 296, 176 - 197.
- SASSOON D. (2005). Les maladies liées à l'eau « Eau, santé et oasis du Sahara». [http://www.inbo-news.org/divers/sahara\\_2005/dominique\\_Sassoon.pdf](http://www.inbo-news.org/divers/sahara_2005/dominique_Sassoon.pdf).
- VENNETIER P. (1977). Atlas de la République Populaire du Congo. Editions J.A, Paris, 64 p.

**How to cite this article:**

Olivier Florent ESSOULI (2024). Hydrochimie, qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de la partie nord de Brazzaville (République du Congo). Int J Recent Sci Res.15(11), pp.5048-5059.

\*\*\*\*\*