

Caractérisation physico-chimique et étude sur la mise en équilibre calco-carbonique des eaux de trois forages de la ville de Brazzaville, Congo

**Hubert MAKOMO¹, Hermeline NTALANI^{1*}, Morya-El DISSINDA¹, Fulbert BOUAKA²
et Jean-Maurille OUAMBA¹**

¹ *Université Marien NGOUABI, Faculté des Sciences et Techniques, Unité de Chimie du Végétal et de la Vie,
BP 69, Brazzaville, République du Congo*

² *Société Nationale de Distribution d'Eau, BP 229, Brazzaville, République du Congo*

* Correspondance, courriel : tabunahermeline@gmail.com

Résumé

Ce travail porte sur l'amélioration de la qualité des eaux de trois forages privés de la ville de Brazzaville (Congo). Les échantillons d'eaux ont été prélevés dans les forages du quartier La Poudrière au cours des mois d'octobre, novembre et décembre de l'année 2016. Les prélèvements d'eaux ont été faits à l'aide des bouteilles en plastique de dix litres nettoyés au préalable. Les analyses réalisées avec ces échantillons d'eaux ont concerné les paramètres physico-chimiques suivants : le potentiel hydrogène (pH), le titre alcalimétrique (TA), le titre alcalimétrique complet (TAC), le titre hydrotimétrique (THT), les matières en suspension (MES), les sels d'acides forts (SAF), les sels des bases fortes (SBF), le dioxyde de carbone libre, la conductivité, la turbidité, la couleur, l'oxydabilité au permanganate de potassium, l'indice de Ryznar (I_r), l'indice de Larson (I_L), la minéralisation générale, le pouvoir d'oxydo-réduction (rH), ainsi que les teneurs en ions bicarbonates (HCO_3^-), ions carbonates (CO_3^{2-}), ions nitrates (NO_3^-), ions nitrites (NO_2^-) et ions phosphates (PO_4^{3-}). Les résultats de ces analyses ont mis en évidence les caractères acide, agressif et corrosif de ces eaux de forage. Les valeurs moyennes de pH sont respectivement 4,82 ; 4,54 et 4,23. Les différents traitements de neutralisation effectués ont permis d'apporter des corrections sur les valeurs de pH et de réduire les caractères agressif et corrosif de ces eaux de forages. Ces eaux de forage qui semblent être des solutions palliatives pour les populations nécessitent donc un traitement chimique au préalable.

Mots-clés : *eaux, forages, caractérisation, équilibre calco carbonique, Brazzaville.*

Abstract

Chemical physic characterization and study of calco carbonic equilibrium from three drilling water of Brazzaville city (Congo)

This work concerns the improvement of the water quality of three private boreholes in the Brazzaville city (Congo). Water samples were taken from the boreholes in the La Poudrière district in October, November and December of 2016. Water samples were taken using the previously cleaned ten-litre plastic bottles. The analyses carried out with these water samples concerned the following physico-chemical parameters: hydrogen potential (pH), alkalimetric titre (TA), full alkalimetric titre (TAC), hydrotimetric titre (THT), suspended

solids (SS), strong acid salts (SAF), strong base salts (SBF), free carbon dioxide, conductivity, turbidity, colour, Potassium permanganate oxidability, Ryznar index (IR), Larson index (IL), general mineralization, oxidation-reduction power (rH), as well as bicarbonate (HCO_3^-), carbonate (CO_3^{2-}), nitrate (NO_3^-), nitrite (NO_2^-) and phosphate (PO_4^{3-}) ion contents. The results of these analyses highlighted the acid, aggressive and corrosive characteristics of these drilling waters. The average pH values are 4.82; 4.54 and 4.23 respectively. The various neutralisation treatments carried out have made it possible to make corrections to the pH values and to reduce the aggressive and corrosive characteristics of these borehole waters. These drilling waters, which seem to be palliative solutions for populations, therefore require chemical treatment beforehand.

Keywords : *waters, drilling, characterization, calco carbonic equilibrium, Brazzaville.*

1. Introduction

La République du Congo dispose d'abondantes ressources en eau, constituées des eaux de surface et des eaux souterraines [1, 2]. Les eaux de surface sont drainées par deux grands bassins fluviaux : le bassin du Congo et le bassin du Kouilou-Niari. Le bassin du Congo regroupe les principaux affluents de la rive droite du fleuve Congo qui en est le principal collecteur. Il borde le pays sur plus de 6000 km et son module à Brazzaville atteint 43.000 m³ par seconde. Le bassin du Kouilou-Niari, avec une superficie d'un peu plus de 55.340 km², couvre pratiquement tout le Sud-Ouest du pays. Le principal collecteur est le fleuve Kouilou appelé également Niari dans son cours moyen et Ndouo dans son cours supérieur. Son module atteint 930 m³ par seconde dans son cours inférieur, plus précisément à Kakamoeka [1, 2]. Les ressources en eaux souterraines peuvent être regroupées dans quatre ensembles aquifères : les aquifères du bassin sédimentaire côtier (6000 km²), les aquifères des terrains continentaux de la Cuvette congolaise (224000 km²), les aquifères des séries du sédimentaire ancien (68000 km²) et les aquifères des roches cristallines et cristallophylliennes (44000 km²) [1]. Les ressources en eau renouvelables globales du pays sont estimées à 294.826 m³/ habitant / an [3]. En dépit de ses ressources en eau abondantes, la République du Congo est confrontée à une faiblesse de la capacité de production, à la vétusté et au faible entretien des installations de production et de distribution [4 - 6].

L'alimentation en eau potable assurée par le réseau national de distribution atteint un taux avoisinant 40 % de la population en milieu urbain et 11 % en milieu rural. En zones périurbaines, l'alimentation en eau à usage domestique est de plus en plus assurée par le secteur informel [4]. A Brazzaville, capital politique du pays, de sérieuses perturbations et des ruptures dans la distribution d'eau potable se produisent dans certains quartiers. Les ménages s'approvisionnent en eaux pouvant provenir du réseau national de distribution d'eau, des puits, des rivières, des pluies, des sources, ainsi que des forages [7]. Ces derniers sont devenus une source importante d'approvisionnement en eau pour les activités ménagères des populations [8]. Ces eaux de forage qui sont des eaux souterraines, ne sont pas toujours potables dans leur état naturel [9 - 13]. Plusieurs auteurs ont signalé le caractère acide des eaux souterraines dans la ville de Brazzaville [14 - 17]. Les eaux souterraines peuvent nécessiter un traitement pour les rendre potables avant d'être distribuées aux populations [18,19]. L'eau liée à la consommation humaine doit présenter des caractéristiques adéquates pour garantir la santé des populations [20,21]. Le but de notre étude est d'évaluer par une analyse physico-chimique, la qualité des échantillons d'eau de trois forages privés de la ville de Brazzaville et d'effectuer un traitement de neutralisation pour amener ces eaux de forage à l'équilibre calco carbonique.

2. Matériel et méthodes

2-1. Prélèvement des échantillons d'eaux de forage

Les échantillons d'eau ont été prélevés dans 3 forages privés du quartier La Poudrière, de Brazzaville, au cours des mois d'octobre, de novembre et de décembre de l'année 2016. Nous avons procédé à trois prélèvements pour chaque forage. Les échantillons d'eau ont été prélevés dans des bouteilles en plastique de dix litres, nettoyées au préalable puis rincées à l'eau avant prélèvement.

2-2. Caractérisation physico-chimique

Les mesures et les analyses ont été réalisées au laboratoire de la Société Nationale de Distribution d'Eau (SNDE), sur les échantillons d'eaux brutes des trois forages privés afin de déterminer les paramètres physico-chimiques suivants: le potentiel hydrogène (pH), le titre alcalimétrique (TA), le titre alcalimétrique complet (TAC), le titre hydrotimétrique (THT), les matières en suspension (MES), les sels d'acides forts (SAF), les sels des bases fortes (SBF), le dioxyde de carbone libre, la conductivité, la turbidité, la couleur, l'oxydabilité au permanganate de potassium, l'indice de Ryznar (I_R), l'indice de Larson (I_L), la minéralisation générale, le pouvoir d'oxydo-réduction (rH), ainsi que les teneurs en ions bicarbonates (HCO_3^-), ions carbonates (CO_3^{2-}), ions nitrates (NO_3^-), ions nitrites (NO_2^-) et ions phosphates (PO_4^{3-}).

2-2-1. Potentiel hydrogène (pH), Température, Potentiel rédox [rH]

Le pH a été mesuré avec un pH-mètre HANNA combiné à une électrode de référence avec une prise de la température, selon la norme NF T90-008 [22]. Le potentiel rédox a été déterminé par la *Relation* ci-dessous [23]:

$$rH = \frac{Pr + 0,250}{0,029} + 2 \times pH \quad (1)$$

Pr: différence de potentiel entre l'électrode de platine et l'électrode de référence (calomel) en Volt;
0,250: valeur du potentiel redox au calomel saturé par rapport à l'électrode d'hydrogène.

2-2-2. Dioxyde de carbone libre

Le dioxyde de carbone libre a été déterminé par la méthode titrimétrique en référence à la norme NF T 90-011 [23 - 25].

2-2-3. Turbidité, Matières en suspension, Couleur

La turbidité a été mesurée à l'aide d'un turbidimètre HACH 2100 N selon la norme NF EN ISO 7027. Les matières en suspension ont été déterminées par un colorimètre DR/890 HACH. La couleur a été déterminée à l'aide du comparateur de couleur LOVIBOND, en référence à la norme NF EN ISO 7887 [22, 26].

2-2-4. Conductivité, Minéralisation générale

La conductivité a été mesurée à l'aide d'un conductimètre HACH, en référence à la norme NF EN 27888 et la minéralisation générale a été évaluée à partir de la conductivité en référence à la norme NF T 90-111 [23, 24].

2-2-5. Titre alcalimétrique, Titre alcalimétrique complet, Titre hydrotimétrique

Le titre alcalimétrique et le titre alcalimétrique complet ont été déterminés par un dosage acido-basique avec une solution titrée d'acide sulfurique en présence respectivement de la phénolphthaléine de l'hélianthine suivant la norme NF EN ISO 9963. Le titre hydrotimétrique a été déterminé selon la norme NF T90 003 [23].

2-2-6. Ions bicarbonates (HCO_3^-), Ions carbonates (CO_3^{2-})

Les teneurs en ions bicarbonates et carbonates ont été calculés respectivement à partir du titre alcalimétrique complet (TAC) et du titre alcalimétrique (TA) [22].

2-2-7. Sels d'acides forts (SAF), Sels de bases fortes (SBF)

La teneur en sels d'acides forts a été calculée à partir de la conductivité et du titre alcalimétrique complet. La teneur en sels de bases fortes a été calculée à partir de la conductivité et du titre hydrotimétrique [22].

2-2-8. Teneurs en nitrates (NO_3^-), nitrites (NO_2^-) et phosphates (PO_4^{3-})

Les teneurs en nitrates, nitrites et phosphates ont été déterminés à l'aide du colorimètre DR/890 HACH, respectivement avec les réactifs NitraVer 5, NitriVer 3 et PhosphoVer [22].

2-2-9. Oxydabilité au permanganate de potassium

L'oxydabilité au permanganate de potassium a été déterminée en référence à la norme NF EN ISO 8467 [26, 27].

2-2-10. Indice de Ryznar, Indice de Larson

L'indice de Ryznar permet de définir la tendance agressive ou entartrante d'une eau [24]. Il a été calculé par la **Relation** :

$$I_R = 2 \times pH_e - pH_m \quad (2)$$

pH_e étant le pH d'équilibre et pH_m le pH mesuré

L'indice de Larson permet d'évaluer la tendance corrosive d'une eau [24]. Il a été calculé par la **Relation** :

$$I_L = SAF / TAC \quad (3)$$

SAF étant la teneur en sels d'acides forts en °f et TAC le titre alcalimétrique complet en mg/L $CaCO_3$.

2-3. Étude sur la mise en équilibre calco-carbonique

2-3-1. Détermination du pH d'équilibre

Le pH d'équilibre ou pH de saturation a été déterminé par deux méthodes : la méthode de Tillmans et la méthode de la pincée au carbonate de calcium [24,28]. La méthode de Tillmans permet de lire sur la table de Tillmans, le pH d'équilibre d'un échantillon à analyser en fonction de son Titre Alcalimétrique Complet (TAC).

La méthode de la pincée au carbonate de calcium permet de connaître le pH d'équilibre (pHe) d'un échantillon avant analyse. Dans un bécher de 250 mL, nous avons placé 100 mL de l'eau à analyser. A l'aide d'une spatule, nous avons prélevé une pincée de carbonate de calcium (CaCO₃) que l'on a rasé et versé dans le bécher. Après homogénéisation, le mélange est laissé au repos pendant 30 minutes. Le pH a été mesuré avec le surnageant du mélange après l'apparition d'un dépôt.

2-3-2. Essais de neutralisation chimique des eaux brutes par les solutions d'hydroxydes de sodium et de calcium

Les essais de neutralisation ont été effectués respectivement avec des solutions d'hydroxyde de sodium et d'hydroxyde de calcium [24, 28] de concentration massique égale à 10 g/L. Le pH de la solution d'hydroxyde de sodium était de 13,65 à la température de 25°C ; celui de la solution d'hydroxyde de calcium était égal à 13, à la température de 24°C. Dans une série de six béchers, nous avons placé dans chaque bécher 200 mL de l'échantillon à analyser (eaux de forage 1, forage 2 et forage 3). A l'aide d'une seringue normalisée, nous avons injecté différents volumes en millilitres des solutions d'hydroxyde de sodium et d'hydroxyde de calcium à 10 g/L, [0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,6], pour la première série, [0,2 ; 0,24 ; 0,28 ; 0,32 ; 0,36 ; 0,4], pour la deuxième série et [0,22 ; 0,26 ; 0,3 ; 0,34 ; 0,38 ; 0,42], pour la troisième série. Après un temps de contact de 30 minutes, le pH a été mesuré dans chaque bécher. Ensuite, le bécher présentant une valeur de pH proche de celle du pH d'équilibre est validé, comme présentant un taux de traitement satisfaisant.

2-3-3. Taux de traitement des solutions d'hydroxydes de sodium et de calcium

Le taux de traitement est donné par la **Relation** suivante [26] :

$$\text{Taux de traitement} = \frac{C_p \times V_p \times 1000}{V_e} \quad (4)$$

C_p étant la concentration massique de la solution de NaOH ou de Ca(OH)₂ en g/L, V_p le volume de base injecté en mL et V_e le volume de l'échantillon d'eau en mL

2-4. Analyse statistique

Une analyse statistique des données a été effectuée par le calcul d'écart type à l'aide du logiciel Microsoft Excel 2013.

3. Résultats et discussion

3-1. Caractérisation physico-chimique

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux brutes des trois forages sont présentés dans le **Tableau 1**. Trois séances de prélèvement ont été effectuées pour chaque forage et la moyenne de chaque paramètre a été calculée. Au regard des résultats des analyses physico-chimiques, il ressort que, sur les 23 paramètres de l'étude pour les échantillons d'eaux brutes des trois forages, 20 paramètres correspondent aux réglementations de l'OMS. 3 paramètres ne respectent pas les valeurs recommandées par l'OMS, c'est le cas du pH, de l'indice de Ryznar et de l'indice de Larson [20]. Les analyses des eaux brutes des trois forages ont montré que chaque valeur du pH était inférieure à celle recommandée par l'OMS. Le pH des échantillons

d'eaux brutes des 3 forages est acide avec des valeurs moyennes respectives de 4,82, 4,56 et 4,23. L'OMS recommande les valeurs de pH comprises entre 6,5 et 8,5 [16]. Les eaux de ces forages sont aussi agressives avec des valeurs des indices de Ryznar supérieurs à 8,5, précisément 10,72 pour le forage 1 ; 11,47 pour le forage 2 et 11,91 pour le forage 3. Ces eaux sont également corrosives avec des indices de Larson supérieurs à 1, dont 2,78 pour le forage 1 ; 2,55 pour le forage 2 et 3,85 pour le forage 3 [24]. Ces eaux de forages consommées par les populations ne sont pas potables. Elles nécessitent un traitement de neutralisation par des solutions basiques pour corriger leur caractère acide. Les pH acides avec des valeurs moyennes égales à 4,34 ; 4,04 et 4,28 ont également été signalés pour 3 forages de l'arrondissement 4, de la ville de Brazzaville [14]. MOUKOLO, MATINI et OPO avaient déjà signalé le caractère acide des échantillons d'eaux souterraines prélevées dans différents puits et sources de la ville de Brazzaville [15-17]. Le caractère agressif des eaux souterraines avait déjà été relevé par MBILOU et al dans une étude menée dans la région de Pointe Noire, au Congo [29]. La moyenne de turbidité était de 0,2 NTU pour le forage 1, de 0,6 NTU pour le forage 2 et de 0,23 NTU pour le forage 3. Les faibles valeurs de la turbidité nous indiquent que les matières en suspension (MES) et les matières colloïdales sont quasi inexistantes et respectent la valeur guide de l'OMS qui est fixée à 5 NTU. L'alcalinité (TA) était nulle pour les eaux des 3 forages d'où l'absence des ions carbonates (CO_3^{2-}). Le titre alcalimétrique complet (TAC) était faible, et variait dans l'intervalle de 7,58 mg/L de CaCO_3 à 8,75 mg/L de CaCO_3 . Les valeurs moyennes du titre hydrotimétrique étaient de 11 mg/L de CaCO_3 pour le forage 1, de 14,3 mg/L de CaCO_3 en ce qui concerne les forages 2 et 3. La conductivité était faible avec une moyenne qui varie de 39,53 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 49,58 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La moyenne de la conductivité des eaux de forages indique que ce sont des eaux faiblement minéralisées. La faible minéralisation des eaux souterraines dans la ville de Brazzaville avait déjà été signalée par MATINI [16]. MBILOU et al avaient aussi relevé une faible minéralisation dans leur étude des eaux de la Cuvette congolaise [30]. Les concentrations en nitrate NO_3^- dans les eaux à analyser variaient en moyenne entre de 14,4 mg/L et 15,6 mg/L. Le CO_2 libre présentait des valeurs moyennes de 10,4 mg/L pour le forage 1, de 10,64 mg/L pour le forage 2 et de 9,44 mg/L pour le forage 3. Les valeurs de l'oxydabilité au permanganate de potassium étant toutes inférieures à 1, les matières organiques dissoutes sont en très faible quantité dans ces eaux de forage.

Tableau 1 : Paramètres physico-chimiques des eaux brutes des trois forages

étudiés	Paramètres	Unités	Forage1				Forage2				Forage3				Normes OMS
			Pré1	Pré2	Pré3	Moy	Pré1	Pré2	Pré3	Moy	Pré1	Pré2	Pré3	Moy	
pH			4,81	4,89	4,78	4,82	4,48	4,78	4,40	4,56	4,20	4,18	4,31	4,23	6,5-8,5
Température		°C	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	12-30
Turbidité		NTU	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8	0,6	0,4	0,6	0,2	0,3	0,2	0,23	5
Aspect		-	Homogène				Homogène				Homogène				Homogène
Couleur		mg/L Pt-Co	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
Conductivité		µS / cm	42,21	44,22	48,24	44,89	40,2	42,21	36,18	39,53	56,28	50,25	42,21	49,58	300
Titre alcalimétrique (TA)		mg/LCaCO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Titre alcalimétrique complet (TAC)		mg/LCaCO ₃	5,25	7	10,5	7,58	3,5	10,5	10,5	8,17	3,5	10,5	12,25	8,75	100
Titre hydrotimétrique (THT)		mg/LCaCO ₃	9,9	9,9	13,2	11	6,6	16,5	19,8	14,3	6,6	13,2	23,1	14,3	150
Matières en suspension		mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	< 1
Sels d'acides forts (SAF)		°f	2,00	1,95	1,84	1,93	2,06	1,48	1,12	1,55	3,02	1,96	1,30	2,1	10
Sels de bases fortes (SBF)		°f	1,54	1,66	1,57	1,59	1,75	0,88	0,19	0,94	2,71	1,69	0,22	1,54	10
Oxydabilité au KMnO ₄ /H ⁺		mg/L O ₂	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	< 1
Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)		mg/L	6,4	8,54	12,81	9,25	4,27	12,81	12,81	9,96	4,27	12,81	14,94	10,67	200
Carbonate (CO ₃ ²⁻)		mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
Pouvoir d'oxydoréduction (rH)		-	22,62	22,66	22,23	22,5	21,65	22,25	21,47	21,79	21,46	21,45	21,47	21,46	20 - 27
Indice de Ryznar (I _R)		-	10,69	10,75	10,72	10,72	12,26	10,72	11,44	11,47	12,54	11,66	11,53	11,91	< 8,5
Indice de Larson (I _L)		-	3,82	2,78	1,75	2,78	5,88	1,41	1,066	2,55	8,62	1,87	1,06	3,85	< 1
Minéralisation générale		mg/L	57,41	60,14	65,60	61,05	54,67	57,41	49,20	53,76	53,35	47,64	57,41	52,8	350
Nitrate NO ₃ ⁻		mg/L	15,00	15,7	16,2	15,63	14,4	15	14,1	14,5	14,9	13,3	15	14,4	50
Nitrite NO ₂ ⁻		mg/L	0,04	0,012	0,002	0,018	0,004	0,007	0,012	0,008	0	0,007	0,004	0,004	0,1
Phosphate PO ₄ ³⁻		mg/L	0,08	0,14	0,10	0,1	0,23	0,15	0,06	0,15	0,10	0,05	0,19	0,11	1
CO ₂ libre		mg/L	12,26	11,00	7,93	10,4	10,82	11,36	9,74	10,64	12,63	8,48	7,22	9,44	< 30

3-2. Étude sur la mise en équilibre calco-carbonique

3-2-1. Détermination du pH d'équilibre

Le pH d'équilibre pour les eaux brutes des trois forages est de 7,56 pour le forage 1, de 7,56 pour le forage 2 et de 7,36 pour le forage 3. Ces valeurs de pH sont conformes à ceux recommandés par l'OMS pour l'eau de boisson [20].

3-2-2. Essais de neutralisation chimique des eaux brutes des trois forages par les solutions d'hydroxydes de sodium et de calcium

Les eaux des trois forages étant acides, nous avons procédé à un traitement de neutralisation chimique avec les solutions d'hydroxyde de sodium et d'hydroxyde de calcium, pour corriger le pH de ces eaux acides. Les résultats obtenus sont présentés dans les **Tableaux 2** et **3** et sur les **Figures 1** à **6**. Les résultats des analyses physico-chimiques montrent que les valeurs moyennes du pH des échantillons d'eaux brutes des trois forages qui étaient respectivement de 4,82, 4,56 et 4,23 avant le traitement par neutralisation ont augmenté et sont respectivement égales à 7,69, 7,27 et 7,26 pour les échantillons d'eaux traitées avec la solution d'hydroxyde de sodium. Pour les échantillons d'eaux traitées avec la solution d'hydroxyde de calcium, les valeurs moyennes respectives du pH sont 7,12, 7,47 et 7,41 (**Figure 1**). Toutes les valeurs de pH obtenus après le traitement par neutralisation avec les solutions d'hydroxyde de sodium et d'hydroxyde de calcium sont comprises entre 6,5 et 8,5, valeurs de pH recommandées par l'OMS pour l'eau de boisson [20]. Ces valeurs de pH sont également proches des différentes valeurs de pH d'équilibre ou pH de saturation des eaux des trois forages qui sont respectivement égal à 7,56 ; 7,56 et 7,36 (**Figure 2**). Le traitement de neutralisation a permis de corriger le pH des eaux brutes des 3 forages. Ces eaux brutes ont été amenées à l'équilibre calco carbonique. La réglementation actuelle conseille que soit respectée la référence « pH équilibre - pH mesuré = $0 \pm 0,2$ », pour la production d'eau potable [24].

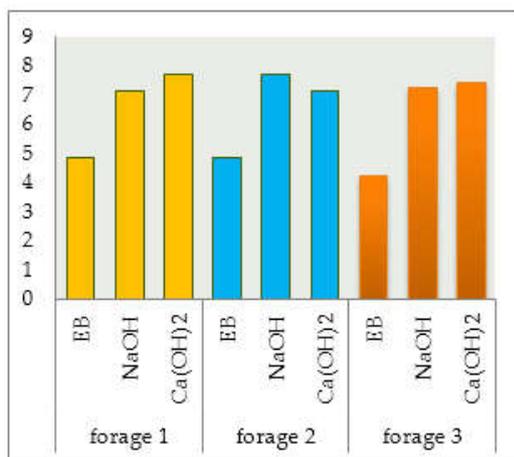


Figure 1 : Variation du pH de l'eau brute et de l'eau traitée par la soude et la chaux

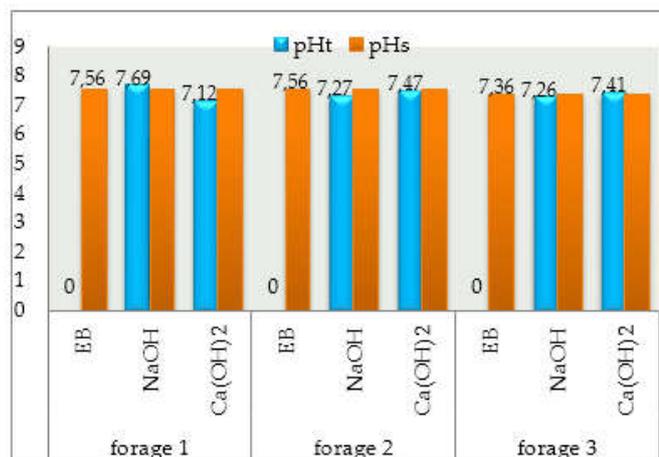


Figure 2 : pH de saturation et des eaux traitées des trois forages

Le traitement de l'eau brute par les solutions d'hydroxyde de sodium et d'hydroxyde de calcium entraîne aussi l'augmentation des valeurs moyennes du titre alcalimétrique complet (TAC). Dans les échantillons d'eaux brutes, les valeurs moyennes du TAC étaient respectivement 7,58 mg/L CaCO_3 ; 8,17 mg/L CaCO_3 et 8,75 mg/L

CaCO₃. Ces valeurs sont de 15,16 mg/L CaCO₃ pour les forages 1 et 3 et de 15,75 mg/L CaCO₃ pour le forage 2, dans les échantillons d'eaux traités avec la solution d'hydroxyde de sodium. Dans ceux traités avec la solution d'hydroxyde de calcium, les valeurs du TAC sont 17,5 mg/L CaCO₃; 18,67 mg/L CaCO₃ et 18,08 mg/L CaCO₃ (**Figure 3**). On note également la diminution de la teneur de dioxyde de carbone dissous dans ces eaux de forage. Les valeurs moyennes du dioxyde de carbone dissous dans les eaux brutes des 3 forages étaient respectivement 10,4 mg/L ; 10,64 mg/L et 9,44 mg/L. Dans les échantillons d'eaux traités avec la solution d'hydroxyde de sodium, ces valeurs sont 1,62 mg/L; 1,86 mg/L et 1,74 mg/L. Dans ceux traités avec la solution d'hydroxyde de calcium, elles sont 1,68 mg/L ; 1,2 mg/L et 2,04 mg/L (**Figure 4**).

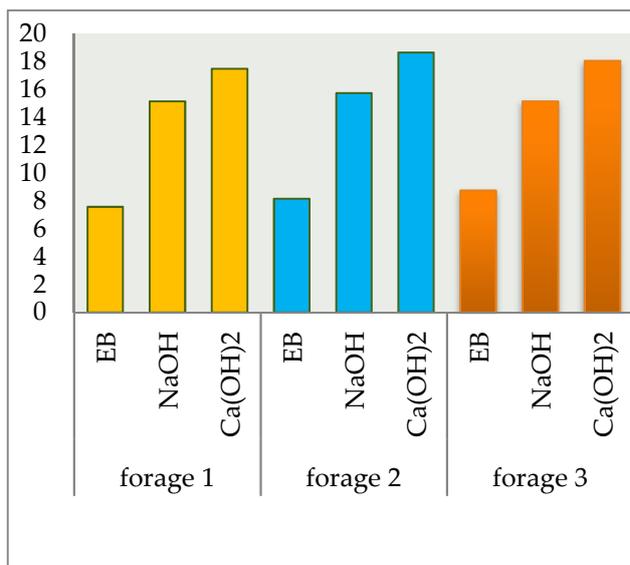


Figure 3 : Variation du TAC de l'eau brute et de l'eau traitée par la soude et la chaux

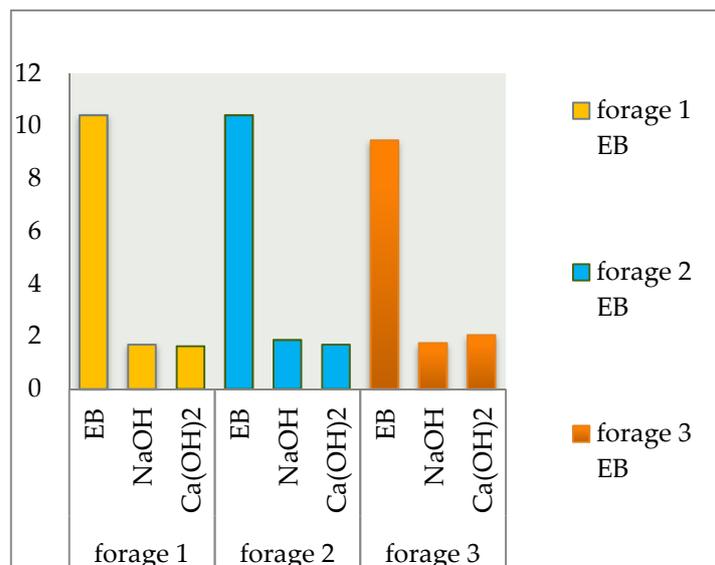


Figure 4 : Variation du CO₂ libre de l'eau brute et de l'eau traitée par la soude et la chaux

L'agressivité des échantillons d'eaux brutes des trois forages a été réduite par le traitement de neutralisation parce que toutes les valeurs moyennes des indices de Ryznar des échantillons d'eaux traités sont inférieures à 8,5 [20]. Les valeurs moyennes de l'indice de Ryznar qui étaient respectivement égales à 10,72, 11,47 et 11,72, pour les échantillons d'eaux brutes sont de 7,67, 8,07 et 8,17, après le traitement avec les solutions d'hydroxydes de sodium. Le traitement avec la solution d'hydroxyde de calcium a conduit aux valeurs de 7,98, 7,5 et 7,63 (**Figure 5**). La corrosivité des échantillons d'eaux brutes des trois forages a également été réduite par le traitement de neutralisation parce que toutes les valeurs moyennes des indices de Larson des échantillons d'eaux traitées sont inférieures à 1 [2]. Les valeurs moyennes de l'indice de Larson qui étaient de 2,78, 2,55 et 3,85, pour les échantillons d'eaux brutes sont égales à 0,9, 0,92 et 0,66 pour les échantillons d'eaux traités avec la solution d'hydroxyde de sodium. Pour le traitement avec la solution d'hydroxyde de calcium, les valeurs obtenues sont 0,87, 0,67 et 0,74 (**Figure 6**).

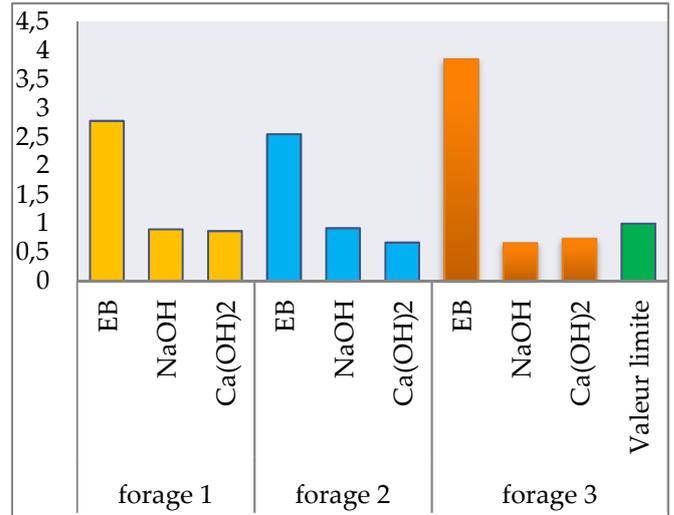
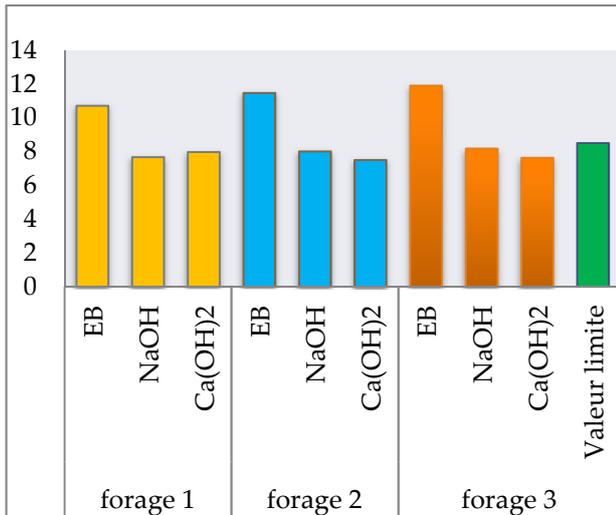


Figure 5 : Variation de l'indice de Ryznar de l'eau brute et de l'eau traitée par la soude et la chaux

Figure 6 : Variation de l'indice de Larson de l'eau brute et de l'eau traitée par la soude et la chaux

Les résultats de nos essais de neutralisation corroborent ceux obtenus par BOUKARI et al qui avaient mis en évidence une diminution de la teneur en dioxyde dissous, une augmentation de la teneur en ions bicarbonates et une correction du pH de 5,83 à 7,66 et de 5,83 à 7,07 pour les essais de neutralisation des eaux souterraines de la ville de Lomé (TOGO), avec les solutions d'hydroxyde de sodium et d'hydroxyde de calcium [31].

3-2-3. Taux de traitement des eaux brutes des trois forages par les solutions d'hydroxyde de sodium et d'hydroxyde de calcium

Le taux de traitement permet de spécifier la dose de la solution d'hydroxyde de sodium ou d'hydroxyde de potassium nécessaire pour le traitement de l'eau brute de chaque forage. Le taux de traitement de la soude est de 12,6 mg/L pour le forage 1, de 14,6 mg/L pour le forage 2 et de 14 mg/L pour le forage 3. Pour la chaux, il est de 12 mg/L pour le forage 1, de 14,6 mg/L pour le forage 2 et de 13,3 mg/L pour le forage 3 (**Figure 7**).

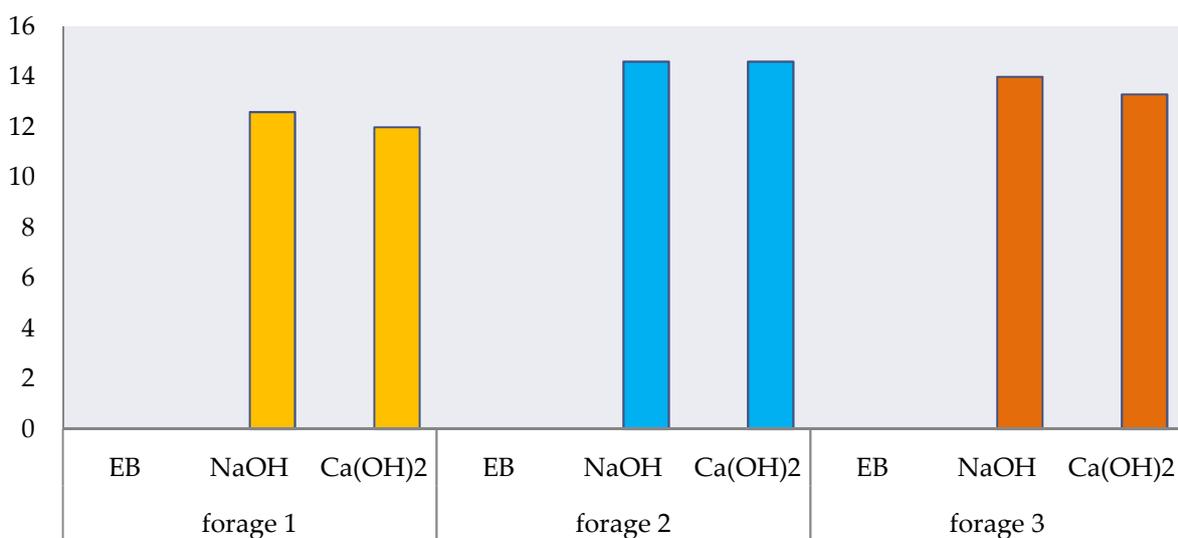


Figure 7 : Taux de traitement de l'eau brute par la soude et la chaux

Tableau 2 : Paramètres physico-chimiques des eaux de trois forages traitées par la solution d'hydroxyde de sodium

Paramètres étudiés	Unités	Forage1				Forage2				Forage3				Normes OMS
		Pré1	Pré2	Pré3	Moy	Pré1	Pré2	Pré3	Moy	Pré1	Pré2	Pré3	Moy	
pH		7,95	7,60	7,53	7,69	7,91	7,17	6,75	7,27	7,35	7,52	6,92	7,26	6,5-8,5
Température	°C	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	12-30
Turbidité	NTU	0,2	0,4	0,4	0,3	0,5	0,6	0,3	0,4	0,3	0,1	0,6	0,3	5
Aspect	-	Homogène				Homogène				Homogène				Homogène
Couleur	mg/L Pt-Co	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
Conductivité	µS / cm	46,23	58,29	40,2	48,24	56,28	58,29	38,19	50,92	44,22	48,24	36,18	42,88	300
Titre alcalimétrique (TA)	mg/L CaCO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Titre alcalimétrique complet (TAC)	mg/L CaCO ₃	14	17,5	14	15,16	17,5	17,5	12,25	15,75	14	15,75	15,75	15,16	100
Titre hydrotimétrique (THT)	mg/L CaCO ₃	6,6	9,9	23,1	13,2	16,5	16,5	16,5	17,6	13,2	9,9	19,8	14,3	150
Matières en suspension	mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	< 1
Sels d'acides forts (SAF)	°f	1,37	1,74	1,01	1,37	1,62	1,74	1,06	1,47	1,25	1,32	0,42	0,99	10
Sels de bases fortes (SBF)	°f	2,11	2,50	0,10	1,57	1,73	1,84	0,64	1,4	1,33	1,90	0,19	1,14	10
Oxydabilité au KMnO ₄ /H ⁺	mg/L O ₂	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	< 1
Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	mg/L	17,08	21,35	17,08	18,48	21,35	21,35	14,95	12,4	17,08	17,08	19,22	17,79	200
Carbonate (CO ₃ ²⁻)	mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
Pouvoir d'oxydoréduction (rH)	-	21,67	22,78	21,64	22,03	21,62	21,6	21,58	21,6	21,62	21,64	21,78	21,68	20 – 27
Indice de Ryznar (I _R)	-	7,57	7,48	7,97	7,67	7,2	7,93	8,9	8,01	8,15	7,98	8,38	8,17	< 8,5
Indice de Larson (I _L)	-	0,981	0,998	0,722	0,9	0,925	0,994	0,865	0,92	0,892	0,838	0,266	0,66	< 1
Minéralisation générale	mg/L	62,87	55,25	54,67	57,6	53,35	55,25	51,94	53,51	60,13	65,60	49,20	58,31	350
Nitrate NO ₃ ⁻	mg/L	15,8	11,2	15	14	10,3	16,1	13,6	13,3	9,6	16,9	15,3	13,9	50
Nitrite NO ₂ ⁻	mg/L	0,004	0,012	0	0,005	0,002	0,013	0	0,005	0,006	0	0,003	0,003	0,1
Phosphate PO ₄ ³⁻	mg/L	0,21	0,13	0,09	0,14	0,13	0,15	0,07	0,11	0,11	0,11	0,67	0,29	1
CO ₂ libre	mg/L	1,98	1,44	1,44	1,62	1,98	1,80	1,80	1,86	1,62	1,80	1,82	1,74	< 30

Tableau 3 : Paramètres physico-chimiques des eaux de trois forages traitées par la solution d'hydroxyde de calcium

Paramètres étudiés	Unités	Forage1				Forage2				Forage3				Normes OMS
		Pré1	Pré2	Pré3	Moy	Pré1	Pré2	Pré3	Moy	Pré1	Pré2	Pré3	Moy	
pH		7,24	7,00	7,14	7,12	7,59	7,49	7,35	7,47	7,32	7,69	7,22	7,41	6,5-8,5
Température	°C	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	12-30
Turbidité	NTU	0,3	0,3	0,6	0,4	0,5	0,5	0,2	0,4	0,3	0,4	0,2	0,3	5
Aspect	-	Homogène				Homogène				Homogène				Homogène
Couleur	mg/L Pt-Co	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
Conductivité	µS / cm	52,26	52,26	58,29	54,27	52,26	50,25	54,27	52,26	64,32	50,25	44,22	49,58	300
Titre alcalimétrique (TA)	mg/L CaCO ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Titre alcalimétrique complet (TAC)	mg/L CaCO ₃	17,5	19,25	15,75	17,5	17,5	19,25	19,25	18,67	19,25	17,5	17,5	18,08	100
Titre hydrotimétrique (THT)	mg/L CaCO ₃	29,7	26,4	23,1	26,4	19,8	29,7	29,7	26,4	23,1	29,7	19,8	24,2	150
Matières en suspension	mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	< 1
Sels d'acides forts (SAF)	°f	1,38	1,21	1,92	1,5	1,38	1,09	1,33	1,26	1,93	1,27	0,90	1,36	10
Sels de bases fortes (SBF)	°f	0,16	0,49	1,18	0,612	1,15	0,04	0,28	0,49	1,67	0,04	0,67	0,79	10
Oxydabilité au KMnO ₄ /H ⁺	mg/L O ₂	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	< 1
Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	mg/L	21,35	23,43	19,21	21,33	21,35	23,48	23,48	22,77	21,35	21,35	21,35	21,35	200
Carbonate (CO ₃ ²⁻)	mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
Pouvoir d'oxydoréduction (rH)	-	21,62	21,59	21,53	21,58	21,64	21,64	21,61	21,63	21,59	21,66	21,63	21,62	20 – 27
Indice de Ryznar (I _r)	-	7,87	7,91	8,17	7,98	7,52	7,42	7,58	7,5	7,59	7,42	7,89	7,63	< 8,5
Indice de Larson (I _l)	-	0,78	0,63	1,21	0,87	0,78	0,56	0,69	0,67	1,00	0,72	0,51	0,74	< 1
Minéralisation générale	mg/L	49,54	49,54	55,26	51,44	49,54	47,63	51,44	49,53	60,97	47,63	60,14	56,24	350
Nitrate NO ₃ ⁻	mg/L	8,1	17,6	10,2	11,9	9,0	8,4	11,5	9,6	16,4	9,1	11,5	12,3	50
Nitrite NO ₂ ⁻	mg/L	0,017	0,007	0	0,008	0,009	0,004	0,010	0,007	0,007	0,003	0	0,003	0,1
Phosphate PO ₄ ³⁻	mg/L	0,12	0,09	0,08	0,1	0,09	0,10	0,34	0,007	0,09	0,15	0,11	0,11	1
CO ₂ libre	mg/L	1,80	2,16	1,08	1,68	1,08	1,44	1,08	1,2	2,16	1,44	2,52	2,04	< 30

Tableau 4 : Valeurs moyennes et écarts types de quelques paramètres physico-chimiques et des taux de traitements des eaux des trois forages

Paramètres	Forage 1						Forage 2						Forage 3					
	E B		E-NaOH		E-Ca(OH) ₂		E B		E-NaOH		E-Ca(OH) ₂		E B		E.-NaOH		E-Ca(OH) ₂	
	Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ
pH	4,82	0,06	7,69	0,22	7,12	0,12	4,56	0,19	7,27	0,29	7,47	0,12	4,23	0,07	7,26	0,21	7,41	0,25
TAC	7,58	0,20	15,16	0,29	17,5	0,22	8,17	0,08	15,75	0,20	18,67	0,21	8,75	0,08	15,16	0,14	18,08	0,08
CO ₂ libre	10,4	0,20	1,62	0,07	1,68	0,13	10,64	0,22	1,86	0,05	1,2	0,21	9,44	0,21	1,74	0,06	2,04	0,06
IR	10,72	0,03	7,67	0,26	7,98	0,01	11,47	0,23	8,01	0,02	7,5	0,08	11,91	0,04	8,17	0,10	7,63	0,24
IL	2,78	0,03	0,9	0,07	0,87	0,03	0,887	0,17	2,55	0,06	0,92	0,11	3,85	0,08	0,66	0,03	0,74	0,05
Tt	-	-	12,6	0,58	12	0,53	-	-	14,6	0,58	14,6	0,58	-	-	14	0,53	13,3	0,58

E B : Eau brute ; E-NaOH: Eau traitée par la solution d'hydroxyde de sodium ; E-Ca(OH)₂: Eau traitée par la solution d'hydroxyde de calcium

3-3. Analyse statistique

L'analyse statistique des données de l'étude sur les trois forages présentées dans le **Tableau 4** a montré une dispersion de 0,06 à 0,29 pour le pH; de 0,08 à 0,29 pour le TAC; de 0,05 à 0,22 pour le CO₂ libre; de 0,01 à 0,26 pour l'indice de Ryznar ; de 0,03 à 0,17 pour l'indice de Larson et de 0,53 à 0,58 pour le taux de traitement.

4. Conclusion

Cette étude a mis en évidence le caractère acide, agressif et corrosif des eaux de trois forages privés du quartier La poudrière de la ville de Brazzaville. Les résultats obtenus montrent que les essais de neutralisation chimique effectués ont permis de réduire la teneur du dioxyde de carbone dissous dans ces eaux de forage et de corriger les différentes valeurs de pH. Les caractères agressif et corrosif de ces eaux de forages ont également été réduits par ces essais de neutralisation. Ces résultats permettent de dire que ces eaux de forage nécessitent un traitement pour les rendre potable. La qualité de l'eau étant un problème de santé publique, les résultats obtenus dans cette étude peuvent sensibiliser les populations sur l'usage des eaux de forage.

Références

- [1] - N. MOUKOLO, M. J. SAMBA KIMBATA, M. MPOUZA, J. NZALABAKA, B. MAZIEZOULA et J. M. OSSETE, « Hydrogéologie du Congo » Edition du BRGM, Orléans, (1992) 121 P.
- [2] - P. VENNETIER, "Géographie du Congo Brazzaville", Gauthier-Villars, Paris, (1966) 174 P.
- [3] - RESEAU FRANCOPHONE SUR L'EAU ET L'ASSAINISSEMENT "Ressources en eau " (2001), 2 p. <https://www.iowater.org/ReFEA>
- [4] - GLOBAL WATER PARTNERSHIP Central Africa, "Développement d'une stratégie de financement du secteur de l'eau en Afrique centrale. Etude nationale sur le financement du secteur de l'eau. Rapport Congo", (2010) ; 112 P <https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-caf-files>
- [5] - UNDP, "Rapport national des progrès vers l'atteinte des objectifs du millénaire pour le développement-République du Congo", (2010), 82 P. <https://www.undp.org>
- [6] - Y. OFOUEME BERTON, "L'approvisionnement en eau des populations rurales au Congo Brazzaville ", Les cahiers d'Outre-mer, N°249, (2010) 7 - 30
- [7] - C. NKOUNKOU LOUMPANGOU, R.F. LOUZAYADIO MVOUEZOLO, N. AYEISSOU, A.M. ELOUMA NDINGA, A.C. NGAKEGN, LIMBILI, G. MAR DIOP CODOU et J.M. OUAMBA, "Approvisionnement en eau dans la ville de Brazzaville, Congo" *European Scientific Journal*, Vol.13, N°21, (2017) 474 - 498
- [8] - INTER PRESS SERVICE, "Développement-Congo : Forages et Châteaux d'eau pour contourner les pénuries", (2007), 2 P. <https://www.ipsinternational.org>
- [9] - A. BLUM, L. CHERY et H. LEGRAND, "L'eau souterraine est-elle toujours potable à l'état naturel ? ", *Géosciences* N°5, (2007) 58 - 67
- [10] - N. EL HAMMOUMI, M. SINAN, B. LEKHLI et L. EL MAHJOUR, "Évaluation de la qualité des eaux souterraines pour l'utilisation dans l'eau potable et l'agriculture : plaine de Tadla, Maroc" *Afrique SCIENCES*, 08 (1), (2012) 54 - 66
- [11] - M. BEN ABOU, M. EL HAJI, M. ZEMZAMI et F. FADIL, "Détermination de la qualité des eaux des nappes de la province de TAZA (MAROC)" *Larhyss Journal*, N°16, (2013) 77 - 90

- [12] - O. ATTEIA, "Chimie et pollutions des eaux souterraines", Editions Technique & Documentation, Paris, (2015) 448 P.
- [13] - P. VAUVILLER, "Protection des eaux souterraines", Editions Technique & Documentation, Paris, (2010) 443 P.
- [14] - P. L. NGOULOUBI MABA, "Les problèmes d'accès à l'eau potable de la population de l'arrondissement 4, Moungali à Brazzaville (République du Congo)", Mémoire de Maîtrise, Université Marien NGOUABI (2013) 139 P.
- [15] - N. MOUKOLO, "Ressources en eaux souterraines et approvisionnement : données hydrogéologiques de la région de Brazzaville", ORSTOM, AGECO, (1987) 97 - 109.
<http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:25696>
- [16] - L. MATINI, J. M. MOUTOU et M. S. KONGO-MANTONO, "Evaluation hydrochimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud- Ouest de Brazzaville, Congo", *Afrique Science*, 05 (1), (2009) 82 - 98
- [17] - U. F. OPO "Qualité des eaux souterraines des quartiers périphériques de l'Arrondissement I de Brazzaville". Mémoire de DEA. Université Marien NGOUABI, Brazzaville, (2009) 130 P.
- [18] - N. BOUCHAHM, L. HECINI et W. KHERIFI, "Adoucissement des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional algérien : cas de la région de Biskra", *Revue des sciences de l'eau*, 29(1), (2016) 37 - 48
- [19] - S. KATEB, "Déferrisation des eaux souterraines de Sud Algérie: station de traitement de l'eau potable de la ville d'Illizi" Editions Universitaires Européennes, (2017) 96 P.
- [20] - OMS, "Directives de qualité pour l'eau de boisson", 4^{ème} édition (2017) 564 P. <https://www.who.int>
- [21] - B. DROBENKO "Droit de l'eau", Gualino éditeur, Paris, (2007) 330 P.
- [22] - M. TARDAT-HENRY et J-P BEAUDRY "Chimie des eaux", Les éditions le Griffon d'argile, Québec, (1992) 537 P.
- [23] - J. RODIER, B. LEGUBE, N. MERLET, R. BRUNET et coll "L'analyse de l'eau" Dumod, 9^e édition, Paris, (2009), 1526 P.
- [24] - B. LUGUBE, "Production d'eau potable. Filières et procédés de traitement", Dumod, Paris, (2015), 414 P.
- [25] - Fondation Nationale de la Santé "Manuel pratique d'analyse de l'eau", 4^{ème} édition, FUNASA, Brésil, (2013) 150 P.
- [26] - C. CARDOT et A. GILLES, "Analyse des eaux: Réglementation, Analyses Volumétriques et spectrophotométriques, Statistiques", Ellipses Edition marketing S.A, Paris, (2013) 296 P.
- [27] - F. REJSEK, "Analyse des eaux. Aspects réglementaires et techniques", CRDP Aquitaine, (2002) 361 P.
- [28] - S. DEGREMONT, "Memento Technique de l'eau", Lavoisier SAS, 10^e édition, Tome 1 et 2, (2005) 785 P., 1718 P.
- [29] - U. G. MBILOU, M. TCHOUMOU, M. NGOUALA MABONZO et J. BALOUNGUIDI, "Caractérisation hydrogéochimique et microbiologique des eaux souterraines dans le système d'aquifères multicouche de la région de Pointe-Noire en République du Congo" *Larhyss Journal*, N° 28 (2016) 257 - 273
- [30] - U. G. MBILOU, M. TCHOUMOU et M. NGOUALA MABONZO, " Etude de la composition physico-chimique des eaux du bassin de la cuvette congolaise, République du Congo" *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, N° 28 (2016) 1 - 12
- [31] - Y. BOUKARI, G. MATEJKA, B. PARINET et P. SIMON, "La mise à l'équilibre des eaux tropicales : conséquences sur la déferrisation" *Revue des sciences de l'eau* 1(4), (1988), 339 - 353