



CONTROLE ET SUIVI DE LA REALISATION DE TROIS FORAGES D'EAU DANS LE BASSIN SEDIMENTAIRE COTIER CONGOLAIS

CONTROL AND MONITORING OF THE REALIZATION OF THREE WATER BOREHOLES IN THE CONGOLESE COASTAL SEDIMENTARY BASIN

***ESSOULI O. F.^{1*}, BOUDZOUMOU F.^{1,2}, MIYOUNA T.¹,
KASHALA E., FAYE S.³***

¹ Université Marien NGOUABI, Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire de Géosciences, B.P. 69 Brazzaville, Congo.

² Institut National de Recherches en Sciences Naturelles et Exactes, B.P. 2400 Brazzaville, Congo

³ Université Cheikh Anta Diop, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, B.P. 743 Dakar-Fan, Sénégal.

**oflorentessouli@gmail.com*

RESUME

La présente étude se propose de contrôler et de suivre les différentes étapes de réalisation de trois (03) forages d'eau suivant les règles de l'art dans le bassin sédimentaire côtier congolais de Pointe-Noire.

Les profondeurs atteintes par les trois forages sont respectivement de 72 m pour le forage de Kounda, 65 m pour le forage de Ngoyo plaine et de 52,5 m pour le forage de Ngoyo commune. Ils captent l'aquifère profond (AQ-2) du système aquifère multicouche de la région de Pointe Noire.

Les essais de puits réalisés sur deux de ces forages, montrent que les débits critiques ne sont pas atteints et les débits d'exploitation maximale sont de 6 m³/h pour le forage de Ngoyo commune et de 6,53 m³/h pour le forage de Kounda.

L'étude de la qualité physico-chimique des eaux souterraines, montre que celles-ci sont potables. La projection des analyses chimiques sur le diagramme triangulaire de Piper montre que ces eaux sont de la famille bicarbonatée calcique et magnésienne. L'étude de l'agressivité des eaux à partir des indices de stabilité de Langelier et de Riznar et des indices de saturation vis-à-vis des différentes phases minérales, montre que les eaux souterraines sont corrosives et peuvent donc attaquer les équipements métalliques de la colonne d'exhaure de ces forages.

Mots clés. Bassin sédimentaire, Pointe-Noire, aquifère profond, essais de puits, agressivité des eaux.

ABSTRACT

The present study proposes to control and follow the different stages of realization of three (03) water boreholes in the Congolese coastal sedimentary basin of Pointe-Noire.

The depths reached by the three drill holes are respectively 72 m for the Kounda borehole, 65 m for the "Ngoyo plaine" borehole and 52.5 m for the "Ngoyo commune" borehole. They capture the deep aquifer (AQ-2) of the multilayer aquifer system in the Pointe Noire region.

Well tests carried out on two of these boreholes show that the critical flows are not reached and the maximum operating flow rates are 6 m³/h for the "Ngoyo commune" and 6.53 m³/h for the Kounda.

The physicochemical quality of the groundwater, shows that these waters are drinkable. The projection of the chemical analyzes on the Piper triangular diagram shows that these waters are of the calcium and magnesium bicarbonate family. The water aggressiveness from the Langelier and Riznar stability indices and the saturation indices with respect to the different mineral phases, shows that the groundwater is corrosive and can therefore attack the metal equipment of the dewatering column of these boreholes.

Keywords. Sedimentary basin, Pointe-Noire, deep aquifer, well tests, water aggressiveness.

INTRODUCTION

L'eau étant une source vitale de tout être vivant, se doit une particularité pour ce même rôle à l'égard de l'Homme où elle doit d'abord être douce pour le maximum des travaux ménagers de celui-ci puis potable pour sa santé. Les eaux douces constituent 2,7% du volume total de l'eau sur terre dont 0,3 % seulement sont utilisables et se trouve à 95 % sous forme d'eaux souterraines (Agence de l'eau de Loire-Bretagne, 2014). Ces eaux souterraines constituent donc exclusivement des ressources d'eau douce exploitable du globe qui nécessite des moyens pour être atteint voilà pourquoi sa couche supérieure est la plus utilisable même grâce aux puits artisanaux ; vulnérable qu'elle est à cause de sa communication directe par infiltration avec les eaux de surface d'où la nécessité de la technique d'ouvrages profonds (forages) pour atteindre des aquifères de plus en plus profonds ayant une garanti d'utilisation et de potabilité.

La Société Nationale de Distribution d'Eau (SNDE) depuis sa création en 1967, est toujours confrontée aux problèmes d'approvisionnement en eau potable à toute la population congolaise à cause de l'explosion démographique et de l'extension des cités urbaines, tel est le problème dans la ville de Pointe-Noire. La direction départementale de la Société Nationale de Distribution d'Eau (SNDE) de Pointe Noire tire l'essentiel de sa ressource du sous-sol grâce aux forages et ne satisfait qu'aux besoins de 40 % des communes et les autres communes de Pointe-Noire font recours aux puits traditionnels, source et surtout aux forages privés (Mampouya, 2015 et Moukolo, 1984). C'est pour cette raison que la société Congo Exploration et le bureau d'études techniques HYDRADEC ont lancé le projet de réalisation de trois forages privés dans trois (03) quartiers extrêmes de la ville de Pointe-Noire à savoir : Kounda, Ngoyo la plaine et Ngoyo la commune.

Cette présente étude se veut une contribution à la maîtrise des différentes étapes de contrôle et de suivi de la réalisation d'un ouvrage hydraulique selon les règles de l'art dans la région de Pointe-Noire. Pour atteindre les objectifs fixés dans le cadre de la mise en œuvre de ce projet, nous avons donc procédé de la manière suivante :

- à l'identification des niveaux aquifères et leurs limites par la description progressive des cuttings ou déblais des formations géologiques traversées pendant la foration ;
- à l'établissement des coupes lithologiques et techniques des différents forages réalisés ;

- à la vérification de la productivité des ouvrages par la mise en œuvre des essais de pompage de courte durée ou essais de puits ;
- et à l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines produites par les forages suivant les différents usages que l'on peut faire de cette eau.

MATERIEL ET METHODES

Cadre général de la région de Pointe-Noire

La région de Pointe-Noire est située au sud-ouest de la République du Congo. Elle s'étend sur 156,6 km² et, est répartie sur un rayon de 15 km. Ses limites géographiques sont comprises entre les méridiens 11°30' et 12° Longitudes Est et les parallèles 4°30' et 5° Latitudes Sud (figure 1).

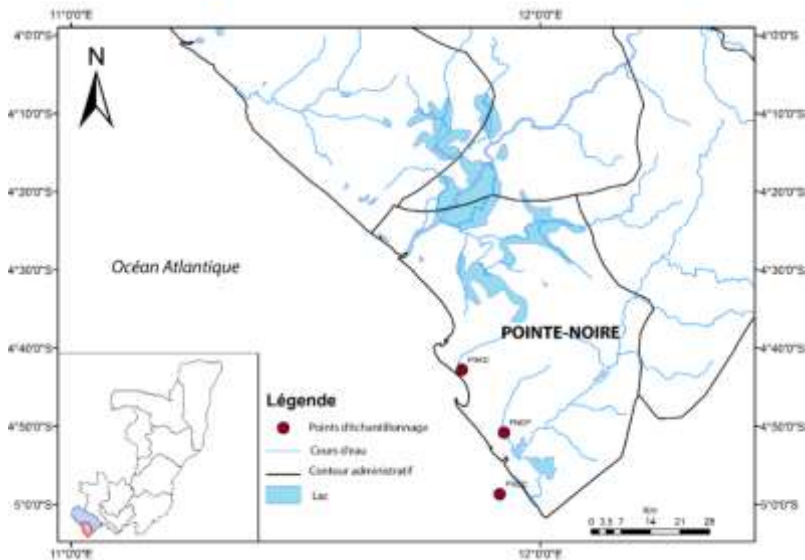


Figure 1 : Situation géographique de la région de Pointe-Noire (KASHALA, 2018).

La région de Pointe-Noire appartient au climat tropical humide. Ce climat est sous l'influence prépondérante de basses pressions intertropicales d'octobre à mai et de hautes pressions subtropicales australes de juin à septembre. Il est caractérisé par une alternance de deux saisons bien distinctes : une saison des pluies et chaude qui s'étend d'octobre à mai caractérisée par une pluviométrie abondante et une saison sèche et fraîche de juin à septembre durant laquelle le

bilan hydrologique est probablement déficitaire. C'est pendant la période de pluviométrie abondante que les nappes sont rechargées par infiltration directe des eaux de pluies (figure 2).

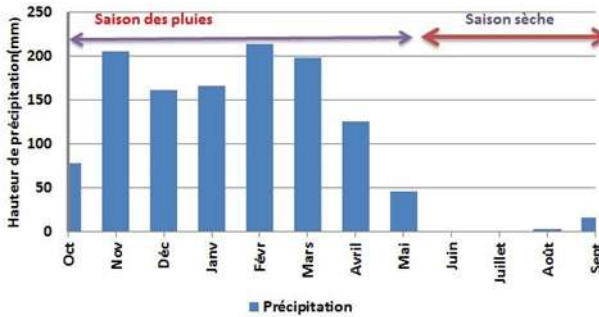


Figure 2 : Variation des précipitations moyennes mensuelles de la station de l'aéroport de Pointe-Noire (Source ANAC, 1970 - 2017).

La figure 3 montrant la variation interannuelle de la pluviométrie de la station de Pointe-Noire de 1970 à 2017, est caractérisée par une alternance des périodes des pluies déficitaires avec des périodes des pluies excédentaires.

Il a été relevé d'une part un déficit de précipitations durant les années 1971, 1972, 1973, 1974, 1977, 1978, 1979, 1982, 1983, 1986, 1988, 1991, 1992, 1996, 1997, 2001, 2004, 2005, 2008, 2012, et 2017 avec un minimum en 1978 et d'autre part vingt-six (26) années de précipitations excédentaires qui sont : 1970, 1975, 1976, 1980, 1981, 1984, 1985, 1987, 1989, 1990, 1993, 1994, 1995, 1998, 1999, 2000, 2002, 2003, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011, 2013, 2014, 2015, et 2016 avec un maximum en 2007.

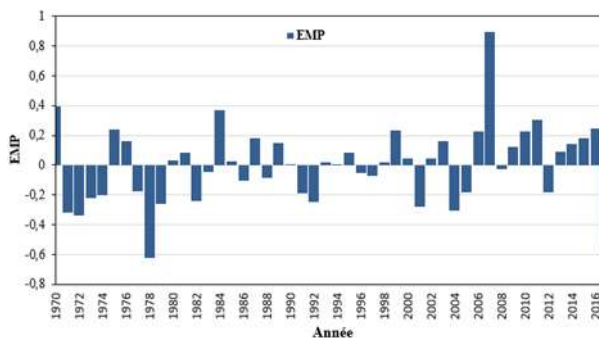


Figure 3 : Ecart pluviométrique moyen à la station de l'aéroport de Pointe-Noire (Source ANAC, 1970-2017).

Sur plan géologique, le bassin sédimentaire côtier de Pointe-Noire constitue un segment du prisme sédimentaire méso-cénozoïque de la marge équatoriale ouest africaine dont l'évolution s'amorce avec l'ouverture sud atlantique au Crétacé inférieur. Il s'organise en 3 grands ensembles lithostratigraphiques, représentatifs des 3 grands épisodes géodynamiques qui jalonnent l'évolution de la marge atlantique (Grosdidier et al., 1996 ; Séranne & Anka, 2005). On reconnaît de bas en haut selon Brownfield et Charpentier (2006) :

- un épisode de rifting, Néocomien à Barrémien, anté-salifère dominé par une tectonique en horsts et grabens, et une sédimentation grés-argileuse à marneuse, lacustre à fluviatile, génératrice de niveaux roche mère (argiles de Sialivakou, marnes de Pointe-Noire, argiles de Pointe-Indienne) qui ont généré des hydrocarbures. Ces sédiments sont affectés, par une tectonique synsédimentaire importante d'extension représentée par une dynamique de horsts et grabens ;
- une phase de transition rift/drift (late rift) qui débute à l'Aptien avec le développement de dépôts lacustres et de cônes alluviaux bordant les hauts structuraux réactivés (Formation de Chéla) après un pulse tectonique ayant engendré une surface de pédiplanation. Cet intervalle continental est surmonté par une puissante série évaporitique dite Formation de la Loémé qui traduit l'incursion de l'océan atlantique sud. Les évaporites s'organisent en 11 cycles évaporitiques. Les cycles les plus complets développent des faisceaux potassiques à sylvinite et carnallite. La série évaporitique se termine par une couche d'anhydrite marquant la transition entre les derniers dépôts évaporitiques et les premiers dépôts carbonatés, datés de l'Albien ;
- un épisode de drift (post-rift) qui s'étend de l'Albien à l'actuel, caractérisé par une succession d'épisodes tectono-eustatiques combinés à l'océanisation l'Halocinèse et une sédimentation de la plate-forme mixte terrigène/carbonate peu profonde de grès et de calcaires. Des niveaux phosphatés d'âge maastrichtien sont reconnus dans des couloirs d'effondrement.

Dans le domaine on shore, les terrains méso-cénozoïques affleurant sont classiquement discriminés en 6 ensembles stratigraphiquement superposés. On reconnaît de bas en haut (Figure 4) :

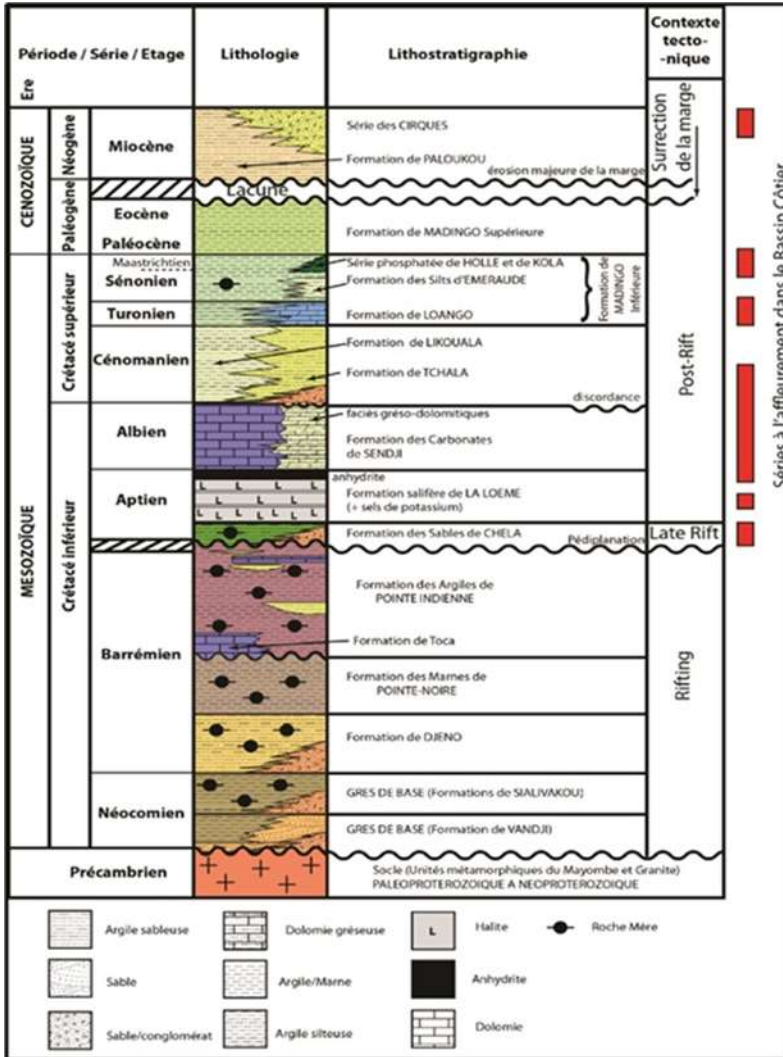


Figure 4 : Colonne lithostratigraphique synthétique des séries méso-cénozoïques de la marge congolaise (Brownfield & Charpentier, 2006).

- la série de contact (représentée pour l'essentiel par la formation de Chéla) d'âge aptien, affleure de façon discontinue dans les couloirs d'effondrement et des vallées incisées entaillant le socle cristallin du Mayombe. Elle est caractérisée à la base par des dépôts alluviaux grésos-conglomératiques, puis argilo-silteux riches en matière organique continentale ;

- un faisceau grésolo-dolomitique surmonté par des argiles et des grès équivalent proximal de la formation de Sendji. Des indices de bitume y sont reconnus sur toute la bordure du Mayombe ;
- des dépôts grésolo-conglomératiques de la formation de Tchala, d'âge cénonanien qui marque un épisode régressif déjà amorcé à la fin de l'albien ;
- la série de Loango, d'âge turonien, affleurant sur les pointes rocheuses de la zone littorale avec des dépôts grésolo-dolomitiques bioturbés et fossilifères qui indiquent une nouvelle transgression ;
- la série de Holle, d'âge maastrichtien, comprend essentiellement des dépôts gréseux phosphatés, préservés dans une structure d'effondrement étroite qui se suit de Tchissakata à la frontière Cabinda, jusque Kola sur près de 100 km de long. Cette structure est l'objet de plusieurs projets d'exploration minière.

Du point de vue contexte hydrogéologique, le bassin sédimentaire côtier auquel appartient la région de Pointe-Noire est constitué d'un complexe hydrogéologique incluant un système aquifère composé de plusieurs couches aquifères superposées avec une continuité hydraulique. Il comprend 5 horizons aquifères ou nappes (Figure 5) caractérisés géologiquement par leur lithologie qui est établie de la manière suivante (Moukolo, 1984 et 1992) :

- aquifère peu profond AQ-1 (non confiné), contient une nappe libre correspondant au milieu saturé des couches les plus perméables et les plus drainants des sables de surfaces ; d'épaisseur 15 à 80 m, elle est entaillée par endroit par des ravins et des vallées voir même des vallées. Cette nappe communique avec l'extérieur de multiples façons ;
- aquifère profond AQ-2 (confiné), contient une nappe profonde confinée artésienne dans certains endroits, correspondant aux couches les plus perméables de la série des Cirques. Elle est constituée des sables hétérogènes parfois silteux alternant avec les niveaux d'argilites. Nappe dont le superstratum se trouve entre 8 et 180 m, et d'épaisseur variant entre 20 et 30 m. Cette aquifère communique verticalement avec les couches aquifères AQ-1 et AQ-3 ;
- aquifère profond AQ-3 (confiné), contient une nappe confinée correspondant aux couches les plus perméables des sables ferrugineux, constituée de sables hétérogènes parfois conglomératiques alternant avec des concrétions ferrugineuses ; nappe d'épaisseur allant de 100 à 200 m ;
- aquifère profond AQ-4 (confiné) contient une nappe confinée reposant sur un substratum peu perméable et limité par un superstratum peu

perméable aussi, correspondant aux couches les moins perméables de la série grésodolomitique du Crétacé, est constitué de sable argileux et d'agrégats dolomitiques. Les couches aquifères AQ-3 et AQ-4 se confondent tout juste après la plaine et deviennent plus loin un aquifère non confiné dont leur superstratum devient libre ;

- aquifère potentiel AQ-5, est une nappe dite potentielle correspondant à l'unité de la dolomie et de la calcite de la série calcaro-dolomitique dans laquelle des pertes de circulation ont été observées dans certains forage d'exploration minière. Aquifère dont le substratum se trouve à 400 - 465 m, elle ne semble pas être en contact avec les couches aquifères du système aquifère sédimentaire.

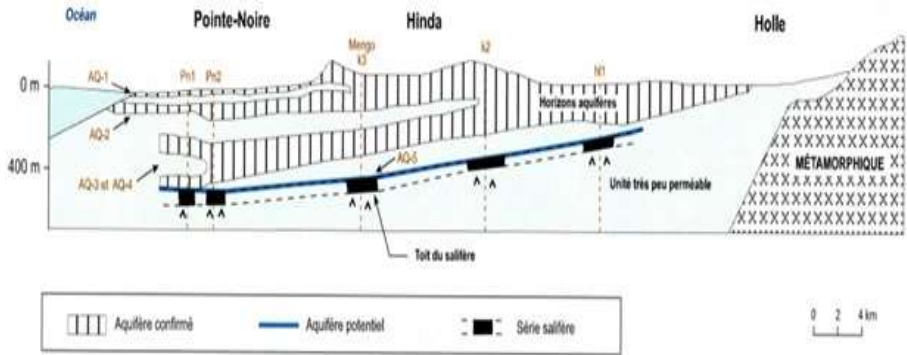


Figure 5 : Coupe hydrogéologique du système aquifère multicouche du bassin côtier de Pointe-Noire (Moukolo, 1992 modifiée).

La diversité des données géologiques (issues des forages pétroliers, d'eau et des sondages géotechniques) semble être contradictoire et pauvre. Ces données géologiques montrent une variation de la lithologie, de faciès et de la structure du système aquifère du bassin. Les travaux antérieurs (Iwaco, 1982 et Safege, 1991) indiquent que le système aquifère du bassin sédimentaire côtier de Pointe-Noire appartient à la série de Cirques, formation d'âge Pléistocène (1 à 5 millions d'années). En résumé, le bassin sédimentaire côtier est un complexe hydrogéologique à aquifères multicouches. Les recherches d'eau entreprises jusqu'alors dans ce bassin n'ont concerné que l'alimentation en eau potable de la ville de Pointe-Noire. Cela explique le caractère très local des données hydrodynamiques et hydrochimiques qu'il serait hasardeux de généraliser (Moukolo, 1992).

Le tableau 1, donne les différents paramètres hydrodynamiques auxquelles les différentes nappes ont été reconnues ainsi que les coefficients de Darcy respectifs.

Tableau 1 : Paramètres hydrodynamiques du système aquifère de la région de Pointe-Noire (Moukolo, 1992 et Mbilou et al., 2016).

Perméabilité	Vitesse d'écoulement	Débit d'écoulement	Débit unitaire	Profondeur
$K_s=10^{-5}$ m/s		Aquifère lié aux formations argilo-sableuses = $3,5 \cdot 10^{-4}$ à $0,35$ m ³ /s	Nappe superficielle = $5 \cdot 10^{-7}$ m ³ /s	15m
$K_p=10^{-4}$ à $2,9 \cdot 10^{-4}$ m/s	$2,5 \cdot 10^{-5}$ m/s	Aquifère lié aux sables et grès du Crétacé = $142 \cdot 10^{-4}$ à $1473 \cdot 10^{-3}$ m ³ /s	Nappe profonde = $4,2 \cdot 10^{-6}$ m ³ /s	

METHODOLOGIE UTILISEE

Acquisition des données sur le terrain

Sur le terrain, nous avons utilisé pour la foration la méthode Rotary à la boue, deux (02) types d'appareils de forage ont été utilisés : Rotary à Top Drive ou à tête d'injection moteur pour le premier site, Kounda, et Rotary à Tête d'injection simple fonctionnant grâce à la table motrice pour les deux autres sites, Ngoyo plaine et Ngoyo commune (Figure 6).

Pendant la foration les données lithologiques sont obtenues par échantillonnage et description des déblais de foration au pas de deux mètres de profondeur (Figure 7).



Figure 6 : Préparation de la boue de forage et la pose du tube guide de l'avant trou (Kashala, 2018).



Figure 7 : Echantillonnage et description des cuttings des formations géologiques traversées (Kashala, 2018)

Essais de pompage

Le but des essais de pompage est d'estimer la productivité des ouvrages nouvellement réalisés, de vérifier la qualité chimique de l'eau ainsi que les paramètres hydrodynamiques des aquifères. Les résultats de ces essais seront décisifs dans la prise de décision de transformation des sondages en forage d'exploitation. Pour cela à partir des électropompes immergées de débits maximums respectifs 10 m³/h et 8 m³/h, on a effectué des essais de puits par palier croissant (ou essais de courte durée), on exécutera que des essais de puits par paliers. Le débit de pompage et le rabattement observé sont notés à la fin de chaque palier.

A l'aide d'une sonde électrique sonore, nous avons mesuré le rabattement de la nappe (ou niveau dynamique) toute les minutes et ceux pendant 1 h voire 1 h 30 mn sans arrêt de la pompe. Pour le réglage du débit de pompage en fonction du temps, nous avons utilisé un fut ou une cuve. Connaissant la capacité de la pompe (débit de pompage souhaité) et celle de la cuve, on peut déterminer le temps mis pour remplir le fut ou la cuve à partir de la formule suivante : $t = (3600 * \text{capacité fut/cuve}) / (\text{capacité pompe})$. Pour le réglage du débit de pompage en fonction du temps, nous avons utilisé un fut. Pour des raisons de variation du courant, on vérifie plusieurs fois la valeur du débit et le débit considéré est la moyenne de la somme des débits trouvés.

Analyses physico-chimiques des eaux souterraines

Au cours des essais de pompage sur les forages de Kounda, de Ngoyo plaine et de Ngoyo commune, des échantillons d'eau ont été prélevés au niveau de l'orifice de sortie à des intervalles de temps précis (30 mn après le début de pompage et chaque 30 mn avant la fin de chaque palier), pour être analysés au laboratoire de contrôle et d'analyse des eaux à Brazzaville.

Au laboratoire, on a procédé à la détermination du pH et de la conductivité électrique ainsi qu'à l'analyse chimique des éléments suivants : Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, HCO₃⁻, PO₄³⁻, F⁻, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Al³⁺, Pb²⁺, Fer total (Fe_{Tot}) et Cr⁶⁺.

Les analyses chimiques des ions Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, F⁻, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Al³⁺, Pb²⁺, Fer total (Fe_{Tot}) et Cr⁶⁺ des eaux échantillonnées ont été effectuées par chromatographie ionique et celles des ions bicarbonates (HCO₃⁻) par titrimétrie.

Traitement des données hydrochimiques

Les données collectées pendant la foration et l'équipement des nouveaux forages ont permis l'établissement des fiches techniques et lithologiques des différents forages en utilisant le logiciel Adobe Illustrator.

Le logiciel Microsoft Excel a permis le traitement des données des essais de pompage et le logiciel Diagramme développé par Roland Smiller du département d'Hydrogéologie de l'université d'Avignon en France, est utilisé pour le traitement des données des analyses physico-chimiques des eaux souterraines.

La précision des analyses chimiques est liée aux méthodes analytiques et aux concentrations. Les méthodes utilisées et les limites de détection varient selon le laboratoire d'analyse. Le calcul de l'erreur relative sur la balance ionique qui est 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).

Si l'écart relatif est inférieur à 5 %, les analyses peuvent être considérées comme bonnes. Lorsque sa valeur est comprise entre 5 % et 10 %, les analyses peuvent à la rigueur être retenues. Au-delà de 10 %, les analyses doivent être rejetées. Deux causes peuvent dans ce cas être invoquées : les méthodes analytiques sont peu précises ou un ou plusieurs éléments en solution n'ont pas été dosés.

Un contrôle systématique de l'erreur sur la balance ionique a été réalisé au laboratoire pour l'ensemble des analyses chimiques de cette étude. Les erreurs calculées sont inférieures ou égales à 5 %, ce qui témoigne d'une bonne qualité des mesures et peuvent être traitées sans restriction à l'aide des différents logiciels de traitement des données hydrochimiques comme Diagramme développé par le laboratoire d'hydrogéologie de l'université d'Avignon en France et Microsoft Excel.

RESULTATS ET DISCUSSION

Reconstitution lithologique des formations géologiques traversées

A Kounda nous avons foré jusqu'à 72 m grâce au fonçage d'une garniture constitué de 24 tiges de 3 m chacune entraîné par le trépan de 0,6 m de long. On a juste tubé 67,5 m, constitué du fond du trou à la surface, d'un décanteur de 3,5

m, de 9 m de crépine et des tubes pleins faisant au total 54 m. Ce tubage révèle qu'il y a eu des petits éboulements des parois du puits et décantage des sédiments contenu dans la boue pendant le retrait de la garniture, ce dépôt a ainsi empêché l'équipement total du forage jusqu'au fond du trou (figure 8).

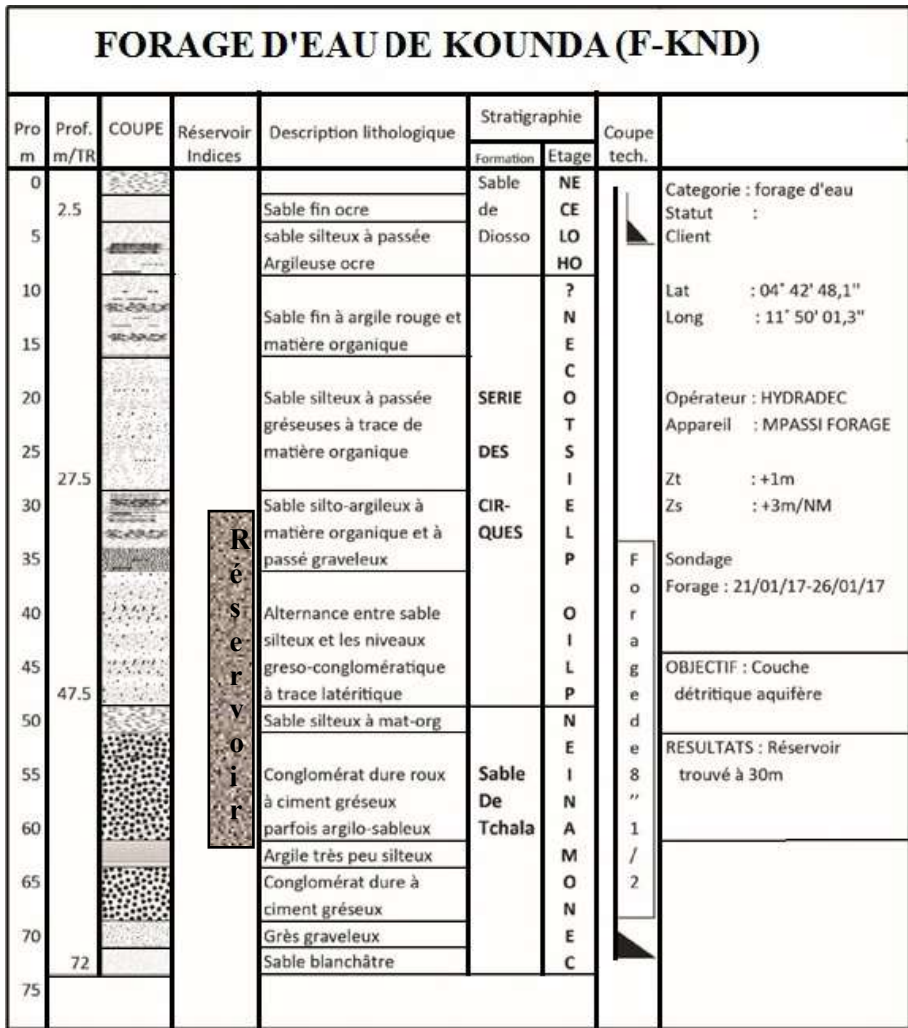


Figure 8 : Coupe lithologique et technique du forage de Kounda (Kashala, 2018).

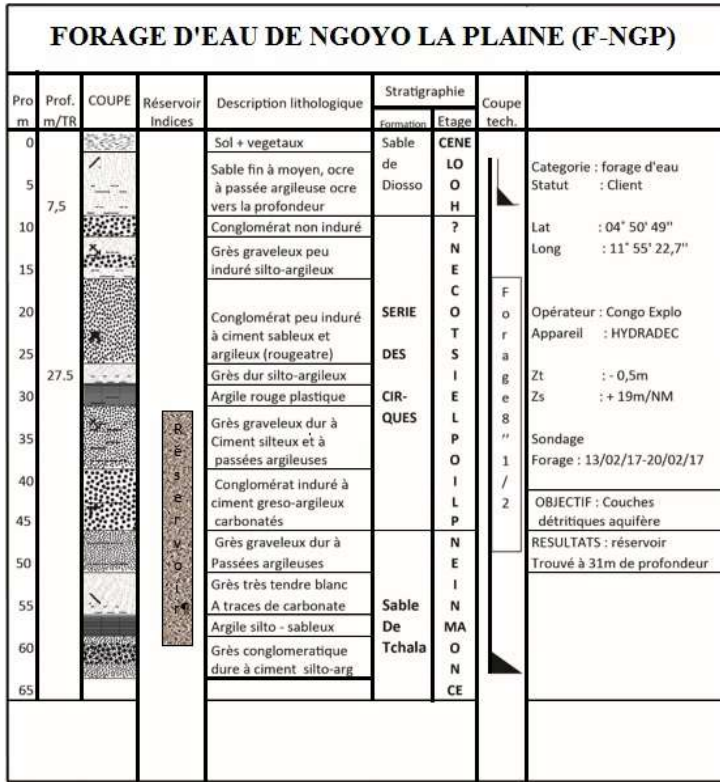


Figure 9 : Coupe lithologique et technique du forage de Ngoyo plaine (KASHALA, 2018).

A Ngoyo la plaine, l'objectif de foration est toujours fixé autour de 70 m de profondeur mais il n'est pas atteint car après 65 m de profondeur, nous sommes tombés sur un conglomérat à argile rouge plastique empêchant l'évolution du forage. D'où l'on a arrêté la foration pour faire la circulation de la boue, ensuite le retrait de la garniture et enfin le tubage. Le forage est équipé à 62,64 m de profondeur avec une perte de 1,36 m par rapport à la profondeur atteinte pendant la foration (figure 9).

A Ngoyo la commune, la foration s'est arrêtée à 52,5 m de profondeur à cause du terrain présentant des niveaux à fort risques d'éboulement d'où la décision d'équipement prise par le superviseur en chef a été exécutée. Nous avons perdu 0,2 m de profondeur car le total équipé fait 52,3 m sur 52,5 m foré (figure 10).

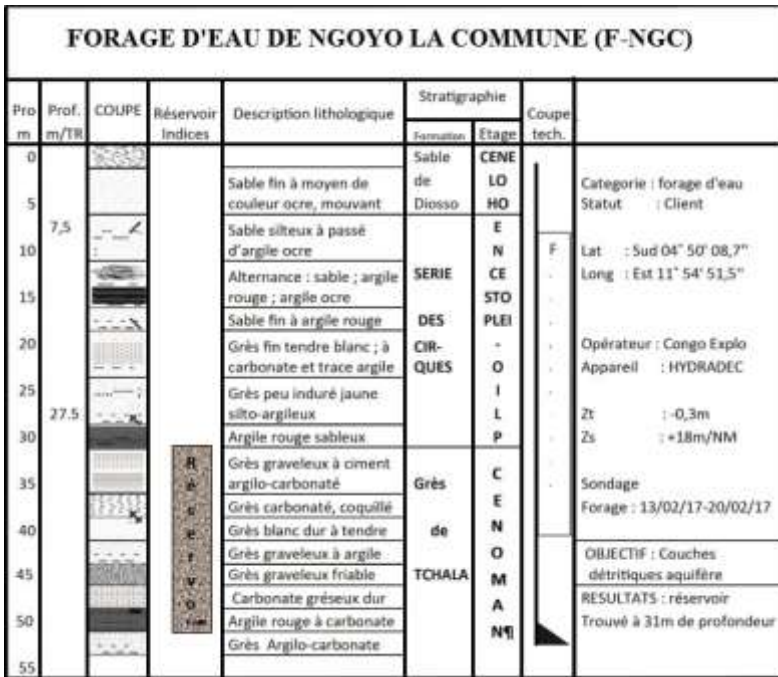


Figure 10 : Coupe lithologique et technique du forage de Ngoyo commune (Kashala, 2018).

Essais de pompage

Les essais de pompage de courte durée encore appelés essais de puits ont été effectués sur les nouveaux forages de Kounda et de Ngoyo la commune.

La courbe caractéristique $[S=f(Q)]$ constitue une fiche d'identification ultérieure des améliorations ou des détériorations suite à l'exploitation de l'ouvrage. Elle permet de déterminer le débit maximum d'exploitation, fonction d'un rabattement maximum admissible. Elle est obtenue en portant le couple de données de chaque palier (débit en m^3/h) et le rabattement en (m) sur un papier millimétré (Tableau 2). Les points obtenus permettent de tracer la courbe $[s=f(Q)]$.

Le débit critique représente la valeur au-delà de laquelle, il apparaît des pertes de charges dans l'ouvrage. Il correspond au point où la courbe quitte l'allure linéaire pour prendre une forme parabolique, et est noté Q_{cr} . Il s'exprime en m^3/h . Les courbes (Figure 11) obtenues par la méthode de Jacob pour la

détermination graphique des débits critiques donnant à la fin une fonction $[S=f(Q_{cr})]$ qui n'est pas la fonction du départ ; s'interprètent de la manière suivante : la courbe de rabattement (S), la courbe des pertes des charges linéaire $[S=BQ]$ et quadratiques $[S=CQ^2]$, la courbe de Jacob $[S=BQ+CQ^2]$, toutes ces courbes sont celles que les figures présentent sauf $[S=BQ]$ car $[B=0]$.

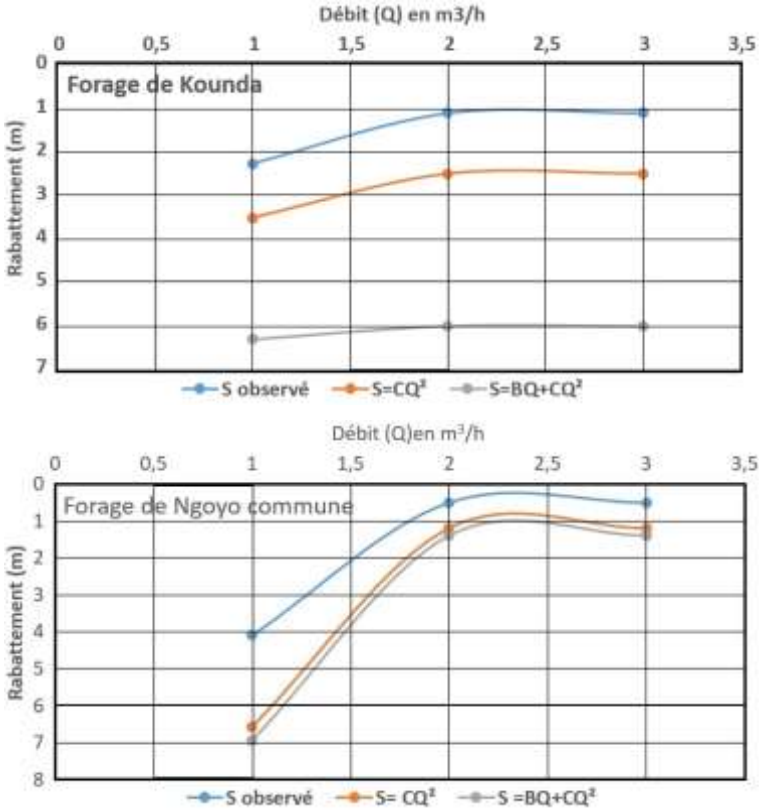


Figure 11 : Courbes caractéristiques des forages de Kounda et de Ngoyo $[S=F(Q_{cr})]$ (Kashala, 2018).

Ces courbes ont une allure linéaire et ne se croisent pas ou encore les autres courbes (rabattement S et $[S=CQ^2]$) ne rencontrent pas la courbe de Jacob ($[S=BQ+CQ^2]$) ce qui permet de conclure que l'on n'a pas pu atteindre les débits critiques pendant les essais de puits à Kounda et à Ngoyo la commune.

Tableau 2 : Essais de pompage de courte durée par la méthode de Jacob (Kashala, 2018)

Paramètres	Forage de Kounda			Forage de Ngoyo commune		
Débit (Q, m ³ /h)	2,8	4,22	6,53	3,48	5,4	6
Rabattement (S, m)	2,27	3,51	6,31	4,1	6,57	6,95
S/Q (m/m ³ /h)	0,81	0,83	0,97	1,18	1,22	1,16
Débit Q/s (m ³ /h/m)	1,23	1,20	1,04	0,85	0,82	0,86
B		0			0	
C		0,14			0,04	
S = BQ	0	0	0	0	0	0
S = CQ ²	1,1	2,5	6	0,5	1,2	1,4
S = BQ + CQ ²	1,1	2,5	6	0,5	1,2	1,4
BQ/S(%)	0	0	0	0	0	0
CQ ² /S(%)	100	100	100	100	100	100
CQ ² /BQ (%)	0	0	0	0	0	0

Evaluation des Pertes de charges

Dans l'ouvrage, le rabattement mesuré à l'instant t est la somme de deux composantes exprimées en mètres de hauteur d'eau qui sont :

- les pertes de charges linéaires (BQ) provoquées par l'écoulement laminaire dans l'aquifère au voisinage du puits ;
- les pertes de charges quadratiques (CQ²), non linéaires, provoquées par l'écoulement turbulent dans l'ouvrage, crépine et tubage.

Ainsi, le rabattement total à l'instant t est donné par l'expression de Jacob (1946) ci-dessous :

$$S (m) = BQ + CQ^2$$

B : coefficient de perte de charge linéaire ;

C : coefficient de perte de charge quadratique ;

Q : débit de pompage en m³/h.

A partir de cette expression, on peut exprimer le rabattement spécifique (S/Q) : [S/Q = B + CQ].

L'expression ci-dessus a permis d'exprimer [S/Q=f(Q)] pour ensuite déterminer les constantes de Jacob B et C.

Dans les deux cas de nos essais de puits, le constat fait est que la constante B de Jacob est nulle d'où S = BQ les pertes de charge linéaires sont négligeables ;

laissant ainsi la place aux pertes de charges quadratiques provoqué par un écoulement turbulent dans le puits car la constante C (0,14 à Kounda et 0.04) à Ngoyo la commune bien que faible mais existe d'où $[S=CQ^2]$ existe (figure 12).

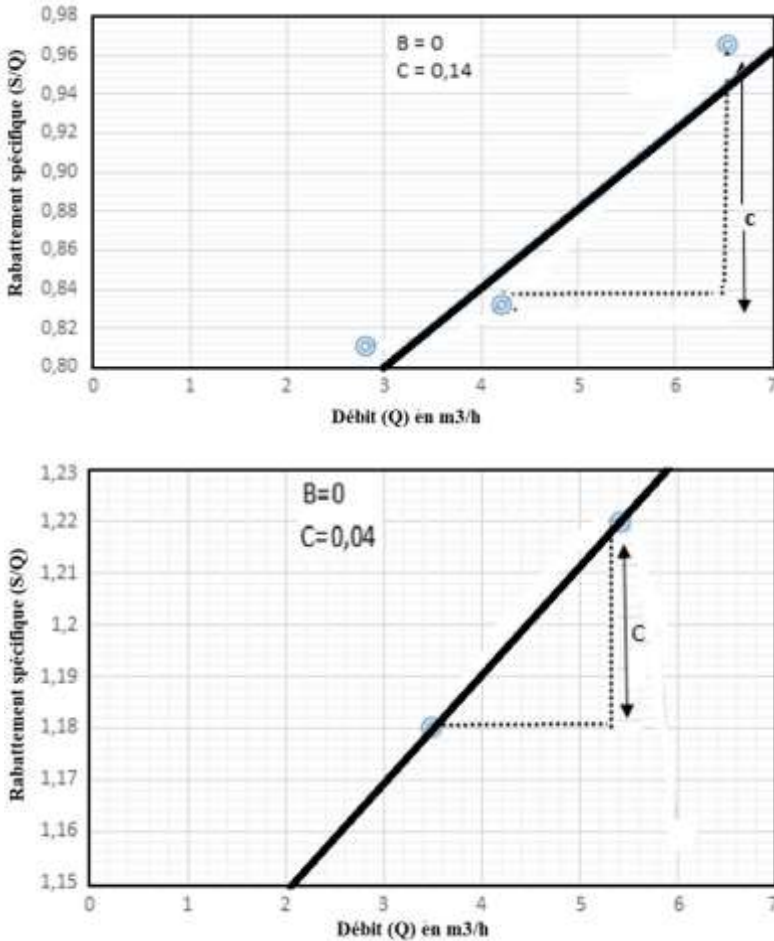


Figure 12 : Détermination des constantes de Jacob des forages de Kounda et Ngoyo commune (Kashala, 2018).

Le débit d'exploitation maximum d'un ouvrage correspond au débit qui peut être pompé dans l'ouvrage, pendant une durée définie, sans que le rabattement induit par le pompage ne dépasse le rabattement maximum admissible (Forkasiewicz, 1978). Or, pour être dans les conditions économiques, le débit d'exploitation maximum et le rabattement correspondant doivent être inférieurs

au débit critique. C'est ainsi que pour les trois forages nous avons fixé le débit d'exploitation maximum à 6 m³/h au-delà duquel on peut atteindre le débit critique pouvant compliquer le fonctionnement des forages. Cependant, les débits critiques n'étaient pas atteints pendant les essais de pompage à cause des pompes électriques immergées que nous avons utilisées, mais aussi de la productivité des nappes captées.

La productivité d'un puits (Pr) est le débit d'exploitation maximum d'un ouvrage correspondant au débit qui peut être pompé dans l'ouvrage, pendant une durée définie, sans que le rabattement induit par le pompage ne dépasse le rabattement maximum admissible (FORKASIEWIEZ, 1978).

$$Pr = Q_s * S_{max}$$

avec Q_s : débit d'exploitation maximum et S_{max} : Rabattement maximum

Le tableau 3 montre que le forage de Kounda (F-KND) est plus productif que le forage de Ngoyo la commune (F-NGC).

Tableau 3 : Détermination de la productivité des forages F-KND et F-NGC (KASHALA, 2018)

Forages	Q_s (m ³ /h.m)	S_{max} (m)	P_r (m ³ /h)
Kounda	6,7	0,97	6,9
Ngoyo commune	5,17	1,16	5,2

Caractéristiques physico-chimiques des eaux des nouveaux forages

Classification des eaux souterraines à partir du diagramme de Piper

La figure 13 permet de faire ressortir les familles et faciès chimiques des eaux souterraines.

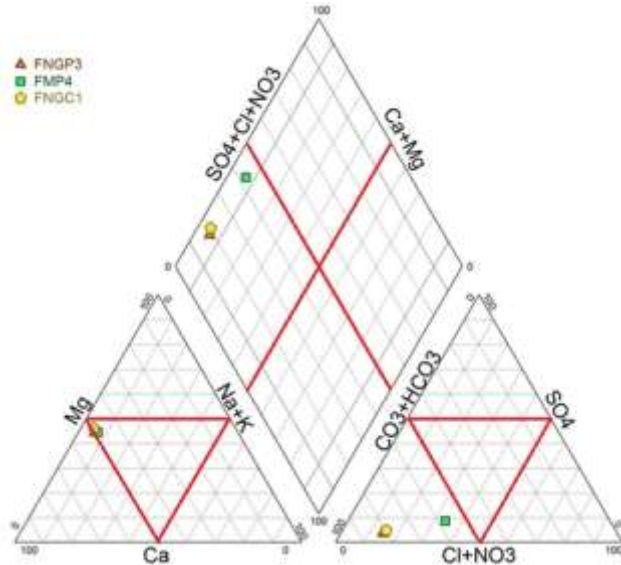


Figure 13 : Classification des eaux des forages à partir du diagramme triangulaire de Piper (KASHALA, 2018).

Dans le losange du diagramme de Piper, les eaux des forages se regroupent dans la famille chimique bicarbonatée calcique magnésienne. Dans le triangle des cations, elles ne montrent pas un cation dominant entre le calcium et le magnésium. Tandis que dans le triangle des anions, elles se regroupent dans le pôle bicarbonaté.

Pour l'étude de la qualité des eaux souterraines de la zone d'étude, nous nous limiterons à l'étude comparative de certains éléments chimiques aux normes de qualités requises pour une eau de boisson car les analyses bactériologiques n'ont pas été réalisées.

Les normes de potabilité de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2006) relatives à la qualité chimique des eaux et les résultats chimiques (minimum et maximum) des eaux souterraines de la zone d'étude sont représentées dans le tableau 4.

L'ensemble des analyses physicochimiques des échantillons d'eau, confirme la bonne qualité chimique des eaux des différents forages réalisés.

Tableau 4 : Normes de potabilité des eaux de boisson de l'OMS (2006) et paramètres physico-chimiques des eaux souterraines (Kashala, 2018)

Paramètres physico-chimiques	F-NGC	F-NGP	F-KND	Normes OMS (2006)	Unités
Température (°C)	25	25	25	25	°C
pH	6,18	6,36	6,01	6,5-8,5	
Conductivité électrique	60	58	94	<2000	µS/cm
(µS/cm)					
Fer total (Fe ²⁺ + Fe ³⁺)	0,07	0,07	0,04	<0,3	mg/L
Baryum (Ba ²⁺)	/	/	/	<0,7	
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	7	6,05	7,70	<250	
Chlorure (Cl ⁻)	12	13,8	19,34	<250	
Calcium (Ca ²⁺)	30	30	18	<100	
Magnésium (Mg ²⁺)	17	16	10	<50	
Carbonates CO ₃ ²⁻	0,0	0,0	0,0	/	
Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	145	173	64,89		
Phosphates (PO ₄ ³⁻)	0,11	0,12	0,17		
Nitrates (NO ₃ ⁻)	7,05	7,17	5,12		
Cuivre (Cu ²⁺)	0,07	0,08	0,07		
Aluminium (Al ³⁺)	0,16	0,21	0,21		
Plomb (Pb ²⁺)	1,55	1,22	3,8		
Ammonium (NH ₄ ⁺)	0,12	0,13	0,27		
Fluor (F ⁻)	0,13	0,14	0,13		
Silice (SiO ₂)	6,66	6,25	6,41		

Etude de l'agressivité des eaux souterraines des forages réalisés

Le phénomène de l'agressivité des eaux a été étudié par plusieurs auteurs qui ont proposés des méthodes permettant son évaluation tant qualitative que quantitative. Parmi ces auteurs, on peut citer Langelier, Ryznar, Larson, Stiff et Davis pour les méthodes qualitatives ; Hallopeau-Dubin, Girard, pour les méthodes quantitatives. Cependant, dans le cas de cette étude, notre choix a été porté sur les indices de stabilité de Langelier et de Ryznar.

Calcul des indices de saturation des phases minérales

L'équilibre eau - minéral est souvent exprimé par l'indice de saturation (IS) déterminé par la formule :

$$IS = \text{Log} (PAI/K_s) \text{ avec,}$$

PAI : Produit d'activité ionique des ions concernés et K_s : Constante d'équilibre.

Quand IS = 0, l'eau est alors en équilibre avec le minéral. En revanche, l'eau est sous-saturée ou sursaturée vis-à-vis du minéral dans le cas où IS serait inférieur

ou supérieur à zéro. Par conséquent, il est recommandé de considérer que le domaine de saturation est obtenu pour des valeurs comprises entre -1 et +1 (Plummer et al., 1976).

Les indices de saturation (IS) des eaux vis-à-vis des phases minérales (anhydrite, aragonite, calcite, dolomite et gypse) présentes dans la matrice de l'aquifère capté par les trois forages réalisés, ont été calculés à partir du programme Wateq (Truesdel et Jones, 1974 ; Plummer et al., 1976).

Les résultats des calculs d'indices de saturation (IS) des eaux souterraines vis-à-vis de certains minéraux carbonatés sont représentés dans le tableau 5 ci-dessus. Ces résultats montrent que les eaux des trois forages réalisés ont des indices de saturation négatifs et sont donc sous-saturées vis-à-vis de l'anhydrite, de l'aragonite, de la calcite, de la dolomite et gypse. Ainsi, il peut y avoir des réactions de dissolution des phases minérales, dans ce cas l'eau est dite agressive.

Indice de stabilité de Langelier

L'indice de stabilité de Langelier (IS_L) permet d'apprécier l'implication de la qualité chimique de l'eau dans la destruction prématurée des crépines, des pompes et conduits d'eau.

Langelier apprécie l'agressivité de l'eau en utilisant comme données la salinité totale ou le résidu sec à 110 °C, la température, la teneur en calcium et l'alcalinité. Il calcule ainsi le pH que devrait avoir la solution pour être en équilibre avec le carbonate de calcium. En comparant la valeur calculée avec le pH de l'eau, il détermine si l'eau est agressive ou incrustante, il définit ainsi un indice d'agressivité :

$$IS_L = pH_{mes} - pH_{Sat}$$

IS_L : indice de saturation de Langelier ; pH_{mes} : pH mesuré et pH_{Sat} : pH calculé ;

Cependant : $IS_L > 0$: eau incrustante ; $IS_L = 0$: eau en équilibre ; si $IS_L < 0$: eau agressive.

D'après le tableau 5, les indices de stabilité de Langelier oscillent entre -1,41 et -2,28 pour les trois forages et sont inférieurs à 0. Cela signifie que les eaux des forages réalisés sont agressives c'est-à-dire qu'elles dissolvent le carbonate de calcium et peuvent attaquer les équipements métalliques des forages : d'où le choix des tubes en PVC alimentaires pour l'équipement des trois forages réalisés dans les quartiers périphériques de Pointe Noire.

Tableau 5 : Indices de stabilité et de saturation des eaux souterraines (Kashala, 2018)

Paramètres	FNGP3	FNGC1	FMP4
pH mesuré	6,18	6,36	6,01
pH de saturation	7,59	7,84	8,29
Indices de stabilité de Langelier	-1,41	-1,48	-2,28
Indices de stabilité de Ryznar	9,00	9,32	10,57
Calcite	-1,32	-1,57	-2,28
Aragonite	-1,46	-1,71	-2,43
Dolomite	-3,11	-3,59	-5,02
Gypse	-2,97	-2,90	-3,05
Anhydride	-3,19	-3,12	-3,27

Indice de stabilité de Ryznar

L'indice de stabilité de Ryznar est une expression empirique calculée par la formule ci-après :

$$IS_R = 2pH_{Sat} - pH_{mes}$$

IS_R : indice de stabilité de Ryznar ; pH_{mes} et pH mesuré.

Le tableau 6 ci-après indique la relation entre l'indice de stabilité de Ryznar et la tendance corrosive de l'eau.

Les indices de stabilité de Ryznar sont supérieurs à 8,5 et oscillent entre 09,00 et 10,53 pour les eaux des trois forages réalisés (Cf. tableau 5). Cela signifie que les eaux des nouveaux forages sont très fortement corrosives.

Tableau 6 : Indice de Ryznar et tendance de corrosivité correspondante de l'eau.

I_R	Tendance
4 à 5	Entartrage important
5 à 6	Entartrage faible
6 à 7	Equilibre
7 à 7,5	Légère corrosivité
7,5 à 8,5	Forte corrosivité
> 8,5	Très forte corrosivité

DISCUSSION DES RESULTATS

Du point de vu résultats de terrain, la description et l'interprétation lithologique pendant la foration, en tenant aussi compte de l'avancement de la machine, a permis l'établissement de la coupe lithostratigraphique et technique de chaque forage. L'aquifère capté est celui situé entre 35 m et 65 m de profondeur (AQ-2) formé d'au moins deux poches d'eau (multicouche). L'aquifère capté est en général productif grâce aux essais de puits réalisés. Résultats en accord avec ceux de Moukolo (1984). Notons par contre que l'AQ-2 se prolonge par endroit dans les formations d'âge céno-turonien surtout en allant de plus en plus vers l'océan.

Du point de vu résultats de laboratoire, les eaux des différents forages sont dans l'ensemble de qualité chimique acceptable avec des concentrations en éléments majeurs inférieures aux concentrations maximales admissibles fixées pour l'eau de boisson par l'Organisation Mondiale de la Santé. Les données des analyses physico-chimiques sur Piper révèle que les eaux des ouvrages réalisés sont de la famille bicarbonaté calcique et magnésienne. Ces résultats se rapprochent de ceux obtenus par Mampouya (2015).

L'agressivité est un phénomène complexe faisant intervenir plusieurs facteurs de nature chimique, électrochimique et même microbiologique. La multiplicité de ces facteurs rend l'étude de ces problèmes extrêmement complexe. En effet, la détermination du caractère agressif des eaux souterraines à partir des indices de stabilité de Langelier et de Ryznar, a permis de savoir que les eaux souterraines de l'aquifère profond sont agressives et très fortement corrosives c'est-à-dire qu'elles dissolvent le carbonate de calcium et peuvent attaquer les équipements métalliques des forages. Sur ce, nous recommandons à l'endroit des sociétés de forages d'eau, l'utilisation les tubes en PVC alimentaires pour la tuyauterie du réseau de distribution d'eau pour l'ensemble du système de desserte en eau potable de la ville de Pointe Noire.

CONCLUSION

Les formations géologiques de la région de Pointe-Noire sont généralement sédimentaires d'où la réalisation des forages hydrauliques dans la région se fait en utilisant la méthode rotary à la boue, l'analyse et l'interprétation des données des cuttings ainsi que l'avancement globale de la foration ont permis l'établissement des coupes lithologiques des trois nouveaux forages. Les forages réalisés exploitent les eaux de l'aquifère profond (AQ-2). Nous avons rencontré

autour de 30 et 31 m de profondeur une couche semi-perméable à imperméable d'argile rouge peu ou très plastique assurant une barrière naturelle empêchant la communication permanente entre les eaux de l'aquifère superficiel (AQ-1) et celles de l'aquifère profond (AQ-2).

Le débit d'exploitation maximum obtenu à partir des essais de pompage, est de 6 m³/h pour une production normale et durable de la nappe. Les débits critiques ne sont pas atteints ; les forages de Kounda et de Ngoyo plaine dont l'efficacité n'a pas été vérifiée sont estimés efficaces de par leurs débits qui avoisinent celui de Ngoyo commune.

Les eaux produites par les trois forages sont dans l'ensemble de qualité physico-chimique acceptable avec des teneurs en éléments majeurs inférieures aux concentrations maximales admissibles définies pour l'eau de boisson par l'Organisation Mondiale de la Santé. La projection des données des analyses chimiques sur le diagramme de Piper montre que les eaux de l'aquifère profond (AQ-2) sont de la famille bicarbonatée calcique et magnésienne. En ce qui concerne l'étude de l'agressivité des eaux souterraines à partir des indices de stabilité de Langelier et de Ryznar et des indices de saturation par rapport aux différentes phases minérales présentes dans la matrice aquifère, les eaux souterraines sont agressives à fortement corrosives, c'est-à-dire qu'elles dissolvent le carbonate de calcium et peuvent attaquer les équipements métalliques du système d'exhaure des forages.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BROWNFIELD M. E. and CHARPENTIER R. R. (2006). Geology and total petroleum systems of the West-Central Coastal Province (7203), West Africa: U.S. Geological Survey Bulletin 2207-B, 52 p.
- BUREAU D'ETUDES IWACO (1982). Approvisionnement en eau potable à Pointe- Noire. Volume 1 : Etudes hydrogéologiques, 16 p. et Volume 2 : Dossier Technique, 54 p.
- FETTER C. W. (1994). Applied hydrogeology. Prentice Hall Inc., New Jersey (USA), 691 p.
- FORKASIEWICZ (1978). Interprétation des données des essais de pompage pour l'évaluation des paramètres des aquifères. Rapport BRGM (Orléans), 50 p.

- GROSDIDIER E., BRACCINI E., DUPONT G., MORON J.-M. (1996). Biozonation du Crétacé inférieur non marin des bassins du Gabon et du Congo. *Géologie de l'Afrique et de l'Atlantique Sud : Actes Colloques Angers 1994*, 67-82, Pau.
- KASHALA E. (2018). Contrôle et suivi de l'exécution de trois forages d'eau dans le département de Pointe-Noire. *Mémoire de Master Géosciences, Faculté des Sciences et Techniques, Université Marien NGOUABI*, 61 p.
- KIRCHMER J. C. (1983). Quality control in water analyses. *Environmental Science and Technology*, Vol. 17, n° 4, pp 178-181.
- MAMPOUYA X. D. (2015). Contribution dans l'étude hydrochimique des aquifères exploités dans la région de Pointe-Noire en utilisant les outils d'interprétation des données hydrochimique. *Mémoire de Master Géosciences, Faculté des Sciences et Techniques, Université Marien NGOUABI*, 45 p.
- MBILOU U. G. TCOUMOU M., NGOUALA MABONZO M. et BALOUNGUIDI J. (2016). Caractérisation hydrogéochimique et microbiologique des eaux souterraines dans le système d'aquifères multicouche de la région de Pointe-Poire en République du Congo. *Larhyss Journal*, n°28, pp. 257-273.
- MOUKOLO N. (1992). Etat de connaissances actuelles sur l'hydrogéologie du Congo Brazzaville. *Hydrogéologie*, n° 1-2, pp. 47-61.
- MOUKOLO N. (1984). Ressources en eau souterraine et approvisionnement. Essai d'Analyse socio-économique en Région équatoriale Humide (Région de Brazzaville et Pointe Noire, Congo). *Thèse de Doctorat de 3ème cycle en Géologie Appliquée, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Académie de Montpellier*, 92 p.
- OMS/WHO (2006). Directives de qualité pour l'eau de boisson. Vol. 3- 504 p.
- PLUMMER L. N.; JONES B. F.; TRUESDELL A. H. (1976). WateqF, a Fortran IV version of Wateq, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. *US Geology Survey Water Resource Investigation*, Vol. 76, n° 13.
- SAFEGE (1991). Ville de Pointe Noire, Alimentation en eau, réhabilitation des forages, étude de la nappe. *Rapport de synthèses*, 103 p.

- SERANNE M. et ANKA Z. (2005). South Atlantic continental margins of Africa: A comparison of the tectonic vs climate interplay on the evolution of equatorial west Africa and SW Africa margins. *Journal of African Earth Sciences* (2005).
- TRUESDELL A. H. ; JONES B. F. (1974). WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. *Journal Research USGS*, Vol. 2, n° 2, pp. 233-239.