

CARACTERISATION DE LA PRODUCTIVITE DES AQUIFERES DU SOCLE DE LA REGION DE L'EXTRÊME NORD, CAMEROUN

EWODO MBOUDOU Guillaume^{1,2*}, BON André Firmin^{2,3}, BINELI Etienne³, NTEP François², OMOLO Auguste¹

¹Département d'Hydraulique et Maîtrise des Eaux, Institut Supérieur du Sahel, Université de Maroua. B.P. 46 Maroua

²Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et d'Altérologie, Département de Sciences de la Terre et de l'univers, faculté des sciences, Université de Yaoundé I. B.P. 812 Yaoundé ³Département de Climatologie, Hydrologie et Pédologie, Institut Supérieur du Sahel, Université de Maroua. B.P. 46 Maroua

*Auteur correspondant, E-mail : guillaume_ewodo@yahoo.fr Tel : (237) 74 18 33 71

Résumé

Dans la zone de socle de la région de l'Extrême Nord du Cameroun, l'exploitation des ressources en eau souterraine permet de faire face au problème de l'alimentation en eau potable des populations rurales. Une meilleure connaissance de ces aquifères est nécessaire pour une bonne productivité. La présente étude a été effectuée pour identifier les principaux paramètres hydrauliques essentiels dans la productivité des aquifères de ce socle. Pour ce faire, une compilation de données regroupant les fiches techniques de forage de même que les essais de pompage disponibles dans ce socle a été faite. Ces données concernent les paramètres tels que : le débit de forage (Q), la profondeur totale (Pt) et l'épaisseur d'altérites (EA). Les paramètres hydrauliques notamment la transmissivité (T) et le débit spécifique (Qs) ont été déterminés à partir de l'interprétation des essais de pompage issus des données des fiches. La transmissivité a été calculée par la méthode de Cooper Jacob avec les données de rabattement des ouvrages disponibles après l'arrêt du pompage lors de la remontée. Une analyse statistique de ces paramètres physiques et hydrauliques déterminés a été réalisée. Il ressort que les débits des forages oscillent entre 0,04 m³/h et 4 m³/h avec une moyenne de 1,66 m³/h. Les classes de débits très faible et faible représentent 74,57% des débits de forage de cette zone. Les forages productifs ont une profondeur totale comprise entre 30 et 75 m avec une épaisseur d'altérites qui varie entre 1m et 14 m. Les formations granitiques et métamorphiques semblent être productives, avec 47,46% des débits se trouvant dans la classe des débits faible à moyenne (Q e" 1m³/h). Les valeurs de transmissivité fluctuent entre 3x10⁻⁷ m²/s et 7,80x10⁻⁴ m²/s avec une moyenne de 5,03x10⁻⁵ m²/s. Elle illustre que les aquifères de socle de la région de l'Extrême Nord ont une faible fonction conductrice.

Mots Clés : Productivité, aquifères, zone de socle, Extrême Nord, Cameroun

Abstract

In the socle zone of the extreme North region of Cameroon, the exploitation of groundwater resources makes it possible to cope with the problem of the supply of drinking water to rural populations. A better knowledge of these aquifers is necessary for good productivity. The present study was carried out to identify the main hydraulic parameters essential in the productivity of the aquifers of this socle zone. To do this, a compilation of data gathering the drilling data sheets as well as the pumping tests available in this socle was made. These data relate to parameters such as: flow of drilling (Q), total depth (P_t) and thickness of alterites (EA). The hydraulic parameters in particular the transmissivity (T) and specific flow rate (Q_s) were determined from the interpretation of the pumping tests from the data the data sheets. The transmissivity was calculated by the Cooper Jacob method with the rabattement data of the works available after the stop of pumping at the time of the ride up. A statistical analysis of these parameters of given drillings and hydraulics was carried out. Borehole flow rates range from $0.04 \text{ m}^3 / \text{h}$ to $4 \text{ m}^3 / \text{h}$ with an average of $1.66 \text{ m}^3 / \text{h}$. The very weak and weak flow classes account for 74.57% of the flow of drilling in this zone. The productive boreholes have a total depth of between 30 and 75 m with a thickness of alterites which varies between 1 m and 14 m. The granitic and metamorphic formations appear to be productive, with 47.46% of the flows in the low to medium flows class ($Q \leq 1 \text{ m}^3 / \text{h}$). Transmissivity values fluctuate between $3 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$ and $7.80 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$ with an average of $5.03 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$. It illustrates that the basement aquifers of the extreme North region have a weak conductive function.

Keys words : Productivity, aquiferes, socle zone, Extreme North, Cameroon

INTRODUCTION

Le Cameroun et plus particulièrement la région de l'Extrême Nord est confronté à d'énorme problème d'eau. L'exploitation des ressources en eaux souterraines dans cette région permet de faire face au problème de l'alimentation en eau potable des populations rurales. Le Gouvernement camerounais, appuyé par les bailleurs de fond, investi de nombreux capitaux à travers divers programmes pour pallier ce problème (Djeuda Tchapinga et *al.*, 2001). En effet, le programme Pays Pauvre Très Endetté (PPTE) et le plan d'urgence ont permis d'accroître le nombre de forages et puits modernes en zones périurbaine et rurale. Malgré ces efforts, l'Extrême Nord du Cameroun connaît toujours des problèmes d'approvisionnement en eau potable surtout dans les localités situées en zone de socle. En effet, comparativement aux milieux sédimentaires où les aquifères sont, en général, continus, l'eau souterraine des régions de socle (métamorphique/plutonique) est localisée dans les aquifères discontinus et compartimentés (Dewandel et *al.*, 2006 ; Courtois et *al.*, 2009). Ces aquifères sont isolés les uns des autres et sont associés à des couloirs de fracturation plus ou moins verticaux hérités de l'histoire tectonique de la région (Gandolfi et *al.*, 2010). La productivité de ces aquifères est liée à la conjonction d'une couverture meuble, à fonction essentiellement capacitive (lorsqu'elle est saturée en eau), et d'un réseau de fissures connectées et ouvertures, drainant les formations meubles sus-jacentes. (Dewandel *al.*, 2006 ; Lachassagne et *al.*, 2011). Dans le cadre des programmes d'hydraulique en zone rurale de l'Extrême Nord, les forages et les puits modernes, implantés en zone de socle, doivent fournir un débit minimum de 1m³/h pour être déclaré positif. Cependant, un nombre assez élevé de ces ouvrages sont souvent déclarés négatifs car n'ayant pas atteint ce débit minimum ou abandonnés après leur mise en service pour « tarissement ». Ces constats

suscitent beaucoup d'intérêt sur le plan de la recherche hydrogéologique. En effet, les caractéristiques de ces aquifères et les profondeurs optimales productives des formations géologiques sont connues de façon sommaire ou totalement méconnues (Tillement, 1970, Detay, 1987). Une meilleure connaissance de ces aquifères est nécessaire pour une bonne productivité. La présente étude a été effectuée dans le but d'améliorer les connaissances de ces aquifères et d'évaluer leur productivité.

Site d'étude

La région de l'Extrême-Nord est située entre 9°58' et 13°03' de latitude Nord et 13°31'et 15°47'de longitude Est (Fig.1). Le climat qui y règne est de type soudano-sahélien caractérisé par une longue saison sèche et une courte saison de pluies (Suchel, 1987). La géomorphologie de la zone d'étude présente des paysages montagnards à l'ouest ; la plaine inondable au Nord et à l'Est la zone de glacis située entre les deux entités précédentes (Dumord et Peronne, 1966) (Fig.2).

L'hydrographie de la région est subdivisée en deux grands bassins hydrographiques : le bassin de la Bénoué à l'Ouest et au Sud et le bassin du Logone au centre et au Nord (Olivry, 1986). Ces bassins regroupent un ensemble de rivières (Mayo) descendant des Monts Mandara et présentant un écoulement temporaire en saison humide.

La géologie de la zone est représentée par les formations sédimentaires, du socle cristallin précambrien (Dumort et Peronne, 1966) et des formations volcaniques. Les formations sédimentaires s'étendent aux pieds des monts Mandara, de la plaine du Diamaré située à l'Est jusqu'aux plaines tchadiennes. Tout cet ensemble constitue la couverture sédimentaire. Son épaisseur varie de quelques mètres au niveau des piémonts à plusieurs dizaines de mètres au niveau du Lac Tchad (Tillement, 1970). Il s'agit des

alluvions provenant du Logone, des monts Mandara, d'argile lacustre et des sables anciens. Le socle cristallin précambrien affleure, de façon continue, dans les zones montagneuses de l'Ouest, la pénéplaine du Sud et, de façon sporadique, en inselberg dans la zone centrale.

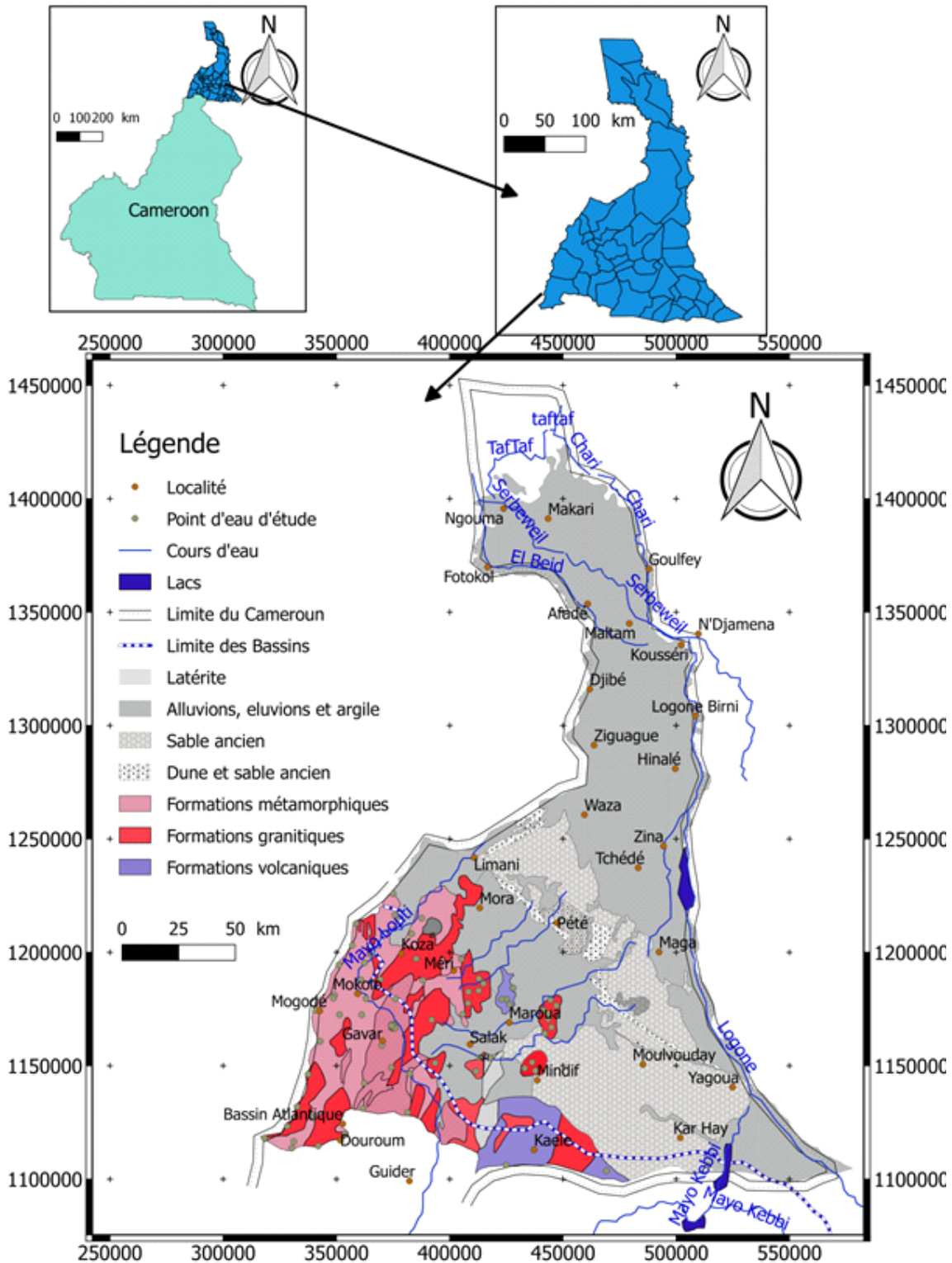


Figure 1 : Situation de la zone d'étude. A) : Situation de l'Extrême Nord dans le Cameroun ; B : Extrême Nord et C) : Géologie de l'Extrême Nord (Dumord et Peronne, 1966)

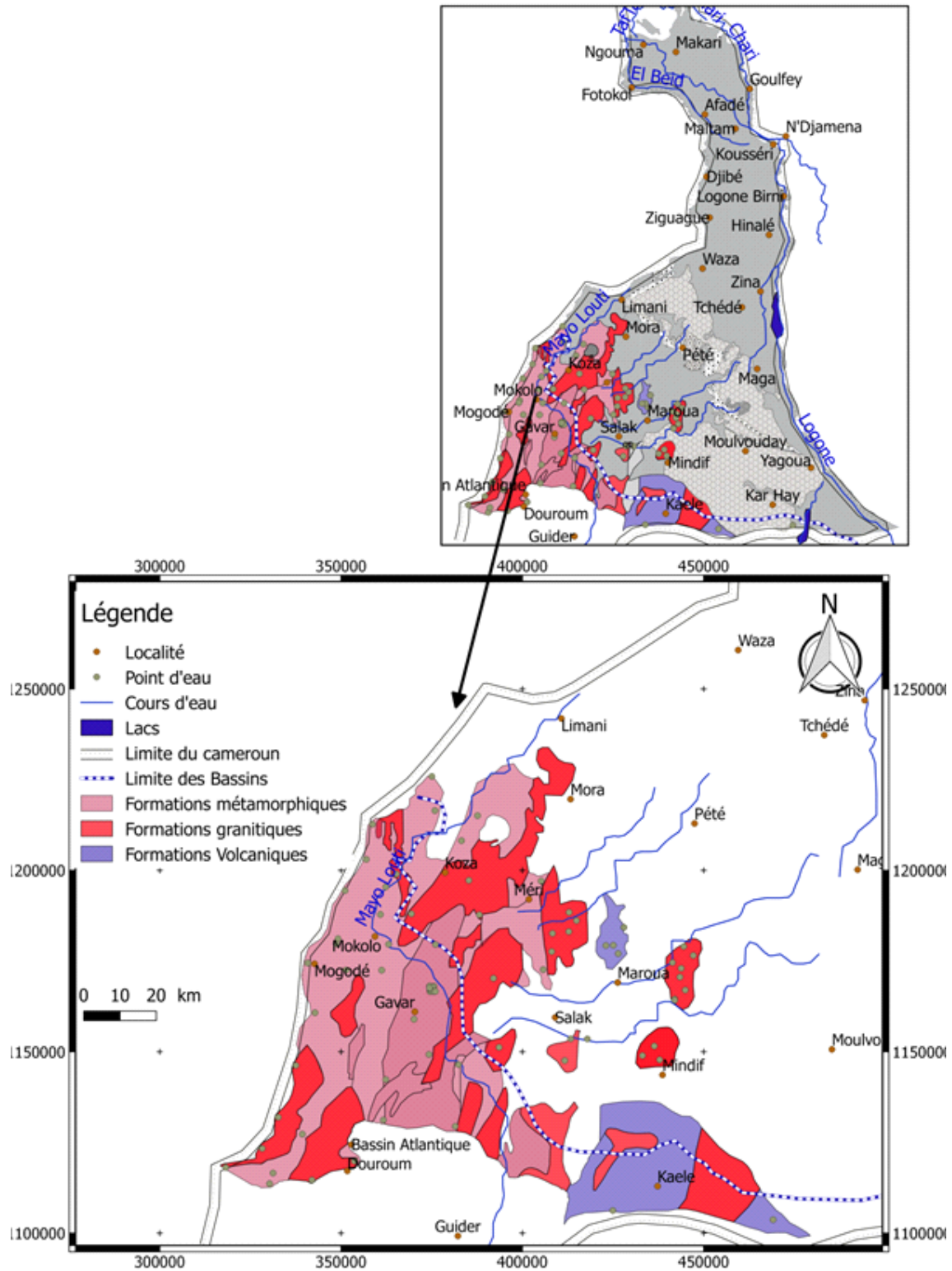


Figure 2 : Carte illustrant la zone du socle de l'Extrême Nord du Cameroun. (Dumord et Peronne, 1966 modifiée)

On distingue dans ce socle (Dumort et Peronne, 1966) :

- un ensemble épi-métamorphique couvrant environ 100% de la surface du socle et formant une bande au nord de Maroua ;
- un ensemble méso-métamorphique migmatite couvrant 50% environ de la surface du socle et formant avec les granites l'ensemble des Monts Mandara ;
- un ensemble méso-métamorphique non migmatite couvrant 10% de la surface du socle affleurant dans la pénéplaine de Kaélé et à Moutourwa.

Dans cette région, on distingue l'hydrogéologie du socle et hydrogéologie de la plaine (Fig.3).

L'hydrogéologie du socle est caractérisée par un socle cristallin précambrien, des formations infracambriennes et primaires illustrant un aquifère discontinu, lié à l'altération et à la fracturation. Sous ces altérites, on passe progressivement au socle par le biais d'un front d'altération qui dépasse rarement 40 mètres d'épaisseur (Tillement, 1970).

Le modèle conceptuel d'aquifère de socle de Lachassagne et Wyns, (2005) peut être admis dans cette zone au vu de conditions environnementales semblables. Ce modèle est constitué d'un recouvrement semi-perméable qui engendre un aquifère d'altérites alimenté par la surface. Cet aquifère surmonte un aquifère de fissures ou de failles, drainant la couverture d'altérite à fonction essentiellement capacitive. Le rôle des altérites saturées est donc primordial. La zone de plaine comprend deux domaines, d'âge quaternaire, subdivisés en plusieurs nappes (Detay, 2000). On peut distinguer : le comblement quaternaire caractérisé par les nappes du Chari-Tchad, du Logone inférieur et du Bec-de-Canard ; la zone de transition se subdivise en nappes de la plaine de Mora, du Nord-Diamaré, et de Kar-Hay.

Matériel et méthodes

Données

La collecte des données s'est effectuée auprès des entreprises de foration (CGC et GEOFOR), des institutions (MINEE, FEICOM, PNDP) et des ONGs. Les fiches de forage obtenues auprès de ces différentes structures n'ont pas toutes les mêmes paramètres requis. Ainsi sur 1200 ouvrages repartis à travers la région, 176 fiches présentent partiellement ou totalement les informations recherchées à savoir : la localité, la nature de l'ouvrage, ses coordonnées géographiques (X, Y), l'altitude, le débit d'exploitation (Q), la profondeur totale (Pt), l'épaisseur d'altérites (EA) et les rapports des essais de pompage. Les pompages d'essai sont exécutés à débit constant avec une phase de descente deux heures et une phase de remontée d'une heure.

Analyse statistique des paramètres de forage

Les données collectées ont fait l'objet de traitement statistique dans le but d'étudier les potentialités hydrogéologiques du socle de cette région. Les résultats de ces analyses devraient renseigner sur la productivité des aquifères et déterminer les formations les plus productives. Ces méthodes statistiques devraient aussi indiquer les profondeurs optimales admissibles pour arrêter la phase de foration au sein de chaque formation.

Estimation des paramètres hydrauliques

L'estimation des paramètres hydrauliques notamment la transmissivité (T) et le débit spécifique (Qs) a été faite à partir de l'interprétation des essais de pompage issus des données des fiches. Dans cette étude, le puits de pompage étant le puits d'observation, et pour cela, il est souvent recommandé d'utiliser les données de la remontée après l'arrêt du pompage. Ces données ont été interprétées d'après la solution analytique de Cooper Jacob qui est recommandée dans ce cas de figure (Lasm, 2000; Dakouré, 2003; Lalbat, 2006; Soro et *al.*, 2010;

Yao et *al.*, 2010; Baka et *al.*, 2011). Le rabattement à la remontée est appelé rabattement résiduel (S_r) et la formule simplifiée est définie de la manière suivante :

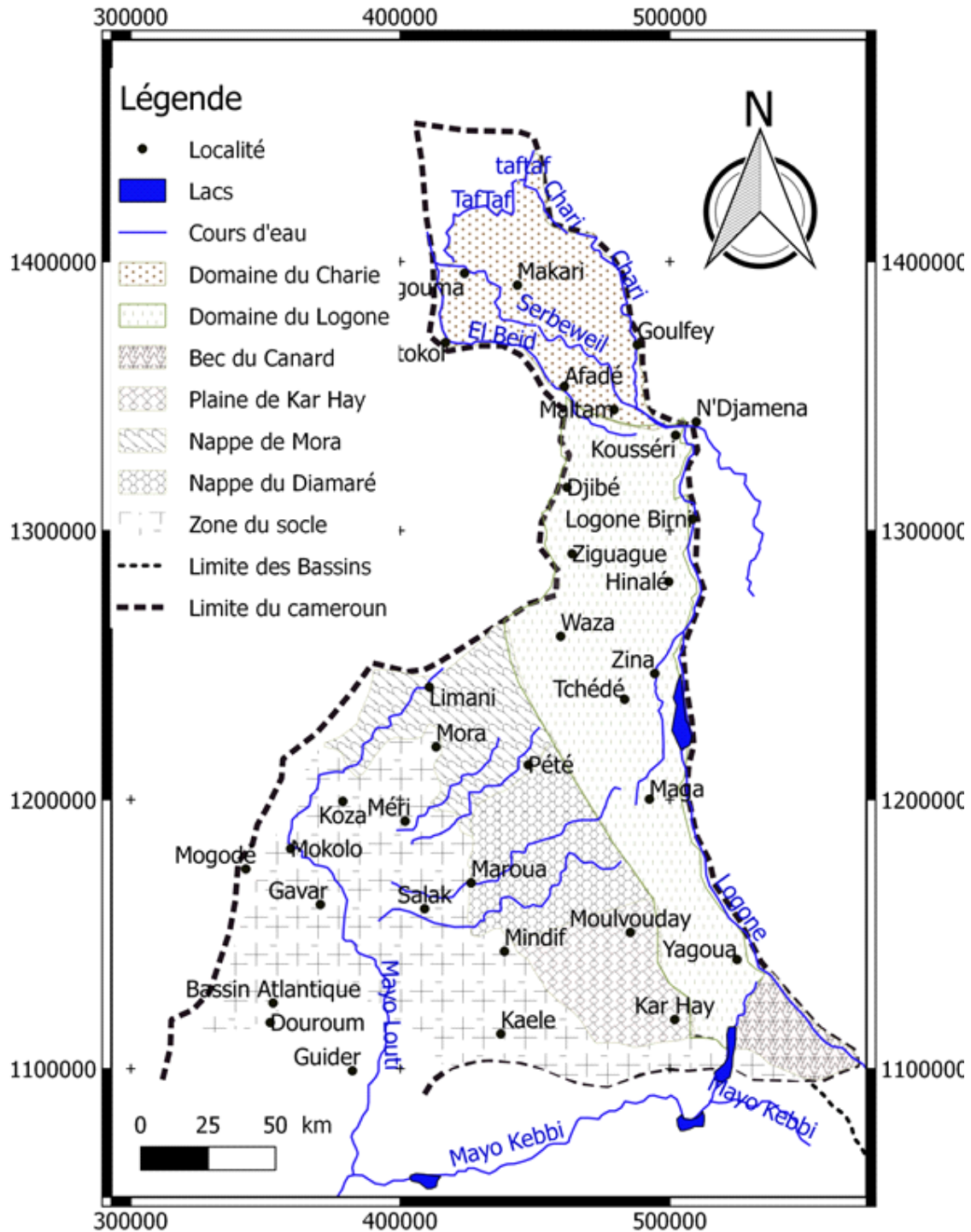


Figure 3 : Hydrogéologie de l'Extrême Nord du Cameroun (d'après Detay, 1987)

$$S_r = \frac{0,183}{T} Q \left(\log \frac{2,25T(t_p - t_r)}{r^2 S} - \log \frac{2,25T t_r}{r^2 S} \right) \quad (1) \quad \text{avec}$$

S_r : Rabattement résiduel ;

t_p : Durée du pompage jusqu'à l'arrêt de la pompe ;

t_r : Temps écoulé depuis l'arrêt du pompage (temps de remontée) ;

S : Coefficient d'emmagasinement ;

T : Transmissivité.

La simplification de cette équation donne l'équation (2) suivante :

$$S_r = \frac{0,183Q}{T} \log \left(1 + \frac{t_p}{t_r} \right) \quad (2)$$

La transmissivité a été déduite par résolution graphique de l'équation 2 suivant la formule :

$$T = \frac{0,183Q}{\Delta S_r} \quad (3) \quad \text{avec}$$

Q : Débit de pompage ;

ΔS_r : Variation du rabattement résiduel.

Les débits spécifiques ont été évalués avec le rabattement en fin de pompage au niveau des forages suivant l'équation (4).

$$Q_s = \frac{Q}{\Delta S_r} \quad (4)$$

Evaluation de la productivité

La productivité des ouvrages de la zone de socle de la région de l'Extrême Nord a été évaluée à partir d'une analyse comparative entre les débits et les paramètres physiques des forages (profondeur totale, épaisseur d'altérites) d'une part et, d'autre part, entre les débits de forages et les transmissivités. La distribution de ces débits et de ces transmissivités a été faite suivant la classification proposée par divers auteurs (Lasm, 2000 ; Dibi et al., 2004 ; Yao et al., 2010) :

Pour les débits :

- de 0 à 1 m³/h : débits très faibles
- de 1 à 2,5 m³/h: débits faibles
- de 2,5 à 5 m³/h: débits moyens
- supérieur à 5 m³/h: débits forts.

Pour la transmissivité :

- classe faible : $T < 10^{-5}$ m²/s ;
- classe moyenne : 10^{-5} m²/s < $T < 10^{-4}$ m²/s ;
- classe forte: $T > 10^{-4}$ m²/s.

RESULTATS

Analyse des paramètres de productivité

Dans la zone du socle de la région de l'Extrême Nord du Cameroun, le débit d'exploitation des forages réalisés varient entre 0,04 m³/h et 4 m³/h avec une moyenne de 1,66 m³/h (Tab 1.). Les résultats de la classification des débits des forages (Fig.4) montrent que la classe de débit fort (supérieur à 5 m³/h) n'existe pas dans la zone. Ces résultats montrent aussi que la classe des débits très faibles (32,2%), celles de débits faibles (42,37%) représentent 74,57% des débits de forage de la zone du socle, illustrant que plus de la moitié des débits enregistrés sont autour de 1m³/h. Ces débits sont situés au seuil inférieur d'acceptabilité pour l'alimentation en eau potable (AEP) des populations en zone rurale. Dans cette zone, 25,42% des forages présente des débits moyens (2,5 < 5 m³/h). Les formations granitiques et métamorphiques (gneiss et

metagranites) représentent respectivement 36,25% et 56,25% des forages réalisés dans la zone du socle de l'extrême nord et semblent être productives, avec respectivement 47,46% des débits se trouvant dans la classe des débits faibles à forts ($Q < 1\text{m}^3/\text{h}$).

Tableau 1: Paramètres physique et hydrauliques dans l'ensemble des formations du socle

	Prof Total (m)	Ep alt (m)	Q/S en m^2/h	T en m^2/s	Qexpl (m^3/h)
Max	71,3	14	3,65	7,80E-04	4
Min	28,4	1	0,02	3,00E-07	0,04
Moyenne	49,19	4,06	0,47	5,03E-05	1,66
Ecart type	10,23	3,05	0,72	1,14E-04	1,13
CV	0,21	0,75	1,53	2,27	0,68

CV : coefficient de variation ; **Prof Total** : profondeur total ; **Ep alt** : épaisseur d'altération ; **Q/S** : débit spécifique ; **T** : transmissivité ; **Qexpl** : débit d'exploitation

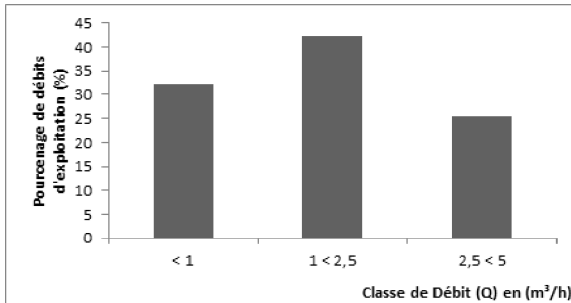


Figure 4 : Classification des débits des forages de la zone de socle de l'Extrême Nord

Productivité des forages en fonction des paramètres physiques

L'analyse de productivité des forages en fonction des paramètres physiques montre que les profondeurs des forages réalisés varient entre 28,4 m et 71,3 m (Tab 1) avec une moyenne de 45,69 m dans les formations métamorphiques (Tab. 2), de 52,47 m dans les formations granitiques (Tab. 3) et 60,12 m dans les formations volcaniques (Tab.4). La profondeur moyenne dans les formations géologiques de ce socle est de 49,19 m, l'écart type est de 10,23 m et le coefficient de variation est de 0,21 (Tab.1). Ceci montre que la série de profondeur dans la zone de socle de la région de l'Extrême Nord est homogène. La répartition des débits de forage en fonction de la profondeur des ouvrages (Fig.5) montre que les principaux débits varient avec les profondeurs comprises entre 30 m et 75 m. Dans cette zone, les épaisseurs d'altérite observées varient entre 1m et 14 m (Tab. 1), avec une moyenne de 4,06 m, un écart type de 3,05 m et un coefficient de variation de 0,75.

Tableau 2: Paramètres physique et hydrauliques dans les formations métamorphiques

	Prof Total (m)	Ep alt (m)	Q/S en m^2/h	T en m^2/s	Qexpl (m^3/h)
Max	53	6	0,54	1,45E-04	4
min	43	1	0,12	2,85E-06	0,04
moyenne	46,5	2,83	0,27	3,71E-05	1,58
écartype	3,39	2,23	0,17	5,37E-05	1,21
CV	0,07	0,79	0,63	1,45	0,77

CV : coefficient de variation ; **Prof Total** : profondeur total ; **Ep alt** : épaisseur d'altération ; **Q/S** : débit spécifique ; **T** : transmissivité ; **Qexpl** : débit d'exploitation

Tableau 3: Paramètres physique et hydrauliques dans les formations granitiques

	Prof Total (m)	Ep alt	Q/S en m^2/h	T en m^2/s	Qexpl (m^3/h)
Max	69	14	2,1	2,68E-04	1,48
min	36	1,5	0,04	2,36E-06	0,75
moyenne	47,33	4,75	0,46	6,06E-05	1,2
écartype	12,64	4,73	0,81	1,04E-04	0,27
CV	0,27	1	1,76	1,71	0,23

CV : coefficient de variation ; **Prof Total** : profondeur total ; **Ep alt** : épaisseur d'altération ; **Q/S** : débit spécifique ; **T** : transmissivité ; **Qexpl** : débit d'exploitation

Tableau 4 : Paramètres physique et hydrauliques dans les formations volcaniques

	Prof Total (m)	Ep alt (m)	Q/S en m ² /h	T en m ² /s	Qexpl (m ³ /h)
Max	70	11	3,65	1,73E-05	3,28
min	37,4	0,88	0,07	1,20E-06	0,13
moyenne	60,12	4,53	0,82	7,48E-06	1,35
écartype	11,66	3,78	1,41	7,77E-06	1,07
CV	0,19	0,83	1,72	1,04	0,79

CV : coefficient de variation ; **Prof Total** : profondeur total ; **Ep alt** : épaisseur d'altération ; **Q/S** : débit spécifique ; **T** : transmissivité ; **Qexpl** : débit d'exploitation

Les épaisseurs les plus importantes se rencontrent dans les formations granitiques avec un maximum de 14 m et une moyenne de 4,31m (Tab.3). Les épaisseurs des altérites les plus fréquents se trouvent dans l'intervalle de 1 à 2 m avec un pourcentage de 38,03%. L'évolution des débits d'exploitation en fonction des épaisseurs d'altération dans chaque type de formation montre que la majorité des débits d'exploitation des forages obtenus sont situés entre 0,75 m³/h et 3,5 m³/h pour les formations métamorphiques (Fig.6a), entre 1 m³/h et 3 m³/h pour les formations granitiques (Fig.6b) et entre 1,75 m³/h et 2,5 m³/h pour les formations volcaniques (Fig.6c). Ces débits varient des classes très faibles à moyennes.

Pour les formations métamorphiques (Fig.6a) un grand nombre de ces débits sont inférieurs à 1 m³/h illustrant qu'ils ne sont pas acceptables pour les projets d'hydraulique villageoise. Par contre, ceux des formations granitiques (Fig.6b) et volcanique (Fig.6c) sont à majorité supérieurs à 1 m³/h et acceptable pour les projets d'hydraulique villageoise. Dans ces formations granitiques et volcaniques, l'épaisseur des altérites sont comprises entre 2 m et 14 m, et entre 4 m et 12 m respectivement (Tab.3 et Tab.4).

Productivité des forages en fonction des paramètres hydrodynamiques

L'analyse de la productivité des forages en fonction des paramètres hydrodynamiques montre que les débits spécifiques dans cette zone de socle varient de 0,02 à 3,65 m²/h, la moyenne est de 0,47 m²/h, l'écart type de 0,72 m²/h et le

coefficient de variation de 1,53 m²/h (Tab.1). La plus grande valeur (3,65 m²/h) se rencontre dans les formations volcaniques (Tab.4) et la plus petite (0,02 m²/h) dans les formations métamorphiques (Tab.2). Ces résultats illustrent aussi que les débits spécifiques sont hétérogènes dans la zone du socle

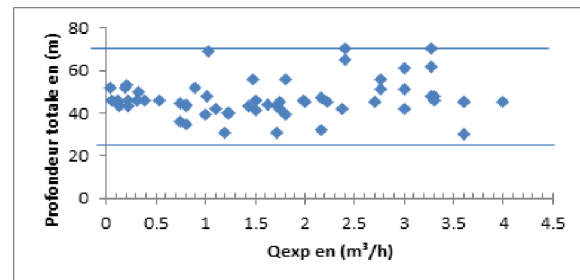
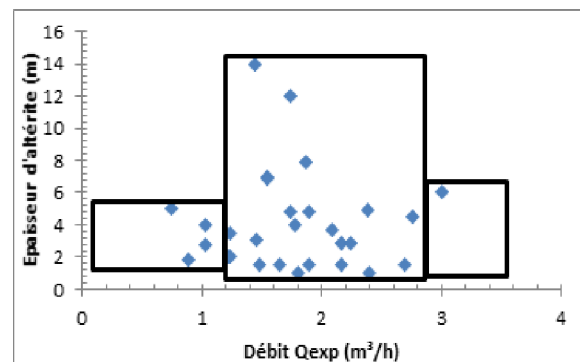
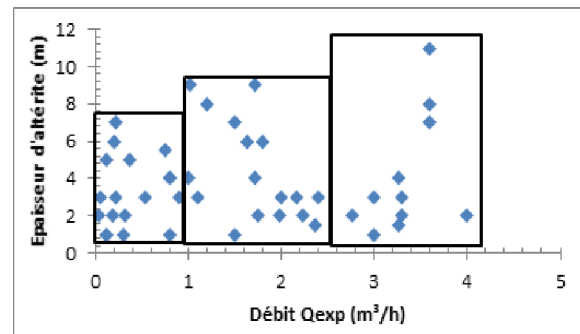


Figure 5 : Répartition des débits de forage en fonction de la profondeur totale des ouvrages



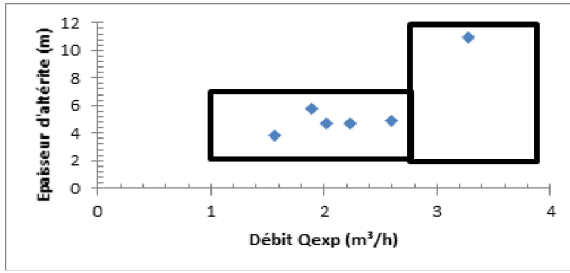


Figure 6: Variation des débits en fonction des épaisseurs d'altérites dans les formations : a) Métamorphiques ; b) Granitiques ; c) Volcaniques

Dans cette zone de socle, les valeurs de transmissivité varient entre $3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ et $7,80 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ avec une moyenne de $5,03 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. L'écart type est de $1,14 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et le coefficient de variation est de 2,27 (Tab.1). Ces résultats montrent que les transmissivités sont hétérogènes dans cette zone de socle. Les différentes classes de transmissivité faible, moyenne et forte regroupent respectivement 47,14%, 42,86% et 10% des points d'eau. 90% des forages dans cette zone ont des transmissivités faible à moyenne. Ceci illustre que les aquifères de socle de la région de l'Extrême Nord ont, en général, une faible fonction conductrice. Néanmoins, cette transmissivité de la zone de socle varie en fonction de la nature pétrographique des roches. Les transmissivités faibles sont majoritaires dans les formations volcaniques (100%) et des formations granitiques (62,96%). Par contre, Elles sont bonnes majoritairement dans la classe de moyennes à fortes au niveau des formations métamorphiques (63,41%) (Tab.5).

Tableau 5: Classe de transmissivité des différentes formations de socle de l'Extrême Nord du Cameroun

	<10-5		10-5_10-4		>10-4	
	Nbre de forages	%	Nbre de forage	%	Nbre de forage	%
Métamorphique	15	36,59	19	46,34	7	17,07
Granite	17	62,96	8	29,63	2	7,41
Volcanique	6	100	0	0	0	0

L'étude de la relation entre la transmissivité et le débit de forage dans les formations métamorphiques montre que l'équation de la courbe est de type polynomial d'ordre 4 (Fig.7) avec une corrélation peu significative ($r = 0,30$). Cette relation est exprimée par l'équation :

$$\text{Log (T)} = -0,1233\text{Q}^4 + 1,0691\text{Q}^3 - 3,0179\text{Q}^2 + 2,9562\text{Q} - 5,253 \quad (5)$$

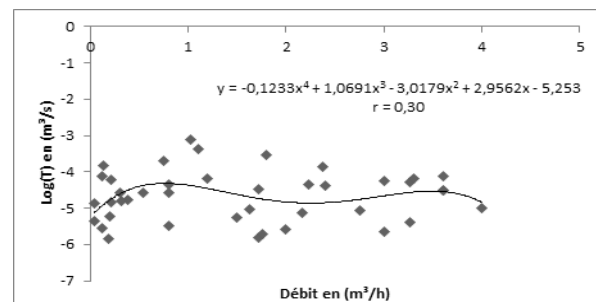
L'examen de la relation entre la transmissivité et le débit de forage dans les formations granitiques illustre aussi une courbe de type polynomial d'ordre 2 (Fig.8) avec une très faible corrélation ($r = 0,18$). Cette relation est exprimée par l'équation :

$$\text{Log (T)} = 0,1248\text{Q}^2 - 0,5883\text{Q} - 4,6013 \quad (6)$$

Le nombre de point forages obtenus étant faible dans les formations volcaniques, une relation entre la transmissivité et le débit de forage n'a pas été établie.

Discussion

Les forages étudiés dépassent rarement la profondeur de 75 m, avec une profondeur moyenne générale de 49,19 m. Les profondeurs moyennes des forages réalisés sont de 47,33 m dans les formations granitiques, 46,5 m dans les formations métamorphiques et 60,12 m dans les formations volcaniques. Les profondeurs maximales sont de 71,3 m dans les formations granitiques, 53 m dans les formations métamorphiques et 70 m dans les formations volcaniques.



dans les formations métamorphiques de l'Extrême Nord Cameroun

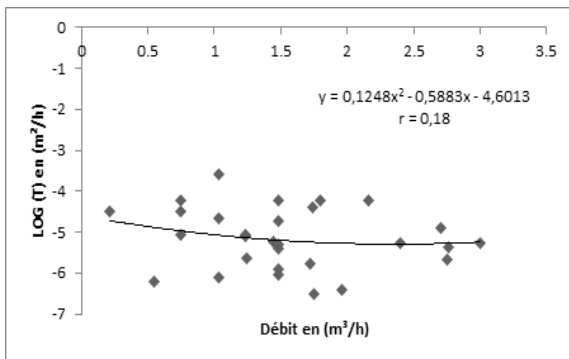


Figure 8: Relation entre la transmissivité et le débit de forages dans les formations granitiques de l'Extrême Nord Cameroun

Ces valeurs sont légèrement supérieures à celles proposées par Detay, (1987) dans la zone mixte de la région de l'Extrême Nord où il trouve les valeurs de, 43,40 m pour les formations métamorphiques, 42,50 m pour les formations granitiques et 44,20 m pour les formations volcaniques. Cet auteur propose une profondeur de foration de 60 m dans cette zone. Sachant que les fractures hydrauliques actives se referment avec la profondeur (Biémi, 1992), les profondeurs de foration à ne pas excéder dans le socle de la région de l'Extrême Nord pour des raisons économiques est de 70 m pour les formations granitiques, 55 m pour les formations métamorphiques et 75 m pour les formations volcaniques.

Les altérites présentent un profil dont la composition dépend de la nature de la roche mère, du stade d'évolution de l'altération (Lasm, 2000 ; Bon et al., 2016) et des caractéristiques climatiques (Maréchal et al., 2004). Les couches d'altérites reçoivent des précipitations nettes qui s'accumulent par infiltration efficace. Pour une épaisseur d'altération importante, la probabilité d'obtenir un débit appréciable est élevé (Kouassi et al., 2012). Cette observation semble être valable dans la zone de socle de la région de l'Extrême Nord, où la moyenne des épaisseurs d'altération est de 4,06 m expliquant la faible productivité des aquifères. Cette conclusion

dépend aussi de la nature de la roche sous-jacente. Les débits de forages étudiés varient entre 0,04 m³/h et 4 m³/h illustrant que la classe de débit fort n'existent pas dans cette zone de socle. Contrairement à la zone mixte où l'on rencontre le débit maximale de 2,5 à 4 m³/h (Deltay, 1987).

Les différentes valeurs de transmissivité obtenues dans la zone de socle de la région de l'Extrême Nord varient entre 3,0x10⁻⁷ m²/s et 7,8x10⁻⁴ m²/s avec une moyenne de 5,03x10⁻⁵ m²/s, un écart type de 1,14x10⁻⁴ m²/s et un coefficient de variation de 2,27. Ces transmissivités sont hétérogènes et de faible valeurs. Les plus importantes se rencontrent dans les formations granitiques et métamorphiques. Cette importance peut s'expliquer par la présence de réseaux de fracturations communicatives (Kaouassi et al., 2012). En effet, la diversité de direction de linéament leur confèrent l'avantage d'être plus transmissifs et à cela, il faut ajouter la présence de filons et joints secs (Niamké et al., 2008). Ces valeurs de transmissivité se rapproche de celles obtenues dans la région de Yaoundé par Ewodo Mboudou et al, (2012) et Bon et al, (2016) et en Côte d'Ivoire par Soro (1987), Ahoussi (2008), Kouassi et al., (2012b). Cette analyse montre que l'hétérogénéité spatiale de la transmissivité est due aux variations quantitatives et qualitatives de la fracturation (Bahir et al., 2008) et non à l'hétérogénéité de faciès lithologiques rencontrés de la zone du socle de la région. La transmissivité est faiblement corrélée avec les débits de forage dans la zone de socle de cette région.

Conclusion

Dans la zone de socle de la région de l'Extrême Nord, les débits des forages réalisés oscillent entre 0,04 m³/h et 4 m³/h avec une moyenne de 1,66 m³/h. La classe des débits forts (supérieur à 5 m³/h) n'existe pas dans cette zone. Les classes de débits très faible et faible représentent 74,57% des débits de forage de la zone de socle. Ces débits

sont au seuil inférieur d'acceptabilité pour l'alimentation en eau potable des populations rurales. Les forages productifs ont une profondeur totale comprise entre 30 et 120 m avec une épaisseur d'altérites qui varie entre 1 m et 14 m. Les formations granitiques et métamorphiques représentent respectivement 36,25% et 56,25% des forages réalisés dans la zone du socle de l'Extrême Nord et semblent être productives, avec respectivement 47,46% des débits se trouvant dans la classe des débits faibles à forts ($Q < 1\text{m}^3/\text{h}$). Les valeurs de transmissivité fluctuent entre $3 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ et $7,80 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ avec une moyenne de $5,03 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$. Ces transmissivités sont hétérogènes dans ce socle et se rencontrent dans la classe de faible à moyenne. Elles illustrent que les aquifères de socle de la région de l'Extrême Nord du Cameroun ont une faible fonction conductrice.

Remerciement

Les auteurs expriment leurs gratitudeux aux reviewers qui ont rehaussés grâce à leurs critiques de cet article.

Références bibliographiques

Ahoussi K.E. (2008). Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le Sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 270p.

Bahir M., Carreira P., Oliveira Da Silva M., Fernandes P. (2008). Caractérisation hydrodynamique, hydrochimique et isotopique du système aquifère de Kourimat (Bassin d'Essaouira, Maroc). *Estudios Geológicos*, Vol. 64 (1), pp. 61-73.

Baka D., Lasm T., Oga M.S., Youanta M., De Lasmé O., Kouakou O. S. et Ettien B.F. (2011). Characterization of transmissivity in the fractured reservoirs in the Oumé area (Center of Côte d'Ivoire). *American journal of scientific and industrial research*, Vol. 2 (2), pp. 310-322.

Biemi J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopique des aquifères discontinus de sillons et des aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 480p.

Bon A.F., Ndam Ngoupayou J.R., Ewodo Mboudou G., Ekodeck G. E., (2016). Caractérisation hydrogéologique des aquifères de Socle altéré et fissuré du bassin versant de l'olézoa à Yaoundé, Cameroun

Courtois N., P. Lachassagne, R. Wyns, R. Blanchin, F. Bougaire, S. Some et A. Tapsoba (2009). Large-scale mapping of hard-rock aquifer properties applied to Burkina Faso. *Ground Water*, 48, 269-283.

Dakoure D. (2003). Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudéni (Burkina Faso - Mali) – essai de modélisation. Thèse de Doctorat, Université Paris VI, France, 255p.

Detay M., (1987). Identification analytique et probabiliste des paramètres numériques et non numériques et modélisation de la connaissance en hydrogéologie sub-sahélienne – Application au Nord-Cameroun. Univ. de Nice, Thèse de doct. ès-sciences, 456 p.,

Detay M. (2000). Hydrogéologie : Atlas de la province Extrême-Nord Cameroun, Minrest, INC, IRD, Paris, pp 30-37

Dewandel B., P. Lachassagne, R. Wyns, J.C. Marechal et N.S. Krishnamurthy (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Hydrology J.*, 330, 260-284.

Dibi B., Inza D., Goula B.T., Savané I., Biémi J. (2004). Analyse statistique des paramètres influençant la productivité des forages d'eau en milieu cristallin et

cristallophyllien dans la région d'Aboisso (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *Sud Sciences & Technologies* N°13, (Dec. 2004), n°13, pp 25-27.

Djeuda Tchapgna H. B., Tanawa E., Ngnikam E., (2001). *L'eau au Cameroun ; Approvisionnement en eau: (Tome I)*. Édité. PUY, 359 p.

Dumort J-C et Péronne Y., (1966). Notice explicative sur la feuille de Maroua. 67p

Ewodo Mboudou G., Ombolo A., Fouépé Takounjou A., Bon A. F., Ekodeck G. E. (2012b). Etude des Paramètres hydrauliques des aquifères de sub-surface du bassin versant de la Mingosso, région de Yaoundé", *Rév. CAMES-Série A*, Vol.13, pp 123-127

Gandolfi J.M., Wyns R. et Damy P.C. (2010). Diagnostic des potentialités aquifères des formations de socle en région Mid-Pyrénées. Rapport BRGM/RP-58808-FR. 141p.

Kouassi A.M., Ahoussi K.E., Yao K.A., Ourega W.E.J.A, Yao K.S.B., Biemi J.(2012b). Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (centre-est de la côte d'ivoire). *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680. pp. 57-74

Lachassagne P., Wyns R. et Dewandel B. (2011). The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 10, 1365-3121

Lachassagne P. et Wyns R. (2005). Aquifères de socle : nouveaux concepts. Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau. *Géosciences*, 2, 32-37.

Lalbat F. (2006). Fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère du Miocène du bassin de Carpentras (Vaucluse, France). Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, France, 234p.

Lasm T. (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: Analyses statistiques et géostatistiques de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes

de Côte d'Ivoire (domaine Archéen). Thèse de Doctorat de l'université de Poitiers, France, 272 p.

Maréchal, J.-C.; Dewandel, B. & Subrahmanyam, K. (2004). Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered fractured layer of a hard rock aquifer. *Water Resources Research*, 40: W1150801-W1150817.

Niamké K.H., Saley M.B., N'Dri B.E., Ouattara A., Biemi J. (2008). Contribution à l'interprétation des linéaments par l'exploitation des Pseudo Images, de l'hydrographie en région tropicale humide: Cas du N'zi-Comoé (Centre de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, Vol. 24 (1), pp.74-93

Olivry J C, (1986). Fleuves et rivières du Cameroun, collection monographique, hydrologique, MESRES – ORSTOM. 733 p.

Soro G. Soro N. Ahoussi K. E. Lasm T. Kouame F. K.; Soro T. D. et Biemi J. (2010). Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères fracturés des formations cristalline et métamorphique dans la région des Lacs (centre de la Côte d'Ivoire). *Estudios Geologicos [online]*, Vol. 66, N°2.

Soro N. (1987). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Thèse de 3^e cycle Univ. Scient. Technol. et Médicale de Grenoble, France, 243p.

Suchel J. B., (1988). Les climats du Cameroun. *Thèse Univ. Saint-Étienne*, 1188 p.

Tillement B. (1970) : Hydrogéologie du Nord-Cameroun. *Bull. Dir. Mines et Géol., Cameroun*.

Yao K.A., Kouassi A.M., Koffi Y.B., Biemi J. (2010). Caractérisation hydrodynamique et hydrogéochimique des aquifères fissurés de la région de Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire). *Journal of Environmental Hydrology*, Vol. 18 (26), décembre 2010, <http://hydroweb.com>.

Received: 24/03/2017

Accepted: 23/10/2017