

Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des aquifères de socle fissuré du complexe gneisso-migmatitique de la zone interne des Dahoméides : cas de la préfecture de Haho, Sud-Est du Togo

**Komlavi Eyam AGBOTSOU^{1*}, Mozimwè ANI^{1,2}, Kokou Aimé DJONGON^{3,4},
Koffi SOSSOU⁵ et Kissao GNANDI¹**

¹ *Université de Lomé, Faculté des Sciences, Département de Géologie, Laboratoire de Géologie,
01 BP 1515 Lomé, Togo*

² *Université de Reims Champagne-Ardenne, Laboratoire GEGENAA- EA 3795, 2 Esplanade Roland Garros,
51100 Reims, France*

³ *Université du Québec à Montréal, Laboratoire GEOTOP, 201, av. du Président-Kennedy,
QC H2X3Y7 Montréal, Canada*

⁴ *Université Paris-Saclay, Faculté des Sciences d'Orsay, Laboratoire Géosciences Paris-Sud (GEOPS),
UMR CNRS 8148, Bât. 504, F-91405 Orsay, France*

⁵ *Andhra University, Department of Environmental Engineering, Geo Lab, Pin 530003, Visakhapatnam, India*

(Reçu le 14 Juin 2023 ; Accepté le 08 Août 2023)

* Correspondance, courriel : jagbotsou@gmail.com

Résumé

Dans la préfecture de Haho au Sud-Est du Togo, l'approvisionnement en eau potable des populations rurales est assuré en majorité par les eaux souterraines contenues dans les aquifères fissurés. L'objectif de cette étude est d'évaluer des propriétés hydrodynamiques de ces aquifères afin d'entreprendre des études pour une gestion efficace de cette ressource. Elle est basée sur l'utilisation d'une base de données référencant 167 forages captant les eaux des aquifères de socle fissuré dont 27 forages renseignent sur le débit de pompage (Q), le rabattement résiduel (s), le temps de pompage (t). Deux méthodes ont été appliquées pour l'estimation de la transmissivité. Il s'agit des méthodes de l'Ecopage et de Logans. Les résultats obtenus montrent que les transmissivités varient entre $5,96.10^{-7}$ et $6,53.10^{-4}$ m²/s. Elles sont hétérogènes, avec de faibles valeurs, ce qui traduit la faible fonction conductrice de l'aquifère. Ces résultats contribuent à une meilleure connaissance des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères fissurés de la préfecture de Haho.

Mots-clés : *transmissivité, méthode de l'Ecopage, méthode de Logans, ressource en eau, Togo.*

Abstract

Hydrodynamic properties characterization of fissured basement aquifers of the gneisso-migmatitic complex of the internal zone of Dahomeyides : case of the Haho prefecture, Southeast of Togo

In the Haho prefecture in southeastern Togo, the majority of the rural population's drinking water supply is provided by groundwater contained in fissured aquifers. The aim of this study is to evaluate the hydrodynamic

properties of these aquifers in order to undertake studies for the efficient management of this resource. It is based on the use of a database referencing 167 boreholes drawing water from fissured basement aquifers, 27 of which provide information on pumping rate (Q), residual drawdown (s) and pumping time (t). Two methods were used to estimate transmissivity. These were the Ecopage and Logans methods. The results obtained show that transmissivities vary between $5.96.10^{-7}$ and $6.53.10^{-4}$ m²/s. They are heterogeneous, with low values, reflecting the weak conductive function of the aquifer. These results contribute to a better understanding of the hydrodynamic characteristics of fissured aquifers in Haho prefecture.

Keywords : *transmissivity, Ecopage method, Logans method, water resource, Togo.*

1. Introduction

Les principales ressources en eau douces sont les eaux de surface et les eaux souterraines. Au regard des risques de contamination, l'eau souterraine a pris l'avantage sur l'eau de surface en devenant la source privilégiée d'alimentation en eau potable. Ceci, en raison de sa moindre vulnérabilité à la pollution et de son faible coût de traitement [1]. Elle constitue le principal mode d'approvisionnement en eau potable des populations d'Afrique subsaharienne [2]. En zone de socle, elle s'emmagasine souvent dans les altérites et/ou circule le long d'importantes fracturations qui affectent la roche-mère [3]. Au Togo, environ 94 % du territoire est occupé par des roches de socle (magmatiques, métamorphiques ou sédimentaires consolidées) à perméabilité matricielle très faible [4]. Pour améliorer l'accès à l'eau potable et augmenter le taux de desserte, l'Etat a entrepris, depuis le début des années 1970, des projets d'hydraulique villageoise, qui, se sont bien accentués cette dernière décennie pour doter des localités de forages équipés de pompe à motricité humaine (PMH) et ainsi atteindre les objectifs du millénaire pour le développement (OMD) [5]. Malgré ces efforts consentis, il n'en demeure pas moins que les problèmes d'approvisionnement en eau potable de certaines localités notamment celles de la préfecture de Haho restent encore tristement d'actualité. En effet, le taux de desserte en 2015 par rapport aux forages fonctionnels et aux bornes fontaines fonctionnelles dans la préfecture est 23,58 % avec une demande plus forte que l'offre [6]. Or, plus de 50% des forages réalisés sont négatifs et donc abandonnés pour diverses raisons [6] : (i) les pannes mécaniques, (ii) les erreurs d'implantation des forages, (iii) le tarissement ou les faibles débits délivrés pendant l'exploitation occasionnant de nombreuses heures et files d'attente et (iv) parfois la mauvaise qualité de l'eau conduisant à la fermeture de certains ouvrages. Toutes ces observations suscitent tant d'intérêts sur le plan de la recherche hydrogéologique. En effet, les caractéristiques hydrogéologiques et hydrodynamiques de ces aquifères sont méconnues. Ceci explique l'intérêt de cette étude entreprise dans le but de comprendre le fonctionnement hydrodynamique des aquifères fissurés du Sud-Togo. L'objectif de cette étude est d'évaluer les propriétés hydrodynamiques des aquifères fissurés du complexe gneisso-migmatitique de la préfecture de Haho.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation de la zone d'étude

2-1-1. Physiographie

La préfecture de Haho est l'une des douze préfectures de la région des Plateaux au Togo. Elle est comprise entre $6^{\circ}40'$ et $7^{\circ}20'$ de latitude nord et entre $0^{\circ}50'$ et $1^{\circ}50'$ de longitude est (*Figure 1a*) avec une superficie de 3641 km². Sa population est de 305 096 habitants en 2022 [7]. Elle est marquée par un relief assez contrasté avec des altitudes croissant du nord-est au sud-ouest. La végétation est caractérisée par une savane

arborée des galeries forestières et des forêts classées. Le climat est de type tropical humide à régime bimodal. La pluviométrie atteint 1011mm par an tandis que les températures moyennes mensuelles varient entre 23°C et 27°C. Les principaux cours d'eau sont : le Mono à l'est et ses affluents, le Haho au sud-ouest avec ses affluents, le Yoto, Chra, etc.

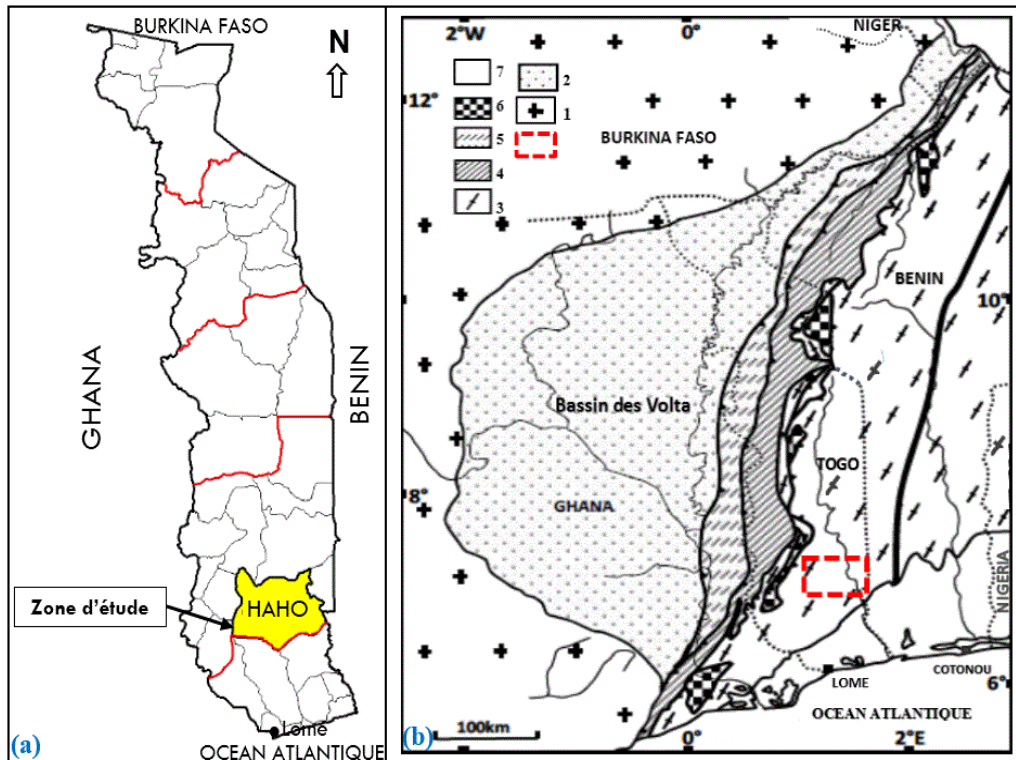


Figure 1 : Carte de localisation et géologie régionale incluant la zone d'étude : (a) situation géographique de la préfecture de Haho ; (b) principaux domaines structuraux du Togo ([8], modifiée). 1- Socle Birimien ; 2- Bassin des Volta ; 3- Unité Bénino-Togolaise ; 4- Unité structurale de l'Atacora ; 5- Unité structurale du Buem ; 6- Complexes basiques-ultrabasiques ; 7- Bassin sédimentaire côtier

2-1-2. Contexte géologique et hydrogéologique

L'ensemble lithologique de la préfecture de Haho, appartient aux unités internes de la chaîne des Dahoméyides (**Figure 1b**). Connue comme une chaîne collisionnelle, la chaîne des Dahoméyides est subdivisée en trois zones réparties d'Ouest en Est : la zone externe, la zone de suture, et la zone interne [9]. La zone externe correspond aux unités structurales du Buem et de l'Atacora représentant les unités métasédimentaires du Bassin des Volta, les unités orthogneissiques de Kara-Niamtougou et les granitoïdes du pluton Kpalimé-Amlamé [9]. La zone de suture est matérialisée par un alignement de massifs basiques à ultrabasiques et à faciès essentiellement granulite ou parfois élogite (Dérouvarou au Bénin ; Kabyè-Kpaza, Djabatouré-Anié, Agou-Ahito au Togo et Shaï ou Akuse au Ghana) [10]. La zone interne correspond à la partie méridionale du métacraton transsaharien [11] sur lequel s'établit la pénéplaine bénino-nigériane. Elle est constituée d'unités gneisso-migmatitiques, métasédimentaires et des granitoïdes panafricains [9]. Sur le plan lithologique, la préfecture de Haho (**Figure 2**) est recouverte par un ensemble complexe réunissant les unités gneisso-migmatitiques, métasédimentaires et quelques intrusions de granitoïdes tardi-panafricains [12]. L'unité gneisso-migmatitique est essentiellement représentée dans la zone d'étude par des affleurements de gneiss à amphibole dans le lit de la rivière Chra, de migmatites à Kpédomé ou à Wahala et de véritables anatexites à Rodokpé [13]. Les métasédiments sont représentés par les affleurements de paragneiss à l'est

du mont Egbéto [14] et de quartzites micacés à disthène à Amakpavé [13]. Les intrusions granitiques s'individualisent comme des roches intrusives affleurant en de petits massifs ou souvent chaotiques. Elles sont représentées par les granodiorites et les granites tardi-panafricains de Sihimé [12]. Ces roches essentiellement mises en place lors de l'orogénèse panafricaine (600 ± 50 Ma) ont été altérées et affectées par plusieurs familles d'accidents géologiques majeurs de direction préférentiellement NE-SW [8, 15], susceptibles de faciliter la circulation d'eau dans les roches encaissantes.

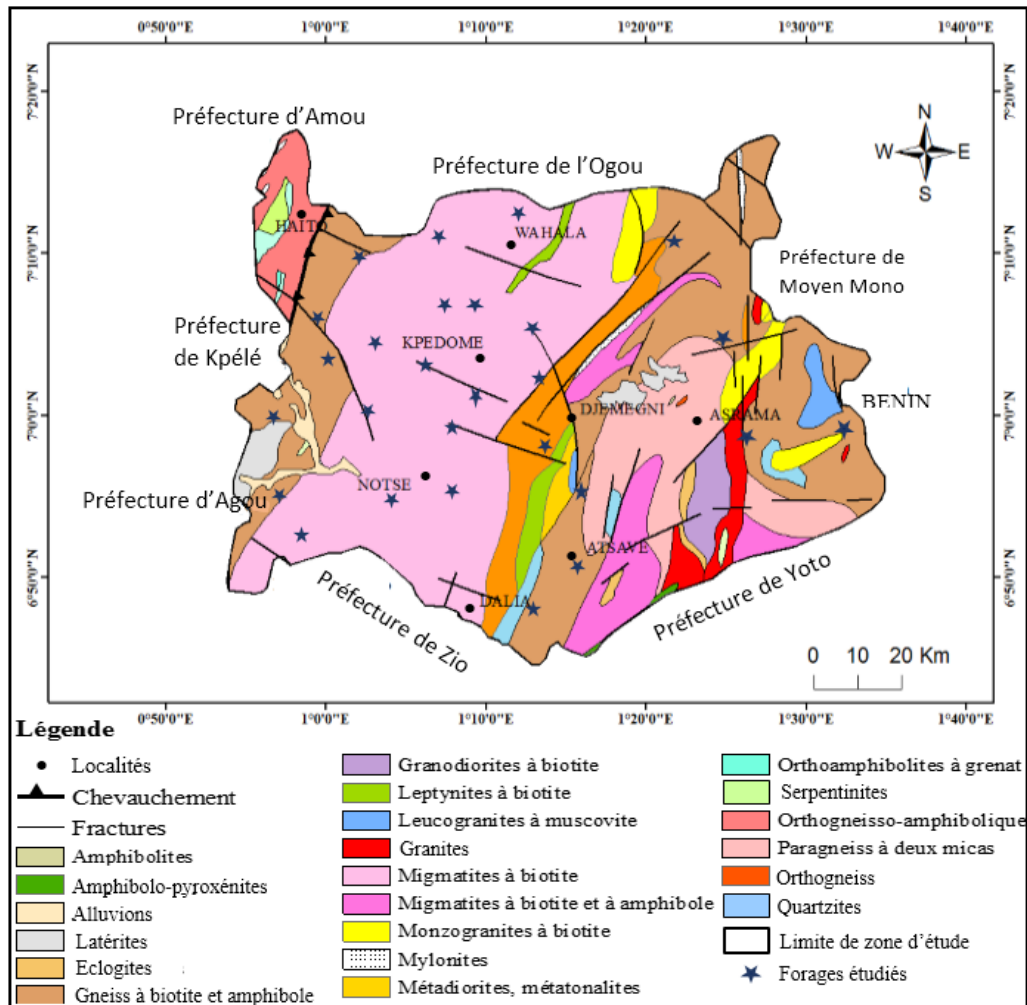


Figure 2 : Carte géologique de la zone d'étude extraite de [14]

Du point de vue hydrogéologique, l'exploitation des eaux souterraines dans ces roches de socle se fait au moyen des puits traditionnels captant l'aquifère d'altérites plus superficiel (*Figure 3a*) et des forages profonds de plusieurs dizaines de mètres captant l'aquifère fissuré sous-jacent (*Figure 3b*). En outre, on note la présence de quelques retenues d'eau artificielles mises en place après l'exploitation des carrières (*Figure 3c*).

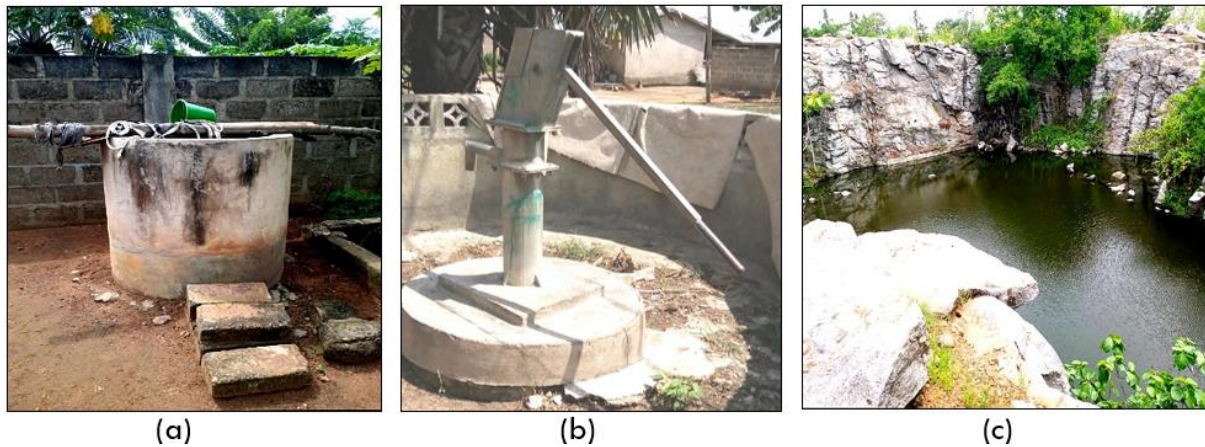


Figure 3 : *Les différents ouvrages hydrauliques de la zone. (a) Puits traditionnel captant l'aquifère d'altérites à Asrama ; (b) Forage captant l'aquifère fissuré de migmatite à Notsé et (c) Retenue d'eau souterraine dans les anatexites à Rodokpé*

2-2. Données

Cette étude a été réalisée à l'aide des données de forages obtenues par le biais des documents techniques de forage des programmes d'hydraulique villageoise réalisés dans la préfecture de Haho de 2008 à 2015. Ces documents, comprenant des fiches techniques de forage et des données d'essais de pompages, ont été fournis par la direction d'hydraulique villageoise d'Atakpamé. 167 fiches techniques renseignant sur les paramètres physiques notamment la profondeur totale du forage (Pt) en m, le débit d'exploitation en m³/h, l'épaisseur de l'altération (EA) en m, l'épaisseur de l'horizon fissuré foré (EF) en m, ont servi de base de données pour l'analyse de la productivité. 27 fiches techniques renseignant sur les données hydrodynamiques exigées par les différentes méthodes de détermination de la transmissivité des aquifères ont été retenues pour l'estimation des paramètres hydrodynamiques. Il s'agit du débit de pompage (Q) en m³/h du troisième palier, du niveau statique (NS) en m, du rabattement (s) en m induit par le pompage dans le temps, du rabattement résiduel (s') en m, du temps de pompage (t) en s.

2-3. Méthodes d'évaluation des données hydrauliques

2-3-1. Analyse de la productivité des ouvrages

En hydraulique, certains paramètres tels que la profondeur totale, l'épaisseur de l'altération et les débits de forage, renseignent sur l'aptitude des aquifères à former de bons réservoirs d'eaux souterraines [16]. Ainsi, une analyse comparative des débits de forages en relation avec les paramètres physiques des forages (profondeur totale, épaisseur d'altérites) a été effectuée afin d'apprécier les variables influençant la productivité des ouvrages de la zone d'étude.

2-3-2. Détermination de débit spécifique

Le débit spécifique est le paramètre traduisant la productivité intrinsèque d'un aquifère. Il est noté Qsp (m²/h) et se calcule à l'aide de la **Formule** mathématique suivante :

$$Q_{sp} = \frac{Q}{s} \quad (1)$$

Q étant le débit de pompage (m³/h) et s le rabattement induit par le pompage (m).

Les débits spécifiques ont été évalués à la fin du troisième palier après pompage au niveau des forages. Ainsi, pour mieux apprécier la distribution des débits de forage, le Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH) a proposé la classification suivante [17] :

Tableau 1 : Classification des débits spécifiques (Q_{sp})

Classes Q_{sp}	Classe faible	Classe moyenne	Classe forte
Valeurs	$Q_{sp} < 0,1 \text{ m}^2/\text{h}$	$0,1 \leq Q_{sp} < 1 \text{ m}^2/\text{h}$	$Q_{sp} \geq 1 \text{ m}^2/\text{h}$

2-3-3. Détermination de la transmissivité

L'estimation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère se fait au moyen des tests de pompage de longue durée à l'aide de diverses méthodes (méthode de Cooper-Jacob, méthode de Thiem, la méthode de Gringarten, la méthode de Gringarten-Ramey, la méthode de Thiery, etc.) qui dérivent de la méthode de Théis [18]. En effet, les résultats issus de ces méthodes précitées sont confrontés aux problèmes de leurs fiabilités en raison de nombreuses hypothèses qui ne sont pas toujours vérifiées [19]. L'utilisation d'autres méthodes dont les bases mathématiques diffèrent de celles dérivant de la méthode de Théis peut permettre d'aboutir à des résultats similaires voire meilleurs et donc d'évaluer les propriétés hydrodynamiques des aquifères de socle [19]. Cependant, en tenant compte de la revue de la littérature de quelques travaux de recherche effectués au Togo, sur le socle Birimien [21] et en Côte d'Ivoire notamment ceux de la région du N'zi-Comoé [19], de la région du Béliér [20] et de quelques localités du Nord [22], il était possible de calculer ces paramètres à l'aide des pompages de courte durée à condition d'atteindre un palier au cours de chaque cycle. Le nombre de paliers minimum nécessaire pour obtenir des résultats satisfaisants est de trois (3). En l'absence de pompage de longue durée, les pompages de courtes durées sont utilisés pour l'évaluation des propriétés hydrodynamiques [19 - 22]. En effet, les résultats issus de leurs utilisations ne diffèrent pas significativement de ceux des pompages classiques. Dans le cadre cette étude, en l'absence de pompage de longue durée, alors qu'on souhaite déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, ce sont les essais par paliers qui ont été utilisés. Ainsi, les méthodes utilisées pour l'estimation de la transmissivité sont la méthode de l'Ecopage et la méthode de Logans.

▪ Méthode de l'Ecopage

La transmissivité par la méthode de l'Ecopage (T_1) est déterminée à partir de l'expression mathématique suivante [23] :

$$T_1 = \frac{V}{4\pi s r t} \quad (2)$$

V étant le volume d'eau pompé (produit du débit de pompage par le temps) en m^3 , s le rabattement résiduel en m, t le temps écoulé depuis l'extraction du volume d'eau pompé en s et T_1 la transmissivité en m^2/s .

▪ Méthode de Logans

La transmissivité par la méthode de Logans (T_2) est calculée au moyen de la **Formule** mathématique suivante [24] :

$$T_2 = 1,25 \times Q_{sp} \quad (3)$$

Q_{sp} étant le débit spécifique en m^2/s et T_2 la transmissivité en m^2/s .

Les valeurs de transmissivité (T) sont réparties en trois (3) classes selon la classification suivante [17] :

Tableau 2 : Classification des valeurs de transmissivité (T)

Classes T	Classe faible	Classe moyenne	Classe forte
Valeurs	$T < 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	$10^{-5} < T < 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	$T > 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

2-3-4. Analyse statistique des valeurs des paramètres hydrodynamiques

Des études statistiques basées sur l’analyse des paramètres descriptifs de séries de valeurs ont été effectuées pour en tirer des informations utiles. Elles ont concerné les valeurs extrêmes (minimum, maximum), la moyenne, l’écart-type et le coefficient de variation (CV). Selon la valeur de coefficient de variation (CV), trois classes sont mises en évidence [19] :

Tableau 3 : Classification des valeurs de coefficient de variation (CV)

Classes Cv	Très homogène	Homogène	Hétérogène
Valeurs (%)	$CV < 20$	$20 < CV < 25$	$CV > 25$

3. Résultats

3-1. Analyse statistique des paramètres physiques des forages

Les profondeurs totales des forages étudiés varient entre 21,32 et 104 m avec une profondeur moyenne de 58,22 m, une médiane de 55,25 m et un écart type de 16,44 m (*Tableau 4*). En considérant l’écart type d’environ 16 m et la médiane 55 m, on peut suggérer que les forages productifs se localiseraient entre 39 et 71 m de profondeur. La dernière venue d’eau représente la profondeur à partir de laquelle le plus souvent les fissures se referment. Environ 18% des forages étudiés dépassent 71 m de profondeur (*Figure 4a*). En effet, leurs débits restent en dessous d’un débit souhaitable (5 m³/h).

Tableau 4 : Paramètres physiques et hydrauliques des forages

Paramètres	Effectif	Min	Max	Moy	Med	Ecart-type	CV (%)
Prof. tot (m)	167	21,32	104,08	58,22	55,25	16,44	28
EA (m)	27	2,92	17,42	8,46	7,06	4,28	51
NS (m)	167	0,3	29,8	11,59	11,05	6,55	57
Q (m ³ /h)	167	0,2	36	3,43	1,70	5,23	152

Min = minimum ; Max = maximum ; Moy = moyenne ; Med = médiane ; Cv = coefficient de variation.

Les épaisseurs d’altération varient entre 2,92 et 17,42 m avec une épaisseur moyenne de 8,46 m, une médiane de 7,06 m et l’écart type de 4,28 m (*Tableau 4*). En considérant l’écart type d’environ 4 m et la médiane 7 m, on peut laisser entendre que les forts et très forts débits seraient fournis par des épaisseurs altérites comprises entre 3 et 11 m. Au-delà de 11 m d’épaisseur, les débits tendraient à la baisse.

3-2. Analyse de la productivité des aquifères

3-2-1. Relation entre débits de forages et profondeurs totales

L’histogramme de distribution (*Figure 4*) présente les résultats des 167 forages étudiés en fonction des profondeurs forées et des débits d’exploitation.

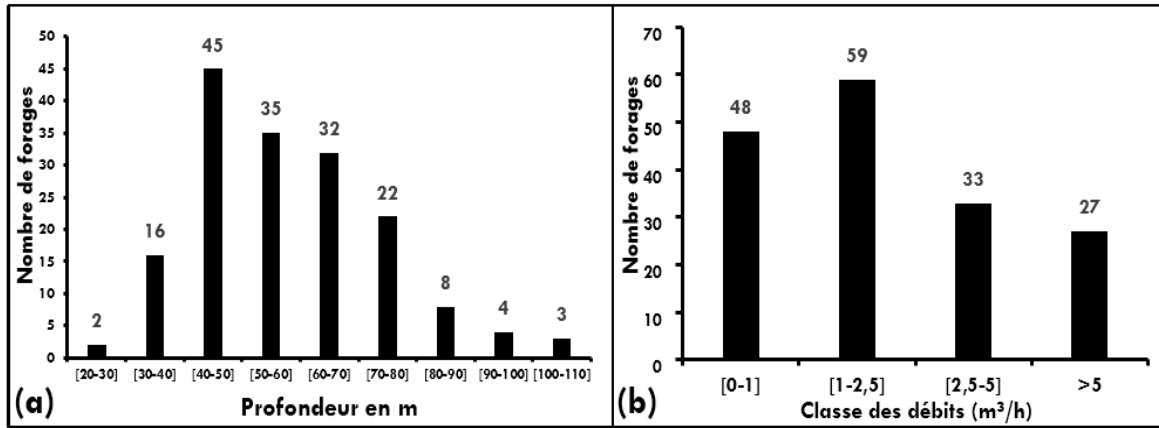


Figure 4 : Histogrammes de distribution. (a) profondeurs et (b) débits d'exploitation

Les débits des forages étudiés varient entre 0,2 et 36 m³/h avec une valeur moyenne de 3,4 m³/h et un écart type de 5,23 m³/h (*Tableau 4*). Le coefficient de variation de 152 % montre une très forte variabilité du débit, liée à la nature pétrographique des roches, l'épaisseur d'altération et la densité de fissures. L'histogramme (*Figure 4b*) montre que 140 forages (84 %) ont des débits très faibles à moyens (≤ 5 m³/h) alors que 15 forages (9 %) ont des débits forts ($5 \text{ m}^3/\text{h} \leq Q \leq 10 \text{ m}^3/\text{h}$) et 12 forages (7 %) ont des débits très forts ($> 10 \text{ m}^3/\text{h}$). La relation entre les débits d'exploitation et profondeurs totales (*Figure 5*) confirme que les meilleurs débits sont générés entre 39 m et 71 m de profondeur et qu'au-delà de 71 m de profondeur, les débits tendent à baisser.

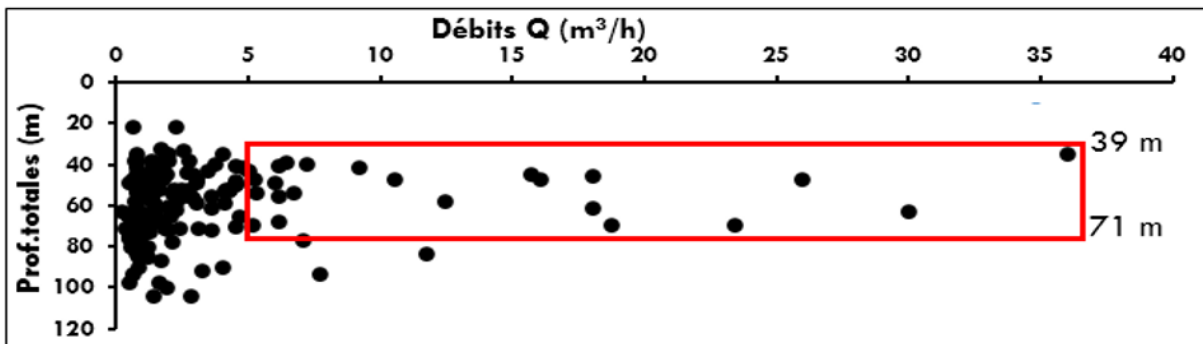


Figure 5 : Relation entre débits d'exploitation et profondeurs totales

3-2-2. Relation entre l'épaisseur d'altérites et débits

L'évolution des débits en fonction des épaisseurs d'altération (*Figure 6*) montre une inadéquation. L'importance des débits des ouvrages ne semble pas établir une relation particulière avec la puissance des altérites d'une manière générale. Les bons débits sont en majorité fournis par des épaisseurs d'altérites variant entre 3 m et 11 m. Au-delà de 11 m, on note une tendance à la baisse des débits des forages dans la zone.

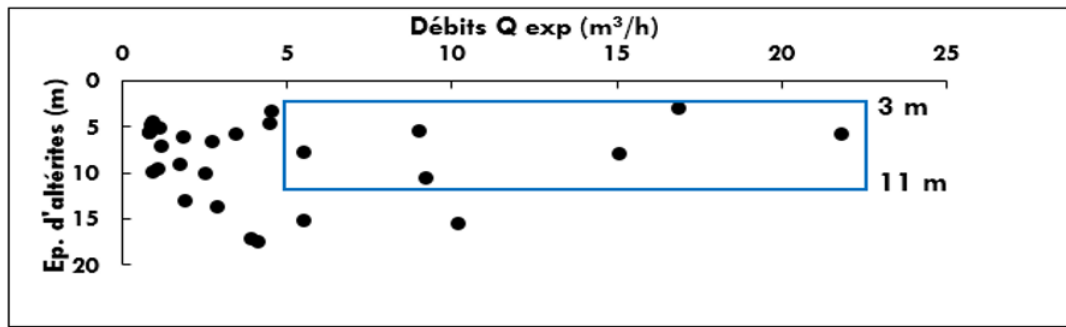


Figure 6 : Relation entre débits et épaisseurs d'altérites

3-3. Analyse des paramètres hydrodynamiques

3-3-1. Débits spécifiques (Qsp)

Les valeurs des débits spécifiques (Qsp) oscillent entre 0,03 et 1,88 m²/h avec une moyenne de 0,36 m²/h (Tableau 5). Le coefficient de variation (CV) supérieur à 100 % montre que les débits spécifiques sont très hétérogènes dans la zone.

Tableau 5 : Caractéristiques statistiques des débits spécifiques (Qsp)

Paramètres	Effectif	Min	Max	Moy	Med	Ecart-type	CV (%)
Qsp (m ² /h)	27	0,03	1,88	0,36	0,19	0,47	131

Min = minimum ; Max = maximum ; Moy = moyenne ; Med = médiane ; CV = coefficient de variation.

3-3-2. Transmissivité (T)

L'analyse statistique des 27 valeurs de transmissivité calculées à partir des méthodes de l'Ecopage (T₁), et de Logans (T₂) sont consignées dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Caractéristiques statistiques des transmissivités calculées

Méthodes	Moy	Min	Max	Ecart-type	CV (%)
Ecopage (T ₁)	7,98.10 ⁻⁶	5,96.10 ⁻⁷	4,16.10 ⁻⁵	1,04.10 ⁻⁵	130
Logans (T ₂)	1,25.10 ⁻⁴	9,36.10 ⁻⁶	6,53.10 ⁻⁴	1,64.10 ⁻⁴	131

Moy = moyenne ; Min = minimum ; Max = maximum ; CV = coefficient de variation.

L'analyse du Tableau 6 montre que les valeurs de transmissivité varient entre 5,96.10⁻⁷ et 4,16.10⁻⁵ m²/s pour la méthode de l'Ecopage (T₁) tandis qu'avec la méthode de Logans (T₂), elles oscillent entre 9,36.10⁻⁶ et 6,53.10⁻⁴ m²/s. Les coefficients de variation (CV) sont supérieurs à 100%, ce qui traduit une forte dispersion des valeurs de transmissivité dans la zone.

L'analyse des résultats par classe de transmissivités calculées (Tableau 7) révèle :

- au niveau de la méthode de l'Ecopage (T₁), la majeure partie des transmissivités sont de classe faible (77,78 %). La classe moyenne représente 22,22 % tandis que la classe forte est de 0 % ;
- concernant la méthode de Logans (T₂), les valeurs de transmissivité se situent en majorité entre les classes moyenne et forte avec des valeurs respectives de 59,26 % et 37,04 %. La classe faible ne représente que 3,70 %.

Tableau 7 : Répartition des transmissivités en fonction des classes définies

Méthodes	Classes de T	Faible	Moyen	Fort
		$<10^{-5}$	$[10^{-5} ; 10^{-4}]$	$>10^{-4}$
Ecopage (T ₁)	Nombre de forages	21	6	0
	% des classes	77,78 %	22,22 %	0
Logans (T ₂)	Nombre de forages	1	16	10
	% des classes	3,70 %	59,26 %	37,04 %

La répartition des transmissivités montre qu'elles sont toutes concentrées dans les classes faibles et moyennes pour la méthode de l'Ecopage (T₁), tandis qu'elles sont plus concentrées dans les classes moyennes et fortes pour la méthode de Logans (T₂).

4. Discussion

4-1. Analyse de la productivité des ouvrages

4-1-1. Profondeurs des ouvrages

Les profondeurs des forages étudiés varient entre 21,32 m et 104 m avec une profondeur moyenne de 58,22 m. Or, les fissures hydrauliquement actives se referment avec la profondeur [1]. En effet, il existe des profondeurs de foration à ne pas excéder dans le socle (80 m dans les granites et 100 m dans les schistes) pour des raisons purement économiques [1, 25, 26]. Par contre, la possibilité d'obtenir des forages productifs est réelle à de grandes profondeurs en utilisant des méthodes géophysiques [27]. Dans la préfecture de Haho, les profondeurs optimales productives se localisent entre 39 et 71 m. Ce résultat concorde à ceux de plusieurs travaux effectués au Togo [21], au Burkina Faso [25], au Cameroun [28] et en Côte d'Ivoire [1, 16, 20, 27] fixant la limite inférieure d'existence de fractures ouvertes entre 50 et 70 m de profondeur. Les grandes profondeurs trouvées dans la zone, seraient liées au fait que n'ayant pas obtenu le débit escompté, l'on ait poursuivi la foration [26]. De ce fait, les forages les plus profonds correspondraient généralement au moins productifs.

4-1-2. Epaisseurs d'altération

Les épaisseurs d'altération varient entre 2,92 et 17,42 m avec une moyenne épaisse de 8,46 m. L'étude de la variation des débits en fonction de l'épaisseur d'altérites montre d'une manière générale une absence de corrélation entre les débits et l'épaisseur des altérites. Ainsi, pour une épaisseur d'altération n'excédant pas les 11 m, les débits sont importants. Or, l'importance des débits est liée à l'ouverture des fractures. Ce résultat est quasiment similaire à ceux observés au Bénin, commune de Dassa-Zoumè où sous une épaisseur d'altération inférieure à 13 m, les linéaments sont souvent validés en fractures [29] et en Côte d'Ivoire, respectivement dans la région des Lacs [18] et dans le bassin versant du N'zi [30] où plus les débits sont importants, plus l'altération est peu développée. Par contre, une importante épaisseur d'altération peut devenir un facteur de productivité des aquifères fissurés à condition que celle-ci présente une bonne perméabilité dans la réalimentation des fractures sous-jacentes [20, 27, 28, 31]. L'évolution des débits par rapport à l'épaisseur d'altération est fonction du type de formation géologique [31]. Dans la préfecture de Haho, une importante épaisseur des altérites tend à s'opposer à la réalimentation des fractures sous-jacentes. C'est ce qui expliquerait la tendance à la baisse des débits en fonction de l'épaisseur des altérites.

4-1-3. Débits d'exploitation

Les débits de forages étudiés varient entre 0,2 m³/h et 36 m³/h. L'étude de la productivité des ouvrages indique que 84 % des forages étudiés ont des débits très faibles à moyens (≤ 5 m³/h). Cela peut s'expliquer par le manque d'études plus fines (télédétection, géophysique) avant l'implantation des ouvrages. Les forages (9 %) ayant des débits très forts (> 10 m³/h), pourraient être implantés sur des nœuds de fractures. Le forage ayant un débit supérieur à 35 m³/h, pourrait quant à lui être implanté sur une méga fracture. La classification des débits révèle que 71 % des débits sont supérieurs à 1 m³/h. Ces observations concordent avec celles effectuées au Cameroun [28] et en Côte d'Ivoire [18, 30, 31], qu'un débit d'au moins 1 m³/h est suffisant pour l'alimentation en eau potable des populations en zones rurale.

4-2. Analyse des paramètres hydrodynamiques

4-2-1. Débits spécifiques

Les débits spécifiques calculés oscillent entre 0,03 m²/h et 1,88 m²/h dans la zone. Ils se situent dans l'intervalle des valeurs observées au Togo [21], en Côte d'Ivoire [1, 16, 17, 20] et au Niger [32]. En effet, Ils sont majoritairement dans la classe moyenne et dépassent rarement 1 m²/h.

4-2-2. Transmissivité

Les transmissivités calculées à partir des différentes méthodes (méthode de l'Ecopage et méthode de Logans) varient entre $5,96.10^{-7}$ et $6,53.10^{-4}$ m²/s avec des valeurs moyennes dans l'ordre de 10^{-6} à 10^{-4} . Les différents coefficients de variation (CV) des transmissivités supérieurs à 100 % reflètent la forte hétérogénéité du milieu géologique de la zone d'étude. Cette forte dispersion des valeurs des transmissivités a été également constatée dans les formations analogues, aussi bien au Togo [21] qu'ailleurs en Afrique, notamment au Burkina Faso [25], en Côte d'Ivoire [1, 17, 19] et au Cameroun [28]. La grande dispersion spatiale de la transmissivité peut s'expliquer par le fait que les différents forages étudiés ne captent pas l'aquifère à la même profondeur, ni sur une même épaisseur [19], mais surtout par des variations quantitatives et qualitatives de la fracturation [33]. Les fortes valeurs de transmissivité peuvent s'expliquer par la présence de réseaux de fracturations communicatives [20, 30]. Divers travaux effectués au Togo et ailleurs en Afrique dans les mêmes contextes géologiques à partir d'autres méthodes que celles appliquées dans cette étude ont donné plusieurs résultats. Au Togo, les valeurs variant entre $1,12.10^{-6}$ et $2,1.10^{-3}$ m²/s obtenues à partir de la méthode de Cooper-Jacob, sont celles de la région des plateaux [34]. En Côte d'Ivoire, avec la méthode de Cooper-Jacob, des valeurs comprises entre $1,15.10^{-6}$ et $4,48.10^{-4}$ m²/s sont celles de la région des lacs [18]. Les valeurs allant de $1,72.10^{-6}$ à $3,62.10^{-4}$ m²/s sont celles de la région de N'zi-Comoé [31]. Les transmissivités situées entre $1,35.10^{-6}$ et $1,1.10^{-4}$ m²/s sont celles de la région de Katiola [16]. Les valeurs allant de $1,29.10^{-6}$ à $2,65.10^{-4}$ m²/s sont celles de la région du Bélier [20]. Au Burkina Faso, les valeurs situées entre $2,9.10^{-5}$ et $6,46.10^{-3}$ m²/s obtenues à partir de la méthode Théis, sont celles du centre urbain de Ouagadougou [35]. Au Cameroun, les valeurs comprises entre $3,0.10^{-7}$ et $7,8.10^{-4}$ m²/s obtenues à partir de la méthode de Cooper-Jacob, sont celles de la région de l'extrême Nord [28]. Cette analyse montre que les ordres de grandeur de la transmissivité obtenue à partir de la méthode de l'Ecopage sur les aquifères de socle de la préfecture de Haho, s'inscrivent donc dans la gamme des valeurs obtenues en zone de socle par ces auteurs. Cependant, les valeurs de transmissivité obtenues par la méthode de Logans qui sont dans les classes moyenne et forte, montrent que cette méthode a pour désavantage de surestimer la transmissivité [19]. Toutefois, ces résultats corroborent ceux déjà obtenus sur les aquifères de socle fissuré, aussi bien au Togo qu'ailleurs en Afrique.

5. Conclusion

Au terme de cette étude initiée dans le but de mieux cerner le comportement hydrodynamique des aquifères de socle fissuré du Sud-Togo, d'importants résultats ont été obtenus. Les valeurs de transmissivité calculée à partir des différentes méthodes hydrodynamiques (méthode de l'Ecopage et méthode de Logans) sont comprises entre $5,96.10^{-7}$ et $6,53.10^{-4}$ m²/s avec des valeurs moyennes dans l'ordre de 10^{-6} à 10^{-4} . Elles sont de l'ordre de 10^{-7} à 10^{-5} m²/s avec la méthode de l'Ecopage et de 10^{-6} à 10^{-4} m²/s avec la méthode de Logans. Les deux méthodes appliquées donnent des résultats qui s'inscrivent dans les ordres de grandeurs obtenus en Afrique en général et au Togo en particulier (10^{-6} à 10^{-4}). Ces résultats permettront une bonne gestion de la ressource en eau souterraine. Il est donc envisagé une modélisation du fonctionnement hydrodynamique de ces aquifères, comme un outil d'aide à la prise des décisions au service du développement durable dans la zone étudiée et les autres zones similaires.

Remerciements

Nos remerciements à la Direction Régionale de l'Hydraulique Villageoise d'Atakpamé pour avoir mis à notre disposition les données de forages.

Références

- [1] - J. BIÉMI, "Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants Sub-sahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire)". *Thèse de doctorat*, Université Nationale de Côte d'Ivoire, (1992) 480 p.
- [2] - AFD, "Réalisation et gestion des forages équipés d'une pompe à motricité humaine en Afrique subsaharienne. Guide méthodologique. *Agence française de Développement*, Paris, France, (2011) 85 p.
- [3] - T. K. YAO, Hydrodynamisme dans les aquifères de socle cristallin et cristallophyllien du sud-ouest de la Côte d'Ivoire : cas du département de Soubre. Apports de la télédétection, de la géomorphologie et de l'hydrogéochimie, Thèse de Doctorat, Conservatoire National des Arts et Métiers (France) et Université de Cocody (Côte d'Ivoire), (2009)
- [4] - K. GNANDI, F. FABLO et A. FREDERIK, "Etude de faisabilité des forages manuels au Togo : Identification des zones potentiellement favorables", (2009) 59 p.
- [5] - DGEA, "Projet de Réhabilitation et de Création des Points d'Eau dans la région des Plateaux", Rapport Final, Vol. 1, (2011)
- [6] - SPDD-HAHO, "Stratégie de Développement Durable de la Préfecture de Haho 2015-2030", Rapport, (2015) 79 p.
- [7] - RGPH-5, "5^{ème} Recensement Général de la Population et de l'Habitat au Togo", (2023) 1 - 2 p.
- [8] - M. S. TAIROU, P. AFFATON, S. ANUM, and T. J. FLEURY, "Pan-African Paleostresses and Reactivation of the Eburnean Basement Complex in Southeast Ghana (West Africa)". *Journal of Geological Research*, (2012) 1 - 15
- [9] - P. AFFATON, M. A. RAHAMAN, R. TROMPETTE and J. SOUGY, "The Dahomeyide Orogen : Tectonothermal Evolution and Relationships with the Volta Basin. In: R.D. Dallmeyer and J.P. Lécorché (eds) *The West African Orogens and Circum-Atlantic Correlatives*". *Springer-Verlag, Berlin*, (1991) 107 - 122 p.
- [10] - R. P. MENOT and K. F. SEDDOH, "The eclogites of Lato Hills (South Togo, West Africa) : relies from early tectono-metamorphic evolution of the Pan-African orogeny". *Chemical Geology*, 50 (1985) 313 - 330 p.

- [11] - M. G. ABDELSALAM, J. P. LIEGEOIS and R. J. STERN, "The Saharan Metacraton". *Jour. of Afri. Earth Sci.*, 34 (2002) 119 - 136
- [12] - G. ALAYI, "Les granitoïdes tardifs de la chaîne panafricaine des Dahoméyides au Togo : étude pétro-structurale, géochimique et géochronologique". *Thèse Doctorat*, Université Lomé, (2018) 265 p.
- [13] - Y. AGBOSSOUMONDE, "Les complexes Ultrabasiques-Basiques de la chaîne Panafricaine au Togo (axe Agou-Atakpamé, Sud-Togo) : Etude pétrographique, minéralogique et géochimique". *Thèse de Doctorat*, Université Jean Monnet, (1998) 306 p.
- [14] - J. P. SYLVAIN, A. AREGBA, J. COLLART et K. S. GODONOU, Notice explicative de la carte géologique du Togo 1/500000. Mémoire N°6, DGMG/BNRM, Lomé-Togo, (1986)
- [15] - K. ZONDOKPO, M. S. TAIROU, A. A. M. BANG'NA and M. D-T. GNAZOU, "Fracturing and hydrogeological potentialities of the Gneisso-Migmatitic Units along the Keve-Amoussoukope road in the southwest of Togo (West Africa)". *Hydrology.*, Vol. 10, N° 4 (2022) 65 - 74 p.
- [16] - F. M. GNAMBA, Y. M. S. OGA, T. GNANGNE et T. LASM, "Analyse de la productivité des aquifères de fissures du socle Paléoprotérozoïque de la région de Katiola (Centre-Nord de la Côte d'Ivoire)". *European Scientific Journal*, Vol. 10, N°5 (2014) 79 - 98 p.
- [17] - T. LASM, Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen), *Thèse de doctorat*, Université de Poitiers, France, (2000) 274 p.
- [18] - G. SORO, N. SORO, K. E. AHOUSSE, T. LASM, K. F. KOUAME, T. D. SORO et J. BIEMI, "Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères fracturés des formations cristallines et métamorphiques dans la région des lacs (Centre Côte d'Ivoire)". *Estudios Geológicos*, Vol. 66, (2) (2010) 227 - 242
- [19] - A. M. KOUASSI, J. C. OKAINGNI, K. E. KOUAKOU et J. BIEMI, "Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères de socle cristallin et cristallophyllien : Cas de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire)", *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 2, N° 1 (2013) 61 - 71
- [20] - K. M. EHOUSSE, A. M. KOUASSI et B. KAMAGATE, "Caractérisation hydrodynamique des aquifères fissurés de la région du Bélier (centre de la côte d'ivoire)". *Larhyss Journal*, N° 36 (2018) 119 - 143
- [21] - G. BOGUIDO, M. D. T. GNAZOU, L. TAMPO, A. BLEZA, M. AYAH, K. ZOUARI, L. M. BAWA and G. DJANEYEBOUNDJOU, "Analysis of Hydraulic Properties of Discontinuous Aquifers Basement of the Birimian Basin in Northern Togo". *Journal of Scientific and Engineering Research*, 6 (12) (2019) 90 - 101
- [22] - O. Z. De LASME, S. D. KOUADIO et A. COULIBALY, "Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des aquifères du socle dans quelques localités du Nord de la Côte d'Ivoire". *European Scientific Journal, ESJ*, 17 (7) (2021) 137 - 153
- [23] - F. LALBAT, "Fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère du Miocène du bassin de Carpentras (Vaucluse, France)". *Thèse de Doctorat*, Université d'Avignon, France, (2006) 234 p.
- [24] - A. ALASSANE, "Etude hydrogéologique du continental terminal et des formations de la plaine littorale dans la région de Porto-Novo (Sud du Bénin) : identification des aquifères et vulnérabilité de la nappe superficielle". *Thèse de Doctorat*, l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, (2004) 145 p.
- [25] - A. N. SAVADOGO, "Géologie et Hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta. Etude régionale du bassin versant de la Sissili". *Thèse de Doctorat*. Ès Sc. Nat. Université Scientifique et médicale de Grenoble, France, (1984) 351 p.
- [26] - K. E. KOUADIO, N. SORO et I. SAVANE, "Stratégie d'optimisation de la profondeur des forages en contexte de socle : Application à la région du Denguélé, nord-ouest de la Côte d'Ivoire". *Revue des sciences de l'eau*, Vol. 23, N°1 (2010) 1 - 15
- [27] - Y. A. N'GO, D. L. GONE, I. SAVANE et M. M. GOBLE, "Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) : Caractérisation hydroclimatique et physique". *Afrique SCIENCE*, 01 (1) (2005) 127 - 144

- [28] - G. EWODO MBOUDOU, A. F. BON, E. BINELI, F. NTEP et A. OMBOLO, "Caractérisation de la productivité des aquifères du socle de la région de l'extrême nord, Cameroun". *Journal of the cameroon academy of sciences*, Vol. 14, N°1 (2017) 44 - 60
- [29] - E. N. YALO, M. GNANMI, N. AKOKPONHOUE, E. KOUNIKA, G. ZOLA-SAHOSSI, "Impact de l'épaisseur de l'altération sur la détection des fractures par tomographie de résistivité électrique dans la commune de Dassa-Zoumè (Centre Benin)". *12e Colloque GEOFCAN*, Grenoble, (2021)
- [30] - A. KOUDOU, B. E. N'DRI, K. H. NIAMKE, O. A. ADJIRI, A. P. SOMBO & K. C. NIANGORAN, "Analyse de la productivité et estimation de la vulnérabilité à la pollution pour l'optimisation de l'implantation des forages dans les aquifères de socle du bassin versant du N'zi (Côte d'Ivoire)". *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, N° 38 (2016) 149 - 164
- [31] - A. M. KOUASSI, K. E. AHOUSSE, K. A. YAO, W. OUREGA, K. B. YAO et J. BIEMI, "Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire)". *Larhyss journal*, N°10 (2012) 57 - 74
- [32] - M. S. ABDOU BABAYE, "Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako-Niger)". *Thèse de Doctorat*, Université de Liège, Belgique, (2012) 265 p.
- [33] - K. V. AKPATAKU, "Apports de l'hydrogéochimie et de l'hydrologie isotopique à la compréhension du fonctionnement des aquifères en zones de socle dans la Région des Plateaux au Togo". *Thèse de Doctorat*, Université de Lomé, (2018) 240 p.
- [34] - M. BAHIR, P. CARREIRA, M. OLIVEIRA DA SILVA, P. FERNANDES, "Caractérisation hydrodynamique, hydrochimique et isotopique du système aquifère de Kourimat (Bassin d'Essaouira, Maroc)". *Estudios Geológicos*, Vol. 64, (1) (2008) 61 - 73 p.
- [35] - S. YAMEOGO, "Ressource en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso : Qualité et vulnérabilité". *Thèse de doctorat*, Université d'Avignon, France, (2008) 245 p.