

Étude de la productivité d'un aquifère de socle et approche statistique pour la détermination des tranches de profondeurs potentiellement productives : cas de la région de Bongouanou, est de la Côte d'Ivoire

Study of hard rock aquifer productivity and a statistical approach for the determination of potential productive depths: case of the Bongouanou region, eastern Ivory Coast

Emile Assie Assemian, Fernand Koffi Kouamé, Mahaman Bachir Saley, Kouadio Affian, Marc Youan Ta, Jean Patrice Roger Jourda and Jean Biemi

Volume 27, Number 1, 2014

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1021984ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/1021984ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Assemian, E. A., Kouamé, F. K., Saley, M. B., Affian, K., Youan Ta, M., Jourda, J. R. & Biemi, J. (2014). Étude de la productivité d'un aquifère de socle et approche statistique pour la détermination des tranches de profondeurs potentiellement productives : cas de la région de Bongouanou, est de la Côte d'Ivoire. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 27(1), 81–97. <https://doi.org/10.7202/1021984ar>

Article abstract

In the department of Bongouanou in the Ivory Coast, the potable water supply for the population is mainly assured by groundwater that is continuous in a hard rock aquifer of granite and schist. Unfortunately, more than 20% of bore holes that are drilled prove to be negative, because of their too weak productivity. The objective of this work was to improve the knowledge of this typical aquifer and to estimate its potential as a source of groundwater. To this end, statistical analyses of hydrogeological parameters from 230 drillings realized in the department have been carried out. For an annual average recharge of the aquifer of 145 mm, the average flow of drillings is $4.34 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ and the average transmissivity is $1.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. The hard rock aquifers of the Bongouanou region are thus modestly productive, as is typical of weathered hard rock. The statistical results reveal that schist, which represents more than 80% of the territory, is more productive than granite. Generally, the drillings that are established on the slope and the bottom of valley in this region yield more important flows than those on the plateau. The influence of weathering on the productivity of drillings is evident from the apparent relationship between the thickness of the weathered material (saprolite) and the productivity of the aquifer. For weathered thicknesses of less than 15 m (indicative of the absence of a permeable fissured horizon) and greater than 60 m (interpreted as an indication that the drill hole intersects a weathered subsurface discontinuity), the flows are very weak. We also observed that the first 30 m of the fissured horizon, situated just underneath the weathered base, are more permeable and thus the most productive; beyond this limit, the permeability diminishes markedly with depth. From the ground surface, the optimal depths that are the most productive of groundwater are found between 40 and 70 m for granite, and between 40 and 80 m for schist. Finally, this work allowed us to propose a conceptual model of the structure and the hydrodynamic properties of the hard rock aquifers in this Ivory Coast region.

ÉTUDE DE LA PRODUCTIVITÉ D'UN AQUIFÈRE DE SOCLE ET APPROCHE STATISTIQUE POUR LA DÉTERMINATION DES TRANCHES DE PROFONDEURS POTENTIELLEMENT PRODUCTIVES : CAS DE LA RÉGION DE BONGOUANOU, EST DE LA CÔTE D'IVOIRE

Study of hard rock aquifer productivity and a statistical approach for the determination of potential productive depths: case of the Bongouanou region, eastern Ivory Coast.

EMILE ASSIE ASSEMLAN^{1*}, FERNAND KOFFI KOUAMÉ¹, MAHAMAN BACHIR SALEY¹, KOUADIO AFFLIAN¹,
MARC YOUAN TA¹, JEAN PATRICE ROGER JOURDA¹, JEAN BIEMI¹

¹UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Félix Houphouët Boigny,
Abidjan, B.P. 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Reçu le 21 mars 2013, accepté le 14 novembre 2013

RÉSUMÉ

Dans le département de Bongouanou, l'essentiel de l'approvisionnement en eau potable de la population est assuré par les eaux souterraines contenues dans les aquifères de socle des granites et des schistes. Malheureusement, plus de 20 % des forages réalisés sont négatifs, en raison de leur trop faible productivité. Ce travail a donc pour objectif d'améliorer la connaissance de ce type d'aquifère et d'évaluer ses potentialités en eau souterraine. Pour ce faire, des analyses statistiques des paramètres hydrogéologiques de 230 forages réalisés dans le département de Bongouanou ont été effectuées. Cet aquifère bénéficie d'une recharge moyenne annuelle de 145 mm. La moyenne du débit des forages est de $4,34 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et la transmissivité moyenne est de $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Les aquifères de socle de la région de Bongouanou sont donc modestement productifs, caractéristique typique des milieux de socle altérés. Les résultats statistiques révèlent que les schistes, qui occupent

plus de 80 % du territoire, sont plus productifs que les granites. Généralement, les forages implantés sur les pentes et les fonds de vallée, dans cette région, présentent des débits plus importants que ceux des plateaux. L'influence de l'altération sur la productivité des forages est démontrée. Statistiquement, elle se traduit par une relation apparente entre l'épaisseur des altérites meubles (saprolite) et la productivité. Ainsi, pour des épaisseurs de saprolite inférieures à 15 m (interprétées comme dues à l'absence de l'horizon fissuré perméable sous-jacent) et supérieures à 60 m (interprétées comme dues au fait que le forage recoupe une discontinuité subverticale argilisée), les débits sont très faibles. On observe aussi que ce sont seulement les 30 premiers mètres de l'horizon fissuré, situé juste sous la base des altérites meubles, qui sont les plus perméables, et donc les plus productifs; au-delà de cette limite, la perméabilité diminue sensiblement avec la profondeur. Ainsi, dans cette région, à partir de la surface du sol, les profondeurs optimales les plus productives en eau souterraine sont comprises entre

40 et 70 m pour les granites et 40 à 80 m pour les schistes. Enfin, ce travail permet de proposer un modèle conceptuel de la structure et des propriétés hydrodynamiques des aquifères de socle de cette région de la Côte d'Ivoire.

Mots clés : Recharge, statistique, forage, aquifères de socle, productivité, transmissivité, Bongouanou, Côte d'Ivoire

ABSTRACT

In the department of Bongouanou in the Ivory Coast, the potable water supply for the population is mainly assured by groundwater that is continuous in a hard rock aquifer of granite and schist. Unfortunately, more than 20% of bore holes that are drilled prove to be negative, because of their too weak productivity. The objective of this work was to improve the knowledge of this typical aquifer and to estimate its potential as a source of groundwater. To this end, statistical analyses of hydrogeological parameters from 230 drillings realized in the department have been carried out. For an annual average recharge of the aquifer of 145 mm, the average flow of drillings is $4.34 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ and the average transmissivity is $1.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. The hard rock aquifers of the Bongouanou region are thus modestly productive, as is typical of weathered hard rock. The statistical results reveal that schist, which represents more than 80% of the territory, is more productive than granite. Generally, the drillings that are established on the slope and the bottom of valley in this region yield more important flows than those on the plateau. The influence of weathering on the productivity of drillings is evident from the apparent relationship between the thickness of the weathered material (saprolite) and the productivity of the aquifer. For weathered thicknesses of less than 15 m (indicative of the absence of a permeable fissured horizon) and greater than 60 m (interpreted as an indication that the drill hole intersects a weathered subsurface discontinuity), the flows are very weak. We also observed that the first 30 m of the fissured horizon, situated just underneath the weathered base, are more permeable and thus the most productive; beyond this limit, the permeability diminishes markedly with depth. From the ground surface, the optimal depths that are the most productive of groundwater are found between 40 and 70 m for granite, and between 40 and 80 m for schist. Finally, this work allowed us to propose a conceptual model of the structure and the hydrodynamic properties of the hard rock aquifers in this Ivory Coast region.

Key-words: Recharge, statistical analysis, drilling, hard rock aquifers, productivity, transmissivity, Bongouanou department, Ivory Coast.

INTRODUCTION

Les aquifères de socle (des roches cristallines et métamorphiques) occupent une superficie très importante tant à l'échelle du globe qu'en Afrique de l'Ouest. Leur ressource en eau souterraine participe significativement au développement socio-économique des pays concernés. Les connaissances sur la structure et les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères de socle ont fait récemment l'objet de progrès très significatifs. Il a ainsi été démontré que ce sont les processus d'altération qui sont à l'origine de leur potentialité aquifère (LACHASSAGNE *et al.*, 2011).

Les aquifères de socle comprennent ainsi, du haut vers le bas (DEWANDEL *et al.*, 2006; DEWANDEL *et al.*, 2011) : des altérites meubles (saprolite) caractérisées par une faible perméabilité, mais avec une capacité significative de stockage des eaux souterraines, un horizon fissuré stratiforme perméable, résultant lui aussi des processus d'altération, puis la roche saine imperméable, localement recoupée de couloirs d'altération plus profonde liés à des filons, des contacts lithologiques ou des anciennes fractures tectoniques qui peuvent aussi montrer une certaine perméabilité à leurs épontes (LACHASSAGNE *et al.*, 2005; MARÉCHAL *et al.*, 2003; TAYLOR et HOWARD, 2000; WYNS, 1998). L'origine de cette fissuration, et donc de la perméabilité des aquifères de socle, résulte des contraintes engendrées par le gonflement des minéraux au cours du processus d'altération (DEWANDEL *et al.*, 2006; LACHASSAGNE *et al.*, 2011). Cet horizon fissuré est constitué de roche dure, affectée, sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, par la présence de fissures, de fréquence décroissante avec la profondeur.

Ces (paléo) profils d'altération sont connus dans de très nombreuses régions du monde : Amérique du Nord, Amérique du Sud, Afrique, Inde, Chine, Corée, Japon, Australie, Europe, y compris Europe du Nord (HASSANE, 2010; MIGON et LIDMAR-BERGSTRÖM, 2002; TARDY et ROQUIN, 1998; WYNS, 1991). Pour une lithologie donnée, l'épaisseur de l'altérite dépend du climat, de la durée d'altération et de la topographie car, en présence d'un relief fort, l'érosion est intense et les produits de l'altération ne peuvent s'accumuler (WYNS, 2002). De manière générale, l'épaisseur de l'horizon fissuré est presque le double de celle des altérites meubles, et assure ainsi un stockage significatif des eaux souterraines (LACHASSAGNE *et al.*, 2011).

En Côte d'Ivoire, avec la croissance rapide de la population, les effets du réchauffement climatique et la pollution des eaux de surface, l'on est confronté à de véritables problèmes d'approvisionnement en eau potable dans les zones de socle, qui occupent 97,5 % de la superficie du territoire. Selon la direction de l'Hydraulique Humaine (DHH, 2001),

18 430 forages ont été réalisés dans le socle. Un inventaire des différents ouvrages de captage dans la région du N'Zi-Comoé (Est de la Côte d'Ivoire) a dénombré 1 241 forages dont 267 pour le département de Bongouanou. Néanmoins, le constat est alarmant car, sur ces 267 ouvrages, 37 sont abandonnés pour « tarissement » et 49 sont déclarés négatifs, car n'ayant pas atteint un débit optimum de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Ces constats suscitent beaucoup d'intérêt sur le plan de la recherche hydrogéologique. En effet, les caractéristiques de ces aquifères sont connues de façon sommaire et les profondeurs optimales productives des formations géologiques sont méconnues.

Les objectifs de ce travail sont donc d'étudier les potentialités en eau souterraine du socle de la région de Bongouanou par une approche d'analyse statistique des paramètres des forages. Il est aussi question de déterminer la productivité de chaque unité géologique en fonction de la profondeur pour optimiser les coûts de foration. L'intérêt scientifique de cette étude porte aussi sur l'applicabilité des concepts nouveaux présentés ci-dessus au contexte de la Côte d'Ivoire.

Le département de Bongouanou, qui fait partie de la région du N'zi-Comoé, est situé entre les longitudes $3^{\circ}44'W$ et $4^{\circ}47'W$ et les latitudes $6^{\circ}9'50''N$ et $6^{\circ}59'N$ (Figure 1). Il couvre une superficie de $6\,670 \text{ km}^2$, avec une population estimée à environ 350 000 habitants. La région est soumise à un climat de type tropical humide, avec une pluviométrie moyenne annuelle de $1\,200 \text{ mm}$. Le sol est essentiellement hydromorphe et ferrallitique, propice pour la culture du café, du cacao et de l'hévéa. Sur le plan topographique, les secteurs les plus accidentés sont le Centre et le Nord-Est. On y rencontre les chaînes « bauxitiques », d'environ 600 m d'altitude, qui s'étendent du Centre (sous-préfecture de Bongouanou) vers le Nord-Est (Figure 1). Les autres secteurs sont relativement plats, avec une altitude moyenne d'environ 120 m .

Le sous-sol est composé en grande partie de schistes volcano-sédimentaires et de granites. On rencontre aussi, en bordure du fleuve N'Zi et de la Comoé, des formations alluviales quaternaires holocènes formées de vase et de sable fluvial. Les schistes présentent des épaisseurs d'altération (altérites meubles) généralement plus importantes que les granites; parfois elles peuvent atteindre 100 m .

1. DONNÉES ET MÉTHODES

1.1 Données

Les données climatiques (1969-2005) ont été obtenues auprès de la Société d'Exploitation pour le Développement Aéroportuaire et Météorologique (SODEXAM).

Les paramètres des forages ont été recueillis à la direction régionale de l'hydraulique de Yamoussoukro. Ils ont été collectés à partir d'un dépouillement d'environ 269 dossiers (villes et villages) sur lesquels on a pu disposer de données relativement complètes sur 230 forages. Ces paramètres sont : la localité, la nature de l'ouvrage (forage ou puits), ses coordonnées géographiques (X, Y), l'altitude, la profondeur totale de l'ouvrage, la nature géologique, la situation géomorphologique du forage (plateau, pente et fond de vallée), l'altitude de la base des altérites meubles, la nature de l'aquifère exploité (socle fissuré ou altérite meuble), le niveau piézométrique au repos, le débit d'exploitation, les profondeurs des arrivées d'eau et le débit des venues d'eau significatives. Pour 75 forages, sont aussi disponibles les mesures réalisées lors des essais de pompage. Les pompages d'essai sont exécutés à débit constant. La descente dure deux ou trois heures et la remontée est suivie pendant une heure d'observation.

1.2 Méthodes

1.2.1 Estimation de la recharge

La recharge des aquifères a été estimée au cours d'une étude précédente (ASSEMIAN *et al.*, 2013, sous presse) au moyen des méthodes de THORNTHWAITE (1948) et de TIXERONT (1964).

1.2.2 Analyse statistique des paramètres de forage

Les méthodes statistiques classiques sont mises en œuvre pour étudier les potentialités aquifères du socle de cette région (COURTOIS *et al.*, 2009; DEWANDEL *et al.*, 2005; N'GO *et al.*, 2005). Les résultats de ces analyses devraient pouvoir nous renseigner sur la productivité des aquifères et déterminer les horizons productifs en rapport avec la lithologie. Ces méthodes statistiques devraient aussi indiquer les profondeurs optimales les plus correctes possibles pour arrêter la phase de foration, en tenant compte des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères.

1.2.3 Estimation des paramètres hydrodynamiques

L'interprétation des essais de pompage dans les aquifères de socle consiste à la détermination des paramètres hydrodynamiques tels que la transmissivité ou la perméabilité au moyen d'une solution analytique de l'équation de la diffusivité. Dans cette étude, le puits de pompage étant le puits d'observation, il est recommandé d'utiliser les données de la remontée après l'arrêt du pompage. Ces données ont été interprétées avec la solution analytique de COOPER-JACOB (1946) qui est recommandée dans ce cas de figure (KRUSERMAN et DE RIDDER, 1990; LASM, 2000; RAZACK et LASM, 2006; YOUAN TA, 2008). L'on suppose que le socle fracturé répond aux hypothèses de la solution analytique de COOPER-JACOB. Il est notamment considéré

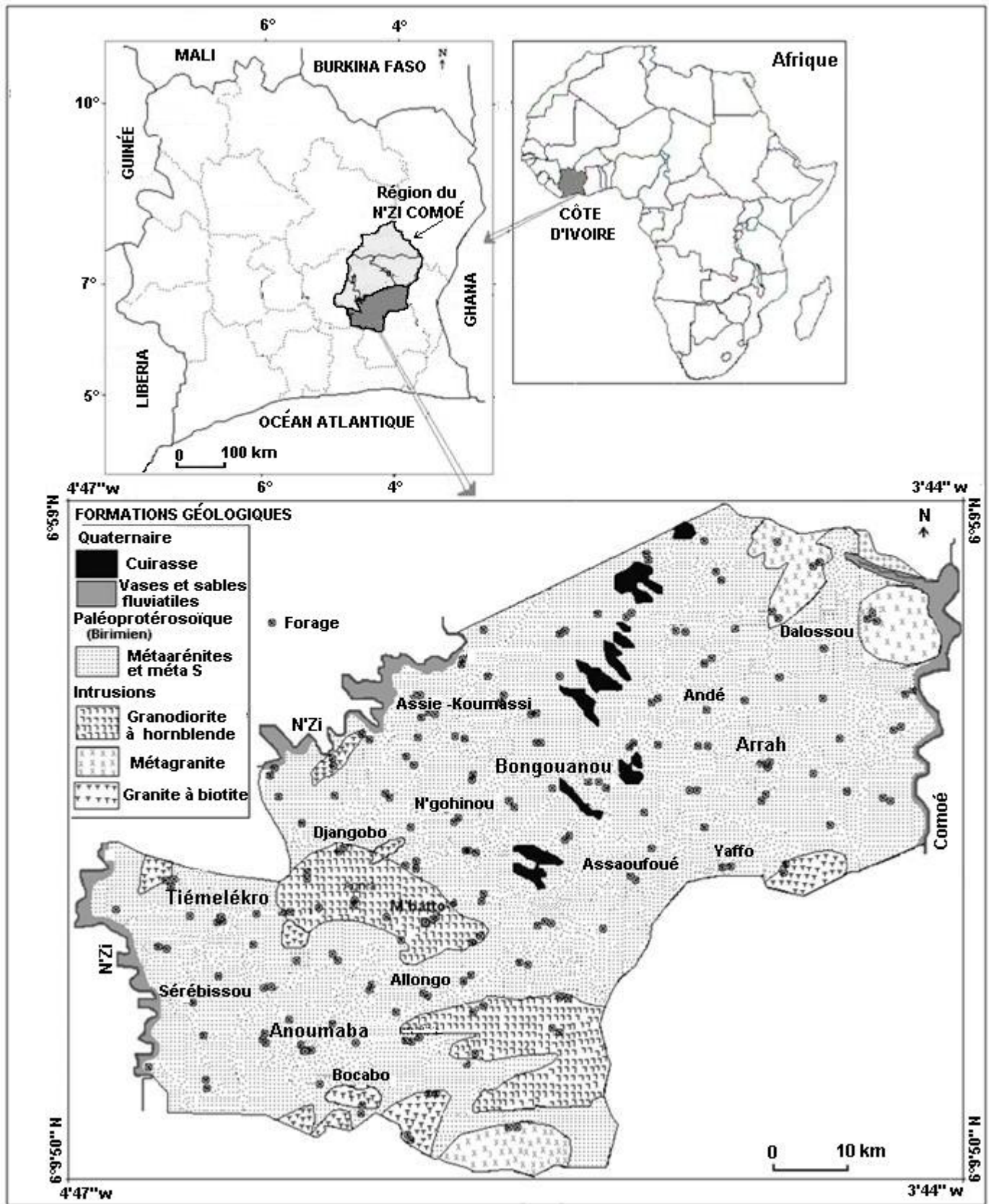


Figure 1. Situation géographique et esquisse géologique du département de Bongouanou.
Geographic location and geological sketch of the department of Bongouanou.

comme un milieu poreux équivalent. Le rabattement à la remontée est appelé rabattement résiduel (S_r) et la formule simplifiée est définie de la manière suivante :

$$S_r = \frac{0,183}{T} Q \cdot \text{Log} \left(\frac{tp + tr}{tr} \right) \quad (1)$$

avec :

S_r : rabattement résiduel (m);

tp : durée du pompage (s);

tr : temps écoulé depuis l'arrêt du pompage (temps résiduel variable) (s);

Q : débit de pompage ($m^3 \cdot s^{-1}$); et

T : transmissivité ($m^2 \cdot s^{-1}$).

En mode opératoire, il faut :

- porter sur une échelle semi-logarithmique le rabattement résiduel S_r en fonction de $(tp + tr)/tr$, [$S_r = f(\log((tp + tr)/tr))$], ce dernier doit être sur l'axe logarithmique. On peut ainsi obtenir une droite;
- mesurer la variation de rabattement résiduel $\Delta S_r = S_{r_2} - S_{r_1}$ et celle de $\Delta \log((tp + tr)/tr) = \sigma$;
- à partir de l'équation (1), on déduit la transmissivité T par la formule 2 suivante :

$$T = \frac{0,183}{\Delta S_r} Q \cdot \sigma \quad (2)$$

1.2.4 Estimation de la transmissivité par une approche empirique

Le débit spécifique (Q/s) qui est le rapport entre le débit de pompage Q et le rabattement maximal s , est un paramètre facile à estimer. Ce paramètre hydrodynamique peut aussi être utilisé pour obtenir une estimation de la transmissivité (T) par une approche empirique (MACÉ, 2000; SRIVASTAY *et al.*, 2007), notamment lorsque l'on ne dispose pas de pompage d'essai ou des données d'un pompage d'essai. Cette approche est basée sur la recherche d'une corrélation entre les valeurs de T et celles de Q/s (ACHEAMPONG et HESS, 1998; HAMM *et al.*, 2005; JALLUDIN et RAZACK, 2004; MACÉ, 2000; YIDANA *et al.*, 2007). Très souvent, la corrélation est meilleure en utilisant les logarithmes et cette relation mathématique est écrite selon l'équation 3 :

$$T = A \cdot (Q/s)^D \quad (3)$$

où :

A et D sont des coefficients (constantes);

T : transmissivité ($m^2 \cdot s^{-1}$); et

Q/s : débit spécifique ($m^2 \cdot s^{-1}$).

2. RÉSULTATS

2.1 Recharge des aquifères

Les résultats essentiels du bilan hydrologique annuel obtenus dans la région de Bongouanou sur la période de 1969 à 2005 (ASSEMIAN *et al.*, 2013, sous presse) sont consignés dans le tableau 1. Ces résultats montrent que, pour une pluviométrie moyenne annuelle de 1 163 mm, la lame d'eau ruisselée est d'environ 35 mm, soit 3 % des précipitations. L'évapotranspiration réelle (ETR), qui représente la fraction d'eau qui retourne dans l'atmosphère, est de 983 mm, soit 84 % des précipitations. Malgré la diminution de la pluviométrie constatée au cours de ces dernières décennies (ASSEMIAN *et al.*, 2013, sous presse), les aquifères discontinus de cette région reçoivent en moyenne, chaque année, une recharge estimée à 145 mm, soit 12 % des précipitations. Ainsi, pour une superficie de 6 670 km², le volume moyen d'eau infiltré chaque année est environ 0,96 km³.

2.2 Analyse statistique des paramètres des forages

Les résultats statistiques des paramètres de tous les forages (positifs et négatifs) étudiés ont été reportés dans le tableau 2.

Les altitudes du positionnement des forages oscillent entre 63 et 270 m, avec une moyenne de 140 m. Sur le terrain, généralement, les altitudes les plus élevées sont identifiées sur les plateaux, ensuite viennent les pentes et, en dernière position, les fonds de vallée parfois semblables aux bas-fonds en ce qui a trait à l'altitude. Au centre et dans la bande de la cuirasse bauxitique (Figure 1), les forages sont situés à plus haute altitude, 270 m au maximum. Cette région, distante des deux principaux fleuves, correspond très vraisemblablement à des reliques de profils d'altération anciens, non encore totalement érodés, compte tenu de leur éloignement des fleuves. Les autres secteurs sont des pénéplaines de moindre altitude résultant très vraisemblablement d'une morphogenèse plus récente. Dans ce second secteur, les forages se situent à moindre altitude (63 m au minimum).

La profondeur totale des forages varie entre 21 et 110 m, avec une moyenne de 65 m. On dénombre souvent jusqu'à trois arrivées d'eau. Cependant, dans ce milieu, les premières arrivées d'eau sont perceptibles dans les profondeurs variant entre 16 m et 83,81 m et la moyenne est environ 42 m. Les niveaux piézométriques au repos oscillent entre 2,5 et 40,8 m, avec une moyenne de 17,54 m.

Tableau 1. Récapitulatif des résultats du bilan hydrologique de la région de Bongouanou (1969-2005).

Table 1. Summary of the hydrological balance results for the Bongouanou region (1969 -2005).

Paramètres	1969-2005
Précipitation (mm)	1163,4
ETP (mm)	1273,8
ETR (mm)	983,1
Excédent (P-ETR) (mm)	180,3
Ruissellement (R) (mm)	35
Recharge (Ie) (mm)	145
Volume d'eau infiltré (km ³)	0,96

Tableau 2. Statistique élémentaire des paramètres des forages.

Table 2. Basic statistics for the drilling parameters.

Paramètres	Effectifs	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart-type
Z (m)	230	63	140	270	138,2
Pt (m)	230	21	65	110	67,5
EpA (m)	230	4	41,03	105,5	45,6
Ns (m)	230	2,5	17,54	40,8	18,2
AE1(m)	167	16	42,2	83,81	43,11
Q (m ³ •h ⁻¹)	230	0,23	4,34	21	5,01
T (m ² •s ⁻¹)	75	4,4•10 ⁻⁷	1,4•10 ⁻⁴	4,1•10 ⁻⁴	2,0•10 ⁻⁴
Q/s (m ² •s ⁻¹)	75	1,6•10 ⁻⁷	1,3•10 ⁻⁴	3,7•10 ⁻⁴	1,4•10 ⁻⁴

Z : Altitude du point du forage

Pt : Profondeur totale du forage

EpA : Épaisseur d'altération (altérites meubles)

Ns : Profondeur du niveau piézométrique

AE1 : profondeur de la première arrivée d'eau

Q : débit d'exploitation du forage

T : Transmissivité

Q/s : Débit spécifique

2.3 Analyse des paramètres hydrodynamiques

Les valeurs de transmissivité calculées par la méthode de COOPER-JACOB sur 75 forages sont comprises entre $4,4 \cdot 10^{-7}$ et $4,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, soit sur trois ordres de grandeur, avec une moyenne de $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Le débit spécifique, qui peut servir en tant qu'approximation de la transmissivité, a été estimé. Les valeurs calculées varient entre $1,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et $3,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, avec une moyenne de $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Le coefficient de variation (CV), qui représente le rapport de l'écart-type sur la moyenne, traduit la dispersion des données au sein d'un échantillon. Les valeurs des CV des transmissivités et des débits spécifiques calculés dépassent 100 %. Elles confirment la forte dispersion de ces paramètres hydrodynamiques.

2.4 Situation géomorphologique des forages et débits

Les forages ont été classés en différents sous-groupes sur la base de leur situation géomorphologique (plateaux, pentes et fonds de vallée). Dans la zone d'étude, environ 61 % des forages ont été réalisés sur les pentes, contre 21 % sur les plateaux et 18 % dans les fonds de vallée. Les pentes sont donc les plus sollicitées dans les campagnes de forage. Cependant, les tendances de variation des épaisseurs d'altération meuble (saprolite) sur chaque élément géomorphologique sont presque les mêmes (Tableau 3). En effet, celles-ci fluctuent entre 2 et 88 m dans l'ensemble, avec des moyennes et des médianes qui varient respectivement entre 36 - 40 m et 33 - 40 m; même les épaisseurs d'altération meuble sur les fonds de vallée sont importantes malgré l'érosion qui affecte ces secteurs (Tableau 3).

Tableau 3. Statistique sur la profondeur d'altération et le débit des forages implantés sur les différents éléments géomorphologiques.
Table 3. Statistical analysis of the relation between the thickness of weathered material and the flow for bore holes drilled in different geomorphologic elements.

Paramètres	Géomorphologie	Effectifs	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-Type	Q1	Me	Q3
Épaisseur d'altération (m)	Plateau	49	2	88,5	36,15	21,86	18,35	36	54,8
	Pente	140	3	84,3	40,2	17	26	40	52,7
	Fonds de vallée	41	14,5	78	37,84	16,65	23,7	33	48
Débits de forage (m ³ •h ⁻¹)	Plateau	49	0,2	11,5	2,72	2,47	1	2	3,6
	Pente	140	0,17	14,6	3,24	2,92	0,91	2,3	4,76
	Fonds de vallée	41	0,1	21	3,18	3,77	1	2,3	3,83

Le premier quartile : Q1

La médiane : Me

Le troisième quartile : Q3

On y enregistre respectivement, aux points des forages, des valeurs minimum, maximum, moyennes et médianes de 14,5 m, 78 m, 37,8 m et 33 m. Une analyse des débits des forages implantés sur chaque élément géomorphologique a été aussi effectuée et consignée dans ce même tableau 3. Les débits des forages implantés sur les plateaux varient entre 0,2 m³•h⁻¹ et 11,5 m³•h⁻¹, avec une moyenne et une médiane de 2,72 m³•h⁻¹ et de 2 m³•h⁻¹ respectivement. Par contre, sur les pentes et les fonds de vallée, les débits semblent significativement plus forts. Les moyennes, les médianes et les quartiles sont presque les mêmes pour les pentes et pour les fonds de vallée. Ces observations statistiques suggèrent que les forages implantés sur les pentes et les fonds de vallée sont plus productifs que ceux des plateaux dans cette région.

2.5 Corrélation entre l'épaisseur des altérites meubles et la productivité de l'horizon fissuré

Dans le département de Bongouanou, les épaisseurs d'altérites (altérites meubles, encore appelées saprolite; horizon fissuré non compris) observées varient entre 4 et 105,5 m, avec une moyenne de 41,03 m et un coefficient de variation de 111 % (Tableau 2). Le socle de Bongouanou est donc systématiquement altéré; c'est l'une des caractéristiques des formations volcano-sédimentaires des confins ivoiro-ghanéens.

L'étude du débit moyen des forages captant l'horizon fissuré en fonction des classes d'épaisseurs d'altérites a été effectuée pour déterminer s'il existe une relation entre ces deux paramètres (Figure 2). Sur la figure 2a, on remarque que, pour des épaisseurs d'altérites inférieures à 15 m et supérieures à 75 m, les débits des forages (captant l'horizon fissuré) sont inférieurs à 3 m³•h⁻¹; c'est seulement l'intervalle compris entre 20 et 70 m qui fournit de nombreuses valeurs de débits supérieurs à 3 m³•h⁻¹, avec même un maximum de 21 m³•h⁻¹.

Par ailleurs, l'étude des débits moyens par classe d'épaisseur d'altérite meuble (Figure 2b) semble aussi illustrer les mêmes tendances. En effet, on observe que, dans les classes] 0 – 15],] 60 – 75] et (> 75 m), les débits moyens captés dans l'horizon fissuré sont plus faibles que pour les classes] 15 – 30],] 30 – 45] et] 45 – 60] (Figure 2b), alors que les estimations des moyennes et des médianes des profondeurs du socle fissuré de ces classes sont autant importantes (> 10 m) que celles-ci, et donc, normalement, devraient pouvoir favoriser de bons débits dans l'ensemble, avec des effectifs respectifs de 15, 19 et 7 forages. Il est probable que les faibles épaisseurs d'altérites (ici < 15 m) traduisant une altération pelliculaire sont à l'origine des débits faibles. En ce qui concerne les classes les plus fortes (] 60 – 75] et > 75 m), les débits moyens faibles semblent se justifier par le fait que les forages recoupent des discontinuités subverticales argilisées (DEWANDEL et al., 2011). L'altérite y est capacitive plutôt que d'être transmissive. Il se pourrait aussi que tous les forages aient à peu près la même profondeur, et donc, que pour les fortes épaisseurs d'altérites, ils ne recoupent pas assez de fissures pour que les débits soient forts; cela ne peut pas être le cas, car les estimations des moyennes et des médianes des profondeurs de socle fissuré, dans ce cas précis, sont supérieures à 10 m pour au moins obtenir des débits aussi importants que les autres classes, puisque la fissuration est aussi issue des processus d'altération. En effet, de très fortes épaisseurs d'altération (par exemple ici > 75 m) devraient normalement engendrer une forte perméabilité, du moins au niveau du toit de l'horizon fissuré sous-jacent, ce qui n'est pas le cas, car les débits sont très faibles. Il s'agit donc vraisemblablement de discontinuités argilisées très profondes recoupées par les forages.

Par contre, pour les classes] 15 – 30],] 30 – 45] et] 45 – 60], malgré des effectifs importants de données de forage (≥ 50), surtout avec des moyennes et des médianes des profondeurs de socle fissuré relativement faibles au niveau de la classe] 45 – 60], les débits moyens sont importants

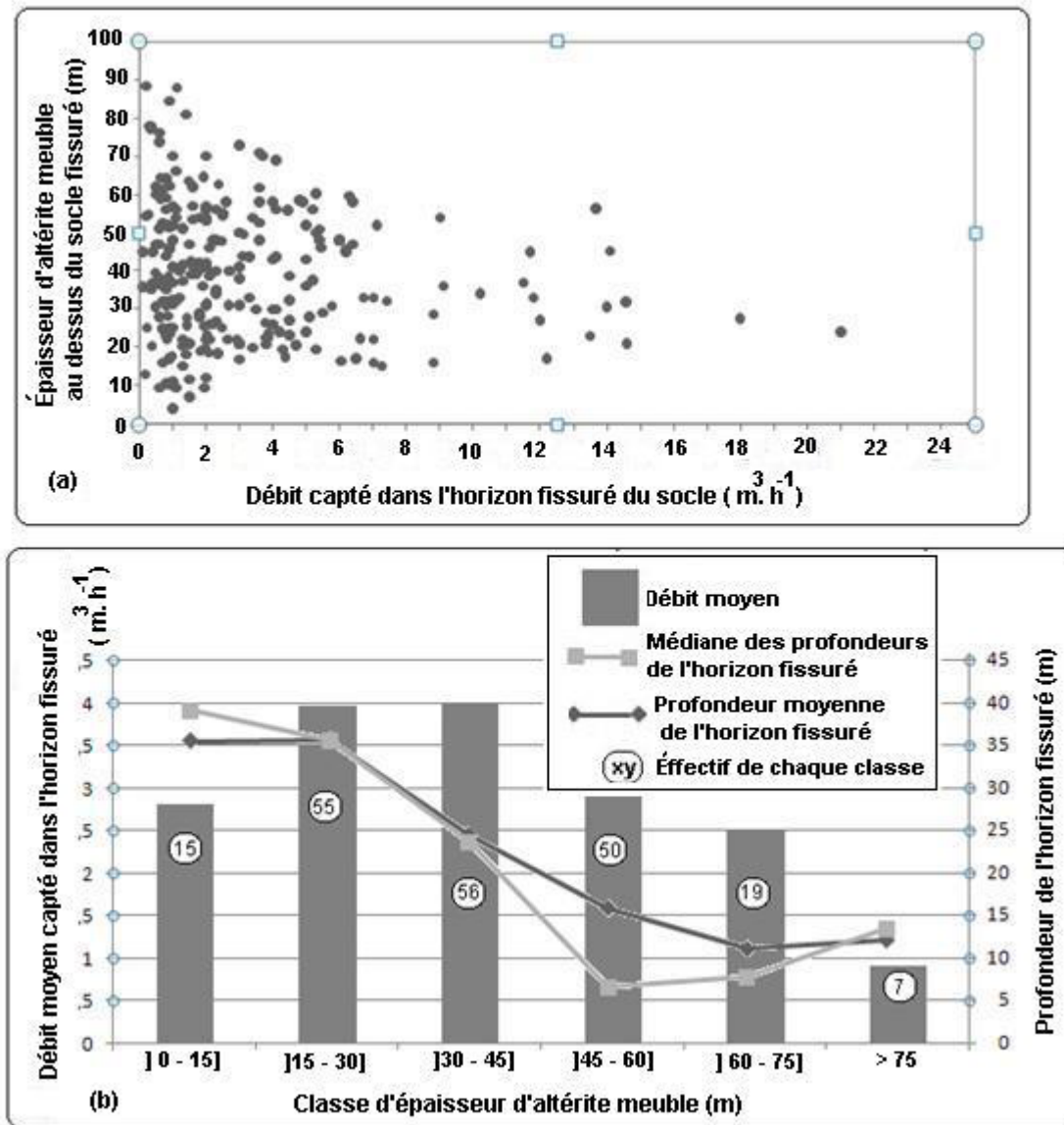


Figure 2. Relation entre altérite meuble et l'horizon fissuré du socle : (a) Débit capté dans l'horizon fissuré en fonction de l'épaisseur de l'altérite meuble; (b) Débit moyen capté dans l'horizon fissuré en fonction de classe d'épaisseur d'altérite.

Relation between weathered and hard rock fissured horizon: (a) Flow obtained in the fissured horizon according to the thickness of the weathered material; (b) Average flow obtained in the fissured horizon according to the thickness of the weathered material.

(> 3 m³·h⁻¹). On remarque aussi qu'à partir de la classe] 45 – 60], les débits moyens tendent à diminuer sensiblement en fonction des classes des épaisseurs d'altérite meuble. Toutes ces observations montrent que l'influence de l'épaisseur d'altérite est en apparence significative en ce qui concerne la productivité en eau souterraine de l'horizon fissuré dans cet aquifère de socle.

2.6 Débit des forages

Dans le département de Bongouanou, le débit des forages varie entre 0,23 et 21 m³·h⁻¹, avec une moyenne de 4,34 m³·h⁻¹.

La classification des débits selon les critères du Comité Interafricain des Études Hydrauliques (CIEH) montre que les classes des débits faibles (1 m³·h⁻¹ < Q < 2,5 m³·h⁻¹), moyens (2,5 m³·h⁻¹ < Q < 5 m³·h⁻¹) et forts (> 5 m³·h⁻¹) représentent 77 % des forages dans la région (Figure 3a). C'est seulement 23 % des forages qui sont négatifs (Q < 1 m³·h⁻¹). Le socle de la région de Bongouanou présente donc une productivité relativement modeste pour toutes les lithologies présentes dans cette région, ce qui est néanmoins caractéristique des aquifères de socle.

Le débit d'exploitation des forages ne captant que les altérites (53 ouvrages) montre que 83 % des forages ont des

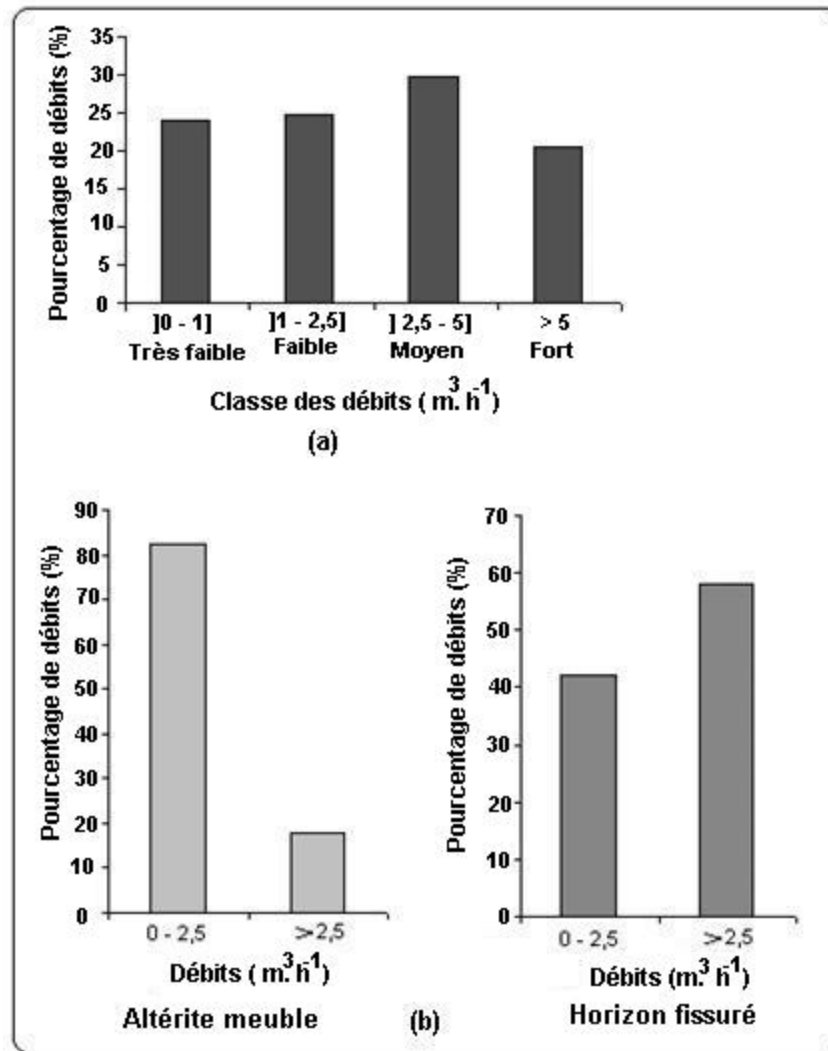


Figure 3. Distribution du débit des forages : (a) classes de variation des débits; (b) variation des débits dans les altérites meubles et dans l'horizon fissuré.
Distribution of the drillings flows: (a) classes of flow variation; (b) flow variation in the weathered and in the fissured hard rock.

débits faibles et seulement 17 % ont des débits moyens et forts ($Q > 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) (Figure 3b). Par contre, sur un total de 177 ouvrages captant l'horizon fissuré, 42 % seulement ont des débits faibles et 58 % ont des débits moyens et forts. En plus, seuls 5,6 % des forages captant les altérites fournissent des débits supérieurs à $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, alors que dans le socle fissuré, on en enregistre 25 %. Ces statistiques confirment que dans le département de Bongouanou, comme dans les autres régions de socle du monde, l'horizon fissuré est plus productif que les altérites meubles. Par ailleurs, il ne peut être exclu que des forages identifiés comme captant les altérites meubles, captent en fait la frange supérieure de l'horizon fissuré, non identifié en tant que tel lors de la foration.

2.7 Profondeur optimale productive

En vue de déterminer les profondeurs optimales productives dans la région de Bongouanou, nous avons analysé les débits moyens des 230 forages (captant les altérites ou l'horizon fissuré) par classes de profondeur totale dans chaque unité géologique du socle (Figure 4). Dans les schistes (Figure 4a), les intervalles compris entre 40 et 80 m sont les seuls qui fournissent des débits moyens supérieurs à $3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Les classes de profondeur les plus productives sont :] 50 - 60],] 60 - 70] et] 70 - 80]. À partir de 80 m, les schistes sont moins productifs.

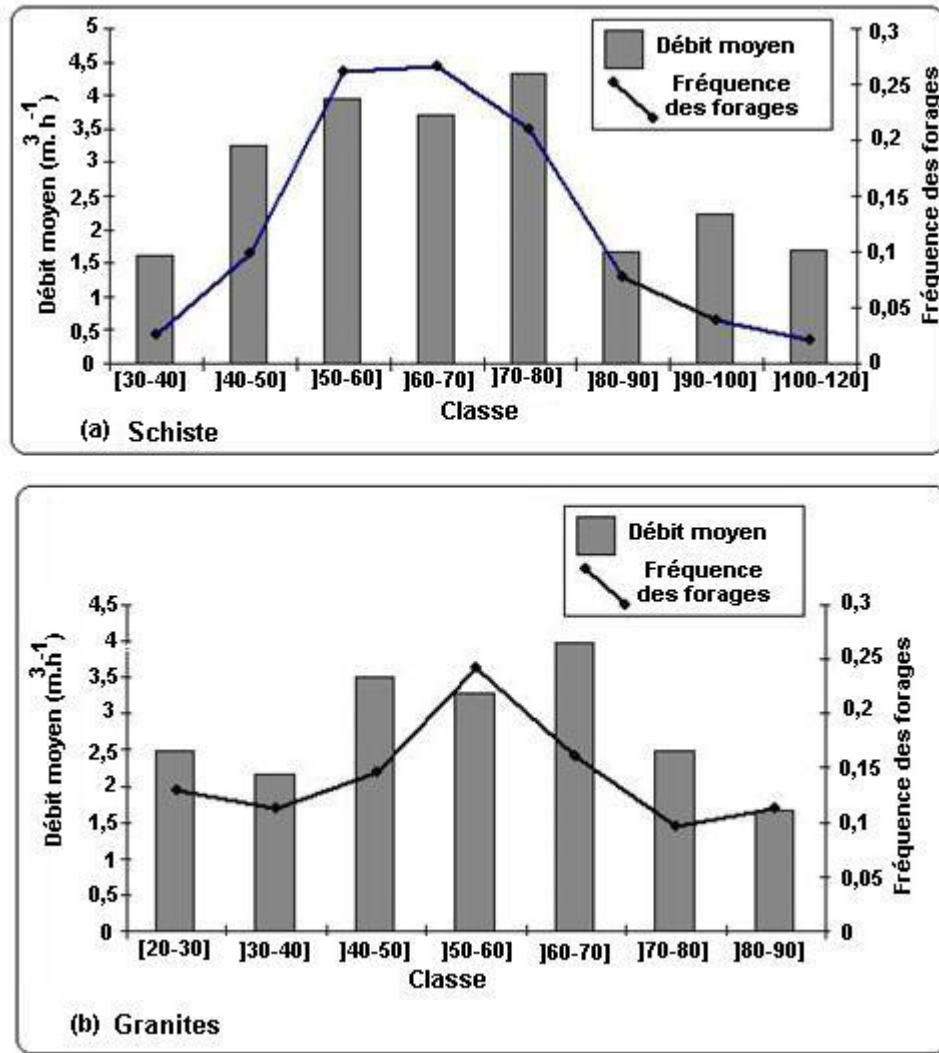


Figure 4. Mise en évidence des tranches de profondeur potentiellement productives : (a) classes de profondeur totale et débits moyens dans les schistes; (b) classes de profondeur totale et débits moyens dans les granites.

Display of the potentially productive depth zones: (a) depth classes and average flows in schist; (b) depth classes and average flows in granite.

Dans les granites (Figure 4b), les intervalles de profondeur compris entre 40 et 70 m sont aussi les seuls qui fournissent des débits moyens supérieurs à $3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Les classes de profondeur les plus productives sont :] 40 - 50],] 50 - 60] et] 60 - 70]. Les profondeurs inférieures à 40 m et supérieures à 70 m sont les moins productives.

Par ailleurs, les données des forages, où des essais de pompage ont été effectués (75 forages), ont aussi permis de mettre en évidence les caractéristiques hydrauliques du socle selon la profondeur totale (Figure 5). Sur la figure 5a, on constate que, passée une première tranche de 30 m où très peu de forages sont disponibles et où les débits spécifiques moyens sont faibles, on atteint un palier d'environ $0,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Les tranches de profondeurs comprises entre 40 et 80 m montrent parfois des moyennes géométriques des débits spécifiques supérieures à $0,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, avec des maximums respectifs

de $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, entre 40 et 50 m et entre 60 et 70 m. Au-delà, le débit spécifique moyen décroît pour atteindre une valeur inférieure à $0,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Globalement, cette donnée montre une décroissance avec la profondeur à partir de l'intervalle 40 - 50 m. Le graphe des débits moyens de ces mêmes forages en fonction de la profondeur totale de chaque forage (Figure 5b) donne des résultats presque similaires. En effet, les débits moyens sont aussi relativement faibles dans les 30 premiers mètres de profondeur. Par contre, les profondeurs comprises entre 40 et 80 m fournissent des débits moyens les plus importants, avec une moyenne aux alentours de $2,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Au-delà aussi de 80 m, les débits moyens diminuent tout comme les moyennes géométriques des débits spécifiques. Les paramètres débits moyens et débits spécifiques moyens des forages, où il y a eu des essais de pompage, confirment les tendances mises en évidence

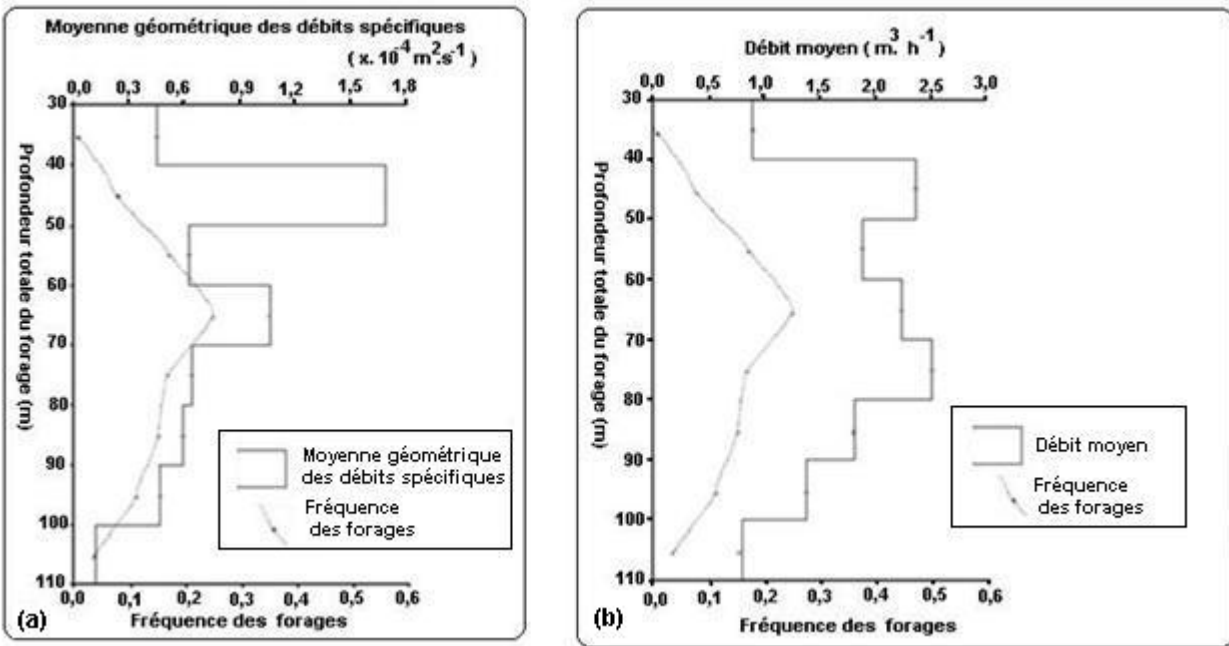


Figure 5. Variabilité des débits spécifiques moyens et des débits moyens des forages en fonction de la profondeur.
Variability of average specific capacities and average flows according to the depth.

en ce qui concerne la tranche de profondeur potentiellement productive dans cette région.

2.8 Zone de l'horizon fissuré du socle potentiellement productive

Dans cette partie de l'étude, seules les arrivées d'eau (AE) enregistrées dans le socle fissuré des schistes ont été analysées. Les granites n'ont pas été étudiés à cause du manque d'informations suffisantes sur les AE dans ce milieu. Sur un total de 123 forages, où les profondeurs des AE ont été enregistrées dans la base de données, 43 possèdent une seule AE et le reste deux AE. Le graphe de la figure 6a, qui présente la fréquence des AE en fonction des classes de profondeur (pas de 10 m), permet d'apprécier la distribution des AE dans le socle fissuré. On constate qu'environ 72 % des AE se situent au niveau des 30 premiers mètres, avec une prédominance de 0 et 10 m de profondeur (28 % des AE) suivie d'une baisse régulière de la fréquence qui atteint 21 % aux environs de 30 m. Au-delà de cette profondeur, les venues d'eau deviennent très rares dans l'horizon fissuré du socle.

Pour appréhender le comportement de ces arrivées d'eau avec la profondeur, le graphe présentant les débits moyens des AE en fonction des classes de profondeur a été construit (Figure 6b). On constate sur ce graphe que le débit moyen des AE augmente avec la profondeur et atteint son maximum (5,2 m³.h⁻¹) à environ 30 m dans le socle. Au-delà de cette profondeur, le débit moyen des AE décroît rapidement pour atteindre son plus bas niveau (0,4 m³.h⁻¹) à environ 61 m

dans le socle sain. On remarque que les meilleurs débits dans l'horizon fissuré se situent au niveau des 30 premiers mètres. Cette tranche correspond à la zone de fortes densités de fissures ou de fractures ouvertes correspondant à l'horizon fissuré tel que décrit en introduction. Au-delà de cette profondeur, la fréquence des fissures diminue.

2.8 Productivité des formations géologiques

Les roches du socle forées appartiennent principalement à deux grandes catégories : les schistes et les granites. Environ, 160 forages ont été réalisés dans les schistes et 60 forages dans les granites. L'étude comparative de la productivité de ces deux formations géologiques est consignée dans le tableau 4. Pour un total de 135 forages captant l'horizon fissuré des schistes, 71 % fournissent des débits moyens et forts, alors que dans l'horizon fissuré des granites, pour un total de 42 forages, 56 % seulement fournissent des débits moyens et forts. 27 % des forages captant le socle schisteux fournissent des débits forts ($Q > 5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), ce qui est du même ordre de grandeur que dans le socle granitique qui enregistre 24 %. De même, 37 % des forages captant les altérites des schistes ont des débits supérieurs à 2,5 m³.h⁻¹, alors que dans les altérites des granites, on a seulement 19 %. Enfin, dans les schistes, on observe 80 % de taux de succès (pourcentage de forages à débits supérieurs à 1 m³.h⁻¹), alors que dans les granites, on a 70 % de taux de succès. Au vu de ces résultats, il apparaît nettement que les schistes sont plus productifs que les granites.

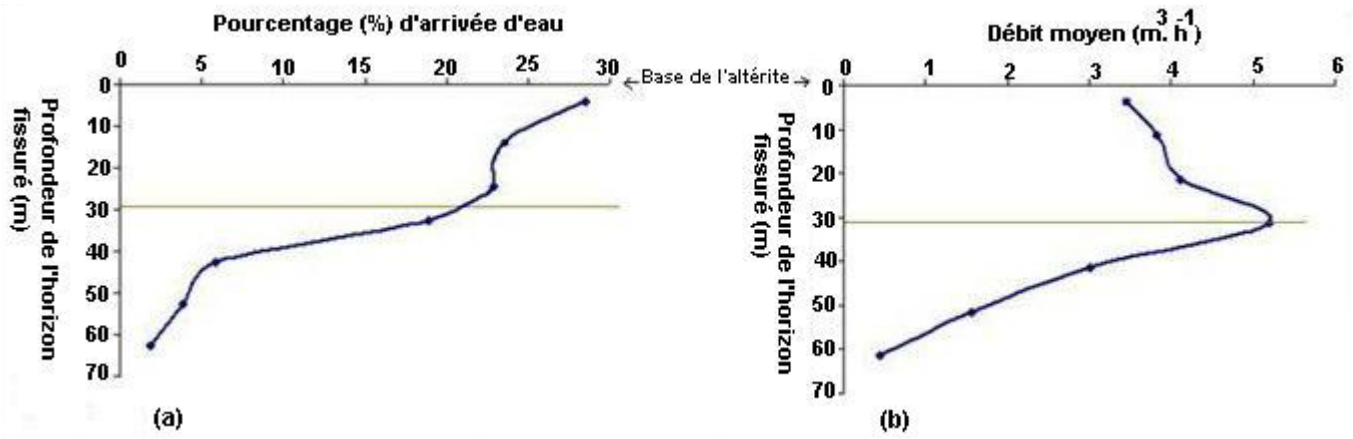


Figure 6. Mise en évidence de la zone de l'horizon fissuré du socle productive : (a) pourcentage d'arrivée d'eau en fonction de la profondeur de l'horizon fissuré; (b) débits moyens en fonction de la profondeur du socle fissuré.
Determination of the hard rock horizon productive zone: (a) water arrival frequency according to the depth of the fissured horizon; (b) average flows according to the depth of fissured horizon.

Tableau 4. Statistique des classes de débit des forages dans les granites et dans les schistes.
Table 4. Statistics for flow classes for bore holes drilled in granite and in schist.

Unités géologiques	Nombre de forages	[0; 1]	Débits Q (m ³ •h ⁻¹)			Total
			[1; 2,5]	[2,5; 5]	> 5	
GRANITE	Altérite	Effectifs	8	7	3	18
	meuble	Pourcentage %	42,35	38,09	19,04	100
	Socle	Effectifs	10	8	14	42
	fissuré	Pourcentage %	24	20	32	100
SCHISTE	Altérite	Effectifs	9	13	8	35
	meuble	Pourcentage %	25,71	37,14	22,85	100
	Socle	Effectifs	22	19	58	135
	fissuré	Pourcentage %	15,74	13,38	44,1	100

2.9 Estimation de la transmissivité par la méthode empirique

Les fréquences de distribution des logarithmes des valeurs de transmissivité (T) et de débit spécifique (Q/s) sont présentées dans un diagramme de probabilité (Figures 7a,b). Les différents points s'organisent suivant une droite, ce qui traduit une distribution normale des valeurs cumulées des logarithmes. Ces diagrammes indiquent donc que les variables T et Q/s sont distribués suivant une loi log-normale, ce qui est classique en hydrogéologie. Ces deux paramètres ont donc été analysés dans un diagramme bi-logarithmique (Figure 7c). Ce diagramme met en évidence la relation empirique entre la transmissivité et le débit spécifique, avec une faible dispersion des points. Le nuage de points s'organise suivant une droite dont les paramètres sont les suivants :

$$\text{Log}(T) = 1,2 \cdot \text{Log}(Q_{sp}) + 0,0507 \quad (4)$$

où :

$$T = 1,052 \cdot (Q/s)^{1,2};$$

avec :

T : transmissivité (m²•s⁻¹);

Q/s : débit spécifique (m²•s⁻¹); et

Coefficient de détermination R² = 0,84.

Le coefficient de détermination (84 %) montre que Log (T) et Log (Q/s) entretiennent une forte corrélation. La relation empirique définie pour les aquifères discontinus de la région de Bongouanou n'est pas trop différente de celles existant dans la littérature. Ainsi, dans les aquifères cristallins et métamorphiques de la région de Man-Danané, à l'ouest de la Côte d'Ivoire, RAZACK et LASM (2006) ont obtenu respectivement T = 0,89 (Q/s)^{1,3} (R² = 0,88). Récemment, dans le sud du bassin de la Volta au Ghana (zone cristalline), YIDANA

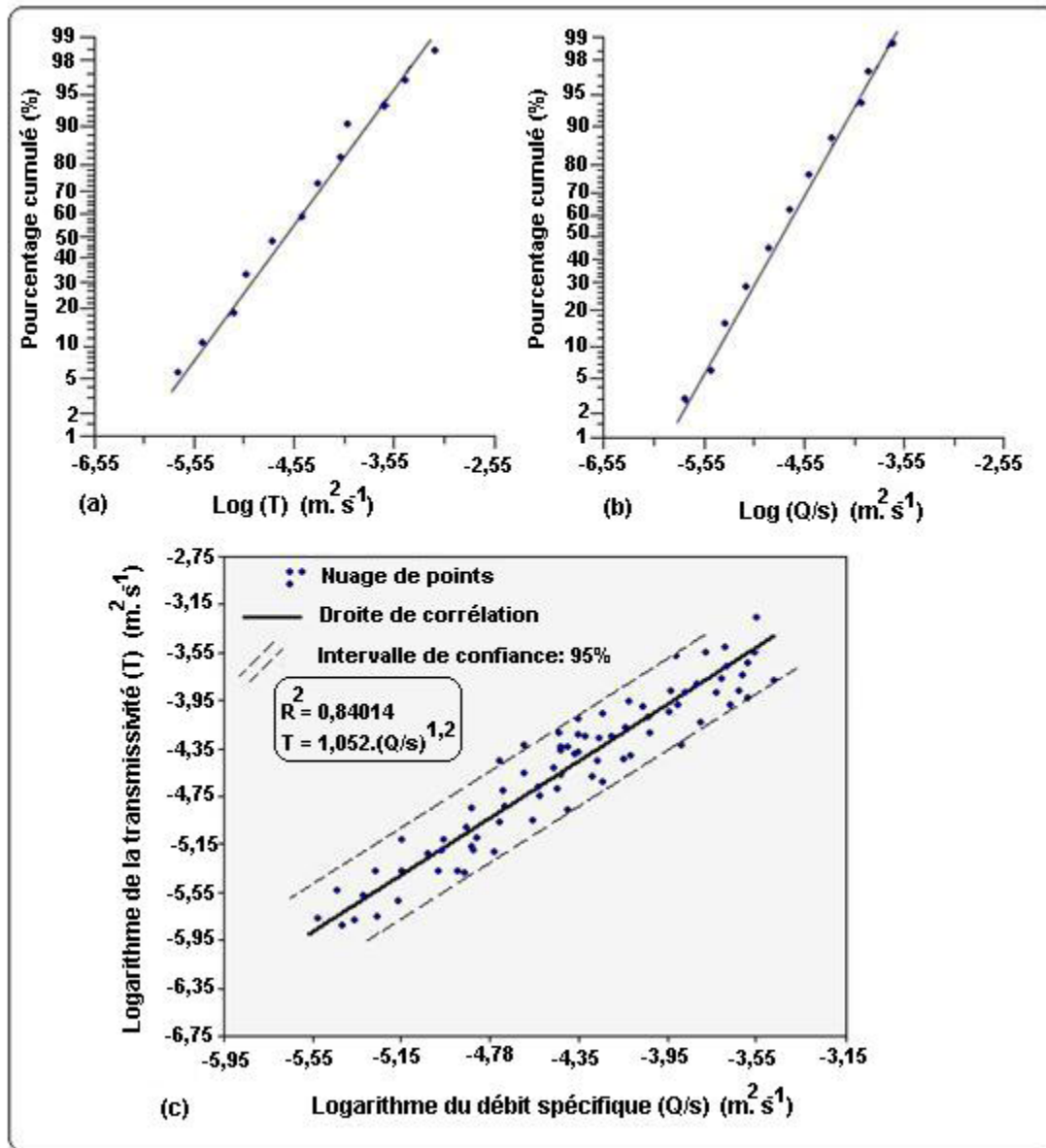


Figure 7. Détermination de la relation empirique entre la transmissivité (T) et le débit spécifique (Q/s) : (a) ajustement à la loi lognormale de T; (b) ajustement à la loi lognormale de Q/s; (c) relation entre Log(T) et Log(Q/s).

Determination of the empirical relation between transmissivity (T) and specific capacity (Q/s): (a) adjustment with the lognormal law of T; (b) adjustment with the lognormal law of Q/s; (c) relation between Log(T) and Log(Q/s).

et al. (2007) ont obtenu $T = 0,769 (Q/s)^{1,075}$ ($R^2 = 0,83$). Ces différentes relations empiriques varient en fonction du contexte hydrogéologique. On constate également que ces expressions montrent aussi des différences significatives dans des environnements géologiques similaires. Ceci indique qu'elles sont spécifiques au site d'étude (RAZACK et LASM,

2006) et/ou à la méthodologie mise en œuvre (type et durée des pompes d'essai, par exemple).

La relation obtenue à Bongouanou peut valablement y servir à proposer une estimation des transmissivités des aquifères par la simple connaissance du débit spécifique.

3. DISCUSSION

Au regard des paramètres des forages analysés, le schéma conceptuel des aquifères de socle de la région de Bongouanou peut être illustré par la figure 8. Ce schéma tient compte des tendances des altitudes des éléments géomorphologiques, des tendances des épaisseurs d'altération (saprolite, d'une part, horizon fissuré, d'autre part) sous chaque élément, des débits qu'on peut tirer dans chaque horizon fissuré et les secteurs d'existence probable d'approfondissements locaux du profil d'altération (discontinuités altérées; DEWANDEL *et al.*, 2011). Deux types de profils géomorphologiques sont donc mis en évidence : celui des plateaux (très probablement ancien) et celui des pentes, sûrement plus récent; les plateaux correspondent sans aucun doute à des profils d'altération anciens, en partie érodés (au droit des pentes); l'altération semble ensuite avoir repris le long des pentes. Ce schéma conceptuel semble similaire à celui élaboré par WYNS (1998). Il s'en distingue néanmoins, au niveau du développement, de l'épaisseur d'altération sur chaque élément géomorphologique. Néanmoins, DEWANDEL *et al.* (2006) ont obtenu un modèle similaire au nôtre dans des aquifères granitiques, quoique avec une moindre amplitude altitudinale. En effet, le modèle conceptuel de WYNS, monophasé, met en évidence une faible épaisseur d'altération sur les pentes et dans les vallées à cause des phénomènes d'érosion qui y affectent le profil d'altération. Dans les formations volcano-sédimentaires de la région de Bongouanou, la topographie est relativement douce, avec

généralement de faibles pentes. On n'observe donc, *a priori*, pas de profils d'érosion aussi importants que sur le modèle de WYNS, élaboré en Europe dans des régions soumises depuis plusieurs millions d'années à une érosion significative (orogénèse alpine).

Par ailleurs, à Bongouanou, les pentes et les fonds de vallée ont la plupart du temps des profils d'altération bien développés avec des couches d'altérites meubles de fortes épaisseurs (souvent plus de 80 m) qui montrent que l'on y a tout particulièrement de fréquentes discontinuités (DEWANDEL *et al.*, 2011) induisant des approfondissements très locaux importants des altérites meubles.

Les horizons fissurés sous-jacents ne sont perméables que sur les 30 premiers mètres. Au-delà de cette profondeur, les venues d'eau sont rares et les débits sont faibles. Ces estimations sont similaires à celles mises en évidence par DEWANDEL *et al.* (2006) dans les granites de l'Inde. Ces résultats confirment aussi les travaux des études antérieures effectuées en Côte d'Ivoire et dans la sous-région (ASSOUMA, 1988; FAILLAT, 1988; N'GO *et al.*, 2005; SOURISSEAU, 1981). En effet, selon WYNS *et al.* (2004), LACHASSAGNE *et al.*, (2011) et DEWANDEL *et al.* (2011), les aquifères de socle doivent leur perméabilité à l'horizon fissuré stratiforme dont la densité des fissures diminue avec la profondeur.

Les différentes valeurs de transmissivité obtenues dans le département de Bongouanou varient entre $4,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,

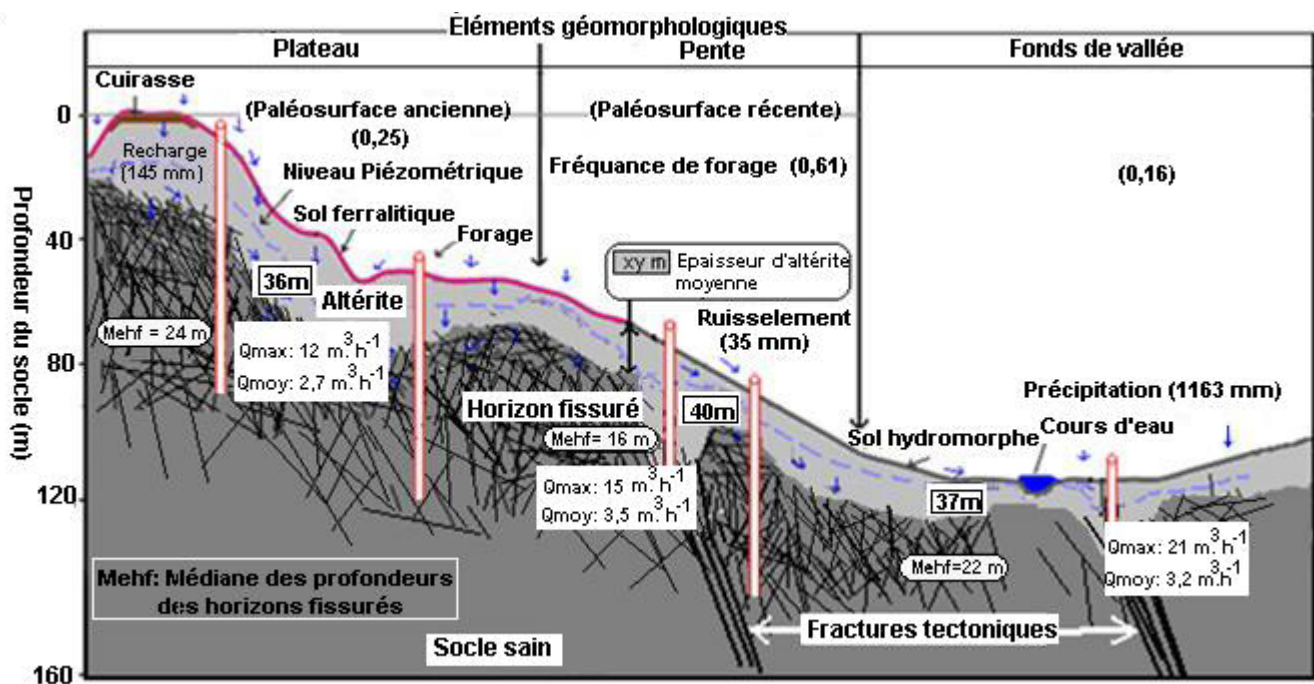


Figure 8. Schéma conceptuel des aquifères de socle du département de Bongouanou.
Schema conceptual model of hard rock aquifers of in the department of Bongouanou.

et $4,1 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, avec une moyenne de $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Elles s'apparentent aux valeurs obtenues en Côte d'Ivoire par SORO (2002) dans la région de Grand Lahou, DIBI et al. (2004) dans la région d'Aboisso et AHOUSI (2008) dans la région d'Agboville. La relation empirique déterminée entre la transmissivité et le débit spécifique dans cette région diffère de celles obtenues par RAZACK et LASM (2006), ACHEAMPONG et HESS (1998), ROTZOLL et EL-KADI (2008) et YIDANA et al. (2007). Toutes choses qui confirment le fait que les relations entre T et Q/s varient d'un site à un autre et sont donc spécifiques à l'environnement géologique et/ou à la méthodologie mise en œuvre pour l'évaluation respective de T et de Q/s.

4. CONCLUSION

Le socle du département de Bongouanou a une productivité en eau souterraine relativement modeste. La recharge annuelle est estimée à environ 145 mm. En effet, les moyennes des débits, des débits spécifiques et des transmissivités dans ce milieu fissuré sont respectivement $4,36 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $1,3 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et $1,4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Cependant, il faut aussi noter que les schistes qui constituent les formations majeures (80 %) sont plus productifs que les granites. Par ailleurs, les forages implantés sur les pentes et les fonds de vallée obtiennent des débits plus importants que les plateaux. Dans cette région, ce sont les épaisseurs d'altérites comprises entre 15 et 60 m qui sont corrélées à la plus forte productivité en eau de l'horizon fissuré. Dans cette région, à partir de la surface du sol du point de forage, les profondeurs optimales très productives en eau souterraine sont comprises entre 40 à 70 m pour les granitiques et 40 à 80 m pour les schistes. Pour être plus précis, en dessous de la base des altérites, ce sont seulement les 30 premiers mètres de l'horizon fissuré qui sont plus perméables, au-delà de cette profondeur, les perméabilités tendent à diminuer très sensiblement. Enfin, ce travail montre aussi que c'est la partie supérieure de l'horizon fissuré qui est généralement plus productive en eau souterraine dans ce socle.

REMERCIEMENTS

Les auteurs adressent leurs sincères remerciements aux correcteurs anonymes dont les commentaires ont permis d'améliorer le manuscrit.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACHEAMPONG S.Y. et J.W.HESS (1998). Hydrogeological and hydrochemical framework of the shallow groundwater system in the southern Voltaian Sedimentary Basin, Ghana. *Hydrogeol. J.*, 6, 527-537.
- AHOUSI K.E. (2008). *Évaluation 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, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 270 p.
- ASSEMIAN A.E, F.K. KOUAME, É.V. DJAGOUE, K. AFFIAN, J.P.R. JOURDA, M. ADJA, T. LASM et J. BIEMI (2013). Étude de l'impact des variabilités climatiques sur les ressources hydriques d'un milieu tropical humide : cas du département de Bongouanou (Est de la Côte d'Ivoire). *Rev. Sci. Eau*, 26, 247-261.
- ASSOUMA. D. (1988) *Étude par modèle mathématique de la structure et du fonctionnement d'un aquifère de socle exploité, en région tropicale (alimentation en eau potable de la ville de Dapaong-Togo)*. Thèse de Doctorat, 3^e cycle, Université Orléans, France, 183 p.
- COOPER H.H. and C.C. JACOB (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Am. Geophys. Union Trans.*, 27, 526-534.
- COURTOIS N., P. LACHASSAGNE, R. WYNS, R. BLANCHIN, F.D. BOUGAIRE, S. SOME et A. TAPSOBA (2009). Large-scale mapping of hard rock aquifer properties applied to Burkina Faso. *Groundwater*, 48, 269-283.
- DEWANDEL B., P. LACHASSAGNE, B. LADOCHE, J.L. PINAUT et A. AL-MAKL (2005). A conceptual model of the structure and functioning of the Oman ophiolite hard-rock aquifer through a pluridisciplinary and multiscale approach. *Hydrogeol. J.*, 13, 708-726.
- DEWANDEL B, P. LACHASSAGNE, R. WYNS, J.C. MARÉCHAL et N.S. KRISHNAMURTHY (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *J. Hydrol.*, 330, 260-284.

- DEWANDEL B., P. LACHASSAGNE, F.K. ZAIDI et S. CHANDRA (2011). A conceptual hydrodynamic model of a geological discontinuity in hard rock aquifers: Example of a quartz reef in granit terrain in South India. *J. Hydrol.*, 405, 474-487.
- DHH (2001). *Hydraulique humaine en Côte d'Ivoire*. Ministère des Infrastructures Économiques, Direction de l'Hydraulique Humaine, Abidjan, Côte d'Ivoire, 66 p.
- DIBI B., B.T, INZA, I. GOULA, I.SAVANE et J. BIEMI (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 Sci. Technol.*, 13, 22-31.
- FAILLAT J.P. (1988). *Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest)*. Thèse de l'État, Univ. Languedoc (Montpellier), France, 534 p.
- HAMM S.T., J.Y CHEONG, S. JANG, C.Y. JUNG et B.S. KIM (2005). Relationship between transmissivity and specific capacity in the volcanic aquifers of Jeju Island, Korea. *J. Hydrol.*, 310, 111-121.
- HASSANE B.A. (2010). *Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique, cas de la communauté urbaine de Niamey (NIGER)*. Thèse de Doctorat, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger, 198 p.
- JALLUDIN M. et M. RARACK (2004). Assessment of hydraulic properties of sedimentary and volcanic aquifer systems under arid conditions in the Republic of Djibouti (Horn of Africa). *Hydrogeol. J.*, 12, 159-170.
- KRUSERMAN G.P. et A. DE RIDDER (1990). Analysis and evaluation of pumping test data. Publication Series n°4. Dans : *International Institute for Land Recycle and Improvement (IILRI)*, Wageningen, The Netherlands, 213 p.
- LACHASSAGNE P., J.C. MARÉCHAL, S.H. AHMED, B. DEWANDEL, J.M. GANDOLFI, N.S. KRISHNAMURTHY et R. WYNS (2005). Nouveaux outils et méthodes pour gérer et protéger la ressource en eau souterraine des régions de socle. *Hydrosci. Hydroplus*, 150, 54-57.
- LACHASSAGNE P., R. WYNS et B. DEWANDEL (2011). The fracture permeability of hard rock aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 30, 145-161.
- LASM T. (2000). *Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : analyses statistiques 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, 220 p.
- MACÉ R.E. (2000). *Estimating transmissivity using specific-capacity data*. http://www.twdb.state.tx.us/gam/GAM_documents/sc_report.pdf, (consulté le 10 juin 2013).
- MARÉCHAL J.C., R. WYNS, P. LACHASSAGNE, K. SUBRAHMANYAM et F. TOUCHARD (2003). Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle : concordance avec la structure géologique des profils d'altération. *C.R. Geosci.*, 335, 451-460.
- MIGON P. et K. LIDMAR-BERGSTRÖM (2002). Deep weathering trough time in central and northwestern Europe: problems of dating and interpretation of geological record. *Catena*, 49, 25-40.
- N'GO Y.A., D.L GONE, I. SAVANE et M.M GOBLE (2005). Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) : caractérisation hydroclimatique et physique. *Afrique Sci.*, 1, 127-144.
- RAZACK M. et T. LASM (2006). Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). *J. Hydrol.*, 325, 164-178.
- ROTZOLL K. et A.I. EL-KADI (2008). Estimating hydraulic conductivity from specific capacity for Hawaii aquifers, USA. *Hydrogeol. J.*, 16, 969-979.
- SORO N. (2002). *Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand Lahou et ses environs (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Implication hydrologique et hydrogéologique*. Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 272 p.
- SOURISSEAU B. (1981). *Hydraulique villageoise dans le département du Sahel (Haute Volta)*. Rapport final, Rép. de Haute Volta, BRGM, 69 p.
- SRIVASTAV S. K.M. WLUBCZYNSKI et K. BIYANIA (2007). Upscaling of transmissivity, derived from specific capacity: a hydrogeomorphological approach applied to the Doon Valley aquifer system in India. *Hydrogeol. J.*, 15, 1251-1264.

- TARDY Y. et C. ROQUIN (1998). *Dérive de continents, paléoclimats et altérations tropicales*. Éditions du BRGM, Orléans, France. Rapport BRGM, 472 p.
- TAYLOR R. et K. HOWARD (2000). A tectono-geomorphic model of the hydrogeology of deeply weathered crystalline rock: evidence from Uganda. *Hydrogeol. J.*, 8, 279-294.
- THORNTHWAITE C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geograph. Rev.*, 38, 55-94.
- TIXERONT J. (1964). Préviation des apports des cours d'eau : Dans : *Symposium Eau de Surface*, tenu à l'occasion de l'Assemblée Générale de Berkely de L'UGGI, Berkely, CA, États-Unis, pp. 118-126.
- WYNS R. (1998). PRD324. *Hydrogéologie des aquifères discontinus. Ressources en eau Margeride Ouest. Modélisation de la géométrie (altitude, épaisseur) des arènes granitiques du bassin versant lozérien de la Truyère (Lozère, Massif Central)*. Rapport BRGM N° R40191, 18 p., 9 fig.
- WYNS R. (1991) L'utilisation des paléosurfaces continentales en cartographie probabiliste. *Geol. France*, 3, 1-10.
- WYNS R. (2002). Climat, eustatisme, tectonique : quels contrôles pour l'altération continentale ? Exemple des séquences d'altération cénozoïques en France. *Bull. Inf.Ass. Geol. Bass. Paris*, 39, 5-16.
- WYNS R. J. M.BALTASSAT, P. LACHASSAGNE, A. LEGTCHENKO et J. VAIRON (2004). Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). *Bull. Soc. Geol. France*, 175, 21-34.
- YIDANA S.M., D. OPHORI et B. BANOEN-YAKUBO (2007). Hydrogeological and hydrochemical characterization of the Voltaian Basin: the Afram Plains area, Ghana. *Environ. Geol.*, 54, 1751-1762.
- YOUAN TA, M. (2008). *Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Cas de la région de Bondoukou Nord-Est de la Côte d'Ivoire*. Thèse de Doctorat, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 236 p.