

Propriétés des aquifères de socle du Bénin: analyse multi-variables et multi-échelles des paramètres de contrôle

Properties of Benin hard rock aquifers: multivariables and multiscale analysis of controlling parameters

Vouillamoz, J.M.⁽¹⁾; Tossa, A.Y.A.⁽²⁾; Chatenoux, B.⁽³⁾; Kpegli, K.A.R.⁽⁴⁾

(1) IRD/UJF-Grenoble-1/CNRS/G-INP – UMR LTHE, jean-michel.vouillamoz@ird.fr

(2) Direction Générale de l'Eau du Bénin, aureltoss@gmail.com

(3) IRD/UJF-Grenoble-1/CNRS/G-INP – UMR LTHE, gisinfo@bchate.name

(4) Université d'Abomey-Calavi/Institut National de l'Eau, raoulkpegli@yahoo.fr

I. INTRODUCTION

Environ 80% de la superficie du Bénin est occupée par des roches de socle (Fig. 1a). Ces roches se sont essentiellement développées lors de l'orogénèse panafricaine (610-570 Ma) puis ont été altérées et érodées. Les aquifères de ces roches métamorphiques (gneiss, migmatite, schiste, mylonite, etc...) sont exploités par des puits et forages pour l'approvisionnement en eau domestique des zones rurales mais également des villes. Depuis les années 2000, plus de 1 000 nouveaux points d'eau sont ainsi réalisés en moyenne chaque année, et le taux de desserte en 2012 est estimé à environ 63% de la population (http://eaubenin.bj/site/index.php/taux_desserte_eau_potable/). Bien que le nombre de points d'eau réalisés chaque année soit conséquent, le taux de desserte national n'évolue que lentement car l'augmentation du nombre de points d'eau est compensée par l'augmentation de la population. Or 40% des forages qui sont réalisés chaque année sont négatifs et donc abandonnés: réduire le nombre de forages négatifs pourrait donc permettre d'augmenter le taux de desserte sans augmenter significativement les investissements.

L'implantation des forages est contractuellement réalisée par des bureaux d'étude dont l'objectif est de localiser une fracture d'origine tectonique susceptible d'être productrice. Après une analyse du contexte (géologie, rapports d'études antérieures, recherche de linéaments par photo-interprétation) des trainés électriques sont réalisés pour confirmer l'existence de la fracture, puis des sondages électriques pour caractériser l'anomalie géophysique identifiée par trainée.

Notre étude vise à vérifier si la cible hydrogéologique généralement visée pour implanter les forages (la fracture d'origine tectonique) contrôle effectivement le succès et les propriétés des forages. Pour ce faire, nous avons cherché les relations entre les propriétés des forages et les propriétés des aquifères à différentes échelle spatiales.

II. MATERIEL ET METHODE

Les propriétés des forages ont été calculées à partir des données de la Banque de Données Intégrée (BDI) de la Direction Générale de l'Eau du Bénin (<http://eaubenin.bj/site/index.php/bdi/>). Après un contrôle qualité, 3 415 forages ont été retenus. L'épaisseur de la zone altérée (ZA) des aquifères est estimée comme l'épaisseur de roche non-consolidée qui a été forée au rotary, l'épaisseur de la zone fissurée et altérée (ZFA) est estimée à partir de la profondeur forée sous la ZA au marteau-fond-de-trou. Les débits instantanés sont les débits mesurés en fin de développement, et les débits spécifiques sont calculés comme le rapport du débit instantané sur le rabattement induit.

Le modèle numérique d'altitude utilisé est issu d'une image SRTM avec une résolution de 90m (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>), l'image satellite utilisée est une image Landsat 8 (2013), et la carte

géologique au 1/200 000 de la zone étudiée a été digitalisée (Office Béninois des Mines, 1984). L'ensemble des analyses spatiales a été réalisé avec le logiciel libre QGIS (<http://www.qgis.org/fr/site/>).

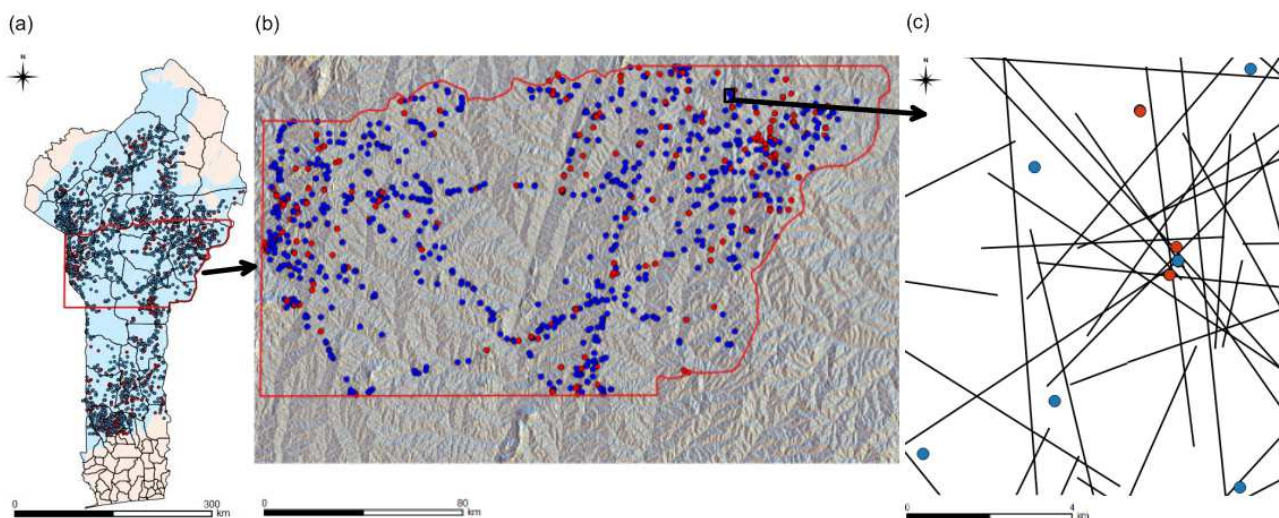


Figure 1 – Zone d'étude. (a) Zone de socle du Bénin (bleu) et forages utilisés (positifs en bleu et négatifs en rouge). (b) Fenêtre d'étude, forages et relief ombragé. (c) Exemple d'un site d'étude, forages et linéament.

Nous avons dans un premier temps calculé les propriétés des forages et estimé les propriétés des aquifères de socle à l'échelle nationale du Bénin (Fig 1a; 87 000 km²). Nous avons ensuite défini une fenêtre d'étude de 27 000 km² dans laquelle les propriétés des forages ont été analysées au regard de leurs coordonnées géographiques et des unités géologiques du socle (Fig. 1b). Enfin, nous avons étudié à l'échelle du site (de 1 à 10 km²) les relations entre les propriétés des forages et des aquifères (Fig. 1c).

III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 Statistiques nationales

Aucune arrivée d'eau n'a été détectée en cours de foration pour 34% des forages, et 40% de 3 415 forages sont considérés comme négatifs car leur débit instantané est inférieur aux 700 l/h nécessaires pour alimenter une pompe à motricité humaine (Fig. 2a). On note également que seuls 17% des forages ont un débit instantané supérieur aux 3,6 m³/h susceptibles d'alimenter un réseau. Ces résultats sont très proches de ceux obtenus dans les roches de socle du Burkina Faso voisin du Bénin (Courtois et al., 2010).

50% des forages positifs ont une profondeur comprise entre 43 et 60 m (Fig. 2b). L'épaisseur de la ZA est comprise entre 11 et 25 m (1^{er} et 3^{ème} quartiles, Fig. 2c) et l'épaisseur de la ZFA entre 21 et 41 (1^{er} et 3^{ème} quartiles). Le profil d'altération est donc bien développé et l'altération non-consolidée encore en place sur plus de dix mètres d'épaisseur.

80% des 4 600 arrivées d'eau notées en cours de foration sont enregistrées à moins de 48 m de profondeurs (et 90% à moins de 56 m), soit à la base de la ZA ou dans les premiers mètres de la ZFA (Fig. 2c). Remarquons que les arrivées d'eau situées dans la ZA ne sont pas notées car elles sont masquées par la technique de foration au rotary. Le réservoir saturé et productif se situe donc dans la ZA et dans les premiers mètres d'épaisseur de la ZFA. A l'échelle nationale, les aquifères exploités par les forages positifs se sont développés à la faveur des processus d'altération à l'origine de la ZA et de la ZFA (Lachassagne et al., 2011).

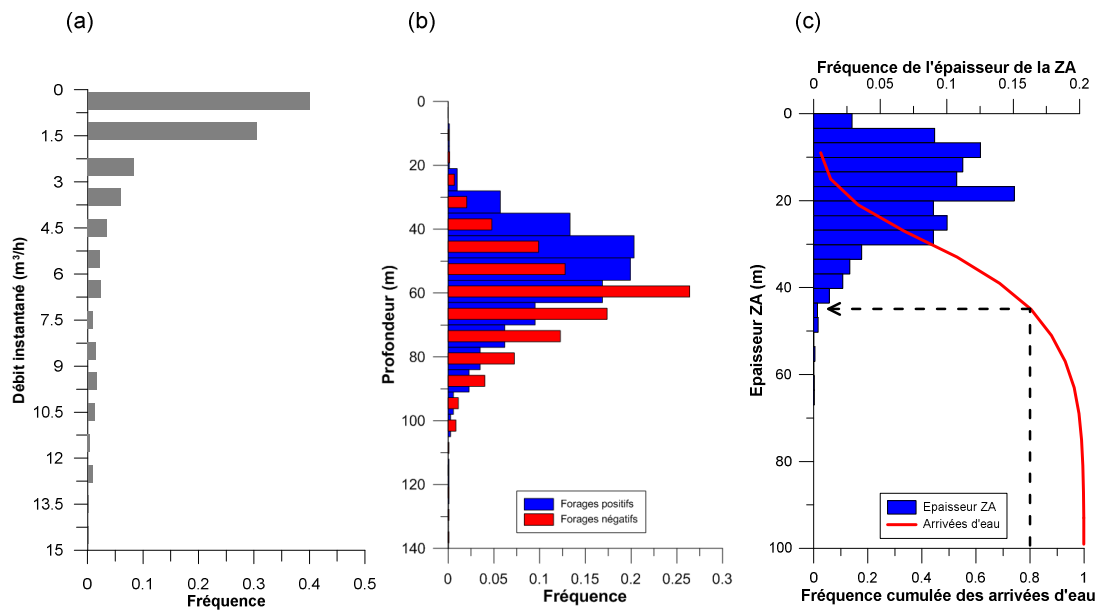


Figure 2 – Statistiques des forages. (a) Débit instantané. (b) Profondeur des forages. (c) Epaisseur de la ZA et profondeur des arrivées d'eau.

III. 2 Echelle régionale

La fenêtre sélectionnée de 27 000 km² recoupe la direction structurale du socle au Bénin et comprend 10 unités géologiques et 1 203 forages retenus (Fig. 3a). L'épaisseur de la ZA ainsi que le débit spécifique des forages ne semblent pas être contrôlés au premier ordre par les unités géologiques (Fig. 3b). Sur l'ensemble de la fenêtre, on note par contre une bonne corrélation entre les débits spécifiques des forages et l'épaisseur de la ZA (coefficient de corrélation de 0.8).

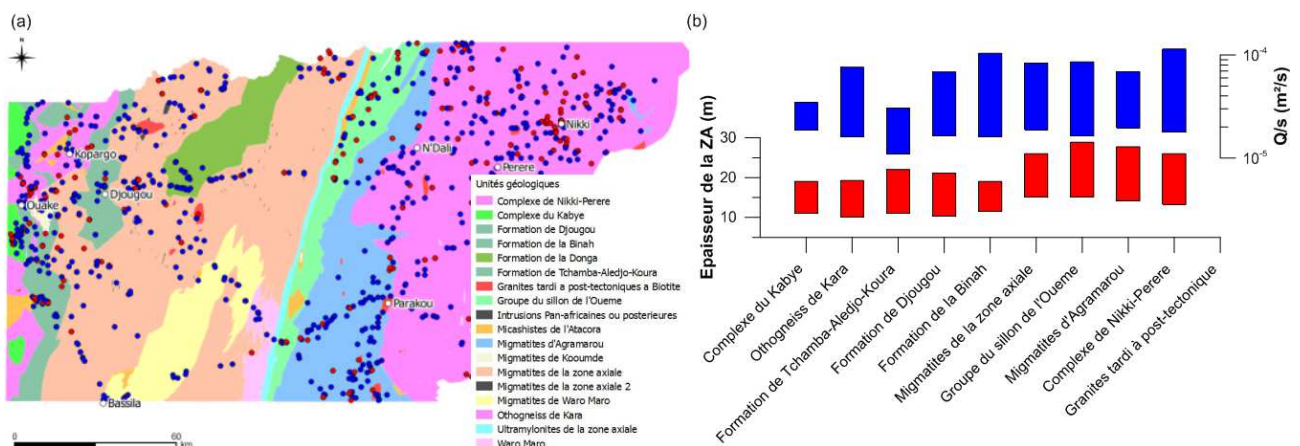


Figure 3 – Fenêtre d'étude. (a) Unités géologiques et forages (les noms sont les principales agglomérations). (b) Epaisseur de la ZA et débit spécifique pour les principales unités géologiques.

Pour chercher si les propriétés des forages suivent une logique spatiale en dehors de la distribution des unités géologiques, la fenêtre d'étude est découpée en bandes suivant la direction structurale Nord-Sud (Fig. 4a). La largeur des bandes est fixée à 10 km pour être supérieure aux longueurs de linéament comprises entre 1,2 et 4 km (1^{er} et 3^{ème} quartiles). Le taux de succès des forages suit une distribution longitudinale assez nette: il est maximum dans la moitié Ouest de la fenêtre (entre les longitudes 350 000

et 425 000 m, Fig. 4b). L'épaisseur de la ZA est distribuée suivant la même logique longitudinale alors que la densité de linéaments est distribuée de façon quasi inverse: elle est plus importante au centre de la fenêtre qui correspond à une zone de plus basse altitude où l'épaisseur de la ZA est minimale. L'érosion semble ainsi avoir décapé une partie de la ZA et marquée la topographie au centre de la fenêtre, permettant ainsi aux linéaments d'apparaître plus clairement.

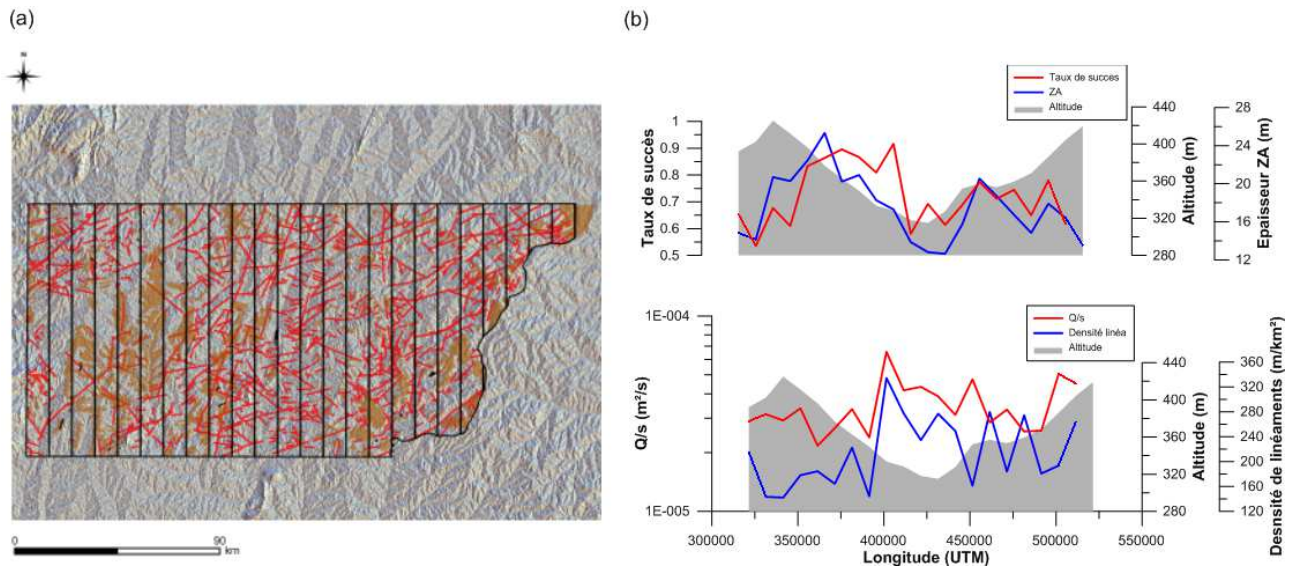


Figure 4 – Analyse longitudinale. (a) Fenêtre d'étude et découpe longitudinale avec relief ombragé, linéaments et altération cartographiée. (b) Variations longitudinales.

Pour juger de la signification statistique des relations qui semblent se dessiner, une analyse en composante principale est conduite. Nous ne présentons dans ce résumé que les corrélations significatives issues de cette analyse en composante principale. Le taux de succès des forages est corrélé avec l'épaisseur de la ZA (coefficient de corrélation de 0,66, Fig 5a) et avec la surface d'altération calculée à partir de la carte géologique (coefficient de corrélation 0,53, Fig. 5b). Par contre, la relation entre la densité de linéament et le débit spécifique des forages n'est statistiquement pas significatif (idem si on considère la direction des linéaments, Fig. 5c).

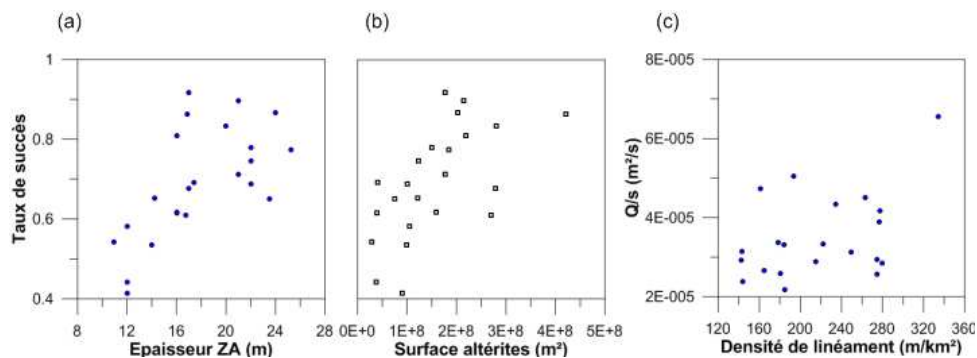


Figure 5 – Corrélations à l'échelle régionale. (a) Taux de succès des forages et épaisseur de la ZA. (b) Taux de succès des forages et surface d'altération. (c) Débit spécifique et densité de linéament.

III. 3 Echelle du site

Sur les 6 sites d'études sélectionnés dans des unités géologiques différentes (Fig. 6a), 42 forages sont répertoriés dont 15 négatifs et 27 positifs (Fig. 6b). L'incertitude sur la localisation des forages et des

linéaments étant d'environ 100 m, les forages sont regroupés en classe de distance de 100 m. Une relation semble se dessiner entre la distance horizontale au linéament et le débit spécifique des forages: les forages semblent plus productifs s'ils sont situés à moins de 200 m d'un linéament (Fig. 7a). Notons cependant que le succès des forages n'est pas corrélé à la distance au linéament et qu'un forage a des chances encore significatives d'être négatif même si il est à moins de 200 m d'un linéament (Fig. 7b).

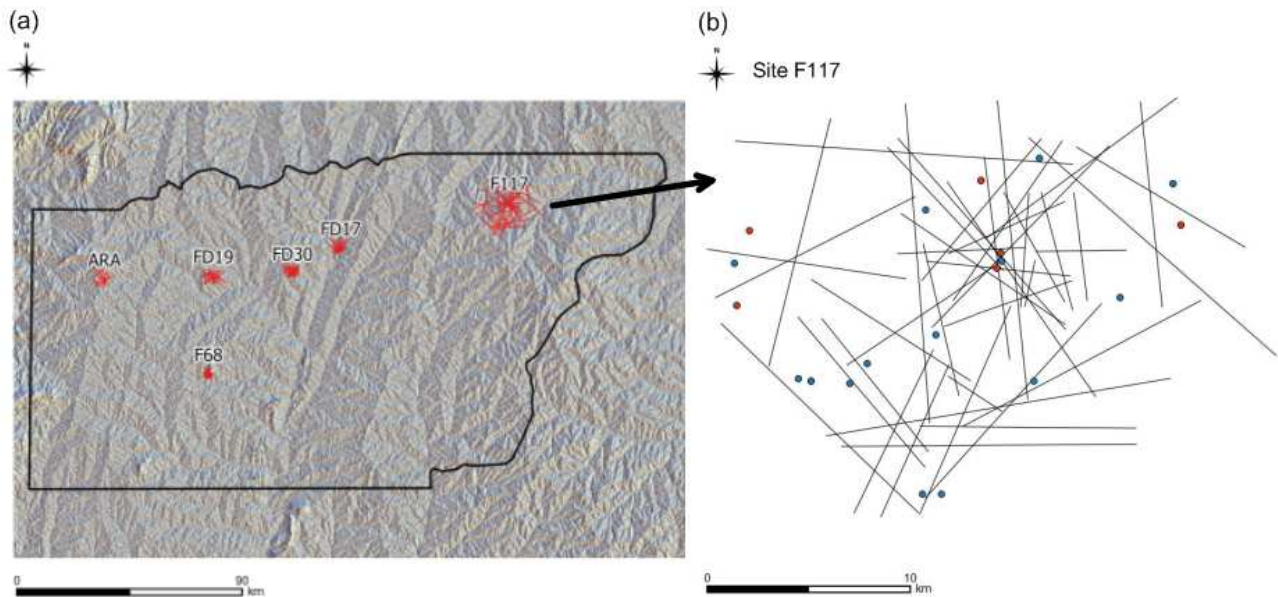


Figure 6 – Sites expérimentaux. (a) Localisation des sites expérimentaux dans la fenêtre d'étude et linéaments (b) Exemple du site expérimental F117, forages utilisés (positifs en bleu et négatifs en rouge) et linéaments.

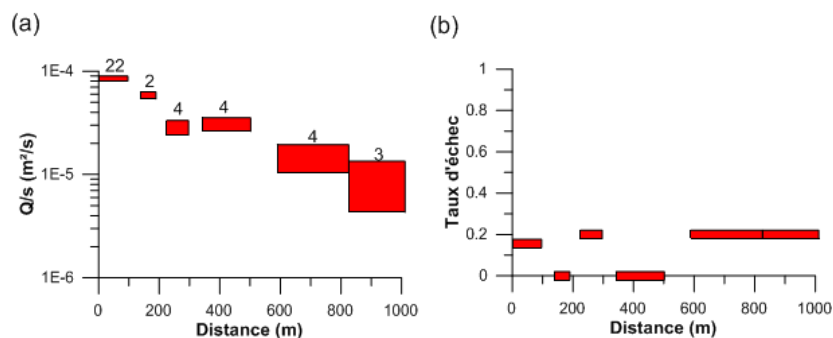


Figure 7 – Forages vs distance aux linéaments. (a) Débit spécifique vs distance, les nombres indiquent le nombre de forages pour chaque classe de distance. (b) Taux d'échec (forage négatif) vs distance.

Enfin, les pompages de 72h réalisés dans des forages des sites expérimentaux indiquent que sur 2 des 6 sites, des forages situés à moins de 20 m l'un de l'autre ne sont pas connectés hydrauliquement au travers d'un réseau de fissures mais uniquement au travers de l'altération non-consolidée.

IV. CONCLUSION

L'analyse statistique de la banque de données intégrée du Bénin indique que 40% des forages réalisés dans le socle sont négatifs malgré l'application d'une méthodologie d'implantation basée sur la recherche de fracture tectonique. De plus, seulement 17% des forages ont un débit instantané supérieur à 3,6m³/h.

A l'échelle nationale, les niveaux productifs sont situés dans l'altération non-consolidée et dans les premiers mètres d'épaisseur de l'altération consolidée (zone fissurée/altérée). L'analyse des forages à l'échelle régionale confirme cette observation: l'épaisseur d'altération non-consolidée contrôle le taux de succès des forages mais également les débits spécifiques, alors que la densité de linéaments ne semble pas influencer sur la productivité des forages. Enfin, à l'échelle du site, implanter un forage à proximité d'un linéament ne permet pas d'augmenter les chances de réaliser un forage positif mais semble permettre d'obtenir une productivité instantanée (débit spécifique) plus élevée.

L'ensemble de ces observations indique que les aquifères se sont essentiellement développés à la faveur des processus d'altération agissant depuis la surface du sol plutôt que depuis la fracturation tectonique. Aussi, la stratégie d'implantation actuellement utilisée qui vise à systématiquement rechercher la fracturation tectonique pourrait être révisée et recentrée sur la recherche d'altération non-consolidée la plus épaisse et la moins argileuse possible. Les mesures géophysiques mises en œuvre sur le terrain (trainé et sondage électriques) ne sont pas les plus appropriées à la caractérisation de l'altération non-consolidée et de nouvelles approches devraient être adoptées avec notamment la réalisation de mesures de résistivité électrique en 2 dimensions (Allé et al., ce volume) et de mesures par Résonance Magnétique Protonique aptes à estimer non seulement la productivité mais également la réserve du milieu (Lawson et al., ce volume). Cependant, l'hétérogénéité des aquifères à l'échelle décamétrique (connectivité des fissures de la zone fissurée/altérée) ne pourra pas être renseignée par la géophysique de surface et seule une démarche intégrée hydrogéophysique pourrait significativement augmenter le taux de succès et la productivité des forages.

En comprenant mieux quelles propriétés des aquifères contrôlent le succès et la productivité des forages, cette étude ouvre la perspective de spatialiser et de cartographier les zones les plus intéressantes pour la réalisation de forages positifs (Lachassagne et al., 2001). Couplée au travaux réalisés sur les réserves en eau du socle (Lawson et al., ce volume), ce travail pourrait également permettre de spatialiser les prélèvements admissibles pour une gestion raisonnée des aquifères de socle du Bénin.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet GRIBA (Groundwater Resources in Basement Rocks of Africa) financé par l'Union Africaine, l'Union Européenne et l'IRD (grant AURG/098/2012). Le contenu de ce papier est de la seule responsabilité des auteurs et ne peut en aucune circonstance être considéré comme reflétant la position de l'Union Africaine ou de l'Union Européenne.

Références bibliographiques :

- Allé, C.; Descloitres, M.; Vouillamoz, J.M.; Yalo, N.; Lawson, M.; Adihou, C., (2015). Caractérisation des aquifères de socle par la résistivité électrique: pratique de l'implantation des forages et perspectives d'amélioration au Bénin. « Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles » La Roche-sur-Yon, juin 2015.
- Courtois, N., Lachassagne, P., Wyns, R., Blanchin, R., Bougaïré, F.D., Somé, S., Tapsoba, A., (2010). Large-Scale Mapping of Hard-Rock Aquifer Properties Applied to Burkina Faso. *Ground Water* 48, 269–283.
- Lachassagne, P., Wyns, R., Bérard, P., Bruel, T., Chéry, L., Coutand, T., Desprats, J.-F., Le Strat, P., (2001). Exploitation of High-Yields in Hard-Rock Aquifers: Downscaling Methodology Combining GIS and Multicriteria Analysis to Delineate Field Prospecting Zones. *Ground Water* 39, 568–581. doi:10.1111/j.1745-6584.2001.tb02345.x
- Lachassagne, P., Wyns, R., Dewandel, B., (2011). The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova* 23, 145–161. doi:10.1111/j.1365-3121.2011.00998.x
- Lawson, F.M.A.; Vouillamoz, J.M.; Yalo, N.; Descloitres, M., (2015) Application de la Résonance Magnétique Protonique à la caractérisation des aquifères de socle: exemple du Bénin. « Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles » La Roche-sur-Yon, juin 2015.
- Office Béninois des Mines, (1984). Notice explicative de la carte géologique à 1/200 000 (Feuille Djougou-Parakou-Nikki).