

Cartographie des zones de potentielles recharges de nappes d'eau souterraines dans le département des Collines

[Mapping of potential groundwater recharge areas in Collines department]

Okoundé K. J. Eudes¹, F. Avahounlin Ringo¹⁻², C. Kédomé Nelly³, Sambiénou Gédéon¹, and W. Vissin Expédit⁴

¹Chaire Internationale de Physique Mathématique et Applications (CIPMA CHAIRE-UNESCO, FAST, UAC), Benin

²Ecole Normale Supérieure (ENS, UNSTIM), Benin

³Département des Sciences de la Terre (DST, FAST, UAC), Benin

⁴Département de Géographie et de l'Aménagement du Territoire (DGAT, FASH, UAC), Benin

Copyright © 2022 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Benin's renewable water resource potential is no less important. In the basement regions such as the Collines department, the hydrogeological characteristics made of crystalline rocks condition the recharge of the aquifers and therefore the durability of the boreholes drilled. The objective of this study is to determine the potential groundwater recharge zones at the scale of collines aquifer systems. Thus from planimetric data made of geological, pedological, hydrographic, slope, land use maps; satellite images and technical data from 50 boreholes, piezometric level mapping methods associated with multi-criteria analysis methods were applied. It appears from the results obtained that the aquifer system of the Hills located in a hydrogeologically difficult zone is made of a strong potential of recharge. The piezometric levels vary between around 40 m and 320 m. The highest are located in the north (recharge zone) of the department and gradually decrease towards the south to minimum values of 40 m. The general trend of the flow is from North to South with domes and depressions. The main domes are in the north in the municipalities of Bantè and Ouessè. Depressions are observed south of the communes of Savalou and Dassa-Zoumè. The domes constitute the groundwater recharge zones while the depressions are the discharge zones. Recharge areas require protective measures to avoid pollution in the aquifer system.

KEYWORDS: Collines; groundwater tables; piezometric levels; charging areas.

RESUME: Le potentiel en ressources en eau renouvelable du Bénin est non moins important. Dans les régions de socle comme le département des collines, les caractéristiques hydrogéologiques faites de roches cristallines conditionnent la recharge des nappes donc la pérennité des forages réalisés. La présente étude a pour objectif de déterminer les potentiels zones de recharges des nappes d'eau souterraine à l'échelle des systèmes aquifères des collines. Ainsi à partir des données planimétriques faites de cartes géologiques, pédologiques, hydrographiques, de pentes, l'occupation du sol; les images satellitaires et les données techniques de 50 forages, des méthodes de cartographies des niveaux piézométriques associées aux méthodes d'analyse multicritère ont été appliquées. Il ressort des résultats obtenus que le système aquifère des Collines situé dans une zone hydrogéologiquement difficile est faite d'un fort potentiel de recharge. Les niveaux piézométriques varient entre 40 m et 320 m environs. Les plus élevés se situent au Nord (zone de recharge) du département et diminuent graduellement vers le Sud jusqu'aux valeurs minimales de 40 m. La tendance générale de l'écoulement est du Nord vers le Sud avec des dômes et des dépressions. Les principaux dômes se trouvent au Nord dans les communes de Bantè et de Ouessè. Les dépressions sont observées au Sud des communes de Savalou et de Dassa-Zoumè. Les dômes constituent les zones de

recharges de la nappe tandis que les dépressions sont les zones de décharges. Les zones de recharge nécessitent des mesures de protection afin d'éviter toute pollution dans le système aquifère.

MOTS-CLEFS: Collines; nappes d'eau souterraine; niveaux piézométriques; zones de recharge.

1 INTRODUCTION

La garantie de l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement d'une part et l'assurance d'une gestion durable des ressources en eau d'autre part est l'un des objectifs pour le développement durable (ODD, 2015). Et d'ici l'horizon 2030, il est impératif d'assurer l'accès universel et équitable à l'eau potable, à un coût abordable (ODD6.1, 2015). Dans cette course contre la montre, des approches radicalement différentes comprenant une variété de solutions adaptées à chaque région doivent être envisagées (Jean P. Jourda et al, 2015). Le Bénin, dans l'optique d'une meilleure gestion de ces ressources en eau a adhéré à l'instar de la communauté internationale aux conclusions des différentes rencontres internationales intégrant le secteur de l'eau dont celle de Rio+20. Et pour assurer la fourniture et la distribution d'eau potable aux populations, plusieurs communes du Bénin font recours aux ouvrages simples de captage (puits à grand diamètre, forage, sources aménagées) des eaux en opposition aux adductions d'eau villageoises, plus complexes à réaliser, à exploiter et à gérer (H. Yarou, 2017). En effet, le potentiel en ressources en eau renouvelable du Bénin est non moins important. Et du fait, la disponibilité des ressources en eau, ne serait-ce qu'en quantité, ne devrait pas constituer un facteur limitant pour le développement socio-économique du pays (Tossou, 2016). Il faut cependant relativiser cette abondance des ressources en eau car, sur l'ensemble du territoire national, elle est inégalement répartie, notamment en ce qui concerne les eaux souterraines. Les 80 % du territoire (partie centrale et nord du pays) sont constitués de socle et ne renferment que 20 % des réserves d'eau souterraine (*Direction de l'Hydraulique, 1999*). Dans les régions de socle comme le département des collines, les caractéristiques hydrogéologiques faites de roches cristallines conditionnent la recharge des nappes donc la pérennité des forages réalisés. Une étude réalisée sur près de 5300 forages a montré que le taux de réussite des forages est de 70 à 90% dans les zones de roches sédimentaires mais se limite à environ 60% dans le socle avec le taux le plus faible de moins de 50% dans le département des collines (JICA, 2018). D'après les mêmes auteurs, la recharge des aquifères reste la plus faible (150 mm/an) dans cette partie du pays aux observatoires de Savè et Bohicon. Pour donc remédier aux problèmes de pénurie et par la suite à l'abandon des points d'eau de forage, il urge qu'une bonne évaluation des recharges avant toute réalisation des forages. La présente étude propose une cartographie des zones de potentielles recharges des nappes d'eau souterraines à l'échelle du département des collines.

2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le département des collines qui s'étend sur une superficie de 13 931 km² est localisé entre 7°27' et 8°46' de latitude Nord et entre 1°39' et 2°44' de longitude Est. La pluviométrie et la température constituent deux facteurs qui influencent la disponibilité de l'eau dans les communes des collines. Le régime pluviométrique suit une distribution bimodale au Sud et unimodale du Nord (Bokonon-Ganta, 1987; Boko, 1988; Afouda, 1990; Houssou, 1998; Ogouwalé, 2006). Et malgré la quantité d'eau qui s'écoule et s'infiltré, l'approvisionnement en eau de consommation demeure problématique du fait de la nature géologique du sous-sol.

Au plan géologique, le département des collines est situé à l'échelle de l'unité structurale de la plaine du Bénin et présente une grande complexité de formations géologiques affecté de plusieurs phases de déformations, de métamorphisme et de magmatisme (Boukari, 1982). Au plan géologique, affleurent des formations migmatitiques et gneissiques intrudées par des plutons granitiques en massifs circonscrits et une série volcano-sédimentaire (Breda, 1989 in Adissin, 2012). Ces affleurements présentent une direction générale Nord-Sud (Dubroeuq, 1967). Au Nord-est, on observe par endroits, des plutons de granite porphyroïde à biotite se présentant sous forme de massifs plissotés mis en place dans l'encaissant gneissique à migmatitique, le Nord-ouest étant dominé par des migmatites et gneiss du groupe de Pira.

3 MATERIELS ET METHODES

3.1 DONNÉES D'ÉTUDE

Les données utilisées pour cette étude concernent des données cartographiques, des images satellitales de type Landsat ETM+ (datant de 2018) et des données techniques de forages. Les données cartographiques comprennent les cartes topographiques (au 1/50 000 et 1/200000) des feuilles de Zagnanado et d'Abomey (*IRB, 1982; Volkoff, 1969* de l'Institut Géographique National (IGN) et de l'Office Béninoise de Recherches Géologiques et Minières (OBRGM) du Bénin. Un modèle

numérique de terrain (SRTM) a été récupéré. Ces images ont été acquises à partir des sites officiels de Landsat: <http://earthexplorer.usgs.gov/> et <http://gdex.usgc.gov/>. Les données techniques de forages obtenues à la Direction Générale de l'Eau concernent les coordonnées géographiques, la litho-stratigraphie, les niveaux statiques, et les résultats de pompes d'essai réalisés lors de l'implantation des forages d'alimentation en eau potable dans la zone d'étude.

3.2 RÉALISATION DES COUPES GÉOLOGIQUES

Au moyen du logiciel ArcMap 9.3 diverses cartes thématiques ont été réalisées. Il s'agit de la carte d'occupation du sol, du réseau de fractures, de la carte pédologique, de la carte géologique et de la carte des pentes obtenue à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT). Aussi à partir des cartes topographiques et les logs stratigraphiques des forages, des coupes hydrogéologiques ont été réalisées à l'échelle du département des collines suivant la technique y afférent. La figure 2 présente les traits de coupe exécutés. Au total, six traits de coupes géologiques (AB, CD, EF, GH, IJ et KL) ont été exécutés et utiliser dans le cadre de la présente étude (figure 1).

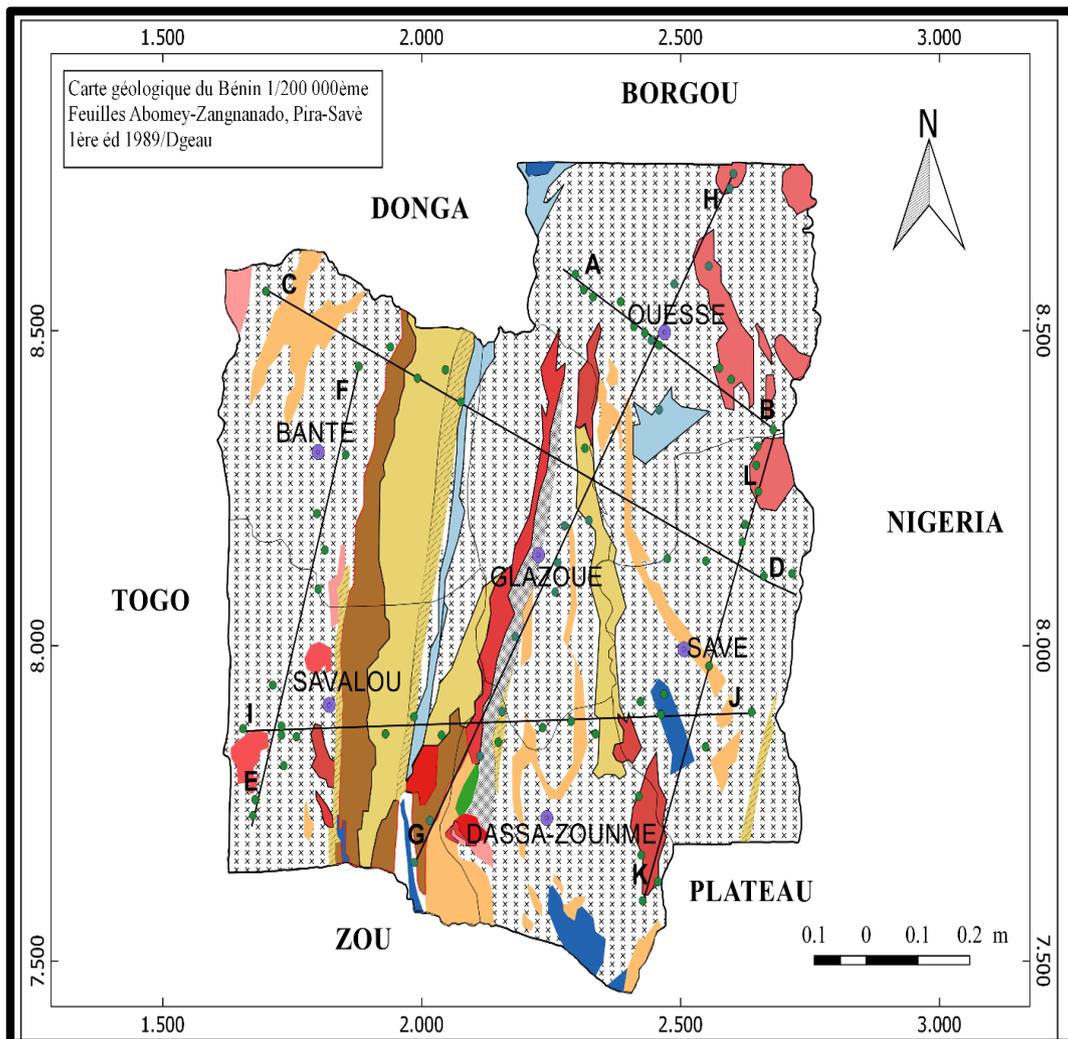


Fig. 1. Profil topographique et coupes géologiques le long des traits AB et CD

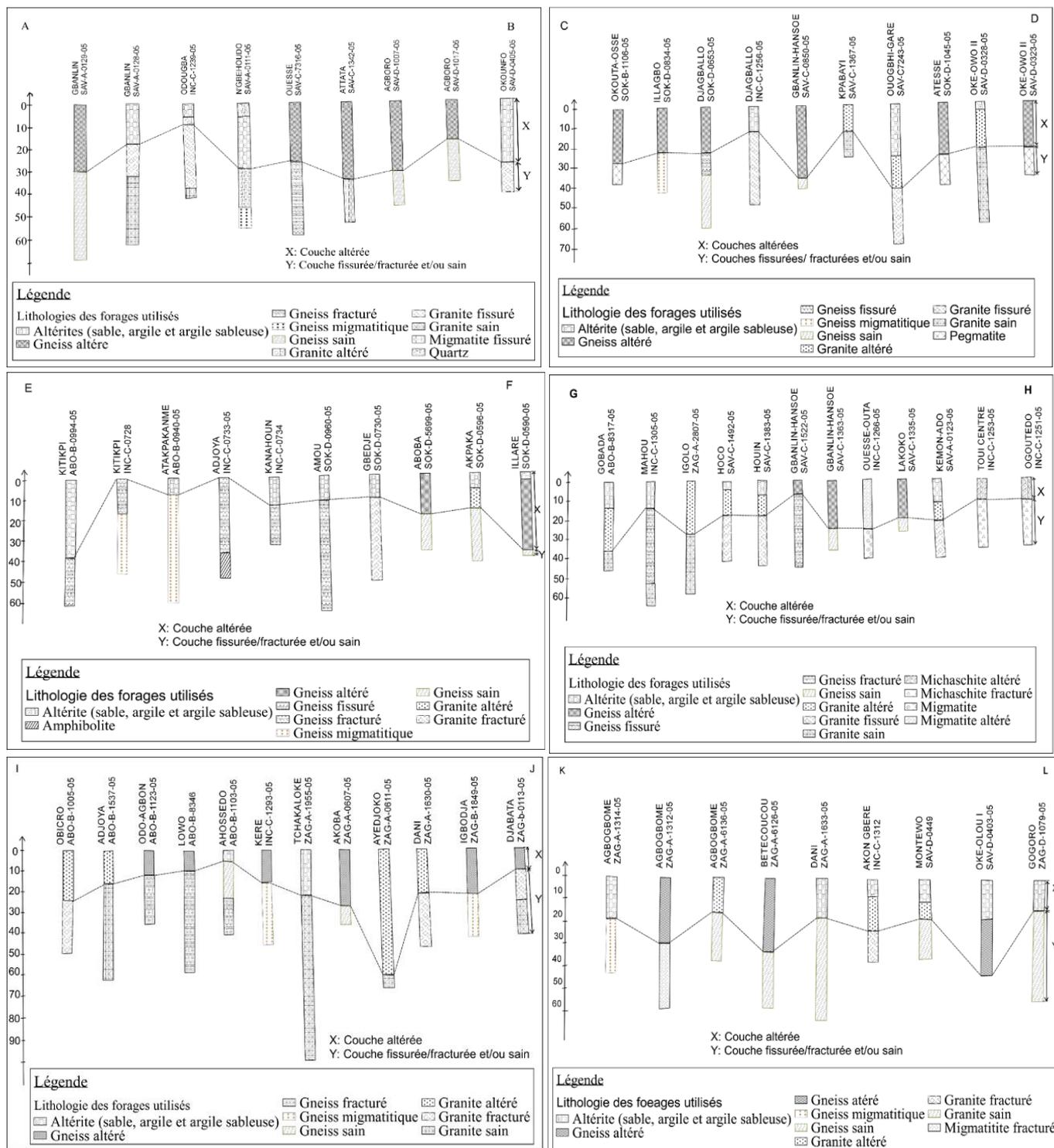


Fig. 2. Profil topographique et coupes géologiques le long des traits exécutés

CARTOGRAPHIE ET CLASSIFICATION DES FACTEURS CONTRÔLANT LE PROCESSUS DE RECHARGES DES NAPPES

Différents facteurs contrôlent le processus de recharges des nappes en milieu fracturé. Il s'agit de la lithologie, des fractures, les types d'occupation du sol, la pédologie, les pentes et le réseau de drainage (Krishnamurthy *et al.*, 1996; 2000; Shaban, 2003; Shaban *et al.*, 2006; Sener *et al.*, 2005; Thakur et Raghuvanshi, 2008; Hsin-Fu *et al.*, 2009). La lithologie du département des Collines a été cartographiée (figure 2) à partir de la carte géologique.

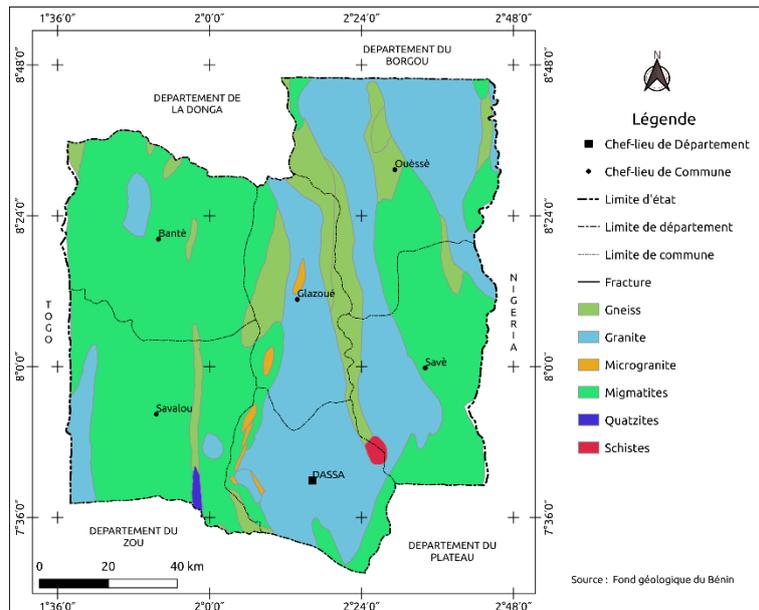


Fig. 3. Ensemble lithologique identifié à l'échelle des collines

La validation de la carte de fracturation et du réseau de drainage (figure 4a, 4b) ont permis de déterminer respectivement la densité de fracturation et celle de drainage. La production et la visualisation de ces cartes ont été effectuées avec le logiciel ArcMap 9.3. En fonction de la longueur cumulée sur des mailles de 5x5 km², différentes zones ont été identifiées.

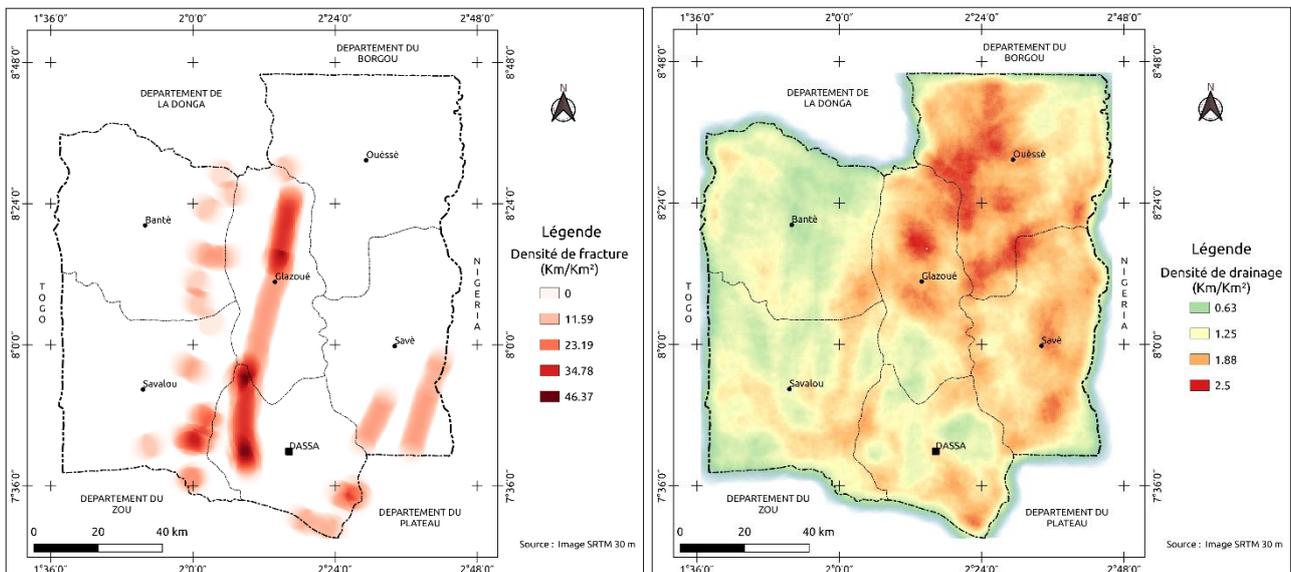


Fig. 4. a) Carte de densité de fracturation. b) Carte de densité de drainage

Les unités paysagiques et pédologiques du département des Collines ont été respectivement produite à partir de l'image satellitaire et de la carte pédologique (figures 5; 6). Aux images a été appliquées la classification supervisée avec l'algorithme de maximum de vraisemblance, disponible dans le logiciel Envi 4.5. Onze types d'occupation du sol et seize unités pédologiques variées ont été identifiés dans la zone d'étude.

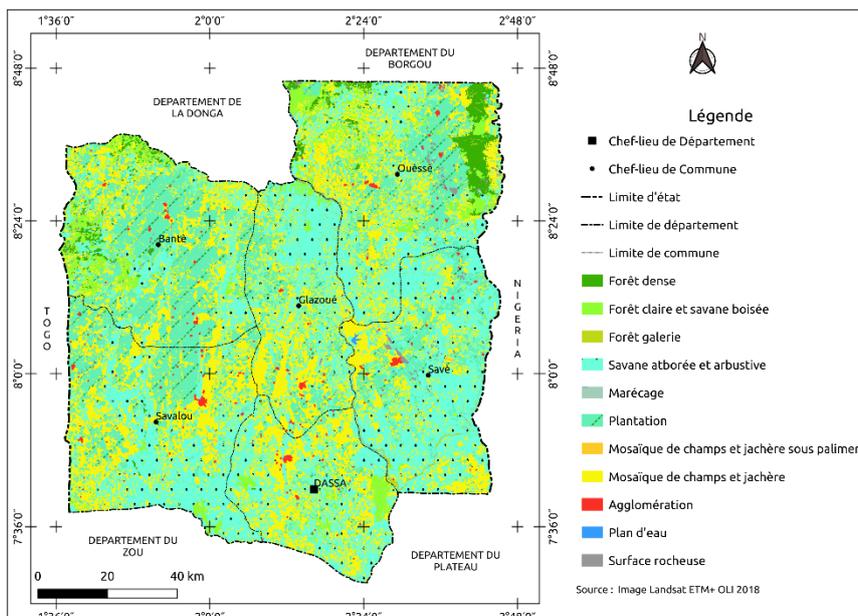


Fig. 5. Unités d'occupation du sol identifiées dans les collines

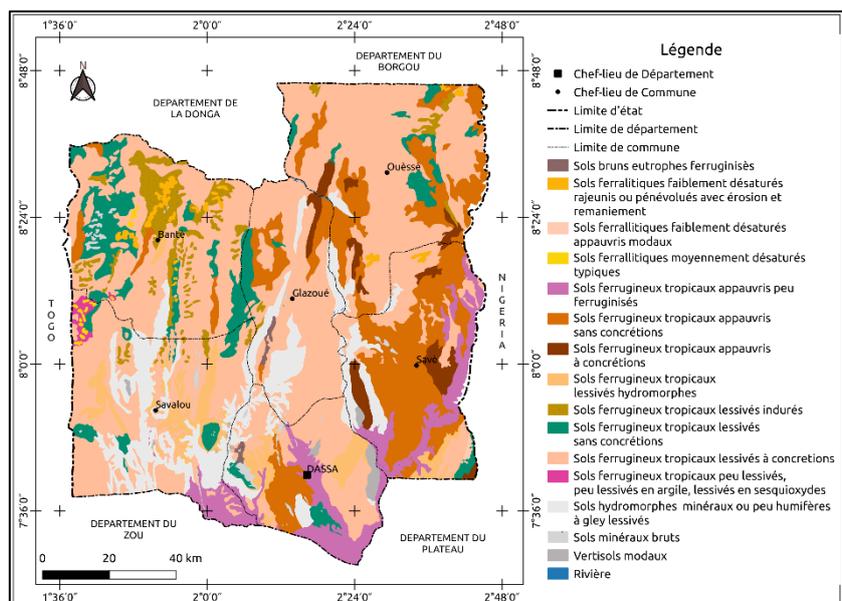


Fig. 6. Unités pédologiques identifiées dans les collines

A partir du Modèle Numérique du Terrain, les pentes ont été déduites avec une résolution de 90 m (figure 7). Il est acquis en format SRTM. Les pentes ont été calculées avec le logiciel ArcMap 9.3 et elles sont exprimées en degré et sont regroupées en quatre classes.

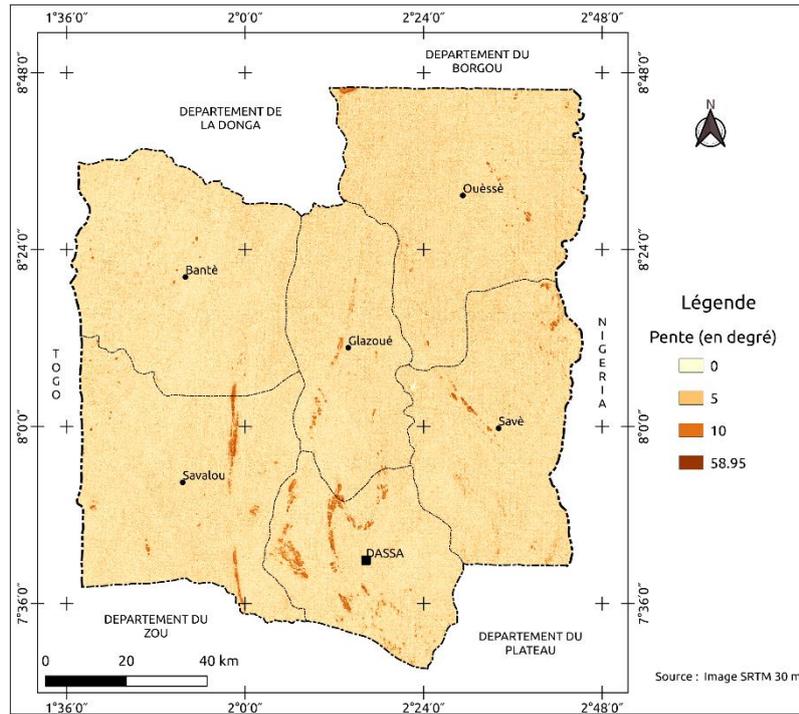


Fig. 7. Cartographie des pentes dans les collines

Les cartes thématiques des différents facteurs contrôlant le processus de recharge des nappes générées et décrites, ont été classifiées selon leur aptitude à l’infiltration. L’interprétation hydrogéologique de ces classes est consignée dans le Tableau 1.

Tableau 1. Classification hydrogéologique des facteurs contrôlant le processus de recharges des nappes dans les collines

Facteurs d'influence		Aptitude hydrogéologique
Classification hydrogéologique de la lithologie		
Granite/microgranite		Moyenne
Migmatites		Médiocre
Gneiss		Moyenne
Quartzites		Mauvaise
Schistes		Médiocre
Classification hydrogéologique des domaines en fonction de la densité de fracturation		
Domaine	Densité (km/km ²)	Aptitude hydrogéologique
1	0,7 - 1	Très bonne
2	0,5 - 0,7	Bonne
3	0,3 - 0,5	Modérée
4	0 - 0,3	Mauvaise
Classification des domaines en fonction de la densité du drainage		
Domaine	Densité (km/km ²)	Aptitude hydrogéologique
1	0,7 - 1	Très bonne
2	0,5 - 0,7	Bonne
3	0,3 - 0,5	Modérée
4	0 - 0,3	Mauvaise
Classification hydrogéologique des types d'occupation du sol		
Unités paysagiques		Aptitude hydrogéologique
Habitation		Mauvaise
Forêt dense/ Savane		Bonne
Palmeraies Cocoteraies/ Marécage/ Plantation/ Forêt claire/ Culture Jachère		Très bonne
Forêt marécageuse/ Eau		Excellente
Classification hydrogéologique des types de sol		
Unité pédologique		Aptitude hydrogéologique
Sols ferrugineux tropicaux appauvris sans concrétions/à concrétions		Moyenne
Sols ferrugineux tropicaux lessivés hydromorphes/indurés/ sans concrétions/ à concrétions		Moyenne
Sols ferrugineux tropicaux appauvris peu ferruginisés		Bonne
Sols ferrugineux tropicaux peu lessivés, peu lessivés en argile, lessivés en sesquioxydes		Bonne
Sols ferrallitiques faiblement désaturés rajeunis ou pénévulés avec érosion et remaniement		Médiocre
Sols ferrallitiques faiblement désaturés appauvris modaux		Mauvaise
Sols ferrallitiques moyennement désaturés typiques		Moyenne
Sols bruns eutrophes ferruginisés		Bonne
Sols hydromorphes minéraux ou peu humifères à gley lessivés		Mauvaise
Sols minéraux bruts		Mauvaise
Vertisols modaux		Médiocre
Rivière		Mauvaise
Classification hydrogéologique des pentes		
Classe d'intervalle (en degré)		Aptitude hydrogéologique
0 - 4		Excellente
4 - 8		Très bonne
8 - 12		Bonne
12 - 16		Modérée
>16		Mauvaise

INTÉGRATION DES FACTEURS CONTRÔLANT LA RECHARGE DES NAPPES DANS UN SIG

Les interactions entre les différents facteurs contrôlant le processus de recharge des nappes ont été évaluées à travers une analyse multicritère. Ces facteurs n'ayant pas le même degré d'influence sur la recharge, ont été croisé suivant leur degré d'influence. Le degré d'influence est apprécié par les poids et les coefficients d'interaction attribués aux différentes classes définies. Les facteurs ayant une grande aptitude d'infiltration se distinguent par des poids totaux élevés. Les interactions existantes entre les facteurs de contrôle des processus de recharge des nappes dans un hydrosystème ont été présentées par Shaban, 2003; Hsin-Fu *et al.*, 2009; Sékouba Oularé, 2017 (figure 8).

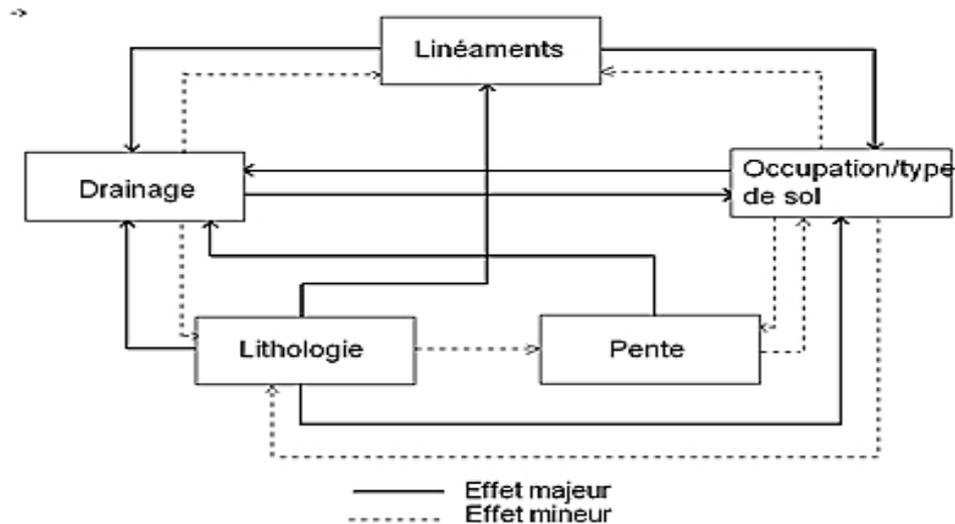


Fig. 8. Schéma des interactions entre les facteurs (Shaban *et al.*, 2006, Sékouba Oularé, 2017; modifié)

4 RESULTATS ET DISCUSSION

ANALYSE DES COUPES LITHOSTRATIGRAPHIQUES

La coupe AB peut être résumée par le schéma conceptuel suivant montrant une couche d'altérites meubles à la surface pouvant aller à 30m d'épaisseur. Cette couche est suivie de gneiss fracturé ayant une épaisseur moyenne de 15m, puis la roche saine qu'est le gneiss sain, d'une épaisseur maximale de 25m. Suivant la coupe CD on a une couche d'altérites meubles à la surface pouvant aller à 25m d'épaisseur. Cette couche est suivie de granite fracturé ayant une épaisseur moyenne de 15m, puis la roche saine qu'est le granite sain, d'une épaisseur maximale de 30m. Au niveau de la coupe EF on distingue une couche d'altérites meubles à la surface pouvant aller à 15m d'épaisseur. Cette couche est suivie d'une dominance en gneiss fracturé ayant une épaisseur moyenne de 20m, puis la roche saine qu'est le gneiss sain, d'une épaisseur maximale de 25m. La coupe GH présente une couche d'altérites d'épaisseur maximale de 15m. Cette couche est suivie de gneiss fracturé ayant une épaisseur moyenne de 15m et pouvant aller à 35m, puis la roche saine qu'est le gneiss sain, d'une épaisseur maximale de 30m. La coupe IJ montre une couche d'altérites d'épaisseur maximale de 25m. Cette couche est suivie de granite fracturé ayant une épaisseur moyenne de 25m, puis la roche saine qu'est le granite sain, d'une épaisseur maximale de 30m. A la coupe KL on identifie une couche d'altérites meubles à la surface d'épaisseur maximale de 25m. Cette couche est suivie de gneiss fracturé ayant une épaisseur moyenne de 20 à 25m, puis la roche saine qu'est le gneiss sain, d'une épaisseur pouvant aller à 35m. Les schémas de profil d'altération s'accordent à celui proposé ces dernières années par les auteurs Lachassagne & Wyns (2004), El-Fahem (2008), Tossou (2016) et Sambiénou (2019).

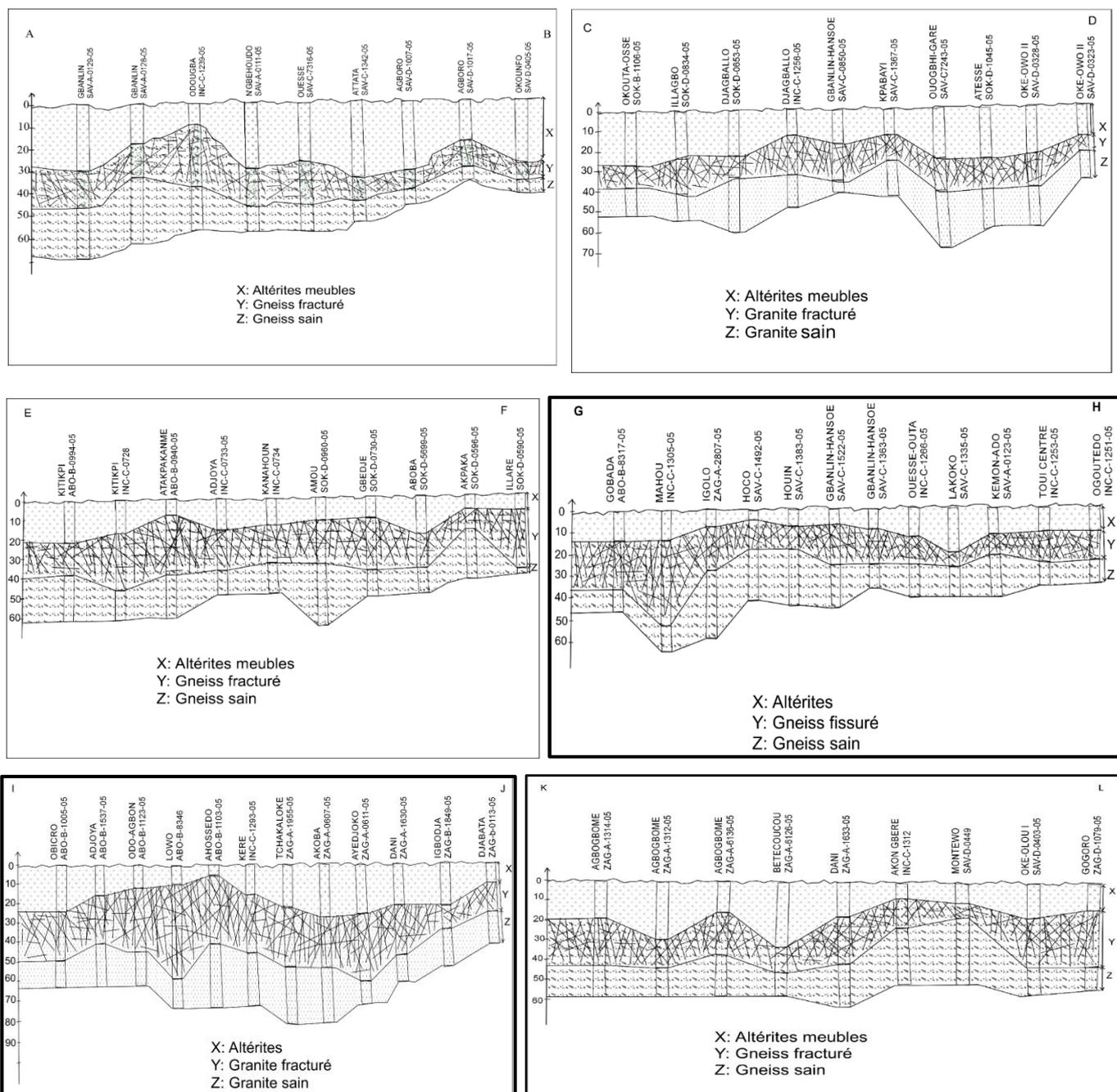


Fig. 9. Cartographie de profondeur de la nappe captée et zones de recharges dans le département des Collines

Les niveaux statiques mesurés dans notre zone d'étude varient de 7 à 14 m environs. La nappe est moins profonde et les niveaux d'eau dans les ouvrages varient d'un secteur à un autre. La carte de la figure 10 illustre la répartition spatiale de ces niveaux dans notre zone d'étude. La nappe est de plus en plus profonde vers l'Ouest de la zone d'étude et aussi au Sud de Savé et elle remonte jusqu'à 7 m environs vers l'Est et dans les secteurs de Dassa-Zoumè et au Sud-Ouest de Glazoué. Par ailleurs, les niveaux statiques augmentent considérablement lorsqu'on évolue vers le Nord (14 m environs). Sur la carte piézométrique du département réalisée (figure 11), les niveaux piézométriques varient entre 40 m et 320 m environs. Les niveaux piézométriques élevés se situent au Nord (zone de recharge) du département et diminuent graduellement vers le Sud jusqu'aux valeurs minimales de 40 m. La tendance générale de l'écoulement est du Nord vers le Sud. Nous notons la présence de dômes et de dépressions. Les principaux dômes se trouvent au Nord dans les communes de Bantè et de Ouessè. Les dépressions sont observées au Sud des communes de Savalou et de Dassa-Zoumè. Les dômes constituent les zones de recharges de la nappe tandis que les dépressions sont les zones de décharges. Les zones de recharge nécessitent des mesures de protection afin d'éviter toute pollution dans le système aquifère.

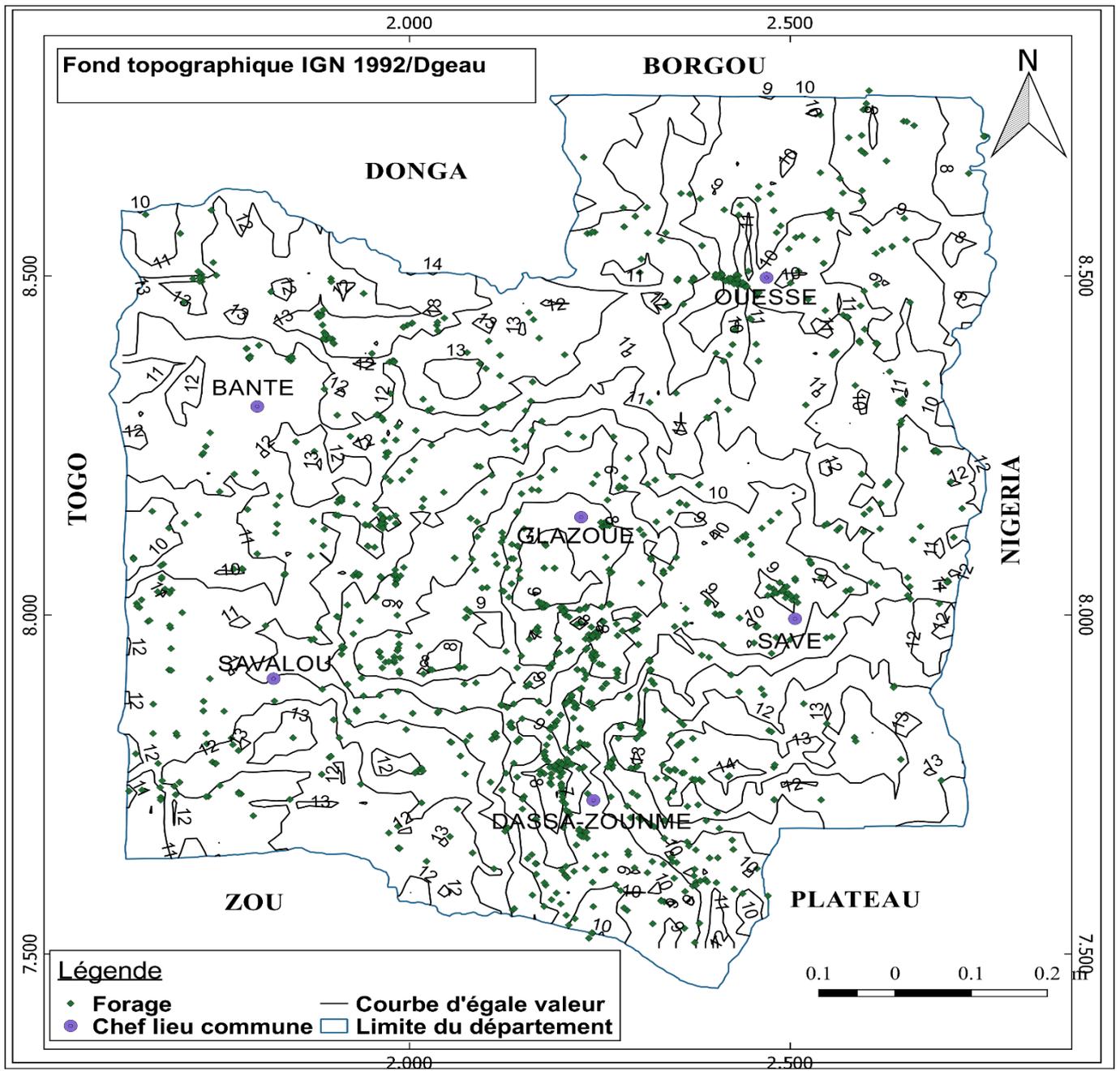


Fig. 10. Répartition spatiale des niveaux statiques dans la zone d'étude

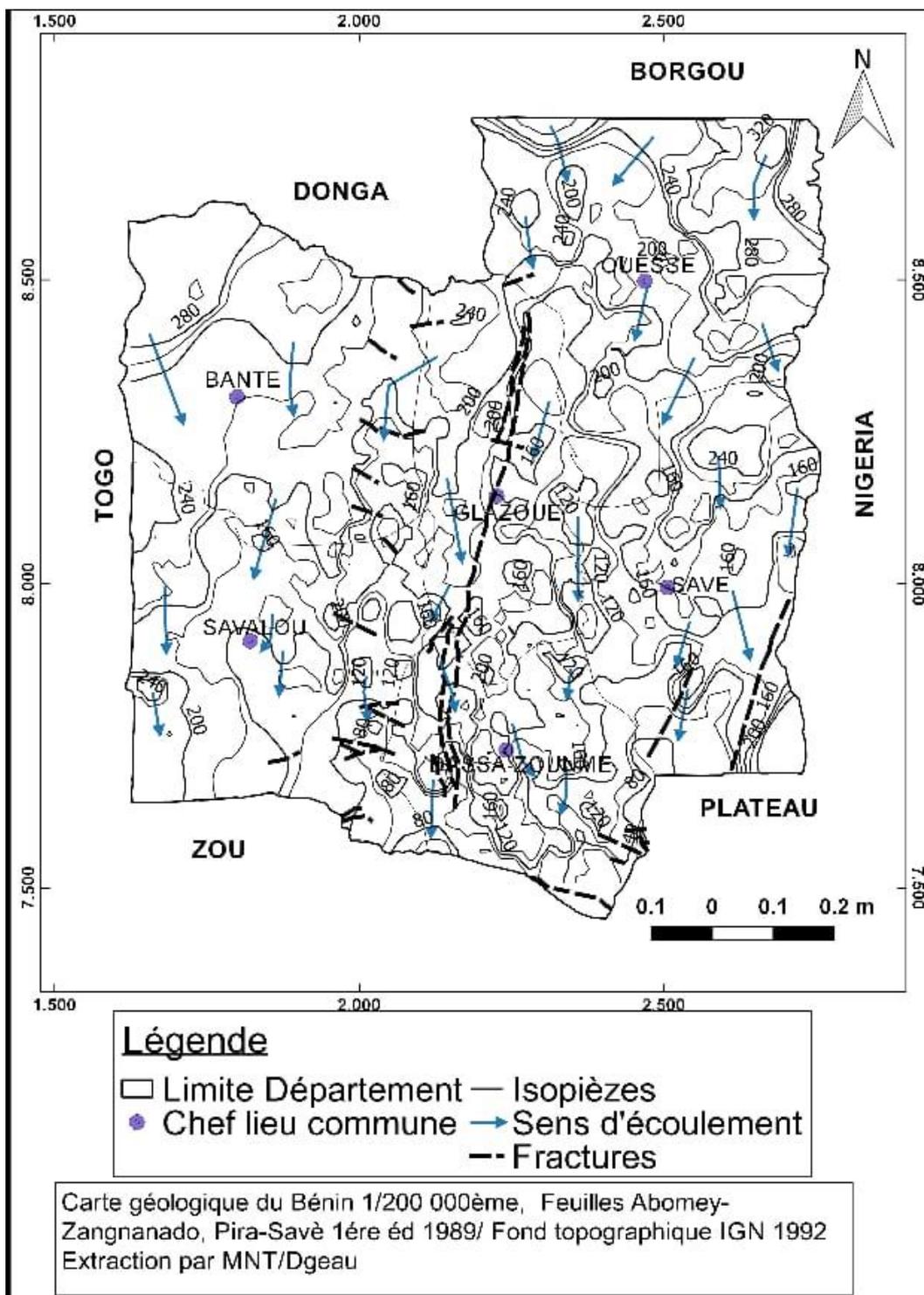


Fig. 11. Carte piézométrique de la zone d'étude

Le regroupement des cartes des principaux facteurs influençant le processus de recharges des nappes et les résultats de l'analyse multicritère ont permis d'élaborer la carte générale présentant les zones de potentielles recharges des nappes régité par l'aptitude hydrogéologique à l'échelle du Département des Collines. L'analyse de la figure 12 montre quatre zones de potentielles de recharge présentant des aptitudes hydrogéologiques différentes. Ces zones sont classifiées de niveau mauvais, bon, très bon et excellent. La zone mauvaise représente 45% des zones cartographiées. Elle est en général située à l'ouest et une partie à l'est de la zone étudiée, le long des cours d'eau dont la rivière Agbado. En effet dans ces zones où les sols sont hydromorphes, le drainage favoriserait le ruissellement au détriment de l'infiltration. La zone bonne représente environ 20 %

de la zone étudiée. Elle se trouve disséminé dans le secteur d'étude et surtout dans la bordure ouest des Collines (Bantè, savalou). Il s'agit des zones de forêt et dans les zones à faibles altitudes. La zone très bonne représente environ 25% de la zone étudiée et dans le secteur est et au centre. La zone excellente occupe environs 10% de l'espace étudié et se trouve principalement le long de la faille de Kandi dans les fracturations et fissures et est disséminée dans la partie centrale de la zone étudiée.

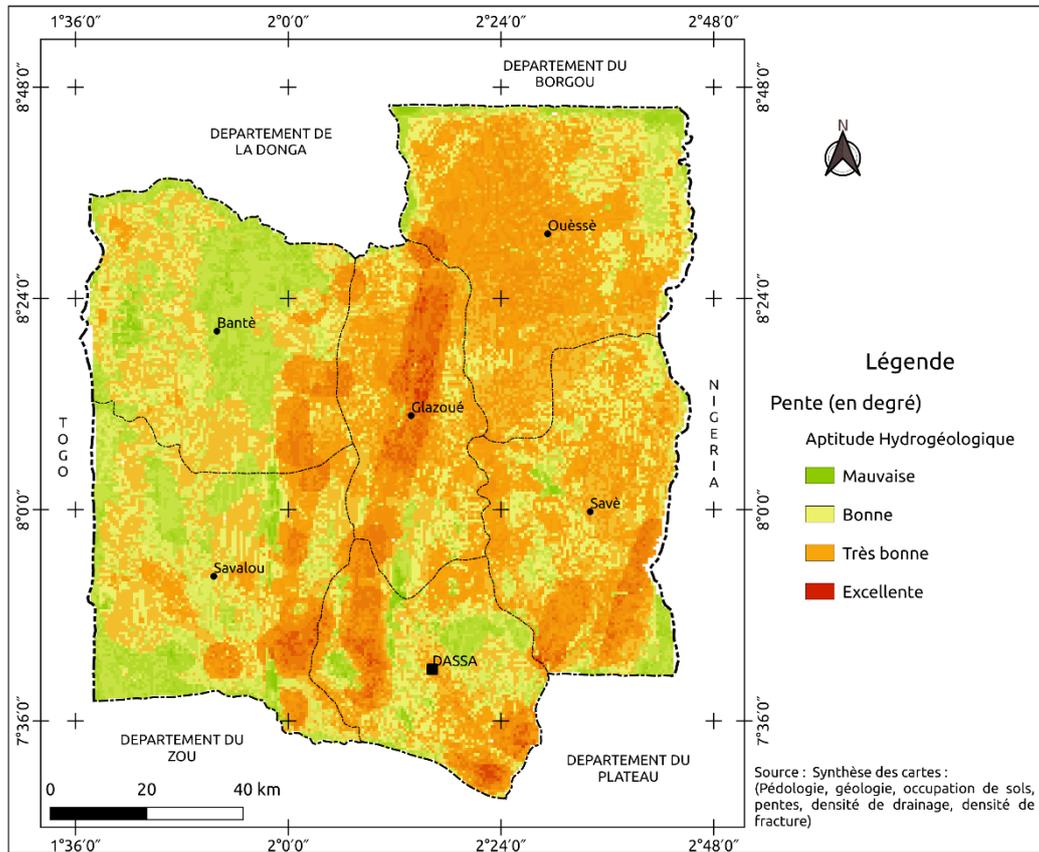


Fig. 12. Carte des zones de potentielles recharges des nappes d'eau souterraine dans les Collines

5 DISCUSSION

Des travaux (Kamagaté, 2006; Kamagaté et al., 2007; El-Fahem, 2008; Kamagaté et al., 2008) portant sur l'hydrogéologie des aquifères de socle du Bénin notamment dans la haute vallée de l'Ouémé et sur les caractéristiques des aquifères de la zone d'étude, notamment dans sa partie méridionale à Dassa-Zoumé et environs (Boukari, 1982; 2007) ont montré sur l'existence de deux principaux réservoirs superposés et en contact permanent qui caractérisent la zone d'étude. Selon les auteurs, ces systèmes aquifères sont faits d'un réservoir d'altérites superficiel constitué du produit d'altération semi-perméable de la roche saine sous-jacente, caractérisé par une bonne fonction capacitive et dont la nappe est alimentée à partir de la surface par la recharge pluviométrique; et d'un réservoir sous-jacent de fissures et fractures permettant le drainage du recouvrement meuble supérieur à porosité d'interstice.

En somme, notre zone d'étude, située au centre du Bénin, est caractérisée par quatre grandes formations de socle à savoir: les micaschistes, les gneiss, les migmatites et les granites. Dans ces formations, le modèle conceptuel des aquifères de socle distingue deux niveaux de connexion hydraulique (Lachassagne *et al.*, 2011). Depuis la surface vers la profondeur, on distingue la zone altérée (ZA), représentée par la couche d'altérites, la zone fissurée altérée (ZFA) encore appelée aujourd'hui par certains auteurs la zone fracturée stratiforme (Allé *et al.*, 2018) et la roche saine. La zone altérée a généralement une épaisseur comprise entre 11 et 25 m (Vouillamoz *et al.*, 2015). En fonction de la roche mère et de l'histoire géologique qui contrôlent les processus d'altération, sa nature oscille entre un faciès sableux et un faciès argileux. Le coefficient de perméabilité de cette zone altérée est généralement faible, mais ses propriétés d'emménagement contrôlent la réserve en eau des aquifères de socle (Kotchoni, 2019). La zone fissurée altérée est située à la base de la zone altérée, elle a une épaisseur comprise entre 21

et 41 m sur notre zone d'étude (Vouillamoz *et al.*, 2015). Elle se caractérise par une forte densité de fractures sub-horizontales attribuée aux phénomènes d'altération (Wyns *et al.*, 2004). La densité et la connectivité des fractures sont généralement fortes au sommet et décroissent en profondeur. Cette zone fissurée altérée possède des coefficients de perméabilité généralement plus élevés que ceux de la ZA, mais ses propriétés d'emmagasinement, quoique non négligeables, sont généralement plus faibles. La roche saine peut parfois présenter des fractures résultant de l'histoire tectonique de la région. Ces fractures se referment progressivement avec la profondeur (Boukari, 1983). Les deux niveaux en connexion hydraulique de ce modèle conceptuel des aquifères de socle sont la zone altérée (ZA) et la zone fissurée altérée (ZFA); si des fractures tectoniques de la roche saine viennent s'ajouter à ces deux niveaux, elles sont également connectées hydrauliquement aux deux ensembles. La transmissivité de la ZA et de la ZFA intégrées est comprise entre $1,8 \cdot 10^{-5}$ m²/s et $3,9 \cdot 10^{-4}$ m²/s et la porosité de drainage entre $5 \cdot 10^{-3}$ et $7 \cdot 10^{-2}$ (Vouillamoz *et al.*, 2014). Les bons débits s'obtiennent généralement au niveau des forages implantés dans les zones où l'on rencontre d'importantes épaisseurs non argileuses de la ZA, présentant ainsi une bonne capacité à stocker l'eau souterraine, et qui reposent sur une épaisseur suffisante de la ZFA à haute perméabilité (Allé *et al.*, 2018). En somme, la zone altérée, la zone fissurée et les éventuelles fractures tectoniques jouent des rôles spécifiques que différents auteurs comme Allé *et al.* (2018) et Lachassagne *et al.* (2011) ont su décrire dans leurs travaux.

REFERENCES

- [1] Adissin G. C. L., (2012): La zone de cisaillement de Kandi et le magmatisme associé dans la région de Savalou-Dassa (Bénin): étude structurale, pétrologique et géochronologique. Thèse de doctorat de l'Université Jean Monnet Saint-Etienne et d'Abomey-Calavi, 238p + annexe.
- [2] Afouda, F., (1990). L'eau et les cultures dans le Bénin central et septentrional: Etude de la variabilité des bilans de l'eau dans leurs relations 190 Références bibliographiques avec le milieu rural dans la savane africaine; Th de doctorat nouveau rme, Paris IV, Sorbonne, 428p.
- [3] Boko, M., (1988). Climats et communautés rurales du Bénin: Rythmes climatiques et rythmes de développement; Thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres et Sciences Humaines. Université de Bourgogne, Dijon. 2 volumes, 608 p.
- [4] Bokonon-Ganta, B., (1987). Les climats de la région du golfe du Bn; Thèse de doctorat de 3ème cycle, Université de Paris 248p + annexes.
- [5] Boukari M., (1982): Contribution à l'étude hydrogéologique des régions de socle de l'Afrique Intertropicale: l'hydrogéologie de la région de Dassa-Zoumé (Bénin). Thèse de doctorat de 3ème cycle en Géologie Appliquée, mention hydrogéologique, Université de Dakar (Sénégal). 173p.
- [6] Boukari M. (2007): Hydrogéologie de la République du Bénin (Afrique de l'Ouest). Africa Geoscience Review. Vol. 14, N° 3, pp. 303-328. France. Direction de l'Hydraulique, 1999.
- [7] El-Fahem, T (2008): Hydrogeological conceptualisation of a tropical river catchment in a crystalline basement area and transfer into a numerical groundwater flow model - Case study for the Upper Ouémé catchment in Benin, PhD Thesis, Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn, 178 pp, urn: nbn: de: hzb: 5N-15094.
- [8] Houssou, C., (1998). Les bioclimats humains de l'Atacora (NordOuest du Bénin et leurs implications socio-économiques); Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 331p.
- [9] Hsin-Fu Yeh, Youg-Sin Cheng, Hung-I. Lin, Cheng-Haw Lee (2009). Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan, 11P.
- [10] Institut Géographique National Institut de Recherche Breda (IRB), (1982) Etude de cartographie géologique et de prospection minière de reconnaissance au Nord du 11ème parallèle; Final report, OBEMINES, Cotonou, Bénin.
- [11] Kamagaté, (2006): Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin: bassin versant de la Donga (haute vallée de l'Ouémé), Thèse du 3e cycle: Météorol., Océanographie et Phys. de l'Environnement, Université de Montpellier 2. 2006/10/17. 321p.
- [12] Kamagaté Shen Qu, German Perdomo, Dongming Su, Dae Hyun Kim, Sandra Slusher, Marcia Meseck, and H. Henry Dong (2008). FoxO1 mediates insulin-dependent regulation of hepatic VLDL production in mice, 19p.
- [13] Kamagaté, Jing He, German Perdomo, Tonia Tse, Yu Jiang, and H. Henry Dong, Shen Qu,1 Dongming Su, Jennifer Altomonte, (2007): PPAR mediates the hypolipidemic action of fibrates by antagonizing FoxO1, 14p.
- [14] Kotchoni Rachidi, Marcel Boyer & Anne Catherine Faye & Éric Gravel (2019): Guiding Principles in Setting Cartel Sanctions (The Working Paper Version), CIRANO Working Papers 2019s-18, CIRANO.
- [15] Krishnamurthy B. N. GOSWAMI (2000): Indian Monsoon-ENSO Relationship, on Interdecadal Timescale.17p.
- [16] Lachassagne P., Dewandel B., Wyns R., (2004). Le modèle conceptuel hydrogéologique des aquifères de socle altéré et ses applications pratiques, Vingtièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues.
- [17] Ogouwalé, E., (2006). Changements climatiques dans le Bénin méridional et central. Indicateurs, scios et prospective de la sécurité alimentaire; Thèse de doctorat unique, EDP, UAC, FLASH, 302p.

- [18] Sener, Erhan & Davraz, Aysen & Ozcelik, Mehmet. (2005).: An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: A case study in Burdur, Turkey, *Hydrogeology Journal*. 13. 826-834. 10.1007/s10040-004-0378-5.
- [19] Sékouba, Oularé & Adon, Gnangui & Akpa, Lucette & Mahaman Bachir, Saley & Kouamé, Fernand & Therrien, René. (2017). Identification Des Zones Potentielles De Recharge Des Aquifères Fracturés Du Bassin Versant Du N'zo (Ouest De La Côte d'Ivoire): Contribution Du SIG Et De La Télédétection, *European Scientific Journal*. 13. 10.19044/esj.2017.v13n36p192.
- [20] Shaban, A. (2003).: Etude de l'hydrogéologie au Liban Occidental: Utilisation de la télédétection, Ph.D. Dissertation, Bordeaux 1 Université, 202 p.
- [21] Shaban A, Khawlie M, Abdallah C (2006).: Use of remote sensing 220 References and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon, *Hydrogeol J* 14: 433 443.
- [22] Thakur, G.s & Raghuvanshi, R. (2008): Perspect and Assessment of Groundwater Resources using Remote Sensing Techniques in and around Choral River Basin, Indore and Khargone Districts, MP, *Journal of The Indian Society of Remote Sensing*. 36. 217-225. 10.1007/s12524-008-0022-2.
- [23] Tossou, Y. Y. J. (2016).: Caractérisation des anomalies fluorées eaux souterraines du socle cristallin Précambrien du Bénin central (Afrique de l'Ouest). Apport des outils hydrogéochimiques, pétrographiques et minéralogiques. Thèse pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences de l'Ingénieur, Université de Liège (Belgique), 181p.
- [24] Vouillamoz JM, Lawson FMA, Yalo N, Descloitres M (2015). The use of magnetic resonance sounding for quantifying specific yield and transmissivity in hard rock aquifers: the example of Benin, *Journal Appl Geophys* 107: 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.05.012>.
- [25] Wyns, R., Baltassat, J.M., Lachassagne, P., Legchenko, A., Vairon, J., Mathieu, F. (2004).: Application of SNMR soundings for groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France), *Bulletin de la Société Géologique de France*, 175, (1), 21-34.