

Facteurs de contrôle de l'hydrothermalisme sélectif des aquifères jaillissants du Bassin Sédimentaire Côtier du Bénin, Afrique de l'Ouest

**Prudence Mahutondji DOSSOU^{1,2*}, Crépin ZEVOUNOU², Abdoukarim ALASSANE³,
Christophe KAKI², Moussa BOUKARI³ et Daouda MAMA³**

¹ *Université d'Abomey-Calavi, Chaire Internationale en Physique, Mathématique et Applications (CIPMA-Chaire UNESCO), 072 BP 50 Cotonou, Bénin*

² *Université d'Abomey-Calavi, Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire de Géologie, Mines et Environnement, BP 2462 Abomey-Calavi, Bénin*

³ *Université d'Abomey-Calavi, Institut National de l'Eau (INE), Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA), 01 BP 526 Abomey-calavi, Bénin*

(Reçu le 22 Juillet 2022 ; Accepté le 18 Septembre 2022)

* Correspondance, courriel : prudencedossou12@gmail.com

Résumé

Le Bassin Sédimentaire Côtier du Bénin fait partie du vaste domaine sédimentaire de la Baie de Dahomey, qui s'étend de Ghana à l'Ouest au Nigéria à l'Est. Ces dépôts ont une structure monoclinale séparée par les vallées des principaux cours d'eau (Ouémé, Couffo et Mono) et caractérisée par une subsidence différentielle croissante vers le SSE. L'objectif de cette recherche est d'étudier les facteurs qui contrôlent les anomalies thermiques qui s'observent au niveau des forages à eau jaillissante dans certaines zones du BSC du Bénin. La présente étude basée sur la cartographie, télédétection, la gravimétrie et l'analyse des logs des forages disponibles fait une étude structurale des aquifères jaillissants, responsables de l'hydrothermalisme dans certaines zones du Bassin Sédimentaire Côtier du Bénin. Les forages à eau jaillissante sont généralement répartis dans les vallées des principaux cours d'eau du BSC avec une température qui atteint 69°C par endroits. La projection des points des sites d'eau thermale sur les cartes de la dérivée horizontale (dx, dy) et vertical (dz) de l'anomalie de Bouguer montre que les sites d'eau thermale sont répartis dans les zones d'anomalie négative. La méthode de déconvolution d'Euler a permis d'estimer les profondeurs moyennes des sources d'anomalies gravimétriques entre 600 m et 2100 m avec des fracturations de directions préférentielles NE-SW et NNE-SSE. La confrontation des linéaments gravimétriques à ceux extraits à partir des images satellitaires après leurs callages avec la carte géologique du BSC montre que les sites d'eau thermale sont répartis dans les zones d'anomalie négative, le long des failles conjuguées dans les vallées des principaux cours d'eau du BSC.

Mots-clés : *aquifères jaillissants, eau thermale, gravimétrie, télédétection, BSC.*

Abstract

The Control factors of selective hydrothermalism in gushing aquifers of the Benin Coastal Sedimentary Basin, West Africa

The Benin Coastal Sedimentary Basin is part of the vast sedimentary domain of the Bay of Dahomey, which extends from Ghana in the West and Nigeria in the East. These deposits have the monoclinical structure separated by the valleys of the main rivers (Ouémé, Couffo and Mono) and are characterized by an increasing differential subsidence towards the SSE. The main concern of this research is to study the factors that control the thermal anomalies observed at certain level of wells which gush forth water in different zones of the BSC of Benin. The research is based on cartography, remote sensing, gravimetry and on the analysis of the logs of the available boreholes, thus a structural study of the gushing aquifers, responsible for hydrothermalism in certain areas of the Coastal Sedimentary Basin of Benin. The gushing wells are generally distributed in the valleys of the main rivers of the BSC with 69°C of the temperature in certain areas. The projection of the points of the thermal water sites on the maps of the horizontal (dx, dy) and vertical (dz) derivative of the Bouguer anomaly, shows that the thermal water sites are distributed in the negative manner in different zones. The Euler deconvolution method enables the estimation of the average depths of the sources of gravity anomalies between 600 m and 2100 m with preferential fracturing directions NE-SW and NNE-SSE. The confrontation of the gravimetric lineaments to these extracted forms and to the satellite images with their calibrations regarding the geological map of the BSC, shows that the thermal water sites are distributed in the negative manner in zones, along with the conjugated faults in the valleys of the main BSC streams.

Keywords : *gushing aquifers, thermal water, gravimetry, remote sensing, BSC.*

1. Introduction

Les eaux souterraines constituent la meilleure source d'approvisionnement en eau potable pour l'homme. Lorsqu'elles sont thermales, elles sont valorisées pour plusieurs fins. Ces diverses applications dépendent de leurs températures, caractéristiques minéralogiques et chimiques, le processus d'exhaure de l'eau et l'emplacement géographique [1, 2]. En effet, les sites d'eau thermale sont des lieux d'attraction géotouristique, de production d'énergie géothermiques, de bains sanitaires, de consommation humaine, et de développement de petite agriculture [3 - 5]. C'est à juste titre que plusieurs environnements géothermiques particulièrement intéressants ont été inscrits sur la liste du Patrimoine Mondiale de l'UNESCO (par exemple le Yellowstone National Parc aux USA ; Pamukkale en Turquie). Au Bénin, dans le Bassin Sédimentaire Côtier des forages profonds ont capté les aquifères à eau jaillissante, parfois thermale dans certaines localités. La température des aquifères à eau jaillissante ne correspond pas à l'évolution du gradient géothermique à cette profondeur dans ce bassin sédimentaire. Le Bassin Sédimentaire Côtier que constitue notre zone d'étude est situé entre les parallèles 7°36' et 7°12' Nord et les méridiens 1°36' et 2°48' Est avec une superficie totale de 11200 km² environ [6]. Sur le plan géomorphologique, il est constitué d'une série de plateaux séparés entre eux par les vallées des principaux cours d'eau et repartis de part et d'autre par la dépression de la Lama. Une zone littorale basse qui s'ouvre aussi sur l'Océan complète l'ensemble. Les principaux cours d'eau, d'orientation N-S ou NW-SE qui traversent le BSC sont de l'Est à l'Ouest, l'Ouémé, le Couffo et le Mono [7]. Cette province sédimentaire est celle de la Baie de Dahomey (*Figure 1*) qui s'étend du Ghana à l'Ouest, au Nigéria à l'Est [8, 10 - 12]. Les dépôts sédimentaires sont d'âge Crétacé au Quaternaire et subdivisés en huit unités lithostratigraphiques qui se reposent en discordance majeure sur le socle parcourus par deux principaux systèmes de failles de direction NNE-SSW et ENE-WSW [8 - 10, 13 - 15]. De par leur nature lithologique, les formations géologiques du Bassin Sédimentaire Côtier du Bénin sont regroupées en quatre réservoirs

hydrogéologiques (**Figure 2**). On dénombre du Nord au Sud l'aquifère du sable du Crétacé supérieur ou unité I, l'aquifère des calcaires du Paléocène ou unité IIb à nappe essentiellement captive sous les argilites et marnes du Paléocène supérieur et de l'Eocène inférieur et moyen, l'aquifère des sables du Miocène supérieur-Pliocène ou Unités VI et VII et l'aquifère du Quaternaire ou unité VIII représenté par les aquifères des sables littoraux, d'une part et ceux des sables alluviaux d'autre part [12, 16]. L'objectif de la présente étude est d'explorer les caractéristiques structurales et l'environnement géographique des aquifères jaillissants à eau thermique afin de ressortir les facteurs qui contrôlent la répartition des anomalies thermiques dans certains points du Bassin Sédimentaire Côtier du Bénin. De façon spécifique, cela consistera à cartographier les sites d'eau thermique, en suite à identifier et à décrire les logs lithostratigraphiques des forages jaillissants du BSC, puis élaborer un modèle structural du BSC à partir des données gravimétriques et des images SPOT et enfin ressortir les liens qui existent entre les points d'eau thermique et les fracturations identifiées.

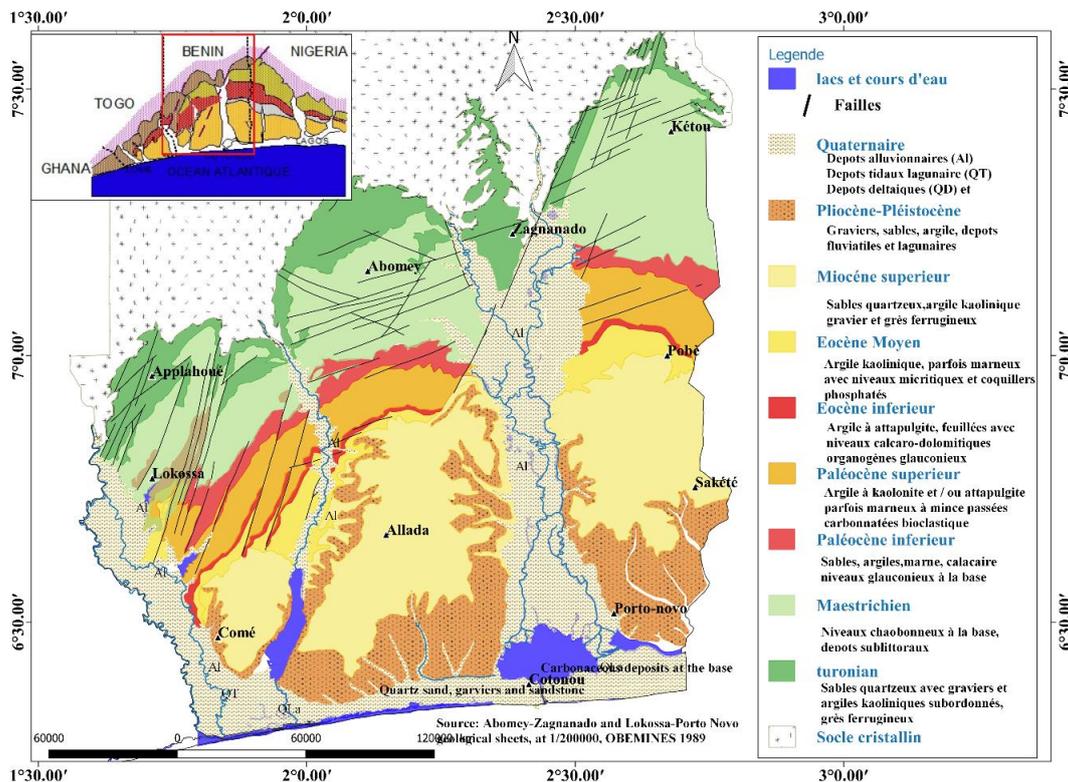


Figure 1 : Carte géologique du bassin sédimentaire côtier du Bénin, extraite des feuilles géologiques à 1/200000 Lokossa-Porto Novo et Abomey-Zangnanado [9]

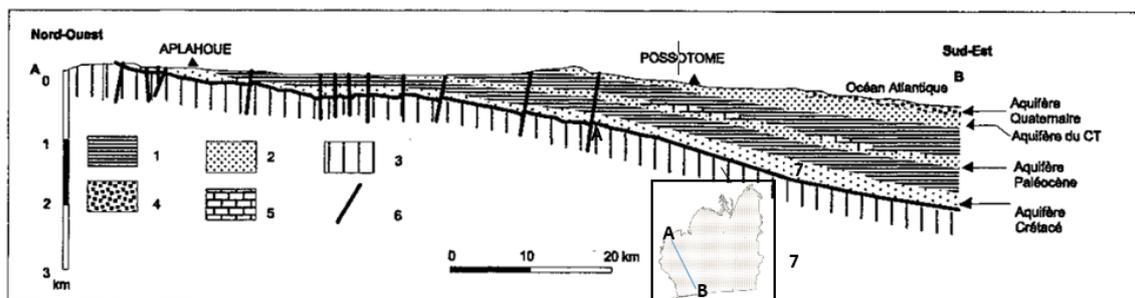


Figure 2 : Coupe hydrogéologique du BSC NW-SE [10] 1 : Argilites et marnes ; 2 : Sables ; 3 : Socle cristallin cristalloyphyllienne ; 4 : Gravier ; 5 : Calcaires ; 6 : Faille ; 7 : Orientation du trait de coupe AB suivant la direction NW-SE dans le BSC

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel

Les données collectées concernent :

- les levées gravimétriques et topographiques téléchargés sur le site du Bureau Gravimétrique International (BCG) au niveau de 3600 points avec un maillage régulier d'un point par km² sous forme de fichier data ;
- des images SPOT (Système Pour Observation de la Terre) et les Modèles Numériques de Terrain (MNT) sur le site de USGS avec 30 m de résolution pour la télédétection ;
- des logs lithostratigraphiques disponibles sur certains forages qui captent les aquifères jaillissants ;
- La température des forages jaillissants et à eau thermale mesurés in-situ.

2-2. Analyse et traitement des données

La méthode gravimétrique est utilisée pour ressortir les discontinuités présentes dans les corps géologiques [17]. Elle fournit des informations sur la variation de la densité afin de concevoir un modèle structural de la province géologique étudiée à partir des anomalies de Bouguer [18 - 20]. La valeur de l'anomalie de Bouguer mesurée en un point donné de la surface terrestre reflète la densité de la roche sous-jacente [21]. Il existe donc une corrélation entre les variations spatiales de l'anomalie de Bouguer et les lithologies à travers leur densité. Elle dessine des régions correspondant à des anomalies positives qui reflètent la présence des roches denses ou une surrection du socle et des régions à des anomalies négatives qui reflètent des roches légères, des chenaux ou effondrement du socle [22]. Le traitement des données gravimétriques est fait dans le logiciel Oasis Montaj 8.3.3 et permet de ressortir les cartes de l'anomalie de Bouguer, de la dérivée verticale (dz) et horizontales (dx et dy) des anomalies gravimétriques. Vu que notre objectif est l'étude des aquifères, nous nous sommes focalisés essentiellement sur les hétérogénéités de masse proches de la surface. La dérivée verticale permet d'accentuer les anomalies gravimétriques de courtes longueurs d'ondes et de renforcer l'amplitude des structures géologiques proches de la surface [23]. Cette technique tend à réduire le phénomène de coalescence des anomalies [24]. La technique du gradient horizontal est très utilisée pour localiser les discontinuités en subsurface à partir de données gravimétriques [25]. Les anomalies nulles du gradient horizontal correspondent aux discontinuités [24, 26]. Lorsqu'une signature gravimétrique varie latéralement, cela signifie que la nature du corps géologique responsable de l'anomalie change également laissant ressortir une discontinuité. Une discontinuité peut donc se traduire soit par un contact entre deux corps de nature différente, soit par un contact tectonique, c'est-à-dire, une faille. Afin de déterminer le type de discontinuité, la forme et l'impact de la discontinuité doivent être étudiés [27]. Quand une discontinuité s'observe cartographiquement sur une distance de plusieurs dizaines voire centaine de kilomètres d'extension latérale, il s'agit alors d'une discontinuité dite « majeure ». Cette dernière s'interprète généralement en géologie par un accident tectonique important. A cet effet, les linéaments gravimétriques ont été numérisés sur chacune des cartes de dérivé de l'anomalie de Bouguer obtenu (l'anomalie horizontale dx et dy et l'anomalie verticale dz). Après superposition des axes gravimétriques obtenus à partir des anomalies de Bouguer (dx, dy et dz) un modèle structural des linéaments gravimétriques du BSC a été élaboré. La technique de déconvolution d'Euler, appliquée aux cartes gravimétriques permet d'estimer la localisation des sources d'anomalies ainsi que leur profondeur [28]. Les solutions de la déconvolution d'Euler dépendent des paramètres suivants : l'indice structural (IS), la fenêtre (F) et la tolérance (T). Pour l'extraction des linéaments par télédétection, l'emprise du Bassin Sédimentaire Côtier du Bénin est couverte par quatre scènes d'images de Landsat (192/55 ; 192/56, 191/55 et 191/56). La technique d'estompage a été utilisée pour leur traitement. Enfin, les linéaments obtenus par la méthode gravimétrique sont comparés à ceux obtenus par la télédétection et aux travaux antérieurs réalisés dans le BSC afin de parvenir à un modèle structural de la zone d'étude [8 - 9, 29]. La réalisation des rosaces directionnelles des fractures est faite avec Géorose.

3. Résultats

3-1. Caractéristiques géomorphologiques et cartographie des sites d'eau thermale

Les sites d'eau thermale jaillissante sont généralement répartis dans les zones de basses altitudes avec une dénivellation variant de quatre mètres à quarante mètres. Ces zones sont représentées par des vallées des principaux cours d'eau (Ouémé, Couffo et Mono) du BSC correspondant à des zones de fracturation. Ces vallées séparent des zones de plateau d'altitudes élevées avec des dénivellations allant de soixante (60) à deux-cent-douze (212) mètres (**Figure 3**).

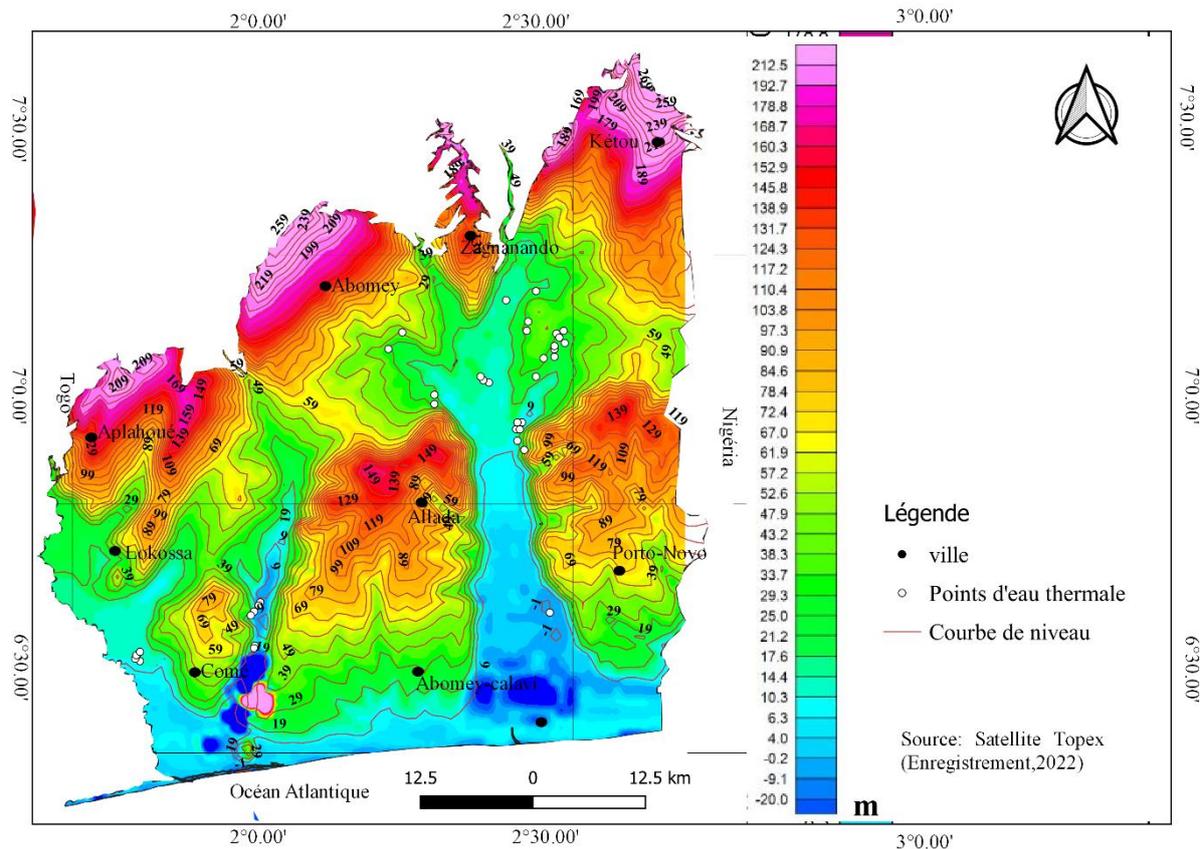


Figure 3 : Carte géomorphologique, altimétrique et des sites d'eau thermale du BSC

3-2. Analyse lithologique des aquifères à eau jaillissante

Les aquifères à eau jaillissante peuvent être répartis en deux groupes (**Figure 4**):

- Les aquifères du Crétacé qui sont captifs sous les argilites et marnes du Maestrichtien à partie de la province nord de la dépression de Lama vers le Sud ;
- Les aquifères du Paléogène qui sont affleurant ou sub-affleurant à l'intérieur de la dépression de Lama, puis captive au vers le Sud sous les argiles dans les vallées des principaux cours d'eau du BSC.

Les forages ont capté la nappe captive jaillissante du Crétacé à une profondeur allant de 140 mètres à 570 mètres. Le forage le plus profond est situé dans la localité de Bopa, à une profondeur de 570 mètres avec une température de 46°C. Le moins profond est celui de Hon de 140 mètres de profondeur avec une température de 52°C. La nappe captive du Paléocène est captée à une profondeur allant de 190 mètres à 400 mètres. Le

forage de Hetin-sota a atteint cette nappe à 417 mètres de profondeur et celui de Gbéko à 390 mètre avec une température de 69°C et 30°C respectivement. S'il est vrai que le gradient géothermique varie de 3°C tous les 100 mètres de profondeur en moyenne la température mesurée au niveau des forages à eau jaillissante n'est pas corrélable avec les profondeurs captées. Par ailleurs, ces résultats sont similaires à ceux obtenus dans le Bassin de Great [30].

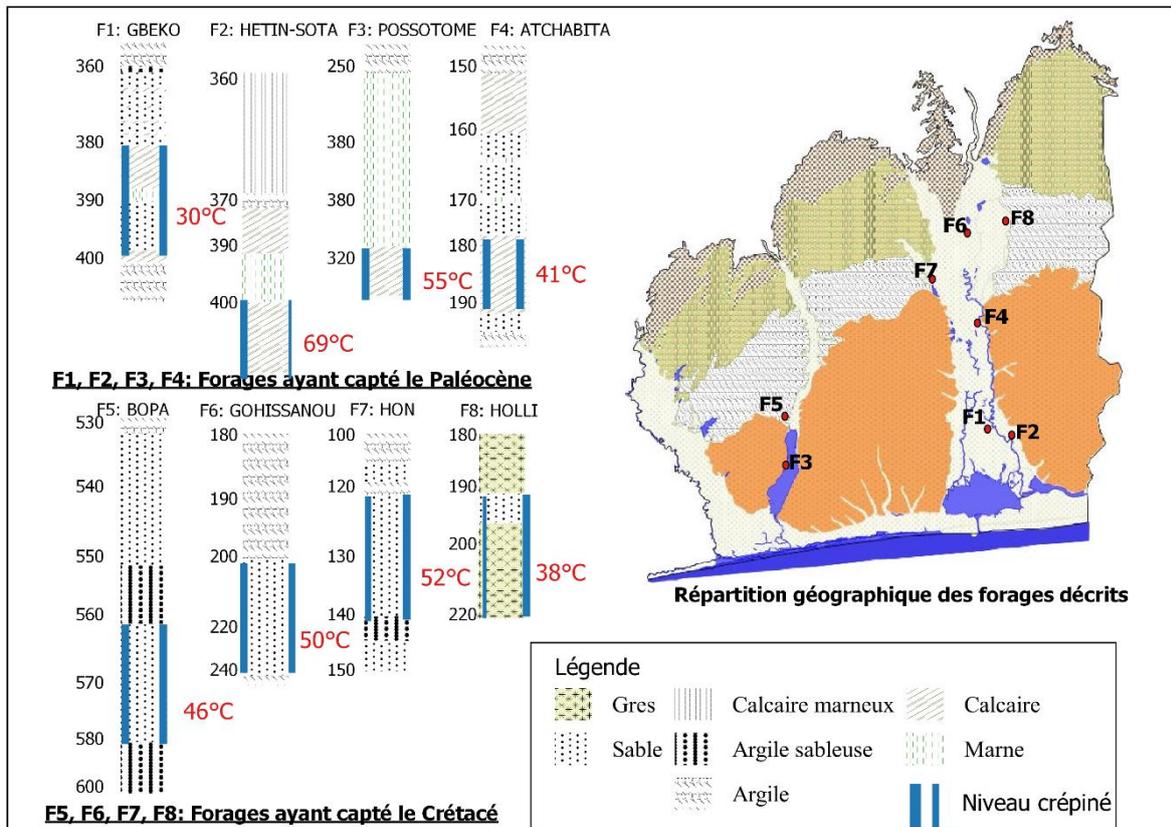


Figure 4 : Comparaison du Crétacé et du Paléocène dans certains forages du BSC

3-3. Anomalies gravimétriques

3-3-1. Anomalie de Bouguer

La carte de l'anomalie de Bouguer montre des zones à anomalies positives comprises entre 20 mGal et 55 mGal. Les zones de forte amplitude sont localisées dans les secteurs d'Aplahoué, Zagnanando et de Kétou au nord puis d'Allada et Lokossa au centre. Cette forte amplitude peut être en relation avec le soulèvement de terrains relativement plus dense (Figure 5).

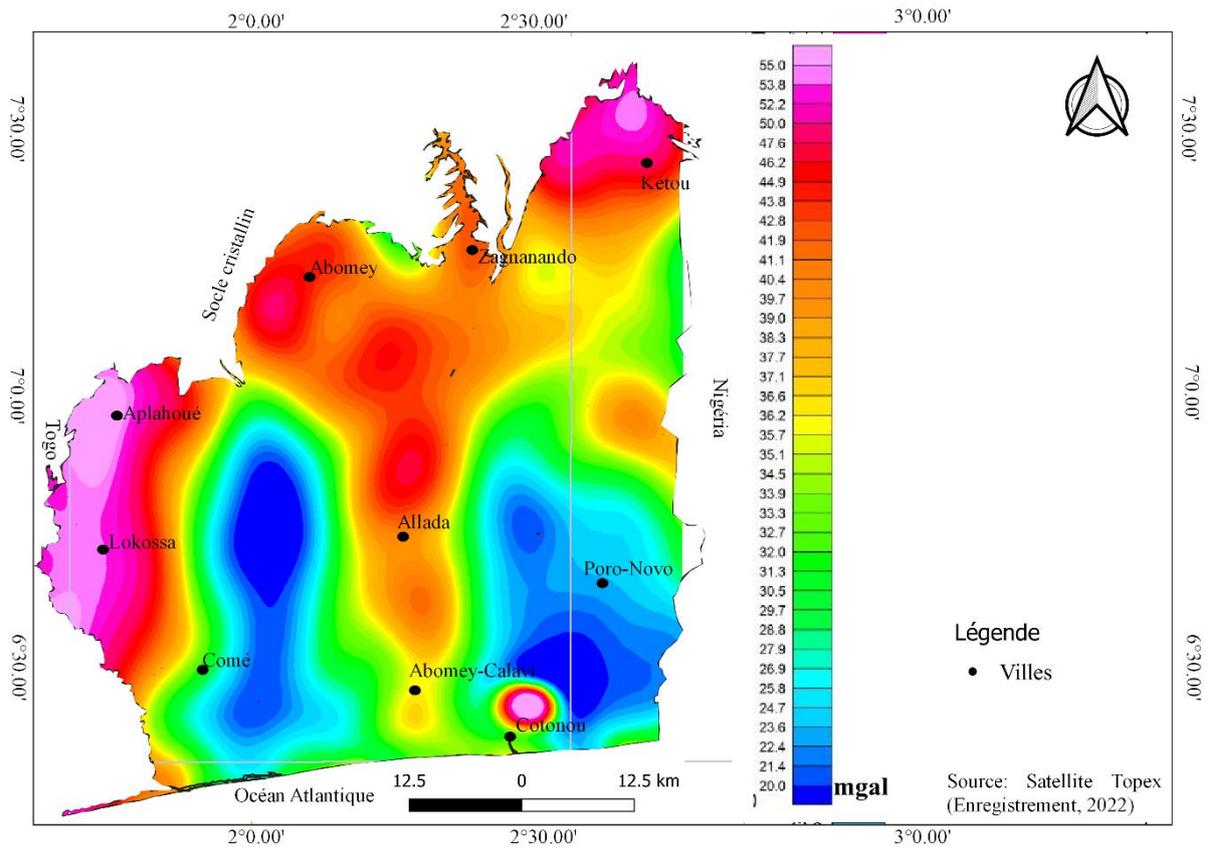


Figure 5 : Carte de l'anomalie régionale de Bouguer

3-3-2. Gradients horizontaux (dx et dy) de l'anomalie gravimétrique

L'interprétation de la dérivée horizontale (dx) a permis d'identifier les discontinuités structurales majeures à l'échelle du secteur d'étude (**Figure 6**). Elle montre des anomalies positives et négatives de dimension et d'amplitude variables, avec des valeurs allant de -14.10^{-4} mGal/m dans la partie sud-ouest à $+14.10^{-4}$ mGal/m dans la partie nord-est. La carte des anomalies dx fait ressortir les principaux secteurs gravimétriques qui reflètent en profondeur la structure de la zone d'étude. Les linéaments gravimétriques mis en évidence s'orientent essentiellement suivant les directions NNE-SSW et NNW-SSE. Les points de forage à eau thermale se superposent aux secteurs d'anomalie négative ou à la limite, entre secteurs d'anomalie négative et positive.

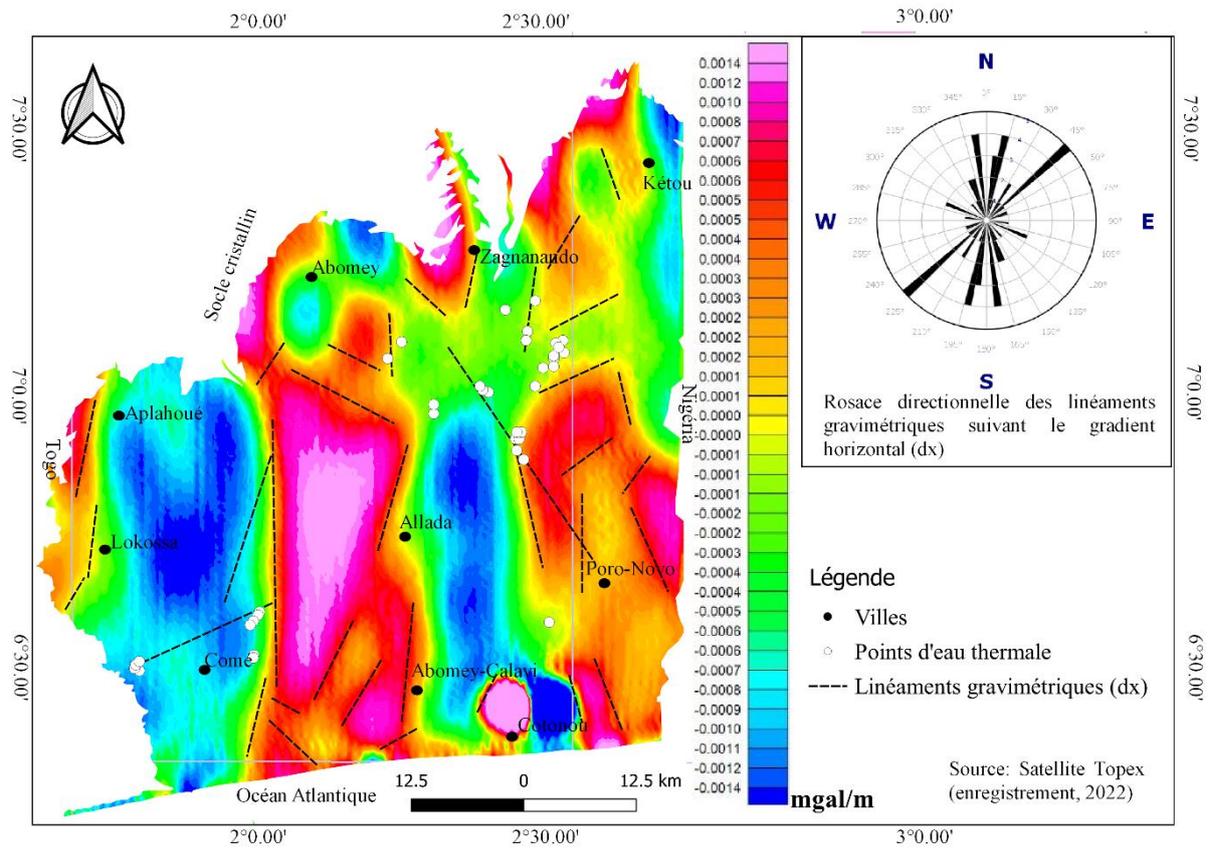


Figure 6 : Carte du gradient horizontale (dx) de l'anomalie gravimétrique du BSC

La **Figure 7** présente la carte de traitement suivant la première dérivée (dy) du gradient horizontal de l'anomalie de Bouguer. Elle montre les secteurs d'anomalie positive et négative d'amplitude comprise entre -11.10^{-4} mGal/m et $+11.10^{-4}$ mGal/m. Ces anomalies gravimétriques mises en évidence sont séparées par des valeurs d'annulation 00 mGal/m. Les valeurs d'annulation marquent la limite des corps géologique [18]. Les axes gravimétriques mis en évidence montrent les directions préférentielles NE-SE et NW-SE. Les points de forage à eau thermale sont situés dans les zones d'annulation gravimétrique ou négative.

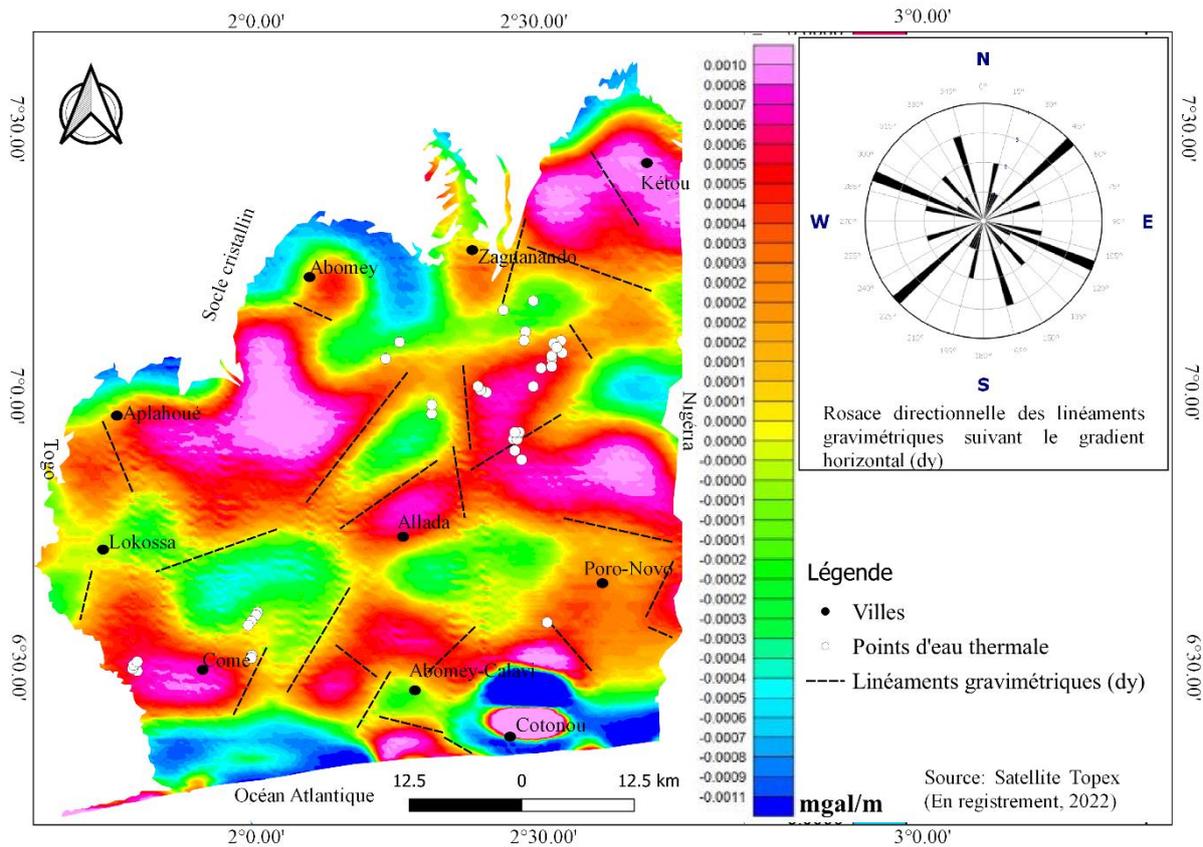


Figure 7 : Carte du gradient horizontale (dy) de l'anomalie gravimétrique du BSC

3-3-3. Gradient vertical (dz) de l'anomalie gravimétrique

La carte de la dérivée première du gradient vertical (dz) de l'anomalie gravimétrique met en évidence les anomalies d'extension importante et fait ressortir des contacts francs entre secteurs d'anomalie gravimétrique positive à l'Ouest (Aplahoué, Lokossa et une portion de Athiémé) et au centre (Abomey, Allada et Abomey-calavi), séparés par un secteur d'anomalie négative (Comé, Atthiémé et Porto-Novo) gravimétrique (Figure 8). En s'appuyant sur l'étude pétrographique réalisée [9] dans la partie nord de la zone d'étude, l'interprétation qualitative de ces anomalies gravimétriques permet de lier les fortes valeurs d'anomalies positives aux migmatites, quartzites et granitoïdes. Les zones d'anomalies positives pourraient être interprétées comme liées à la présence d'une faible couverture sédimentaire ou à un soulèvement du socle. Les différentes anomalies gravimétriques mises en évidence sont séparées par la valeur d'annulation 00 mGal/m qui marque la limite des corps géologiques [18, 22, 31, 32]. Les axes gravimétriques mis en évidence montrent les directions préférentielles N-S et NNW-SSE. Les points d'eau thermale coïncident avec les secteurs d'anomalies négatives ou d'anomalies nulles.

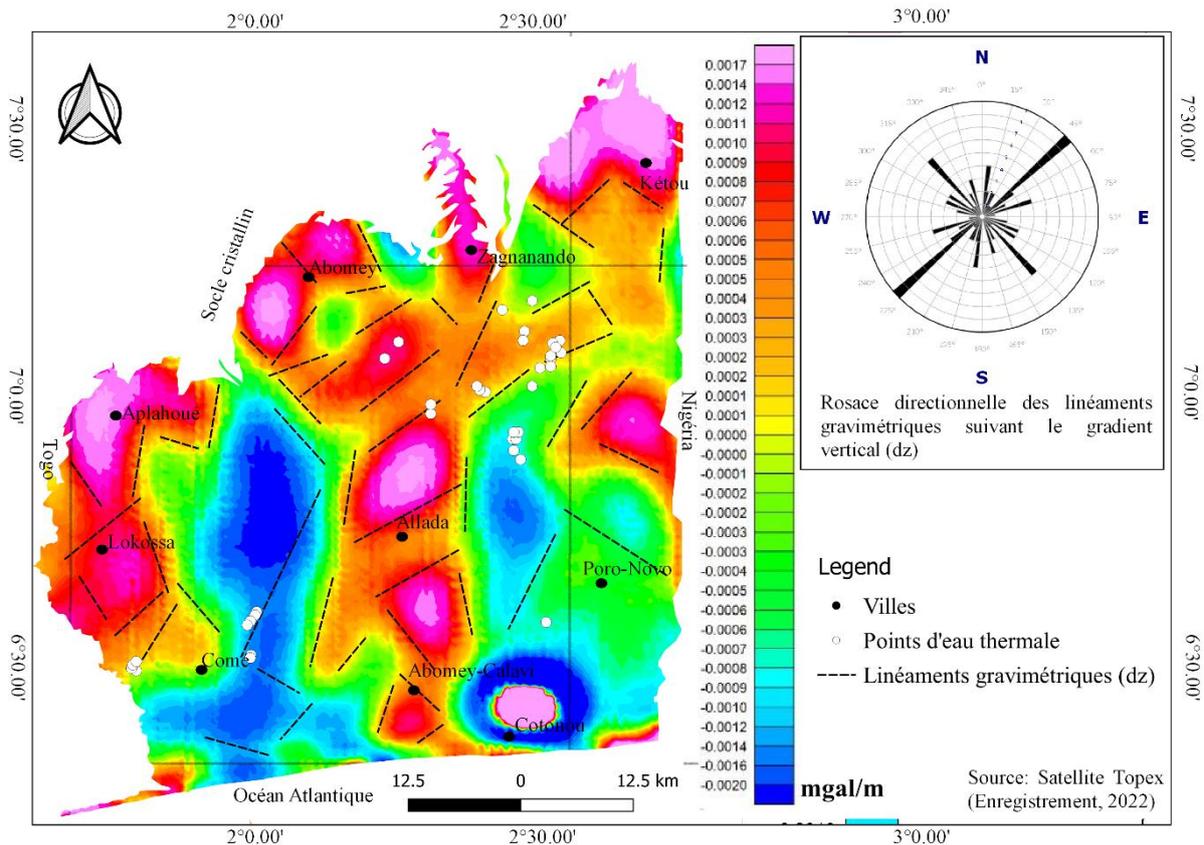


Figure 8 : Carte du gradient vertical (dz) de l'anomalie gravimétrique du BSC

3-4. Linéaments et profondeurs des sources d'anomalies gravimétriques

L'analyse par superposition dans une base de Système d'Information Géographique (SIG) des fracturations cartographiées par la méthode gravimétrique et de télédétection du BSC a permis après calage avec les cartes géologiques (feuilles Abomey-Zagnanando, Lokossa-Porto-Novo à l'échelle de 1/200000) et les modèles de blocs pétroliers sud réalisés de valider certaines fracturations et de proposer un modèle structural de la région [29]. La direction majeure qui caractérise les accidents géologiques cartographiés dans le BSC est NE-SW (**Figure 9**). D'autres directions NNE-SSE moins importantes sont également mises en évidence. Les directions NE-SW et NNE-SSE sont représentées principalement par des failles bordières et les décrochements après leur superposition à la carte géologique du BSC. Les directions de ces fractures sont en parfaite corrélation avec celles mises en évidence et occasionnant dans le Crétacé supérieur la formation des vallées d'effondrement, de fossés et de Horst [9]. Les solutions d'Euler obtenues par superposition de la dérivée horizontales (dx et dy) et verticale (dz) des données gravimétriques et celles de l'anomalie de Bouguer dans une fenêtre de 9km x 9km avec une erreur de 15 % ont permis d'estimer les profondeurs probantes de certaines facturations du BSC. La signification des solutions de la déconvolution Eulérienne dépend de l'indice structural (IS). Dans le cadre de la présente étude, l'indice structural utilisé est égal à 0.5. Il met en évidence les contacts, les limites, les failles, les rejets de failles ou reliefs intermédiaires depuis leur profondeur à la surface. Les solutions obtenues sont regroupées en cinq familles dont les profondeurs varient de 600 mètres à 2100 mètres. Ces solutions se superposent et/ou sont parallèles aux fracturations identifiées.

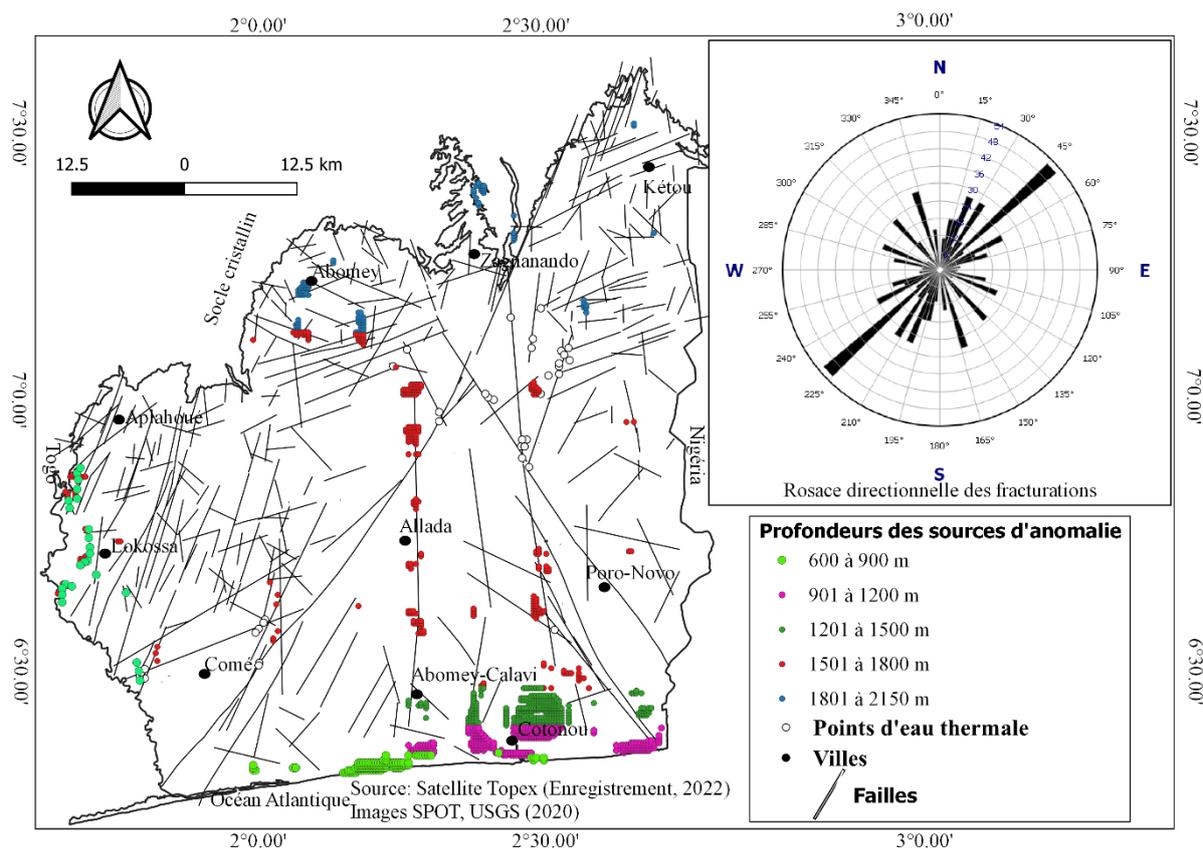


Figure 9 : Carte des fracturations du BSC et des solutions d'Euler et les sites d'eau thermale

4. Discussion

Les aquifères étudiés sont du Crétacé et du Paléogène dans le BSC. Ils sont à eaux jaillissantes avec des températures variables d'un site à un autre. L'hydrothermalisme observé dans certains sites d'eau jaillissante du Bassin Sédimentaire Côtier du Bénin peut être associé à deux facteurs : l'effet du gradient géothermique censé apporter une augmentation de la température des eaux souterraines avec l'évolution de la profondeur et la présence des fracturations profondes qui favorisent la diffusion de la chaleur dans les aquifères en contact. L'analyse comparative des logs lithostratigraphiques et des profondeurs des aquifères captés au niveau des différents forages montre que les températures mesurées ne correspondent pas au gradient géothermique de la zone d'étude. On constate plutôt que certains forages profonds captent des eaux froides tandis qu'à proximité immédiate d'autres forages moins profonds captent des eaux thermales. Les sondages de Bopa profond de 570 mètres et de Possotomè d'une profondeur de 320 mètres illustrent mieux ce constat puis que les températures enregistrées sont respectivement de 46°C et de 55°C [5, 8, 15]. Les manifestations d'hydrothermalismes liées au gradient géothermique sont observées dans les bassins profonds d'au moins 2000 à 3000 mètres [33]. La plus part des forages thermaux dans la partie nord du BSC ont atteint le socle à moins de 400 mètres de profondeur. La projection des points d'eau thermale sur les cartes de la dérivée du gradient horizontal et vertical de l'anomalie de Bouguer montre que ces sites sont repartis dans les zones d'anomalie négative ou d'anomalie nulle, à la limite entre les zones d'anomalie positive et négative. Les zones d'anomalies négatives reflètent la présence de chenaux ou l'effondrement du socle, la présence d'un fossé ou graben à remplissage sédimentaire [20, 22]. Quant aux zones d'anomalie nulle, elles marquent les limites ou les zones de contacts entre différentes formations géologiques [18, 22, 31, 32].

La répartition des sites d'eau thermale dans les zones d'anomalie nulle ou négative du BSC doit être associée à l'hydrothermalisme de type tectonique. Les solutions obtenues par la déconvolution eulérienne montrent des profondeurs en moyenne de 600 mètres à 2100 mètres. L'analyse structurale de la zone d'étude par la rosace directionnelle des fracturations présente deux directions préférentielles, NE-SW et NNE-SSE. La confrontation des fracturations obtenues aux solutions eulériennes et leur superposition aux points des sites d'eau thermale montre le lien qui existe entre ces derniers. En effet, les sites d'eau thermale sont répartis dans les zones de sources profondes de 1501 mètres à 2100 mètres en moyennes, le long des failles conjuguées. Le réchauffement des eaux souterraines des aquifères captifs dans le BSC est dû à la chaleur libérée le long de ces failles et diffusée dans les formations géologiques perméables qui contiennent les eaux souterraines.

5. Conclusion

Les aquifères étudiés sont du Crétacé et du Paléogène dans le BSC. Ils sont à eaux jaillissantes dans les vallées des principaux cours d'eau du BSC avec des températures variables d'un site à un autre. L'hydrothermalisme de ces aquifères jaillissants dans certains endroits du Bassin Sédimentaire Côtier du Bénin serait lié à l'infiltration des eaux météoriques depuis les zones préférentielles de recharge de ces aquifères et réchauffées dans les zones d'anomalies thermiques par la chaleur d'origine lithosphérique. Ces zones d'anomalie thermiques sont situées dans les secteurs à anomalie gravimétrique négative ou nulle, le long des fracturations croisées profondes d'au moins 1500 m à 2100 m. Toutefois, cette hypothèse reste à élucider par nos recherches en cours sur la géochimie et isotopie des eaux souterraines.

Références

- [1] - M. BOUGHLALI, Thermalisme et thalassothérapie en Algérie ; Centre de Thalassothérapie Sidi-Fredj Staouali (Alger) Algérie. *Presse therm climat*, 140 (2003) 161 - 165 p.
- [2] - S. BOURI, M. GASMI, G. JAOUADI, I. SOUISSI, A. LAHLOU MIMI and H. BEN DHIA, Etude intégrée des données de surface et de subsurface pour la prospection des bassins hydrogéothermiques: cas du bassin de Maknassy (Tunisie centrale) *Hydrological Science Journal*, 52 : 6 (2007) 1298 - 1315
- [3] - S. CHEVALIER, J. GAUTHIER et O. BANTON, Évaluation du potentiel géothermique des nappes aquifères avec stockage thermique ; (INRS)-Eau, Université du Québec, Vol. 24, (1997) 611 - 620
- [4] - L. ANDRIANAIVO et J. V. RAMASIARINORO, Importance des ressources géothermales naturelles sur le tourisme. *Mada-Hary*, Vol. 1, (2013) 15 p.
- [5] - P. M. DOSSOU, C. ZEVOUNOU, A. ALASSANE, C. KAKI, M. BOUKARI and D. MAMA, Physico-chemical characteristics of gushing water aquifers in the Coastal Sedimentary Basin of Benin (West Africa) ; *GEP Journal*, 9 (2021) 149 - 163
- [6] - M. BOUKARI, Réactualisation des connaissances hydrogéologiques relatives, au bassin sédimentaire côtier du Benin, Direction de l'hydraulique, Cotonou, Benin, 1624 (2002) 154 p.
- [7] - L. LE BARBÉ, G. ALE, B. MILLET, H. TAXIER, Y. BOREL, R. GUALDE, Les ressources en eau superficielle de la République du Bénin : Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération, *Col Monographiq Hydro*, N°11 (1993) 543 p.
- [8] - M. SLANSKY, Contribution à l'étude géologique du bassin sédimentaire côtier du Dahomey et du Togo. Mémoire du Bureau recherche géologique et minière, N°11 (1962) 268 p.
- [9] - INSTITUT DE RECHERCHE BREDI, Notice explicative de la carte géologique à 1/200000, Feuille Pira-Savè, Abomey-Zagnanado et Lokossa-Porto Novo, mémoire n°3, 1^{ère} édition, (1989) 77 p.

- [10] - M. DRAY, L. GIACHELLO, V. LAZZAROTTO, M. MANCINI, E. ROMAN E et G. M. ZUPPI, Etude isotopique de l'aquifère Crétacé du bassin sédimentaire côtier béninois ; hydrogéologie, N°3 (1989) 167 - 177
- [11] - A. J. KODJO et D. C. YAWOA, Le passage de Paléocène-Eocène dans les Bassins Sédimentaires Côtiers du golf du Bénin : Togo, Bénin et Nigéria. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 11 (2008) 193 - 205, ISSN 1813-3290
- [12] - B. COLLIGNON, Données nouvelles sur l'aquifère Paléocène du Bassin Sédimentaire Côtier Bénino-Togolais. Cinquième colloque international d'hydrologie en pays calcaire et milieu fissuré. Annales sc de l'univ de Besançon, 11 (1992) ISSN 0523-056X
- [13] - SAGA PETROLEUM, Evolution du Bassin Sédimentaire Côtier du Bénin. SAGA Petroleum, Denver, (1994)
- [14] - GEOHYDRAULIQUE, Hydraulique villageoise dans les provinces de l'Atacora, du Mono et de l'Ouémé, Direction de l'Hydraulique, Cotonou, Bénin ; Rapport final, (1985) 236 p.
- [15] - M. BOUKARI et A. ALASSANE, Les ressources en eau souterraine du bassin sédimentaire côtier de la république du Bénin, *Africa Géoscience review*, Vol. 14, N°3 (2007) 283 - 301
- [16] - M. BOUKARI, Aquifères côtiers de l'Afrique de l'Ouest (Bénin, Nigéria, Togo, Ghana, Cote d'Ivoire), rapport de l'atelier national sur le document de projet régional à moyen terme, document-guide, (2005) 62 p.
- [17] - A. G. B. DAGO, les granitoïdes Berimien de la région de Daloa (centre-ouest de la côte d'Ivoire) : genèse et implication dans l'évolution thermique du craton ouest africain. Thèse de doctorat de l'univ. Felix Houphouët Boigny, *Science de la terre*, (2020) 257 p.
- [18] - D. B. BOUKEKE, Structures crustales d'Afrique centrale déduites des anomalies gravimétriques et magnétiques : le domaine précambrien de la République Centrafricaine et du Sud-Cameroun. Doct. Univ. Paris-Sud, éd. ORSTOM, (1994) 278 p.
- [19] - B. FARHAT, R. BENASSI, C. JALLOULI & A. BEN MAMMOU, Contribution de la gravimétrie à l'étude de la structure de la plaine de Mornag (nord-est de la Tunisie): implications hydrogéologiques. *Hydrological Science Journal*, 55 (8) (2010) 1396 - 1404
- [20] - N. YALO, E. A. LAWIN, G. A. F. D'ALMEIDA, T. P. GONÇALVES et G. F. DAGBA, Contribution de la gravimétrie à l'étude de la partie sud du bassin sédimentaire côtier onshore du Bénin, *Africa Geoscience Review*, Vol. 20, N°3 & 4 (2013) 67 - 81
- [21] - S. SAWADOGO, Les plutons granitiques de la ceinture de Djibo au nord du Burkina Faso (Afrique de l'Ouest) : mécanismes de mise en place et implications dans l'évolution géodynamique de la ceinture. Doct. Univ. Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO, (2015) 235 p.
- [22] - A. PARRIAUX, Géologie base pour l'ingénieur. Presses polytechnique et universitaire Romandes, 2eme édition revue et augmentée, (2009) 581 p.
- [23] - R. J. BLAKELY & R. W. SIMPSON, Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, 51 (1986) 1494 - 1498
- [24] - J. DUBOIS, M. DIAMENT & J. P. COGNE, Géophysique. Cours et exercices corrigées, 4ème édition. Dunod, Paris, (2011) 257 p.
- [25] - M. FEDI & G. FLORIO, Detection of potential fields source boundaries by enhanced horizontal derivative method. *Geophysical prospecting*, 49 (2001) 1365 - 2478
- [26] - J. SCHOEFFLER, Gravimétrie appliquée aux recherches structurales et à la prospection pétrolière et minière. Technip, Paris, (1975) 288 p.
- [27] - J. BAPTISTE, Cartographie structurale et lithologique du substratum du Bassin parisien et sa place dans la chaîne varisque de l'Europe de l'Ouest : approches combinées géophysiques, pétrophysiques, géochronologiques et modélisations 2D. Univ Orléans, (2016)
- [28] - A. B. REID, D. FITZGERALD & P. MCINERNEY, Euler deconvolution of gravity data : 73rd Annual International Meeting, SEG, *Expanded Abstracts*, (2003) 576 - 579

- [29] - FUGRO, Southern block basement of Coastal Sedimentary basin of Bénin. Ministère de l'Energie, des Recherches Pétrolières et Minières, de l'Eau et de Développement des Energies Renouvelable, (2014)
- [30] - J. E. FAULDS, M. COOLBAUGH, G. BLEWITT and C. D. HENRY, Why is the Nevada in the hot water ? Structural controls and tectonic model of geothermal system in the northwestern Great Basin : *Geothermal Resources Council Transaction*, (2004) 649 - 654
- [31] - M. DEHALU, Gravimétrie et les anomalies de la pesanteur en Afrique orientale, Université de Liège. Bx1, IRGC, mémoire de 3eme cycle, coll, in-°4, tome IV. Fascicule, 3 (1943) 91 p.
- [32] - F. BOUTHEINA, B. RAMDHANE, J. CHOKRI & M. ABDALLAH BEN, Contribution de la gravimétrie à l'étude de la structure de la plaine de Mornag (nord-est de la Tunisie): implications hydrogéologiques, *Hydrological Sciences Journal*, 55 : 8 (2010) 1396 - 1404
- [33] - A. TAILLEFER, Interactions entre tectonique et hydrothermalisme : rôle de la faille normale de la Têt sur la circulation hydrothermale et la distribution des sources thermales des Pyrénées Orientales. Doct Univ de Gãia et de Montpellier, (2017) 250 p.