

Analyse des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère fissuré du socle paléoprotérozoïque : Aide à l'approvisionnement en eau potable des populations de la région de Bondoukou (Nord-est de la Côte d'Ivoire)

[Hydrodynamic properties analysis of fissured aquifers from paleo proterozoic basement : An help for drinking water supply to people from Bondoukou region at North-eastern of Cote d'Ivoire]

Marc YOUAN TA¹⁻², Omer DE LASME³, Derving BAKA², Théophile LASM², Jean Patrice JOURDA¹⁻², and Jean BIEMI¹⁻²

¹Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), U.F.R des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Université Felix Houphouët Boigny de Cocody, 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

²Département des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de l'Environnement, U.F.R des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Université Felix Houphouët Boigny de Cocody, 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

³Université Péléforo Gon Coulibaly de Korhogo, BP 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire

Copyright © 2015 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: This study realized at Bondoukou region in north-eastern of Cote d'Ivoire. It aims to analyze hydrodynamic properties of fissured aquifers with a view to improve drinking water supply at this region. Methodology applied for this study started by mapping of fractures networks from treatment of Landsat 7 satellite images with directional filters. After that, it was established relationship among the parameters of groundwater capture and their relation with fracturing and nature of rock formation. Geostatistical analysis of specific capacity of wells from corrected last step drawdown closed the methodology. Use of remote sensing led to map 5000 fractures responsible of water-bearing-layers inside bedrocks. Productive fractures are met between 30 and 60 meters under the ground with these principals directions: NE-SW, NW-SE and E-W. Great yields are also met at weathering between 15 to 45 meters. Approximately 83, 41% of arrival water occurred in the first 30 meters of the basement. Porphyroid granodiorit produced water more than other rocks formations. Variogram structuring of Log (Q/s) revealed that this hydrodynamic parameter can be considered as a regionalized variable with a range equals to 7,36 km. This is a proof of best connectivity of fractures networks identified. Estimation of specific capacities at the whole studied area was made by kriging. All results obtained through this study contribute to best comprehension of hydrodynamic properties of aquifer at North-east of Côte d'Ivoire.

KEYWORDS: Côte d'Ivoire, Bondoukou, Fractured aquifers, Productivity, specific capacity, Statistical analysis, Geostatistical.

RESUME: Cette étude réalisée dans la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire) a pour objectif d'analyser les propriétés hydrodynamiques des aquifères de fissure en vue d'aider à l'approvisionnement en eau potable des populations. L'approche méthodologie adoptée débute par l'utilisation des images satellitaires de Landsat 7 pour la cartographie des réseaux fractures du socle paléoprotérozoïque grâce à la technique de filtrage directionnelle. Ensuite ont été étudiées les relations pouvant lier les paramètres caractérisant les ouvrages de captage entre eux mais aussi les relations qu'ils peuvent avoir avec la fracturation et les différentes formations géologiques. Enfin, l'analyse géostatistique a permis la modélisation de la distribution spatiale du débit spécifique (Q/S) calculé pour tous les forages au niveau du troisième palier, après correction des rabattements. La cartographie structurale par télédétection a permis l'élaboration d'une carte des fractures détaillées

avec plus de 5000 fractures répertoriées responsables de la formation des aquifères de fracture de la région de Bondoukou. Selon l'étude de la productivité, les fractures les plus productives se rencontrent entre 30 et 60 m de profondeur et les familles de fractures de directions NE-SO, NO-SE et EO sont jugées responsables de cette forte productivité. Les forts et très forts débits sont fournis sous des épaisseurs d'altérites variant entre 15 et 45 m et environ 83,41% des AE se situent dans les 30 premiers mètres dans le socle. Les granodiorites porphyroïdes seraient les formations géologiques les plus productives. La structuration du variogramme de la transformée logarithmique du débit spécifique permet d'affirmer qu'il s'agit d'une variable régionalisée avec une distance de régionalisation de l'ordre de 7,36 km témoignant de la bonne connectivité des réseaux de fractures. Le krigeage conduit ensuite à une bonne estimation du débit spécifique sur l'ensemble de la zone d'étude. Les résultats acquis dans cette étude concourent à une meilleure compréhension des propriétés hydrodynamiques des aquifères du nord-est de la Côte d'Ivoire.

MOTS-CLEFS: Côte d'Ivoire, Bondoukou, Aquifère de fissure, Productivité, Débit spécifique, analyses statistiques Géostatistique.

1 INTRODUCTION

En Côte d'Ivoire, le problème d'approvisionnement en eau potable des populations est assez récurrent et très clairement perceptible dans sa partie nord notamment dans la région de Bondoukou. Les ressources en eaux de surfaces sont rares et de très mauvaise qualité surtout pendant la saison sèche. Le recours aux eaux souterraines devient un impératif pour les autorités dans leur recherche de solution à cet épineux problème. Au niveau du socle paléoprotérozoïque, comme celui de la région de Bondoukou, les principales ressources en eau souterraine sont contenues dans les aquifères d'altérites et ceux de fissures. Ces réservoirs étant généralement superposés, les plus profondes à savoir les aquifères de fissures sont les plus recherchés pour l'approvisionnement des populations en eau potable car ils sont moins vulnérables à la pollution d'origine anthropique et moins sujette aux fluctuations saisonnières du niveau piézométrique. On comprend alors que depuis ces dernières décennies de nombreuses études ont été menées pour une meilleure compréhension du fonctionnement des hydrosystèmes développés en milieu de socle cristallin et cristallophyllien de Côte d'Ivoire ([1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16]. Certains travaux ont été orientés vers la connaissance des propriétés hydrochimiques et isotopiques des eaux fournies par ces aquifères de socle fissuré ([2], [17], [18], [19], [20], [21], [22]).

Les travaux de [7] ont clairement montré que les populations de la région de Bondoukou éprouvent d'énormes difficultés d'approvisionnement en eau potable. En effet certaines localités (plus de 63%) de cette région qui fait l'objet de cette étude, manquent de point d'approvisionnement en eau et se retrouvent dans des conditions dramatiques de pénurie d'eau potable quasiment toute l'année. D'autres localités bien que possédant un forage ne sont pas totalement à l'abri de cette grave situation de manque d'eau potable car bon nombre de ces ouvrages se trouvent être en panne par manque d'entretien alors que d'autres fournissent des débits trop faible pour satisfaire toute la localité. En effet, plusieurs travaux ont montré que la majorité des ouvrages de captages à l'échelle nationale ont des débits faibles ([1], [23], [2], [24], [3], [7], [10]). Cet état de fait est souvent imputable aux manques d'études appropriées utilisant des techniques nouvelles de prospection hydrogéologique que sont la télédétection optique et radar et la géophysique lors de l'implantation des ouvrages notamment dans les zones rurales. Les travaux de [1], [23], [2], [24], [3], [7] parviennent à la même conclusion. De plus dans le Nord-Est de la Côte d'Ivoire principalement dans les régions de Bondoukou et de Bouna encore plus au nord, les travaux portant sur la prospection hydrogéologique sont très rares et fragmentaires.

Cette étude a donc été initiée dans le souci de mieux connaître le comportement d'un point de vue hydrodynamique des réservoirs de fissures du socle paléoprotérozoïque du nord-est de la Côte d'Ivoire. Elle s'est fixé pour objectif principal d'analyser les propriétés hydrodynamique des aquifères de fissures de la région de Bondoukou.

2 SITUATION GÉOGRAPHIQUE, CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le secteur qui fait l'objet de cette étude couvre en partie le département de Bondoukou situé dans la nouvelle région du Gontougo au Nord-Est de la Côte d'Ivoire. Cette zone d'étude se localise entre les latitudes 7°55 et 8°30 nord et les longitudes 2°40 et 3°20 ouest.

Elle occupe une superficie d'environ 4735 km² (73,43 km sur 64,49 km) au niveau du socle précambrien du domaine Baoulé-Mossi de la Côte d'Ivoire (Figure1). Avec une fracturation des roches bien développée ce socle d'âge

paléoprotérozoïque est séparé du domaine archéen par l'accident géologique majeur du Sassandra de direction N-S. Les principales formations géologiques de la zone d'étude peuvent être regroupées en trois grands ensembles lithologiques.

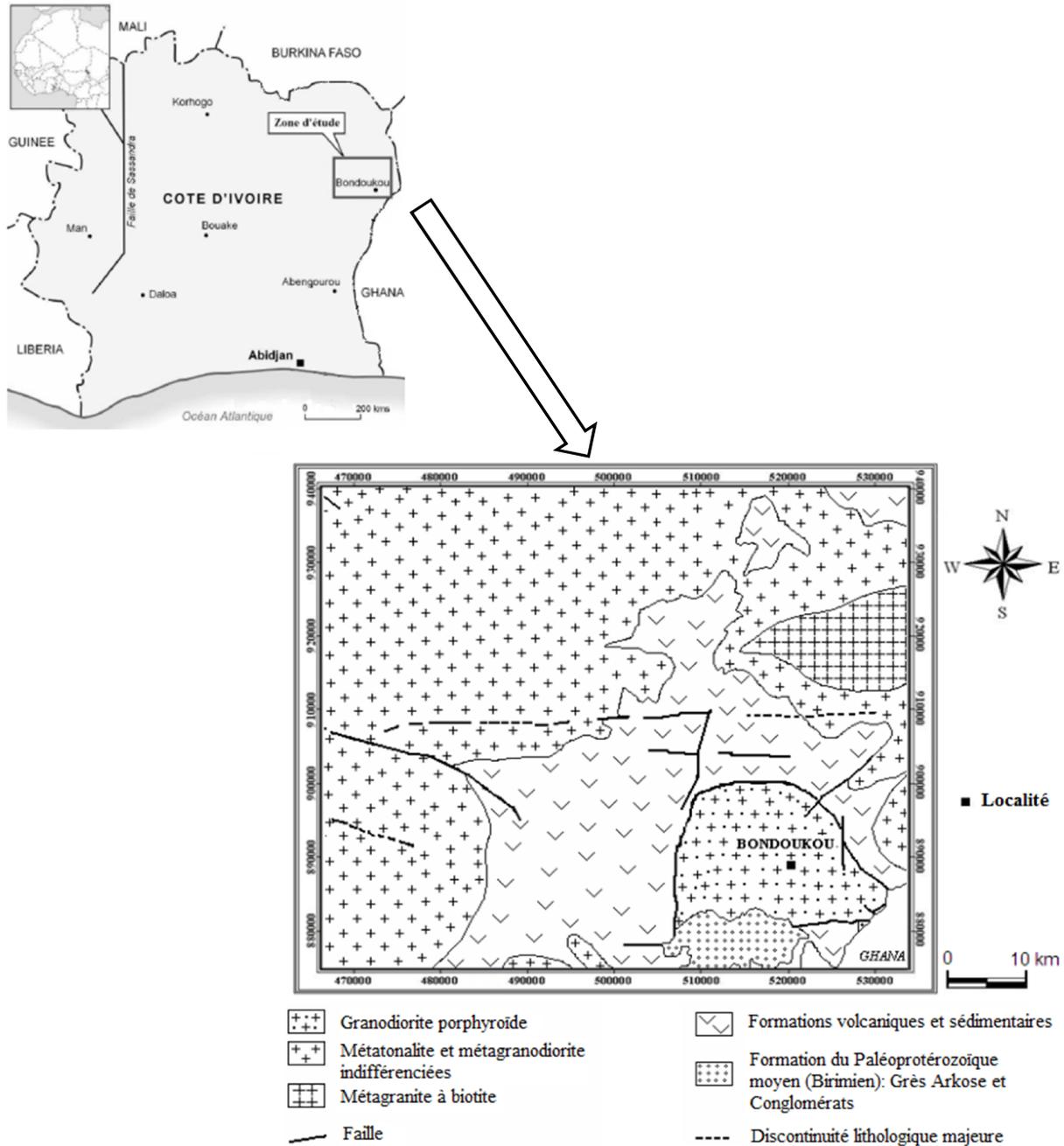


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude et aperçu géologique de la région de Bondoukou

Un ensemble tarkwaien constitué essentiellement de formations détritiques post-tectoniques localisées au sud-est de la zone d'étude et représentées par les Conglomérats (rencontré dans la région de Duakouamé et de Zanzan) et de Cinérite (dans la région de Takoutou et de Siago) [7]. La présence de Grès, d'Arkoses, de Galets de quartz anguleux, de Galets de jaspes et d'Andésites est également signalée par [25]. Un ensemble volcanique et sédimentaire, constitué de plusieurs unités géologiques de nature pétrographique différente. Il s'agit principalement de Schiste, d'Amphibolite et de Métadolérite. Cet ensemble affleure dans les régions du Sud et Centre de la zone d'étude avec des prolongements vers l'Est et le Nord-Est. Les Schistes volcano-sédimentaires indifférenciés sont les plus rencontrés dans cet ensemble et constituent le grand massif à l'intérieur duquel affleure toute une séquence de lentilles hectométriques volcaniques et sédimentaires interdigitées.

L'ensemble intrusif rencontré dans la région de Bondoukou regroupe les granites syntectoniques (granite concordant dit de type Baoulé) et les granites intrusifs post-tectoniques (granite discordant dit type Bondoukou) ([26]). Cet ensemble intrusif est constitué essentiellement granodiorites plus ou moins métamorphisées et secondairement de granites et de tonalites. Au niveau des événements tectoniques, ils s'avèrent complexes et polyphasées générant parfois des distensions responsables de la mise en place des fractures ouvertes à l'instar des autres provinces fracturées de socle de la Côte d'Ivoire ([27], [28], [29]).

Au plan hydrogéologique, le secteur d'étude présente deux types aquifères généralement superposés comme c'est le cas partout en Côte d'Ivoire. Il s'agit des aquifères d'altérites et des aquifères de fissures (fractures) encore appelé aquifères discontinus. Alors que les aquifères d'altérites sont les plus superficiels et ont une fonction capacitive, les aquifères de fractures sont les plus profonds et ont une fonction essentiellement conductrice. Ces derniers ont fait l'objet principal de cette étude.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 MATÉRIEL

La base de données nécessaire à la réalisation de cette étude est constituée d'images satellitaires, de cartes géologiques et les fiches techniques de forages réalisés dans le secteur d'étude. Les données images sont les huit (8) bandes acquises le 02 février 2000 par le capteur ETM+ de Landsat 7. Ces images orthorectifiées apparaissent en générale très claires et nettes. Pour couvrir toute la zone d'étude, il a fallu juxtaposer des quadrants 1 de la scène 195-054 (path 195, row 054) et 3 de la scène 195-055 (path 195, row 055). Diverses cartes géologiques et photogéologiques ont été exploitées pour la validation des résultats obtenus à partir du traitement des images satellitaires. Il s'agit des cartes [30] au 1/200 000, des cartes géologiques établies au 1/200 000 pour les localités d'Agnibilékrou [28], de Bondoukou [29] et de Nassian [27]. Les cartes photogéologiques établies au 1/200 000 pour ces localités [31] ont également été utilisées. Les données de forages concernent les ouvrages réalisés de 1975 à 2006 après une étude géomorphologique lors des programmes nationaux d'équipements hydrauliques financés par le Fond National à l'Hydraulique (F.N.H) et dans le cadre du projet BADEA (Banque Arabe de Développement Economique en Afrique). Ces fiches techniques de forage renseignent sur la profondeur totale forée (Pt), l'épaisseur d'altération (EA), les arrivées d'eau (AE), les niveaux statiques (NS), les niveaux dynamiques (ND), les débits de foration (Q), le débit spécifique (Qsp) et la nature pétrographique du socle.

Le traitement des images satellitaires pour la cartographie des fractures de la région de Bondoukou s'est fait grâce au logiciel ENVI 4.4. Pour l'étude des propriétés hydrodynamiques des aquifères formés par ces fractures, les logiciels Map-Infos™ 8.0 et Excel ont été utilisés. Le logiciel Statistica 6.1 a été utilisé pour effectuer les analyses statistiques. Le traitement des données en vue de la détermination des paramètres régionalisés lors l'analyse géostatistique a nécessité l'utilisation du logiciel Variowin™ [32] et le module Xvalid de Geoeas pour procéder au krigeage.

3.2 MÉTHODES

3.2.1 CARTOGRAPHIE STRUCTURALE DU SOCLE PRÉCAMBRIEN PAR TÉLÉDÉTECTION

Pour rehausser les discontinuités images en vue de leur cartographie, la technique de filtrage directionnelle par fenêtre mobile est appliquée d'une part sur les images brutes ETM+ de Landsat 7 (ETM+5 et ETM+7) et d'autre part sur les nouvelles images fournies par l'analyse en composantes principales sélectives (ACP1567), les combinaisons d'images (ETM+5/ETM+4 et ETM+7/ETM+6). Il s'agit principalement des filtres directionnels de dimension 7x7 de type Sobel et les filtres gradient de [33]. L'application de ces méthodes conduit à l'élaboration de la carte détaillé et la validation des fractures de la région de Bondoukou. Pour plus d'informations sur le principe des méthodes, leur applicabilité et sur la procédure de validation de la carte de fracturation, nous renvoyons les lecteurs aux documents de [34], [2], [35], [4], [7], [8]. Ces fractures sont à l'origine de la formation des aquifères de fissures dont l'analyse des propriétés hydrodynamique fait l'objet principal de cette étude.

3.2.2 ETUDE DE LA PRODUCTIVITÉ DES OUVRAGES DE CAPTAGE EN MILIEU FISSURÉ

L'analyse des relations qui lient les paramètres caractérisant les ouvrages de captage (forages) peut fournir des informations très intéressantes sur leur productivité et leur rentabilité. L'étude de ces relations s'avère donc importante pour toutes les études hydrostructurales, afin d'améliorer la connaissance des aquifères captés. Il s'agira donc dans le cadre de cette étude d'analyser et interpréter les relations entre les profondeurs totales des forages et les débits d'exploitation ; les couche d'altérites et les débits d'exploitation ; les accidents géologiques c'est-à-dire la carte détaillée de fractures mis en

évidence par la télédétection et le positionnement des forages dans le socle ; la direction de cette fracturation et la productivité des ouvrages ; la productivité et la nature pétrographique des roches. La distribution et le comportement des arrivées d'eau (AE) seront également étudiés.

3.3 MODÉLISATION PAR ANALYSE STATISTIQUE ET GÉOSTATISTIQUE DU DÉBIT SPÉCIFIQUE

Le débit spécifique noté Q_{sp} est le débit pompé (Q), rapporté au rabattement (s) pour un temps de pompage donné, dans les conditions d'essai de puits. Dans le cadre de cette étude il faut signaler que le débit spécifique (Q/S) a été calculé pour tous les forages au niveau du troisième palier, après une correction appropriée des différents rabattements.

L'analyse statistique a consisté simplement à la détermination de la loi de distribution qui permet le meilleur ajustement des valeurs du débit spécifique. Une étude géostatistique de ce paramètre hydrodynamique est effectuée pour identifier les paramètres de régionalisation les caractérisant et suivre leur déploiement dans l'espace [3], [7], [36]. L'analyse géostatistique est basée sur la théorie des variables régionalisées. Elle intervient là où se pose le problème de l'analyse de données spatiales. Son outil mathématique est le variogramme expérimental. Le variogramme exprime le demi-accroissement quadratique moyen entre deux points d'appui distants de h . Il permet de décrire la structure spatiale et d'apprécier la corrélation entre les points mesurés en fonction de la distance. Il est défini par la relation (1) :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var}[Z(x+h) - Z(x)]$$

Avec $\gamma(h)$ est le demi-variogramme, $\text{VAR}[Z(x)]$ est la variance au point x et h , le vecteur de module ($x-x'$). Les paramètres de régionalisation des variogrammes expérimentaux sont déterminés après ajustement à des modèles théoriques (sphérique, exponentiel, gaussien, etc.). Le modèle exponentiel a été retenu dans le cadre de cette étude comme l'ont préconisé [37], [3], [8], dont l'expression générale est donnée par l'équation (2) ci-dessous.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(\frac{-3h}{a}\right) \right]$$

où C_0 est l'effet de pépite c'est-à-dire la discontinuité à l'origine, $C = C_0 + C_1$ est le palier, a est la portée pratique (distance à partir de laquelle 95% du palier est atteint), et h est la distance entre deux points d'appui. Les valeurs de la transformée logarithmique des débits spécifiques ont été utilisées pour l'analyse géostatistique. En effet, l'usage de la transformée logarithmique permet de minimiser les fluctuations des variogrammes expérimentaux et d'obtenir un variogramme beaucoup plus structuré que la valeur brute. Aussi, le variogramme a-t-il été calculé à partir des valeurs logarithmiques. La technique de krigeage permet ensuite d'effectuer une estimation de la variable spatiale sur l'ensemble de la zone d'étude. Cette technique prend en compte la structuration spatiale de la variable caractérisée par le variogramme expérimental qui doit auparavant être ajusté par un modèle théorique. Les bases théoriques fondamentales de la géostatistique et celles du krigeage peuvent être consultées dans des ouvrages de référence [38], [37], [39].

4 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

4.1 MISE EN ÉVIDENCE DES STRUCTURES LINÉAMENTAIRES À L'AIDE DES FILTRES SPATIAUX

Les filtres spatiaux utilisés dans le cadre de ce travail, ont été d'un apport considérable dans la vectorisation des discontinuités images même les plus subtiles. Deux fenêtres d'images traitées sont ci-dessous présentées (Figure 2 et 3) pour illustrer le pouvoir discriminant des filtres de types Sobel et gradient. Ainsi plusieurs linéaments ont été cartographiés sur ces images traitées.

Les linéaments parallèles (F1 et F2) de direction NE-SO gouvernant la direction de différents cours d'eau de la région de Bilikié correspondent à des failles parallèles ayant probablement la même histoire géologique. Le faisceau linéamentaire (F3) à l'Ouest de la granodiorite de Bondoukou a une forte tendance structurale. Nous pouvons l'assimiler à une importante zone de cisaillement au contact entre la Granodiorite et les formations Amphibolitiques. Ce faisceau correspond en réalité au couloir passant à proximité de la localité de Sama et de direction N20.

Le filtre gradient de [33] met également en évidence les accidents régionaux affectant la granodiorite porphyroïde de Bondoukou. Majoritairement de direction NO-SE, ces méga fractures jouent un rôle très important dans l'alimentation en eau souterraine des aquifères formés au sein de la granodiorite. Le Barrage de Boda (BB) et le cours d'eau pérenne qu'il engendre, constituent les sites permanents d'infiltration des eaux souterraines. Ainsi, le barrage de Boda alimenterait directement les réverses d'eau souterraine de la ville de Bondoukou et ses environs. Ceci pourrait expliquer les débits

exceptionnels ($Q > 10 \text{ m}^3/\text{h}$) obtenus dans les localités de Bondoukou et de Sama. La carte de la figure 4 présente le résultat final obtenu après l'opération d'extraction des linéaments effectuée sur les images ETM+ traitées de Landsat 7. Ces linéaments ont des tailles et des directions différentes. Leurs interconnexions forment un réseau très dense. Au vu de la densité élevée de la fracturation, on pourrait dire que, la région de Bondoukou aurait subi l'influence de plusieurs phénomènes tectoniques qui ont conduit à la fragmentation prononcée des formations géologiques.

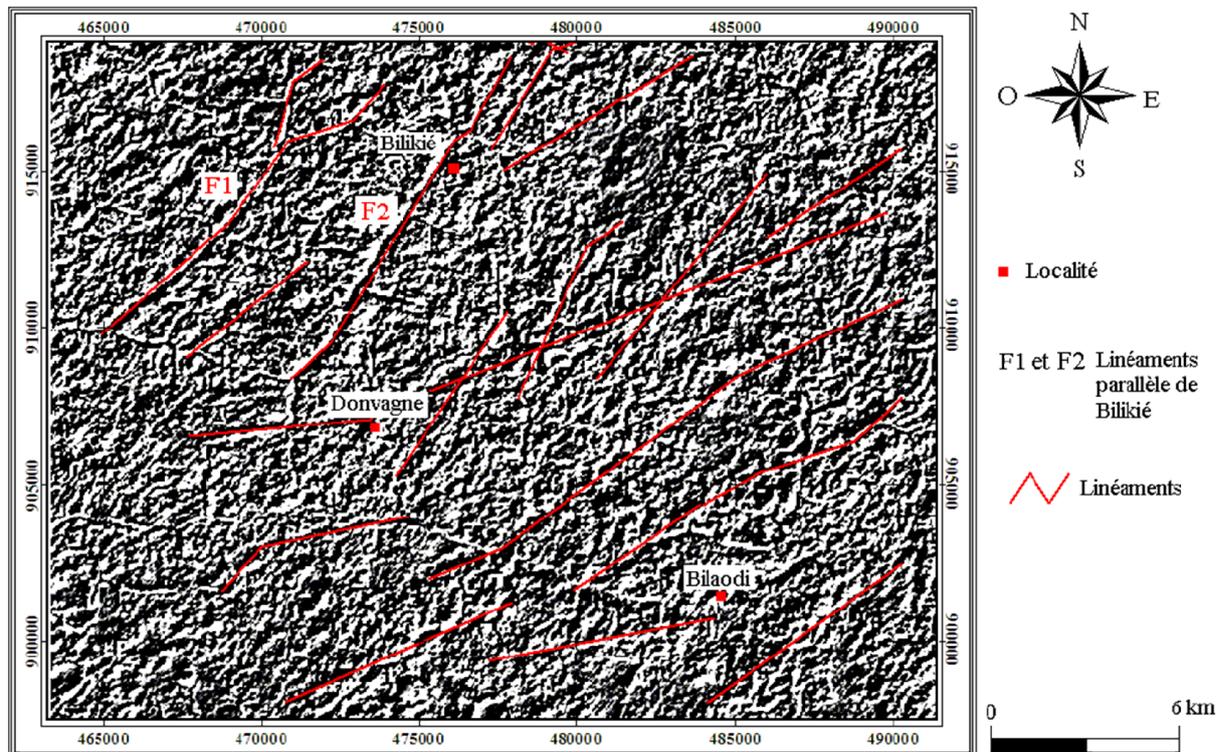


Figure 2 : Filtre Sobel (NO-SE) appliqué à l'indice ETM+5/ETM+4 rehaussant les accidents NE-SO

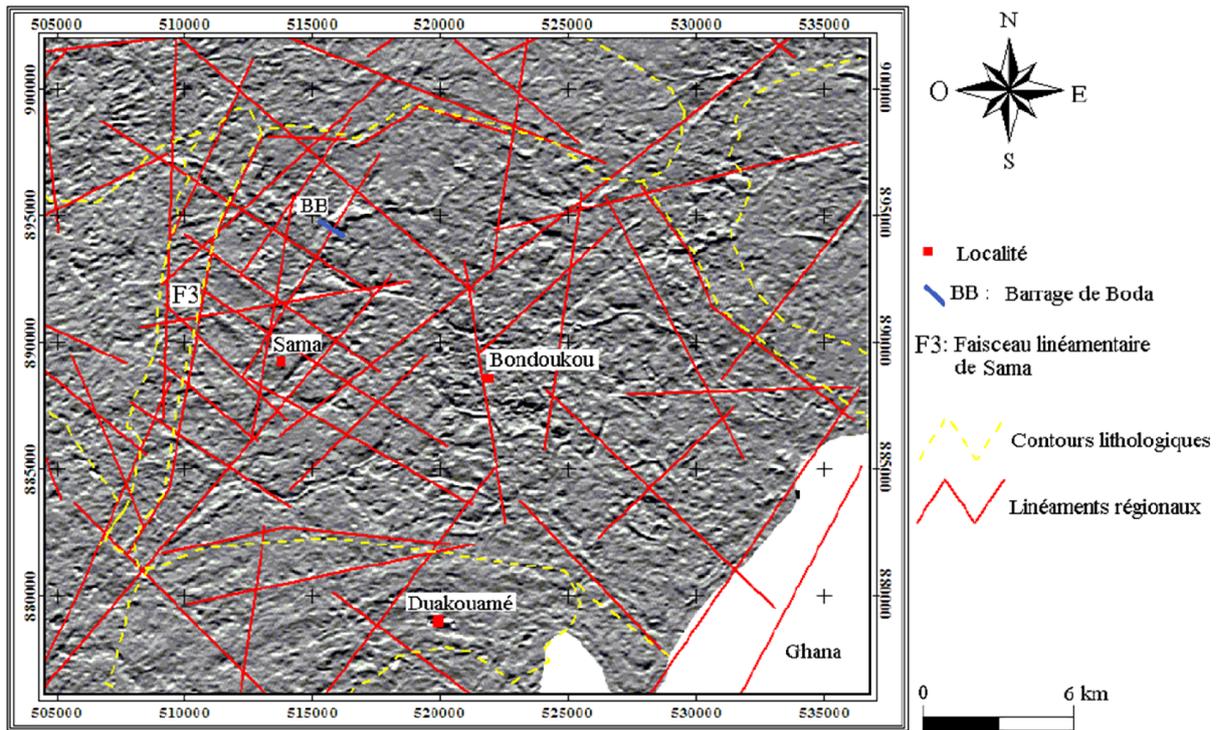


Figure 3 : Filtre gradient de [33] appliqué à ETM+7 rehausse des accidents régionaux affectant la granodiorite porphyroïde de Bondoukou

Cette carte compte environ 5000 linéaments extraits manuellement à partir de l'interprétation des images dérivées. Après une phase de validation à l'aide de la carte photogéologique de la même zone, ces linéaments ont eu valeur de fracturation et peuvent être utilisés pour l'analyse hydrodynamique des aquifères de fissure de la région de Bondoukou.

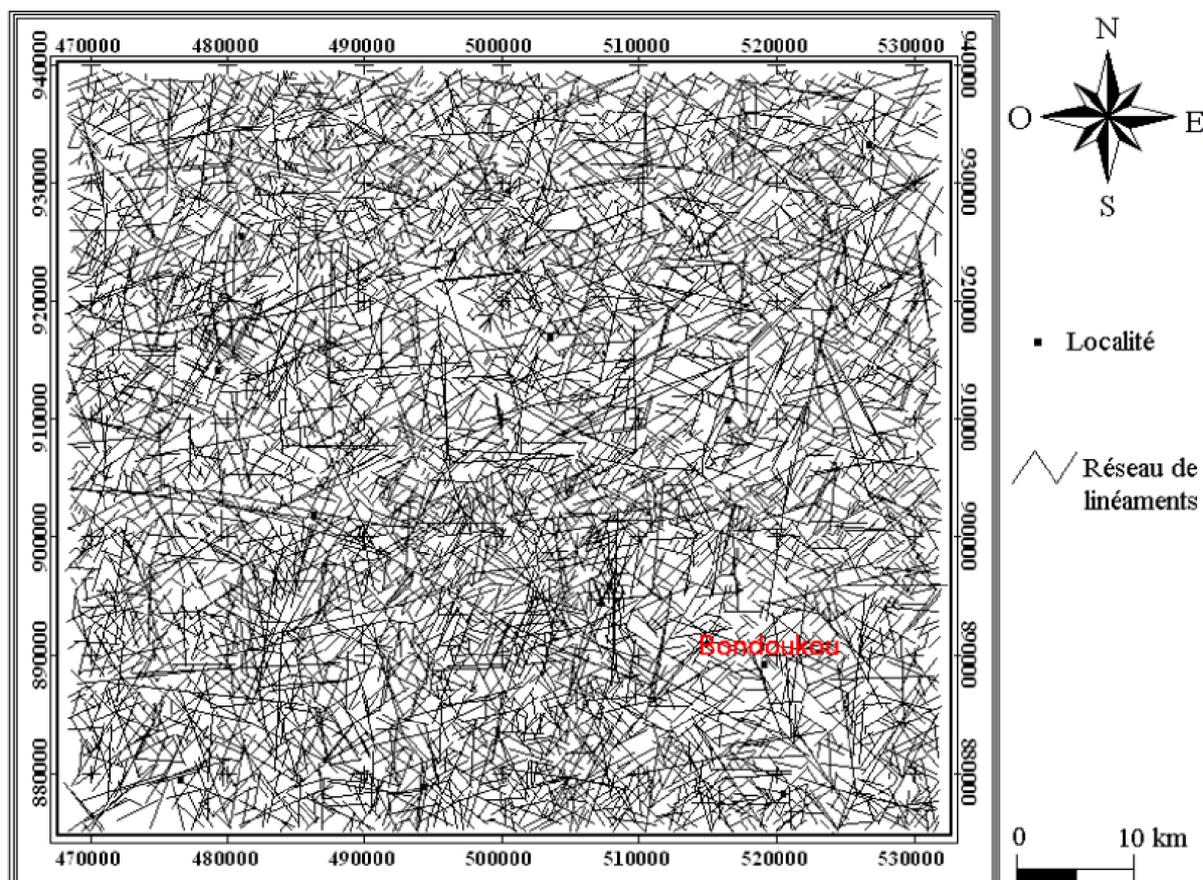


Figure 4 : Carte détaillée de linéaments de la région de Bondoukou établie à partir des images ETM+ de Landsat 7

4.2 ETUDE DE LA PRODUCTIVITÉ DES OUVRAGES DE CAPTAGE

4.2.1 DIRECTION DE FRACTURATION ET PRODUCTIVITÉ DES OUVRAGES DE CAPTAGE

Tout forage de captage implanté dans le socle pour être productif doit nécessairement rencontrer au moins une fracture. Cette dernière influencera le débit des forages si sa connexion dans le réseau global et surtout sa direction le favorisent. Pour ce faire, une des fonctionnalités du SIG qui est la superposition de deux ou plusieurs cartes a été utilisée. La carte de la fracturation tous azimuts et la carte de positionnement des forages ont été superposées. Tous les forages situés directement sur une fracture détiennent leur débit de la productivité de celle-ci. Pour les forages n'étant pas situés sur une fracture, la fracture la plus proche leur est attribuée. Les figures 5, 6, 7 illustrent la répartition des différentes classes de débits dans les classes directionnelles de fracturation. L'analyse de la figure 5 montre qu'en général, toutes les directions de la fracturation sont susceptibles de fournir des faibles débits. Pour l'alimentation d'une petite communauté (ouvrage à faible débit), la recherche des directions de fracturation les plus productives n'est donc pas nécessaire. La difficulté survient lorsque pour l'approvisionnement d'une agglomération ou d'une activité agro-pastorale, on a besoin d'un ouvrage à gros débit (débit moyen et fort débit). L'observation de la figure 6 permet de dire que les classes directionnelles N30, N70-80, N120-130 et N140-150 sont capables d'offrir des débits pouvant parfois atteindre $5 \text{ m}^3/\text{h}$. Une classe directionnelle de fracturation est dite productive lorsqu'elle permet d'avoir des forages avec des débits supérieurs à $5 \text{ m}^3/\text{h}$. La figure 7 permet de mettre en évidence les classes jugées les plus productives dans la région de Bondoukou. Il s'agit des classes N40 (NE-SO), N80 (EO), N140-150 (NO-SE). Ces classes directionnelles de fracturation concordent bien avec les principales directions de fracturation mises en évidence par l'étude des champs de fractures. Les classes NO-SE et NE-SO sont les plus représentatives. Ces accidents, qui s'associent respectivement aux directions libériennes et éburnéennes fournissent les meilleurs débits dans la région de Bondoukou. Les localités de Guimini et de Bidio dont les forages fournissent des débits respectifs de $8 \text{ m}^3/\text{h}$ et $9 \text{ m}^3/\text{h}$, captent des fractures de direction NE-SO. Au niveau des localités de Laoudi-Ba, Bondoukou et Sama, les forages fournissent des débits de $8,1 \text{ m}^3/\text{h}$, $12 \text{ m}^3/\text{h}$ et $14 \text{ m}^3/\text{h}$ respectivement. Ces forages interceptent tous des fractures de

direction NO-SE. Tous ces résultats montrent que les gros débits sont en relation avec les principales directions de fracturation de la région. Le report des différents débits sur la carte de méga fractures de la région de Bondoukou est présenté à la figure 8. L'analyse de cette dernière permet la mise en évidence et confirme les directions productives de cette région du pays. Il s'agit de la direction N40 (NE-SO) avec des débits allant de 6 à 20 m³/h ; la direction N140-150 (NO-SE) avec des débits supérieurs à 5 m³/h et les directions N170-180 (NS) et N 80-100 (EO) avec des débits variant de 5 à 12 m³/h.

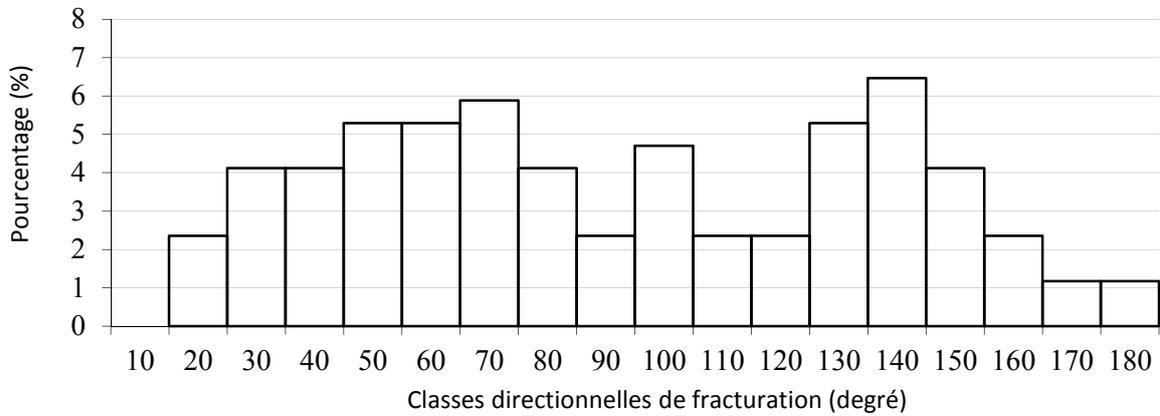


Figure 5 : Répartition des faibles débits (Q < 2,5 m³/h) en fonction des classes directionnelles de fracturation

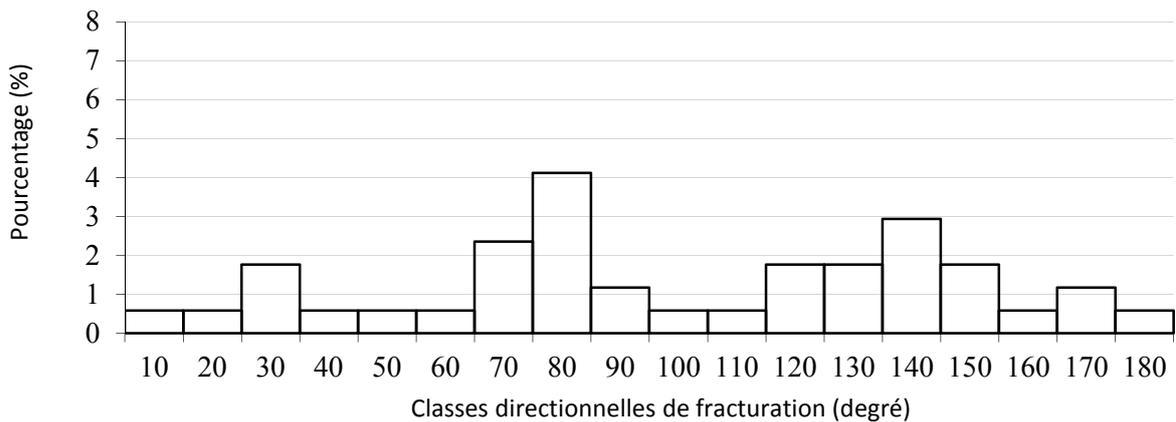


Figure 6 : Répartition des débits moyens (2,5 < Q < 5 m³/h) en fonction des classes directionnelles de fracturation

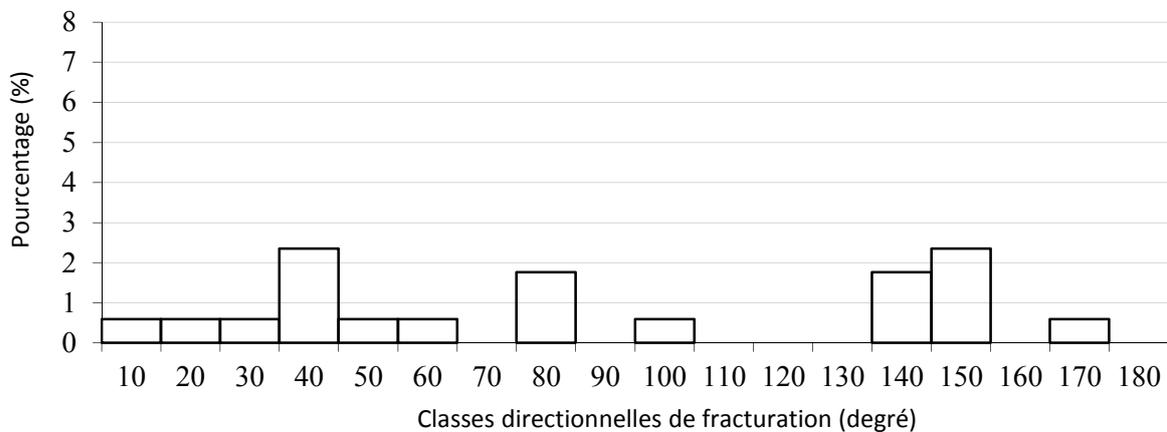


Figure 7 : Répartition des forts débits (Q > 5 m³/h) en fonction des classes directionnelles de fracturation

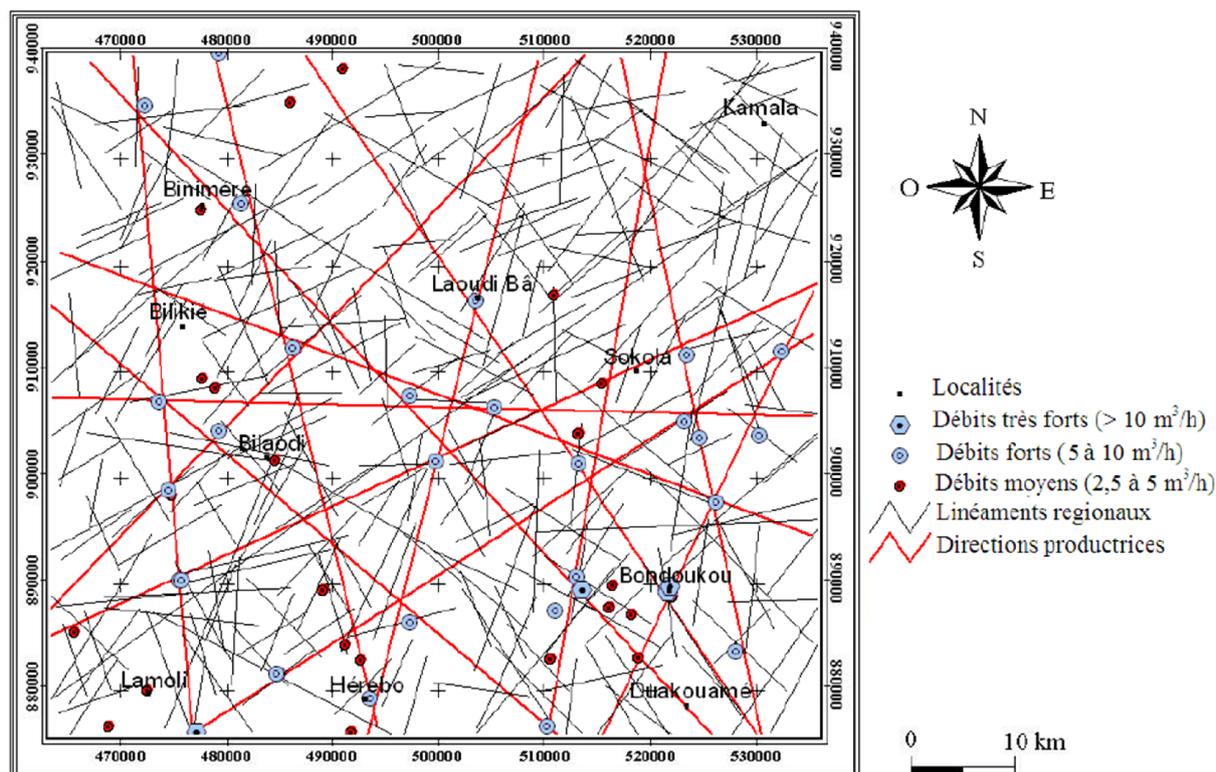


Figure 8 : Carte des directions productives de la région de Bondoukou

4.2.2 PRODUCTIVITÉ ET NATURE PÉTROGRAPHIQUE

Pour mener cette étude, les formations géologiques les plus représentées ont été considérées. Il s'agit des formations granitiques, schisteuses et granodioritiques. Le tableau I présente la répartition des différentes classes de débits considérées en fonction de la nature pétrographique des roches.

Tableau I : Répartition des classes de débits dans les différentes formations géologiques

Formations géologiques	Effectif total	2,5 < Q ≤ 5 m ³ /h		Q > 5 m ³ /h	
		Effectif	Taux %	Effectif	Taux %
Granite	86	15	17	7	8
Schiste	50	12	24	3	6
Granodiorite	26	12	46	9	35

Ce tableau montre que dans la région de Bondoukou, la formation granodioritique semble être la productrice pour l'ensemble des débits supérieurs à 2,5 m³/h. En effet, dans le terrain granodioritique, sur une population de 26 forages, 21 (soit 81%) ont un débit supérieur à 2,5 m³/h. La répartition de ces dernières entre les différentes classes de débit donne 12 forages (soit 46%) pour la classe moyenne (2,5 < Q ≤ 5 m³/h) et 9 forages (soit 35%) qui ont un débit supérieur à 5 m³/h. Tous les six (6) forages qui approvisionnent la ville de Bondoukou en eau potable, ont des débits supérieurs à 13 m³/h et atteignent parfois 20 m³/h. Des débits de 8 m³/h, 9 m³/h et 14 m³/h ont également été signalés au niveau de la granodiorite de Bondoukou respectivement dans les localités rurales de Guimini, Bidio et Sama. Au niveau de la classe des débits moyens, après la granodiorite porphyroïde, les schistes semblent être plus productifs avec 24% de forages contre 17% dans les formations granitiques. Cette tendance s'inverse quand il s'agit de la classe des forts débits où 8% des forages implantés dans les formations granitiques fournissent des débits supérieurs à 5 m³/h contre seulement 6% dans les formations schisteuses.

Les formations schisteuses de la région de Bondoukou, bien que redressées à la verticale, se trouvent en zone à relief élevé (topographiquement haut). Une forte densité de réseau hydrographique tapis sur ces formations est le signe d'une

faible infiltration des eaux pour l'alimentation des nappes souterraines. En plus de ces raisons, l'absence des intercalations calcodolomitiques et des filons de quartz au sein de ces formations pourrait expliquer les faibles débits enregistrés. L'épaisseur d'altération sur les formations granitiques est généralement plus faible que celle des terrains schisteux, ce qui exposerait les niveaux d'eau dans ses aquifères aux fluctuations saisonnières et par conséquent réduirait ainsi la productivité des ouvrages captant ces formations.

En somme dans la région de Bondoukou, la granodiorite porphyroïde semble être la plus productive. On constate donc au vu de ces résultats que, la productivité des ouvrages varie selon la nature pétrographique de la roche avec un effet non moins négligeable du critère géomorphologique. Dans le cas des granodiorites porphyroïdes de Bondoukou, le barrage de Boda aurait certainement contribué à la réalimentation permanente des nappes souterraines de cette région rendant ces formations très productives. En effet, le barrage de Boda est localisé sur cette formation et engendre une rivière pérenne (par la libération du trop-plein d'eau même en saison sèche) qui coule au niveau de la zone à forte tendance structurale. Cette zone serait probablement le lieu de réalimentation permanente de la nappe qui se trouve au sein de cette formation.

4.2.3 ETUDE DES ARRIVÉES D'EAU (AE)

Dans cette étude, seules les arrivées d'eau (AE) enregistrées dans le socle ont été prises en compte. Sur un total de 85 forages où la profondeur des AE a été déterminée, 77 possèdent au plus une seule AE. Seulement 6 forages ont enregistré une deuxième AE et 2 forages, une troisième AE.

Le diagramme ci-dessous (Figure 9) qui présente la fréquence des AE en fonction des classes de profondeur (pas de 10 m) permet de mieux apprécier la distribution des AE dans le socle. Environ 83,41% des AE se situent au niveau des 30 premiers mètres dans le socle, avec une prédominance entre 0 et 10 m de profondeur dans le socle (40,74% des AE) suivie d'une baisse régulière de la fréquence qui atteint 10% aux environs de 30 mètres. Au-delà de cette profondeur les venues d'eau deviennent très rares. 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 10). On constate sur ce graphe, que le débit moyen des AE augmente avec la profondeur et atteint son maximum (3,7 m³/h) 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 (1,2 m³/h) à environ 50 m dans le socle. On constate donc que les meilleurs débits dans la région de Bondoukou se situent au niveau des 30 premiers mètres dans le socle. Cette zone correspond à la zone de nombreuses fractures ouvertes et productives. Aux plus grandes profondeurs, les fractures ont tendance à se refermer vers le bas. Toutefois, de rares méga fractures beaucoup plus profondes peuvent être rencontrées et fournir de gros débits.

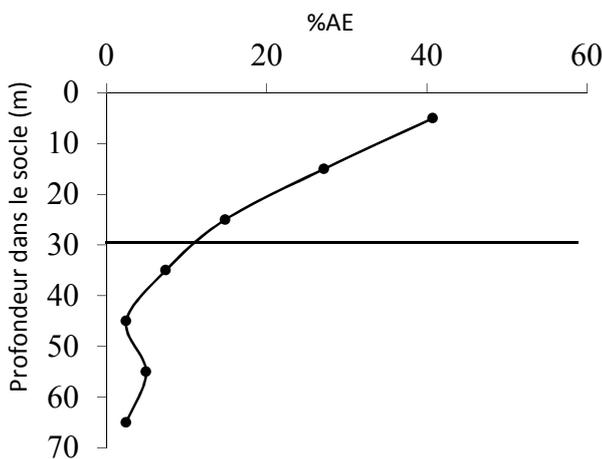


Figure 9 : Relation entre AE et la profondeur dans le socle

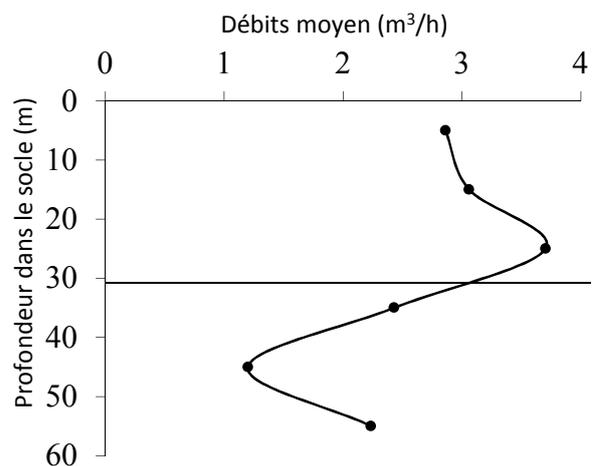


Figure 10 : Relation entre débits moyens des AE et la profondeur dans le socle

4.2.4 RELATION ENTRE PROFONDEURS TOTALES DES FORAGES ET LES DEBITS

Les profondeurs totales des forages exécutés dans la région de Bondoukou sont très variables autour d'une valeur moyenne de 55 m (à Bokoré). La plus faible est rencontrée à Kouassi Nawa avec un forage de 18,8 m. Quant à la plus grande qui atteint 102 m, elle a été rencontrée dans les localités de Boyi, Wolobidi et Zanzan.

L'analyse de la figure 11 révèle la présence possible des faibles débits ($< 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$) à toutes les profondeurs (Kouassi Nawa : $0,7 \text{ m}^3/\text{h}$; Bokoré : $0,7 \text{ m}^3/\text{h}$; Boyi : $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$). Les débits moyens (de $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ à $5 \text{ m}^3/\text{h}$) se rencontrent généralement entre 20 et 80 m. Les profondeurs comprises entre 30 et 60 m sont marquées par des débits les plus importants et pouvant atteindre $18 \text{ m}^3/\text{h}$ rencontrés à Chiagni Sogo. Bien que celles supérieures à 80 m soient caractérisées par les faibles débits, la rencontre inopinée de gros débits (à Laoudi Ba $8,10 \text{ m}^3/\text{h}$ à $81,5 \text{ m}$) indique la présence de quelques rares fractures productives à de grandes profondeurs. S'il est vrai que l'étude du diagramme ne révèle l'existence d'aucune relation mathématique définie entre la profondeur atteinte et le débit optimum des forages, elle permet néanmoins de dire que les fractures les plus productives de la région de Bondoukou se rencontrent entre 30 et 60m de profondeur.

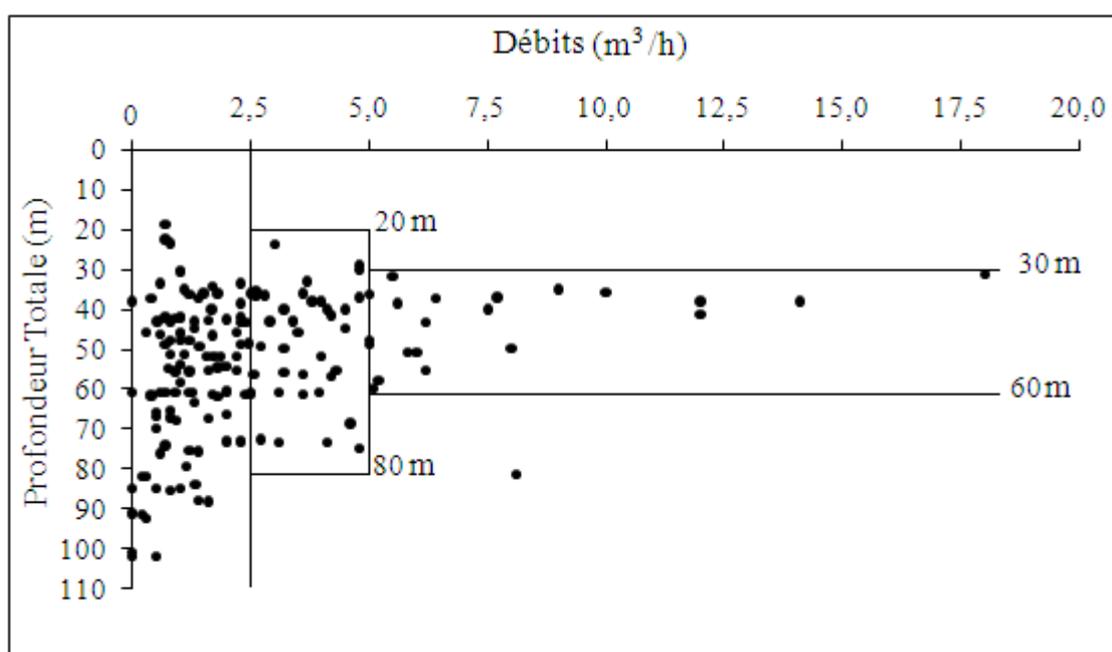


Figure 11 : Relation entre débits et profondeur totale des forages

4.2.5 RELATION ENTRE COUCHE D'ALTÉRITES ET DÉBITS

L'analyse de la figure 12 montre une nette influence des épaisseurs d'altérites sur les débits. En effet, ce diagramme révèle très clairement que dans la région de Bondoukou les forts et très forts débits sont fournis par des épaisseurs d'altérites variant de 15 à 45 m. Les épaisseurs d'altérites inférieures à 15m offrent généralement des débits faibles à moyens ($< 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$) et jamais de débits forts. Cet état de fait est également constaté avec les épaisseurs d'altérites supérieures à 45 m. Le comportement des systèmes hydrogéologiques (milieux poreux altéritique à bonne fonction capacitive) favorise une accumulation des eaux souterraines en provenance des altérites subjacentes dans les aquifères de fissures, grâce au phénomène de drainance. Ce comportement semble expliquer les résultats obtenus dans la région de Bondoukou. Toutefois, il faut signaler qu'au niveau des faibles et très faibles épaisseurs d'altérites, la fonction capacitive est biaisée de même qu'avec les fortes épaisseurs, le phénomène de drainance est obstrué. En effet, les faibles épaisseurs d'altérites ne peuvent emmagasiner qu'une très faible quantité d'eau et exposent la nappe aux fluctuations saisonnières. Les épaisses couches d'altérites, engendrent parfois de forte charge lithostatique tendant à comprimer les fissures lorsque la profondeur augmente.

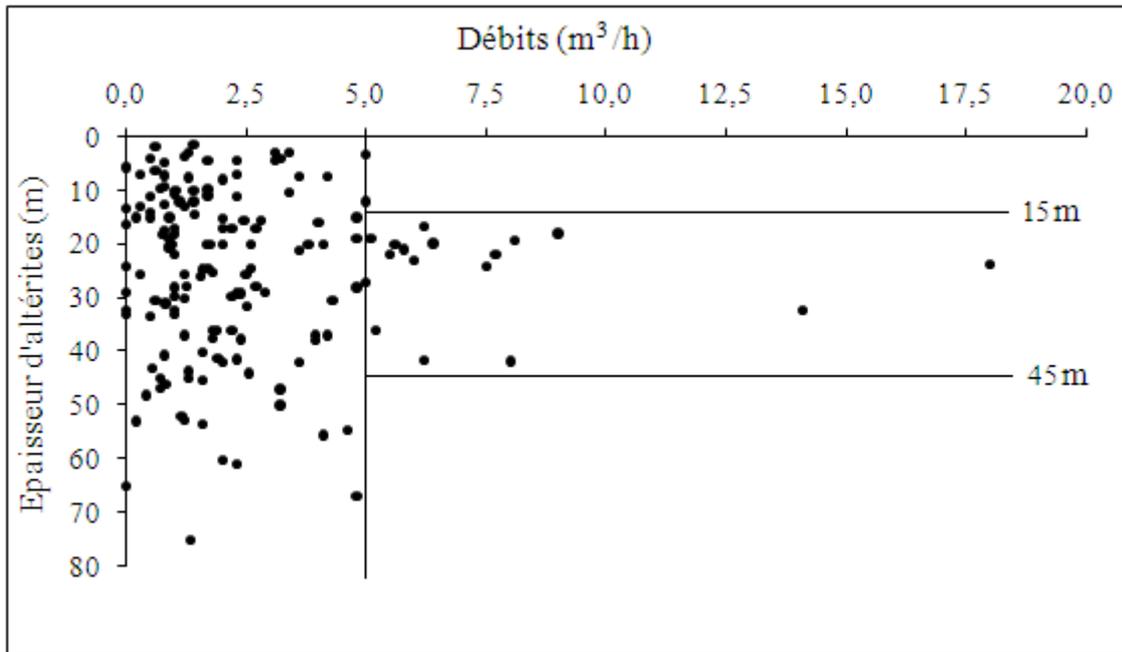


Figure 12 : Relation débits et épaisseurs d'altérites

4.3 ANALYSE GÉOSTATISTIQUE DU DÉBIT SPÉCIFIQUE (QSP)

Le débit spécifique noté Q_{sp} est le débit pompé (Q), rapporté au rabattement (s) pour un temps de pompage donné, dans les conditions d'essai de puits. Le débit spécifique a été calculé au niveau de cinquante-sept (57) forages où les données étaient disponibles. Le tableau II présente les statistiques classiques caractérisant ce paramètre.

Tableau II : Principales caractéristiques du débit spécifique (Q_{sp}) de la région de Bondoukou

	Nombre	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Q_{sp} ($m^3/h/m$)	57	7,198E-03	4,955E-01	1,347E-01	1,105E-01

Une analyse statistique de ces valeurs logarithmiques du débit spécifique permet d'indiquer que leur distribution suit une loi normale (Figure 13).

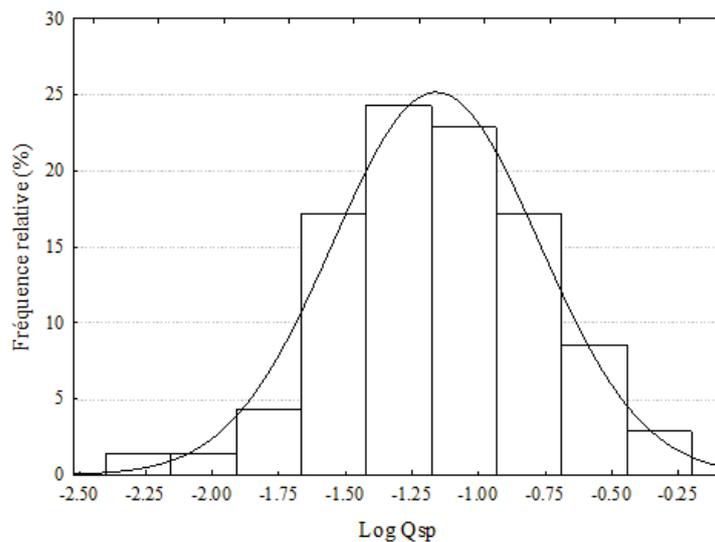


Figure 13 : Distribution de $\log Q_{sp}$: Ajustement à une loi normale

En effet le test de conformité du Khi 2 réalisé au seuil de signification de 10% révèle que l'ajustement d'une distribution normale à log Qsp est acceptable (Tableau III).

Tableau III : Test d'ajustement de la loi normale aux valeurs de log Qsp

Loi de distribution	χ^2 calculé	χ^2 théorique ($\alpha = 10\%$)	Degré de liberté
Normale	0,63	6,25	3

Le variogramme des valeurs logarithmiques (Figure 14) est structuré et présente une discontinuité à l'origine. Cette discontinuité serait due aux erreurs de mesures et à l'existence d'une micro-régionalisation. Le modèle exponentiel fournit les paramètres de régionalisation du débit spécifique (Tableau IV).

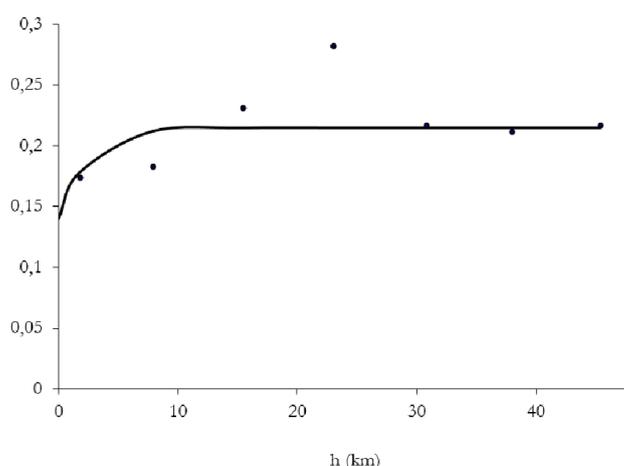


Figure 14 : Variogramme des valeurs logarithmiques du débit spécifique : Ajustement à un modèle exponentiel

Tableau IV : Paramètres de régionalisation de la transformée logarithmique du débit spécifique.

Modèle ajusté	Portée a (km)	Plateau C (km ²)	Plateau-pépité C-C ₀ (km ²)	Effet de pépité C ₀ (m ² /h) ²	Ecart moyen
Exponentiel	7,36	0,25	0,08	0,14	3,15 E-3
Sphérique	8,28	0,22	0,06	0,17	3,73 E-3

Le débit spécifique se comporte donc comme une variable régionalisée. La distance de régionalisation des débits spécifiques dans la région de Bondoukou est de l'ordre de 7,36 km.

Ce modèle fournit l'équation de modélisation suivante :

$$\gamma(h) = 0,14 + 0,08 \times \left(1 - e^{\frac{-3h}{7,36}}\right)$$

Le variogramme présente un effet de pépité témoignant de l'irrégularité locale du paramètre. La structuration spatiale du variogramme du débit spécifique permet d'envisager son estimation par krigéage sur l'ensemble du domaine étudié. Les valeurs du débit spécifique dans la région de Bondoukou présentent de fortes valeurs au niveau des localités du Centre (Laoudi-Ba, Laoudigan et Bakié) du Centre Ouest (Bilaodi et Dinaoudi) et du Nord-Ouest (Nord-Ouest de Brougoudoum). La carte krigée (Figure 15) c'est-à-dire la carte d'estimation des débits spécifiques de la région de Bondoukou, construite à partir du variogramme théorique, fournit par le modèle exponentiel restituée parfaitement aussi bien les fortes que les faibles

valeurs du débit spécifiques. D'une manière générale, les valeurs brutes du débit spécifique sont compatibles aux valeurs estimées par krigeage. Sur cette carte krigée, les zones à fortes valeurs de débits spécifiques s'allongent dans la direction NE-SO et dans un secteur concentrique du Nord-ouest indiquant ainsi un caractère hautement hydraulique des aquifères de ces différentes parties de la zone d'étude.

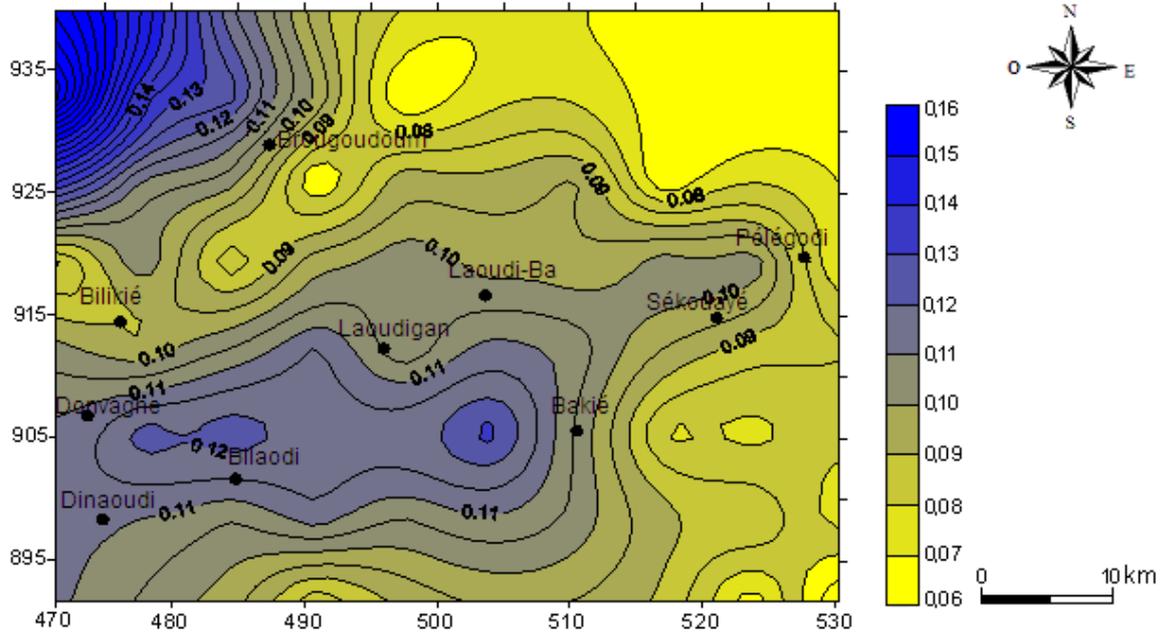


Figure 15 : Carte krigée des valeurs de débits spécifiques : modèle exponentiel

Les résultats de validation fournis par le module X-Valid de Geoeas a permis de construire le graphe des erreurs d'estimation (Figure 16). Ce graphe présente une distribution de forme symétrique avec un mode voisin de 0. La valeur moyenne des erreurs d'estimation du débit spécifique (Me) vaut 0,028 et la variance réduite des erreurs (σ_{RE}^2) est égale à 0,88. Notons que Me et σ_{RE}^2 sont respectivement proche de 0 et de 1 et sont donc en conformité avec les valeurs théoriques. Nous pouvons donc conclure que le modèle du variogramme et les estimations sont valides. L'estimation du débit spécifique par la technique de krigeage est satisfaisante et les valeurs estimées peuvent être retenues pour la connaissance de l'efficacité des futurs forages dans les zones où ils n'ont pas encore été implantés.

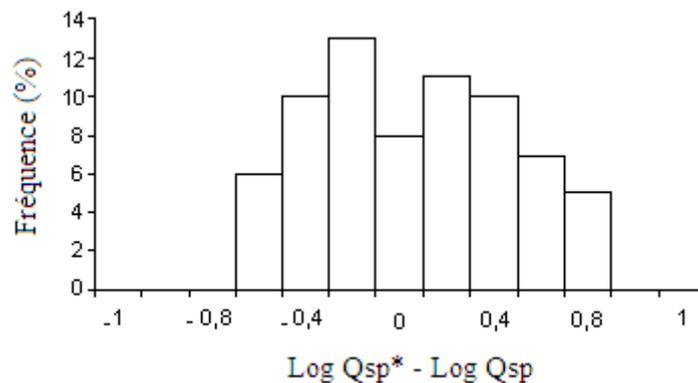


Figure 16 : Distribution des erreurs d'estimation de Qsp. modèle exponentiel

5 DISCUSSION DES RÉSULTATS

5.1 TÉLÉDÉTECTION ET CARTOGRAPHIE DE LA FRACTURATION

Au niveau du socle précambrien et dans des conditions favorables de prise de vue, les images ETM+ de Landsat 7, lorsqu'elles subissent un traitement approprié constituent un support renfermant d'importantes informations d'ordre structurales. En effet, dans la région de Bondoukou, l'intense fracturation du socle paléoprotérozoïque est mise en évidence grâce à l'application des techniques de filtrage par fenêtres mobiles autant sur les images brutes que sur les images issues de l'analyse en composante principale sélective ou de la combinaison d'image (indice calculé). Ces techniques ont donné de très bons résultats en Côte d'Ivoire, dans la région de la Marahoué [2], à Man [40], à Korhogo [4], à Bondoukou [7], [8], [16] et sur le terrain montagneux de l'île de Naxos en Grèce [41]. Les méthodes de télédétection restent, les méthodes les plus adaptées à la cartographie régionale (sur de vastes zones d'étude) des réseaux de fractures pour la prospection hydrogéologique et la recherche d'eau souterraine. En témoignent les travaux de [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [4], [41], [50], [51], [52], [53], [54], [55] ; qui utilisent les techniques de télédétection pour l'étude des ressources en eaux.

5.2 ETUDE DE LA PRODUCTIVITÉ DES OUVRAGES DE CAPTAGE

L'étude de la productivité des forages par l'exploitation et l'analyse des données fournies par les fiches techniques de ces ouvrages de captage permet de mieux comprendre les caractéristiques hydrauliques des aquifères exploités. De nombreuses études similaires ont été menées dans plusieurs régions de la Côte d'Ivoire ces trente dernières années comme en témoignent les travaux de [56], [1], [23], [2], [40], [3], [57], [4], [7].

L'étude de la relation liant la direction de la fracturation à la productivité des ouvrages de captage de la région de Bondoukou indique les classes NO-SE et NE-SO respectivement associées aux directions libériennes et éburnéennes sont jugées les plus productives et fournissent les meilleurs débits de toute la zone d'étude. Des débits atteignant $9 \text{ m}^3/\text{h}$ voire $14 \text{ m}^3/\text{h}$ ont en effet été enregistrés au niveau des forages captant directement des fractures épousant ces directions. Des résultats similaires ont été rencontrés dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire particulièrement dans le bassin de la Marahoué avec des débits avoisinant $14 \text{ m}^3/\text{h}$ relevés sur des fractures de direction libérienne (NO-SE) [47] de même dans le grand Ouest de la Côte d'Ivoire précisément à Glongouin où un débit exceptionnel de $90 \text{ m}^3/\text{h}$ a été obtenu sur cette direction de fracture [3].

Les résultats de cette étude ont montré que dans la région de Bondoukou, la granodiorite porphyroïde semble être la plus productive. Des résultats similaires ont été obtenus par [4] dans la région de Korhogo pour les forts débits ($Q > 5 \text{ m}^3/\text{h}$). Force est de reconnaître que sous certaines conditions (redressées, fracturées, avec des plis ouverts et occupant les zones topographiquement bas) les formations schisteuses deviennent très productrices. [23], [2], [3], [57], [7] sont tous unanimes que les schistes sont les formations géologiques les plus productrices en Côte d'Ivoire.

On dénote dans cette étude que le comportement des arrivées d'eau (AE) reste quasiment inchangé au niveau du socle précambrien de la Côte d'Ivoire. En effet tout comme dans la région de Bondoukou, [3] à Man et [4] à Korhogo ont relevé une augmentation du débit moyen des AE avec la profondeur (au environ de 30 m de profondeur) suivie d'une réduction de ces débits autour de 50 m dans le socle. Ce comportement est également noté au niveau du socle cristallin suédois avec les travaux de [58], [59] est arrivé également à la même conclusion avec ces travaux concernant la quantification des ressources hydrauliques dans les cristallines de l'Afrique de l'Ouest. A des profondeurs élevées ($> 50 \text{ m}$ dans le socle), les AE sont rares, mais souvent productives. Ainsi après étude de la relation entre les profondeurs de forages et les débits, cette étude pourrait recommander de fixer la limite inférieure d'existence de fractures ouvertes dans la région de Bondoukou à 60 m. Ces résultats sont en accord avec les études fixant la limite inférieure d'existence de fissures ouvertes entre 50 et 70 m de profondeur [1], [2], [4], [7].

5.3 DISCUSSION SUR L'ANALYSE GÉOSTATISTIQUE DES PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES

La structuration spatiale du variogramme (existence d'un palier, d'une portée et d'un effet de pépite) implique que le débit spécifique se comporte comme une variable régionalisée. Cette bonne structuration de ces paramètres dans l'espace permet d'envisager son estimation régulière sur l'ensemble de la zone d'étude. La discontinuité à l'origine signalée, est un phénomène couramment rencontré dans la littérature [60], [61], [62], [3], [63], [4].

La distance de structuration du débit spécifique est de 7,36 km. Des résultats similaires ont été obtenus par [3] qui ont donné 6,16 km dans la région de Man

L'analyse conjointe des cartes krigées (estimation) et des écart-types d'estimation permet de distinguer la qualité de l'estimation. Sur la carte estimée, on peut noter un certain lissage de l'information. La carte krigée demeure malgré tout une estimation, qui bien qu'étant optimale, ne respecte pas strictement l'intégralité de la variabilité spatiale réelle du phénomène analysé. On conçoit aisément qu'une telle différence puisse exister entre le phénomène dans sa réalité et son estimation krigée [37].

Dans les parties de la zone d'étude où les données disponibles sont suffisantes, les écart-types d'estimation sont les plus faibles. Plus on s'éloigne de cette zone, c'est-à-dire vers les limites du domaine, les écart-types d'estimation augmentent progressivement et les estimations deviennent de moins en moins bonnes. Les fortes valeurs des écart-types d'estimation s'expliquent par l'insuffisance et/ou le manque de données disponibles, notamment dans les parties sud-est et nord-est. Les estimations dans ces secteurs sont moins bonnes que celles de la zone centrale. On retiendra que d'une manière générale, les écart-types d'estimation montrent que les estimations du débit spécifique sont cohérentes. Il y a donc compatibilité entre valeurs estimées et valeurs brutes. Partant de ce constat, on peut affirmer que les estimations du débit spécifique sur la totalité du champ d'étude sont cohérentes et peuvent être acceptées. La zone à fortes valeurs de transmissivité s'allongeant dans la direction NE-SO [7], [8] apparaît plus ou moins sur cette carte krigée des valeurs de débits spécifiques (fortes valeurs de débits spécifiques) indiquant ainsi un caractère hautement hydraulique aux aquifères de cette partie de la zone d'étude. Le manque de données complètes n'a permis une bonne estimation de ce paramètre dans les secteurs de Bondoukou et Sama.

6 CONCLUSION

Au terme de cette étude, d'importants résultats ont été obtenus. L'utilisation de la technique des fenêtres mobiles par l'intermédiaire des filtres spatiaux de dimension 7x7 de type Sobel et gradient a permis la cartographie de plusieurs linéaments de la zone d'étude. En effet ces filtres appliqués aussi bien sur les images brutes que les images issues du calcul d'indices ont conduit à l'élaboration de la carte des fractures détaillées comportant environ 5000 fractures après une extraction manuelle suivie d'une validation. Ainsi, cette étude a contribué à l'actualisation de la carte structurale par la mise en évidence de nombreuses fractures régionales jamais signalées dans la région alors que d'autres ont vu leur tracé amélioré. Cette importante fracturation a permis la mise en place au niveau du socle paléoprotérozoïque des aquifères de fissure.

L'analyse hydrodynamique de ces réservoirs discontinus a fourni de nombreuses informations dont les plus importantes sont présentées ici. L'analyse de la productivité des aquifères de la région de Bondoukou révèle que les fractures les plus productives se rencontrent entre 30 et 60 m de profondeur, alors que les forts et très forts débits sont fournis par des épaisseurs d'altérites variant entre 15 et 45 m. Environ 83,41% des AE se situent dans les 30 premiers mètres dans le socle. Les classes directionnelles jugées responsables de cette productivité (donc les plus productives) sont les directions NE-SO, NO-SE et EO. L'analyse de la productivité des principales formations du socle a permis de constater que les granodiorites porphyroïdes seraient les plus productives avec plus de 46% des forages ayant un débit supérieur à 2,5 m³/h contre environ 24% pour les schistes.

L'analyse géostatistique indique que le débit spécifique (la transformée logarithmique), s'identifie à une variable régionalisée. La distance de régionalisation de l'ordre de 7,36 km est importante et témoignerait de la bonne connectivité des réseaux de fractures de la région de Bondoukou. Le krigeage a permis l'estimation du débit spécifique sur l'ensemble du champ d'étude grâce à la connaissance des données en quelques points. Le test de validation indique que l'estimation par krigeage est satisfaisante et les valeurs estimées peuvent être retenues. La géostatistique a permis une meilleure connaissance de ce paramètre hydraulique important sur l'ensemble du domaine étudié.

REMERCIEMENTS

Les auteurs voudraient remercier la Direction de l'hydraulique Rurale et Périurbaine (DHRP), la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) et le Centre Universitaire de Recherche et Application en Télédétection (CURAT) pour toute leur aide et la mise à notre disposition les différentes données et matériels. Les auteurs remercient également les différents instructeurs qui ont contribué à l'amélioration de ce présent document à travers leurs critiques, leurs commentaires et suggestions.

REFERENCES

- [1] Faillat J.P. (1986). Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest). Thèse Univ. Languedoc (Montpellier), 534 p
- [2] Biémi J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat. ès Sc. Nat., Univ. Abidjan, 493 p.
- [3] 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 unique de doctorat Université de Poitier, 272 p
- [4] Jourda J. P. (2005). Méthodologie d'application des techniques de Télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody, 430 p.
- [5] Saley M. B. (2003). Système d'informations à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse unique de doctorat, Université de Cocody, 209 p.
- [6] Kouamé, K.F.; Akaffou, A.G.; Lasm, T.; De Dreuzy, J.R.; Davy, P. & Bour, O. (2005). Simulation des écoulements dans les réservoirs fracturés: application au socle Archéen de Touba (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Actes du Colloque Internationale SITIS 05, Yaoundé (Cameroun), 27 Nov.-1er Déc. 2005: pp.39-46.
- [7] 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 unique de doctorat, université de Cocody-Abidjan, 237p
- [8] Youan Ta M., Lasm T., Jourda J. P., Kouamé K. F., Razack M. (2008). Cartographie structurale par imagerie satellitaire ETM+ de Landsat-7 et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte-d'Ivoire), Revue télédétection, vol. 8, n° 2, p. 119-135.
- [9] Koita, M. (2010). Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre Est de la Côte d'Ivoire). PhD Thesis. Université Montpellier II, 220 pp.
- [10] Soro, G. (2010). Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraines dans la région des Lacs (centre de la Côte d'Ivoire): Hydrogéologie et Hydrochimie des aquifères discontinus du district de Yamoussoukro et du département de Tiébissou. PhD Thesis, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire 257 pp.
- [11] Kouamé, K.F.; Lasm, T.; De Dreuzy, J.R.; Akaffou, A.G.; Bour, O. & Davy, P. (2010). Contribution d'un modèle hydrogéologique à fractures discrètes à l'étude des aquifères fracturés du socle Archéen de Touba (Nord-Ouest, Côte d'Ivoire). Revue des Sciences de l'Eau, Vol. 22 n° 5: 617-632
- [12] De Lasme O. Z. ; Lasm T., Oga M. S., Youan Ta M., Baka D., Ettien F. B., Kouakou S., Onetie O. Z., Yao T. K., (2012) Analyse des propriétés hydrodynamiques des aquifères fissurés de la région de San-Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Estudios Geológicos, Vol. 68, n° 2, pp. 217-232.
- [13] Kouassi A.M., Ahoussi K.E., Yao K.A., Ourega W.E.J.A, Yao K.S.B., Biemi J. (2012). Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région du n'zi-comoé (centre-est de la Côte d'Ivoire). Larhyss Journal, n° 10, pp. 57-74
- [14] Ahoussi K. E., Koffi Y. B., Kouassi A. M., Soro G., Soro N., Biémi J. (2013) Fonctionnement hydrodynamique des aquifères discontinus de la région d'Abidjan-Agboville (sud de la Côte d'Ivoire). International Journal of Geography and Geology, Vol. 2, N° 5, pp 52-69
- [15] Gnamba F. ; Oga Y. M. S. ; Gnanagne T. ; Lasm T. ; Biémi J. ; Kouakou Y. K. N. (2014). Analyse de la productivité des aquifères de fissures du socle paléoprotérozoïque de la région de Katiola (centre-nord de la Côte d'Ivoire). European Scientific Journal. Vol. 10, n°5. pp. 79-89.
- [16] Youan Ta M., Kouamé K. F., Koudou A., Adja M. G., Baka D., Lasm T., Lasme D. O., Jourda J. P., Biemi J. (2014) Apport de la Cartographie lithostructurale par imagerie satellitaire landsat 7 à la connaissance des aquifères du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte D'Ivoire). International Journal of Innovation and Applied Studies. Vol. 7 n°. 3 Aug. 2014, pp. 892-910
- [17] Oga M.-S. (1998). Ressources en eaux souterraines dans la région du grand Abidjan (Côte d'Ivoire) : Approches hydrochimique et isotopique. Thèse unique. Université de Paris XI Orsay. Paris (France). 240 p.
- [18] 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). Implications hydrologiques et hydrogéologiques. PhD Thesis, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 256 pp.

- [19] Adiaffi, B. (2008). Apport de la géochimie isotopique, de l'hydrochimie et de la télédétection à la connaissance des aquifères de la zone de contact « socle-bassin sédimentaire » du Sud-Est de la Côte d'Ivoire. PhD Thesis, Université Paris-Sud, Orsay, France, 217 pp.
- [20] Ahoussi, K. E. (2008). Evaluation 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, PhD Thesis, Université de Cocody Abidjan, Côte d'Ivoire, 270 p.
- [21] Ahoussi, K., E. , Oga Y. M. S., Koffi Y. B., Kouassi A. M., Soro N., Biémi J., (2011). Caractérisation hydrogéochimique et microbiologique des ressources en eau du site d'un centre d'enfouissement technique (cet) de Côte d'Ivoire : Cas du cet de kossihouen dans le district d'abidjan (Côte d'Ivoire). International Journal of Biological and Chemical Sciences, Vol. 5 pp 114-2132.
- [22] Ahoussi K. E., Youan Ta M., Loko S., Adja M. G., Lasm T., Jourda J. P. (2012). Étude hydrogéochimique des eaux des aquifères de fractures du socle Paléoprotérozoïque du Nord-Est de la Côte d'Ivoire : Cas de la région de Bondoukou. Afrique SCIENCE Vol. 08 n° 3 pp 51-68.
- [23] Soro N. (1987). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Sud-Est de la Côte d'Ivoire (bassin versant de la Mé). Thèse de Doct. 3è cycle, Univ. de Grenoble 1, Institut Dolomieu, 239 p.
- [24] Savané I. (1997). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse d'Etat, Université de Cocody, 396 p.
- [25] Touré S. (2007). Pétrologie et géochronologie du massif granitoïde de Bondoukou. Nord-Est de la Côte d'Ivoire. Évolution magmatique et contexte géodynamique au Protérozoïque inférieur. Relations avec le volcano-détritique du Zanzan, Koun, Tanda attribué au Tarkwaïen du Ghana. Implications paléogéographiques. Thèse de Doctorat Es Nat., Univ. d'Abobo Adjamé 434p.
- [26] Tempier P. (1969). Données récentes sur la géologie de socle de la Côte d'Ivoire. Ann. Univ. Abidjan (Côte d'Ivoire), vol.5, pp. 55-92.
- [27] Delor C., Siméon Y., Vidal M., Zeade Z., Koné Y., Adou M., Dibouahi J., Irié D.B., Ya B. D., N'da D., Pouclet A., Konan G., Diaby I., Chiron J-C., Dommanget A., Kouamelan A., Peucat J.J., Cocherie A. Et Cautru J.P., (1995). Carte géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, feuille Nassian, Mémoire n°9 de la Direction des Mines et de la Géologie, Abidjan.
- [28] Siméon Y., Delor C., Zeade Z., Koné Y., Yao B., Vidal M., Diaby I., Konan G., Dje B.I., N'da D., Dommanget A., Cautru J.P., Guerrot C. ; Chiron J-C., (1995). Notice explicative de la carte géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, feuille Agnibilékro, Mémoire de la Direction des Mines et de la Géologie de la Côte d'Ivoire, n°8 Abidjan, Côte d'Ivoire.
- [29] Zeade Z, Delor C, Simeon Y, Yao B D, Vidal M, Sonnendrucker P, Diaby I, Cautru Jp. (1995). Notice explicative de la carte Géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, Feuille Bondoukou, Mémoire de la Direction des Mines et de la Géologie de la Côte d'Ivoire, n°10 Abidjan, Côte d'Ivoire.
- [30] GEOMINES Ltée (1982). Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise. Ministère des Travaux Publics et des Transports, Direction Centrale de l'Hydraulique, République de Côte d'Ivoire, carte de Bondoukou, Cahier n°14.
- [31] Caldini F. G., Posavec M., Azuelos M. J. (1978). Carte photogéologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, Feuille de Nassian, Commission du Canada, Société pour de Développement Minier de la Côte d'Ivoire (SODEMI).
- [32] Pannatier Y., 1996. Variowin: Software for Spatial Data Analysis in 2D. Springer-Verlag, New York, NY, USA.
- [33] Yesou H., Pion J. C., Besnus Y., Saint Jean R. (1993). Amélioration des données SPOT pour la cartographie structurale en milieu tropical. Exemple de la région des chapeaux de fer de Pagala (Togo). IIIèmes Jour. Scient. Rés. Télédét. UREF, Toulouse, 13-16 novembre. 1990, pp. 143-164. In.:J.M. Dubois, F. Blasco (dir), Outil microinformatique et Télédétection de l'évolution des milieux, PUQ/AUPELF UREF. Ed., 492 p
- [34] Bonn F., Rochon G. (1992). Précis de télédétection: Principe et méthodes. Press. Univ. Queduc. AUPELF-UREF. Vol.1, 485 p
- [35] Lillesand T., Kiefer R. (1993). Remote sensing and image interpretation. 3ème Edition, 750 P.
- [36] Lasm T., Razack M., Youan Ta M. (2008). Geostatistical assessment of the transmissivity of crystalline fissured aquifer in the Bondoukou region, north-eastern Côte d'Ivoire. Applied groundwater Studies in Africa; n°, 13, chapitre 28. pp 473-485
- [37] Razack M. (1984). Application des méthodes numériques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés en hydrogéologie. Thèse Doctorat ès Sci., Univ. Languedoc, 384 p.
- [38] Journel A. G., Huijbregts C. J. (1978) Mining geostatistics. Academic Press, NewYork, 600 p.
- [39] Isaaks E. H., Srivastava M. R. (1989). An introduction to applied geostatics. Oxford University Press, New York, 561p.
- [40] Kouamé K. F. (1999). Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitales et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse 3ème cycle, Univ. Cocody-Abidjan, (Côte d'Ivoire), 194 p.

- [41] Galanos I., Rokos D. (2006). A statistical approach in investigating the hydrogeological significance of remotely sensed lineaments in the crystalline mountainous terrain of the island of Naxos, Greece. *Hydrogeology journal* vol.14 pp 1569-1581.
- [42] Lointier M. (1995). Gestion intégrée des zones humides en milieu tropical. Apport de la télédétection à la connaissance hydrodynamique. *Télédétection et Gestion des ressources en Eau, Colloque FAO, Montpellier, 29 Nov. au 01 Dec. 1995.*
- [43] Savané I. ; Gozé B. ; Biémi J. (1995). Evaluation des ressources en eau dans le socle par l'étude des fractures à l'aide des données Landsat (Bassin d'Odienné, Côte d'Ivoire). *Télédétection et Gestion des ressources en Eau, Colloque FAO, Montpellier, 29 Nov. au 01 Dec. 1995.*
- [44] Aouni L. (1995). Apport de la télédétection dans la mobilisation des ressources en eaux de surface et la gestion du secteur irrigué. *Télédétection et Gestion des ressources en Eau, Colloque FAO, Montpellier, 29 Nov. au 01 Dec. 1995.*
- [45] Puech C. (1995). Télédétection Et Modélisation Hydrologique : Quelle Vision Quelle Echelle, quels processus ?. *Télédétection et Gestion des ressources en Eau, Colloque FAO, Montpellier, 29 Nov. au 01 Dec. 1995.*
- [46] Traoré K. (1995). La télédétection comme moyen d'appui à la planification des ressources en eau (cas du Sud-Ouest du Burkina Faso). *Télédétection et Gestion des ressources en Eau, Colloque FAO, Montpellier, 29 Nov. au 01 Dec. 1995.*
- [47] Biémi J. ; Jourda J. P. ; Deslandes S. Et Gwyn H. (1995). Positionnement, productivité et gestion des forages en milieu fissuré de Côte d'Ivoire par télédétection et système d'information géographique. *Télédétection et Gestion des ressources en Eau, Colloque FAO, Montpellier, 29 Nov. au 01 Dec. 1995.*
- [48] Savané I. et Biémi J. (1999). Télédétection et S.I.G pour l'étude des aquifères du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Télédétection, 1999, Vol. 1, N°1 pp.47-64.*
- [49] Drury S.A., Deller A. M. E (2002). Remote sensing and locating new water sources. http://www.unoosa.org/pdf/sap/2002/Ethiopia/presentations/12speaker01_1.pdf. Consulter en novembre 2006
- [50] Jourda J. P., Saley M. B., Djagoua E. V., Kouamé K., J., Biémi J., Et Razack M. (2006). Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation. *Revue de Télédétection, vol. 5, n° 4, pp. 339-357.*
- [51] Sarah O., Tweed, Leblanc M., John A., Webb, Maciek W. And Lubczynski (2007). Remote sensing and GIS for mapping groundwater recharge and discharge areas in salinity prone catchments, southeastern Australia. *Hydrogeology journal* vol.15 pp 75-96.
- [52] Hoffmann J. And Sander P. (2007) Remote sensing and GIS in hydrogeology. *Hydrogeology journal* vol.15 pp 1-3.
- [53] Brunner P., Hendricks F. H.-J., Kgotlhang L., Bauer-Gottwein P., Kinzelbach W. (2007). How can remote sensing contribute in groundwater modelling? *Hydrogeology journal* vol.15 pp 5-18.
- [54] Leblanc M., Favreau G. Sarah T., Leduc C., Razack M., Mofo L. (2007). Remote sensing for groundwater modelling in large semiarid areas: Lake Chad Basin, Africa. *Hydrogeology journal* vol.15 pp 97-100.
- [55] Sander P. (2007). Lineaments in groundwater exploration: a review of applications and limitations. *Hydrogeology journal* vol.15 pp 71-74.
- [56] Lenk P.P. (1977). Données nouvelles sur l'hydrogéologie des régions à substratum métamorphique et éruptif. Enseignements tirés de la réalisation de 900 forages en Côte d'Ivoire. C.R. Acad. Sc. Fr. Paris (France), Série D. 299p.
- [57] Dibi B., Inza D., Goula B. T. A., Savane I., Biemi J. (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 sciences & technologies* n°13 pp22-31.
- [58] Carlsson A., Olsson T. (1981). Caractéristiques de fracture et propriétés hydrauliques d'une région au sous-sol cristallin en Suède. *Bull. B.R.G.M., Sect. III, n°3, pp. 215-233.*
- [59] Engalenc M. (1980-1981). Elément de quantification des ressources hydrauliques dans les roches cristallines. *Bull. B.R.G.M., Sér. II, Sect. III, n°4, pp. 325-326.*
- [60] Ahmed S, De Marsily G. (1987). Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity. *Water Resour Res ; Vol. 23 n° 9 pp 1717-1737.*
- [61] Bracq P., Delay F. (1997). Transmissivity and morphological features in chalk aquifer: a géostatistical approach of thier relationship. *Journal. Hydrol., Vol. 191, pp. 139-160.*
- [62] Fabbri P., (1997). Transmissivity in the geothermal Euganean Basin : A geostatistical analysis. *Ground Water* Vol.35 n° 5. pp 881-887.
- [63] Soro N, Savane I, Ouattara A, Fofana S. (2001) Approche géostatistique de la variabilité spatiale des écoulements souterrains dans les aquifères du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Revue Bioterre; Vol.2 n°1 pp 85-100.*