



ANALYSES STATISTIQUE ET GEOSTATISTIQUE DE LA FRACTURATION EXTRAITE DE L'IMAGERIE ASAR ENVISAT DU SUD-EST DE LA CÔTE D'IVOIRE

***KOUDOU A.¹, ASSOMA T.V.^{2,3}, ADIAFFI B.³,
YOUAN TA M.^{2,3}, KOUAME K.F.^{2,3}, LASM T.³***

¹Département des Sciences de l'Environnement,
Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) de Daloa, 02 BP 150 Daloa 02,
Côte d'Ivoire,

²Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT),
U.F.R des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM),
Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 22 B.P. 801 Abidjan 22,
Côte d'Ivoire

³Département 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 Félix Houphouët Boigny de Cocody, 22 B.P. 582 Abidjan 22
Côte d'Ivoire

kdaime@yahoo.fr

RESUME

La fracturation contribue incontestablement à la formation d'aquifère en terrain cristallin et cristallophyllien. Sa caractérisation est donc incontournable pour une meilleure connaissance des aquifères fracturés.

La présente étude a pour objectif de caractériser la fracturation du sud-est de la Côte d'Ivoire à partir des méthodes statistiques et géostatistiques. Elle s'appuie sur la carte de fracturation issue des images ASAR ENVISAT. Cette dernière constitue le support numérique de base important pour les traitements statistique et géostatistique.

L'analyse statistique de la fracturation montre une certaine hétérogénéité de la fracturation. Les fractures les plus abondantes (N120-130, N110-120, N150-160) sont aussi les plus longues. Les longueurs de fractures s'ajustent mieux à la loi de puissance. Les espacements de fractures s'ajustent de manière satisfaisante à la loi exponentielle.

L'analyse géostatistique montre que les variogrammes de la fracturation s'ajustent mieux au modèle exponentiel. Ils sont caractérisés par une portée, un

plateau et un effet de pépité. La densité de fracturation en longueurs cumulées s'apparente à une variable régionalisée. Le variogramme de la fracturation majeure présente un pur effet de pépité. L'effet de pépité est dû à l'action combinée des erreurs de mesure et une micro-régionalisation.

Mots-clés : Statistique, géostatistique, fracturation, loi de puissance, loi exponentielle, variogramme, Côte d'Ivoire

ABSTRACT

The fracturing contributes incontestably to the formation of aquifer in crystalline and cristallophyllien bedrock. Its characterization is therefore inescapable for a better knowledge of fractured aquifers.

The aim of this study is to characterize the fracturing of the southeast of Côte d'Ivoire through statistical and geostatistical methods from ASAR ENVISAT pictures. This fracturing map constitutes the important numerical support from which statistical and geostatistical processing are made.

Fractures statistical analysis showed some heterogeneity of the fracturing. It also proved that most abundant fractures oriented (N120-130, N110-120, N150-160) are longest. The lengths of fractures are better adjusted to the power law while spacings of fractures are satisfactorily adjusted to the exponential law.

Geostatistical analysis showed that the variograms of fracturing are better adjusted to exponential model. Global fracturing variogram and N-S family fracturing variogram are structured. They are characterized by a reach, a sill and a nugget effect. The fracturing density in accumulated lengths is therefore similar to a regionalized variable. The major fracturing variogram shows a pure nugget effect. The nugget effect is due to the combined result of micro-regionalization and measurement error.

Keywords: Statistical, geostatistical, fracturing, power law, exponentiel law, variogram, Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION

La fracturation est sans contexte un facteur indiscutable dans les conditions d'existence d'aquifère en milieux de socle (Berger et al., 1980; Biémi, 1992; El Hadani, 1992; Biémi et al., 1999; Kouamé, 1999; Maréchal et al., 2003; Lasm et al., 2004; Wyna et al., 2004; Lachassagne et al., 2005; Kouamé et al., 2006; Koudou et al., 2010). Elle conditionne la formation des réservoirs. Elle constitue la voie privilégiée d'accès aux ressources en eau souterraine. La fracturation des formations géologiques oriente donc les prospections des ressources en eau souterraine.

Les techniques d'acquisition de cette fracturation se déroulent à plusieurs échelles : affleurements, sondages, galeries, MNT (Modèle Numérique de Terrain), photographies aériennes, images satellitaires, etc. Quel que soit le mode d'acquisition de la fracturation, celui-ci doit pouvoir mettre en évidence un échantillon de données suffisamment grand et représentatif du réseau naturel (Faillat, 1986; Bodin et Razack, 1999). La télédétection (optique et radar), par ses possibilités de vision synoptique, demeure un moyen incontournable dans la mise en évidence de la fracturation. Par ailleurs, elle est indéniable dans l'établissement et l'actualisation des cartes litho-structurales.

En Côte d'Ivoire, en dehors du bassin sédimentaire côtier, les principales ressources en eau souterraine se situent dans les roches fissurées du socle précambrien et dans les altérites. L'hétérogénéité des milieux fracturés amplifie très fortement la difficulté de leur caractérisation. Cette difficulté est par ailleurs inhérente au fait que les systèmes souterrains ne sont pas visibles. La compréhension des systèmes souterrains fracturés apparaît donc comme un enjeu majeur en hydrogéologie, et surtout dans la recherche de nouvelles ressources.

La caractérisation quantitative de la fracturation associée aux différentes formations géologiques est un moyen incontournable pour une meilleure connaissance des aquifères fracturés de socle. La détermination des paramètres géométriques de la fracturation (orientation, longueur, espacement, intensité de la fracturation, etc.) permet de mieux appréhender l'organisation des réseaux de fractures. Ces paramètres jouent un rôle significatif dans l'organisation du réseau de fractures et de ses propriétés de transport (Razack, 1982; La pointe et Hudson, 1985; Lasm, 2000). Les méthodes d'analyse statistique et géostatistique demeurent inévitable dans l'étude de ces paramètres. L'intérêt de la statistique est de faciliter la description des principaux paramètres géométriques de la fracturation (La pointe et Hudson, 1985; Lasm, 2000). Quant à la géostatistique, elle étudie la structuration spatiale de la fracturation. Le variogramme est utilisé pour conduire l'analyse structurale (La pointe, 1980; Razack, 1984; Massoud, 1988; Chiles et De Marsily, 1993).

La présente étude a pour objectif de caractériser la fracturation du sud-est de la Côte d'Ivoire à partir des méthodes statistiques et géostatistiques. Il s'agit d'analyser quantitativement la fracturation en vue d'une meilleure compréhension de la structure des aquifères. Une meilleure connaissance des aquifères facilite une mise au point des modèles d'écoulement (Kouamé, 1999).

La carte de fracturation réalisée à partir des images ASAR ENVISAT sert de support aux différentes analyses. L'imagerie radar, par sa sensibilité à la texture du sol en termes de topographie et de rugosité de surface, est utilisée à juste titre dans cette partie du sud-est de la Côte d'Ivoire. Elle facilite la détection des linéaments structuraux qui contrôlent les mouvements des eaux souterraines (Mahmood, 1986).

L'étude de la fracturation, qui est abordée suivant l'approche purement quantitative, est une contribution à une meilleure connaissance des aquifères fracturés du socle précambrien de la Côte d'Ivoire.

CADRE D'ETUDE ET CONTEXTE GEOLOGIQUE

La zone d'étude est située en zone de socle à l'extrême sud-est de la Côte d'Ivoire. Elle s'étend sur une superficie de 7 163 km² entre les longitudes 4°38' et 2°40'O et les latitudes 2°45' et 5°48'N. Elle fait frontière avec le Ghana à l'Est et est limitée au Sud par le bassin sédimentaire côtier.

Les formations géologiques précambriennes de la zone d'étude sont constituées de séries volcano-sédimentaires à l'Est et à l'Ouest, des séries grésopélitiques (Figure 1).

Les séries volcano-sédimentaires sont constituées en grande partie de schistes tuffacés à passée graphiteuse, ampélite au sein desquels se trouvent des métagabbros et métadolérites allongés au centre et des schistes quartzeux au Nord, des schistes à chlorite et à amphibole renfermant des métarhyolites, des métadacites et des amphibolopyroxénites.

Les granitoïdes jouxtant les séries volcano-sédimentaires sont constituées de métadiorites, métatonalites, d'un faciès porphyroïde à l'intérieur des métagranodiorites à biotite et/ou hornblende. A ces formations s'ajoutent en petit nombre et de façon disséminée, des métamonzogranites, des métagranites et des diorites.

Le reste de la lithologie vers l'Ouest est composé des séries grésopélitiques renfermant des intrusions de granitoïdes. Les séries grésopélitiques comprennent les métaarénites, les métasiltstones, les gneiss fins à biotite et amphibole au sein desquels se trouve parfois un faciès siliceux (Delor et al., 1992).

Les différents cours d'eau de la zone d'étude orientés Nord-Sud sont l'Agnébi, la Mé, le Comoé, la Bia et la Tanoé.

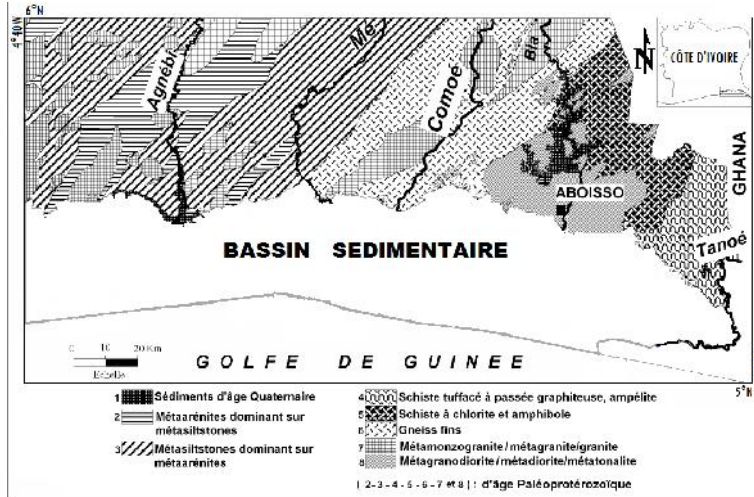


Figure 1 : Localisation et présentation des formations géologiques de la zone d'étude

DONNEES UTILISEES ET METHODOLOGIE DE TRAVAIL

Données utilisées

La carte de fracturation du sud-est de la Côte d'Ivoire (Figure 2) est la donnée de base de l'étude. Cette carte est issue du traitement des images ASAR ENVISAT à partir des outils NEST-3C pour la calibration et ENVI 4.5 pour les traitements et le relevé des discontinuités structurales.

Le traitement a porté sur les corrections géométriques, les procédures d'amélioration radiométrique en adaptant les paramètres des filtres spatiaux de réduction du chatouement aux changements locaux de l'image, des techniques de cartographie hydrostructurale basées sur le radiofacès et la géomorphologie, de la combinaison des données ASAR WSM et du MNA SRTM, et enfin, de l'interprétation et du relevé des discontinuités structurales.

Ces traitements, détaillés dans les travaux de Assoma (2013), ont été réalisés au Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (C.U.R.A.T.) de l'Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody (Côte d'Ivoire).

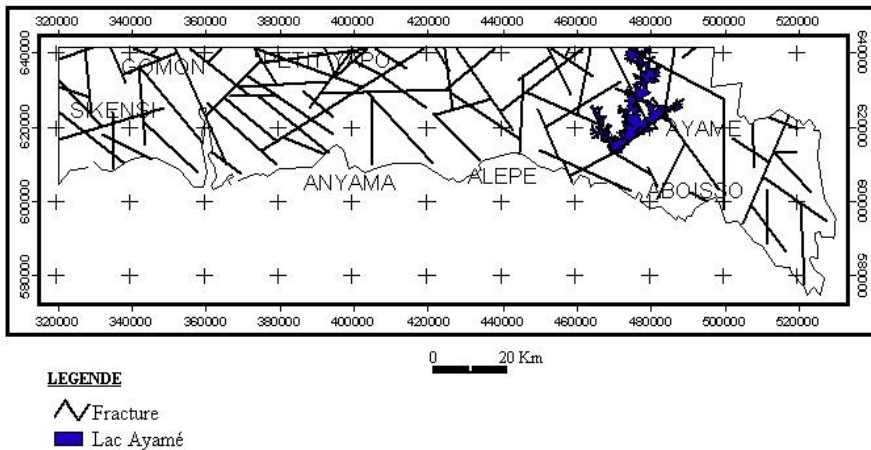


Figure 2 : Carte de fracturation du sud-est de la Côte d’Ivoire

Méthodologie

La carte de fracturation du sud-est de la Côte d’Ivoire constitue le support numérique important pour les traitements statistique et géostatistique.

Traitement statistique de la fracturation

Les différentes familles de fractures (en nombre et en longueurs cumulées) ont été discriminées en fonction de leur orientation par croissant angulaire de 10 degrés sur une rosace directionnelle à partir du logiciel Linwin 2.0. Cette discrimination facilite la détermination des espacements entre les fractures (Lachaine, 1999), calculés à l’aide du module RAFESP du logiciel RAFRAC (Razack, 1984).

Les longueurs et les espacements de fractures sont intégrés aux logiciels STATISTICA 6.0 pour être ajustés aux lois classiques de distribution (log-normale, exponentielle, gamma).

Le modèle qui permet le meilleur ajustement présente, selon le test de conformité de Khi-2 au seuil de signification de 10%, un Khi-2 calculé inférieur au Khi-2 théorique.

L’ajustement à la loi de puissance sur Microsoft office Excel consiste à reporter dans un diagramme bi-logarithmique, la distribution de fréquences du paramètre géométrique. Si les points s’alignent suivant une droite, la distribution suit alors une loi de puissance d’équation (1) :

$$N(li) = a \times l_i^{-a} \tag{1}$$

avec l_i : centres des classes du paramètre; N : fréquence de classe ; a : coefficient de proportionnalité ; k : exposant caractéristique de la loi de puissance.

Approche géostatistique de la fracturation

La géostatistique est la discipline qui tient compte de l'organisation spatiale des variables étudiées afin d'étudier tout phénomène quantifiable. L'étude géostatistique est basée sur la théorie des Variables Régionalisées, et son premier objectif est de mettre en évidence, lorsqu'elle existe, la structuration spatiale du phénomène étudié et d'envisager l'estimation de ce phénomène. L'outil mathématique de la géostatistique est le variogramme ou semi-variogramme expérimental. Il est défini par l'équation (2) :

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

où $\gamma(h)$ est le semi-variogramme, $\text{VAR}[Z(x)]$ est la variance au point x et h , le vecteur module $(x-x')$.

Le semi-variogramme est une courbe qui décrit l'autocorrélation spatiale pour une variable aléatoire mesurée sur un jeu de points géoréférencés. Un examen exhaustif de cette méthode se trouve dans Matheron (1970), Journel et Huijbregts (1978), Isaak et Srivastava (1989), Pannatier (1995), Lopez (2000) et Kitanidis (2000).

Pour mieux comprendre la structuration spatiale de la fracturation, l'étude géostatistique porte sur la fracturation globale (fracturation tous azimuts) et sur les familles de fractures (fracturation majeure et famille directionnelle N-S) jouant un rôle important dans l'hydrogéologie des réservoirs fracturés.

La variable étudiée est la densité de fracturation en longueurs cumulées par maille carrée de $5 \times 5 \text{ km}^2$. Cette maille, qui correspond à la Surface Élémentaire Représentative (SER), est bien adaptée à la zone d'étude.

L'analyse structurale consiste à construire, à modéliser les variogrammes expérimentaux à l'aide du logiciel VARIOWIN TM (Pannatier, 1994), puis à les interpréter. L'ultime phase de l'analyse variographique consiste à ajuster au mieux sur le variogramme expérimental les modèles exponentiel et sphérique (Razack, 1984 ; Lasm, 2000). Le modèle qui donne la valeur des écarts moyens quadratiques la plus faible, entre les valeurs expérimentales et théoriques du variogramme, est retenu pour l'ajustement.

RESULTATS

Analyse statistique de la fracturation

Rosace directionnelle de la fracturation

La carte de fracturation du sud-est de la Côte d'Ivoire comporte 190 fractures potentielles et/ou des contacts entre formations géologiques, et des intersections de fractures.

La distribution de la fracturation en nombre et en longueurs cumulées n'est pas homogène (Figure 3). Les classes majeures de la fracturation en nombre dont la fréquence est supérieure ou égale à 10% sont respectivement N120-130, N110-120, N150-160 et N0-10. Les classes secondaires sont représentées par les directions N170-180, N130-140, N140-150, N100-110 et N160-170. Les autres classes dont les fréquences sont inférieures à 5% sont considérées comme minoritaires.

Concernant les longueurs cumulées, les classes majeures sont N120-130, N110-120, N150-160 et N130-140. Les classes secondaires sont N50-60, N170-180, N0-10, N80-90 et N140-150. En dehors de ces classes, les autres sont minoritaires.

L'analyse de la distribution des fréquences en nombre des trois premières classes majeures (N120-130, N110-120, N150-160) indique une forte similitude avec la distribution des fréquences en longueurs cumulées de ces classes. Autrement dit, les fractures les plus abondantes sont aussi les plus longues.

Les histogrammes circulaires de la fracturation traduisent une certaine hétérogénéité de la fracturation.

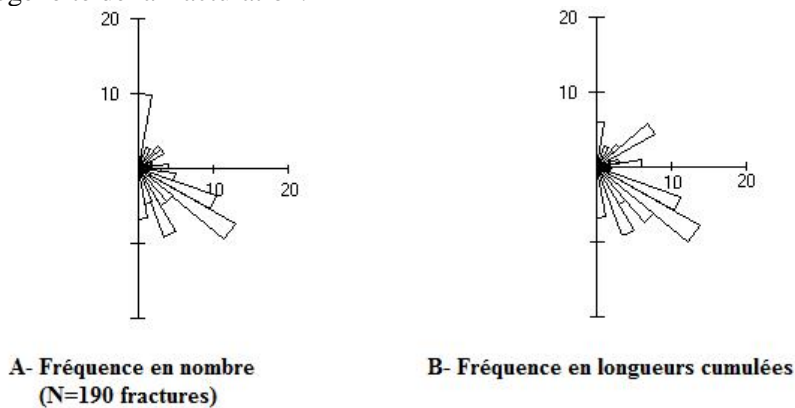


Figure 3 : Rosaces directionnelles de la fracturation du sud-est de la Côte d'Ivoire

A- Fréquence en nombre (N=190 fractures) ; B- Fréquence en longueurs cumulées

Ajustement des longueurs de fractures aux lois classiques

Les longueurs de fractures sont comprises dans l'intervalle [312 m-41741 m]. Ces longueurs de fractures ne s'ajustent pas aux modèles les plus fréquemment utilisées (Gamma, Exponentielle et Lognormale). Le test de conformité de Khi-2 au seuil de signification de 10%, a permis de rejeter tous ces modèles précités (Tableau 1).

Tableau 1 : Résultats du test d'ajustement des lois de distribution aux longueurs de fractures.

Paramètre	Loi de distribution	χ^2 calculé	χ^2 théorique ($\alpha = 10\%$)	
Longueur de fractures	Lognormale	36,87	7,78	4
	Exponentielle	15,62	7,78	4
	Gamma	12,58	6,25	3

Les longueurs de fractures ont été ajustées à une loi de puissance (Figure 4). L'analyse de ce diagramme révèle que seule une partie du graphe (13,99 km - 41,74 km) présente un comportement linéaire sur laquelle il est possible d'ajuster une loi de puissance d'équation (3) :

$$N(l) = 9886,9 \times l^{-2,496} \tag{3}$$

avec $R^2 = 0,8715$

Cette loi de puissance met en évidence le caractère auto-similaire de la fracturation pour les longueurs de fractures l comprises entre 13,99 km et 41,74 km.

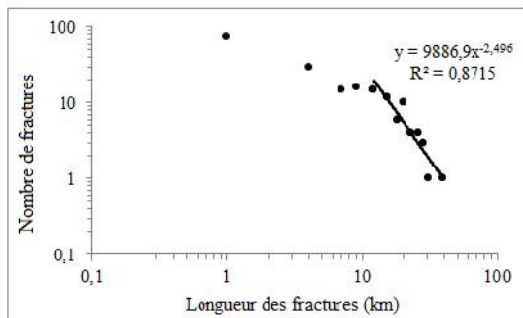


Figure 4 : Diagramme log-log de la distribution des fréquences des longueurs de fractures. Ajustement à une loi de puissance.

Ajustement des espacements de fractures aux lois classiques

Les espacements de fractures ont été mesurés aussi bien au niveau de la fracturation tous azimuts que des familles de fractures représentatives (fractures majeures et fractures N-S) de la zone d'étude. Les caractéristiques des espacements de fractures sont consignées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Caractéristiques des espacements de fractures.

Espacements des fractures	Tous azimuts	Majeures	Nord-Sud
Nombre	125	51	17
Maximum (km)	90,87	86,40	166,32
Minimum (km)	2,83E-02	0,014	7,28
Ecart-Type () (km)	8,790	19,9	40,44
Moyenne (μ) (km)	7,068	17,24	40,47
Cv = σ/μ	1,24	1,15	0,99

L'espacement des fractures tous azimuts est la distance séparant les fractures sur un profil d'échantillonnage sans tenir compte de l'orientation des fractures. Le nombre total d'espacement mesuré pour la fracturation tous azimuts est de 125. Le coefficient de variation (Cv) calculé est de 1,24. Cette valeur, supérieure à 1, suggère que les fractures globales sont regroupées, en accord avec un modèle dit en amas.

L'espacement des fractures appartenant à une même famille est la distance perpendiculaire à l'orientation moyenne des fractures. Pour la famille de fractures majeures, le Cv est de 1,15. Les fractures majeures sont aussi regroupées au même titre que la fracturation globale. A l'opposé, le Cv de la famille de fractures N-S égale à 0,99, est inférieur à 1. Ces fractures seraient donc distribuées de manière constante ou uniforme.

Le diagramme schématique des espacements de fractures tous azimuts montrent que la loi exponentielle est appropriée pour décrire la distribution de ce paramètre (Figure 5). La justification réside dans le fait que le test de conformité de Khi-2 au seuil de signification de 10% est positif pour cette loi (Tableau 3).

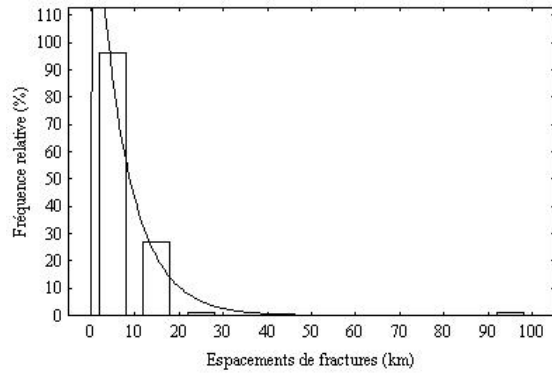


Figure 5 : Distribution des espacements. Ajustement à une loi exponentielle.

Tableau 3 : Résultats du test d'ajustement des lois de distribution aux espacements de fractures tous azimuts

Paramètre	Loi de distribution	χ^2 calculé	χ^2 théorique ($\alpha = 10\%$)	
Espacements de fractures tous azimuts	Log-normale	16,23	6,63	1
	Exponentielle	4,64	6,63	1
	Gamma	—	—	—

Analyse géostatistique de la fracturation

Les variogrammes expérimentaux de la fracturation tous azimuts et des familles de fractures représentatives (fractures majeures et fractures N-S) sont ajustés au modèle exponentiel (Figures 6, 7 et 8). Les paramètres de régionalisation de la fracturation déterminés à l'aide des modèles théoriques (exponentiel et sphérique) sont présentés au tableau 4. Il ressort de l'analyse des écarts moyens quadratiques de ce tableau, que le modèle exponentiel est celui qui ajuste le mieux les variogrammes expérimentaux.

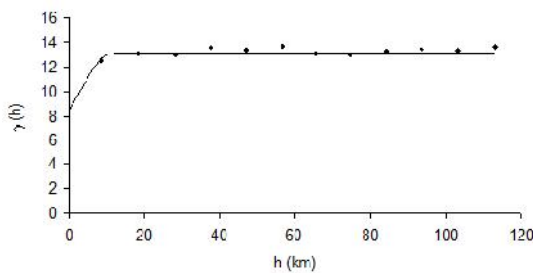


Figure 6 : Variogramme de la fracturation tous azimuts ajusté au modèle

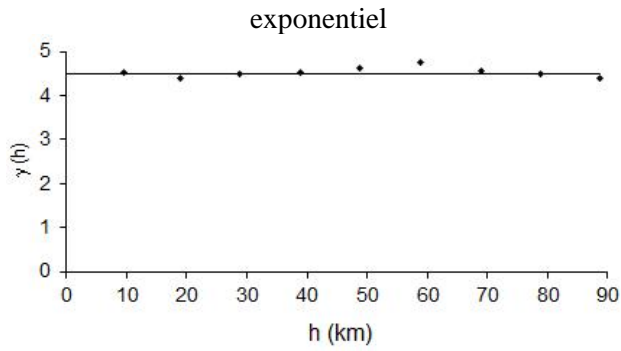


Figure 7 : Variogramme de la fracturation majeure ajusté au modèle exponentiel

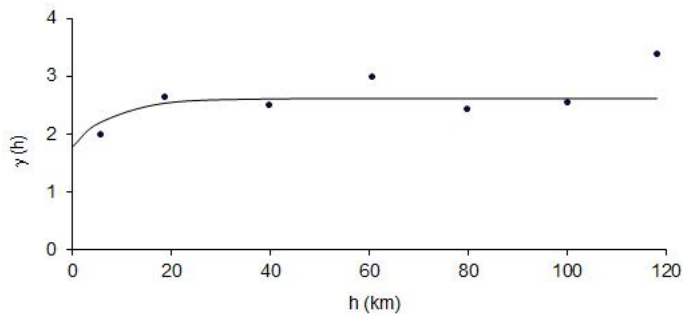


Figure 8 : Variogramme de la fracturation Nord-Sud ajusté au modèle exponentiel

Tableau 4 : Paramètres de régionalisation de la fracturation de la zone d'étude.

Fractures	Modèle ajusté	Portée (a) (km)	Plateau (C) (km ²)	Plateau-pépité (C-Co) (km ²)	Effet de pépité (Co) (km ²)	Ecart moyen (km)
Tous azimuts	Sphérique	15,596	13,02	1,54	11,48	1,21E+01
	Exponentiel	12	13,16	4,76	8,4	6,46E+00
Fractures majeures	Sphérique	--	--	--	--	--
	Exponentiel	--	--	--	--	--
Nord-Sud	Sphérique	22,8	2,619	0,81	1,809	5,08 E-01
	Exponentiel	24	2,619	0,837	1,782	5,00E-01

Les variogrammes modélisés de la fracturation tous azimuts et de la famille de fractures N-S présentent les caractéristiques suivantes :

- l'existence d'un palier de 13,16 km² pour la fracturation tous azimuts et de 2,619 km² pour la fracturation de famille Nord-Sud. Le palier correspond à la valeur autour de laquelle se stabilise le variogramme ;
- l'existence d'une portée de 12 km et 24 km respectivement pour la fracturation tous azimuts et la famille de fractures N-S. A partir de cette valeur, le palier est atteint. Cette valeur représente la distance d'auto-corrélation ; c'est-à-dire il y a corrélation spatiale pour les couples de points distants de moins de 12 km pour la fracturation tous azimuts et de moins de 24 km pour la famille de fractures N-S. Au-delà de cette distance, il y a indépendance entre deux points distants d'une valeur de h même très proche ;
- l'existence d'un effet de pépite de 8,4 km² et 1,782 km² respectivement pour la fracturation tous azimuts et la famille de fractures N-S. L'effet de pépite correspond à la valeur de $\gamma(0)$ quand h tend vers 0. Il représente la discontinuité à l'origine.

Ces différentes caractéristiques montrent que la fracturation de la zone d'étude n'est pas répartie de façon aléatoire. Les variogrammes de la fracturation globale et de la famille de fractures N-S sont donc spatialement bien structurés. La densité de fracturation en longueurs cumulées s'apparente à une variable régionalisée.

Les paramètres de régionalisation de la fracturation tous azimuts et de la fracturation majeure permettent d'établir les équations 4 et 5 après ajustement au modèle exponentiel.

Fracturation tous azimuts

$$\gamma(h) = 4,76 [1 - \exp(-h / 12)] + 8,4 \quad (4)$$

Fracturation N-S :

$$\gamma(h) = 0,837 [1 - \exp(-h / 24)] + 1,782 \quad (5)$$

Le variogramme des fractures majeures met en évidence un pur effet de pépite (Figure 7). Ceci montre que le réseau constitué par la fracturation majeure est mal structuré.

DISCUSSION

L'exposant caractéristique ($\alpha = 2,49$) de la distribution des longueurs de fractures suivant la loi de puissance est en accord avec les données de la littérature comprises entre 1 et 3 (Lasm, 2000 ; Jourda, 2005 ; Youan Ta et al.,

2008 ; Zazoun, 2008 ; Koudou et al., 2013). Cette valeur proche de 3 montre que le réseau de fractures caractérisé par $\ell \geq 13,99$ km, s'identifie à un réseau percolant ayant un grand intérêt en hydrogéologie structurale. Par ailleurs, elle fixe la proportion des grandes fractures par rapport aux petites (Darcel, 2002).

La loi de puissance caractérise les longueurs de fractures supérieures à 13,99 km. Pour une meilleure caractérisation des fractures de tailles inférieures, Castaing et al. (1989), Odling (1997), Lasm (2000) suggèrent un échantillonnage à différentes échelles et de recalculer les données pour obtenir une seule distribution. La distribution des longueurs de fractures du sud-est de la Côte d'Ivoire suivant la loi de puissance indique que les réseaux de fractures auraient atteint un stade de développement très avancé. Des résultats analogues ont été obtenus par Bodin et Razack (1999), Lasm (2000), De Dreuzy et al. (2001), Lasm et Razack (2001), Darcel (2002), Jourda (2005), Youan Ta (2008), Zazoun (2008), Koudou et al. (2013).

La loi de distribution des espacements de fractures reste très controversée dans la littérature : loi exponentielle négative (Baecher et al., 1977), loi lognormale (Rouleau et Gale, 1985), lois normale et Gamma (Huang et Angelier, 1989), loi de Weibull (Bardsley et al., 1990), loi de puissance (Gillespie et al., 1993 ; Bodin et Razack, 1999). Dans le sud-est de la Côte d'Ivoire, la distribution des espacements de fractures s'ajuste mieux à la loi exponentielle, signe d'une absence de corrélations (Pineau, 1985 ; Brooks et al., 1996; Genter and Castaing, 1997; Genter et al., 1997; Odling et al., 1999). Un résultat pareil a été obtenu par Jourda (2005) dans la région de Korhogo. Rives et al. (1992) suggèrent d'utiliser la distribution des espacements comme un indicateur de stade de développement des familles de fractures. Le stade initial de développement correspond à la distribution exponentielle des espacements et le stade final de maturité correspond à la distribution normale.

Le nombre de fractures (190 fractures) obtenu dans la région par cette étude est légèrement supérieur à celui de 179 fractures obtenu par Adiaffi (2008) à partir d'images ETM+ du satellite Landsat. Le nombre d'espacements (17) de la famille de fractures N-S est très faible. Cet effectif, selon Brooks et Carruthers cités par Soro (1987) in Lasm (2000), n'est pas représentatif pour mener une étude statistique. Le Cv de la famille de fractures N-S ne serait pas valable. Le résultat d'interprétation de la distribution de cette famille (homogène ou constante) est donc à prendre avec beaucoup de précaution.

L'utilisation du coefficient de variation Cv, suggéré par Odling et al. (1999), pour analyser la distribution de l'espacement des fractures dans l'espace ne renseigne pas sur l'arrangement spatial des fractures, à savoir si elles sont distribuées aléatoirement ou selon une structure spatiale définie (La Pointe, 1980). Une étude géostatistique aide à reconnaître la présence d'une structure dans l'arrangement des fractures.

Les variogrammes expérimentaux de la fracturation globale et de la famille de fractures N-S présentent une discontinuité à l'origine. Cet effet de pépité peut être lié à l'action combinée des hétérogénéités spatiales à plus petite échelle et à

des incertitudes de mesure (Massoud, 1988 ; Lasm, 2000). Il est difficile sur un variogramme expérimental de séparer l'effet de pépite de l'erreur de mesure (Massoud, 1988 ; Lasm, 2000). La discontinuité à l'origine est un phénomène couramment rencontré dans l'analyse géostatistique des milieux fracturés (Lasm, 2000). L'effet de pépite sur les variogrammes indique que la variable étudiée est très irrégulière.

L'existence d'un palier au niveau des variogrammes traduit un phénomène stationnaire d'ordre 2 (Razack, 1984). L'hypothèse de stationnarité admise est vérifiée et l'usage de la théorie des fonctions intrinsèques est justifié (Gascuel-Odoux, 1987 ; Razack, 1984).

La présence d'un pur effet de pépite traduit l'absence de structuration au niveau des fractures majeures et s'explique par la très faible densité de celle-ci (Lasm et al., 2004). Deux points distants d'une valeur h même très faible sont indépendants, c'est-à-dire qu'ils sont sans corrélation quelle que soit la valeur de h non nulle.

CONCLUSION

L'étude statistique et géostatistique de la fracturation menée dans le sud-est de la Côte d'Ivoire à partir de la carte de fracturation issue des images ASAR ENVISAT, œuvre à une meilleure caractérisation des aquifères fracturés du socle précambrien.

L'analyse statistique montre que la distribution de la fracturation n'est pas homogène. Les fractures les plus abondantes (N120-130, N110-120, N150-160) sont aussi les plus longues. Les longueurs de fractures s'ajustent mieux à une loi de puissance. Cette loi met en évidence le caractère auto-similaire de la fracturation pour les longueurs de fractures l comprises entre 13,99 km et 41,74 km. Les réseaux de fractures auraient atteint un stade de développement avancé. La distribution des espacements de fractures montre une distribution suivant la loi exponentielle. La valeur du coefficient de variation C_v inférieure à 1, suggère que les fractures sont plutôt regroupées que distribuées aléatoirement ou de manière constante.

L'analyse géostatistique montre que les variogrammes de la fracturation globale et de la famille de fractures N-S, caractérisés par un palier, une portée et un effet de pépite, sont spatialement bien structurés. La densité de fracturation en longueurs cumulées s'identifie à une Variable Régionalisée. En revanche, la fracturation majeure est spatialement mal structurée.

La prochaine étape de l'étude serait d'entreprendre une estimation spatiale ou interpolation de la fracturation par krigeage et d'évaluer l'influence de chacune des fractures sur l'écoulement de l'eau souterraine.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 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", Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Paris-Sud, Orsay, France, 230 p.
- ASSOMA T.V. (2013). Variabilité hydroclimatique et évaluation des ressources en eau du bassin côtier de l'Agnéby au Sud-Est de la Côte d'Ivoire : apport des outils statistiques, de la modélisation et de la télédétection optique et radar, Thèse unique de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan- Cocody, N°750/2013, 196 p.
- BAECHER G.B., LANNEY N.A., EINSTEIN, H.H. (1977). Statistical description of rock properties and sampling, Proc.18th U. S. Symp. on Rock Mech., AIME, 5CI-I à 5CI-B.
- BARDSLEY W.E., MAJOR T.J., SELBY M.J. (1990). Note on a Weibull property for joint spacing analysis, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr., vol.27 n°2, 133-134.
- BERGER J., CARNERLO J., FAHY J.C. (1980). Etude des ressources en eaux souterraines dans une région de socle cristallin "La boucle du cacao en Côte d'Ivoire", Bull. BRGM, Section III, série n°4. 335-338.
- BIEMI J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens 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 Doct. ès Sci. Nat., Faculté des Sciences et Techniques, Univ. Nationale de Côte d'Ivoire, 493 p.
- BIEMI J., DESLANDES S., GWYN Q.H.J., JOURDA P. (1991). Géologie et réseaux de linéaments régionaux du bassin versant de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire) : cartographie à l'aide des données Landsat TM et du champ magnétique total. In : Télédétection et Gestion des Ressources, Vol. VII, 135-145, Association Québécoise de Télédétection.
- BODIN J., RAZACK M. (1999). L'analyse d'images appliquée au traitement automatique de champs de fractures. Propriétés géométriques et lois d'échelle. Bull. Soc. Géol. Fr., t. 170, n°4, 579-593.
- BROOKS B.A., ALLMENDINGER R.W., BARRA I.G.D.L. (1996). Fault spacing in El Teniente mine, central Chile: evidence of nonfractal fault geometry, J. Geophys. Res., 101, 13633-13653.
- CASTAING C., MARTIN P., GOUYET J.F., LOISEAU P., MARTIN P., POINTET T. (1989). Etude pluridisciplinaire d'un réseau de discontinuité-image SPOT milieu granitique couvert. Implications en hydrogéologie des milieux fissurés, Hydrogéologie, n°1, 19-25.
- CHILES J.P., DE MARSILY G. (1993). Stochastic models of fracture systems and their use in flow and transport modeling. In Flow and contamination

- transport in fractured rock. Edited by J. Bear, C.-F. Tsang, and G. de Marsily. Academic Press, London, 169-236.
- DARCEL C. (2002). Corrélation dans les réseaux de fractures: caractérisation et conséquences sur les propriétés hydrauliques, Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, n°102, 223 p.
- DE DREUZY J.R., DAVY P., BOUR O. (2001). Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following a power law length distribution^o: 1-Effective connectivity, *Water resources Research*, n°7, 107-111.
- DELOR C., DIABY I., TASTET J.P., YAO B., SIMEON Y., VIADAL M., DOMMANGET A. (1992). Notice explicative de la carte géologique à 1/200 000, feuille de Grand Bassam et d'Abidjan, 30 p.
- EL HADANI D. (1992). Application de la télédétection à la prospection hydrogéologique en milieux fissurés. In: *Géo Observateur (Actes du Symposium MARISY'92, Rabat, Maroc, Octobre 7-9)*, 99-112.
- FAILLAT J.P. (1986). Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest), Thèse de l'Université, Languedoc (Montpellier), 534 p.
- GASCUEL-ODOUX C. (1987). Variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol, méthodes et résultats ; cas d'une seule variable : revue bibliographique, *Agronomie*, Vol 7, 01, 61-71.
- GENTER A., CASTAING C. (1997). Effets d'échelle dans la fracturation des granites, *C. T. Acad. Sci., Ser II Sci. Terr. Planet.*, 325, 439-445.
- GENTER A., CASTAING C., DEZAYES C., TENZER H., TRAINEAU H., VILLEMIN T. (1997). Comparative analysis of direct (core) and indirect (borehole imaging tools) collection of data in the Hot Dry Soultz reservoir, *J. Geophys. Res.*, 102, 15419-15431.
- GILLESPIE P.A., HOWARD C.B., WALSH J.J., WATTERSON J. (1993). Measurement and characterization of spatial distributions of fractures. *Tectophys.*, Vol. 226, 113-1141.
- HUANG Q., ANGELIER J. (1989). Fracture spacing and its relation to bed thickness. *Géol. Mag.*, Vol. 4, n° 126, 355-362.
- ISAAKS E.H., SRIVASTAVA R.M. (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York, 561p.
- 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'hydrotechniquespatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire, Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody, 430 p.
- JOURNEL A.G. ET HUIJBREGTS C.J. (1978). *Mining Geostatistics*, Academic Press, London, 600 p.
- KITANIDIS P.K. (2000). *Introduction to Geostatistics. Application in Hydrogeology*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

- KOUAME K.F., PENVEN M.J., KOUADIO B.H., SALEY M.B., GRONAYES C.C. (2006). Contribution des images d'Aster de Terra et d'un modèle numérique d'altitude à la cartographie morphostructurale du massif des Toura (Ouest de la Côte d'Ivoire), *Téledétection*, Vol. 6, n°2, 103-121.
- KOUAME K.F. (1999). Hydrogéologie des régions de montagne : apport des données de télédétection et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale des aquifères discontinus du secteur Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat, Université Cocody, Abidjan, 210 p.
- KOUDOU A., LASM T., KOUAME K.F., YOUAN TA M., ASSOMA T.V, BIEMI J. (2013). Contribution des images ASTER à la connaissance des aquifères fracturés de la région de Duékoué (Ouest de la Côte d'Ivoire). Photo-Interprétation, *European Journal of Applied Remote Sensing*, n° 2012/4, 48-66.
- KOUDOU A., KOUAME K.F., YOUAN TA M., SALEY M.B., JOURDA J.P., BIEMI J. (2010). Contribution des données ETM+ de Landsat, de l'Analyse Multicritère et d'un SIG à l'identification de secteurs à potentialité aquifère en zone de socle du bassin versant du N'zi (Côte d'Ivoire). Photo-Interpretation, *European Journal of Applied Remote Sensing*, , Vol. 46, n°2010/3-4, 98-115.
- LACHAINE G. (1999). Structures géologiques et linéaments, Beauce (Québec): apport de la télédétection. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître es sciences (M.Sc.) en géographie, cheminement Télédétection, Département de géographie et télédétection, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke, 105 p.
- LACHASSAGNE P., MARECHAL J.C., AHMED SH., DEWANDEL B., GANDOLFI J.M., KRISHNAMURTHY N.S., SUBRAHMANYAM K., WYNS R. (2005). Nouveaux outils et méthodes pour gérer et protéger la ressource en eau souterraine des régions de socle, *Hydrosciences*, n°25, 53-57.
- LA POINTE P.R., HUDSON J.A. (1985). Characterisation and interpretation of rock mass joint patterns. Geological Society of America, Boulder, Colo. Special Paper 199.
- LA POINTE P.R. (1980). Analysis of the spatial variation in rock mass properties through, 21st U.S. Symp. On Rock Mech., Rolla, 570-580.
- LASM T., KOUAMÉ K.F., SORO N., JOURDA J.P. R., BIÉMI J. (2004). Analyse géostatistique de la fracturation extraite de l'imagerie spatiale aéroportée et satellitaire. Application à la région de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire), *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologiques*, n°5, 135-154.
- LASM T., RAZACK M. (2001) Lois d'échelle dans la fracturation des roches dures cristallines et dans le réseau hydrographique associé, *Compte Rendu Académie des Sciences Paris, Science de la Terre et des planètes*, n° 333, 225-232.

- LASM T. (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : analyses statistique 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 Poitiers, 272 p.
- LOPEZ P. (2000). Comportement mécanique d'une fracture en cisaillement : analyse par plan d'expériences des données mécaniques et morphologiques connues sur une Fracture, Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux I (France) et de l'Université du Québec à Chicoutimi (Canada), 401 p.
- MAHMOOD A. (1996). Lineaments as Groundwater Exploration Guides in Hard-rock Terranes of Arid Regions, *Journal Canadien de Télédétection*, Vol. 22, n°1, 108-116.
- MARECHAL J.C., WYNS R., LACHASSAGNE P., SUBRAHMANYAM K., TOUCHARD F. (2003). Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle concordance avec la structure géologique des profils d'altération, *Comptes rendus Géosciences*, Vol. 335, 451-460.
- MASSOUD H. (1988). Modélisation de la petite fracturation par les techniques de la géostatistique, *Doc. B.R.G.M*, n°.155, 197 p.
- MATHERON G. (1970). La théorie des variables régionalisées, et ses applications. *Les Cahiers du CMM*, fasc. 5, Ecole des Mines de Paris.
- ODLING N. E., GILLESPIE P., BOURGINE B., CASTAING C., CHILÈS J.-P., CHRISTENSEN N. P., FILLION E., GENDER A., OLSEN C., THRANE L., TRICE R., AARSETH E., WALSH J.J., ET WATTERSON J. (1999). Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractured hydrocarbon reservoirs, *Petroleum Geoscience*, n°5, 373-384.
- ODLING N. (1997). Scaling and connectivity of joint systems in sandstones from western Norway, *Journal of Structural Geology*, Vol. 19, n° 10, 1257-1271.
- PANNATIER Y. (1995). Variowin : logiciel pour l'analyse spatiale des données en 2D : Etude géologique et géostatistique du gîte de phosphates de Taiba (Sénégal), Thèse, Faculté des sciences de l'université de Lausanne, 208 p.
- PANNATIER Y. (1994). Variowin 2.1, User's manual.
- PINEAU A. (1985). L'échantillonnage des espacements entre fractures : une distribution exponentielle négative tronquée, *C.R. Acad. Sc. Paris, Série II*, t. 301, n°14, 1295-1297.
- RAZACK M. (1984). Application des méthodes numériques et statistiques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés en hydrogéologie, Thèse de Doctorat d'Etat, Université des Sciences et Techniques, Languedoc, 384 p.
- RAZACK M. (1982). A propos de la loi de distribution des fractures: intérêt pour l'hydrogéologie des aquifères de fissures, *C.R.Acad. Sc. Paris, Sér. II*, t. 294, 1295-1297.

- RIVES T., RAZACK M., PETIT J.P., RAWNLEY K.D. (1992). Joints spacing : analogue and numerical simulations, *J. Struct. Geol.*, Vol. 14, n°8/9, 925-937.
- ROULEAU A., GALE J.E. (1985). Statistical characterization of the fracture system in stripa granite, Sweden, *Int. J. Rock. Mech.& Mining Sc.& Geomech. Abs.*, 22, 353-367.
- WYNS R., BALTASSAT J.M., LACHASSAGNE P., LEGTCHENKO A., VAIRON J. (2004). Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France), *Bulletin de la Société Géologique de France*, Vol. 175, n°1, 21-34.
- YOUAN TA M. (2008). Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle Précambrien d'Afrique de l'Ouest : cas de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire), Thèse de l'Université de Cocody, 237 p.
- YOUAN TA M., LASM T., JOURDA J.P., KOUAME K.F., RAZACK M. (2008). Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire Landsat-7 ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (nord-est de la Côte d'Ivoire), *Télédétection*, Vol. 8, n°2, 119-135.
- ZAZOUN R. S. (2008). The Fadnoun area, Tassili-n-Azdjer, Algeria: Fracture network geometry analysis, *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 50, n°5, 273-285.