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)

Marc Youan Ta[1, 2], Théophile Lasm[2, 3], Jean Patrice Jourda[1, 2], Koffi Fernand Kouamé[1, 2], Moumtaz Razack [3]

1) Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), U.F.R des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire ; téléphone : + (225) 22 445 270 ; télécopieur : + (225) 22 445 270 ; courriels : youanta@yahoo.fr ; kouamef@yahoo.fr

2) Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement, U.F.R des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, 22 B.P. 582 Abidjan 22 (Côte d'Ivoire), téléphone : +(225) 22 483 803 ; courriels : theophile_lasm@yahoo.fr ; patrice_jourda@yahoo.fr

3) UMR 6532 HydrASA-CNRS, Laboratoire d'Hydrogéologie, Université de Poitiers, 40, Avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers Cedex, France, téléphone : +(33) 549 453 681; +(33) 549 454 241, courriel : moumtaz.razack@univ-poitiers.fr

Soumis le 17 août 2007 ; révisé le 1 5 avril 2008 ; accepté le 2 juin 2008, © *Revue Télédétection*, 2008, vol. 8, n° 2, p. 119-135.

Résumé

La présente étude porte sur une région située au nord-est de la Côte d'Ivoire (Bondoukou) où la fracturation est bien développée. Elle a pour objectifs principaux de cartographier les réseaux de fractures dans les roches cristallines et métamorphiques à l'aide des images satellitaires Landsat-7 ETM+ et de les caractériser à partir de méthodes statistique et géostatistique. L'ensemble des techniques utilisées a abouti au rehaussement des éléments structuraux et linéaires contenus dans les images brutes, permettant une meilleure cartographie des accidents géologiques. La carte linéamentaire obtenue après les traitements est très dense et comporte des linéaments (discontinuités images) de tailles variables. La validation de ces différentes structures linéaires a été faite sur la base des cartes géologiques et photo-géologiques existantes et des connaissances de terrain. L'analyse des réseaux de fractures indique que leur longueur s'échelonne sur trois ordres de grandeur mettant en évidence l'hétérogénéité des formations géologiques. La distribution des longueurs de fractures suivant la loi de puissance souligne que les réseaux de fractures de la région de Bondoukou auraient atteint un stade de développement avancé. L'analyse géostatistique souligne que la densité de fracturation se comporte comme une variable régionalisée. Le variogramme de la fracturation tous azimuts est caractérisé par plusieurs structures emboîtées mettant en évidence la structuration à différentes échelles et impliquant la complexité de ces réseaux. La structuration des familles de fractures n'est pas identique dans les différentes directions de l'espace. L'ensemble des résultats contribue à une meilleure connaissance des réseaux de fractures de la région de Bondoukou.

Mots clés : *Télédétection, fracturation, statistique, géostatistique, Côte d'Ivoire.*

Abstract

Mapping geological accidents from Landsat 7 ETM+ imagery and analysis of fractures networks of the precambrium substratum of the Bondoukou area (North -East of Ivory Coast).

The present study is located in the Northeast of the Côte d'Ivoire (Bondoukou) where fracturing is well developed. The main purpose of this study is to map the fracture networks in the crystalline and metamorphic hard rocks using satellite images ETM+ of Landsat 7 and to characterise them through the statistical and geostatistical methods.

Image processing techniques have permitted to improve the structural and linear features contained in the raw satellite images. That permits a better mapping of geological objects. The fracturing map obtained after treatments is very dense and include many lineaments of variable sizes. The validation of these fractures has been made using the existing geological and photo-geological maps and ground observation. The analysis of the fracture networks indicates that fracture length varies, which indicates the heterogeneity of the geological formations.

The distribution of fracture length follows power law indicating that the fracture networks of Bondoukou area have reached its optimal stage. The geostatistical analysis shows that the fractures networks of Bondoukou area behaves like a regionalized variable. The omnidirectional variogram of the fracture density is characterized by several structures putting in evidence the structuring at different scales and involving the complexity of these fracture networks. Fracture structuring is not identical in all the space directions. The sum of the results contributes to a better knowledge of the fracture networks of Bondoukou area.

Key words : *Remote sensing, fractures network, statistics, geostatistics, Ivory Coast.*

1. INTRODUCTION

Les réseaux de fractures constituent les principaux chemins des écoulements souterrains, et partant, du transport de solutés, de polluants, de masses et de chaleur dans les roches. La connaissance et la quantification du transport de soluté dans les roches fissurées est d'une importance capitale pour la protection et la préservation des aquifères. Dans les régions où les formations géologiques sont majoritairement constituées de socle comme c'est le cas de la Côte d'Ivoire (plus de 97 %), l'étude des réseaux de fractures est fondamentale pour la recherche en eaux souterraines. En effet, l'essentiel des ressources en eau se trouve dans les aquifères fracturés (Biémi, 1992 ; Kouamé, 1999 ; Lasm, 2000). La fracturation peut être étudiée aux moyens de différentes méthodes telles que la géophysique et la télédétection (photographies aériennes et satellitaires, imagerie radar). La télédétection possède de nombreuses techniques de prétraitements et de traitements qui rehaussent la perception visuelle des images pour une meilleure cartographie des discontinuités images. De nombreux travaux (Krishnamurthy et al., 1996 ; Lloyd, 1999 ; Jackson, 2002) ont montré comment la télédétection peut contribuer dans les investigations hydrogéologiques. En Côte d'Ivoire, les travaux de Biémi (1992), Savané et al. (1993), Savané (1997), Kouamé (1999), Jourda (2005) et Jourda et al. (2006) ont mis en évidence la relation entre les données de télédétection et les ressources en eaux souterraines dans les roches de socle. Il a été montré que les images satellitaires contiennent des accidents géologiques qui ont un lien direct avec le débit des eaux souterraines (Kresic, 1994). Ces différents travaux ont contribué à la reconnaissance de l'importance des linéaments pour l'hydrogéologie.

Depuis, 1995, le Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT) en collaboration avec le Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE) de l'Université de Cocody (Côte d'Ivoire) ont initié un vaste programme de recherche sur les aquifères fracturés des roches dures cristallines et métamorphiques. Il s'agissait, d'une part, de caractériser les réseaux de fractures et d'autre part de modéliser les écoulements dans les réseaux souterrains. C'est donc dans cette optique que plusieurs travaux ont été entrepris au niveau du territoire, notamment dans les régions ouest (Kouamé, 1999 ; Lasm, 2000 ; Saley, 2003), nord et nord-est (Jourda, 2005, Youan Ta, 2008) de la Côte d'Ivoire.

La télédétection, grâce à sa vision synoptique permet d'étudier de vastes champs géographiques et constitue un puissant outil pour l'étude de la fracturation. En effet, le traitement des données satellitaires est devenu incontournable pour l'évaluation des ressources naturelles et la cartographie des états de surface d'où son utilisation dans le cadre de cette étude.

Les principaux objectifs de ce travail consistent à cartographier et à caractériser des réseaux de fractures susceptibles de développer des aquifères souterrains dans les roches cristallines et métamorphiques du nord-est de la Côte d'Ivoire (Région de Bondoukou). Ce travail est une contribution à une meilleure connaissance de la géométrie des réseaux de fractures. Il permettra d'envisager, d'une part, la simulation des écoulements souterrains qui conduira à la détermination des grands axes d'écoulement et, d'autre part, à l'évaluation des ressources en eau souterraine disponibles en vue d'une meilleure gestion de celles-ci.

2. CADRE D'ÉTUDE ET CONTEXTE GÉOLOGIQUE

La zone d'étude est située dans la région de Bondoukou au nord-est de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 7°55' et 8°30' nord et les longitudes 2°40' et 3°20' ouest (figure 1), où la fracturation des roches est bien développée. Elle fait partie du domaine Baoulé-Mossi de Côte d'Ivoire et est séparée du domaine archéen par la faille majeure du Sassandra de direction N-S dont l'histoire est complexe (Camil, 1984 ; Djro, 1998).

Sur le plan lithologique, le domaine Baoulé-Mossi est constitué d'un ensemble de gneiss, constituant le socle des formations supracrustales d'origines volcanique, sub-volcanique et sédimentaire déposées dans des sillons ou bassins intracratoniques dans lesquels se sont mis en place les granites du cycle éburnéen (Kouamelan, 1996). Ces formations

se sont différenciées du manteau entre 2200 Ma et 2300 Ma et caractérisent le Birimien. Ce dernier regroupe l'ensemble des formations de l'Afrique de l'Ouest dont l'âge varie entre 2400 Ma et 1600 Ma. L'orogénèse éburnéenne est l'événement tectono-métamorphique majeur, qui a le plus affecté ces formations paléoprotérozoïques de l'Est de la faille du Sassandra.

À l'échelle du secteur d'étude, trois grands ensembles lithologiques se distinguent (figure 2) :

- un ensemble volcanique et sédimentaire, constitué de plusieurs unités pétrographiques (schistes, amphibolites et métadolérites), affleurant dans les régions sud et centre ;

- un ensemble intrusif constitué essentiellement de granodiorites plus ou moins métamorphisées et secondairement de granites et de tonalites ;

- un ensemble tarkwaïen constitué de formations détritiques post-tectoniques représentées par des conglomérats, grès et arkoses.

Les travaux de Zeade *et al*. (1995) et Delor *et al.* (1995) sur la tectonique de la région de Bondoukou montrent que celle-ci est complexe et caractérisée par plusieurs phases de déformations, à l'instar des autres régions de socle fracturées de Côte d'Ivoire.



Figure 1 : Localisation de la zone d'étude.
***Figure 1** : Location of the study area.*

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1. Matériel

La base de données cartographiques utilisée dans le cadre de cette étude comporte les cartes géologiques établies au 1/200 000 pour les localités d'Agnibilékrou (Siméon *et al.*, 1995), de Bondoukou (Zeade *et al.*, 1995) et de Nassian (Delor *et al*., 1995). Les cartes photogéologiques établies au 1/200 000 pour ces localités (Caldini et *al.*, 1978) ont également été utilisées. A ces données, s'ajoutent deux images Landsat 7 ETM+ (scènes 195-54/55) acquises le 2 Février 2000 et correspondant à la grande saison sèche. Cette période est caractérisée par la quasi absence de nuages, ce qui est favorable à la bonne visibilité des capteurs. Ces images satellitaires ont été choisies du fait de leurs caractéristiques spectrales et spatiales permettant une bonne cartographie structurale à petite échelle. Il s'agit des bandes ETM+1 (bleu), ETM+2 (vert) ETM+3 (rouge), ETM+4 (proche infrarouge), ETM+5 (infrarouge moyen), ETM+7 (infrarouge lointain) toutes avec des pixels carrés de 30 m et la bande ETM+6 (infrarouge thermique) des pixels de 60 m.

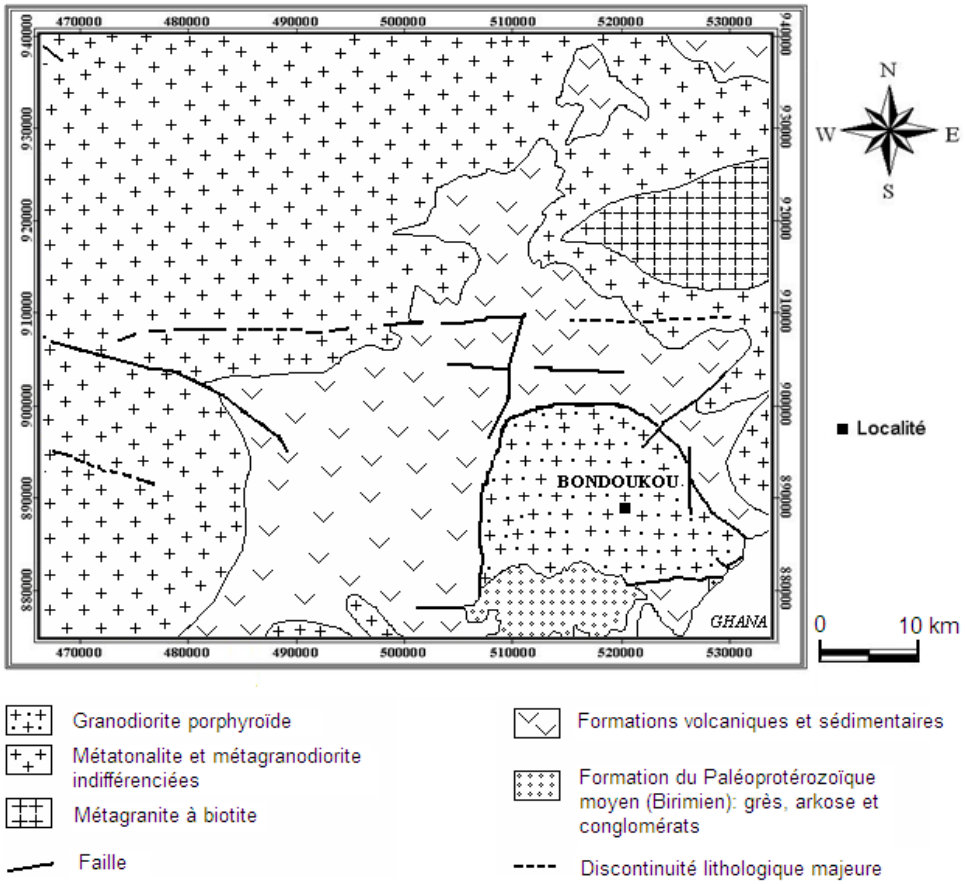


Figure 2 : Carte géologique de la région de Bondoukou.
***Figure 2** : Geological map of the Bondoukou region.*

3.2. Méthodologie pour le traitement des données

3.2.1. Prétraitement des images ETM+

La phase préliminaire de traitement des images satellitaires consiste à éliminer les bruits radiométriques dans les bandes ETM+ et à corriger les distorsions géométriques afin de les rendre parfaitement superposables aux cartes thématiques existantes (cartes topographiques, géologiques et photogéologiques). Les images ETM+ utilisées ici apparaissent sans bruit radiométrique majeur et ne nécessitent donc pas des traitements importants. Seule l'atténuation des effets d'ombrage liés au relief a été réalisée, grâce aux rapports de bandes ETM+3/ETM+4, ETM+4/ETM+5 , ETM+4/ETM+6 et ETM+4/ETM+7. Le réechantillionnage de la bande ETM+ 6 a donc été nécessaire pour ramener les pixels de 60 m à 30 m de côté.

La correction géométrique a été effectuée à partir de dix points d'amer repartis de façon homogène sur l'ensemble de la zone d'étude. Ces points sélectionnés pour leurs caractères permanents, sont visibles aussi bien sur la carte topographique que sur les images. Une équation polynomiale d'ordre 2 générée automatiquement à partir du fichier des points de contrôle permet de traduire mathématiquement le phénomène de transformation de l'image non corrigée pour qu'elle soit parfaitement superposable à la carte de référence. La méthode d'interpolation bilinéaire a permis d'attribuer les valeurs des pixels dans la grille corrigée. Les images corrigées ont par la suite subi d'autres traitements pour l'amélioration de la perception visuelle en vue d'une meilleure cartographie des accidents géologiques de la région d'étude.

3.2.2. Traitement numérique des images pour la cartographie des accidents géologiques

L'analyse en composantes principales (ACP), les combinaisons d'images et le filtrage spatial directionnel ont été appliqués pour le rehaussement des images. L'ACP ou transformée de Hotelling, consiste à développer le signal-image sur la base de fonctions orthogonales entre elles (Joly, 1986 cité par Robin, 1998). Cette technique s'emploie à rechercher les axes de plus grandes variances dans l'espace des radiométries d'une image. Dans le souci de cartographier l'essentiel des fractures ayant affecté le socle précambrien de la région de Bondoukou, nous avons effectué une analyse en composantes principales sélectives (ACPS), consistant dans un premier temps à réaliser une première ACPS avec les bandes du visible 1, 2 et 3 de ETM+. Ceci conduit à l'obtention des trois composantes $ACP1_{123}$, $ACP2_{123}$ et $ACP3_{123}$. Une deuxième ACPS est alors réalisée avec les bandes de infrarouge 5, 6 et 7 de ETM+. Le résultat conduit également à obtenir trois autres composantes $ACP1_{567}$, $ACP2_{567}$ et $ACP3_{567}$. Certains détails

contenus dans l'image ont pu être rehaussés grâce à l'application de la technique de combinaison d'image dont le principe est basé sur les opérations mathématiques qui permettent de générer des rapports de bandes (ETM+5 / ETM+4) et des indices normalisés ((ETM+6 – ETM+4) / (ETM+6 + ETM+4)).

Les images brutes et les néocanaux ainsi générés ont été utilisés comme images d'entrée pour l'application de techniques plus pertinentes pour le rehaussement des structures linéaires. Il s'agit notamment des techniques de filtrages (filtres Sobel et gradient de dimension 7x7) qui ont été appliquées aux bandes ETM+5, ETM+7, ETM+5 / ETM+4, $ACP1_{123}$ et $ACP1_{567}$. Ces filtres directionnels dont les matrices d'application sont présentées dans le tableau ci-dessous ont été conçus pour faire ressortir ou masquer des caractéristiques spécifiques d'une image en se basant sur leur fréquence liée à la texture (Himyari *et al.*, 2002). L'analyse proprement dite des textures a été effectuée pour faciliter l'identification des discontinuités images. Elle a nécessité le calcul des paramètres d'homogénéité et de contraste réalisés respectivement à partir de l'image ETM+7 et $ACP1_{567}$.

Tableau : Matrices de filtres Sobel et gradient.
Table : Sobel and gradient filters matrix.

0	1	1	1	1	1	2
-1	0	2	2	2	3	1
-1	-2	0	3	4	2	1
-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-2	-4	-3	0	2	1
-1	-3	-2	-2	-2	0	1
-2	-1	-1	-1	-1	-1	0

Filtre Sobel de direction NE-SW

2	1	1	1	1	1	0
1	3	2	2	2	0	-1
1	2	4	3	0	-2	-1
1	2	3	0	-3	-2	-1
1	2	0	-3	-4	-2	-1
1	0	-2	-2	-2	-3	-1
0	-1	-1	-1	-1	-1	-2

Filtre Sobel de direction NW-SE

1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
-1	-2	-3	-7	1	1	1
-1	-2	-3	-3	1	1	1
-1	-2	-2	-2	1	1	1
-1	-1	-1	-1	1	1	1

Filtre de Prewitt

1	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Filtre de Yésou *et al.* (1993)

3.2.3 Contrôle et validation

La phase de contrôle et de validation des accidents géologiques extraits du traitement numérique des images ETM+ est indispensable pour juger de la pertinence de la méthode utilisée.
Les structures identifiées à partir des images Landsat 7 ETM+ ont fait l'objet d'une analyse fréquentielle où les directions principales ont été comparées à celles des accidents relevés sur la carte photogéologique (Caldini et al., 1978). Les données auxiliaires issues des cartes géologiques et photogéologiques ont été comparées aux structures linéaires ou alignement morpho-structuraux (A.M.S.) extraites des images satellitaires afin de leur donner une signification structurale (Kouamé *et al.*, 1999 ; Kouamé, 1999 ; Lasm, 2000). Lorsque l'origine anthropique d'une structure linéaire a été prouvée (routes, pistes, limites de forêts ou de surfaces cultivées, lignes de haute tension, etc.), elle a été supprimée. Ainsi, celles restantes doivent vraisemblablement correspondre à de la fracturation (Faillat, 1986 ; Lasm, 2000 ; Lasm et Razack, 2001 ; Lasm *et al*., 2004 ; Kouamé et al., 2005).
La carte détaillée des réseaux de fractures obtenue dans le cadre de cette étude n'est certes pas exhaustive mais est représentative de la fracturation de la région de Bondoukou. Elle servira de base pour la caractérisation des réservoirs discontinus.

Les réseaux de fractures ont donc été analysés suivant les techniques de l'analyse statistique et géostatistique. Dans le premier cas, il s'agit essentiellement d'étudier les lois de distribution des longueurs des fractures et dans le second cas, d'analyser le variogramme expérimental de la densité de fracturation.

Nous ne présenterons pas ici les bases théoriques fondamentales de la géostatistique qui peuvent être consultées dans des ouvrages de référence (Isaak et Srivastava, 1989 ; Kitanidis, 2000). 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. Il est défini par la relation (1) :

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

où :

γ (h) est le demi-variogramme, VAR [Z(x)] est la variance au point *x* et *h*, le vecteur de module (x-x'). C'est la fonction 2γ (h) qui s'appelle « variogramme », mais, il est d'usage courant d'appeler « variogramme » la fonction γ (h). 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. La figure 3 illustre la représentation graphique du variogramme théorique.

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 Razack (1984) et Lasm (2000), dont l'expression générale est donnée par l'équation (2) ci-dessous.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1\left[1 - \exp\left(\frac{-3h}{a}\right)\right] \quad (2)$$

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.

L'extraction des longueurs des fractures a été a été réalisée avec l'aide du programme LINEAM (Bodin et Razack, 1999). Ces longueurs ont été intégrées à une étude statistique avec le logiciel STATISTICA 6.0. Dans le cadre de cette étude, la fracturation est considérée indépendamment de son contexte cinématique, approche abordée par Zeade *et al.* (1995) et Delor *et al.* (1995). Il s'agit donc ici d'une approche purement quantitative où les fractures n'ont été différenciées qu'en fonction de leur direction et leur densité.

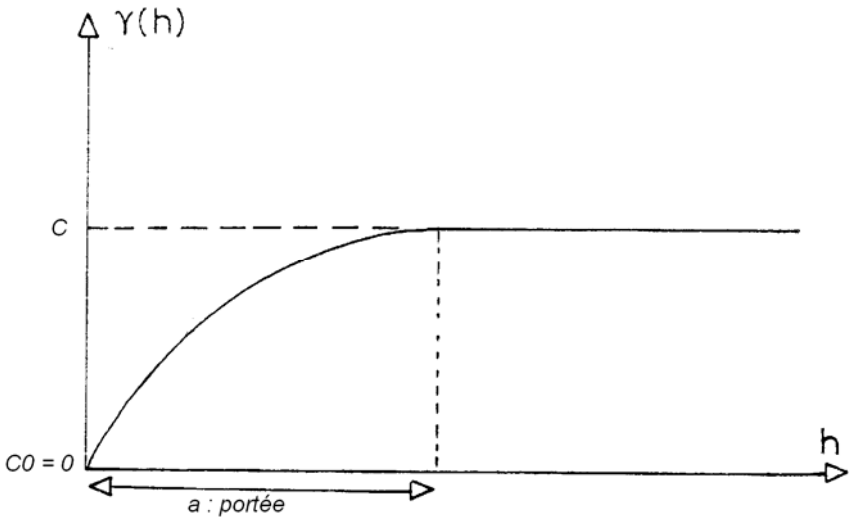


Figure 3 : Représentation graphique du variogramme.
***Figure 3** :Variogram graphic representation.*

4. RÉSULTATS

4.1. Cartographie des structures linéamentaires

L'application des filtres de Sobel et gradient de dimension 7 x 7 sur les canaux 5, 6 et 7 des images brutes de Landsat 7 ETM+ et traitées (ETM+5/ETM+4 (figure 4 a), $ACP1_{123}$ et $ACP1_{567}$) a permis de mettre en évidence de nombreuses discontinuités images. Sur ces images, les linéaments sont matérialisés par les limites formées par les zones sombres et claires. Elles peuvent parfois s'étendre sur plusieurs kilomètres. Les filtres de Sobel ont la particularité de rehausser les linéaments qui sont perpendiculaires à leur direction de convolution (figure 4b). La fenêtre de la figure 4b a été choisie parce qu'elle apparait la meilleure pour illustrer nos propos. Les filtres gradients rehaussent quant à elles, les linéaments tous azimuts (figure 5). L'analyse des attributs texturaux a favorisé la cartographie de nombreuses structures linéaires et

plus ou moins curvilignes aussi bien à l'échelle locale que régionale. Les paramètres homogénéité (figure 6) et contraste réalisés respectivement à partir des bandes ETM+7 et $ACP1_{567}$ ont permis la mise en évidence de nombreux linéaments tous azimuts. Ces linéaments apparaissent sur cette figure (figure 6) sous un ton noir dans une image à teinte plus ou moins grise.

Ainsi, la carte détaillée des linéaments (figure 7) a été réalisée grâce à une interprétation des images dérivées des différentes techniques de traitements. Cette carte présente une importante densité de linéaments de tailles variables allant de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres.

La carte linéamentaire met en évidence les différents nœuds des fractures. Ces nœuds constitués par les intersections des fractures auraient des potentiels hydriques non négligeables. Ils apparaissent souvent avec un décalage plus ou moins marqué, mais à l'échelle d'observation satellitaire, ils sont parfois difficilement observables.

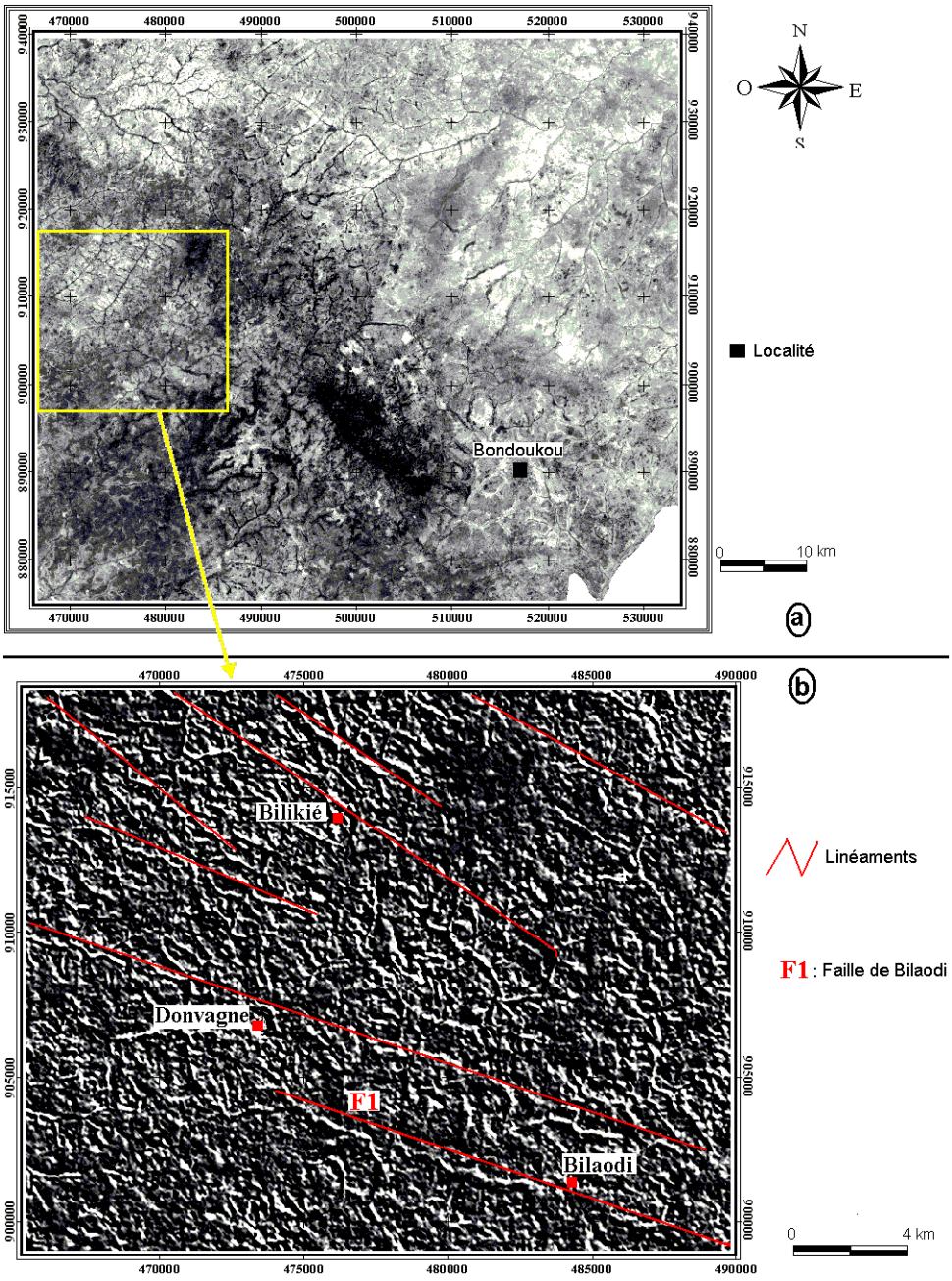


Figure 4 : a) Indice ETM+5/ETM+4 rehaussant les principaux accidents majeurs. b) Images traitées par filtrage Sobel de direction NW-SE appliqué à l'indice ETM+5/ETM+4 et cartographie des différents accidents.

***Figure 4** : a) Majors fractures enhanced by the ETM+5/ETM+4 ratio. b) Fractures enhanced by the NW-SE Sobel filter applied to the ETM+5/ETM+4 ratio.*

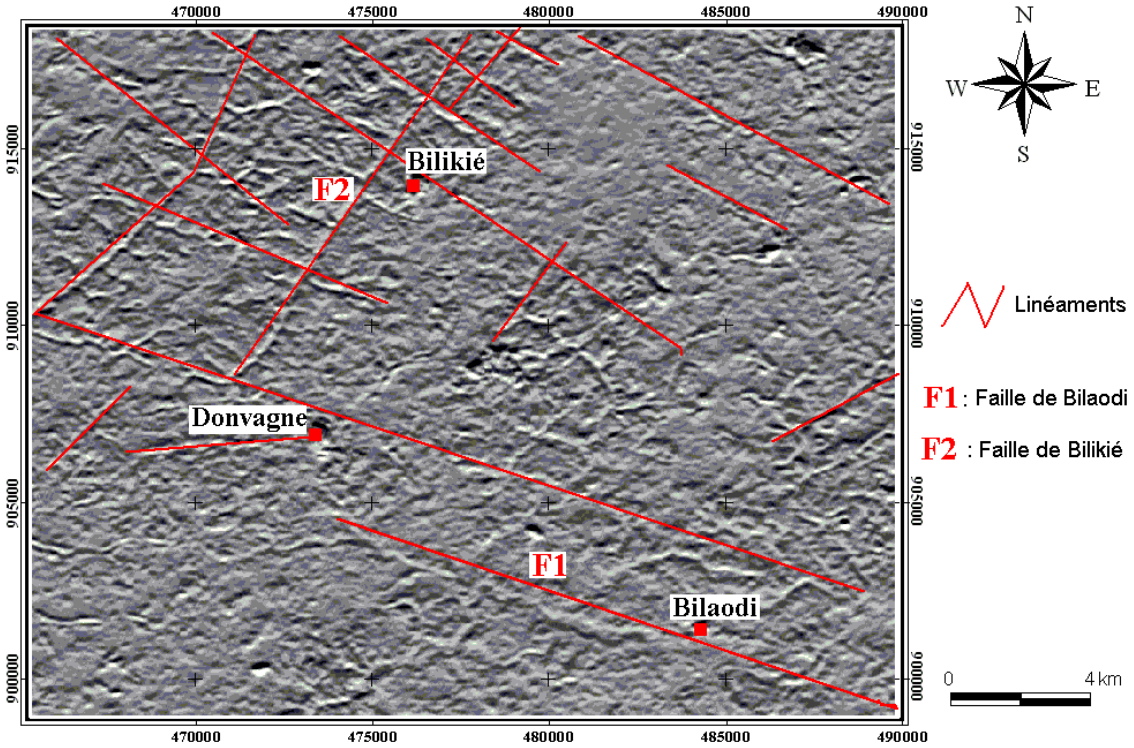


Figure 5 : Accidents majeurs rehaussés par le filtrage gradient de Yésou *et al.* (1993) appliqué à l'image ETM+7.
***Figure 5** : Majors fractures enhanced by the gradient filter of Yésou et al. (1993) applied to the ETM+7 image.*

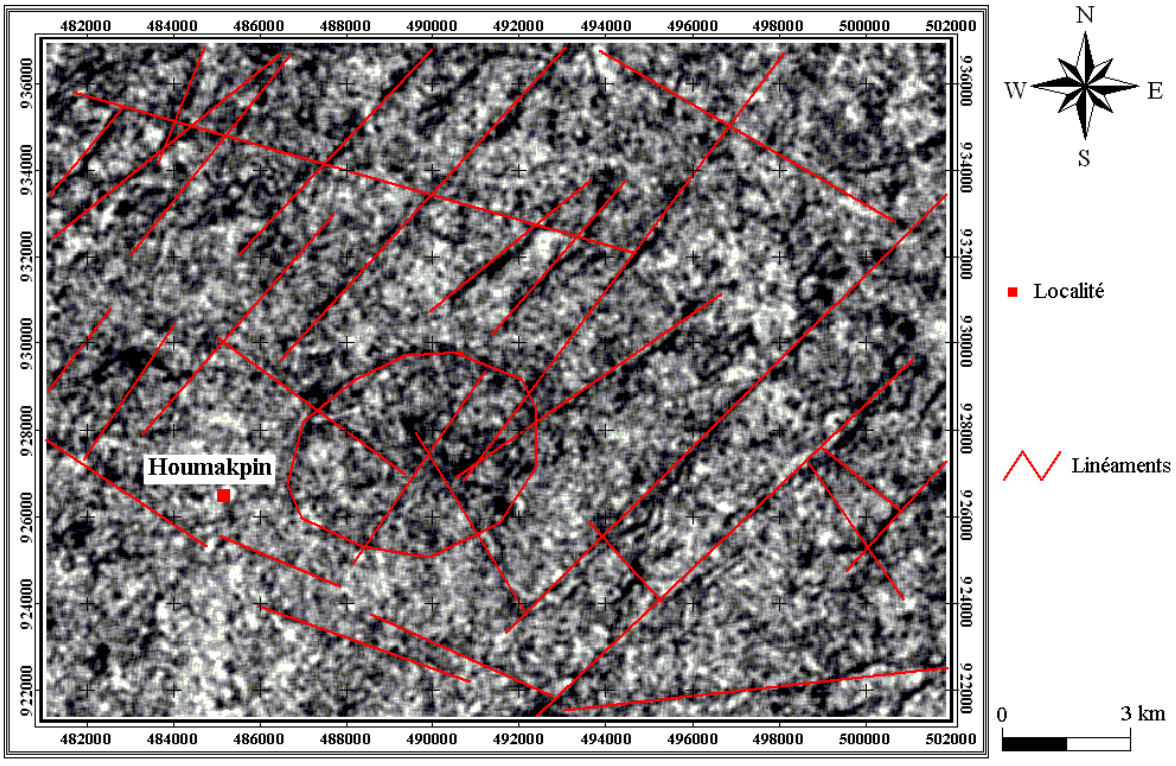


Figure 6 : Fractures rehaussées par le paramètre d'homogénéité réalisé à partir de la bande ETM+7.
***Figure 6** : Fractures enhanced by the homogeneity parameter realized with ETM+7 band.*

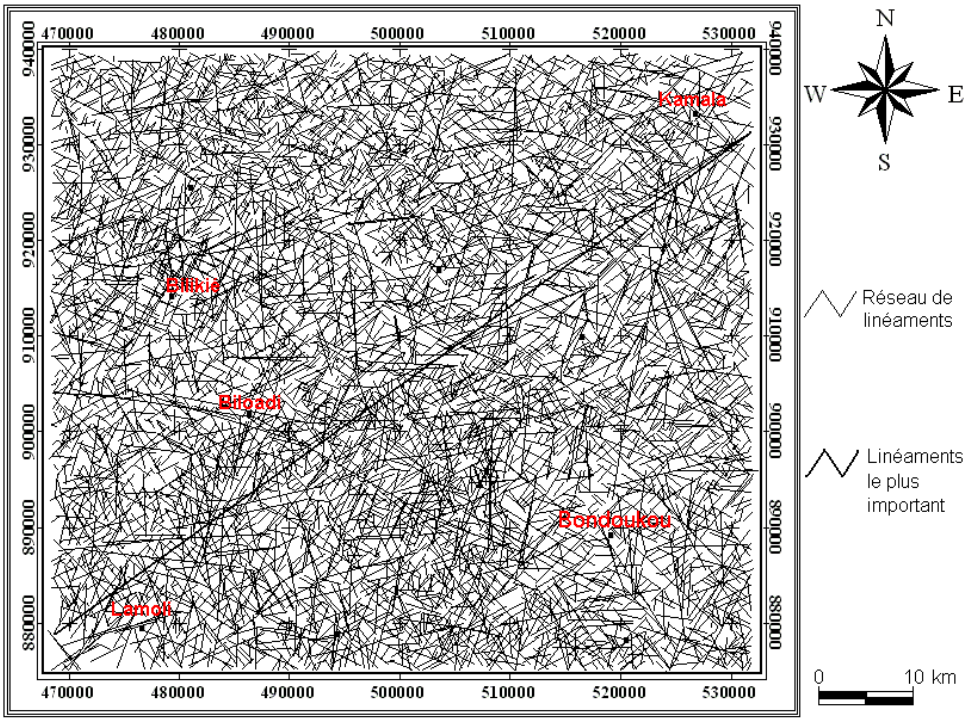


Figure 7 : Carte détaillée des linéaments de la région de Bondoukou établie à partir de l'analyse des images ETM+ de Landsat 7.
***Figure 7** : Detailed lineament map of the Bondoukou area extracted from the ETM+ bands of the Landsat 7 image.*

4.2. Analyse statistique des réseaux de fractures

4.2.1. Distribution des longueurs de fractures

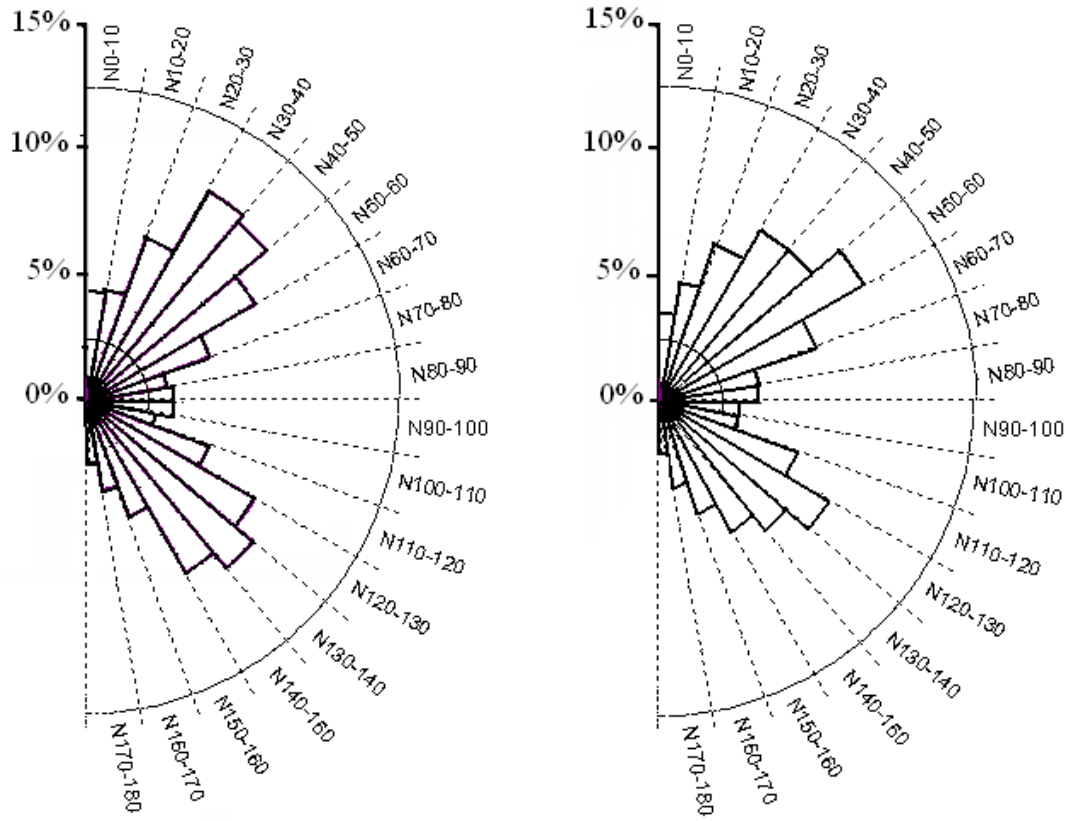
La carte de fracturation (figure 7) obtenue après les divers traitements compte environ 4 992 fractures de tailles variables, comprises dans l'intervalle [0,233 km ; 88,980 km] avec une longueur moyenne de 2,44 km. La longueur totale des linéaments cartographiés sur la zone d'étude est d'environ 12 201,61 km. Le linéament le plus important mesure 88,98 km et traverse diagonalement la zone d'étude (ENE-WSW) en passant la localité de Kamala. En dehors de cet accident, tous les autres ont une taille inférieure à 35 km. Plus de 91 % des fractures ont une taille inférieure à 5 km, seulement 0,3 % des fractures ont une taille supérieure à 15 km. Les petites fractures sont donc les plus nombreuses.

Les linéaments sont regroupés selon leur orientation en 18 classes d'orientation par croissant angulaire de 10 degrés. La fréquence et la densité des fractures par classe d'orientation ont été calculées. Les rosaces directionnelles de la fracturation exprimée en nombre (N = 4992) et en longueur cumulée sont représentées à la figure 8. L'histogramme circulaire de la fracturation présente un double intérêt. Il permet de faire ressortir les maxima directionnels, d'une part, et de réaliser une étude comparative des intensités relatives de chaque famille, d'autre part. Etudier l'orientation des fractures revient donc à distinguer les différentes familles de fractures caractérisées par une densité de fracturation en nombre et en longueur cumulée.

La distribution de la fracturation sur la rosace directionnelle est presque homogène. En effet, aucune famille de fractures ne dépasse les 10 % en fréquence. Les fréquences oscillent entre 2,45 et 9,70 %. Cependant certaines familles se démarquent de l'ensemble avec des fréquences proches de 10%. Il s'agit des familles de fractures N30-40, N40-50, N130-140 et dans une certaine mesure N50-60, N120-130 et N140-150 dont les fréquences oscillent entre 8 et 10 %. Ces familles de fractures peuvent être regroupées en deux grandes familles principales qui sont : NE-SW (N30-60) et NW-SE (N120-160). La première représente la direction birimienne en référence à la déformation tectono-métamorphique majeure (orogénèse éburnéenne) qui a le plus marqué le domaine Baoulé-Mossi de Côte d'Ivoire (Camil, 1984 ; Kouamelan, 1996). La seconde s'apparente à la direction libérienne (Biémi, 1992 ; Savané, 1997) bien que la région n'ait pas été affectée par l'orogenèse libérienne.

En dehors de ces familles, les autres présentent des fréquences inférieures à 6 %.

L'analyse de la distribution des fréquences de longueurs cumulées indique une forte similitude avec la distribution des fréquences en nombre de fractures. Ce résultat montre que les principales classes directionnelles de fractures identifiées apparaissent les plus longues. Autrement dit les fractures les plus abondantes en fréquence sont aussi les plus longues.



a : Fréquence en nombre (N=4992) b : Fréquence en longueur cumulée

Figure 8 : Diagrammes de répartition de l'orientation des fractures de la zone d'étude : a) fréquence en nombre (N= 4992) b) fréquence en longueur cumulée.
***Figure 8** : Distribution diagrams of fractures directions in the study area: a) numbers frequency (N=4992) ; b) cumulated length frequency.*

La carte photogéologique établie par Caldini et al. (1978) à partir des photographies aériennes couvre la moitié ouest du secteur d'étude. Les réseaux de fractures ont été analysés et la rosace directionnelle a été comparée à celle tirée des images satellitaires qui couvrent le même secteur (figure 9a et b). Cette analyse montre que les deux rosaces directionnelles sont plus ou moins similaires. En effet, les orientations des linéaments en générale et les principales classes d'orientation en particulier sont concordantes au niveau des deux rosaces.

La différence de densité de fracturation enregistrée au niveau des deux cartes peut être imputée d'une part à la qualité et à la résolution qui n'ont pas permis de cartographier convenablement les fractures d'une part et d'autre part à l'absence de techniques d'amélioration d'images au niveau des photographies aériennes acquises uniquement dans le visible. En effet, cette carte a été réalisée manuellement par un opérateur à la suite d'une analyse stéréoscopique.

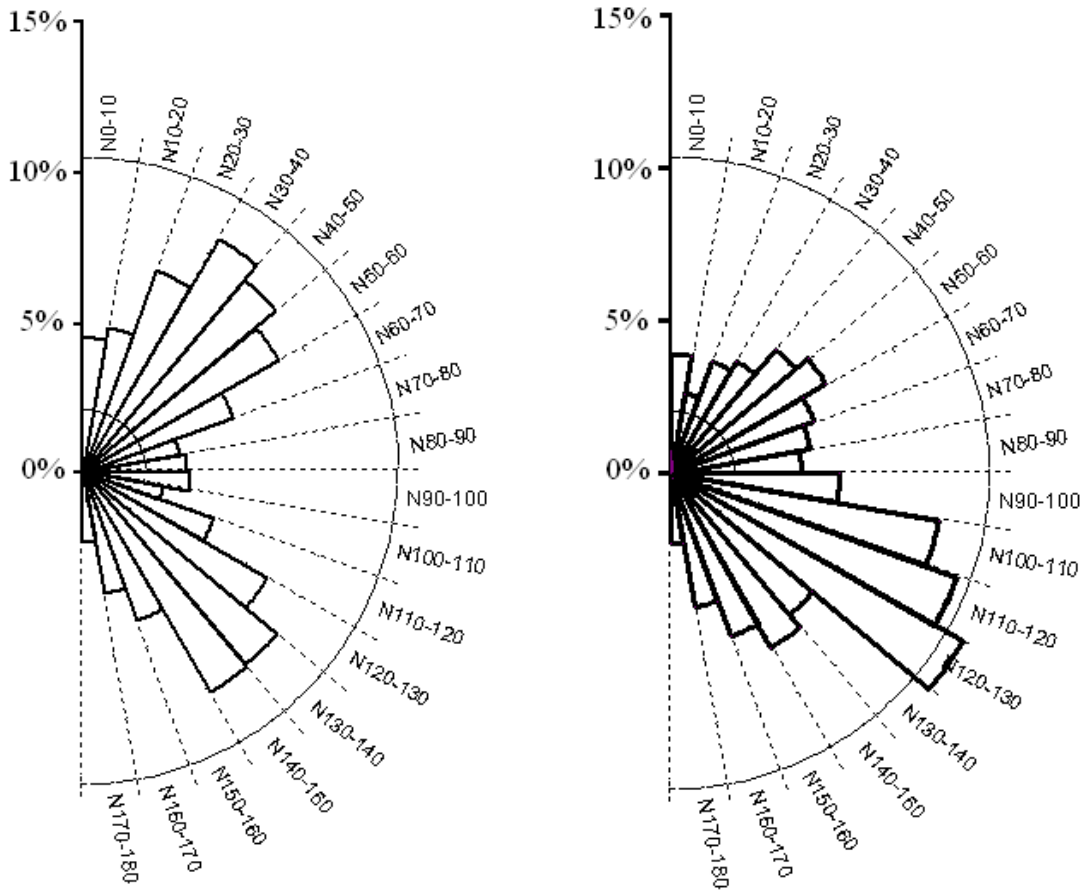
Les longueurs de fractures ont été ajustées aux modèles théoriques (exponentiel, log normal, gamma et puissance, etc.). Le test de conformité du Khi-2 qui consiste à calculer les fréquences théoriques et à les comparer aux fréquences expérimentales ou observées. S'il y a conformité entre les différentes fréquences, le test est positif à un seuil de signification. Dans le cadre de cette étude, ce test de conformité est négatif pour les trois premiers modèles au seuil de signification de 10 %. Cependant la loi de puissance donne des résultats satisfaisants. En effet, sur le graphe de la figure 10, nous distinguons une portion linéaire $\ell \geq 2{,}23\,\text{km}$ sur laquelle il est possible d'ajuster une loi de puissance. Cette loi de puissance est définie par l'expression (3) :

$$N(\ell) = 17022 \times \ell^{-2{,}98} \qquad (3)$$

avec : $R^2 = 0{,}96$ (R^2 étant calculé pour les $\ell \geq 2{,}23\,\text{km}$).

L'exposant caractéristique de la loi de puissance vaut ici $\alpha = 2{,}98$.

Pour les valeurs inférieures à 2,23 km, on s'éloigne très significativement de la droite linéaire théorique mettant en évidence les limites de résolution avec la rupture de pente.



a : Histogramme circulaire de la fracturation du secteur ouest (moitié ouest)

b : Histogramme circulaire de la fracturation de la carte photogéologique (Caldini et al., 1978)

Figure 9 : Comparaison des diagrammes de répartition de l'orientation des fractures tirés des images satellitaires (a) et de la carte photogéologique (b) du secteur ouest de la zone d'étude.

***Figure 9** : Comparison between the distribution diagrams of fractures directions extracted from the satellite images (a) and the photogeological map (b) in the western part of the study area.*

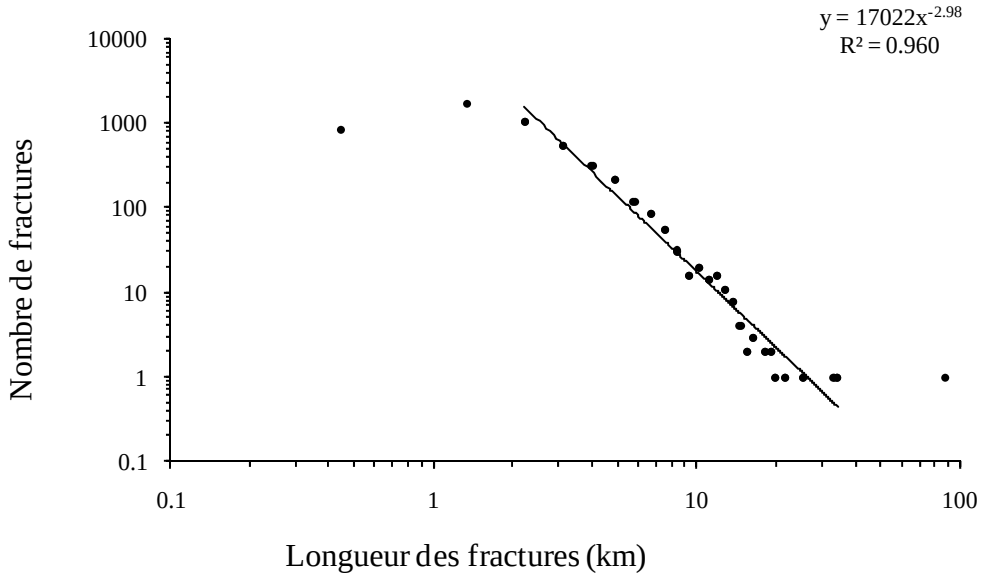


Figure 10 : Diagramme log-log de distribution des fréquences des longueurs des fractures. Ajustement à une loi de puissance.

***Figure 10** : Log-log diagram of the fault length frequency distribution : Fitting of a power law.*

4.2.2. Analyse géostatistique des réseaux de fractures

Plusieurs variogrammes expérimentaux ont été calculés. Il s'agit des variogrammes de la fracturation tous azimuts et des familles de fractures NE-SW et NW-SE (figures 11, 12 et 13). Sur les différents variogrammes, on note les caractéristiques suivantes : existence d'un palier « *C* », valeur autour de laquelle se stabilise le variogramme ; existence d'une portée « *a* », valeur à partir de laquelle le palier est atteint ; existence d'un effet de pépite plus ou moins marqué « C_0 », valeur de γ (*h*) quand *h* tend vers 0. L'effet de pépite représente la discontinuité à l'origine. Ces différentes caractéristiques permettent ainsi de montrer une bonne répartition spatiale de la fracturation. En d'autres termes, l'organisation spatiale de la fracturation, support de circulation des eaux souterraines dans la région de Bondoukou, n'est pas aléatoire. La densité de fracturation exprimée en longueurs cumulées s'apparente sans ambiguïté à une variable régionalisée.

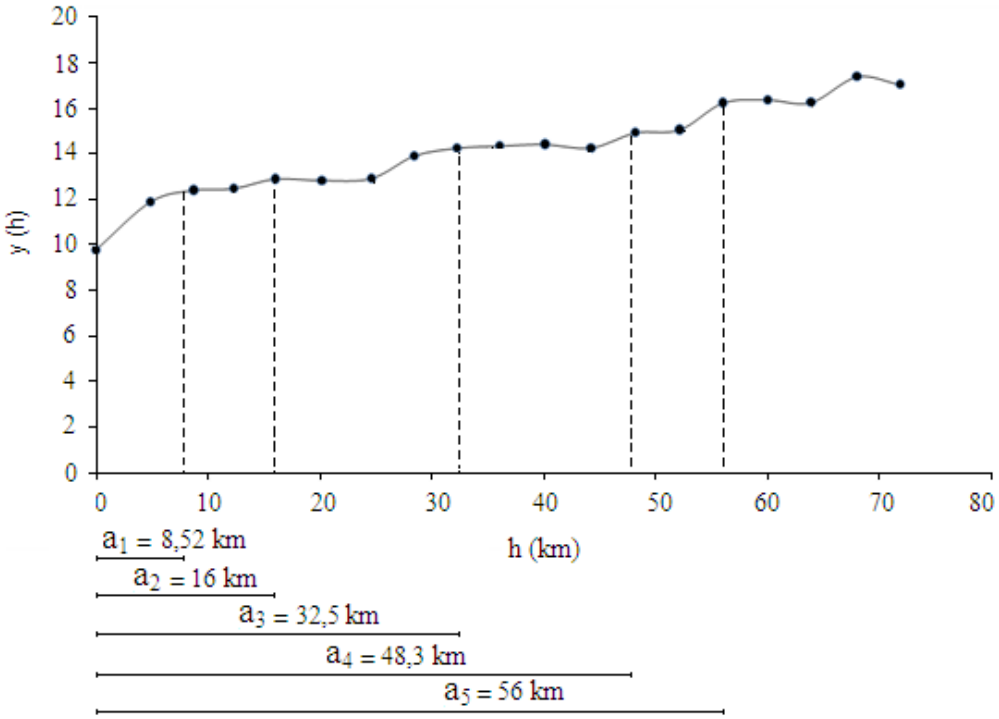


Figure 11 : Variogramme de la fracturation tous azimuts.
***Figure 11** : Variogram of the all fractures.*

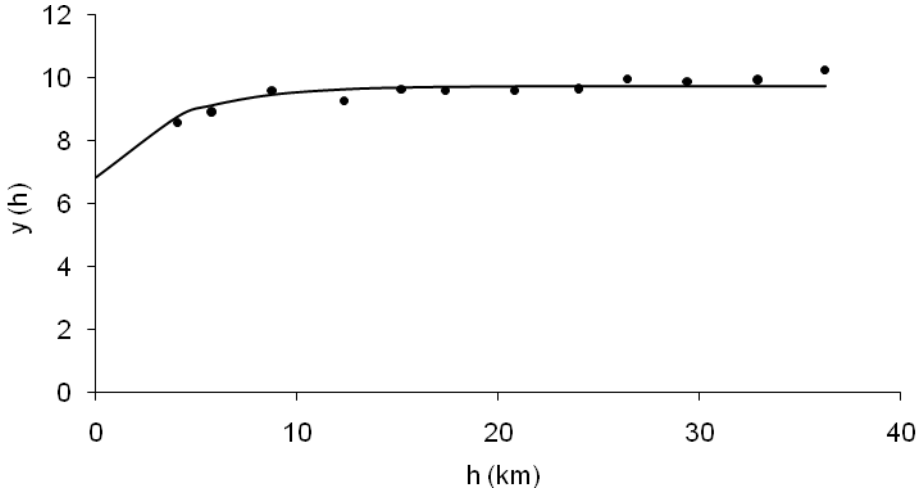


Figure 12 : Variogramme de la famille de fractures NE-SW.
***Figure 12** : Variogram of the NE-SW fractures*

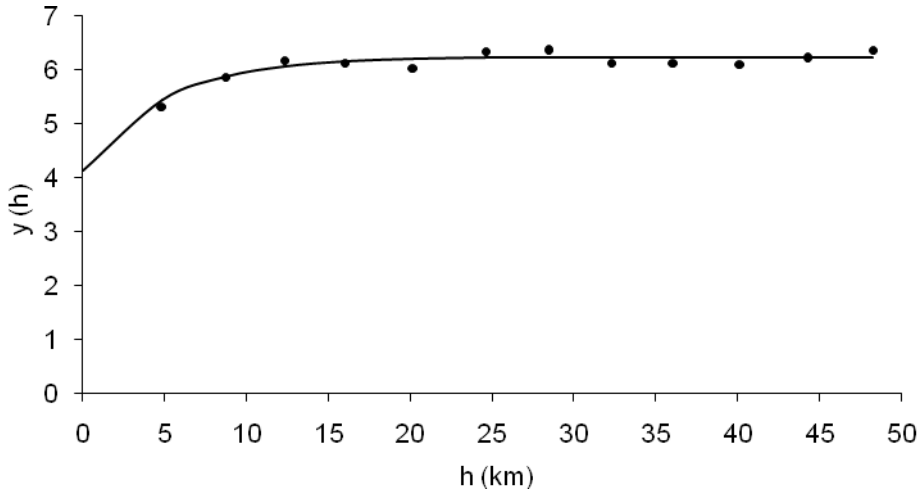


Figure 13 : Variogramme de la famille de fractures NW-SE.
***Figure 13** : Variogram of the NW-SE fractures.*

L'ajustement des variogrammes expérimentaux aux modèles théoriques (sphérique, exponentiel, gaussien, etc.) est une étape importante dans la détermination et l'interprétation des paramètres de régionalisation.

Le variogramme expérimental de la fracturation globale (tous azimuts) présente un comportement particulier caractérisé par plusieurs paliers (figure 11). Ceci peut être l'indication d'un emboîtement de plusieurs structures (structures gigognes) à plusieurs échelles différentes. La fracturation globale serait donc caractérisée par une multi-régionalisation ou une multi-structuration. Dans ce cas, le variogramme modélisé correspondrait à la somme des variogrammes élémentaires dont l'équation générale est donnée par l'expression (4).

$$\gamma(h) = \gamma_1(h) + \gamma_2(h) + \gamma_3(h) + \gamma_4(h) + \gamma_5(h) + ... + \gamma_n(h) \quad (4)$$

Les paramètres de régionalisation sont déterminés d'après le modèle exponentiel et l'expression générale du premier variogramme élémentaire est représentée par l'équation ci-dessous (5).

$$\gamma_1(h) = 9,75 + 2,85 \times \left[1 - \exp\left(\frac{-3h}{8,64}\right)\right] \quad (5)$$

L'effet de pépite représente 77,38 % de la dispersion totale au niveau de la fracturation tous azimuts, cette valeur est de 66,13 % et 70,15 % pour les familles de fractures NW-SE et NE-SW respectivement. D'une manière générale, la dispersion est très importante au niveau de ces variogrammes.

Le variogramme de la fracturation globale est multi-structuré avec six paliers bien distincts dont le dernier n'est pas complet. Cinq portées pratiques ont été déterminées respectivement à a_1 = 8,52 ; a_2 = 16 ; a_3 = 32,5 ; a_4 = 48,3 et a_5 = 56 km. La portée maximale du variogramme est donc de 56 km. La structuration des réseaux de fractures est donc importante. La distance de structuration des familles de fractures NE-SW et NW-SE est estimée respectivement à 11,1 et 14,92 km. Les équations de modélisation de ces variogrammes sont représentées par les expressions (6) et (7) ci-dessous :

$$\gamma_{NE-SW}(h) = 6,84 + 2,91 \times \left[1 - \exp\left(\frac{-3h}{11,1}\right)\right] \quad (6)$$

$$\gamma_{NW-SE}(h) = 4,12 + 2,11 \times \left[1 - \exp\left(\frac{-3h}{14,92}\right)\right] \quad (7)$$

Ces valeurs sont différentes d'un point de vue statistique indiquant que le comportement de la fracturation n'est pas identique dans les différentes directions de l'espace. Au-delà de cette distance, il y a une indépendance entre les différents points.

Ce résultat met en évidence la complexité des réseaux de fractures de la région de Bondoukou.

5. DISCUSSION

L'application des techniques de prétraitement et de traitement ont abouti au rehaussement radiométrique des images les rendant plus expressives et plus fines pour la cartographie structurale.

Plusieurs travaux (Savané, 1997 ; Kouamé, 1999 ; Jourda, 2005 ; Youan Ta, 2008) ont montré l'apport majeur des images ETM+ pour la reconnaissance des réservoirs discontinus. Ces images offrent une résolution aussi bien spectrale que spatiale appropriées pour une bonne étude hydrogéologique (Tweed et al., 2007 ; Brunner *et al.*, 2007 ; Leblanc *et al.*, 2007 ; Sander, 2007). Hoffmann et Sander (2007) ont présenté une analyse synthétique et critique de l'utilisation de l'imagerie satellitaire en hydrogéologie.

La carte détaillée des linéaments cartographiés par imagerie satellitaires comporte de nombreux accidents d'extension régionale. Ce sont les exemples des failles de Bilaodi (F1), de Bilikié (F2), etc. (figure 5). Ces accidents étaient mal connus car ils n'ont jamais été répertoriés ou signalés au cours des travaux antérieurs (Youan Ta, 2008). Rappelons que les études antérieures sur la fracturation n'étaient que très fragmentaires (Faillat, 1986 ; Lasm, 2000). L'accident de Bilaodi, orientée NW-SE bien visible sur les images satellitaires, correspond à la faille passant par le village portant le même nom. Cette faille a été partiellement cartographiée par la SODEMI (Zéade *et al.*, 1995) et ses limites restaient en deçà des limites réelles, sa taille était d'environ 32 km. En réalité, l'accident de Bilaodi se prolonge jusqu'au niveau des métasédiments au sud de la localité de Bondoukou et présentant une longueur d'environ 58 km.

Les résultats de cette étude sont en accord avec ceux obtenus en Côte d'Ivoire par Biémi (1922), Kouamé (1999) et Jourda (2005) respectivement dans la région de la Marahoué, de Man et de Korhogo. Ces auteurs ont utilisés les combinaisons d'images, ACP, analyses de texture et les filtres directions de dimension 7x7 pour produire des cartes détaillées de la fracturation. L'ensemble de ces techniques utilisées dans la région de Bondoukou a permis d'actualiser la carte de fracturation existante en mettant en évidence de nombreuses autres fractures qui n'étaient pas connues jusqu'alors.

L'analyse statistique des réseaux de fractures indique que les longueurs de fractures sont distribuées suivant une loi de puissance. L'exposant caractéristique de la loi de puissance α est égal à 2,98. Cette valeur est compatible avec les données de la littérature comprises généralement entre 1 et 3, qui peuvent varier d'un réseau de fractures à un autre comme l'attestent les travaux de Bodin et Razack (1999), Lasm (2000), Lasm et Razack (2001), de Dreuzy (2000) et Darcel (2002). L'exposant α fixe ainsi la proportion de grandes fractures ($\ell \geq 2{,}23\,\text{km}$) par rapport aux petites ($\ell < 2{,}23\,\text{km}$). Les variations de α définissent en particulier les différents stades de développement ou de maturité des réseaux fractures (Lasm, 2000 ; de Dreuzy, 2000, Darcel, 2002). La caractérisation d'une loi de puissance requiert un jeu de données sur un minimum de deux ou trois ordres de grandeur (Darcel, 2002). C'est bien le cas ici où les réseaux étudiés ont des tailles qui s'échelonnent sur 3 ordres de grandeur.

La longueur des fractures est généralement conditionnée par la taille de la fenêtre d'échantillonnage. En effet, à l'intérieur de cette fenêtre, il est possible de rencontrer des fractures tronquées (0 ou 1 extrémités observables) et des fractures non tronquées (2 extrémités observables). Ces biais se traduisent par la variabilité de la loi de distribution : log normale, exponentielle, gamma, puissance, etc. (Bodin et Razack, 1999 ; Lasm, 2000 ; de Dreuzy, 2000). Les résultats des travaux de simulations numériques et de données expérimentales sur la fracturation montrent que la distribution des longueurs peut évoluer au cours de la croissance du réseau et correspondre à une distribution exponentielle, log normale ou puissance (Darcel, 2002). Ceci pourrait donc expliquer en partie la variabilité de la loi de distribution des longueurs de fractures signalée dans la littérature (Dershowitz et Einstein, 1988 ; Bodin et Razack, 1999 ; Lasm, 2000).

Darcel (2002) signale que pour les réseaux naturels cartographiés en 2D, plusieurs études tendent vers une distribution en loi de puissance, bien que certaines soient plus en faveur d'une distribution exponentielle ou log normale. La loi de puissance apparaît comme un bon modèle pour représenter les distributions de longueurs d'un grand nombre de réseaux de fractures. Elle présente l'avantage de n'avoir pas de longueur caractéristique en dehors des limites physiques du système. La loi de puissance indique que les réseaux étudiés possèdent des propriétés d'auto-similarité (Bodin et Razack, 1999 ; Lasm 2000). Des résultats analogues ont été obtenus dans l'ouest de la Côte d'Ivoire où des études sur la fracturation ont été conduites par Lasm (2000) et Lasm et Razack (2001).

Cette loi de puissance souligne que les réseaux de fractures de la région de Bondoukou auraient atteint un stade de développement avancé. Pour certains auteurs (de Dreuzy, 2000 ; Darcel, 2002), tous les réseaux de fractures naturels au terme de leur développement devraient avoir des longueurs distribuées suivant une loi de de puissance, comme c'est le cas à Bondoukou.

L'analyse géostatistique des réseaux de fractures souligne que la fracturation étudiée se comporte comme une variable régionalisée. L'existence d'un palier au niveau du variogramme traduit un phénomène stationnaire d'ordre 2 (Razack, 1984). L'effet de pépite sur les variogrammes indique que la variable étudiée est très irrégulière. C'est un phénomène couramment rencontré dans l'analyse géostatistique des milieux fracturés (Massoud, 1988, Jalludin, 1993 ; Lasm *et al.*, 2004). L'effet de pépite est interprété comme l'action combinée des hétérogénéités spatiales à plus petite échelle et des incertitudes de mesures. Il est difficile sur un variogramme expérimental de séparer l'effet de pépite de l'erreur de mesure (Massoud, 1988 ; Lasm, 2000).

La multi-régionalisation de la fracturation globale caractérisée par l'emboîtement de plusieurs structurations témoigne de la complexité des systèmes de fractures dans la région de Bondoukou. Le variogramme de la famille de fractures NW-SE (figure 13) est mieux structuré que celui de la famille NE-SW (figure 12). Ce résultat implique que la fracturation dans cette partie du pays est anisotrope.

L'organisation spatiale des réseaux de fractures de Bondoukou est similaire à celle de la région de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire) comme l'attestent les travaux de Lasm (2000) et Lasm *et al.* (2004). Les régions de Bondoukou et de Man-Danané appartenant respectivement aux domaines Baoulé-Mossi et Archéen sont séparés par l'accident majeur du Sassandra. Cette faille aurait joué un rôle majeur dans l'isolement du noyau archéen de Côte d'Ivoire au cours de la tectonique éburnéenne (Camil, 1984). Ce résultat implique que ces deux régions ont subit des déformations similaires. Les analyses statistiques des réseaux de fractures de ces deux sites sont favorables à cette hypothèse puisque les coefficients α de 2,98 et 2,91, pour la fracturation de Bondoukou et de Man-Danané respectivement, sont similaires.

6. CONCLUSIONS

La télédétection constitue un puissant outil pour les recherches concernant la prospection des eaux souterraines. C'est une méthode d'investigation adaptée à la prospection hydrogéologique des milieux fracturés. Le traitement et l'analyse d'images Landsat 7 ETM+ a permis de cartographier les réseaux de fractures dans la région de Bondoukou, qui jusque là étaient mal connues. L'analyse par télédétection n'a cependant pas permis de préciser si les fractures identifiées étaient hydrauliquement actives, c'est-à-dire si ces fractures constituaient des réservoirs d'eaux souterraines. La carte de fracturation tirée de l'imagerie satellitaire doit nécessairement être couplée aux données hydrogéologiques à travers un SIG pour une meilleure exploitation des ressources en eau. Cette approche permettrait d'identifier avec plus de confiance les zones favorables à l'implantation des forages pour l'approvisionnement de l'eau potable des populations rurales, voire des grandes agglomérations.

Les réseaux de fractures s'échelonnent sur trois ordres de grandeur (0,233 km ; 88,980 km). L'analyse statistique de ces réseaux de fractures indique que les réseaux les fractures de la région de Bondoukou ont atteint un stade de développement avancé. L'analyse géostatistique de la fracturation a montré que les réseaux de fractures de la région de Bondoukou se comportent comme une variable régionalisée. La géométrie de ces réseaux dans l'espace ne se fait pas de manière aléatoire mais de manière structurée et organisée. Cette structuration n'est cependant pas isotrope.

Dans le futur, nous envisageons de coupler ces résultats aux données hydrodynamiques (débits, transmissivité, perméabilité, etc.) pour optimiser les études hydrogéologiques et réduire considérablement le taux d'échec lors de l'implantation des forages. Ceci devrait ensuite permettre d'aborder le problème des écoulements souterrains dans le système fracturé au travers d'une modélisation numérique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs voudraient remercier et témoigner leur reconnaissance aux instructeurs anonymes pour leurs critiques, commentaires et suggestions qui ont contribué à l'amélioration du présent document.

Références

Biémi, J. (1992) Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants sub-sahéliens 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* Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, 493 p.

Bodin J. & Razack M. (1999) L'analyse d'images appliquée au traitement automatique de champs de fractures. Propriétés géométriques et lois d'échelle. Bulletin de la Société Géologique de France, t. 170, n°. 4, p. 579-593.

Brunner P.; Hendricks Franssen H.-J; Kgotlhang L. Bauer-Gottwein P. et Kinzelbach W. (2007) How can remote sensing contribute in groundwater modeling?; Hydrogeology Journal, n°. 15, p. 5-18.

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).

Camil, J. (1984) Pétrographie, chronologie des ensembles granulitiques archéens et formations associées de la région de Man Côte d'Ivoire). Implication pour l'histoire géologique du craton Ouest-africain. Thèse de doctorat *ès* Sciences Naturelles, Université Abidjan, Côte d'Ivoire, 306 p.

Darcel C. (2002) Corrélation dans les réseaux de fractures : caractérisation et conséquences sur les propriétés hydrauliques. Thèse de doctorat, Université Rennes 1, Rennes, France, 223 p.

De Dreuzy J. R. (2000) Analyse des propriétés hydrauliques des réseaux de fractures, Université de Rennes. Thèse de doctorat, Université Rennes 1, Rennes, 101 p.

Delor, C. Siméon, Y. Vidal, M. Zeade, Z. Koné, Y. Adou, M. Dibouahi, Irié, D. B. Ya, B. D. N'da, D. Pouclet, A. Konan, G. Diaby, I. Chiron, J. C. Dommanget, A. Kouamelan, A. N. 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- Côte d'Ivoire.

Dershowitz W.S., Einstein H. H. (1988) Characterizing rock joint geometry with joint system models. Rock Mechanical & Rock Engineering, n°. 21, p. 21-51.

Djro S. C. (1998) Evolution tectono-métamorphiques des gneiss granulitiques archéens du secteur de Biankouma. *Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan - Cocody, Côte d'Ivoire, 171 p.*

Faillat J. P. (1986) Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest). *Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université du Languedoc-Montpellier II, France, 534 p.*

Himyari, S. M. Hoepffner, C. Benzakour, M. et Hadani, D. E. (2002) Etude structurale du haut atlas oriental Maroc) à l'aide de l'analyse linéamentaire des images HRV XS) de Spot. Télédétection, Vol. 02, n°4, p. 243-253.

Hoffmann J., Sander P. (2007) Remote sensing and GIS in hydrogeology. Hydrogeology journal n.° 15 ; p.1-3.

Isaaks E. H., Srivastava M. R. (1989) An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, New York, 561 p.

Jackson T J (2002) Remote sensing of soil moisture: implications for groundwater recharge. Hydrogeology journal n.° 10, p.40-51.

Jalludin M. (1993) Propriétés géométriques et hydrodynamiques des aquifères en milieux volcaniques fissurés sous climat aride. République de Djibouti. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 216 p.

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 ès Sciences Naturelles, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 429 p.

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 Korhogo (nord de la Côté d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation. Télédétection, vol. 5, n° 4, p. 339-357.

Kitanidis P. K., (2000) Introduction to Geostatistics. Application in Hydrogeology. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

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 de 3ème cycle, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 194 p.

Kouamé, K. F. Gioan, P., Biémi, J. et Affian, K. (1999) Méthode de cartographie des discontinuités-images satellitales : Exemple de la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire. Télédétection, Vol. 2, p.139-156.

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, p. 39-46.

Kouamélan, A. N. (1996) Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition Archéen-Protérozoïque. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 284 p.

Kresic N. (1994) Remote sensing of tectonic fabric controlling groundwater flow in Dinaric carst. In: Proceedings of the 10th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 9–12 May 1994, San Antonio, Texas, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, p. 161-167.

Krishnamurthy J., Venkatesa Kumar N., Jayaraman V. et Manivel M. (1996) An approach to demarcate ground water potential zones through remote sensing and geographic information systems. International Journal of remote Sensing 17 (10) p. 1867 - 1884

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 de doctorat, Université de Poitiers, 272 p.

Lasm, T. et 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, p. 225-232.

Lasm T**.,** Kouamé 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 Technologie 5, p. 135-154.

Leblanc M., Favreau G. Sarah T., Leduc C., Razack M., and Mofor L. (2007) Remote sensing for groundwater modelling in large semiarid areas: Lake Chad Basin, Africa. Hydrogeology journal, vol. 15, p. 97-100.

Lloyd J.W. (1999) Water resources of hard rock aquifers in arid and semi-arid zones. UNESCO, Paris.

Massoud H. (1988) Modélisation de la petite fracturation par les techniques de la géostatistique. Document B.R.G.M., p. 155- 197.

Razack M. (1984) Application des méthodes numériques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés en hydrogéologie. *Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles.* Université du Languedoc, Montpellier, France, 384 p.

Robin M. (1998) La Télédétection : Des satellites aux systèmes d'information géographiques. Fac Géographie, Univ. Nantes, France), 319 p.

Saley, M. B. (2003) Cartographie thématique des aquifères de fissures pour l'évaluation des ressources en eau. Mise en place d'une nouvelle méthode d'extraction des discontinuités images et d'un SIHRS pour la région semi-montagneuse de Man Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire), Thèse unique Université de Cocody-Abidjan, 209 p.

Sander P. (2007) Lineaments in groundwater exploration : a review of applications

and limitations, Hydrogeology Journal, n° 15, p. 71-74.

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). Apports de la télédétection et d'un Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale. Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan- Côte d'Ivoire, 386 p.

Savané I., Benié G. B., Hugh Gwyn J. Q., Biémi J. (1993) Application de la télédétection à la recherche des eaux souterraines en milieu cristallin : cas d'Odienné, Côte d'Ivoire. Télédétection des ressources en eau, Actes Journées Scientifiques, Tunis, p.111-120.

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., et 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.

Tweed S. O., Leblanc M. C., Webb J. A. and Lubczynski M. W. (2007) Remote sensing and GIS for mapping groundwater recharge and discharge areas in salinity prone catchments, southeastern Australia. Hydrogeology Journal, n°. 15, p. 75–96.

Yésou, H. Pion, J. C. Besnus, Y. et 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). III^{èmes} Journées Scientifiques du Réseau Télédétection 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.

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 doctorat unique, Université de Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire), 236 p.

Zeade, Z. Delor, C. Siméon, Y. Yao, B. D. Vidal, M. Sonnendrucker, P. Diaby, I. et Cautru, J. P. (1995) Carte Géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200000 ; Feuille Bondoukou, Mémoire de la Direction des Mines et de la Géologie Abidjan Côte d'Ivoire 1995 ; 10.