EXTRACTION DE LINÉAMENTS STRUCTURAUX À PARTIR D'IMAGES SATELLITAIRES, ET ESTIMATION DES BIAIS INDUITS, EN MILIEU DE SOCLE PRÉCAMBRIEN MÉTAMORPHISÉ

Théodore Koffi YAO*, Olivier FOUCHÉ-GROBLA*, Marie-Solange Yéi OGA, Vincent Tchimou ASSOMA

**Université de Cocody, LSTEE, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 22 BP 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire. +22505000107, koffiyao@ymail.com*
LEESU, École des Ponts ParisTech, Université Paris Est, 6-8 avenue Blaise Pascal, Cité Descartes Champs-sur-Marne, 77455, Marne-la-vallée cedex 2, France. +33140272427, olivier.fouche@cnam.fr
**Conservatoire national des Arts et Métiers, le Cnam, Département ICENER, Ingénierie de la construction*
Université de Cocody, LSTEE, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 22 BP 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire, oga_oms@yahoo.fr
Université de Cocody, CURAT, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 22 BP 801, Abidjan 22, Côte d'Ivoire, assoma.vce@gmail.com

Soumis le 8 janvier 2011; accepté le 10 mai 2011 - © *Revue Télédétection*, 2012, vol. 10, n° 4, p. 161-178

Résumé

La zone d'étude est située au sud-ouest de la Côte d'Ivoire en milieu plutonique et métamorphique précambrien. Pour mettre en évidence le réseau des fractures d'échelle kilométrique dans le socle, des techniques de télédétection ont été utilisées. Le traitement d'images satellitaires ETM+ de Landsat-7 et RADARSAT-1 a permis de générer une carte de linéaments qui a été par la suite validée en carte structurale sur la base des cartes géologiques et photogéologiques existantes et des connaissances de terrain. L'analyse statistique des fractures indique que leur longueur s'échelonne sur trois ordres de grandeur, avec une classe principale (69 %) présentant des longueurs comprises entre 0,3 km et 6 km. L'étude statistique des espacements entre les fractures a montré que le réseau de fractures présente un caractère poissonien. Sur cette base, une estimation du biais d'échantillonnage permet de calculer le nombre réel de fractures et la proportion des « petites » fractures dans le réseau réel. On met ainsi en évidence qu'environ 17 % des fractures ont été négligées lors de notre levé linéamentaire. Cette étude contribue à une meilleure estimation de la densité des fractures susceptibles de participer à l'écoulement souterrain dans la région de Soubré.

Mots clés : réseau de discontinuités, biais d'échantillonnage, loi gamma, processus de Poisson, Côte d'Ivoire.

EXTRACTION OF STRUCTURAL LINEAMENTS FROM SATELLITE IMAGES IN PRE-CAMBRIAN METAMORPHIC HARD-ROCKS AND EXTRACTION-INDUCED ESTIMATION BIAS.

Abstract

The study area is located southwest of Côte d'Ivoire in crystalline basement. In order to highlight and explore the fracture network in the bedrock, remote sensing and statistics were used. The processing of satellite images ETM+ of Landsat-7 and RADARSAT-1 has generated a map of lineaments which was subsequently validated as a structural map on the basis of existing geological and photogeological maps and field knowledge. Analysis of fractures indicates that their lengths extend over three orders of magnitude, with a main class (69%) between 0.3 km and 6 km. The statistical study of the spacing between consecutive fractures showed that the fracture network has a Poissonian character. An estimate of sampling bias allowed calculating the actual number of fractures and the proportion of small fractures in the real network. The result shows that approximately 17% of the real fractures were overlooked in our lineament mapping which contributes to a better estimate of the fracture density liable to be involved in groundwater flow at the regional scale.

Keywords: Fracture network, Sampling bias, Gamma law, Poisson process, Côte d'Ivoire.

1. INTRODUCTION

Dans certains pays, la quasi-totalité de l'eau potable se trouve en milieu de socle précambrien plutonique et métamorphique où la perméabilité résulte d'une part de la présence d'un réseau de fissures dans un horizon particulier du profil d'altération, et d'autre part d'un réseau de fractures d'origine tectonique. Cette perméabilité est très variable car elle dépend de la fréquence et de l'ouverture des fractures. La densité de fracturation tectonique est généralement plus forte au voisinage des grandes discontinuités du socle. C'est sur cette composante de la structure du socle que l'on se concentre dans cet article.

De nombreux travaux ont montré que les linéaments obtenus en interprétant des images satellitaires peuvent être assimilés à des discontinuités mécaniques qui jalonnent le substratum précambrien de la Côte d'Ivoire, que ce soit en milieu aride, semi aride ou encore en milieu humide (Kouamélan, 1996 ; Kouamé *et al.*, 1999 ; Jourda *et al.*, 2006 ; Youan Ta *et al.*, 2008), ce qui avait été démontré auparavant dans d'autres lithologies (Rudant *et al.*, 1994). Avec le recul, on peut affirmer que leur cartographie apporte une information spatialisée pertinente à l'amont des programmes d'hydraulique villageoise (Waters *et al.,* 1990 ; Greenbaum, 1992 ; Sander *et al.*, 1997 ; Kouamé, 1999).

Les espacements entre les linéaments rendent compte de la densité de la fracturation. Le nombre de linéaments cartographiés conditionne la modélisation de la distribution des espacements. Respectivement, en faisant une hypothèse sur la loi statistique des espacements du réseau de linéaments, on peut discuter/évaluer le biais qui a affecté le levé de ces linéaments. On parle de biais quand le procédé utilisé engendre une erreur systématique dans les résultats d'une étude, erreur qui appauvrit en particulier un intervalle dans la distribution empirique d'un paramètre. Par exemple, si l'on effectuait un sondage linéaire dans un réseau 2D de discontinuités (segments de droites), la probabilité plus faible de croiser des fractures plus courtes conduirait à sous-estimer leur poids dans l'histogramme du paramètre longueur qui s'en trouverait ainsi biaisé. Cette notion s'oppose à celle d'erreur équiprobable. À travers l'étude des lois de distribution statistique de la longueur et de l'espacement des linéaments, nous estimerons le biais dans le levé effectué i.e. le nombre de « petits » linéaments (1 à 3 km de long) non détectés par l'opérateur dans les images satellitaires.

Nous donnons d'abord des informations générales sur la zone d'étude, suivies de l'exposé de la méthodologie adoptée pour l'extraction des linéaments ; puis nous présentons le principal résultat qui est une carte structurale complètement nouvelle par rapport aux documents qui préexistent. Nous considérons cette carte comme un prélèvement le plus exhaustif possible dans un réseau réel inconnu qui est supposé obéir à un modèle stochastique, poissonien ou fractal, constitué de familles directionnelles. Les familles trouvées dans cette carte sont comparées aux familles connues en géologie structurale dans la région. Enfin, la comparaison de cette carte avec un modèle choisi permet d'estimer le biais de prélèvement et de critiquer la méthode.

2. CADRE DE L'ÉTUDE

Le secteur d'étude est situé au sud-ouest de la Côte d'Ivoire, entre les latitudes 5°19 et 6°34 Nord et les longitudes 6°12 et 7°08 Ouest (figure 1). Il bénéficie d'un climat chaud et humide (précipitation annuelle moyenne de 1500 mm) et de conditions favorables à l'agriculture (cultures de rente et vivrières). La plus grande partie de la zone d'étude est située dans la partie avale du bassin versant du Sassandra, fleuve dont le débit (moyenne annuelle) est estimé à 310 $m^3.s^{-1}$ à Soubré et à 500 $m^3.s^{-1}$ à l'embouchure, dans le golfe de Guinée (Yao, 2009). Le relief est fait de plaines et de bas plateaux occupés par la forêt sempervirente et semi-décidue. Les principales formations géologiques appartiennent au domaine éburnéen (2 500 à 1 550 Ma). Sur la carte géologique (figure 2) les formations sont caractérisées au sud-est de la faille majeure par une grande diversité de massifs plutoniques dans un encaissant métamorphique (gneiss, migmatites) et au nord-ouest par une vaste unité de séquence supracrustale dite unité Hana-Lobo, bassin dont la lithologie de type flysch s'est transformée en chloritoschistes sous l'influence des métamorphismes birimiens (Papon et Lemarchand, 1973).

Plusieurs phases de déformation ont affecté cette région occasionnant ainsi une fracturation intense.

Dans le compartiment nord-ouest, deux événements tectoniques distincts sont reconnaissables dans la structuration de l'unité Hana-Lobo (Rompel *et al*., 1988). Il s'agit de phases de compression NO-SE (D1) avec un plissement isoclinal précoce d'axe SO-NE, suivi de la création d'une schistosité orientée SSO-NNE en jeu senestre. Après rotation du système de contrainte passé en compression O-E a commencé la deuxième phase de déformation (D2), avec ouverture de filons de quartz de direction O-E disséminés dans presque toutes les roches de la ceinture birimienne. Cette phase D2 s'accompagne d'un cisaillement dextre suivant la direction SSO-NNE. Des fentes sont observées dans les formations méta-sédimentaires et volcano-sédimentaires, organisées en échelons de direction régionale SSO-NNE à N-S. On note également une série de failles NO-SE qui tronçonnent les intrusions de granites à deux micas, les schistes et métasédiments (Geomines, 1982).

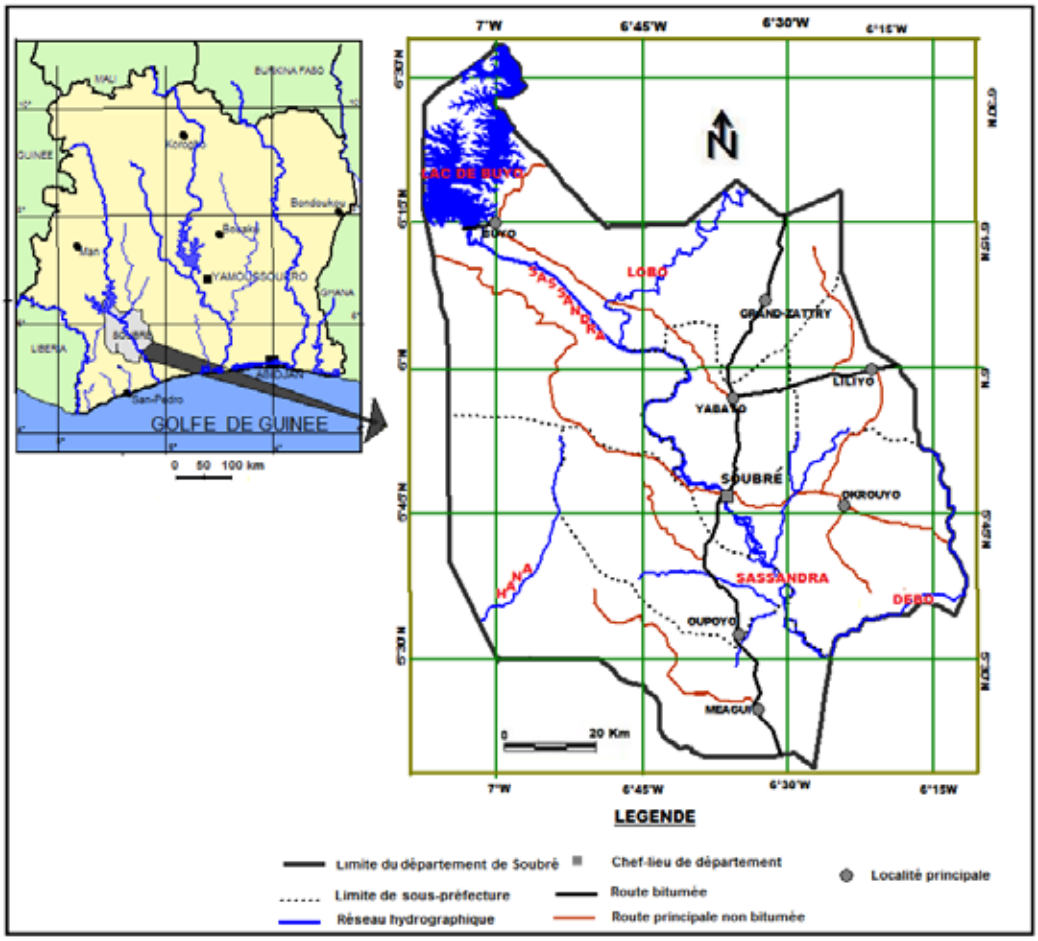


Figure 1. Localisation de la zone d'étude
Location of the study area

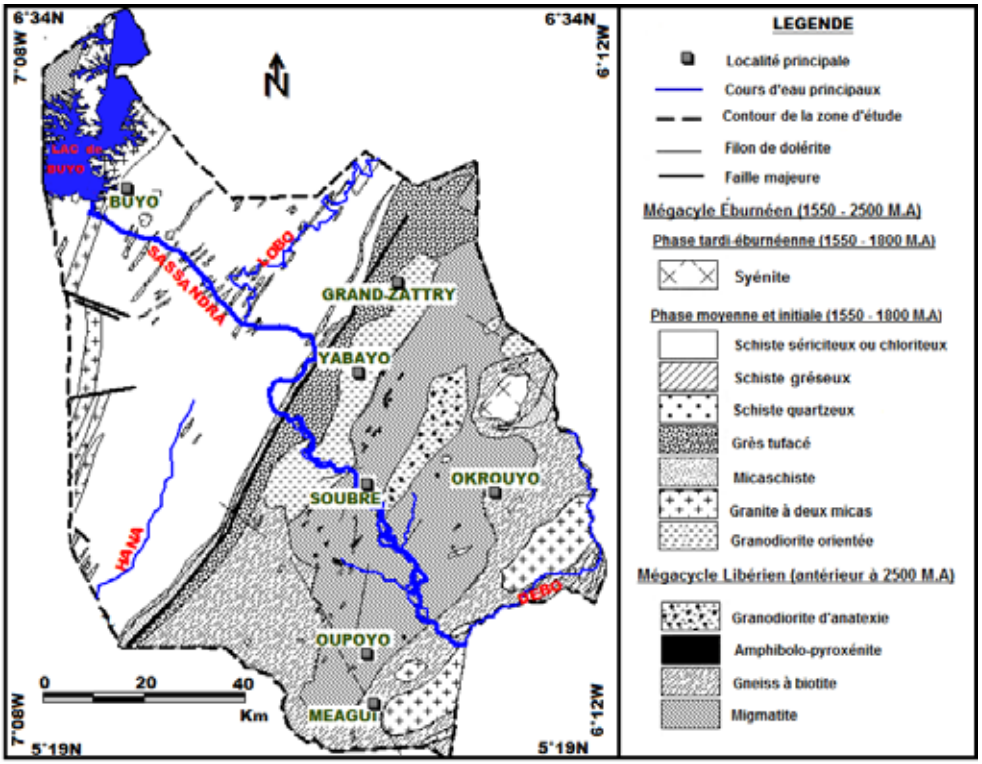


Figure 2. Carte géologique simplifiée du département de Soubré
Simplified geological map of the Soubré area

Dans le compartiment sud-est, quelques failles secondaires de longueur maximale 15 km et orientées le plus souvent NO-SE, marquées par des mylonites, sont dispersées dans les granodiorites et les migmatites. La présence de dykes doléritiques NO-SE est aussi signalée (Knopf, 1967). Cependant, dans l'unité sud-est, les fractures s'orientent majoritairement selon trois directions principales : SSO-NNE, SO-NE et N-S. Les failles de direction SO-NE traversent la partie nord-ouest du compartiment sud-est sur une distance d'environ 65 km.

Sur le plan hydrogéologique, on rencontre dans la région trois types de réservoirs qui se superposent. En surface se localise le réservoir d'altérites, argilo-sableux, d'épaisseur variable et de faible perméabilité (10^{-6} à 10^{-5} $m.s^{-1}$), avec un coefficient d'emmagasinement de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-1} et une transmissivité de 10^{-5} à 10^{-4} $m^2.s^{-1}$. L'extraction de l'eau est difficile dans ce niveau (Faillat et Blavoux, 1989). Le réservoir de fissures, qui est une autre composante du profil d'altération, situé juste en-dessous, est beaucoup plus perméable et drainé par les cours d'eau. Ces deux premiers réservoirs fonctionnent comme un aquifère composite (Dewandel *et al*., 2006) sous lequel on trouve le troisième réservoir de fractures d'origine tectonique qui est l'objet étudié ici.

3. DONNÉES ET MATÉRIEL

La cartographie des linéaments a nécessité la prise en compte de données constituées d'images satellitaires (données numériques de télédétection) et de cartes topographiques. Les données cartographiques comprennent en outre la carte géologique de Papon et Lemarchand (1973) à l'échelle 1/500 000 et la carte structurale de la Côte d'Ivoire issue des travaux de Biémi (1992).

Les données de télédétection utilisées sont composées de trois scènes ETM+ de Landsat-7 (198-56 de janvier 2001, 197-56 de février 2001 et 198-55 de février 2003) acquises en saison sèche, couvrant tout le département de Soubré. Chaque scène est composée de sept bandes spectrales de 30 m de résolution. Seule la bande ETM + 6 de résolution 60 m a été ré-échantillonnée pour la rendre superposable aux autres. Ces images optiques, bien qu'elles permettent de caractériser l'état de la surface du sol, ne satisfont pas toujours à une observation optimale en milieu tropical humide en raison du fort couvert nuageux et végétal. Pour s'affranchir de ces contraintes, ce travail a nécessité l'usage complémentaire des images RSO (radar à synthèse d'ouverture) de RADARSAT-1. Elles sont sensibles à la topographie, à la rugosité du terrain, à l'humidité de surface, et elles pénètrent la végétation et les premiers centimètres de la couverture pédologique. Ces images sont reconnues comme ayant un grand potentiel pour les applications géologiques en général et pour la cartographie structurale en particulier (Desjardins *et al.*, 2000).

Le traitement numérique des images a été réalisé à l'aide du logiciel ENVI 4.3 et d'ARCVIEW 3.2. Le traitement statistique du réseau de fractures a été réalisé à l'aide du logiciel STATISTICA qui a permis de tester différentes lois de distribution sur les paramètres longueur et espacement.

4. MÉTHODOLOGIE

4.1. Exploitation des images de télédétection

4.1.1 Traitement des images ETM+ de Landsat-7

Les linéaments représentent des objets géologiques linéaires ou des alignements d'objets géologiques suffisamment proches, des discontinuités topographiques ou des structures géomorphologiques héritées d'anciennes topographies. La méthodologie du traitement des images satellitaires optiques et de l'extraction des linéaments est une synthèse des travaux de Kouamé *et al*. (1999), Gronayes *et al.* (2003), Jourda *et al.* (2006), et Youan Ta *et al.* (2008). Une phase préliminaire au traitement des images ETM+ a consisté en la création d'une mosaïque des trois scènes préalablement corrigées (points de calage relevés sur les bandes ETM+). Puis, on a effectué un traitement numérique de l'image du département de Soubré, extraite de la mosaïque des trois scènes ETM+. Cela inclut des traitements spécifiques (amélioration des contrastes, Analyse en Composantes Principales) et des combinaisons de bandes et filtrages directionnels favorisant l'identification des linéaments.

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une transformation mathématique qui consiste à calculer les valeurs et vecteurs propres de la matrice de variance-covariance calculée à partir d'une série d'images, puis les composantes principales du compte numérique des bandes multispectrales (Bonn et Rochon, 1992). L'ACP a été effectuée sur les sept bandes originales ETM+ de Landsat-7 de l'image de Soubré qui a ainsi généré des néo-canaux (composantes principales). Les trois premières composantes contiennent un pourcentage élevé de la variance totale (tableau 1). Ce tableau montre une forte corrélation des bandes du visible (1, 2 et 3) avec des coefficients de 0,9. Il existe également une corrélation de l'ordre de 0,7 dans celles de l'infrarouge. L'utilisation conjointe de ces canaux donne des informations redondantes, car ils renferment des données communes. L'ACP a permis de faire ressortir l'information contenue dans ces images multispectrales en éliminant la redondance des données : les géostructures linéaires sont mieux visibles sur la première composante principale (*principal component* 1 ou PC1) que sur l'image multispectrale.

Certains détails contenus dans les images obtenues ont pu être ensuite rehaussés grâce à l'application de la technique de combinaison d'images au moyen d'opérations mathématiques simples qui permettent de générer des rapports de bandes (PC1 / ETM+7) et des indices normalisés (ETM+6 – ETM+4) / (ETM+6 + ETM+4).

L'application du filtre passe haut (Laplacien modifié), des filtres directionnels 7x7 de type Sobel et enfin du filtre gradient de Yésou *et al.* (1993) aux bandes ETM+7, ETM+4 et PC1 permet de rehausser encore mieux les discontinuités-images correspondant à des linéaments structuraux. Le tableau 2 présente les différents filtres utilisés au cours de cette étude.

Tableau 1. Matrice de corrélation des bandes ETM+ de Landsat du département de Soubré
Correlation matrix of the Landsat ETM+ bands of the Soubré department

Bandes ETM+	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
1	1,00						
2	0,96	1,00					
3	0,95	0,95	1,00				
4	0,88	0,87	0,79	1,00			
5	0,87	0,91	0,93	0,86	1,00		
6	0,66	0,66	0,64	0,58	0,66	1,00	
7	0,78	0,79	0,91	0,74	0,88	0,75	1,00

Tableau 2. Matrices des filtres appliqués
Matrices of the applied filters

0	0	-1	0	0
0	-1	-2	-1	0
-1	-2	16	-2	-1
0	-1	-2	-1	0
0	0	-1	0	0

Filtre non directionnel Laplacien modifié 5 x 5

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

Sobel N-S

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

Sobel E-O

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

Sobel NE-SO

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

Sobel NO-SE

1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
0	0	3	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

Yésou et *al.* (1993)

4.1.2. Traitement de l'image RADARSAT-1

Le traitement préliminaire effectué sur l'image RSO de RADARSAT-1 a consisté à réduire le chatoiement à l'aide des filtres adaptatifs de Gamma, Lee et Frost améliorés (Lopes *et al.*, 1990). On a sélectionné les images où la lisibilité des structures géologiques a été améliorée tout en préservant les hautes fréquences. On a procédé ensuite à une rectification géométrique (redressement de l'image) et au fenêtrage du secteur étudié. L'analyse de texture a alors conduit à une redistribution des niveaux de gris dans l'image par regroupement des pixels en zones homogènes. La méthode d'analyse

de texture appliquée utilise la matrice de co-occurrence des niveaux de gris développée par Haralick *et al.* (1973). Différents paramètres de texture ont été calculés : homogénéité, contraste, moyenne et variance. On a alors retenu comme pertinents les paramètres texturaux qui rehaussent visiblement les linéaments.

Le milieu d'étude étant complexe (zone de socle en milieu tropical humide à couverture végétale importante), l'utilisation des filtres spatiaux directionnels et de gradients s'est avérée nécessaire. La convolution des filtres directionnels de Sobel sur les paramètres texturaux « variance » et « moyenne » a permis d'obtenir des images des structures claires et sombres (Kouamé *et al.*, 2009). Les discontinuités géologiques selon les directions E-O et N-S sont ressorties par l'application des matrices (7x7) des filtres de Sobel. La taille du filtre a une incidence sur la longueur des linéaments rehaussés. La matrice 7x7 a été choisie car elle permet d'identifier le mieux les principaux linéaments antérieurement connus de la zone d'étude (en particulier ceux de direction SO-NE), dont les orientations sont comparables aux accidents majeurs et aux grands couloirs de cisaillement mis en évidence par la plupart des travaux de cartographie linéamentaire réalisés en Côte d'Ivoire.

En revanche, ces différents traitements ont eu également pour effet d'homogénéiser tout l'espace d'étude, quelle que soit la formation géologique et la lithologie, dont les contrastes déjà faibles au départ sont finalement gommés.

4.1.3. Extraction des linéaments et validation

L'extraction des linéaments a été réalisée d'une part sur les bandes initiales et transformées (filtrées ou issues de l'ACP) et d'autre part sur l'image radar traitée. Les traitements et filtrages ont eu pour effet d'accentuer et de faciliter la détection des discontinuités-images, permettant ainsi leur levé par simple observation visuelle. Seuls les linéaments d'origine structurale ont un intérêt dans cette étude. Aussi, par synthèse d'informations à travers un SIG, les linéarités d'origine anthropique préalablement vectorisées (routes bitumées, pistes, ligne de haute tension, layons de délimitation de forêt et surfaces cultivées…) ont été identifiées dans l'ensemble des linéaments et éliminées.

Les linéaments géologiques et structuraux relevés au cours des travaux antérieurs de cartographie (Papon et Lemarchand, 1973 ; Rompel *et al*., 1988 ; Biémi, 1992), peu nombreux mais fondés sur des photographies aériennes et des observations de terrain donc considérés comme avérés, ont été retrouvés dans notre réseau de linéaments. Cette capacité de la méthode, fondée sur l'interprétation des images satellitaires, à retrouver des fractures réelles déjà connues, et pas seulement parmi les plus grandes, valide notre méthode d'extraction. Cette validation nous conduit ensuite par extrapolation à accorder une valeur structurale à l'ensemble de nos linéaments et à passer de l'usage du terme de linéament à celui de fracture.

Ce travail sur les images satellitaires fournit finalement une carte structurale nouvelle et beaucoup plus riche de la région de Soubré, dans laquelle on a pu introduire par erreur ou négliger quelques fractures, notamment parmi les plus petites (longueur de quelques kilomètres) à l'échelle d'observation des images.

4.2. Caractérisation statistique de la géométrie des linéaments

L'analyse géométrique du réseau des linéaments est indispensable pour décrire la structure d'un bassin versant. Les paramètres géométriques étudiés dans ce travail sont l'orientation et la longueur des fractures, ainsi que l'espacement entre les fractures. L'espacement est défini comme la distance séparant deux fractures intersectées successivement le long d'une ligne d'échantillonnage, quelle que soit la famille d'orientation à laquelle elles appartiennent.

L'analyse statistique de l'orientation des linéaments formant le réseau permet d'en dégager les directions dominantes. La méthode conventionnelle consiste à produire une rosace directionnelle dont les pétales sont proportionnels à la longueur cumulative des linéaments. La distribution des longueurs et des espacements est ici ajustée par plusieurs modèles statistiques, exponentiel, gamma, log-normal, et puissance, puis testée suivant les tests du khi2 et de Kolmogorov-Smirnov.

On détaille ici la loi puissance à titre d'exemple. En reportant dans un diagramme bi-logarithmique l'histogramme de fréquence du paramètre, si les points s'alignent suivant une droite de pente p, la distribution suit alors une loi de puissance d'équation : $n(x) = a \cdot x^{-p}$ où :

- x : centre de classe de la variable, par exemple la longueur des fractures ;
- n : fréquence de classe ;
- a : coefficient réel à ajuster ;
- p : exposant réel à ajuster, caractéristique de la loi puissance.

L'intensité de la fracturation peut s'exprimer de façon moyenne, en longueur cumulée des traces de fractures rapportée à l'aire de la fenêtre d'observation, mais elle est mieux décrite par la distribution des espacements entre fractures. L'acquisition du paramètre espacement a été faite au moyen d'une ligne d'échantillonnage de position aléatoire et d'orientation choisie tous les 10° dans l'intervalle [0 ; 180], d'une part sur les fractures majeures (longueur supérieure ou égale à 9 km), et d'autre part dans la totalité du champ de fractures (Yao *et al*, 2010). Cette technique d'acquisition

avec 18 droites donne une bonne estimation de la distribution de l'espacement même si elle est légèrement biaisée, comparée à un système d'échantillonnage isotrope et uniforme qui serait constitué de droites en grand nombre. Le poids de ce biais d'échantillonnage à l'aval est de second ordre comparé au biais de prélèvement à la source, lors du levé sur l'image.

S'il s'avère que la distribution des espacements entre les objets (ici les linéaments) suit une loi exponentielle négative, cela signifiera que le réseau d'objets obéit à un processus de Poisson. En théorie des probabilités, la loi de Poisson est une loi de probabilité discrète qui décrit le comportement du nombre d'évènements ou d'objets qui se produisent dans un laps de temps ou d'espace fixé, si ces évènements se produisent avec une fréquence moyenne connue et indépendamment de la distance de l'objet précédent (ou du temps écoulé depuis l'évènement précédent). De plus, si des événements ont été manqués lors de l'enregistrement, on obtiendra sous l'hypothèse Poisson une loi gamma (à la place d'une exponentielle) qui traduira le biais de prélèvement. Au contraire d'un processus fractal, le processus de Poisson ne présente pas la propriété d'autosimilarité à différentes échelles. Un processus fractal est caractérisé par la loi puissance pour les paramètres qui définissent le réseau, longueur et densité en particulier. Un cas extrême de processus fractal est représenté par la loi log-normale. On reviendra sur cette classification des processus dans la discussion.

5. RÉSULTATS

5.1 Cartographie des alignements morpho-structuraux ou linéaments

Le recours à deux types d'images (optique et radar) conduit à de nombreux résultats intermédiaires lors de la cartographie des linéaments. Nous présentons l'essentiel de ces résultats.

5.1.1. Réduction du chatoiement et analyse de texture de l'image radar

Plus on augmente la taille des filtres adaptatifs, plus on réduit le chatoiement dans les images RSO et plus l'image devient claire. En conséquence, une taille de filtre trop grande entraine un lissage trop important. Des trois filtres utilisés, celui de Frost (7x7) a été retenu car il améliore la visibilité de l'image (figure 3) en faisant ressortir des zones contrastées. Ce filtre préserve mieux les hautes fréquences associées aux discontinuités-images, comparativement au filtre Gamma. L'image issue du filtrage de Frost amélioré a été retenue pour l'analyse texturale et l'application des filtres directionnels. L'analyse de texture a permis de produire des néo-canaux (paramètres de texture « moyenne » et « variance ») qui font ressortir les linéaments de la zone d'étude sur les données RSO modifiées (figure 4).

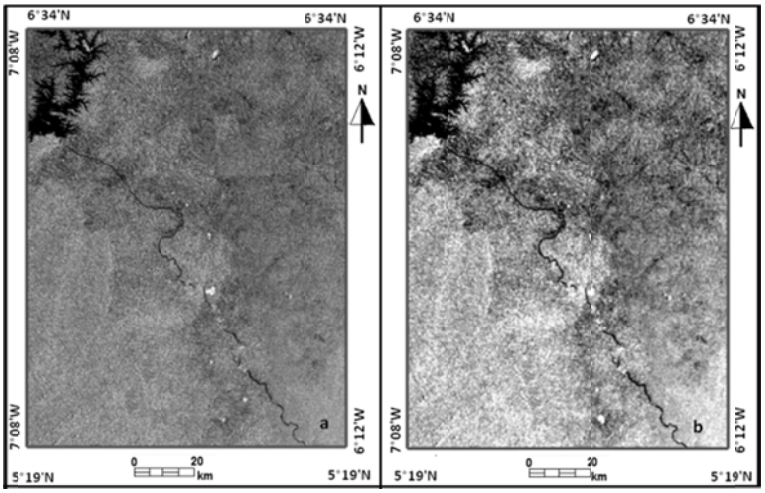


Figure 3. Réduction de chatoiement dans l'image RSO de RADARSAT-1 :
a) Image brute RSO de RADARSAT-1, b) Image RSO de RADARSAT-1 améliorée à l'aide du filtre Frost (7x7)
Speckle reduction in SAR imagery from RADARSAT-1:
a) Raw SAR imagery RADARSAT-1, b) SAR image from RADARSAT-1 enhanced using Frost filter (7x7)

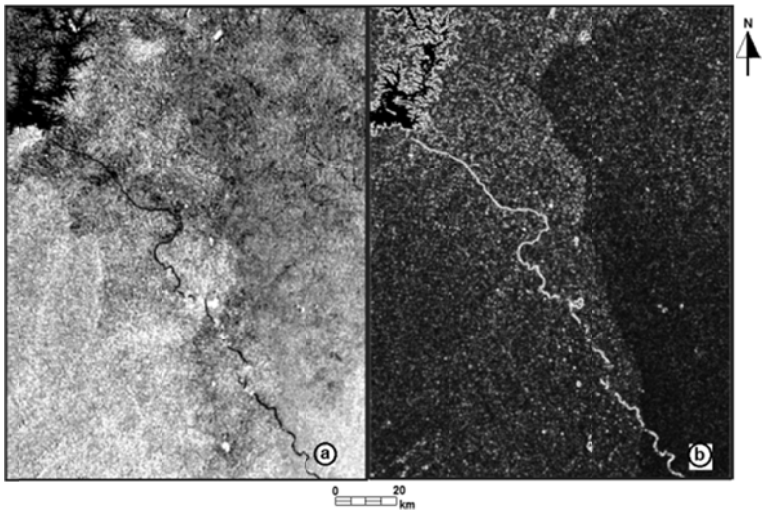


Figure 4. Paramètres de texture préservant les linéaments et les morphostructures dans l'image RADARSAT-1 : a) Paramètre « moyenne », b) paramètre « variance »
Textural parameters preserving the lineaments and morphostructures in RADARSAT-1 image: a) parameter "average", b) parameter "variance"

5.1.2. Application des filtres directionnels et extraction des linéaments

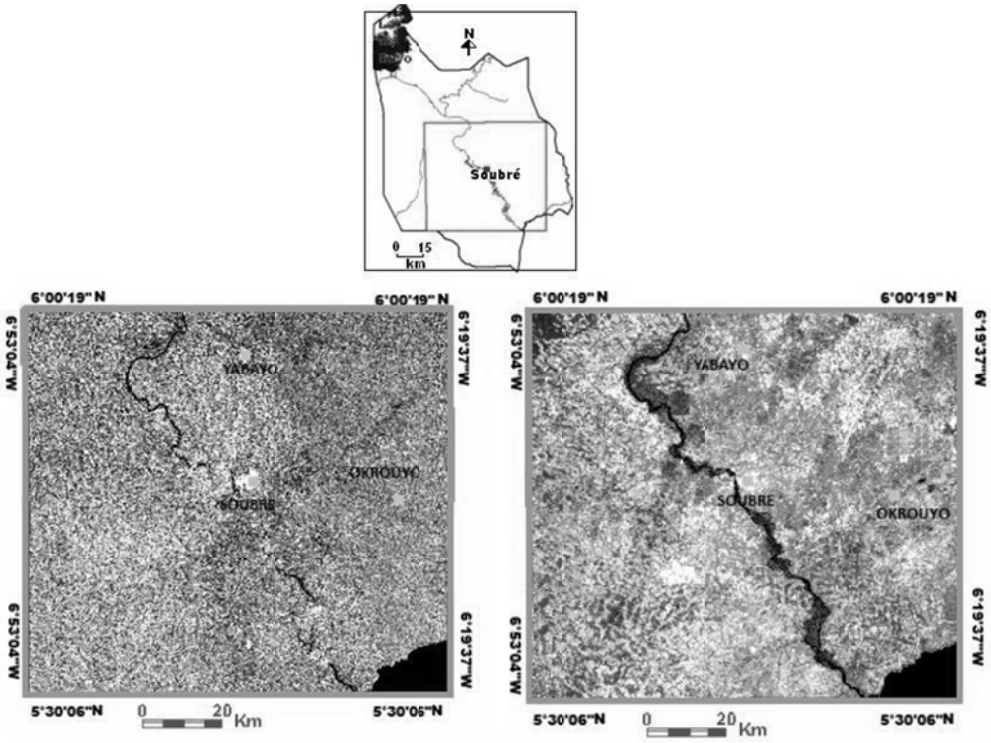


Figure 5. Fenêtre montrant une partie des images utilisées pour l'application des filtres : a) image radar prétraitée, b) image PC1 de ETM+
Some of the images used for the application of filters: a) pretreated radar image, b) PC1 image of ETM+

L'application des filtres spatiaux, notamment ceux de Sobel et de gradient (7x7) sur les canaux 4, 6 et 7 de l'image ETM+ traitée, la PC1 et l'image RADARSAT-1 améliorée, met en évidence de nombreuses discontinuités-images. La figure 5 présente le résultat des filtrages effectués et l'extraction de linéaments sur un extrait de la zone d'étude. Les filtres de Sobel ont la particularité de rehausser les linéaments perpendiculaires à leur direction de convolution (figures 6a, 6b et 6c). Ainsi, le filtre Sobel de direction N-S accentue les discontinuités structurales de direction E-O, et aussi NE-SO. Le filtre Sobel de direction NE-SO accentue les accidents de direction NO-SE et secondairement E-O. Le filtre gradient de Yésou *et al*. (1993) fait ressortir les directions N-S et NO-SE.

Sur les images radar, la convolution des filtres directionnels de Sobel sur le paramètre textural « moyenne » (figure 4a) a permis d'obtenir des images des structures claires et sombres. Les hautes fréquences sont détectées à partir du filtrage.

Ainsi, une extraction des linéaments a été réalisée grâce à une interprétation des images dérivées de différentes techniques de traitement pratiquées sur les deux types d'images. La carte des linéaments est la synthèse des linéaments extraits des différentes images.

5.1.3. Carte des linéaments et orientations dominantes

La première composante (PC1) représente 94,6 % de la variance exprimée, donc une information structurale proche de celles des canaux initiaux. On y distingue facilement (figure 5b) les linéaments représentatifs de la structure régionale et ceux associés au réseau hydrographique. Les filtres directionnels ont permis en particulier de retrouver les failles de la carte géologique de Papon et Lemarchand (1973). Elles appartiennent à la famille d'accidents qui a affecté le socle archéen de tout l'Ouest de la Côte d'Ivoire (Camil, 1984). Les linéaments ont été assimilés après validation à des fractures d'origine tectonique ; c'est le cas de la faille crustale de Hana-Lobo et de quelques autres failles connues par les travaux géologiques antérieurs. Dans la suite de notre réflexion, le champ de linéaments obtenu (figure 7) sera considéré comme représentatif de la fracturation de la zone étudiée.

La rosace directionnelle indique une prépondérance des fractures de direction N90-N100 suivie respectivement des directions N80-N90 et N100-N110. Ces directions majeures peuvent être regroupées en une seule famille N90-N110. D'autres fractures se démarquent, il s'agit d'une famille N50-N70 et d'une famille subméridienne (N0 à N10 ou N170 à N180).

Les directions N150-N160 et N20-N30 qui ont des fréquences inférieures à 5 % sont moins significatives. Ces orientations semblent traduire un bruit de fond qui résulte de la variabilité de chaque famille mais aussi des contacts géologiques qui peuvent être confondus avec des fractures.

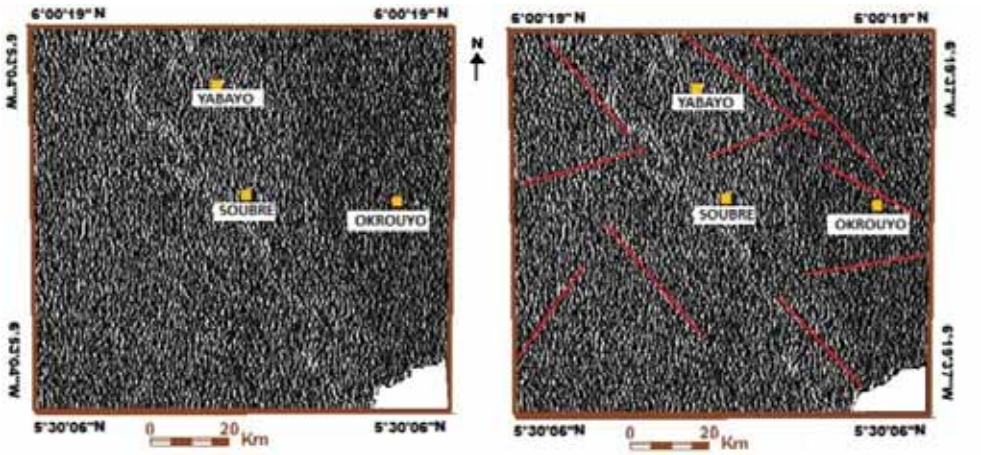


Figure 6a. Filtrage directionnel Sobel (N-S) et extraction de quelques linéaments (image RSO RADARSAT-1)
Directional Sobel filter (NS) and extraction of some lineaments (RADARSAT-1 SAR image)

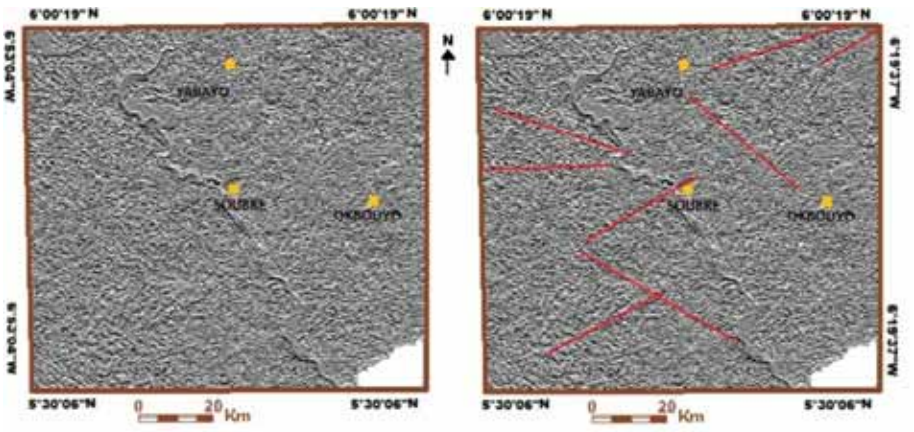


Figure 6b. Image PC1 traitée par filtrage Sobel dans la direction NE-S0 et extraction de quelques linéaments
PC1 image processed by Sobel filtering in the direction NE-SW and some lineament extraction

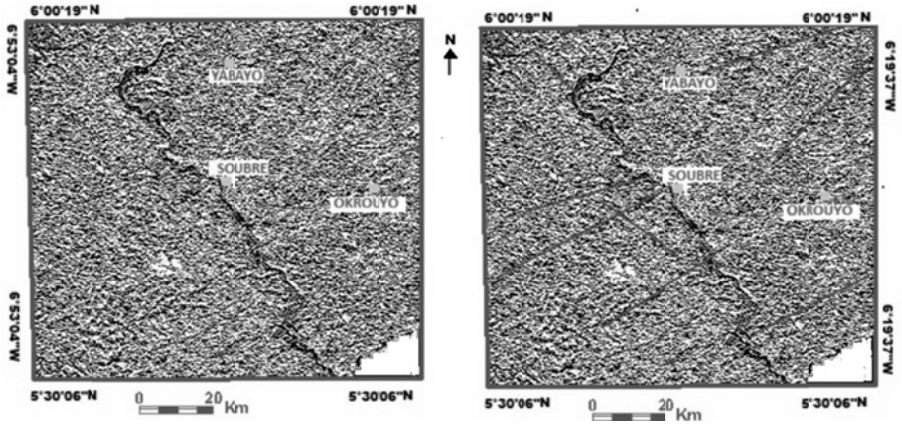


Figure 6c. Linéaments rehaussés par le filtrage de Yesou *et al*. (1993) appliqué à l'image PC1 et extraction de quelques linéaments
Lineaments enhanced by Yesou et al. (1993) filter applied to the image PC1

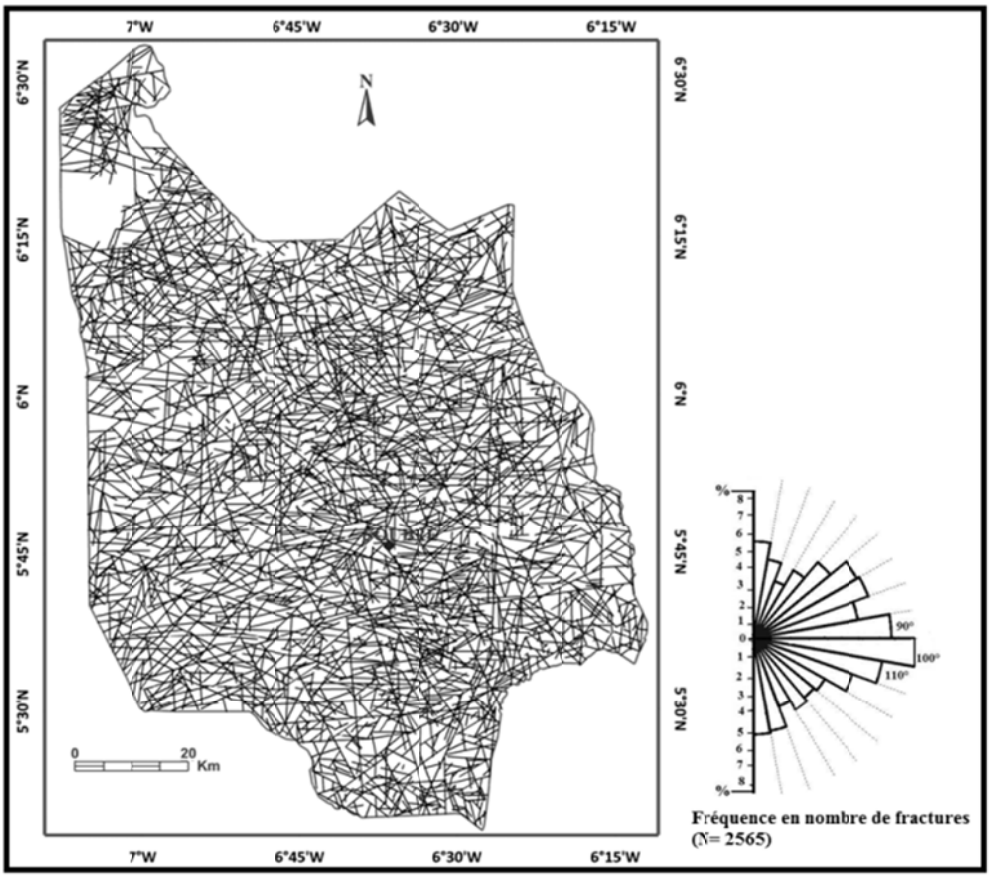


Figure 7. Carte de fracturation et rosace directionnelle des fractures de Soubré
Fracture network and diagram of fracture directions in the study area

5.2. Caractérisation statistique de la géométrie du champ de fractures

La figure 7 présente des fractures dont la longueur va de quelques centaines de mètres (minimum : 319 m) à plusieurs dizaines de kilomètres (maximum : 56 040 m). Les longueurs des 2565 fractures cartographiées sont distribuées en 130 classes avec un pas de 430 m et pour simplifier, peuvent être regroupées en trois grandes classes (figure 8). Une classe principale (69 %) qui comprend les fractures dont les longueurs sont comprises entre 0,319 km et 6 km, suivie d'une classe moins importante (22 %) de fractures qui ont des longueurs comprises entre 6 km et 14,5 km et enfin, une classe minoritaire (9 %) dont les longueurs sont au-delà de 14,5 km.

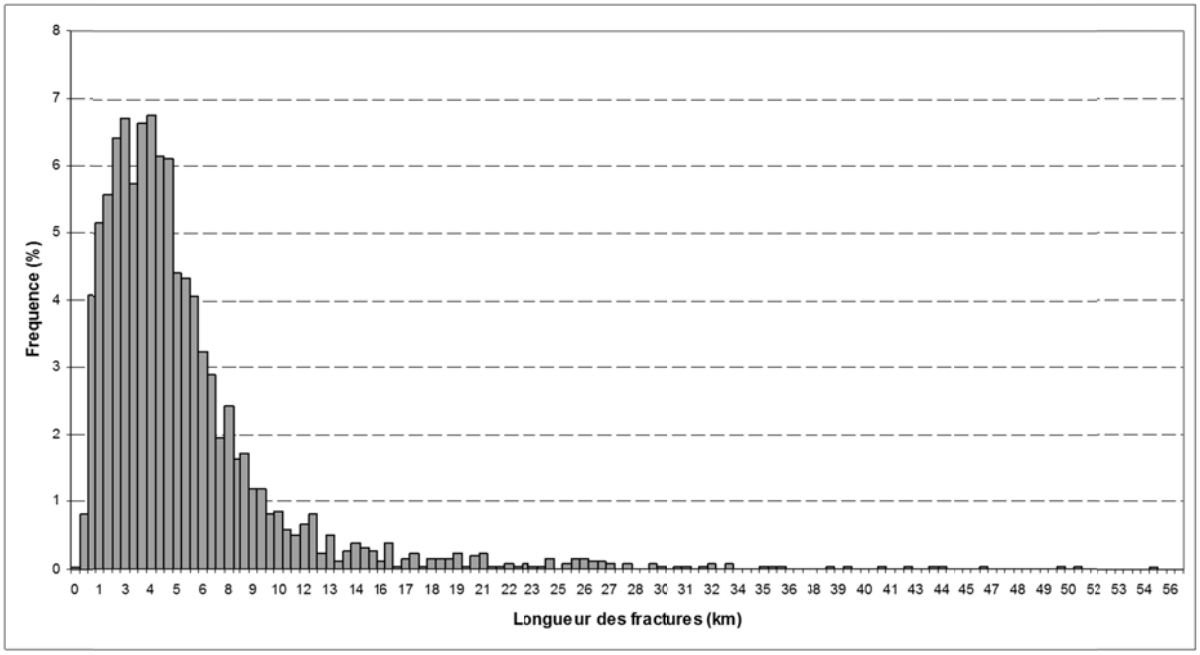


Figure 8. Répartition des longueurs de fractures
Diagram of the fracture length repartition

Les résultats des tests d'ajustement au seuil de signification de 1% par différents modèles sont consignés dans le tableau 3. Bien que la distance de Kolmogorov soit relativement faible pour la loi log-normale, nous ne pouvons pas retenir cet ajustement car les valeurs de khi2 calculé sont supérieures au khi2 théorique. Les lois exponentielle et gamma ne permettent pas non plus de bien décrire statistiquement la longueur des fractures, notamment autour du pic près de zéro, ou encore aux grandes valeurs.

Tableau 3. Ajustement de la distribution de longueur de fractures : tests du khi2 et de Kolmogorov-Smirnov
Fitting the length distribution of fractures: chi2 and Kolmogorov-Smirnov tests

Distribution law and its parameters	**χ2 Observed**	**Degree of freedom**	**Expected χ2 (α = 1 %)**	**K-S test p < 0,01**
Lognormal (μ=1.47 ; σ=0.71)	57.09	4	18.47	0.028
Gamma (ε=2.84 ; β=0.51)	Néant	néant	néant	0.629
Exponential (λ=0.17)	162.72	6	22.46	0.165

NB. Moyenne (μ), Écart type (σ), Paramètre d'échelle (ε), Paramètre de forme (β), Paramètre exponentiel (λ). Pour exprimer la distribution de fréquence, on fait y = 500.f (L) où f est la loi paramétrée dans la première colonne.
Mean (μ). Standard deviation (σ) Scale parameter (ε). Shape parameter (β). Exponential parameter (λ). To express the frequency distribution, we make y = 500.f (L) where f is the law set in the first column.

La figure 9 présente l'ajustement par une loi puissance de la distribution empirique de la longueur avec un pas de 430 m. Seule la partie de la courbe comprise entre 2,155 km et 20,680 km présente un comportement jugé linéaire où a été ajustée une loi puissance d'expression : $n(L)=1067{,}70\times L^{-2{,}37}$. La valeur de la pente obtenue (p = 2,37) est comprise entre 2 et 3, conformément à la théorie pour un réseau 2D connecté au-dessus du seuil de percolation (De Dreuzy, 2000 ; Bonnet *et al.*, 2001). Cependant, cette loi est mal caractérisée ici. Le coefficient de détermination R^2 est faible (0,90) et les tests d'ajustement ne sont pas concluants. En dessous de 2,155 km, cette loi n'est pas respectée : la rupture de pente met en évidence un seuil sous lequel la détection devient manifestement incomplète. Sous ce seuil se trouvent 15 % des linéaments relevés, tant en nombre qu'en longueur cumulée rapportée au total. En outre, au-delà de 10 km, la courbe est mal définie du fait que de nombreuses valeurs de longueur ne sont échantillonnées qu'une fois ou deux. Enfin, entre les bornes inférieure et supérieure, nous ne couvrons qu'un ordre de grandeur, ce qui est insuffisant pour ajuster une telle loi.

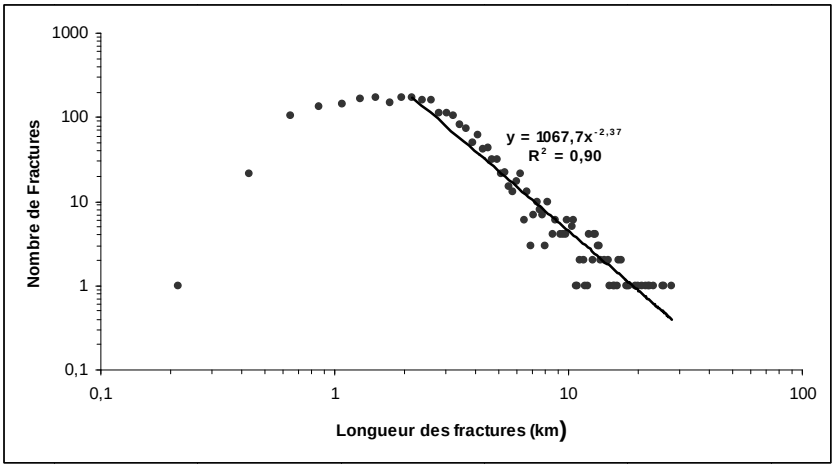


Figure 9. Représentation bi logarithmique de la distribution de longueur des fractures
Fitting a power law on the length distribution of fractures

La figure 10 présente la distribution de l'espacement qui varie entre 0,0006 et 6,6410 km et peut être subdivisée en deux grandes classes. La première concerne les espacements compris entre 0,0006 km et 1 km (70 % de l'effectif) et la seconde de 1 km à 6,641 km, représentant 30 % de l'effectif total. Aussi note-t-on une prépondérance (près de 40 %) des espacements inférieurs à 0,5 km. La moyenne et l'écart type de ce paramètre sont respectivement 0,882 et 0,785 km. Les résultats des tests d'ajustement sur les lois standard au seuil de signification de 1 % sont indiqués dans le tableau 4. Ils montrent que la loi gamma est la mieux adaptée pour la description statistique de l'espacement. La loi exponentielle négative pourrait convenir aussi si l'on acceptait de descendre un peu sous le seuil de signification de 1%. La loi log-normale viendrait ensuite mais avec un seuil de signification beaucoup plus faible. L'ajustement de la loi puissance sur l'espacement entre les fractures ne présente pas une bonne corrélation linéaire dans l'espace log-log (figure 11). On observe une dégradation de la loi linéaire ajustée sur l'espacement, vers les petites et les grandes valeurs. Les causes en sont les mêmes que dans le diagramme de la longueur des linéaments. Par conséquent, les tests du khi2 et de K-S rejetteront l'ajustement de cette loi, même en choisissant un seuil de signification très faible.

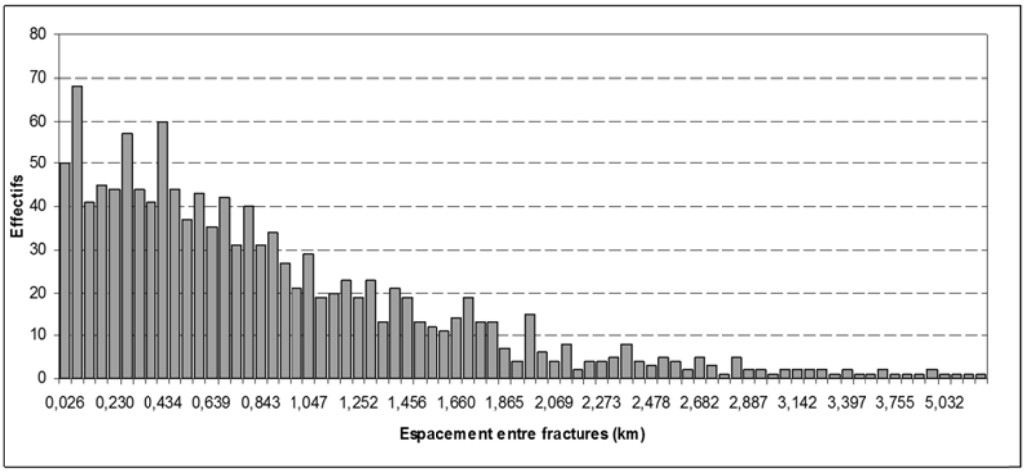


Figure 10. Répartition des espacements entre les fractures
Diagram of the fracture spacing repartition

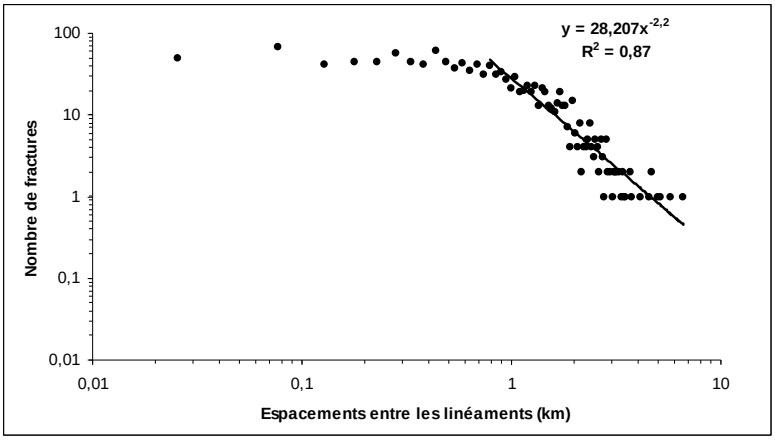


Figure 11. Représentation bi logarithmique de la distribution de l'espacement entre les fractures : échec de l'ajustement de la loi puissance
Log-log diagram of the spacing distribution: failure of fitting of a power law.

Tableau 4. Ajustement de la distribution de l'espacement des fractures : tests du khi2 et de Kolmogorov-Smirnov
Fitting the spacing distribution of fractures: chi2 and Kolmogorov-Smirnov tests

Distribution law and its parameters	**χ2 Observed**	**Degree of freedom**	**Expected χ2 (α = 1 %)**	**K-S test p < 0,01**
Lognormal (μ= − 0.62 ; σ=1.17)	146.15	10	23.20	0.091
Gamma (ε=0.74 ; β=1.18)	11.07	6	16.81	0.027
Exponential (λ=1.13)	33.66	8	20.09	0.060

NB. Moyenne (μ), Écart type (σ), Paramètre d'échelle (ε), Paramètre de forme (β), Paramètre exponentiel (λ). Pour exprimer la distribution de fréquence, on fait y = 50.f(L) où f est la loi paramétrée dans la première colonne.
Mean (μ), Standard deviation (σ), Scale parameter (ε), Shape parameter (β), Exponential parameter (λ). To express the frequency distribution, we make y = 50.f (L) where f is the law set in the first column.

5.3. Modélisation du réseau de fractures et biais de prélèvement

Dans le cadre d'un réseau poissonien, on trouve une loi exponentielle d'espacement en parcourant une ligne d'échantillonnage à condition que l'on mesure tous les espacements entre fractures consécutives. Si nous ne prenons en compte qu'une fracture sur k (i.e. nous sautons d'une fracture à la $k^{ème}$ suivante), nous obtenons une loi gamma de facteur de forme égal à k (entier). Le facteur de forme β (réel non entier) de la loi gamma obtenue s'interprète alors ainsi : c'est la distribution de l'espacement quand on prend 1 fracture sur β dans le réseau. Ainsi, β = 1,2 signifie que l'on a vu 10 fractures sur 12 ou, dit autrement, que l'on en a sauté en moyenne 2 sur 12. Si le réseau réel des linéaments est poissonien, il en résulte que l'on a raté une proportion de 2/12 linéaments (16,7%) à la source, lors du levé des linéaments sur les images. Les fractures oubliées sont vraisemblablement situées vers le bas de la gamme des longueurs. On a ainsi une bonne estimation du biais d'échantillonnage affectant les petites fractures lors du levé.

5.4. Confrontation du réseau de fractures à la géologie structurale

Ainsi, nos travaux ont produit une carte de la fracturation du département de Soubré, là où nous n'avions que quelques failles connues. Elle compte des centaines de fractures dont la réalité est fortement probable et qui n'étaient pas connues ni même soupçonnées jusqu'ici. Outre l'apport considérable de cette carte aux géologues structuralistes et miniers qui disposent ainsi d'un document inédit pour vérifier certaines de leurs hypothèses, cette carte va servir notre objectif qui est de cartographier les zones potentiellement favorables à l'implantation des forages lors de futures campagnes d'alimentation en eau potable (Banks *et al.,* 1992).

La carte du réseau de fractures révèle une densité élevée d'accidents qui morcellent toute la zone d'étude. Cette densité de fracturation et la connectivité du réseau 2D témoignent de l'intensité des mouvements tectoniques qui ont affecté la partie ouest du territoire ivoirien au cours des temps géologiques. L'analyse de l'orientation des fractures a montré une grande dispersion avec toutefois des directions prépondérantes. En comparant la rosace des fractures majeures (longueur excédant 9 km) de Soubré aux orientations principales des cassures pour l'ensemble de la Côte d'Ivoire, nous constatons que toutes les directions bien connues à l'échelle du pays (N30-40 ; N100-110 ; N120-130 ; N150-160 et N170-180) se retrouvent aussi sur notre carte des fractures majeures, quoique dans des proportions différentes. Notre

travail confirme l'abondance des directions N100, N120, N150 et N170 relevées par Tagini (1971), Papon et Lemarchand (1973), et Biémi (1992), ainsi que les familles photo-géologiques relevées par Faillat (1986). En revanche, notre pic secondaire N130-N140 n'est pas suffisant pour être vraiment représentatif de l'abondance de fractures autour de N140 rencontrée dans plusieurs régions de Côte d'Ivoire. Cependant, dans la zone d'étude, cette direction peut être associée aux filons de dolérites bien connus sur le terrain dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire mais difficiles à mettre en évidence sur les images utilisées, la différence lithologique à l'échelle de la dizaine de mètres ne suffisant pas à elle seule à contraster l'image. Autre particularité, la direction N30 a été trouvée seulement dans les formations géologiques qui entourent le mont Kourabahi (au nord-est de la ville de Soubré).

Au niveau de Méagui (au sud de la zone d'étude), les linéaments de direction N130 représenteraient de faibles couloirs de cisaillement dextre identifiés par Gronayes *et al.* (2003) comme le dernier épisode de cisaillement. Quant aux directions N30-N50, elles correspondent à des couloirs de cisaillement de mouvement dextre, synchrones de la phase principale de la migmatisation et de la formation des granites porphyroïdes. Ceci traduirait l'existence, dans les couloirs de cisaillement D2, d'une importante composante oblique liée aux mouvements ascendants des produits de fusion anatectique et des masses granitiques associées (Gronayes *et al.*, 2003). Quant aux directions N80 cartographiées, elles correspondraient à un cisaillement senestre avec des foliations obliques (Ekra, 2008). Ainsi, la caractérisation des linéaments en relation avec la pétrologie structurale étudiée par d'autres chercheurs permet de donner une signification à quelques uns des linéaments cartographiés.

5.5. Perspectives d'utilisation de la carte du réseau de fractures en hydrogéologie

À la différence du caractère fractal qui postule l'invariance d'échelle, le caractère poissonien de la fracturation, reconnu à une échelle donnée, permet d'envisager une modélisation de l'écoulement en milieu de socle qui dépende de l'échelle de travail. Il laisse ainsi ouverte la question de concevoir un modèle propre à l'échelle locale (celle d'une commune). Cette carte nous permettra de discrétiser la région en blocs qui seront autant de domaines structuraux locaux dont les limites sont géométriquement connues. À partir de données hydrodynamiques locales (piézométrie, débit, transmissivité), nous pourrons déterminer les conditions hydrauliques le long de ces limites (fonction de drain ou de barrière étanche), condition nécessaire pour toute modélisation à l'échelle locale. En fonction des paramètres géométriques du réseau (densité, connectivité) et des données hydrauliques, et en prenant en compte des informations géomorphologiques et géologiques locales telles que l'état de l'horizon fissuré associé au gradient d'altération du socle, nous serons capables de cartographier les blocs de fort potentiel productif pour l'alimentation en eau potable. Ainsi nous avons un outil qui va permettre d'optimiser les études de prospection afin de réduire considérablement le taux d'échec lors de l'implantation des forages d'eau qui est actuellement de l'ordre de 50% dans ces régions.

6. DISCUSSION

Nous faisons porter la discussion sur le mode de levé des linéaments puis sur l'apport de l'analyse statistique de la géométrie du réseau des linéaments.

Tout d'abord, la méthode de l'interprétation visuelle du relevé de ces linéaments est certes discutable. Cependant, si l'on en croit Minor *et al.* (1995) ou Sander *et al.* (1997) qui ont travaillé sur le Ghana, le pays voisin à l'est de la Côte d'Ivoire, et contrairement à ce que pensaient des auteurs antérieurs (Siegal et Short, 1977), la variabilité entre opérateurs n'est pas si grande. Globalement, ils trouvent que 50 % des objets levés sont classés de la même façon par trois opérateurs, 40 % diffèrent par leur longueur et leur continuité, leur position, voire leur orientation, ou par la classe à laquelle on les affecte, et seulement 10 % posent problème et représentent une erreur plus grave. Il est donc recommandé de bien fixer les critères de levé et de classement à l'avance. Ainsi, on relève moins de linéaments et ils sont fiables à 90 % (Sander, 2007).

On pourrait utiliser une méthode objective fondée sur des critères de connectivité de pixels. L'utilisation d'un algorithme pour identifier des alignements de pixels, à partir de 10 pixels par exemple, et jusqu'à 3 km (ici, 60 pixels) est toujours possible. Les inconvénients en sont les suivants. Si l'on ne voit pas déjà ces petits linéaments à l'œil, c'est que le contraste des niveaux de gris entre les pixels alignés et les autres est faible, et ceci malgré les traitements effectués pour renforcer le contraste. Il faudrait donc régler l'algorithme pour qu'il détecte des faibles contrastes. Du coup, il produirait comme résultat un grand nombre d'alignements, si l'on n'est pas trop sévère sur le critère de courbure (étant donnés le faible nombre de pixels alignés). Une proportion inconnue de ces alignements serait purement fortuit et ne représenterait rien de réel, sans que l'on puisse dire combien ou lesquels. Cela donnerait un réseau très dense et affecté d'un niveau de signification très faible, sans argument de réalisme permettant à l'opérateur de faire une sélection. De plus, l'opération de tri des nombreux linéaments anthropiques serait impossible dans ce cadre car le SIG ne contient pas toutes les limites de parcelles agricoles ou tous les sentiers et chemins d'extraction forestière à l'échelle du km. On obtiendrait finalement un réseau traitable statistiquement mais dont l'intérêt structural serait assez faible. Nous avons préféré approcher la lacune des petites fractures sous un autre angle, celui de la correction de biais grâce à un modèle géométrique du réseau.

L'analyse de la longueur des fractures a montré que ce paramètre géométrique est mal décrit par les lois de probabilité testées (log-normale, gamma, exponentielle, et puissance). La meilleure loi est la loi log-normale, ce qui est un résultat classique dans la littérature (Priest, 1993) sur les traces de fractures observées sur des supports 2D (surfaces plus ou moins planes). Les résultats de simulations numériques sur le processus de la fracturation ont démontré que la distribution des longueurs peut évoluer au cours de la croissance d'un réseau de fractures et correspondre successivement à une distribution exponentielle, log normale ou puissance (Darcel, 2002).

Des études faites en Europe par Odling (1997) et Bour (1997), et en Côte d'Ivoire par Kouamé (1999), défendent l'idée que la loi puissance est la plus adaptée pour décrire la distribution de longueur des fractures. Cette loi exprime le caractère fractal, réel ou supposé, du réseau de fractures. L'analyse fractale permet principalement la mise en évidence d'une structure auto-similaire. Nous n'entrerons pas dans le débat qui oppose des auteurs choisissant la loi log-normale ou la loi puissance (modèle monofractal ou β-modèle). La contradiction apparente entre ces deux modèles peut se dépasser simplement en rappelant qu'ils ne sont que des cas particuliers dans un cadre multifractal. Rappelons que les premiers modèles concrets de cascade ont été élaborés pour simuler l'intermittence dans les processus stochastiques tels que la turbulence. Les deux modèles les plus connus (le modèle « log-normal » et le β-modèle) sont les extrêmes d'une famille continue de modèles de cascade multifractale caractérisés chacun par un indice, l'indice α (de Lévy) du générateur du processus, qui est une mesure de l'extension de la hiérarchie de singularités (Schmitt *et al.*, 1992) ; $\alpha = 0$ pour le β-modèle, le seul cas monofractal, et au maximum $\alpha = 2$ pour le modèle log-normal.

La distribution en loi puissance se caractérise par l'exposant *p*, dont la valeur est la pente dans un graphe logarithmique, qui exprime la proportion de petites fractures par rapport aux grandes. Dans notre cas, nous ne couvrons qu'un seul ordre de grandeur, ce qui ne permet pas de tester le caractère fractal de la distribution qui requiert un jeu de données sur au moins deux ordres de grandeur. Nous nous contentons donc de comparer nos résultats avec les observations faites par Bodin et Razack (1999) et Lasm et Razak (2001) qui, pour une étude analogue ont trouvé respectivement $p = 2,68$ et $p = 2,91$. L'application de cette loi à notre champ de fracturation donne une valeur de $p = 2,37$. Cette valeur plus petite de la pente ne peut pas s'expliquer par une sur-estimation des grandes fractures car si l'opérateur effectuant le levé peut voir des petits linéaments qui ne sont pas vraiment des fractures, en revanche il ne peut pas inventer les grands linéaments : ces derniers sont beaucoup plus fiables. De plus, la carte des linéaments obtenue révèle un certain nombre d'accidents dont l'extension dépasse le cadre de la zone étudiée. Leurs longueurs sont donc plutôt tronquées par les frontières que sur-estimées.

Si notre valeur de la pente reflète une réalité, c'est que le réseau de fractures de cette région est plus pauvre en petites fractures que les réseaux étudiés par ces auteurs. Mais cela peut aussi signifier que la résolution de nos images ou notre mode de levé censure les petites fractures plus sévèrement que dans les travaux de ces auteurs. La valeur de p doit être interprétée avec beaucoup de précaution, et cela d'autant plus que la qualité de l'ajustement est médiocre.

Quant à l'espacement entre les fractures, les travaux antérieurs de Genter et Castaing (1997) et de Bodin et Razack (1999) en France, de Bilé (2002) et Assoma (2005) en Côte d'Ivoire, ont avancé qu'il suit une loi puissance. Les travaux des deux derniers auteurs ont eu lieu à 200 km de Soubré, dans des formations géologiques similaires, et avec une méthodologie d'acquisition des linéaments similaire à la nôtre. Il est donc remarquable que les espacements calculés dans notre cas n'obéissent pas à une loi puissance mais à une loi exponentielle négative ou une loi gamma proche d'une exponentielle. Ce résultat en rejoint d'autres sur le caractère poissonien des réseaux de fractures (Baecher, 1983 ; Fouché, 1999) qui a déjà permis la correction des biais de sondage à l'échelle infra kilométrique (Fouché et Diebolt, 2004).

À priori, les linéaments que nous n'avons pas vus sur les images alors qu'ils existent dans le réseau réel (dans l'hypothèse où il est bien poissonien) sont de petite taille. Il faut donc les ajouter aux 15% de petites fractures de longueur inférieure à 2,155 km déjà vues. Le nombre N de linéaments cartographiés étant connu, nous pouvons donc calculer le nombre réel des petites fractures selon la proportion trouvée à la section 5.3: $(0,167 / 0,833 + 0,150) \times N$; et leur proportion dans le réseau réel : $(0,167 + 0,150 \times 0,833 = 29,2\%)$. On constate que cette estimation conduit à ajouter seulement $0,167 / 0,833 \times N = 20\% \times N$ au nombre réel de petites fractures, alors qu'une extrapolation suivant la loi puissance ajustée (figure 8) donnerait des milliers de petites fractures supplémentaires… Cette discussion sur le biais d'échantillonnage et sur la possibilité ou pas d'employer un modèle fractal n'a donc rien d'anodin. Il est connu, et on retrouve bien cela, que la fracturation située vers le bas de la gamme des longueurs joue un grand rôle dans l'interconnexion du réseau.

Ce caractère poissonien, donc homogène, n'est peut-être pas conforme à la structure multi-échelle du réseau de fractures qui reste inconnue pour nous, mais il est une réalité du réseau imagé par les techniques utilisées, à l'échelle de travail choisie, et on peut poser cette hypothèse pour raisonner sur le biais d'échantillonnage. Cependant, concernant l'espacement des fractures, la distribution seule ne permet qu'une caractérisation partielle car elle ne donne pas d'information sur d'éventuelles distances de corrélation (Lasm, 2000).

7. CONCLUSION

L'utilisation combinée d'images actives (RSO de RADARSAT-1) et optiques (ETM+) a permis de disposer du maximum de données pour la cartographie des linéaments structuraux du socle précambrien dans le département de Soubré. Ainsi, après application d'une méthodologie appropriée (ACP, réduction de chatoiement et filtrages spatiaux et directionnels), nous avons obtenu une carte linéamentaire comprenant 2565 linéaments de taille variable. Ces linéaments, après validation, ont été assimilés à des fractures d'origine tectonique. La forte densité de fracturation et la connectivité du réseau 2D témoignent de l'intensité des mouvements tectoniques qui ont affecté la partie ouest du territoire ivoirien au cours des temps géologiques. Les fractures s'orientent préférentiellement dans les directions N80-N110. Par ailleurs, toutes les familles d'orientation de fractures observées par divers auteurs en Côte d'Ivoire sont retrouvées, à l'exception de N130-N140 qui consiste principalement, dans le Sud-Ouest, en discontinuités lithologiques (filons) difficiles à discerner.

Le champ de la fracturation apparaît dense et homogène : suite à l'analyse de la distribution des espacements, nous avons trouvé qu'il n'obéit pas à un processus auto-similaire mais plutôt à un processus de Poisson. Grâce à ce modèle, nous avons estimé à 16,7 % le biais de prélèvement des linéaments de taille inférieure à 2,1 km. C'est l'estimation de la proportion de petites fractures que nous n'avons pas pu cartographier et cela représente plus de la moitié des « petites » fractures supposées existantes puisque les petits linéaments relevés comptent pour 15 % dans le nombre total des linéaments relevés. Le caractère poissonien de la fracturation ne permet pas de déduire, du modèle de fracturation à l'échelle régionale, une simulation de l'écoulement en réseau à l'échelle locale. En effet, l'invariance d'échelle du réseau ou auto-similarité, qui serait nécessaire pour cela, n'a pas été démontrée ici. Mais le caractère poissonien du réseau permet de discrétiser la région en blocs qui seront traités à l'échelle locale du point de vue hydrogéologique et géomorphologique. À l'avenir, nous comptons recourir à des images de plus forte résolution (15 m × 15 m) afin de comparer le nombre de petits linéaments cartographiés et le biais observé, ainsi que pour tester avec plus de chance de succès l'hypothèse du caractère fractal qui nécessite de travailler sur plusieurs ordres de longueur et d'espacement.

Nous avons montré ici la limite de la méthodologie d'identification, dans la gamme inférieure de taille (1 à 3 km), des linéaments dont la réalité est la moins discutable, ceux qui sont visibles à l'œil sur l'image après les traitements appropriés. Cette limite n'est pas attribuable à la seule résolution des images car il n'y a pas de problème de résolution pour des linéaments qui font au moins 20 pixels (ici 1 km). Sauf si l'on admettait que les fractures entre 1 et 3 km n'existent pas, ce qui est hautement invraisemblable, cette limite est plutôt due à l'effet de facteurs physiques tels que la couverture végétale, l'épaisseur insuffisante de ces petites fractures et leur moindre impact en termes de géomorphologie. Les travaux qui étudient l'apport de ces linéaments en hydrogéologie en extrapolant l'observation d'une échelle régionale vers l'échelle locale par l'application d'un modèle fractal sont très vulnérables devant cette limite d'identification.

Références bibliographiques

Assoma, V. (2005) Apport de l'imagerie radar et des SIG à la cartographie hydrogéologique et à la gestion intégrée des ressources en eau dans la région semi-montagneuse, à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Mémoire de DEA de Télédétection et SIG, option Sciences de la Terre, Université de Cocody, Abidjan, 93 p.

Baecher, G. B. (1983) Statistical analysis of rock mass fracturing. Mathematical Geology, n°15, p. 329-348.

Banks, D., Solbjorg M. L., and Rohr-Torp, E. (1992) Permeability of fracture zones in a precambrian granite. Quarterly Journal of Engineering Geology, vol. 25, p. 377-388.

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, 480 p.

Bilé, G. R. (2002) Étude des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères de fissures dans la région de Korhogo. Mémoire de DEA Sciences de la Terre, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire 69 p.

Bodin, J. et Razack, M. (1999) L'analyse d'images appliquée au traitement automatique de champs de fractures. Propriétés géométriques et lois d'échelles. Bulletin de la société géologique de France, tome 170, n°4, p. 579-593.

Bonn, F. et Rochon, G. (1992) Précis de Télédétection. Principes et méthodes. Presse de l'université de Québec / AUPELF, vol. 1, 485 p.

Bonnet, E., Bour, O., Odling, N.E., Davy, P., Main, I., Cowie, P., Berkowitz, B. (2001) Scaling of fracture systems in geological media. Rev. Geophys., vol. 39(3), pp. 347-383.

Bour, O. (1997) Transfert de fluide dans les milieux fracturés : effets d'échelle. Thèse de doctorat, Université de Rennes, 200 p.

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

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

Desjardins, R., Iris, S., Roy, D. W., Lemieux, G. H. et Toutin, T. (2000) Efficacité des données de RADARSAT-1 dans la reconnaissance des linéaments : un bilan. Journal Canadien de télédétection, vol. 26, n° 6, pp. 537-548.

De Dreuzy, J-R. (2000) Analyse des propriétés hydrauliques des réseaux de fractures. Thèse de l'Université de Rennes, 217 p.

Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J.-C. and Krishnamurthy, N. S. (2006) A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. Journal of Hydrology, vol. 330, n° 1-2, pp. 260-284.

Ekra, K.F. (2008) Apport de la télédétection radar à l'analyse pétrostructurale des formations géologiques de Soubré, Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Mémoire de DEA Sciences de la Terre, option : Pétrologie-Métallogénie, Université de Cocody, Abidjan, 76 p.

Faillat, J.-P. (1986) Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie. Thèse de Doctorat d'État, Université du Languedoc-Monptpellier II, 536 p.

Faillat, J.-P. et Blavoux, B. (1989) Caractères hydrochimiques des nappes des roches endogènes en zone tropicale mide : l'exemple de la Côte d'Ivoire. Journal of Africa Earth Sciences, vol. 9, n° 1, pp. 31-40.

Fouché, O. (1999) Caractérisation géologique et géométrique, et modélisation 3D, des réseaux de discontinuités d'un massif granitique reconnu par forages carottés, massif de Charroux-Civray (Vienne, France). Thèse de doctorat en Géologie de l'Ingénieur, Ecole des Ponts ParisTech, 296 p.

Fouché, O. et Diebolt, J. (2004). Describing the Geometry of 3D Fracture Systems by Correcting for Linear Sampling Bias. Mathematical Geology, 36(1), pp. 33–63.

Genter, A. and Castaing, C. (1997) Scale effets in the fracturing of granite. Comptes-rendus de l'Académie des Sciences. Paris, vol. 325, pp. 439-445.

Geomines (1982) Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise (degré carré de Soubré). GEOMINES, Canada, Cahier n°28, 28 p.

Greenbaum, D. (1992) Structural influence on the occurrence of groundwater in SE Zimbabwe. In Wright, E.P. and Burgess, W. G. (eds) 1992, Hydrogeology of Crystalline Basement Aquifers in Africa. Geological Society Special Publication, n°66, London, 264 p.

Gronayes, C., Pothin, K.B., Kouamé, F.K. et Brou, B. K. (2003) Identification de couloirs de cisaillement à partir de l'imagerie TM de Landsat : application à l'archéen de Bloléquin (ouest de la Côte d'Ivoire). Télédétection, vol.3, n°2-3-4, pp. 217-226.

Haralick, R. M., Shanmugan, K. and Dinstein, I. (1973) Textural features for image classification. IEEE trans. Trans. Syst. Man and Cybernetics, n°3, pp. 610-621.

Jourda, J-P., Djagoua, E.V., Kouamé, K., Saley, B. M., Gronayes, C., Achy, J-J. et Razack, M. (2006) Identification et cartographie des unités lithologiques et des accidents structuraux majeurs du département de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : Apport de l'imagerie ETM+ de Landsat. Télédétection, vol 6, n°2, pp. 123-142.

Knopf, D. (1967) Les dolérites de Côte d'Ivoire : contribution à l'établissement du mémoire explicatif de la carte géologique au 1/1 000 000 de la Côte d'Ivoire. SODEMI, rapport n° 188, multigr., Abidjan (704), 58 p.

Kouamé, K. F. (1999) Hydrogéologie des régions de montagne : apports 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 de Cocody, Abidjan, 215 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, pp. 139-156.

Kouamé, K. F., Lasm, T., Saley, M. B., Tonyé, E., Bernier, M. et Wade, S. (2009) Extraction linéamentaire par morphologie mathématique sur une image RSO de RADARSAT-1 : application au socle archéen de la Côte d'Ivoire, in Journée d'Animation scientifique (JAS09) de l'AUF, Alger, p. 7.

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, 277 p.

Lasm, T. (2000) Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : analyse statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 274 p.

Lasm, T. et Razack, M. (2001) Lois d'échelle dans la fracturation de roches dures cristallines et dans le réseau hydrographique. Compte Rendu de l'Académie des Sciences, Series IIA - Earth and Planetary Science, vol. 333, n°4, pp. 225-232.

Lopes, A., Touzi, R. and Nezry, E. (1990) Adaptative speckle filters and scene heterogeneity. IEEE trans. Geosci. Remote Sens, vol. 28, n°6, pp. 992-1000.

Minor, T., Russell, C., Chesley, M., Englin, J., Sander, P., Carter, J., Knowles, B., Acheampong, S. and McKay, A. (1995) Application of geographic information system technology to water well siting in Ghana, West Africa: a feasibility study. Publ. n°44033, Desert Research Institute, Reno, USA, 53 p.

Odling, N. E. (1997) Scaling and connectivity of joint systems in sandstone from western Norway. Journal of Struct. Geol., vol. 19, n°10, pp. 1257-1271

Papon, A. et Lemarchand, R. (1973) Géologie et minéralisation du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Synthèse des travaux de l'opération SASCA (1962-1968). SODEMI, Abidjan, 284 p.

Priest, D. (1993) Discontinuity analysis for rock engineering. Chapman & Hall, 473 p.

Rompel, A. K., Koné, A. M., Knupp, K.P. and Burvenich, T. (1988) Structural interpretation of the Hana-Lobo Concession area, western Ivory Coast. Internal AAC report 15/133/500/98/78, 23 p.

Rudant, J.-P., Deroin, J.-P. and Polidori, L. (1994) Multi-resolution analysis of radar images and its application to lithological and structural mapping : Larzac (southern France). International Journal of Remote Sensing, vol.15 n° 12, pp. 2451-2468.

Sander, P. (2007) Lineaments in groundwater exploration : a review of applications and limitations. Hydrogeology Journal, vol. 15, pp. 71-74.

Sander, P., Minor, T.B., Chesley, M. and Matthew, M. (1997) Ground-Water exploration based on lineament analysis and reproducibility tests. Ground Water, vol. 35, n°5, pp. 888-894.

Siegal B. S. and Short N. M. (1977). Significance of operator variation and the angle of illumination in lineament analysis on synoptic images. Modern Geol., vol. 6, n° 2, pp. 75-85.

Schmitt, F., Lavallée, D., Lovejoy, S., Schertzer, D. et Hooge, C. (1992) Estimations directes des indices de multifractals universels dans le champ de vent et de température. Compte Rendu de l'Académie des Sciences Paris, tome 314 Série II, pp. 749-754.

Tagini, B. (1971) Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotechnique régionale. Thèse d'État, Université de Lausanne, 302 p.

Waters, P., Greenbaum, D., Smart, P. L. and Osmaston, H. (1990) Applications of remote sensing to groundwater hydrology. Remote Sensing Reviews, vol. 4, n°2, pp. 223-264.

Yao, K. Th. (2009) Hydrodynamisme de l'eau souterraine dans les aquifères de socle cristallin et cristallophyllien du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire : cas du département de Soubré. Apports de la télédétection, de la géomorphologie et de l'hydrogéochimie. Thèse de doctorat en cotutelle, Conservatoire national des arts et métiers, Paris, et Université de Cocody, Abidjan, 286 p.

Yao, K. Th., Fouché, O., Oga, M.-S., Biémi, J., Pernelle , C. (2010) Circuit de l'eau dans un aquifère de socle hétérogène et fracturé : une enquête hydrochimique dans le bassin versant du Sassandra (sud-ouest de la Côte d'Ivoire, 5e conférence African Association of Women in Geosciences (CAAWG5) « Femmes et Géosciences pour la Paix », 11-17 Avril 2010, Grand Bassam, Côte d'Ivoire.

Yésou, H., Besnus, Y., Rolet, J. et Pion, J.-C. (1993) Comparaison et évaluation des données SPOT, ERS-1, Seasat, Landsat et des données combinées lors d'études de géologie structurale. In 8e congrès de l'Association Québécoise de Télédétection, 16ème Symp. Télédétection, Sherbrooke, pp. 521-526.

Youan Ta, M., Lasm, T., Jourda, J.-P., Kouamé, K. F. et Razack, M., (2008) Cartographie structurale par imagerie satellitaire ETM+ de Landsat-7 et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). Télédétection, vol. 2, pp. 34-42.