

Caractérisation Des Structures Géologiques Par Analyse Morphostructurale d'Image d'Ombrage (ASAR ENVISAT Et MNT SRTM) Et Géostatistique Du Sud De La Côte d'Ivoire

Vincent Tchimou Assoma, PhD

Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection
(CURAT), Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire
Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement,
UFR STRM, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Aimé Koudou, PhD

Département des Sciences de la Terre, UFR Environnement, Université Jean
Lorougnon Guédé (UJLoG) de Daloa, Côte d'Ivoire

Bernard Adiaffi, PhD

Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement,
UFR STRM, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Koffi Fernand Kouamé, PhD

Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection
(CURAT), Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire
Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement,
UFR STRM, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Doi: 10.19044/esj.2018.v14n15p197 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n15p197](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n15p197)

Abstract

This paper focuses on characterizing the structural lineaments of the South of Côte d'Ivoire by using the morphostructural analysis of shading images technique (ENVISAT/ASAR and SRTM/DTM) and the geostatistical method for a better understanding of the fractured environment. This study is carried out on the basis of techniques of backscattered radar signal and the geomorphological analysis. This technical implementation significantly improves the mapping of the fractures of the study area. The number of fractures is estimated at 778. Direction N100-110° fractures are the longest and most representative. The fracture spacing fits better into the power law. The geostatistical analysis shows that the global fracturing variogram is spatially well structured. The fracture density in cumulative lengths is therefore identified with a regionalized variable. The fracturing map that is obtained represents a basic document in the fields of hydrogeology. This paper

can be used for prospecting and production drilling campaigns and can be used also in geotechnics and mining prospecting.

Keywords: Geological structures, image fading, ASAR ENVISAT, morphostructural analysis, géostatistic analysis, Côte d'Ivoire

Résumé

L'objectif principal de cette étude est de caractériser les structures géologiques de socle du Sud de la Côte d'Ivoire par la technique d'analyse morphostructurale d'images d'ombrage (ASAR/ENVISAT et MNT/SRTM) et la géostatistique en vue d'une meilleure connaissance du milieu fracturé. La technique mise en œuvre sur la base du signal radar rétrodiffusé et de l'analyse géomorphologie, améliore significativement la cartographie des fractures de la zone d'étude. Le nombre de fractures de la zone de socle du Sud de la Côte d'Ivoire est estimé à 778. Les fractures de direction N100-110° sont les plus représentatives et sont les plus longues. Les espacements de fractures s'ajustent mieux à la loi de puissance. L'analyse géostatistique montre que le variogramme de la fracturation globale est spatialement bien structuré. La densité de fracturation en longueurs cumulées s'identifie donc à une Variable Régionalisée. La carte de fracturation ainsi obtenue représente un document de base dans les domaines de l'hydrogéologie pour les campagnes de prospection et d'implantation des forages productifs, et au-delà en géotechnique et en prospection minière.

Mots-clés : Structures géologiques, estompage d'image, ASAR/ENVISAT, analyse morphostructurale, analyse géostatistique, Côte d'Ivoire

Introduction

La fracturation des roches présente de nombreuses applications en géotechnique, en métallogénie, en prospection et en exploitation pétrolière, et en hydrogéologie pour l'écoulement et le stockage des eaux souterraines. Les fractures jouent un rôle primordial dans plusieurs phénomènes géologiques. Dans les aquifères de socle, la fracturation s'impose comme étant l'une des conditions essentielles de formation de réservoirs d'eau souterraine (Assoma *et al.*, 2013). Une meilleure connaissance des paramètres géométriques de la fracturation (orientation, longueur, espacement, intensité de la fracturation, etc.) permet de mieux appréhender l'organisation des réseaux de fractures (Kouamé, 1999 ; Lasm, 2000 ; Lasm *et al.*, 2004 ; Youan Ta *et al.*, 2008 ; Koudou *et al.*, 2014).

En Côte d'Ivoire, l'intensification des recherches hydrogéologiques reste d'actualité, afin d'assurer une bonne alimentation en eau de la population sans cesse croissante. Le recours à la cartographie des linéaments structuraux

dans la prospection hydrogéologique demeure incontournable. De nombreuses études ont justifié de l'exploitation des images optiques et radar en l'occurrence des systèmes HRV de SPOT (Biémi *et al.*, 1998), TM et ETM+ de Landsat (Kouamé, 1999 ; Kouamé *et al.*, 1999 ; Jourda *et al.*, 2006), ASTER de Terra (Kouamé *et al.*, 2006 ; Koudou *et al.*, 2013a) et SAR de RADARSAT-1 (Kouamé *et al.*, 2009 ; Kouamé *et al.*, 2013) et ASAR/ENVISAT (Assoma *et al.*, 2011) en vue de la cartographie litho-structurale et de leur caractérisation. Tous ces travaux ont contribué à une meilleure connaissance de la fracturation en milieu de socle. Cependant, la fracturation mise en évidence ne concerne que quelques petites portions de socle disséminées sur le territoire ivoirien. La spécificité de la présente étude repose sur la mise en évidence des fractures de l'immense zone de socle de la moitié sud du territoire ivoirien (160 000 km²). Elle s'inscrit dans la continuité des travaux de caractérisation de la fracturation susceptible de guider la mise en place des réservoirs d'eau dans le socle. L'objectif visé est de caractériser les linéaments structuraux à partir de la technique d'analyse morphostructurale des images estompées et de l'analyse géostatistique en vue d'une meilleure connaissance du milieu fracturé et/ou fissuré. Plus spécifiquement, l'étude propose une extraction optimale des accidents tectoniques et des morphostructures à partir d'une exploitation en synergie des images ASAR ENVISAT et des MNT d'une part, et d'autre part d'analyser les attributs géométriques du réseau de fractures (orientation, longueurs, espacements et densité) et d'étudier leur structuration spatiale et les paramètres de formes.

En raison de l'étendue de la zone étudiée, le recours aux images ASAR-WSM de large champ de vue et aux données MNT pour la morphologie du relief est nécessaire. Le choix des images ASAR se justifie par sa vision synoptique et par sa sensibilité à la texture du sol (topographie, rugosité de surface) facilitant ainsi la reconnaissance et l'extraction des linéaments structuraux. Par ailleurs, le système radar permet de s'affranchir de la présence du couvert végétal dense par la polarisation du signal rétrodiffusé et des produits d'altération de surface qui masquent le socle rocheux, ce qui est favorable à la mise en évidence des structures géologiques. L'imagerie ASAR ENVISAT se présente donc comme un moyen incontournable pour l'établissement et l'actualisation des cartes lithologiques et structurales (Assoma *et al.*, 2011).

Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est située entre les latitudes 4°17'N et 7°N et entre les longitudes 2°40'W et 8°40'W. Le relief varie entre 0 et 300 m du Golfe de Guinée jusqu'à la 7° parallèle (**Figure 1**). D'un point de vue géologique (Figure 2), elle comprend le socle précambrien et sa couverture sédimentaire d'âge Crétacé supérieur-quatenaire dans la partie sud-est. Les formations

précambriennes sont constituées de roches cristallines, granito-gneissiques, essentiellement représentées par les schistes fortement plissés et métamorphisés du birrimien (Le Bourdieu, 1958). La zone d'étude comprend à l'est, des formations éburnéennes (2,5 à 1,5 Ga) caractéristiques des volcano-sédimentaires alternant avec des granitoïdes et à l'ouest, des formations libériennes (2,9 à 2,6 Ga) et des reliques léoniennes (3,5 à 2,9 Ga) (Bessoles, 1977).

Sur le plan climatique, la zone d'étude appartient au climat équatorial de transition caractérisé par quatre saisons : une grande saison de pluie (avril à juillet), une petite saison de pluie (octobre à novembre), une grande saison sèche qui s'étend de décembre à mars, et une petite saison sèche qui s'observe en août et septembre. Le couvert végétal, très hétérogène, passe au début du 20^{ème} siècle des forêts denses humides sempervirentes en accord avec une pluviométrie moyenne annuelle excédant les 1700 mm (Guillaumet *et al.*, 1971) à une végétation actuelle de type savane, caractéristique des régions où la pluviométrie annuelle est inférieure à 1300 mm. Les sols qui s'y trouvent sont essentiellement ferrallitiques et ferrugineux auxquels s'ajoutent des sols bruns eutrophes tropicaux.

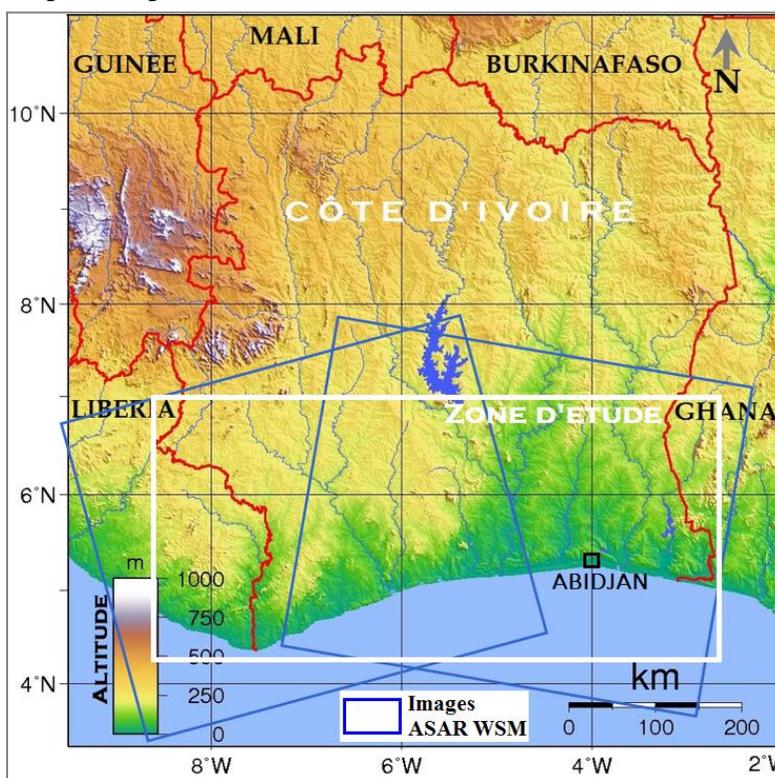


Figure 1. Aperçu physique de la Côte d'Ivoire et couverture en image radar (ASAR ENVISAT)

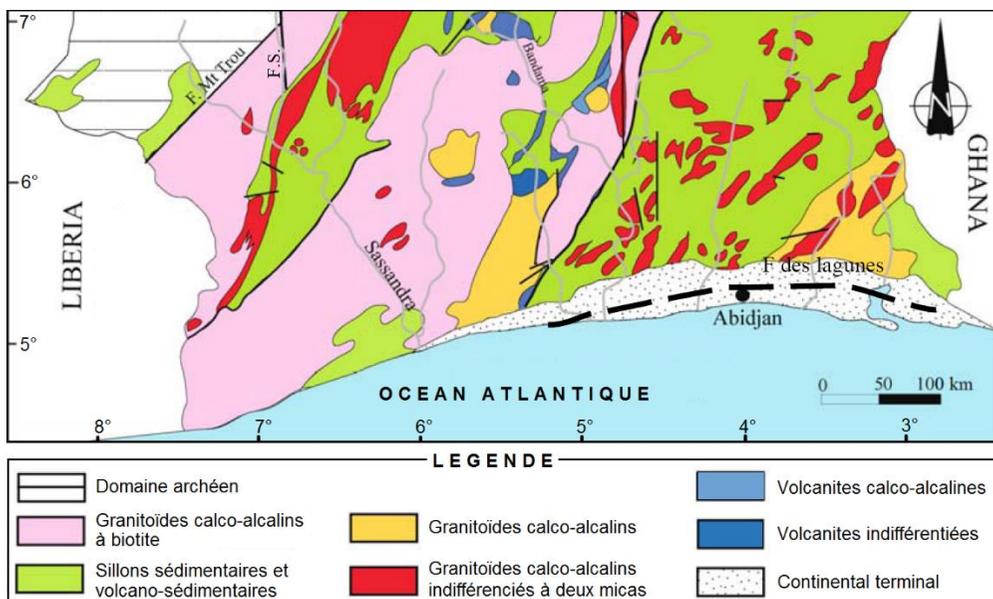


Figure 2. Aperçu de la géologie de la moitié sud de la Côte d'Ivoire, Tagini (1971) modifié

Données et matériel

Les données radar se composent de deux scènes ASAR ENVISAT du mode WSM (Wide Swath Mode) (Figure 1) de la technique ScanSAR (large champ de vue). Ces images sont acquises au Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT) à travers le projet CAT-1 de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et présentent les caractéristiques suivantes (Tableau 1) : bande C (5,6 cm de longueur d'onde), polarisation VV et HH, moyenne résolution spatiale (150 m) rééchantillonnée à 75 m de pixel, 405 km de fauchée avec des angles d'incidence variables (17 à 42 degrés). Ces images disposent des qualités radiométriques en termes de rétrodiffusion radar pouvant discriminer les occupations étendues du sol, les structures morphologiques et morphométriques.

Tableau 1. Caractéristique des images ASAR ENVISAT du mode WSM

Mode	Acquisition	Trace	Orbite
ASAR WSM-1P	Polarisation HH 24/05/2006	30	22128 Ascendante
	Polarisation VV 07/12/2006	337	24940 descendante

Les données de modèle numérique de terrain (MNT) utilisées sont issues de la campagne SRTM (Shuttle Radar Topography and Mapping) du 11 février 2000, pour le relevé de la topographie de la surface du globe. Elles se caractérisent par une précision altimétrique absolue de 16 m, une résolution spatiale de 90 m et une précision relative de ± 10 m en relief élevé et ± 5 m en faible variation topographique (Assoma *et al.*, 2011).

Le traitement des données a nécessité l'emploi des logiciels suivants : **NEST-5.1** (Next ESA SAR Toolbox) pour la calibration et le filtrage spatial des données radar ASAR ; **ENVI-5.1** (Environment for Visualizing Images) pour le traitement des images radar et la cartographie des structures géologiques ; **LINWIN 2.0**, **MS office Excel** et le module **RAFESP** du logiciel **RAFRAC** (Razack, 1984) ont facilité le traitement statistique des paramètres géométriques de la fracturation ; **VARIOWIN TM** a permis le traitement géostatistique de la fracturation.

Méthodes

Exploitation des données de télédétection

Les scènes ASAR en orbite ascendante et descendante ont fait l'objet d'une mosaïque pour en extraire la zone d'étude représentée par la moitié sud de la Côte d'Ivoire étudiée (**Figure 3**).

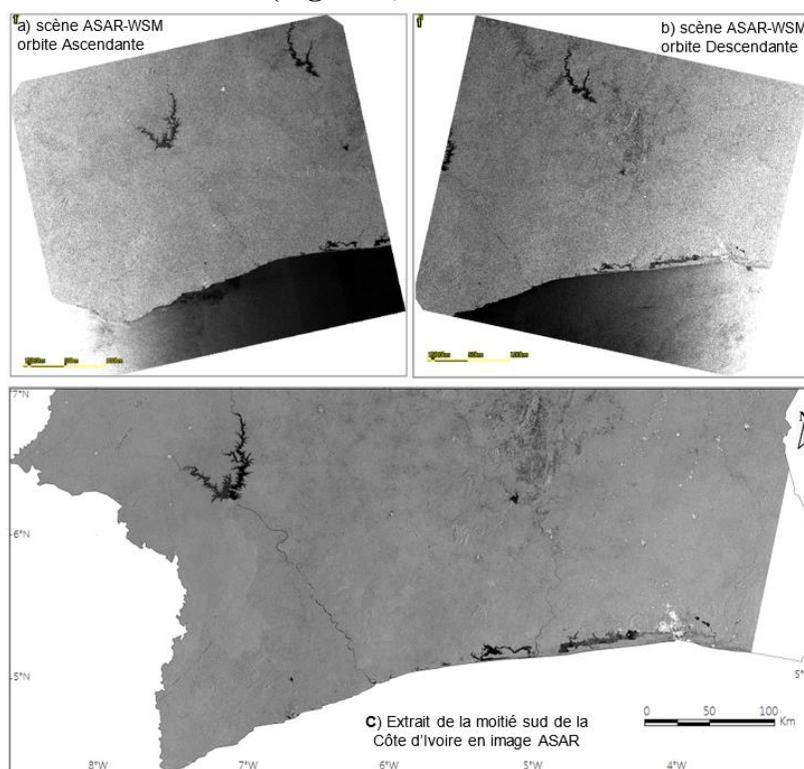


Figure 3. Couverture de la zone d'étude à partir de la mosaïque des scènes ASAR-WSM du satellite ENVISAT

La démarche méthodologique adoptée pour la cartographie des structures géologiques s'est déroulée en trois étapes (prétraitement, traitement et analyse morphologique) successivement décrites dans l'organigramme de la **Figure 4**.

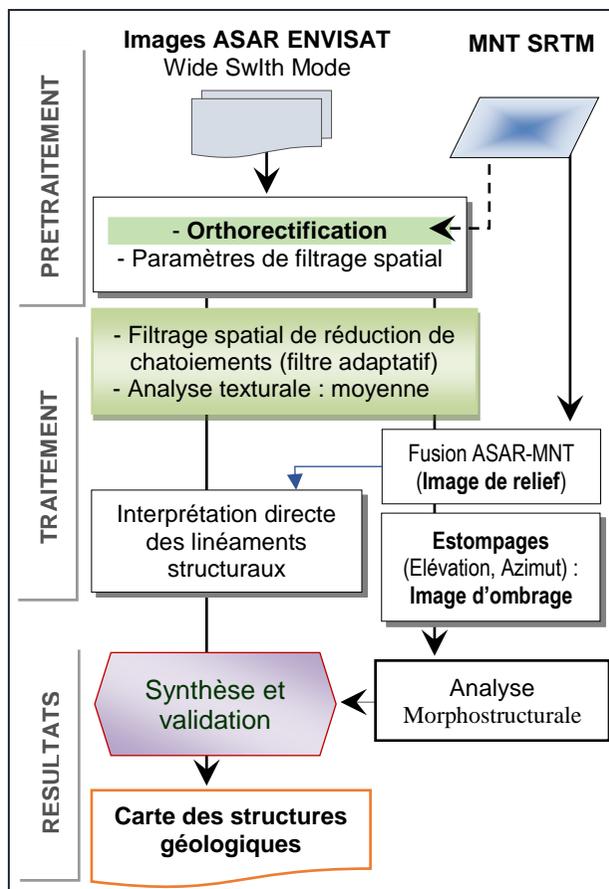


Figure 4. Processus de cartographie des structures géologiques par analyse morphostructurale

Prétraitement des images radar

Les images radar affectées par les distorsions dues aux variations topographiques du terrain et à l'inclinaison des capteurs du satellite sont corrigées par orthorectification : méthode "Range Doppler Terrain-correction" utilisant les données MNT (Small & Schubert, 2008). La projection cartographique a permis le passage de la géométrie image à la géométrie planimétrique UTM (zone 30 Nord) sur la base de l'ellipsoïde WGS84. Connaissant le nombre de vue ($L= 12$) de l'image d'amplitude radar, les paramètres du filtrage spatial pour la réduction des chatoiements dans les images sont calculés (Assoma *et al.*, 2011) : il s'agit des coefficients de variation ($Cv = 0,15$ et $Cv.max = 1,08$) conçus pour isoler la contribution du chatoiement (speckle) à la texture de l'image.

Traitement des données ASAR ENVISAT et MNT

Le filtre adaptatif de LEE amélioré (Lee *et al.*, 1994), de taille (5x5) utilisant ces paramètres de filtrage spatiale est appliqué pour éliminer les chatoiements et améliorer la radiométrie des images radar. A partir des données filtrées, une analyse de texture par cooccurrence (paramètre moyenne) a permis d'accentuer les contrastes dans les images pour faciliter la discrimination et le relevé des linéarités d'ordre structurale.

Le procédé d'estompage numérique consiste à mettre en évidence l'aspect de relief que l'image originale n'a pas, produit par simulation de sources lumineuses. La lumière est virtuellement réfléchi sur les flancs des montagnes et collines présentes sur l'image d'origine. Dans notre cas, l'image d'origine est une image de relief, produit de la combinaison ASAR-MNT. Les images d'ombrage issues de cette combinaison par estompage numérique produisent des attributs morphométriques suivant les paramètres d'angle d'illumination (angle d'élévation et en azimut) (Kaveh & Deffontaines, 2007 ; Assoma *et al.*, 2011). Ainsi, une série d'estompage (avec exagération verticale x10) est effectuée, utilisant des paramètres d'angle d'incidence en élévation (EL.) ou hauteur solaire et en Azimut (Az.) ou illumination du soleil. L'élévation elle-même est l'angle formé entre l'horizontale du point de réception et une ligne reliant ce point au satellite. L'azimut est l'angle formé par le nord géographique et la direction du satellite. Les estompages EL.= 45° et Az.= N045°E permettant de modéliser le relief du sud de la Côte d'Ivoire, sont retenus pour leur bonne discrimination des morpho-structures et autres attributs morpho-métriques.

Relevé des discontinuités structurales

Les discontinuités structurales sont la répercussion en surface des phénomènes géologiques d'ampleurs diverses et variables, nées à la suite des déformations (mégacycles orogéniques et tectoniques) qui ont affecté le socle précambrien sous-jacent. Ils traduisent la présence des phénomènes plus profonds et correspondent à des alignements observés sur le sol, à des changements topographiques, à des écoulements hydrographiques et à des alignements géologiques. L'identification des linéaments structuraux à partir des travaux de terrain étant très limitée à cause des difficultés d'accès, la télédétection représente alors un outil essentiel pour la cartographie des linéaments structuraux à partir des images numériques satellitaires, surtout en imagerie radar (Assoma *et al.*, 2011). Les variations de niveau de gris dans les images radar sont causées par plusieurs facteurs, entre autres le degré d'absorption du rayonnement qui varie fortement selon la nature des cibles éclairées, l'orientation de l'éclairage (angle d'incidence), l'inclinaison et l'élévation des surfaces observées.

Les variables géomorphologiques sont des témoins majeurs de l'évolution morphogénique du relief et peuvent servir à l'identification de certaines formes en géologie ainsi qu'à l'extraction des discontinuités morphostructurales (Bonnet & Colbeaux, 1999 ; Deffontaines, 2000). Les linéaments géologiques ont des descripteurs directs (failles, fractures, joints, contacts lithologiques, dykes, etc.) ou indirects (escarpements, talwegs, contrôle structural du tracé des cours d'eau, etc.) en rapport avec le modelé du relief (Kouamé *et al.*, 2006). Les changements brusques de niveau de gris qui sont en fait des discontinuités dans les images, rehaussent les structures linéaires d'ordre géologique. Les linéaments structuraux ont été relevés manuellement de manière directe sur les images ASAR traitées (filtrage spatial et analyse de texture) et sur les produits morphométriques et à partir des lithofaciès géologiques. Les structures fines, les formes et les linéaments structuraux sont bien perceptibles et leur relevé par numérisation vectorielle sous le logiciel ENVI-5.1 est facilité par simple observation visuelle des images.

Caractérisation des paramètres géométriques du réseau de fractures

La carte linéamentaire de la zone de socle du sud de la Côte d'Ivoire sert de trame à la détermination des paramètres géométriques du réseau de fractures. Le traitement statistique consiste à discriminer les familles de fractures sur la base de leur orientation à l'aide du logiciel Linwin 2.0, lequel a permis de discrétiser la carte de fracturation en mailles régulières de 16 km de côté. Cette maille qui correspond à la Surface Elémentaire Représentative (SER) ainsi définie est bien adaptée à l'étendue de la zone d'étude.

La relation mathématique établie entre les paramètres « nombre de fractures » et « longueurs cumulées de fractures » par maille permet de justifier si ces derniers révèlent la même information (intensité de la fracturation ou densité de fracturation) contenue dans le réseau de fractures. Les espacements entre les fractures sont déterminés à partir du module RAFESP du logiciel RAFRAC (Razack, 1984). La distribution de l'espacement des fractures dans l'espace est mise en évidence par le calcul du coefficient de variation C_v (Odling *et al.*, 1999). La géostatistique est utilisée pour reproduire la structure spatiale de la fracturation "tous azimuts", à partir de l'outil pertinent qu'est le variogramme. La variable étudiée est la densité de fracturation en longueurs cumulées par maille carrée de 16x16 km. Le logiciel VARIOWIN TM permet de réaliser l'analyse structurale.

Résultats

Cartographie des discontinuités structurales

L'exploitation combinée des images ASAR-WSM et du MNT a contribué favorablement à cartographier les discontinuités structurales du Sud

de la Côte d'Ivoire à partir de l'image de relief (**Figure 5**). Elle présente une variation de faciès des formations lithologiques permettant une meilleure discrimination des discontinuités structurales et lithologiques (contact des unités géologiques).

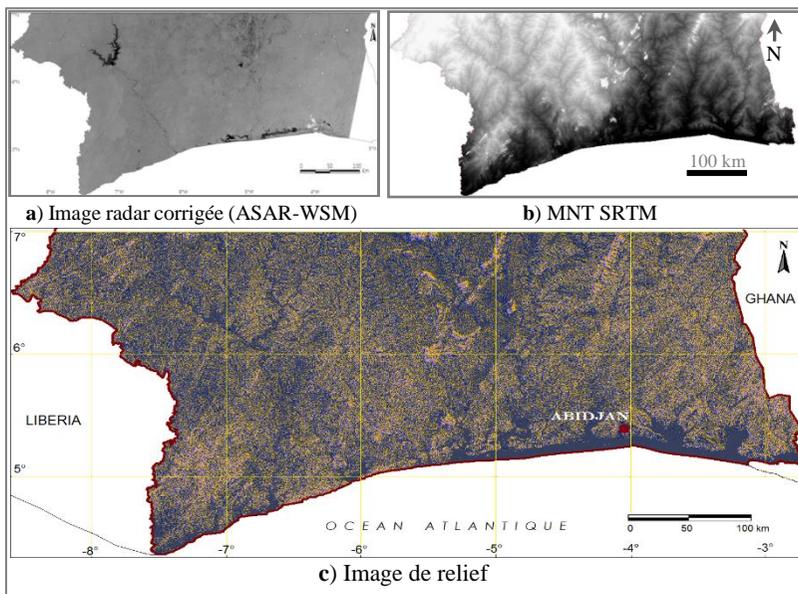
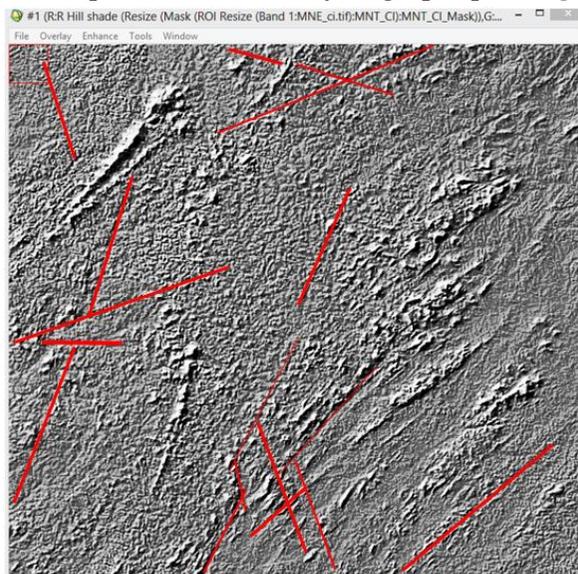
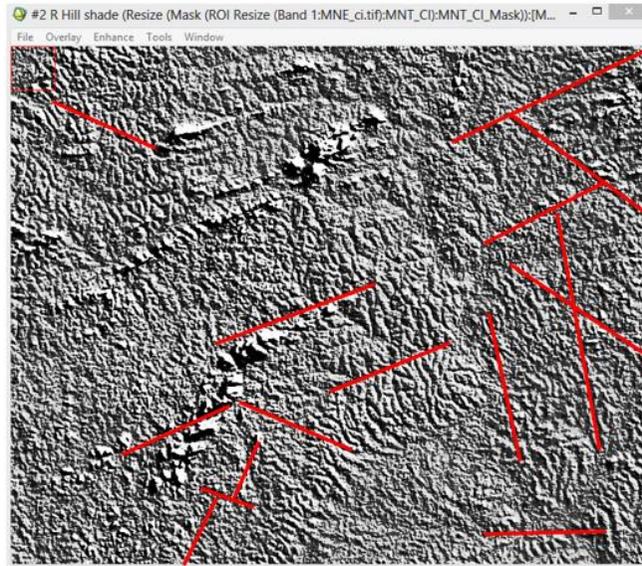


Figure 5.1 Génération d'image de relief du sud de la Côte d'Ivoire par fusion ASAR-MNT

L'analyse des images d'ombrage issues de l'estompage de l'image de relief, met en relief les accidents majeurs comme secondaires, de multiples attributs morphométriques, et le réseau hydrographique (**Figures 6 et 7**).



(a) Estompage : EL = 10°, AZ = N348°E (Zone San-Pédro au sud-ouest)



(b) Estompage : EL = 45°, AZ = N45°E (Zone Toulepleu - Danané, nord-ouest)
Figure 6. Images d'ombrage rehaussant les linéarités des structures géologiques

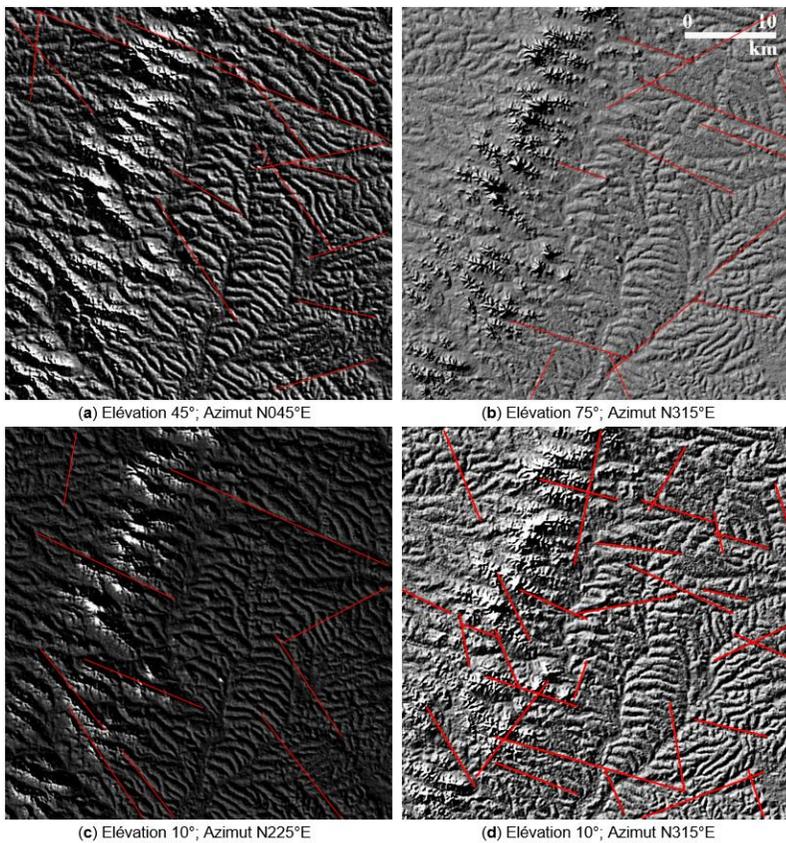


Figure 7. Extraits d'images d'ombrage illustrant les linéarités structurales

Les différentes structures sont très bien rehaussées et accentuées suivant les paramètres d'estompage (angle d'élévation et azimutal). Les estompages 45° en élévation et $N045^\circ E$ en azimut ont la propriété de bien discriminer les morphostructures. Les crêtes, les versants et les vallées du relief qui sont mis en exergue traduisent une bonne perception des ensembles morphostructuraux. Les détails des structures interprétées à partir des images d'ombrage ont permis d'enrichir la carte des linéaments structuraux de la moitié Sud de la Côte d'Ivoire. Le tracé détaillé des fractures a porté sur la zone de socle précambrien qui débouche sur le bassin sédimentaire côtier. Une texture lisse et moins rugueuse caractérise ce bassin sédimentaire, surtout les zones de dépression comme les sédiments du Quaternaire. Dans la procédure d'extraction des linéaments structuraux, les linéaments d'origine anthropique (réseaux routiers, lignes électriques, limites de parcelles agricoles et de forêts classées, etc.) sont éliminés de l'ensemble du réseau détaillé. Ainsi donc, les linéaments relevés ont fait l'objet d'une analyse minutieuse afin de distinguer les discontinuités structurales en relation avec les mouvements tectoniques ayant affecté le socle précambrien étudié.

La crédibilité accordée aux structures géologiques issues de la technique d'estompage est mise en évidence par le couplage de celles-ci au bâti structural antérieur issu de l'interprétation des données de photographies aériennes (**Figure 8**).

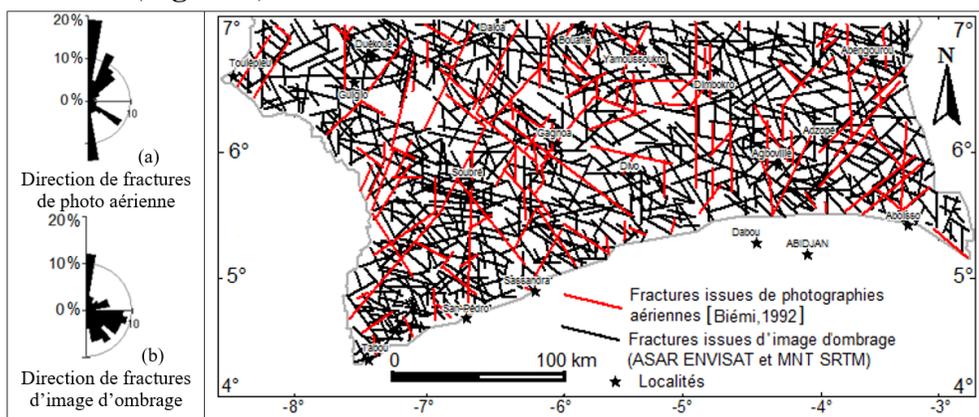


Figure 8. Validation des fractures de la zone de socle du Sud de la Côte d'Ivoire

Il s'établit plus ou moins une certaine similitude entre les fractures issues des deux supports différents. Une correspondance effective des fractures d'orientation N-S et $N120-130^\circ$ (rosaces directionnelles associées) est mise en relief. Le nombre important de fractures interprétées à partir des images d'ombrage traduit la pertinence des techniques d'estompage dans la cartographie des accidents structuraux. Cette phase de validation montre que les fractures extraites de l'ombrage d'image complètent bon nombre des

structures existantes pour la mise à jour cartographique des fractures en milieu de socle au sud de la Côte d’Ivoire. La **Figure 9** illustre la carte détaillée des fractures multi-kilométriques (5 à 100 km) de la moitié Sud de la Côte d’Ivoire interprétée par analyse morphostructurale.

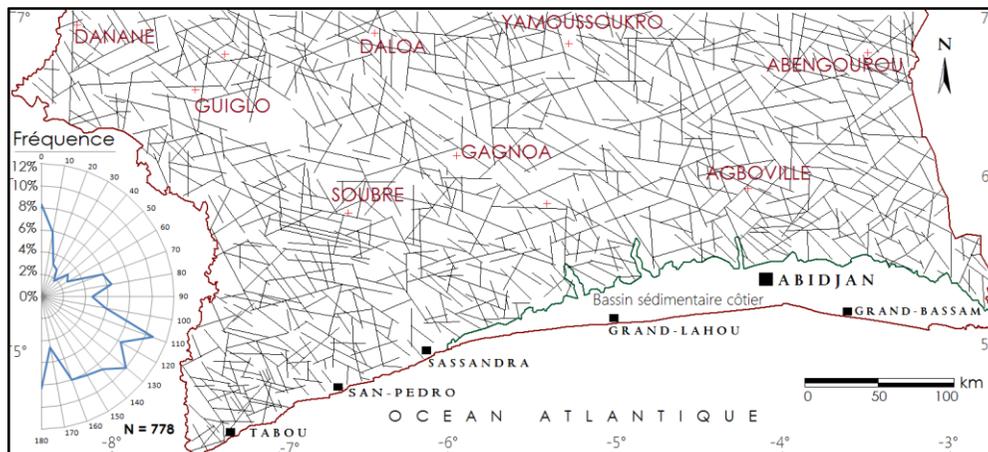


Figure 9. Carte de fracturation télanalytique du Sud de la Côte d’Ivoire issue de l’analyse morphostructurale d’image d’ombrage (ASAR et MNT)

L’ensemble des fractures au nombre de 778, de tailles et de directions différentes sont interconnectées, formant ainsi un réseau très dense assez représentatif à l’échelle de la zone d’étude. Cette carte de fracturation sert de support de traitement statistique et géostatistique de la fracturation. La classe directionnelle majoritaire des fractures, dont la fréquence est supérieure ou égale à 10% en nombre, sont N100-110° et N120-130°. Les fractures secondaires (de fréquence entre 8 et 10%) sont représentées par les classes directionnelles N00-10°, N110-120°, N130-140°, N140-150°, N150-160° et N170-180°. Les autres classes dont les fréquences sont inférieures à 8% sont considérées comme minoritaires. Les longueurs cumulées de fractures ont pour classe directionnelle majeure N100-110°. Il semble que les fractures les plus abondantes en nombre sont les plus longues.

Analyse statistique de la fracturation

Corrélation entre le nombre et longueurs cumulées de fractures

La relation qui existe entre le nombre de fractures (Nf) et les longueurs cumulées de fractures (Lc) par maille est illustrée à la **Figure 10**. La relation ainsi mise en évidence est de type linéaire positif d’équation : $Nf = 0,146 Lc + 0,995$. Le coefficient de corrélation linéaire ($R^2 = 0,54$) montre que les longueurs cumulées de fractures sont faiblement corrélées aux nombres de fractures par maille.

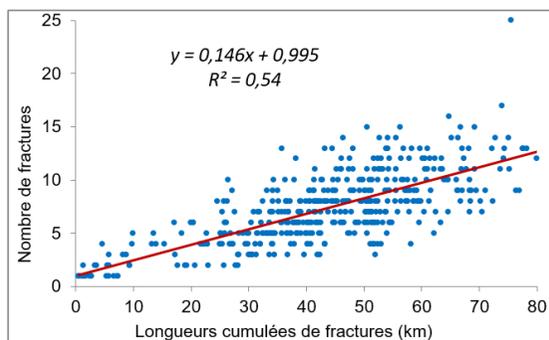


Figure 10. Relation entre le nombre de fractures et les longueurs cumulées de fractures

Caractéristiques des espacements de fractures

Le **Tableau 2** présente les caractéristiques des espacements de fractures "tous azimuts" et celles des fractures directionnelles.

Tableau 2. Caractéristiques des espacements de fractures tous azimuts et directionnelles

Fractures	Effectif	Moyenne (μ)(km)	Ecart-type (σ)	Minimum (km)	Maximum (km)	Coefficient de variation (Cv)
Globale	415	9,77	13,40	0,02	238,77	1,37
NS	40	57,53	66,95	1,93	328,84	1,16
EW	19	64,93	77,67	6,21	278,29	1,20
NE-SW	30	66,13	84,76	0,98	394,76	1,28
NW-SE	132	27,75	29,08	0,06	261,54	1,05

Le nombre total d'espacement des fractures déterminés varie de 19 à 415 avec un coefficient de variation ($Cv = \sigma/\mu$) supérieur à 1. Cela suggère que les fractures globales et les familles de fractures sont regroupées, en accord avec un modèle dit en amas. Les espacements de fractures tous azimuts mesurés varient entre 0,02 km et 238,77 km avec une moyenne de 9,77 km. Les valeurs comprises entre 9,05 km et 48,65 km ($9,05 < l < 48,65$) s'ajustent à une loi de puissance (**Figure 11**) d'équation : $N(l) = 57251 * l^{-2,82}$

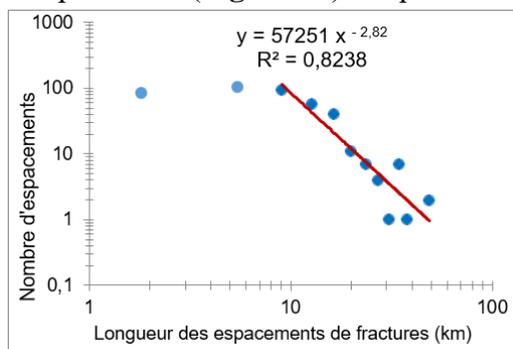


Figure 11. Diagramme bilogarithmique de la distribution des espacements de fractures : ajustement à une loi de puissance

Analyse géostatistique de la fracturation

Les paramètres de régionalisation sont présentés dans le **Tableau 3**. A l'analyse des écarts moyens quadratiques, il ressort que le modèle exponentiel est celui qui ajuste le mieux le variogramme expérimental de la fracturation tous azimuts.

Tableau 3. Paramètres de régionalisation de la fracturation tous azimuts de la zone d'étude

Modèle d'ajustement	Portée (a) (km)	Plateau (C) (km ²)	Plateau-pépité (C-Co) (km ²)	Effet de pépité (Co) (km ²)	Ecart moyen (km)
Sphérique	72,9	291	123	168	2,61.10 ³
Exponentiel	75,6	294	174	120	1,39.10³

La **Figure 12** illustre le variogramme expérimental de la fracturation tous azimuts, ajusté au modèle exponentiel. Le variogramme est structuré et présente une discontinuité à l'origine. Les paramètres de régionalisation de la fracturation globale permettent d'établir l'équation suivante après ajustement au modèle exponentiel : $\gamma(h) = 174 (1 - \text{Exp}(-h / 75,6)) + 120$.

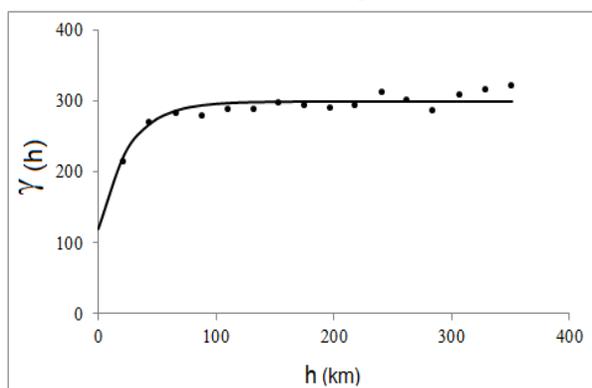


Figure 12. Variogramme de la fracturation tous azimuts ajusté au modèle exponentiel

Le variogramme modélisé de la fracturation tous azimuts, présente les caractéristiques suivantes :

- existence d'un palier ou plateau d'une valeur de 294 km², autour de laquelle se stabilise le variogramme ;
- existence d'une portée ou distance de régionalisation de 75,6 km à partir de laquelle le palier est atteint. C'est la valeur d'auto-corrélation, c'est-à-dire qu'il y a corrélation spatiale pour les couples de points distants de moins de 75,6 km ;
- existence d'un effet de pépité de 120 km², qui représente la discontinuité à l'origine. Ceci témoigne de l'irrégularité locale de ce paramètre.

La fracturation tous azimuts se comporte donc comme une Variable Régionalisée.

Discussion

La caractérisation des structures géologiques à partir de la technique d'images d'ombrage ASAR ENVISAT et du MNT SRTM prend en compte à la fois le signal radar rétrodiffusé et la géomorphologie. Cette approche permet sans aucun doute de cartographier les différentes hydrostructures, les morphostructures et les structures morphométriques (Assoma *et al.*, 2011). Elle optimise la mise en évidence des structures et améliore considérablement l'actualisation de la carte de fracturation de la moitié Sud de la Côte d'Ivoire. L'une des difficultés de cette approche est cependant liée à l'identification précise des signatures de rétrodiffusion radar des faciès lithologiques des scènes ASAR, pouvant permettre la discrimination de contour des formations géologiques.

La densité élevée du réseau de fractures de la zone d'étude traduit certainement l'influence des intenses activités tectoniques subies par les formations géologiques et qui ont prévalu dans cette partie de la Côte d'Ivoire. Le nombre de fractures obtenu n'est certes pas exhaustif, mais la carte de fracturation est représentative de la zone étudiée. Cette dernière constitue un document de base pour des campagnes de prospection et d'implantation des forages d'hydrauliques villageoises améliorées à haut débit dans le cadre de l'alimentation en eau potable pour la population, à condition de cibler les fractures d'extension kilométriques et/ou les croisements de fractures (Biémi, 1992 ; Savané, 1997 ; Koudou *et al.*, 2013b).

La relation qui existe entre le nombre de fractures et les longueurs cumulées de fractures est mise en évidence par le coefficient de corrélation linéaire ($R^2 = 0,56$) qui traduit une certaine dispersion des fractures. Le nombre de fractures est faiblement corrélé aux longueurs cumulées de fractures. Ces deux paramètres n'apportent pas des informations similaires soit au même point de mesure, soit en certains points de la zone d'étude. L'analyse conjointe de ces deux paramètres est donc à même de permettre une meilleure connaissance du système de fractures de la zone d'étude (Youan Ta, 2008).

La loi de distribution des espacements de fractures reste très controversée dans la littérature. La connaissance de celle-ci est susceptible de fournir des informations sur la genèse et l'évolution des systèmes de fractures (Huang & Angelier, 1989 ; Narr & Suppe, 1991). Dans le cadre de cette étude, les espacements de fractures de la zone de socle du sud s'ajustent mieux à la loi de puissance. Des résultats similaires ont été trouvés par divers auteurs (Lasm, 2000 ; Jourda, 2005 ; Youan Ta *et al.*, 2008 ; Zazoun, 2008 ; Koudou *et al.*, 2013a).

La présence d'une structure dans l'arrangement des fractures est mise en évidence à partir de l'étude géostatistique. Le variogramme expérimental de la fracturation globale présente une discontinuité à l'origine due à l'action combinée des hétérogénéités spatiales à plus petite échelle et à des incertitudes

de mesure (Lasm, 2000). La variable étudiée est très irrégulière et présente une discontinuité à l'origine qui est un phénomène couramment rencontré dans l'analyse géostatistique des milieux fracturés (Lasm, 2000).

Conclusion

L'analyse morphostructurale d'images d'ombrage à partir des données ASAR ENVISAT et du modèle numérique de terrain (MNT) permet d'optimiser la mise en évidence des structures géologiques et d'améliorer considérablement l'actualisation de la carte de fracturation de la moitié sud de la Côte d'Ivoire. Cette approche se base à la fois sur le signal radar rétrodiffusé, la géomorphologie et la vision synoptique. Il ressort de l'étude que le nombre de fractures de la zone de socle du Sud de la Côte d'Ivoire est estimé à 778. Les fractures de direction N100-110° représentent la classe directionnelle majeure et sont les plus longues. Les fractures de la zone socle du Sud sont regroupées en accord avec un modèle dit en amas. Les espacements de fractures s'ajustent mieux à la loi de puissance. L'analyse géostatistique montre que le variogramme de la fracturation globale caractérisé par un palier, une portée et un effet de pépite, est spatialement bien structuré. La densité de fracturation en longueurs cumulées s'identifie donc à une Variable Régionalisée. La caractérisation des fractures de la zone de socle du Sud de la Côte d'Ivoire n'apporte certes pas de justification en ce qui concerne leur possibilité à former de bons réservoirs d'eaux souterraines, mais les fractures cartographiées représentent un véritable document de base pour les campagnes de prospection et d'implantation des forages d'hydrauliques villageoises améliorées.

References:

1. Assoma V.T., Kouamé K.F., Rudant J.P., Biémi J. (2011). Réduction du chatoiement et apport des données ASAR ENVISAT et MNT SRTM à la cartographie hydrostructurale du bassin côtier de l'Agnéby (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *PHOTO-INTERPRETATION European Journal of Applied Remote Sensing*, n°2011/4, vol. 47, pp. 88-99.
2. Assoma V.T., Kouamé K.F., Saley M.B. (2013). Using Remote Sensing Data and a Fluid Flow Model for Groundwater Exploration in Fractured Rock of Koué Watershed (Western of Cote d'Ivoire). *International Journal of Engineering Sciences*, vol. 2, n°10, pp. 454-462.
3. Bessoles B. (1977). Géologie de l'Afrique : Le craton Ouest-Africain. Mém. BRGM, n°88, 402 p.
4. Biémi, J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique,

- hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat ès Sci. Nat., Faculté des Sciences et Techniques, Univ. Nationale de Côte d'Ivoire, 493 p.
5. Biémi, J., Gioan, P., Affian, K., Jourda, J.-P. & Kouamé, K.F. (1998). Système d'informations hydrogéologiques pour une évaluation des potentialités hydriques en milieu cristallophyllien fissuré : la région de Biankouma-Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). pp. 261-270. *In* La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes. Ed. AUPELF/UREF, 356 p.
 6. Bonnet, T. & Bolbeaux, J.P. (1999). L'analyse morphologique spatialisée : apports d'une méthode à la détection des accidents, une nécessité dans l'approche hydrodynamique et karstologique des aquifères fissurés. Exemples dans le Nord de la France crayeux. *Geodinamica Acta*, vol. 12, n°3-4, pp.223-235.
 7. Deffontaines, B. (2000). Formes et déformations de la surface terrestre : approche morphométrique et application. Thèse d'habilitation à diriger la recherche, Université Pierre et Marie Curie, Paris, pp.65.
 8. Guillaumet, J.L. & Adjanohoun, E. (1971). Milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Vegetation de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM N°50, pp.163-391.
 9. Haveh, H.F. & Deffontaines, B. (2007). Photo-interprétation du modèle numérique de terrain SRTM, pour l'étude des directions privilégiées de percolation (site de Bursa, Turquie). *PHOTO-INTERPRETATION*, n° special, pp. 115-121.
 10. Huang, Q. & Angelier, J. (1989). "Fracture spacing and its relation to bed thickness". *Géol. Mag.*, Vol.4, n°126, pp. 355-362.
 11. Jourda, J.P. (2005). Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'ouest. Concept de l'Hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 429 p.
 12. Jourda, J.P.R., Saley, M.B., Djagoua, E.V., Kouamé, K.J., Biémi, J. & 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 Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation. *TELEDETECTION*, Vol. 5, n°4, pp.339-357.
 13. Kouamé, K., Adja, M. G., Saley, M. B., & Jourda, J.-P.R. (2013). Réalisation d'une image pseudo-panchromatique RSO de Radarsat-1

- pour la cartographie lithostructurale du socle précambrien dans la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 2, n°4, pp. 392-411.
14. Kouamé, K.F., Penven, M.J., Kouadio, B.E., Saley, M.B., & Gronayes, C.C. (2006). Contribution des images d'aster de terra et d'un modèle numérique d'altitude à la cartographie morphostructurale du massif des Toura (ouest de la côte d'ivoire). *TELEDETECTION*, vol. 6, n°2, pp.103-121.
 15. Kouamé, K.F. (1999). Hydrogéologie des régions de montagne : apport des données de télédétection et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale des aquifères discontinus du secteur Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse Doct., Univ. Cocody, Abidjan, 210 p.
 16. Kouamé, K.F., Gioan, P., Biémi, J. & Affian, K. (1999). Méthode de cartographie des discontinuités images extraites d'images satellitales (exemple de la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire). *TELEDETECTION*, vol. 1, n°2, pp. 139-156.
 17. Kouamé, K.F., Lasm, T., Saley, M.B., Tonyé, E., Bernier, M. & Wade, S. (2009). Extraction linéamentaire par morphologie mathématique sur une image RSO de Radarsat-1 : application au socle Archéen de la Côte d'Ivoire. Journées d'Animation Scientifique AUF (JAS 09), Alger 8-11 Novembre 2009, 8 p.
 18. Koudou, A., Adiaffi, B., Assoma, T.V., Sombo, A.P., Amani, E.M.E., & Biémi, J. (2013b). Conception d'un outil d'aide à la décision pour la prospection des eaux souterraines en zone de socle du Sud-Est de la Côte d'Ivoire. *Geo-Eco-Trop.*, Vol.37, n°2, pp. 211-226.
 19. Koudou, A., Assoma, V.T., Adiaffi, B., Youan Ta, M., Kouame, K.F., & Lasm, T. (2014). Analyses statistique et géostatistique de la fracturation extraite de l'imagerie Asar Envisat du sud-est de la Côte d'Ivoire. *Larhyss Journal*, n°20, pp. 147-166.
 20. Koudou, A., Lasm, T., Kouame, K.F., Youan Ta, M., Assoma, T.V, & Biemi, J. (2013a). Contribution des images ASTER à la connaissance des aquifères fracturés de la région de Duékoué (Ouest de la Côte d'Ivoire). *PHOTO-INTERPRÉTATION European Journal of Applied Remote Sensing*, n°2012/4, pp. 48-66.
 21. Lasm, T. (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen). Thèse Unique de Doctorat, Université de Poitiers, 272 p.
 22. Lasm, T., Kouamé, K.F., Soro, N., Jourda, J. P. R., & Biémi, J. (2004).

- Analyse géostatistique de la fracturation extraite de l'imagerie spatiale aéroportée et satellitaire. Application à la région de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologiques*, 5, pp.135-154.
23. Lee, J.S., Hoppel, K.W., Mango, S.A., & Miller, A. (1994). Intensity and phase statistics of multilook polarimetric interferometric SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, n°32, pp.1017-1028.
 24. Narr, W. & Suppe, J. (1991). "Joints spacing in sedimentary rocks". *J. Struct. Geol.*, Vol. 13, n°9, pp. 1037-1047.
 25. Odling, N., Gillepsie, P. A., Bourguine, B., Castaing, C., Chilès, J. P., Christensen, N. P., Fillion E., Genter, A., Olsen, C., Thrane, L., Trice, R., Aarseth, E., Walsh, J. J., & Watterson, J. (1999). Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractured hydrocarbon reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 5, pp. 373-384.
 26. Razack, M. (1984). Application des méthodes numériques et statistiques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés en hydrogéologie. Thèse d'Etat, Univ. Sc. et Tech., Languedoc, 384p.
 27. Savane, 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 (S.I.H.R.S.). Thèse Université d'Abidjan, 386 p.
 28. Small, D. & Schubert, A. (2008). Guide to ASAR Geocoding. RSL-ASAR-GC-AD, Issue 1.
 29. Youan Ta, M., Lasm, T., Jourda, J.P., Kouamé, K.F., & Razack, M. (2008). Cartographie structurale par imagerie satellitaire ETM+ de Landsat-7 et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte-d'Ivoire). *TÉLÉDÉTECTION*, vol. 8, n°2, pp. 119-135.
 30. Zazoun, R.S. (2008). The Fadnoun area, Tassili-n-Azdjer, Algeria: Fracture network geometry analysis. *Journal of African Earth Sciences*, 50 (5), pp. 273-285.