

Extraction automatique des linéaments à l'aide d'images satellitaires optique et radar en milieu de socle précambrien (Haute Marahoué, Côte d'Ivoire)

Adon Gnangui Christian¹, Oularé Sekouba², Kouamé Kassi Alexis², Saley Mahaman Bachir^{1,2}, Kouamé Koffi Fernand^{1,2}

¹(Centre Universitaire de Recherche d'Application en Télédétection (CURAT)/ Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire)

²(Département des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de l'Environnement (DSTEGE)/ Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire)

Corresponding Author: Adon Gnangui Christian

Abstract: Dans l'objectif de contribuer à une meilleure connaissance de l'état de fracturation des aquifères en zone de socle précambrien, la méthode automatique est appliquée afin d'extraire les linéaments de manière objective, à l'aide du module LINE de PCI Geomatica. Les images satellitaires issues des capteurs ETM+ de Landsat-7 et radar RSO de RADARSAT-1, ont servi à optimiser la détection des linéaments au niveau de la Haute Marahoué. Différents traitements tels que les ACP, les indices normalisés et les filtres adaptatifs ont été appliqués aux images satellitaires, afin de rehausser les informations pour une meilleure extraction des linéaments à travers le module LINE. Les résultats obtenus mettent en évidence que l'image RSO issue du filtre adaptatif de Frost de taille 7x7 et la bande ETM+7 de l'InfraRouge Moyen (IRM) sont les mieux adaptées pour extraire le maximum de linéaments en zone de socle précambrien. Aussi, la bande ETM+4 du Proche InfraRouge (PIR) a été choisie comme complémentaire à l'ETM+7 de l'IRM afin de faire ressortir les linéaments non détectés par cette dernière, car ces deux bandes sont faiblement corrélées. L'analyse des directions préférentielles des linéaments issus de ces trois images (RSO Frost 7x7, ETM+7 et ETM+4) a mis en évidence trois directions préférentielles : N-S (N0-20°; N160-170°) ; E-W (N70-100°) et NE-SW (N30-50°). Ces structures linéaires ont fait l'objet d'une validation par confrontation de leurs directions préférentielles avec ceux des travaux antérieurs, et sont en conformité avec les événements tectono-métamorphiques de la zone d'étude, démontrant ainsi la robustesse du module LINE de PCI. L'ajustement des longueurs de linéaments suivant la loi de puissance a mis en évidence la bonne connectivité du réseau de fractures assurées par les fractures de petites tailles. Ainsi, l'approche automatique par sa capacité à uniformiser l'analyse des différents types d'images, permet d'optimiser la cartographie des structures linéamentaires. Ces linéaments automatiques permettent de caractériser l'état de fracturation du socle de la Haute Marahoué. Intégrés dans un Système d'Information à Référence Spatiale comme critère de décision, ils permettront de cartographier les zones de Productivité Et De Vulnérabilité Des Aquifères De Socle.

Keywords - Linéaments, Module LINE de PCI, Landsat ETM+, Radarsat RSO, Côte d'Ivoire.

Date of Submission: 21-12-2018

Date of acceptance: 05-01-2019

I. Introduction

Les éléments linéaires à la surface de la terre ont, de tout temps attiré, l'attention des géologues, qui ont prouvé que les linéaments perçus dans les images issues de la télédétection sont des indicateurs fiables de la structure géologique [1], [2]. Les linéaments sont définis comme des structures linéaires apparaissant à la surface de la terre sous la forme de discontinuités dans le relief ou dans la couverture du sol. À l'origine le terme "linéament" a été proposé pour désigner les lignes significatives du paysage causées par les cassures et failles relevant de l'architecture du socle rocheux [3]. Ces linéaments s'associent à des éléments structuraux comme les failles, les fractures, les axes de plissements et les contacts lithologiques. Plusieurs travaux, dans différents contextes géologiques, ont permis de montrer que ces structures linéaires sont des indicateurs fiables pour l'exploration des eaux souterraines [4], [5], [6], [7]. Ces différents travaux ont mis en évidence que les linéaments identifiés en surface sont de véritables conduits des eaux souterraines dans les aquifères fracturés [8].

En Côte d'Ivoire, les principales ressources en eaux souterraines étant situées dans les roches fissurées du socle précambrien, les différents travaux se sont principalement axés sur la cartographie des linéaments pour une meilleure exploration hydrogéologique. Ces études exposent une méthodologie assez commune, basée

principalement sur l'imagerie satellitaire optique TM/ETM+ de Landsat, permettant d'extraire les linéaments par photo-interprétation [9], [10], [11], [12]. Ces images optiques, bien qu'elles permettent de caractériser l'état de la surface du sol, ne satisfont pas toujours à une observation optimale des structures linéamentaires en milieu tropical, en raison du couvert nuageux et pédo-végétal. Fondés tous sur l'interprétation visuelle et le relevé manuel des linéaments, les résultats de ces travaux dépendent fortement de l'analyste, notamment en fonction de son expérience, de son habileté et de l'échelle du support étudié. Afin de minimiser les biais causés par la photo-interprétation, l'approche automatique peut être adoptée pour rendre fiable le réseau linéamentaire extrait des images [13], [14]. Ce type de traitement permet de réduire la subjectivité et le temps nécessaire à l'analyse des images par interprétation visuelle, dont les résultats sont rarement reproductibles à l'identique. Plusieurs algorithmes ont ainsi été développés pour l'extraction automatique des linéaments, faisant appel aux images satellitaires et aux modèles numériques de terrain. Parmi ces algorithmes, seul le module LINE (LINEaments Extraction) est intégré dans le logiciel PCI Geomatica, ce qui le rend populaire dans les études géologiques pour la détection automatique des linéaments. Ce dernier offre des résultats satisfaisants avec les données optiques et radars prises séparément, pour les études géologiques [15].

Ainsi, dans le but de contribuer à une meilleure connaissance de l'état de fracturation des hydrosystèmes dans les aquifères du socle précambrien, l'extraction automatique des linéaments à l'aide du module LINE de PCI est appliquée aux images optique ETM+ de Landsat-7 et radar RSO de RADARSAT-1. L'exploitation synergique de l'imagerie radar qui met en évidence les détails structuraux de surface, et des images optiques qui fournissent des informations spectrales détaillées utiles pour différencier plusieurs types de surfaces, permettra d'optimiser l'extraction des structures linéamentaires.

II. Cadre D'étude Et Contexte Géologique

L'hydrosystème de la Haute Marahoué (12 457 km²) est situé au Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest), et est compris entre les longitudes 6°00 et 7°00 Ouest et les latitudes 7°45 et 9°30 Nord (Fig. 1a). Cet hydrosystème est sous l'influence du régime tropical de transition (1300 mm/an) et a pour cours d'eau principal la Marahoué. Son relief peu accidenté se présente comme une pénéplaine dont l'altitude varie en moyenne entre 450 m au Nord et 250 m au Sud, et est principalement occupé par des savanes de types arbustives et arborées, et par des forêts claires et galeries.

La géologie de cette zone, fait partie intégrante du domaine Baoulé-Mossi, et est constituée de deux formations géologiques d'âge birimien (2400-1800 Ma) : (i) un ensemble volcano-sédimentaire représenté par les méta-arénites dominant sur métasiltites et les métavolcanites ; (ii) un ensemble de roches intrusives constitué de granitoïdes essentiellement métamorphisés (Fig.1b). L'événement tectono-métamorphique majeur affectant l'ensemble de ces formations d'âge paléoprotérozoïque est appelé "cycle éburnéen". Ces unités géologiques ont été déformées et fracturées par les différents événements tectoniques, aboutissant ainsi à la mise en place dans ces roches d'une fracturation développée, favorable aux écoulements et à la mobilisation des ressources en eaux souterraines. Cet aquifère discontinu est surmonté par une couche d'altérite meuble, dont l'épaisseur variable à l'échelle régionale se situe entre 0 et 50 m, et est fonction du degré de fracturation, de la nature pétrographique de la roche mère, ainsi que de l'érosion des profils d'altération. Sa base située à plus de 100 m de profondeur, est constituée d'un substratum rocheux sain qui n'est perméable que très localement là où il est affecté par des fractures, le plus souvent subverticales. Les différents types d'aquifères présents au niveau du bassin de la Haute Marahoué sont : les aquifères des altérites développés sur schistes ou sur granitoïdes, les aquifères des séries volcano-sédimentaires qui sont des complexes schisteux et les aquifères des séries granito-migmatiques généralement fissurés ou fracturés.

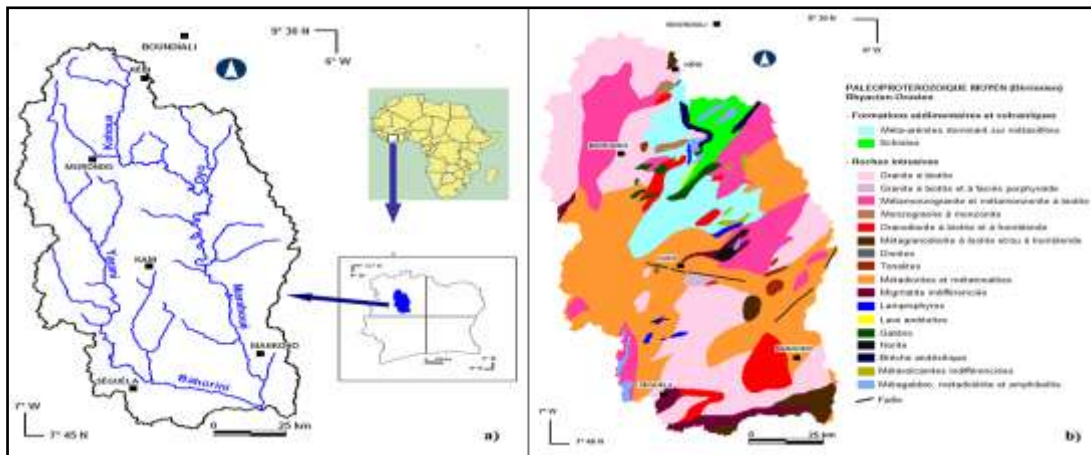


Fig. 1 : Présentation de la Zone d'étude. a) Localisation et b) Géologie de l'hydrosystème de la Haute Marahoué

III. Données Et Méthodes

3.1 Données et outils de traitements

Les données utilisées pour l'extraction des linéaments sont issues des images satellitaires optiques orthorectifiées composées de trois scènes ETM+ de Landsat-7 (197-054 du 16/12/2000, 197-055 du 20/01/2002, et 198-054 du 10/12/2001) acquises en saison sèche sans couverture nuageuse ; et de l'image RSO de Radarsat-1 acquise en 2001 en mode descendant. Les caractéristiques de ces deux types de capteurs sont détaillées dans le tableau I. Les différents prétraitements et traitements ont été exécutés au moyen du logiciel ENVI. Le logiciel PCI Geomatica à travers son module LINE a été utilisé pour l'extraction automatique des linéaments. Enfin, le logiciel ArcGIS a servi à extraire les paramètres statistiques des linéaments (nombre et longueur) et à réaliser les rosaces directionnelles par fraction angulaire de 10 degrés.

Tableau I : Caractéristiques des capteurs ETM + de Landsat-7 et RSO de Radarsat-1

	LANDSAT-7	RADARSAT-1	
Pays	États-Unis	Canada	
Année	1999	1995	
Altitude	705 km	793 km	
Capteurs	ETM (Enhance Thematic Mapper)	RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture)	
Caractéristiques spectrales	Visible	ETM 1 (0,45-0,52µm)	
		ETM 2 (0,52-0,60 µm)	
		ETM 3 (0,63-0,69 µm)	
	PIR	ETM 4 (0,75-0,95 µm)	Bande C
	IRM	ETM 5 (1,55-1,75 µm)	Fréquence : 5,3Ghz
		ETM 7 (2,09-2,35 µm)	
	IRT	ETM 6 (10,4-12,5 µm)	Longueur d'onde : 5,66 cm
PAN	ETM 8 (0,52-0,90 µm)	Polarisation : HH	
Resolution spatiale	Visible, PIR et IRM : 30 m IRT: 60 m, Pan: 15 m	Mode SCANSAR résolution : 50 m	

3.2 Algorithme LINE de PCI

L'extraction des linéaments à l'aide de l'algorithme LINE de PCI s'effectue sur une seule bande spectrale et génère des polygones et segments, en se basant sur 06 paramètres (Tableau II) : RADI (Radius of filter in pixels), GTHR (Threshold for edge gradient), LTHR (Threshold for curve length), FTHR (Threshold for line fitting error), ATHR (Threshold for angular difference) et DTHR (Threshold for linking distance). Cette procédure basée sur l'algorithme de Canny se déroule en 3 étapes. La détection des contours constitue la première étape et permet d'éliminer les bruits de l'image par application d'un filtre à fonction gaussienne dont le noyau est donné par le paramètre RADI. La deuxième étape consiste à un seuillage pour obtenir une image binaire, la valeur seuil est donnée par le paramètre GTHR. Et la troisième étape consiste à l'extraction des courbes, elle est subdivisée en 3 phases : (1) un rehaussement est appliqué à l'image binaire pour produire des courbes squelettiques, toutes les courbes inférieures à la valeur du paramètre LTHR sont éliminées suite aux traitements ; (2) la courbe de pixel extraite est convertie en format vectoriel par ajustement des morceaux de segments, les polygones qui en résultent sont une approximation de la courbe de pixel original ou l'erreur de montage (distance entre les deux) est spécifiée par le paramètre FTHR ; (3) enfin, l'algorithme lie les paires de polygones qui satisfont aux paramètres ATHR et DTHR.

Tableau II : Description des paramètres du module LINE de PCI

Nom	Description	Procédure
RADI	Taille du filtre gaussien	Indique la taille de la fenêtre du filtre gaussien utilisé pour la détection des contours. Une valeur élevée signifie que moins de détails peuvent être détectés.
GTHR	Gradient seuil de bord	Indique la valeur minimale de gradient seuil pour un pixel de bord, afin de générer une image binaire
LTHR	Longueur seuil	Indique la longueur minimale en pixel des linéaments
FTHR	Seuil de montage	Précise l'erreur maximale en pixel entre un polygone et une courbe. Une faible valeur permet un meilleur ajustement, mais produit plus de polygone
ATHR	Seuil angulaire	Précise l'angle maximale en degré entre un segment et un polygone pour différencier un segment d'un polygone.
DTHR	Seuil d'espacement	Spécifie la distance minimale en pixel entre deux points finaux constituant un segment, susceptible d'être relié.

3.3 Méthodes

La phase préliminaire du traitement des images satellitaires orthorectifiées a consisté, avant le mosaïchage des 03 scènes ETM+, en un rééquilibrage des contrastes par étalement dynamique et harmonisation

des histogrammes des scènes présentant des contrastes très différents dus aux dates d'acquisitions, et à un ré-échantillonnage des images ETM+ et RSO à 30 m de résolution. Différents traitements ont été appliqués sur ces images prétraitées afin de rehausser la perception des structures linéaires, notamment l'Analyse en Composition Principale (ACP) et l'indice normalisé, pour les images ETM+, et les filtres adaptatifs pour les images RSO.

L'ACP est une technique efficace qui permet d'accentuer les images multi-spectrales pour des interprétations géologiques fines [16], car elle permet de réduire l'information contenue dans plusieurs bandes, parfois hautement corrélées (redondance des informations spectrales) en un nombre plus restreint de composantes. Quant à l'indice normalisé, il permet de rehausser les informations spectrales au niveau de deux bandes spectrales, afin de mettre en évidence des structures particulières [17] ; de plus le calcul d'un rapport de bandes minimise les effets causés par le relief et par les perturbations atmosphériques. Ces deux techniques ont été appliquées aux images ETM+, en se référant aux indices de corrélation des bandes ETM+. Le tableau III souligne l'existence d'une forte corrélation entre les sept bandes ETM+, excepté entre les bandes ETM+4 avec ETM+6 et ETM+7. L'application de ces techniques de rehaussement en fonction de la corrélation des bandes ETM+ permettra d'optimiser l'extraction des linéaments.

Tableau III : Matrice de corrélation des images ETM+ de Landsat-7

	ETM+1	ETM+2	ETM+3	ETM+4	ETM+5	ETM+6	ETM+7
ETM+1	1,00	0,91	0,93	0,67	0,84	0,78	0,82
ETM+2		1,00	0,93	0,65	0,90	0,77	0,86
ETM+3			1,00	0,63	0,92	0,86	0,92
ETM+4				1,00	0,60	0,41	0,47
ETM+5					1,00	0,76	0,93
ETM+6						1,00	0,83
ETM+7							1,00

Concernant, le rehaussement de l'image RSO les filtres adaptatifs de Lee et de Frost, ont permis de réduire le bruit par lissage de l'information, tout en conservant la précision des formes pour une meilleure détection des structures linéaires. L'application de ces deux filtres selon différentes tailles de fenêtres permettra de mettre en évidence le maximum de linéaments par la méthode automatique.

Après le rehaussement des images ETM+ et RSO, à l'aide du logiciel ENVI, les images sont exportées vers le logiciel PCI Geomatica pour l'extraction des linéaments. Les paramètres du module LINE ont été fixés afin d'optimiser l'extraction automatique des linéaments en zone de socle précambrien en se référant aux travaux de [18]. La taille du filtre gaussien représentée par le RADI est fixée à 20 pixels pour accentuer les discontinuités des images, et le GTHR est fixé à 90 pixels pour l'obtention de l'image binaire. Les courbes de pixels (linéaments) sont extraites de l'image à contour binaire, et converties en format vectoriel avec comme critères de connectivité : LTHR = 50 pixels (1,5 km) ; FTHR = 10 pixels (0,3 km) ; ATHR = 15° et DTHR = 100 pixels (3 km) pour tenir compte du caractère continu des linéaments.

Différents travaux ont montré que les longueurs de fractures ont une distribution qui s'ajuste selon la loi de puissance [19], [20], [21]. Dans cette étude, afin de décrire la distribution des fractures issues de l'extraction automatique des linéaments, la loi de puissance a été ajustée aux longueurs de fractures.

IV. Résultats Et Discussion

4.1 Évaluation des linéaments extraits automatiquement

Le tableau IV présente les nombres et longueurs totales des linéaments issues des canaux et néo-canaux retenus pour l'extraction.

Tableau IV : Paramètres statistiques des linéaments

	Canaux et néo-canaux	Nombre de linéaments	Longueur Totale (km)
Images optiques	ETM+7	3 926	15 847,81
	1CP ₃₄₅₇	3 797	14 843,90
	INDICE ₇₄	3 781	14 809,80
	1CP ₁₋₇	3 678	14 393,67
	2CP ₁₋₇	3 003	11 451,87
	ETM+4	3 011	11 427,91
	2CP ₃₄₅₇	2 983	11 229,37
Images radars	RSO (Frost 7×7)	4 642	19 488,37
	RSO (Lee 7×7)	4 571	19 474,16
	RSO (Lee 9×9)	4 553	19 382,36
	RSO (Frost 9×9)	4 580	19 222,26
	RSO	4 417	18 297,45

L'analyse de ces résultats fait nettement ressortir que les images issues du capteur radar RSO produisent plus de linéaments que celles issues du capteur optique ETM+. Au niveau des images ETM+, on note que l'ETM+7, l'indice normalisé $(ETM+7 - ETM+4)/(ETM+7 + ETM+4)$ noté $INDICE_{74}$ et les 1^{ères} Composantes Principales des bandes ETM+3-4-5 et 7 (1CP₃₄₅₇) fournissent respectivement les meilleures cartes en terme de quantité de linéaments par rapport à la bande ETM+4 et aux 2^{es} Composantes Principales (2CP). La bande ETM+7, destinée aux applications géologiques contient l'essentiel des informations permettant de détecter le maximum de linéaments, quant aux 1CP₁₋₇ (issue des bandes ETM+1 à ETM+7) et 1CP₃₄₅₇ elles regroupent le maximum d'informations spectrales des bandes utilisées, et sont respectivement de 82,04 % et 76,42 %, contre 09,70 % pour la 2CP1-7 et 17,00 % pour la 2CP3457. Au niveau du capteur RSO, on observe que les images issues des filtres adaptatifs produisent plus de linéaments que l'image RSO non filtrée, avec de meilleurs résultats pour les filtres de petite taille. On remarque ainsi que le filtre de Frost 7x7 est meilleur que celui de Lee 7x7. Par contre, pour des matrices de taille 9x9, le filtre de Lee est meilleur que celui de Frost.

Ces différents résultats illustrent l'aptitude des images satellitaires ETM+ et RSO, à extraire de manière automatique le maximum de linéaments à l'aide du module LINE de PCI, en fonction des différents techniques de rehaussement. De cette évaluation, les images ETM+7 (Fig. 2a) et ETM+4 (Fig. 2b) ont été retenues pour leurs particularités spectrales pour la mise en évidence de l'état global de la fracturation du socle de la Haute Marahoué. En effet, l'ETM+4 a été choisie comme complémentaire à l'ETM+7, afin de faire ressortir d'autres linéaments non détectés par cette dernière, car ces deux bandes sont faiblement corrélées. Au niveau du capteur RSO, l'image issue du filtre Frost 7x7 (figure 2c) a été sélectionnée parce que permettant d'extraire le maximum de linéaments en nombre et en longueur, comparativement aux autres images RSO. Les linéaments de ces différentes images ETM+ et RSO sont présentés à la Fig. 3.

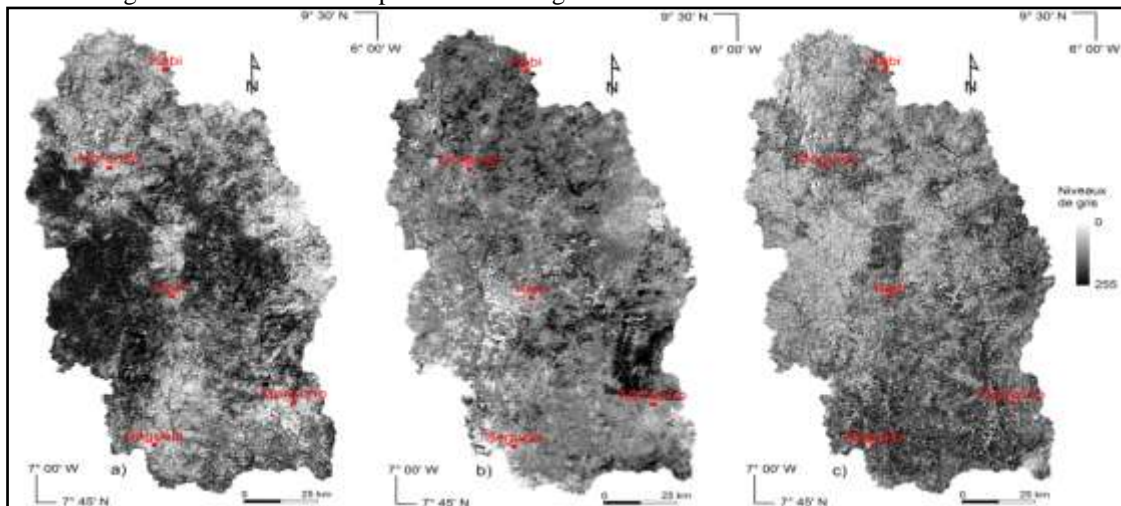


Fig. 2 : Images satellitaires ETM+ et RSO rehaussées : a) ETM+7, b) ETM+4 et c) RSO Frost 7x7

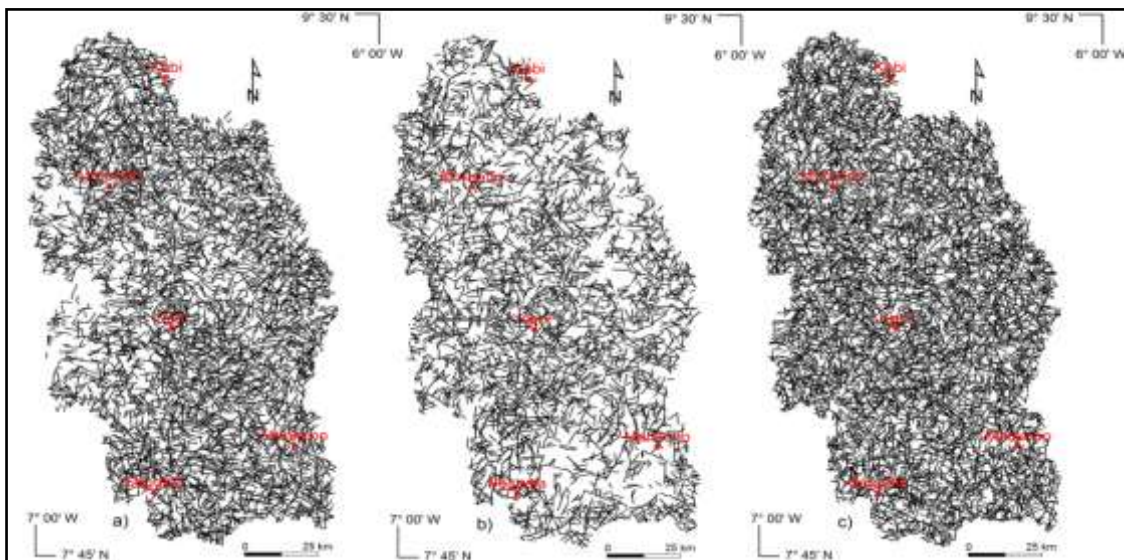


Fig. 3 : Linéaments issus des images satellitaires : a) ETM+7, b) ETM+4 et c) RSO Frost 7x7

4.2 Analyse des directions préférentielles et validation des linéaments

Les rosaces directionnelles des longueurs cumulées des linéaments illustrés à la Fig. 4 montrent une certaine homogénéité de directions des linéaments. Cependant certaines familles d'orientation se démarquent de l'ensemble avec des fréquences supérieures à 6 %, et mettent en relief trois directions dites préférentielles des linéaments extraits automatiquement. Les directions qui se dégagent de l'image ETM+7 sont : N30-40° (NE-SW) et N80-100° (E-W), par contre l'image ETM+4 met en évidence les directions : N10-20° (N-S) et N70-80° (E-W), avec des fréquences supérieures à 7% ; quant à l'image RSO ce sont les directions : N0-20° (N-S), N30-50° (NE-SW) et N160-170° (N-S). Ainsi, les images ETM+7, ETM+4 et RSO présentent des spécificités et des complémentarités informationnelles, suivant les directions préférentielles des linéaments, utiles pour optimiser la cartographie l'état de fracturation du socle de la Haute Marahoué.

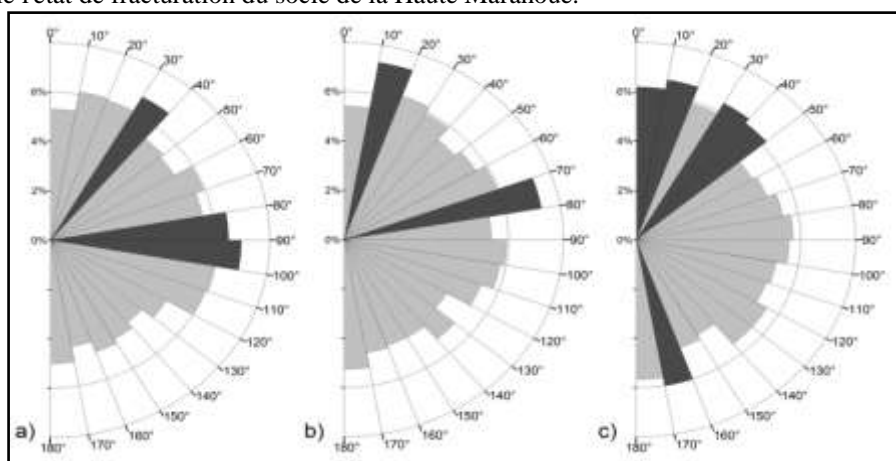


Fig. 4 : Rosaces directionnelles des linéaments : a) ETM+7, b) ETM+4 et c) RSO Frost 7×7

Les trois directions préférentielles des linéaments automatiques N-S (N0-20° ; N160-170°) ; E-W (N70-100°) et NE-SW (N30-50°) présentent d'une part une similitude avec ceux obtenus par [22] sur la même zone à l'aide d'une méthode manuelle, et d'autre part avec les directions des événements tectoniques ayant affecté le socle de la Haute Marahoué. En effet, ce sont les accidents de l'orogénèse éburnéen, principalement de direction N-S qui ont influencé le tracé du réseau hydrographique des grands fleuves de la Côte d'Ivoire tels que la Marahoué et son affluent le Yarani ; la direction birimienne NE-SW en référence à la déformation tectono-métamorphique du cycle éburnéen au niveau des formations volcano-sédimentaires et la direction E-W caractéristique de l'orogénèse panafricaine. Les différentes similitudes entre directions préférentielles des linéaments automatiques avec ceux des travaux antérieurs et des événements tectoniques ayant affecté le socle Baoulé-Mossi permettent d'indiquer leur caractère structural. Les linéaments extraits des images ETM+ et RSO à l'aide du module LINE permettent de caractériser l'état de fracturation du socle de la Haute Marahoué.

4.3 Analyse statistique des longueurs des linéaments

La longueur des 11579 fractures issue de l'extraction automatique, varie entre 1,50 et 25,62 km avec une moyenne de 4,04 km et un écart-type de 2,37 km, montrant l'existence de fractures ayant des longueurs extrêmes. L'ajustement de la distribution des longueurs de fractures suivant la loi puissance est présenté à la Fig. 5. Sur ce diagramme bi-logarithmique une partie de la courbe comprise entre $6,5 \leq L \leq 11$ km présente une allure linéaire sur laquelle il est possible d'ajuster une loi de puissance, d'exposant $\alpha = 3,32$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,956$. La valeur de cette loi de puissance met en évidence un caractère auto-similaire de la fracturation issue de l'extraction automatique des linéaments. Avec $\alpha > 3$, la connectivité est contrôlée par les petites fractures (inférieures à 6,5 km) et les règles de la théorie de la percolation s'appliquent. Ainsi, les fractures du socle de la Haute Marahoué résultant de l'extraction automatique des linéaments constituent un réseau percolant ayant un grand intérêt en hydrogéologie structurale. En effet, la bonne connectivité du réseau de fractures favorise la circulation des eaux souterraines.

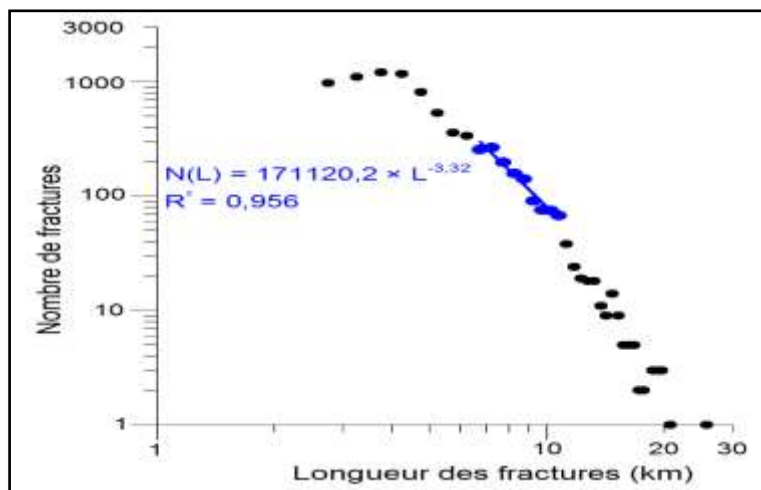


Fig. 5 : Ajustement des longueurs de fractures à une loi puissance

4.4 Discussion

La procédure d'extraction automatique à l'aide du module LINE de PCI Geomatica appliquée dans cette étude est caractérisée par sa rapidité d'exécution, et par l'objectivité dans l'extraction des linéaments qui se traduit par sa capacité à uniformiser l'analyse de différents types d'images [23]. Malgré, les impairs liés à la méthode automatique comme mentionnée par [24], le choix de cette approche s'est justifié par son caractère innovant en milieu de socle précambrien. Elle fait suite aux travaux par morphologie mathématique appliquée aux images RSO de Radarsat-1 dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire [25], aux travaux par réseaux de neurones dans la région de Bondoukou [26] et aux travaux d'optimisation des paramètres du module LINE de PCI en zone de socle précambrien [18]. Elle a été appliquée pour montrer les potentialités de l'extraction automatique, puisque l'approche manuelle a déjà fait l'objet de plusieurs travaux sur le socle ivoirien. Les résultats obtenus montrent que le filtre adaptatif de Frost permet une meilleure réduction du chatoiement des images RSO et sont en accords avec les travaux de [27]. De plus, les images RSO permettent de détecter un maximum de linéaments par rapport aux images ETM+. Cette étude a confirmé que la bande ETM+7 de l'InfraRouge Moyen (IRM) permet une meilleure extraction des linéaments comme l'ont souligné différents travaux [28], [29], [30].

La validation des linéaments par "vérité-terrain" est le moyen le plus adéquat, car les failles d'extension kilométrique sont immédiatement reconnaissables. À défaut, on procède soit à une validation à l'aide des travaux antérieurs de cartographie structurale, soit par une méthode inverse basé sur les forages productifs à gros débits [31]. Dans cette étude, la validation est effectuée en comparant les directions préférentielles des linéaments automatiques avec ceux des travaux antérieurs. Aussi, différents travaux ont montré le potentiel du module LINE à détecter les linéaments pour les études de hydrogéologiques [32] [33] [34]. Ainsi, les linéaments extraits automatiquement des images ETM+ et RSO à l'aide du module LINE, permettent de caractériser l'état de la fracturation du socle de la Haute Marahoué.

La distribution des longueurs de fractures de la Haute Marahoué suivant la loi puissance indique que les réseaux de fractures auraient atteint un stade de développement très avancé, comme indiqué par [35]. Des résultats similaires ont été obtenus par [36] mettant en évidence le potentiel de la loi puissance pour l'ajustement des longueurs de fractures, par rapport aux lois : exponentielle et log-normal. La valeur de l'exposant $\alpha = 3,32$, fixant la proportion de grandes fractures par rapport aux petites [37], ont permis de mettre en évidence le caractère auto-similaire de la fracturation du socle. Cette valeur comprise entre 1 et 3,5 est en accord avec les données de la littérature [19] [21]. Par contre elle est supérieure aux valeurs obtenues par les travaux en socle ivoirien et serait sans doute liée au mode d'extraction des linéaments et/ou au nombre de fractures ajustées.

V. Conclusion

La méthode automatique du module LINE de PCI a été utilisée dans cette étude pour l'extraction objective des linéaments au niveau de la Haute Marahoué en zone de socle précambrien. Les techniques de rehaussements (ACP, Indices normalisés, filtres adaptatifs) appliquées aux images optiques ETM+ et radar RSO ont permis de faire ressortir les structures linéamentaires. Cette méthode automatique a mis en évidence les potentialités des images ETM+ et RSO et des techniques de rehaussement pour une extraction optimale des linéaments. La bande ETM+7 de l'IRM à montrer son potentiel à détecter le maximum de linéaments, quand à la bande ETM+4 du PIR elle est complémentaire à l'ETM+7 puisque ces deux bandes sont faiblement corrélées. Au niveau des techniques de rehaussement le filtre de Frost de taille 7x7 appliqué à l'image RSO permet de détecter le maximum de linéaments. Les similitudes et les différences des linéaments extraits des images optiques (ETM+7 et ETM+4) et radar (RSO Frost 7x7) permettent d'optimiser la détection des structures

linéamentaires de la Haute Marahoué. Les rosaces directionnelles issues de ces linéaments présentent trois directions préférentielles N-S, E-W et NE-SW qui sont en conformité avec les travaux antérieurs et les événements tectono-métamorphiques de la zone d'étude. Ces linéaments ainsi validés, s'ajuste suivant leur longueurs à la loi de puissance démontrant ainsi la bonne connectivité du réseau de fracture. Ces linéaments sont des indicateurs de l'état de fracturation du socle, et donc très utile pour la prospection des eaux souterraines.

References

- [1]. J.Y. Scanvic, "Utilisation de la télédétection dans les Sciences de la Terre", Manuels et méthodes, 7^e Éd. BRGM., 1983, 160 p.
- [2]. A. Ozer, J.M. Marion, C. Roland, et P. Tréfois, "Signification des linéaments sur une image S.P.O.T. dans la région liégeoise", Bulletin de la Société Belge de Géologie, 97(2), 1988, 153-172.
- [3]. W.H. Hobbs, Lineaments of the Atlantic border region, Geological Society of America Bulletin, 15, 1904, 483-506.
- [4]. L.H. Lattman, and R.R. Parizek, "Relationship between fracture traces and the occurrence of groundwater in carbonate rocks", Journal of Hydrology, vol. 2(2), 1964, 73-91.
- [5]. M. Magowe, and J.R. Carr, "Relationship between lineament and ground water occurrence in western Bostwana", Ground Water, 37(2), 1999, 282-286.
- [6]. J-P. Faillat, Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure hydrodynamique et hydrochimie. Thèse de Doctorat d'État, Université des Sciences Techniques du Languedoc (France), 1986, 536 p.
- [7]. V. T. Tam, F. De Smedt, O. Batelaan and A. Dassargues, Study on the relationship between lineaments and borehole specific capacity in a fractured and karstified limestone area in Vietnam, Hydrogeology Journal, 12(6), 2004, 662-673.
- [8]. P. Brunner, H-J. Hendricks Franssen, L. Kgotlhang, P. Bauer-Gottwein, and W. Kinzelbach, "How can remote sensing contribute in groundwater modeling?", Hydrogeology Journal, 15(1), 2007, 5-18.
- [9]. K. F. Kouamé, P. Gioan, J. Biémi, et K. Affian, "Méthode de cartographie des discontinuités images extraites d'images satellitaires (exemple de la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire)", Revue Télédétection, 1(2), 1999, 139-156.
- [10]. M. Youan Ta, T. Lasm, J.P. Jourda, K. F. Kouamé, M. Razack, "Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire Landsat-7 ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire)", Revue Télédétection, 8(2), 2008, 119-135.
- [11]. M.V. Sorokoby, M. B. Saley, K. F. Kouamé, E. V. Djangou, M. Bernier, A. Kouadio, et J. Biémi, "Utilisation des images Landsat ETM+ et du SIRS pour la cartographie linéamentaire et thématique de Soubré-Meagui (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) : Contribution à la gestion des ressources en eau souterraine", Revue Télédétection, 9(3-4), 2008, 209-223.
- [12]. K. T. Yao, O. Fouché-Grobla, M. S. Oga et V. T. Assoma, Extraction de linéaments structuraux à partir d'images satellitaires, et estimation des biais induits, en milieu de socle précambrien métamorphisé. Revue Télédétection, 10(4), 2012, 161-178.
- [13]. G. K. Moore, and F. A. Waltz, "Objective procedures for lineament enhancement and extraction", Photogrammetric Engineering et Remote Sensing, 49(5), 1983, 641-647.
- [14]. A. Karnieli, A. Meisels, L. Fisher, and Y. Arkin, "Automatic extraction and evaluation of geological linear features from digital remote sensing data using a Hough transform", Photogrammetric Engineering et Remote Sensing, 62(5), 1996, 525-531.
- [15]. S. Corgne, R. Magagi, M. Yergeau and D. Sylla, An integrated approach to hydro-geological lineament mapping of a semi-arid region of West Africa using Radarsat-1 and GIS. Remote Sensing of Environment, 114, 2010, 1863-1875.
- [16]. J. Biémi, S. Deslandes, H. Gwyn, et J.P. Jourda, "Influence des linéaments sur la productivité des forages dans le bassin versant de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire) : Apport de la télédétection et d'un Système d'Information à Référence Spatiale". p. 43-49 in Gagnon, P. (éd). Télédétection et gestion des ressources. Vol VII. Comptes rendus du septième congrès de l'Association Québécoise de Télédétection, 1991, 714 p.
- [17]. K. F. Kouamé, "Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire) : Apport des données des images satellitaires et des méthodes statistiques et fractales à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale". Thèse Doctorat 3^{ème} cycle, Université Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire), 1999, 196 p.
- [18]. G. C. Adon, K. F. Kouamé, V. M. Sorokoby, S. Brouyère et Kouadio Affian Extraction automatique des linéaments à l'aide des images satellitaires Landsat-7 ETM+ en zone du socle précambrien (Haute Marahoué, Côte d'Ivoire), Revue Scientifique Internationale de Géomatique, 1(1), 2014, 25-32.
- [19]. J. R. De Dreuzy, P. Davy et O. Bour, Hydraulic properties of two-dimensional random fracture network following a power-law length distribution: 1-Effective connectivity. Water Resources Research, 37(8), 2001, 2065-2078.
- [20]. T. Lasm et M. Razack, Lois d'échelle dans la fracturation des roches dures cristallines et dans le réseau hydrographique associé. Compte Rendu Académie Sciences Paris, 333, 2001, 225-232.
- [21]. C. Darcel, O. Bour, P. Davy and J.R. De Dreuzy (2003). Connectivity properties of two-dimensional fracture networks with stochastic fractal correlation. Water Resources Research, 39, 2003, 1272-1285.
- [22]. J. Biémi, 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 des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat d'État, Université nationale de Côte d'Ivoire, 1992, 480 p.
- [23]. G. K. Moore, and F. A. Waltz, "Objective procedures for lineament enhancement and extraction", Photogrammetric Engineering et Remote Sensing, 49(5), 1983, 641-647.
- [24]. M. F. Ramli, N. Yusof, M. K. Yusoff, H. Juahir and H. Z. Shafri, "Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment : a review", Bull Eng Geol Environ, 69, 2010, 215-233.
- [25]. K. F. Kouamé, T. Lasm, M.B. Saley, E. Tonyé, M. Bernier, S. Wade, "Extraction linéamentaire par morphologie mathématique sur une image RSO de Radarsat-1 : application au socle archéen de Côte d'Ivoire" Journées d'Animation Scientifique de l'AUF, Alger Novembre 2009.
- [26]. V-C Jofack-Sokeng., K. F.Kouamé, M. You an Ta, M. B Saley, et K. Kouamé, Extraction automatique des linéaments sur les images satellitaires par réseaux de neurones : contribution à la cartographie structurale du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). Revue Scientifique Internationale de Géomatique, 1(1), 2014, 4-17.
- [27]. T. V. Assoma, K. F. Kouamé, J. P. Rudant et J. Biémi (2011). Réduction du chatoiement et apport des données ASAR ENVISAT et MNE 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, 47(4), 2011, 88-99.
- [28]. A. Mah, G. R. Taylor, P. Lennox, and L. Balia, "Lineament analysis of Landsat Thematic Mapper Images, Northern territory, Australia". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 61(6), 1995, 761-773.

- [29]. A. Mahmoud, "Lineament as groundwater exploitation guides in hard-rock terranes of arid region", Journ. Can. Télédétection, 22(1), 1996, 108-116.
- [30]. K. F. Kouamé, P. Gioan, J. Biémi et A. Kouadio, Méthode de cartographie des discontinuités-images extraites d'images satellitaires : exemple de la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Revue Télédétection, 1(2), 1999, 139-156.
- [31]. J. P. Jourda, M. B. Saley, E. V. Djagoua, K. Kouamé, J. Biémi et M. Razack, 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. Revue Télédétection, 5(4), 2006, 339-357.
- [32]. V. T. Tam, F. De Smedt, O. Batelaan, and A. Dassargues, "Study on the relationship between lineaments and borehole specific capacity in a fractured and karstified limestone area in Vietnam". Hydrogeology Journal., 12(6), 2004, 662-673.
- [33]. L. Q. Hung, O. Batelaan, and F. De Smedt, "Lineament extraction and analysis, comparison of LANDSAT ETM and ASTER imagery. Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam". Remote sensing for environmental monitoring, GIS applications, and geology. In: Ehlers M, Michel U (eds), Proceedings of SPIE, 5983, 2005, 12 p.
- [34]. U. Mallast, R. Gloaguen, S. Geyer, T. Rodiger, and C. Siebert, "Semi-automatic extraction of lineaments from remote sensing data and the derivation of groundwater flow-paths", Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 8, 2011, 1399-1431.
- [35]. E. Bonnet, O. Bour, N. E. Odling, P. Davy, I. Main, P. Cowie, and B. Berkowitz, Scaling of fracture systems in geological media, Reviews of Geophysics, 39(3), 2001, 347-38.
- [36]. Koudou A., T. V. Assoma, B. Adiaffi, M. Youan Ta, K. F. Kouamé et T. Lasm (2014). Analyses statistique et géostatistique de la fracturation extraite de l'imagerie ASAR ENVISAT du Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Larhyss Journal, 20, 2014, 147-166.
- [37]. Lasm T., Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyses statistiques et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (Domaine Archéen). Thèse Unique de Doctorat Université de Poitiers (France), 2000, 274 p.

Adon Gnanngui Christian" Extraction automatique des linéaments à l'aide d'images satellitaires optique et radar en milieu de socle précambrien " International Journal of Engineering Science Invention (IJESI), vol. 08, no. 01, 2019, pp 24-32