

Cartographie structurale des accidents géologiques majeurs du socle cristallin du département de la Donga (Nord-Ouest du Bénin) : Apport des images landsat-8 Oli et des données de terrain

[Structural Mapping of Major Geological Accidents in the Crystalline Hard-rock of the Donga Department (North-West Bénin) : Contribution of Landsat-8 OLI and Field Data]

Bertrand Hounnigbo AKOKPONHOUE¹⁻²⁻³, Nicaise YALO², Luc ADISSIN GLODJI³, Abdoukarim ALASSANE², Georges AGBAHUNGBA¹, and Théophile LASM⁴

¹Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications (CIPMA Chaire UNESCO), Université d'Abomey-Calavi, 072 BP. 50 Cotonou, Benin

²Laboratoire d'Hydrologie Appliquée, Institut National de l'Eau (INE), Université d'Abomey-Calavi, 01BP. 526 Cotonou, Benin

³Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences et Techniques, Université d'Abomey-Calavi, BP : 2462 Abomey-Calavi, Benin

⁴Département des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de l'Environnement, U.F.R des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Université de Cocody, 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Copyright © 2018 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Prospecting for groundwater resources is a problem in the Donga Department (North-West Benin) to satisfy people's water needs. Remote sensing remains essential for the mapping of water presence indicators, which are linear structures. The present study proposes to map the major fractures of North-West Benin from Landsat-8 OLI images and to use field data to characterize them. The use of spatio-directionnel filtering methods of Sobel and gradient and the techniques of Selective Principal Components Analysis allowed the creation of the major lineaments map. The validation of these last ones was carried out by several field works (geology, hydrogeology, geomorphology and botany). These data were superimposed in a GIS. After treatment, the obtained card counts 745 major fractures. This approach allowed to discriminate three major types of fractures. Fractures marked by vegetation alignments (type A) are the most abundant and occupy 60% of the area of the Donga Department. Fractures related to geological formations (type B) occupy 20% of the area of the study area and correspond to strike-out and shearing structures. The fractures indicated by the rectilinear cornices of lateritic cuirass (type C) correspond to late faults. The study of the directional distribution of outcrop fractures shows that the major directions are N-S (27%) and NE-SO (24%). This map will serve as a background document for future hydrogeological surveys in the region.

KEYWORDS: Remote sensing, GIS, major fractures, lineaments, hydrogeology, groundwater.

RESUME: La prospection des ressources en eau souterraine est un problème dans le département de la Donga pour satisfaire les besoins en eau des populations. La télédétection reste incontournable pour la cartographie des indicateurs de présence des eaux, que sont les structures linéamentaires. La présente étude se propose de cartographier les fractures majeures du Nord-Ouest du Bénin à partir des images Landsat-8 OLI et d'utiliser les données de terrain pour les caractériser. L'utilisation des techniques de l'Analyse en Composantes Principales Sélectives et de filtrage directionnelle de Sobel et gradient ont permis de générer la carte des linéaments majeurs. La validation de ces dernières a été faite par plusieurs travaux de terrain (géologie,

hydrogéologie, géomorphologie et botanique). Ces données recueillies ont été superposées dans un SIG. Après traitement, la carte obtenue compte 745 fractures majeures. Cette approche a permis de discriminer trois grands types de fractures. Les fractures marquées par les alignements de végétation (type A) sont les plus abondantes et occupent 60 % de la superficie du Département de la Donga. Les fractures liées aux formations géologiques (type B) occupent 20 % de la superficie de la zone d'étude et correspondent à des structures décrochantes et cisailantes. Les fractures indiquées par les corniches rectilignes de cuirasses latéritiques (type C) correspondent à des failles tardives. L'étude de la distribution directionnelle des fractures relevées à l'affleurement montre que les directions majoritaires sont N-S (27 %) et NE-SO (24%). Cette carte servira de document de base pour des prospections hydrogéologiques futures dans la région.

MOTS-CLEFS: Télédétection, SIG, fractures majeures, linéaments, hydrogéologiques, eau souterraine.

1 INTRODUCTION

L'eau est la base de toute forme de vie. Elle constitue une ressource indispensable au maintien et à la conservation de la vie sur terre. Dans la nature, on la retrouve dans les dépressions topographiques en contact direct avec l'atmosphère (eau de surface) ou dans des unités géologiques appelées aquifères qui peuvent être consolidés ou non selon le contexte lithologique. Au Bénin, les roches du socle occupent 80 % de la superficie du pays. Ces roches se sont formées lors de l'orogénèse panafricaine (600±100 Ma) puis ont été altérées et érodées. Le département de la Donga objet de la présente étude, est situé au Nord-Ouest du Bénin dans une zone constituée de socle cristallin à cheval entre les climats semi-aride et tropical humide. Dans ce contexte de variabilité climatique marquée par une perturbation de la pluviométrie, les populations sont confrontées à un problème d'approvisionnement en eau potable. La région a pourtant bénéficié de plusieurs programmes d'approvisionnement en eau potable. Cependant la couverture des besoins en eau est loin d'être satisfaisante suite aux taux élevés de forages négatifs (plus 40 %) [1]. Aujourd'hui, Plus de 63 % des populations de cette région n'ont pas accès à l'eau potable [1]. Les populations sont obligées d'avoir recours aux eaux de surface malgré leur qualité douteuse. Ce qui pose un véritable problème d'hygiène dans cette région du pays surtout en période de saison sèche.

En zone de socle cristallin et cristallophyllien, comme c'est le cas dans le département de la Donga, la solution à ces nombreux problèmes se trouve certainement dans la meilleure connaissance des aquifères de fractures. La cartographie et la caractérisation des réseaux de fracturation associée aux différentes formations géologiques est un moyen inéluçable pour une meilleure connaissance des aquifères fracturés du socle. Car, il conditionne la formation des réservoirs et constitue la voie privilégiée d'accès aux ressources en eau souterraine [2], [3], [4], [5], [6]. Cette étude vise donc à cartographier les accidents géologiques majeurs du socle cristallin du département de la Donga (Nord-Ouest du Bénin) grâce à l'apport des images landsat-8 OLI et des données de terrain. En effet, à la croisée de la Télédétection, des SIG, de la géologie, de l'hydrogéologie, le présent travail s'appuie donc sur un axe de recherche multidisciplinaire. L'utilisation conjointe de ces approches permettra de mieux connaître les aquifères de fractures du socle cristallin du département de la Donga.

2 SITUATION GÉOGRAPHIQUE, CONTEXTE GÉOLOGIQUE, ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude (figure 1) se trouve au Nord-Ouest du Bénin et à la frontière avec le Togo. Elle couvre une superficie de 11 126 km² environ et est située à l'Est du méridien 3° de longitude Est et entre les parallèles 8° et 10° de latitude Nord. Son relief est montagneux (Mont Couffé, Mont Tanéka, Mont d'Alédjo et la chaîne de l'Atacora) au Nord et au Sud. Au centre, un relief de pénéplaine cristalline sur lequel affleurent des cuirasses latéritiques très épaisses est parfois interrompue par des collines de granites isolés (Tébou et Manigri par exemple). D'après les études géologiques antérieures, le département de la Donga comprend les formations de la zone externe, de la zone de suture et de la zone interne de la chaîne panafricaine des Dahoméides (figure 2). La zone externe est essentiellement formée de quartzites appartenant à l'unité structurale de l'Atacora. Quant à la zone de suture elle est formée de granulites basiques, d'amphibolites et de pyroxénites du massif Kabyè. Les formations de la zone interne couvrent la plus grande partie du département (figure 2). Elle est formée de gneiss et migmatites variés intrudés par de rares intrusions granitiques. Les formations géologiques de cette région ont été structurées au cours de l'orogénèse panafricaine (600±100 Ma). Les phases tardives de cet tectono-métamorphisme sont matérialisées par de nombreuses fractures généralement structurées N-S et NE-SW dont la plus importante est la zone de faille de Kandi qui est une déformation lithosphérique transcontinentale traversant tout le territoire du Bénin [7]. Sur le plan hydrogéologique, la zone d'étude comporte trois types de réservoirs qui se superposent. Le réservoir d'altérites, argilo-sableux, le réservoir de fissures et plus profondément celui des fractures. Ces réservoirs fonctionnent souvent comme un aquifère composite.

3 MATERIEL ET METHODES

3.1 MATÉRIEL

La mise en œuvre de cette étude a nécessité l'utilisation de données images, de fonds cartographiques et des données recueillies sur le terrain. Les données images sont composées des neuf (9) bandes du capteur OLI de Landsat 8. Ces images orthorectifiées apparaissent très claires et nettes. La couverture totale de la zone d'étude, a nécessité une mosaïque de la scène 192-053, de la scène 192-054 du 05 Janvier 2016 pour les deux premières et de la scène 193-053 du 08 Février 2016.

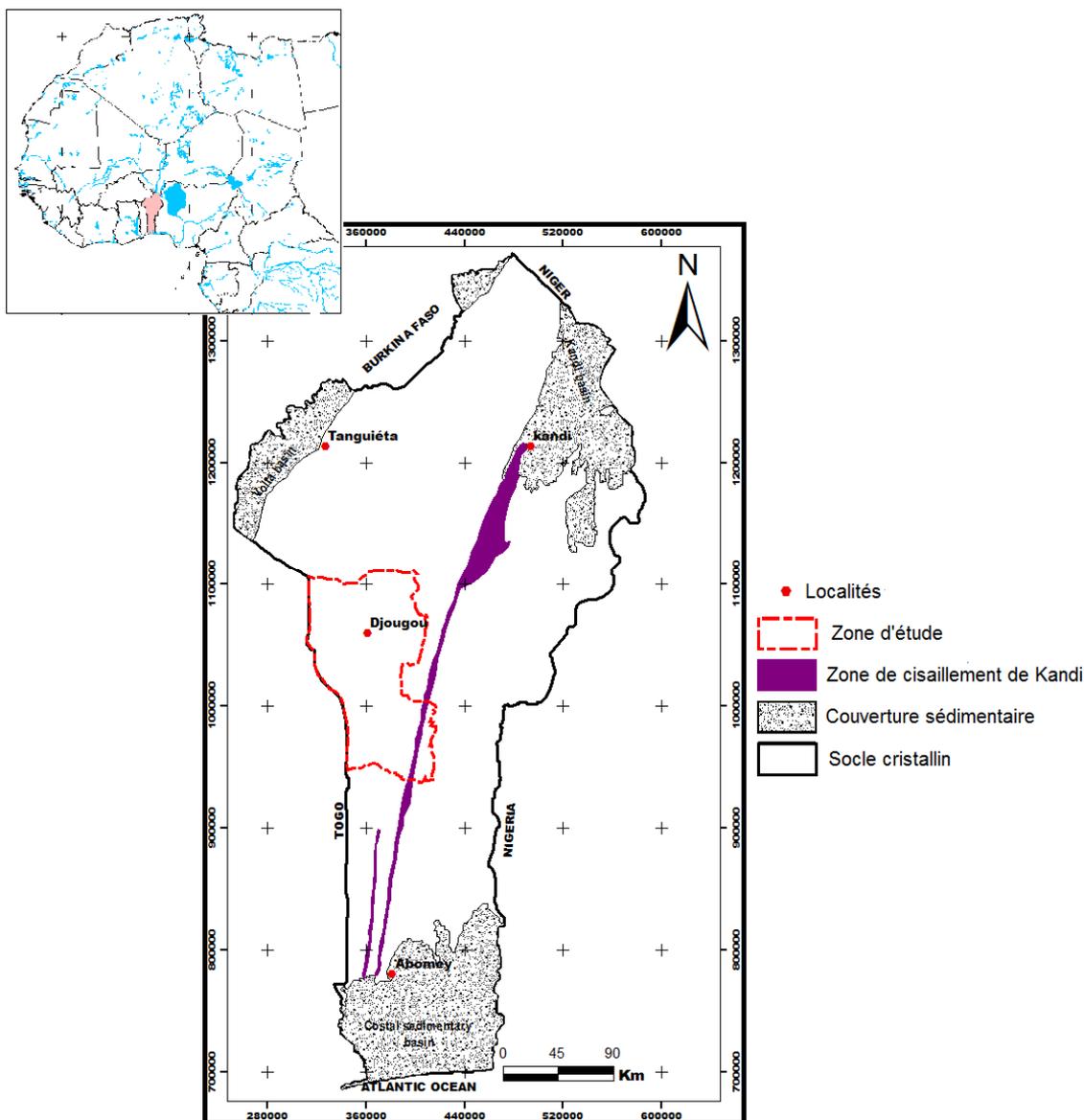


Fig. 1. Carte de présentation de la zone d'étude

Les fonds cartographiques qui couvrent entièrement la zone d'étude sont constitués de cartes topographiques éditées par le Centre National de Télédétection et de suivi Ecologiques du Bénin (CNATEL) et géologiques [8], [9] toutes établies à l'échelle 1/200000.

Les missions de vérité terrain ont permis de collecter d'innombrable informations relatives à la nature et à la localisation des affleurements de roches recueillis et aux structurales tectoniques. Ces mesures structurales sont nombreuses et

diversifiées. Car, la phase d'évaluation et de validation des linéaments extraits du traitement numérique des images est indispensable pour juger de la pertinence de la méthode utilisée, afin de conférer une signification structurale à ces linéaments [3], [10], [11]. Les structures identifiées à partir des images OLI de Landsat 8 ont fait l'objet d'une analyse fréquentielle où les directions principales ont été comparées aux mesures des accidents prises lors des travaux de terrains. L'analyse de l'ensemble de ces informations contribue à valider les résultats d'interprétation des images traitées mais également fournit des informations importantes sur la distribution directionnelle des fractures de la zone d'étude.

En vue d'atteindre les objectifs fixés conformément à l'approche méthodologique adoptée, plusieurs logiciels ont été mis à contribution. Les travaux de prétraitements et de traitements de l'image OLI ayant abouti à réalisation de la carte des linéaments majeurs ont été effectués au moyen du logiciel ENVI 5.1. Le logiciel ArcGIS a permis de réaliser une parfaite superposition des différentes couches d'informations afin d'obtenir les différentes cartes. La caractérisation de la géométrie de l'aquifère nécessite l'utilisation de plusieurs logiciels. Ce sont les logiciels Linwin 2.0, RAFESP, Rockwork 16.

3.2 MÉTHODES

L'approche méthodologie adoptée dans le cadre de ce travail s'articule autour de deux (2) points. Elle débute par l'application des méthodes de télédétection pour la cartographie structurale ; un contrôle et une validation aboutissent à la réalisation de la carte de fracturation et enfin une analyse fréquentielle des différentes directions des fractures du département de la Donga.

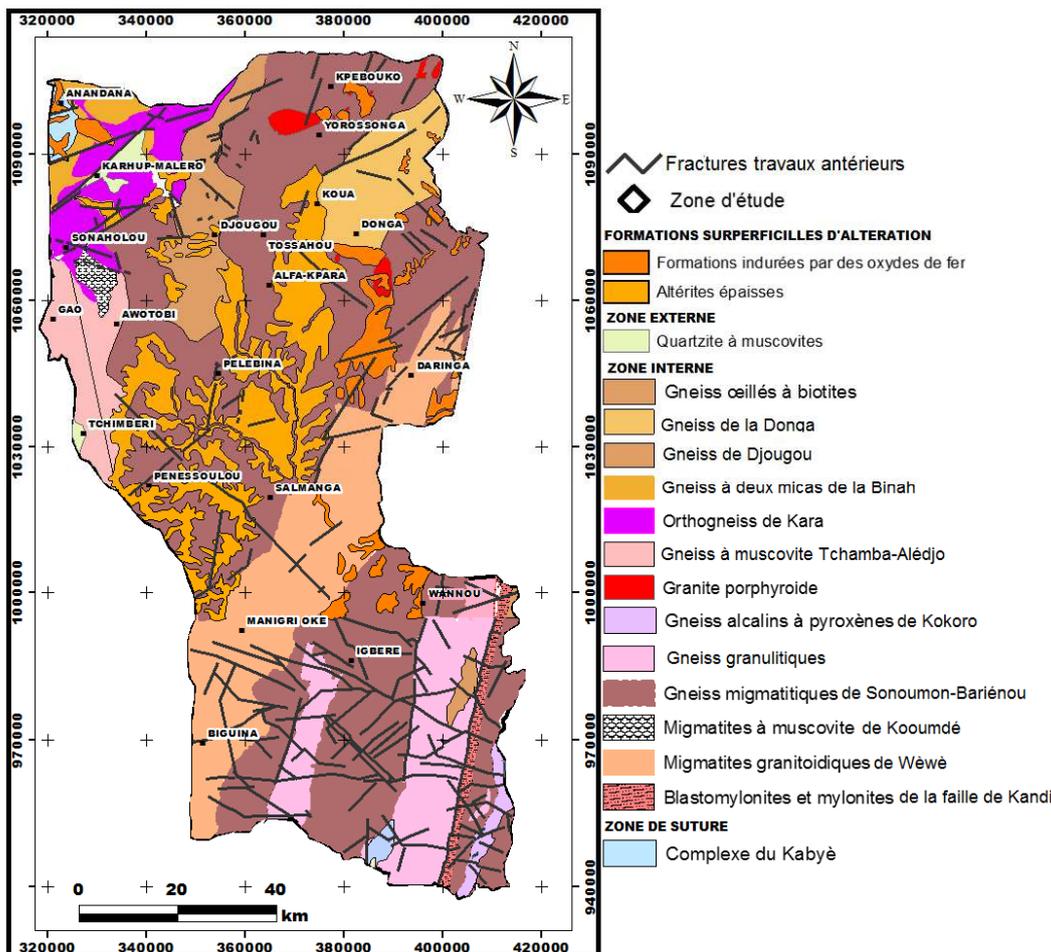


Fig. 2. Carte géologique du département de la Donga [8]

3.2.1 METHODOLOGIE POUR LA CARTOGRAPHIE DES ACCIDENTS GEOLOGIQUES MAJEURS A PARTIR DE LA TELEDETECTION

L’emploi de plusieurs méthodes de traitements numériques appliqués aux images OLI à l’aide des techniques de fusion d’images à savoir les ACPS (Analyse en Composantes Principales Sélectives), les combinaisons d’images, d’une part et des techniques de filtrages spatiaux-directionnel d’autre part ont abouti à augmenter la perception de l’image en l’améliorant et en la rendant plus expressive et plus nette.

• **Les techniques de fusion d’images pour la cartographie structurale des accidents majeurs**

Dans le souci de cartographier le maximum des discontinuités majeures ayant affecté le département de la Donga, la technique de l’analyse en composantes principales sélectives (ACPS) a été appliquée. Elle a consisté au prime abord à effectuer une première ACPS avec les bandes du visible 2, 3 et 4 d’OLI, ce qui a permis d’obtenir trois composantes ACP₁₂₃₄, ACP₂₂₃₄ et ACP₃₂₃₄. Ensuite une deuxième ACPS a été effectuée avec les bandes de l’infrarouge 6, 7 et la bande panchromatique (OLI 8), ce qui a abouti également à l’obtention de trois autres composantes ACP₁₆₇₈, ACP₂₆₇₈ et ACP₃₆₇₈. Cette technique a été inspirée de celle utilisée par [11], [12] dans le socle précambrien de la Côte d’Ivoire. Ces différentes bandes ont également permis l’application de la technique de fusion par codage RVB (Rouge-Vert-Bleue). Des rapports de bandes à savoir OLI5/OLI6, OLI5/OLI7 et OLI5/OLI8 ont été calculés, ainsi que des additions de bandes (ACP₁₂₃₄+OLI8+OLI5).

• **Les techniques de filtrage spatial pour la cartographie structurale**

Les filtres spatiaux directionnels représentent une autre méthode de traitement numérique utilisée pour le rehaussement d’une image. Dans le cadre de cette étude, la technique du filtrage par fenêtre mobile a été utilisée pour cartographier les grands accidents géologiques. Ces filtres de taille 7 x 7 permettent de mieux faire ressortir les structures géologiques régionales. En effet, ces filtres qui sont d’excellents outils de discrimination d’objets rectilignes et plus ou moins curvilignes de grande taille, facilitent l’extraction des linéaments sur les images qu’ils traitent. Afin de mieux rehausser les discontinuités-images majeures, plusieurs opérateurs de filtres directionnels (type Sobel, Prewitt et de [13] de taille 7x7) ont été appliqués notamment sur les bandes OLI4, OLI6, ACP₂₂₃₄, ACP₁₆₇₈, sur les rapports OLI5/OLI6. Ces filtres directionnels sont présentés dans le tableau 1. La cartographie des accidents géologiques majeurs a été effectuée également à partir de l’interprétation de la configuration du réseau hydrographique. Il faut noter que dans le cadre de cette étude, ce réseau hydrographique a été cartographié directement sur les images satellitaires.

Tableau 1. Matrices de filtres Sobel et gradient de dimension 7x7

1	2	3	4	3	2	1	0	1	2	2	3	3	4
2	3	4	5	4	3	2	-1	0	3	4	4	5	3
3	4	5	6	5	4	3	-2	-3	0	5	6	4	3
0	0	0	0	0	0	0	-2	-4	-5	0	5	4	2
-3	-4	-5	-6	-5	-4	-3	-3	-4	-6	-5	0	3	2
-2	-3	-4	-5	-4	-3	-2	-3	-5	-4	-4	-3	0	1
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1	-4	-3	-3	-2	-2	-1	0
Filtres Sobel de direction N-S							Filtres Sobel de direction NE-SW						
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-3	-7	1	1	1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-3	-3	1	1	1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2	1	1	1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
Filtre de [13]							Filtre de Prewitt						

3.2.2 MÉTHODE DE VALIDATION DES LINÉAMENTS EN IMAGERIE SATELLITAIRE ET VÉRITÉ TERRAIN

Les traitements d'images satellitaires se heurtent régulièrement au problème de la fiabilité des résultats qu'ils proposent et à leur validation [3], [10], [14], [15], [16]. Ceci appuie l'obligation de procéder au contrôle et à la validation de tous les résultats de l'interprétation des images traitées. Cette phase d'évaluation et de validation est en effet très indispensable pour une étude de cartographie des linéaments dans la zone de socle compte tenu de la complexité de ce milieu. Pour une amélioration substantielle des résultats obtenus dans le cadre de cette étude, plusieurs missions de vérification et de validation sur le terrain ont été effectuées. Ces missions ont nécessité l'utilisation de plusieurs méthodes (géologique, géomorphologique, hydrogéologique, Botanique). Ce qui a permis la validation des différentes cartes de linéaments établies dans le cadre de cette l'étude.

La méthode de validation est basée sur l'observation sur le terrain de plusieurs paramètres tels que la corrélation linéaments –alignement des végétaux–cours d'eau ; linéaments –alignement des végétaux ; linéaments –alignement des termitières, linéaments–alignement des forages et l'observation des fractures sur les affleurements. La direction, la longueur, l'ouverture, et l'espacement des fractures ont été mesurés. Une étude pétrostructurale in situ a été effectuée sur les affleurements. Cette étude a permis de déterminer les fractures transversales, les fractures longitudinales, les foliations, les cisaillements, les failles de tension ou fractures d'extension. La distribution directionnelle des fractures et des filons relevés à l'affleurement a été établie. A cet effet, plusieurs mesures sont prises sur les affleurements.

4 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4.1 MISE EN EVIDENCE DES STRUCTURES LINÉAMENTAIRES A L'AIDE DES FILTRES SPATIAUX

L'application des filtres de Sobel et gradient 7 x 7 sur les bandes OLI6, OLI7 et OLI8 des images brutes de Landsat 8 et le traitement des rapports (OLI6/OLI5), les ACP₁₂₃₄ et ACP₁₆₇₈ a permis de rehausser de nombreuses discontinuités images. Les filtres spatiaux utilisés dans le cadre de cette étude, ont été d'un apport remarquable dans la vectorisation des linéaments majeurs même les plus discrets. Les figures 3 et 4 présentent les images filtrées produites par les filtres directionnels de type Sobel appliqués sur le rapport OLI6/OLI5 et sur l'ACP₁₂₃₄. Ces filtres (Sobel) rehaussent les linéaments ou les contours perpendiculaires à leur direction de convolution (figure 3), ceux de Prewitt et de [13] (figure 4) le font dans toutes les directions. Ces filtres ont permis de mettre en évidence un nombre très important de linéaments régionaux. La figure 5 présente la Composition colorée de l'ACP₁₆₇₈ rehaussant les principaux couloirs des accidents régionaux.

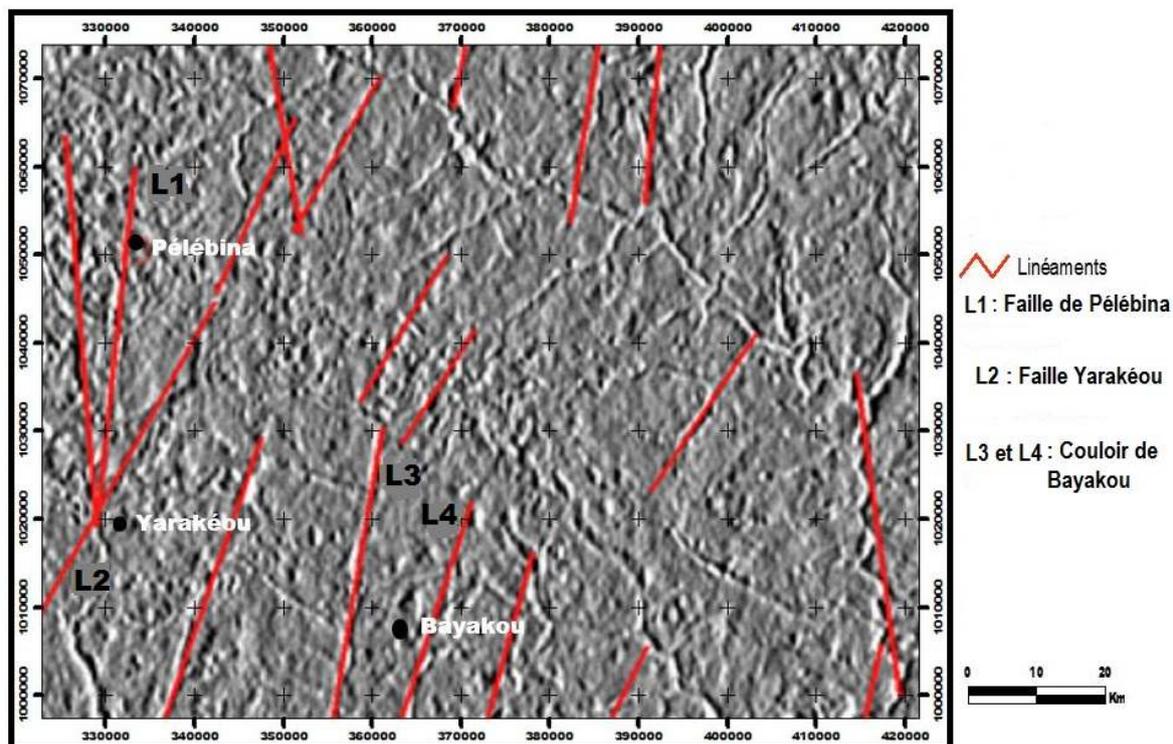


Fig. 3. Filtre Sobel (E-W) appliqué au rapport OLI 6 /OLI5 rehaussant les accidents N-S

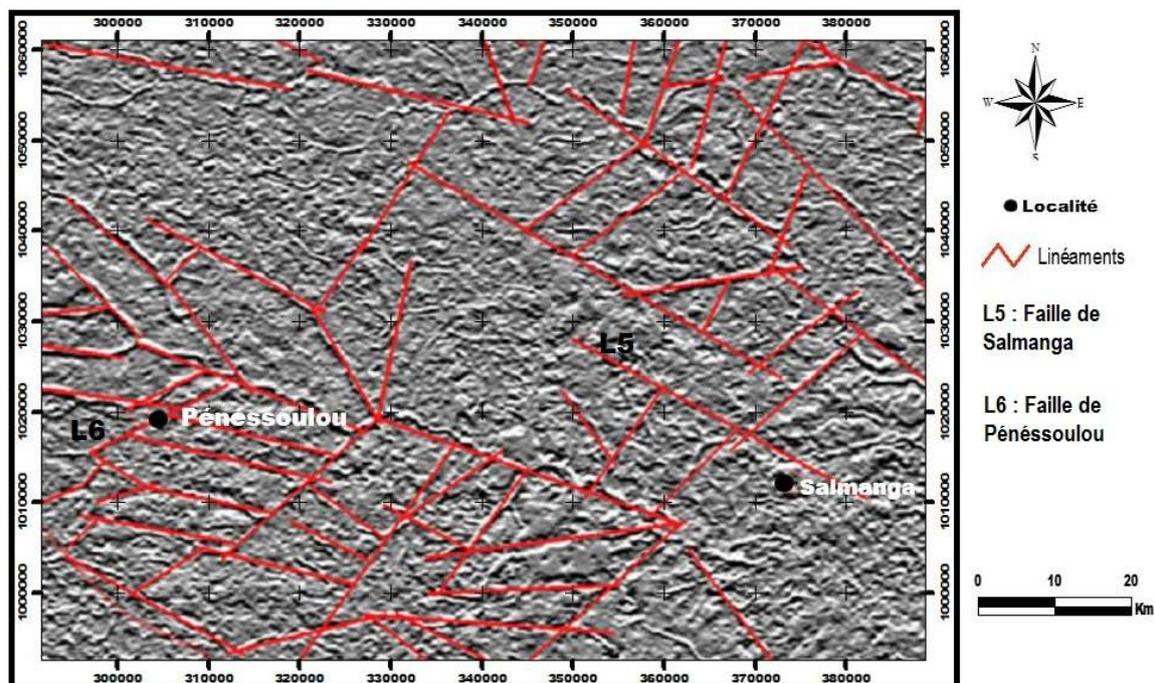


Fig. 4. Filtre gradient de [13] appliqué à ACP1234 rehaussant des accidents régionaux

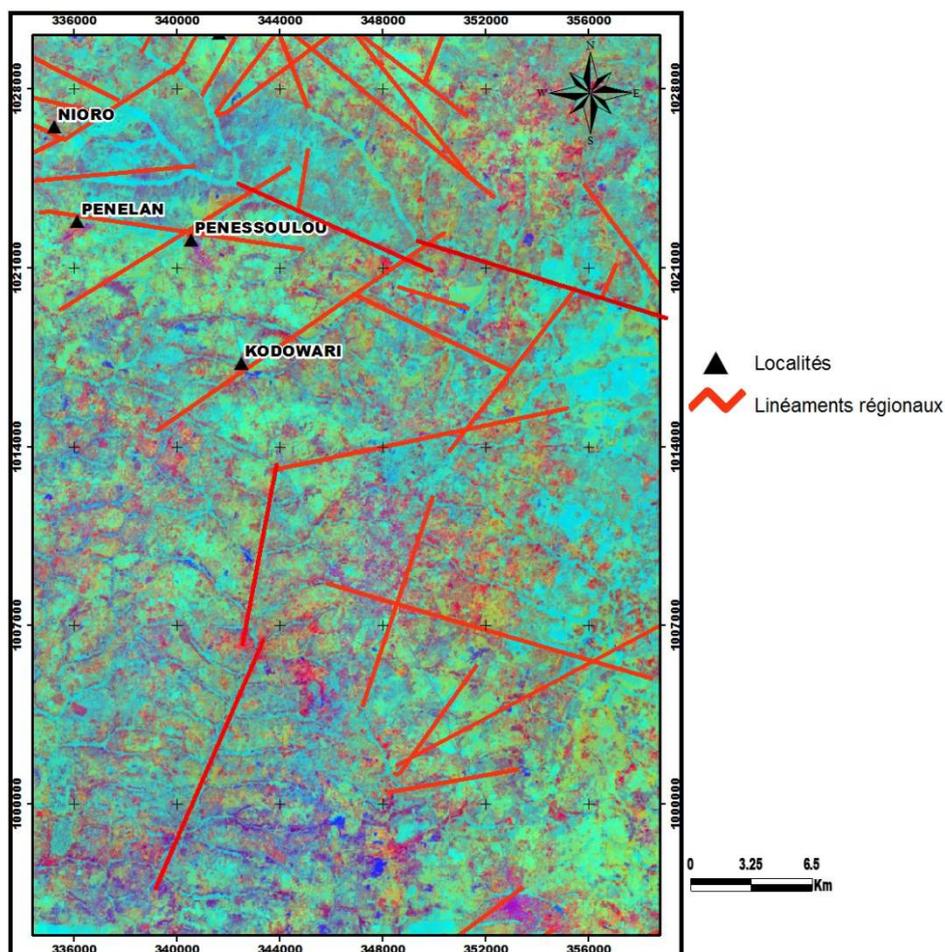


Fig. 5. Composition colorée ACP1₆₇₈ rehaussant les principaux couloirs des accidents régionaux

4.2 CARTOGRAPHIE DES ACCIDENTS MAJEURS DU DÉPARTEMENT DE LA DONGA A L'AIDE DE LA TÉLÉDÉTECTION

La carte des linéaments régionaux du département de la Donga établie à partir de l'analyse des images OLI 8 traitées (ACP1₂₃₄ ; ACP1₆₇₈_OLI8_OLI5 ; OLI5_OLI6_OLI8) et surtout à partir de l'interprétation de la configuration du réseau hydrographique compte 745 accidents géologiques majeurs de diverses directions (Figure 6). Cette carte, bien que n'étant pas exhaustive rend bien compte des grandes directions de fracturation et des déformations tectoniques de la zone d'étude. La région de la Donga est découpée par un ensemble d'accidents géologiques majeurs (figure 6). Ces accidents majeurs étaient jusque-là mal exprimés sur les cartes géologiques, parce que les méthodes utilisées ne permettaient pas de les mettre en évidence. De nos jours, avec l'apport de la télédétection, ces structures autres fois cachées sont plus visibles et mises à nues comme l'attestent plusieurs travaux antérieurs [5], [11], [16] [17] [18]. C'est le cas de l'image OLI6 qui laisse voir le long de la zone de cisaillement de Kandi un faisceau de blastomylonites d'une allure méridienne. Les traitements spécifiques réalisés dans le cadre de ces travaux ont permis de mettre en évidence les accidents majeurs du département de la Donga dont les principaux sont :

Le couloir de cisaillement de Kandi situé au Sud-Est de la zone d'étude. Cette zone de cisaillement bien délimitée sur les images OLI se poursuit de façon très claire et traverse transversalement la commune de Bassila avec une longueur de 71,5 km et enfin le faisceau d'accident géologique situé au Nord-Ouest de la zone d'étude formant un couloir allant de Singré à Karhup-Malero et se prolonge au Togo avec une direction N45° que nous appellerons la faille de Singré.

Les principaux linéaments sont :

- l'accident allant de Prèkètè à Biguina (BG) de direction N0° ;
- l'accident allant de Pélénan à Pénéssoulou (PP) de direction N100° ;
- l'accident allant de Sonaholou à Bohomdo (SB) de direction N60° ;

- l'accident allant de Tassahou à Monè (TM) de direction N60° ;
- l'accident allant de Igbère à Wannou (SW) de direction N70°.

Les discontinuités structurales soulignées par imagerie satellitaire sont en parfait accord avec les données tectoniques de la partie Nord-Ouest du Bénin. Bien d'autres accidents régionaux additionnels ont été rehaussés et identifiés à partir de l'analyse de certaines combinaisons d'images (OLI4_OLI8_OLI7 ; OLI6_OLI7_OLI6/OLI5). Cette image permet également, la vectorisation du réseau hydrographique et éventuellement les accidents géologiques qui y sont rattachés. L'analyse de la carte des accidents géologiques régionaux révèle que tous les linéaments de taille plurikilométrique épousent soit la direction N-S (Panafricaine), ou la direction NE-SO. Ces accidents géologiques majeurs sont très recherchés lors des prospections hydrogéologiques pour la recherche d'eau souterraine, car leur grande taille favorise leur interconnexion avec d'autres fractures facilitant ainsi la formation d'un bon aquifère. Les travaux de [2], [3], [30], [11], [12] [16], [19] ont montré l'importance hydrogéologique des fractures multikilométriques dans la cartographie des eaux en zone de socle cristallin et cristallophyllien de l'Afrique de l'Ouest.

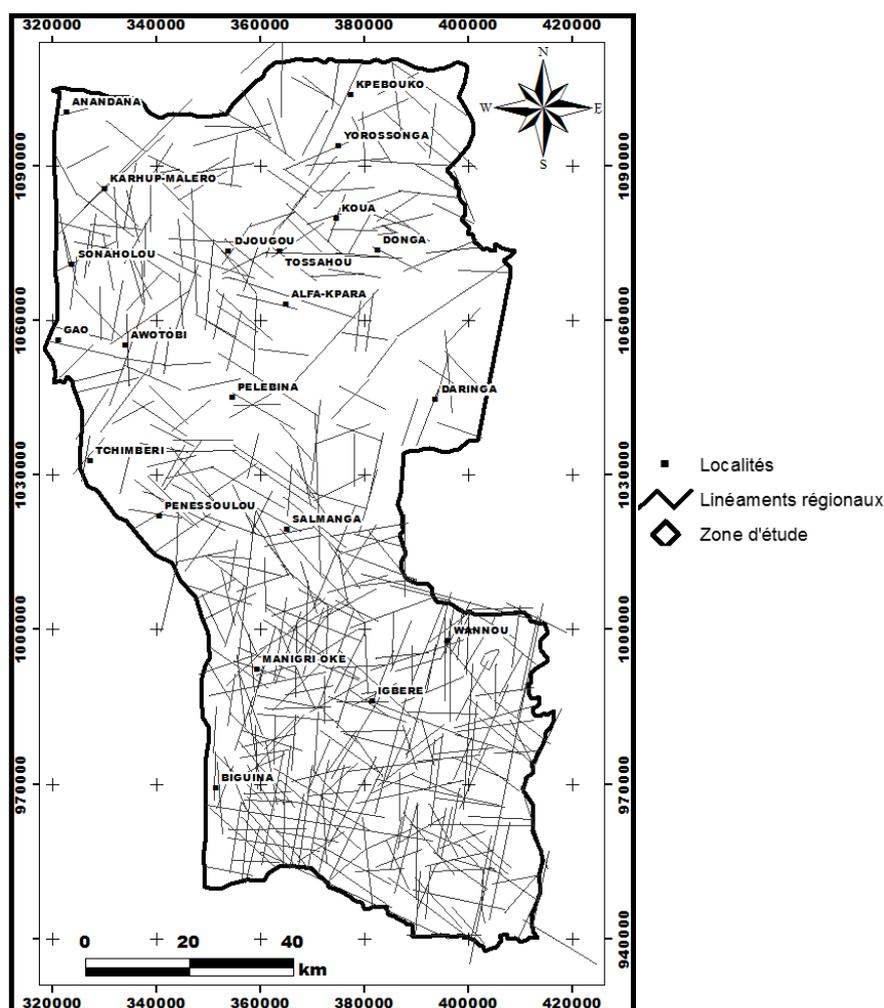


Fig. 6. Carte des linéaments majeurs du département de la Donga établie à partir des images OLI de Landsat 8

4.3 VALIDATION DES LINÉMENTS STRUCTURAUX

La validation de la carte des linéaments majeurs issue du traitement des images satellitaires permet d'attribuer à l'ensemble des linéaments retenus, la valeur de fracture. En effet, la validation de cette carte des linéaments majeurs est une étape très importante qui conditionne son utilisation pour une interprétation structurale et hydrogéologique.

4.3.1 CORRÉLATION LINÉAMENTS –ALIGNEMENT DES VÉGÉTAUX –COURS D’EAU

Les linéaments d'extension régionale et les structures particulières discriminées sur les images satellitaires OLI 8 ont été vérifiés et validés au cours de deux missions de terrain (figure 7). Les différentes investigations menées au cours des missions de terrains nous donnent la confirmation que les linéaments extraits des images satellitaires ont une réalité structurale ce qui renforce la crédibilité et la validité des linéaments en tant que indicateur tectonique.

Les linéaments de type A (alignement de végétaux) représentent plus de 60 % des linéaments identifiés dans le socle cristallin du département de la Donga (figure 7). On distingue, des espèces végétales arborées d'interfluves, (*Pterocarpus erinaceus*, *Khaya senegalensis*, *Adansonia digitata*, *Isobertinia doka*, *Annona senegalensis*, *Prosopis africana*) ; des espèces arbustives et sousarbustives (*Vitellaria paradoxa*, *Anogerssus leiocarpar*, *Parkia biglobosa*, *Vitex doniana*, *Diospyros mespiliformis*); des végétaux comme *Andropogon guyanus*, qui témoigne bien les zones humides. En plus des espèces végétales, on y distingue également les édifices de termitières en cheminées (*Macrotermes bellicosus*, *Macrotermes subhalinus*) qui soulignent bien

la fracturation par des alignements assez remarquables. Le type linéamentaire B (formations géologiques) représente 20 % des linéaments identifiés sur l'image satellitaire, avec la nature du substratum rocheux (figure 2). La plus grande densité de linéaments de type B sur le terrain se rencontre dans les plutons granitiques et les roches métamorphiques. Les linéaments de type B sur le terrain sont très diversifiées : il peut s'agir de contact géologique, des zones de chevauchements, de limite d'affleurement. Les linéaments de types C (cours d'eau et vallées) représentent près de 14 % des linéaments cartographiés dans la zone d'étude. Le type linéamentaire D (corniches rectilignes de cuirasse latéritique) ne représente que 6 % des linéaments situés au Nord-Ouest du Bénin. Leur prépondérance est remarquable sur les gneiss migmatitiques et les orthogneiss à nombreux reliefs cuirassés. Régulièrement, les quatre types de linéaments identifiés sont représentés par des édifices biologiques de termitières épigées (*Macrotermes*).

En effet, la triple relation linéament-eau-végétation confirme que ce type de linéament représente des fractures ouvertes ou le stock d'eau permet une bonne croissance des végétaux [3], [15], [20], [21]. Cette triple concordance représente un bon indice pour la recherche d'eau souterraine en zone de socle des milieux semi-arides et arides où les végétaux ne sont présents que dans les zones humides signifiant que les failles sont hydrauliquement actives à ce niveau.

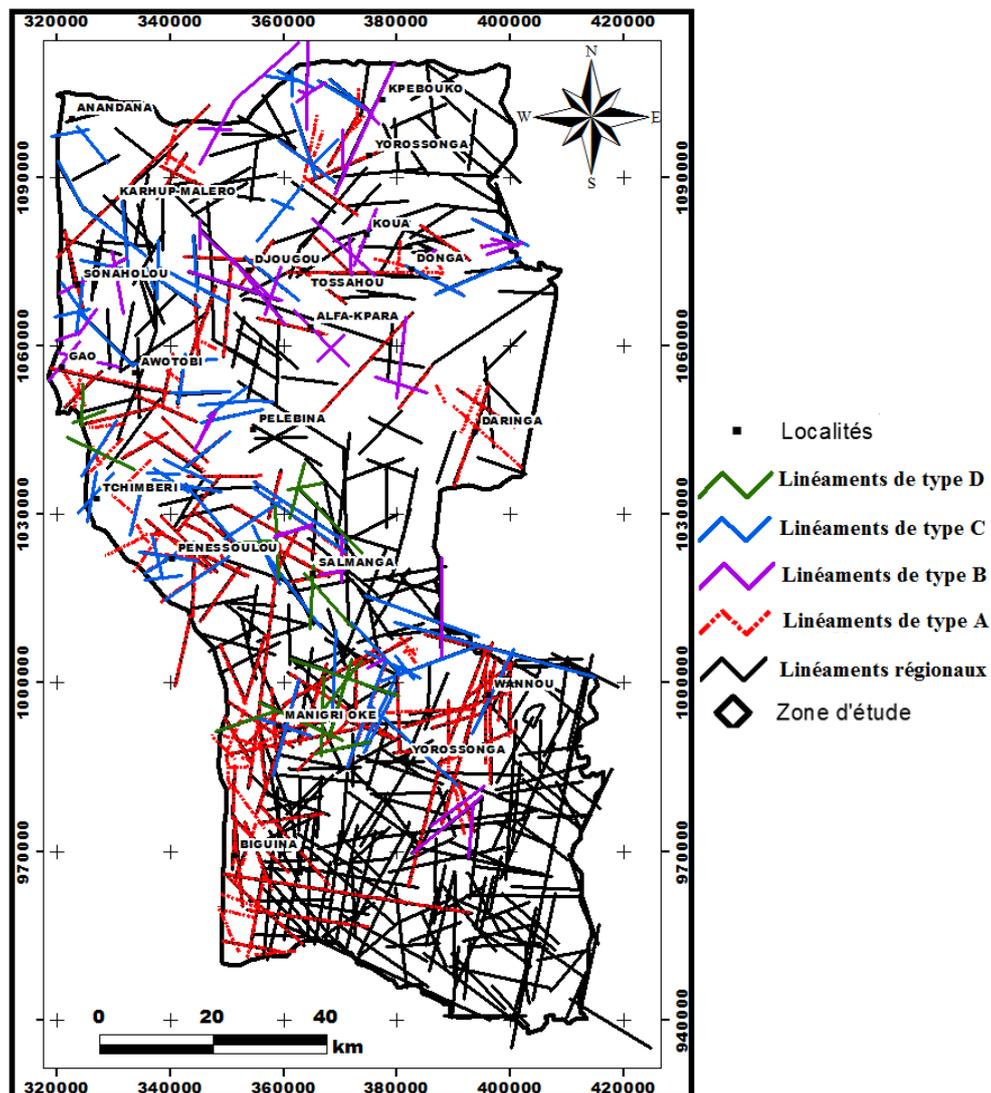


Fig. 7. Carte linéaire extraite des images OLI 8 validé du département de la Donga

4.3.2 DISTRIBUTION DES ORIENTATIONS MAJEURES DES LINÉAMENTS ET DES MESURES STRUCTURALES DES FRACTURES RELEVÉES A L'AFFLEUREMENT

Il se dégage de l'observation de la rosace directionnelle en nombre générée à partir de la carte des linéaments majeurs, une variabilité spatiale de la fracturation. Cette rosace présente une répartition très inégale des classes directionnelles. Les familles directionnelles N-S (N0-10) et NE-SW (N10-40) et E-W (90-110) sont les plus représentées sur cette rosace (figure 8b). Elles présentent des fréquences en nombre voisin de 10%. Ceci pourrait signifier que dans le département de la Donga, les méga fractures épousent préférentiellement les directions N-S, NE-SW et E-W. L'autre classe directionnelles (NW-SE) est minoritaire, parce que ayant des fréquences parfois voisines de 5%.

Les observations et les mesures faites sur les affleurements rocheux (figure 9) ont permis de mieux comprendre et de relativiser les directions linéamentaires mises en évidence au cours du traitement des images satellitaires. Selon [5], la mesure de la fracturation sur l'affleurement constitue une méthode directe d'acquisition de données. Il ressort de ces travaux de terrain l'existence de deux directions principales des accidents géologiques majeurs (N-S et NE-SW) observés sur les affleurements rocheux du département de la Donga (figure 8a). Ces accidents tardifs sont en majorité verticaux. Mais on observe également des failles décrochantes sénestres ou dextres d'orientation N80-120 de moindre fréquence que les fractures sèches. En outre, l'étude structurale de terrain a révélé plusieurs accidents géologiques régionales telles que la faille de Singré-Karhum Malero orientée N40, la Faille de Binaou orientée N20, la Faille de Alfa-kpara orientée N120 et enfin la faille

de Wèwè orientée N10. Les zones de cisaillements identifiées (figure 9b) sur le terrain et correspondant à des zones de broyage et de laminage de roche affectent aussi bien les gneiss que les migmatites. Ces zones sont allongées en couloirs de longueur plurikilométrique et de largeur métrique à hectométrique suivant trois directions reconnues N-S, NE-SW et E-W (figure 7). La rosace directionnelle (figure 8a) conçue à partir des mesures structurales de terrain, montre les directions N-S (27 %), N10-30 (24%), N30-40 (17%) et N100-120 (15%). Parmi ces classes, deux directions principales se démarquent des autres N-S (N0-10) et NE-SW (N10-40) rappelant ainsi les différentes phases de l'orogénèse panafricaine (600 ± 100 Ma). De nombreux filons de quartz, de pegmatites et de dolérites sont développés suivant les directions N-S, NE-SW. C'est le cas des filons de pegmatites de direction N0 formant un couloir de cisaillement dextre dans les migmatites de Wèwè (figures 9b) cartographié sur le terrain. Ces filons une fois altérés, constituent des zones préférentielles d'infiltration et de circulation des eaux souterraines [16], [20], [21]. La rosace directionnelle des accidents géologiques relevés à l'affleurement a été comparée à celle tirée des images satellitaires (figure 8a et b). Cette analyse montre que les deux rosaces directionnelles sont plus ou moins similaires. En effet, les orientations des linéaments en général et les principales classes d'orientation majeure des fractures relevées à l'affleurement en particulier sont concordantes au niveau des deux rosaces.

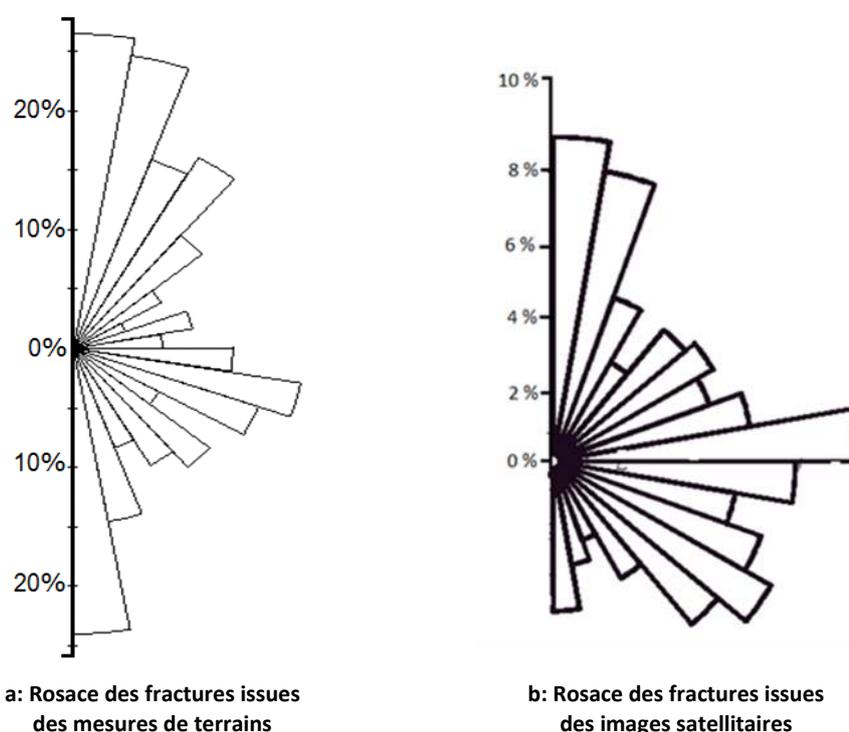


Fig. 8. Comparaison de l'orientation majeure des fractures relevées à l'affleurement (a) et des linéaments extraits des images satellitaires (b) de la région Nord-Ouest du Bénin



a) réseau de fractures ouvertes de direction N 40 Témoin d'une zone de chevauchement à Copargo



b) Filons de pegmatites de direction N0 formant un couloir de cisaillement dextre dans les migmatites de Wèwè



c) fractures ouvertes de direction N5 occupées par les plantes sarcicoles à Bakou



d) fractures Ouvertes sèches de direction N110 dans les gneiss granulitiques

Fig. 9. Principales fractures relevées à l'affleurement

4.4 DISTRIBUTION DIRECTIONNELLE DES FRACTURES RELEVÉES SUR CHAQUE AFFLEUREMENT

Dans le département de la Donga, les grandes directions structurales observées sur les affleurements sont constituées de quatre grandes familles de fractures N0-10, N10-40, N100-130 et N140-160 (figure 11).

Accidents N0-10 : ils sont les plus abondants sur les gneiss migmatitiques, migmatites granitoïdiques (figure 10) et la plupart des filons repérés sur le terrain épouse cette direction méridienne. Ces accidents ont été également repérés sur l'ensemble des grands axes parcourus (figure 11a). Cette direction structurale des fractures est parallèle à la direction des foliations S_n et les grands couloirs de cisaillement (dextre et senestre) du socle cristallin béninois. Cette famille d'accidents rappelle la direction panafricaine N-S en référence à l'orogénèse panafricaine (600 ± 100 Ma).

Accidents N10-40 : Ces structures sont plus observées dans la partie Nord-Ouest de la zone d'étude notamment sur les quartzites (figure 10). Dans les localités de Pénésoulou (figure 5), Akaradè, Copargo et Tchamba-Alédjo-Koura (figure 10), on observe une ouverture d'ordre centimétrique au niveau de cette famille de fractures. C'est certainement l'ouverture de ces accidents géologiques qui favorisent le développement des forêts galeries observées dans cette partie de la zone d'étude. Ces accidents tectoniques N10-40 sont parallèles à la direction de la schistosité S_n des nappes quartzites de la zone externe de la chaîne panafricaine des Dahoméides.

Accidents N100-130 : Cette famille est moins abondante et constitue des structures de décrochement affectant le plus les gneiss de Tchamba-Alédjo, les granulites de Sèmèrè et les gneiss migmatitiques de Pélébina (figure 11c). Ils constituent des fractures transversales qui recoupent les fractures N-S et NE-SW dans tout le socle cristallin du département de la Donga.

Accidents N140-160 : Ces structures géologiques ont été repérées majoritairement sur l'axe Ouaké-Sèmèrè et sur les orthogneiss de Dompago (figure 11d) à l'extrême Nord-Ouest de la zone d'étude. Sur les quartzites d'Akaradè, ces fractures sont des diaclases recoupant les fractures de direction N40. Sur l'axe Pénéssoulou-Akaradè, ils constituent des grands couloirs de cisaillements. A Pélébina, ces fractures sont remplies de pegmatite et de quartz formant ainsi des couloirs de cisaillements senestres avec des fentes de tension.

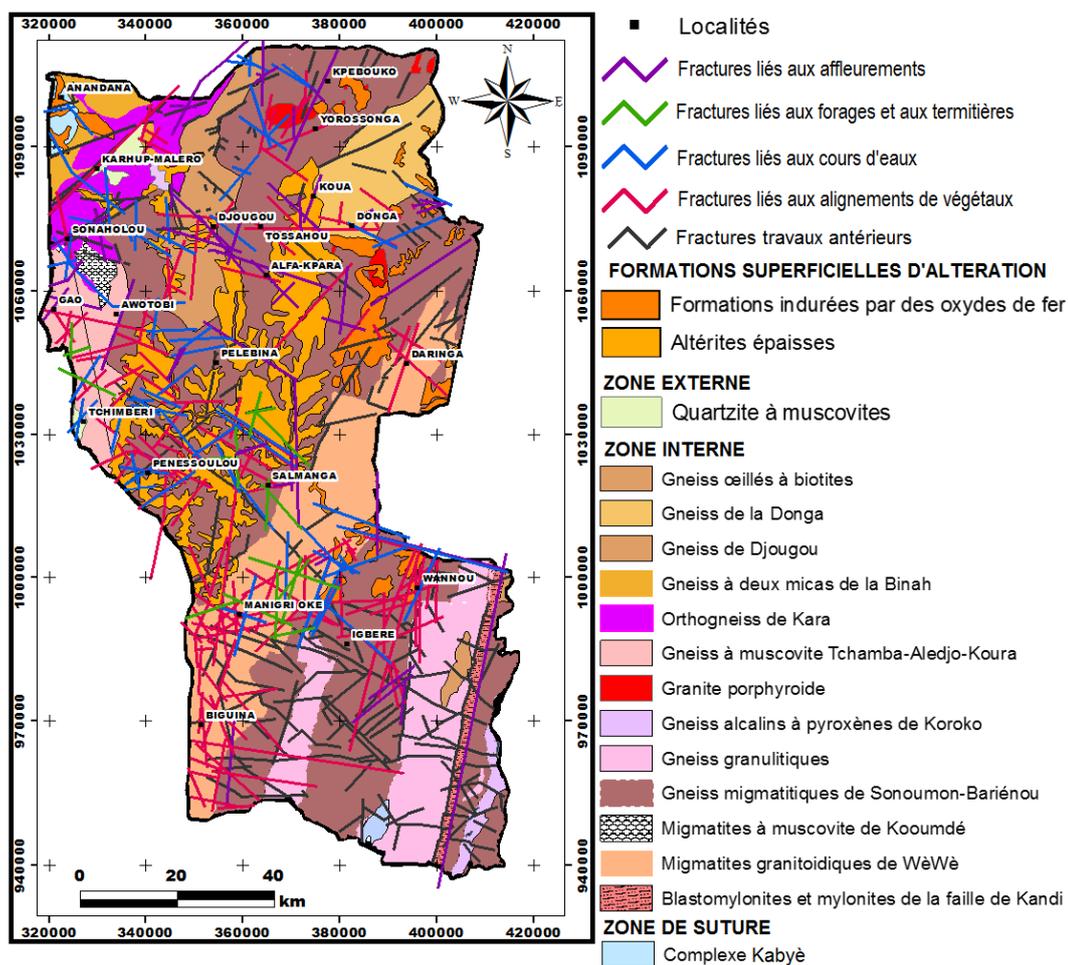


Fig. 10. Relation entre fractures validées et fractures des travaux antérieurs et les formations géologiques

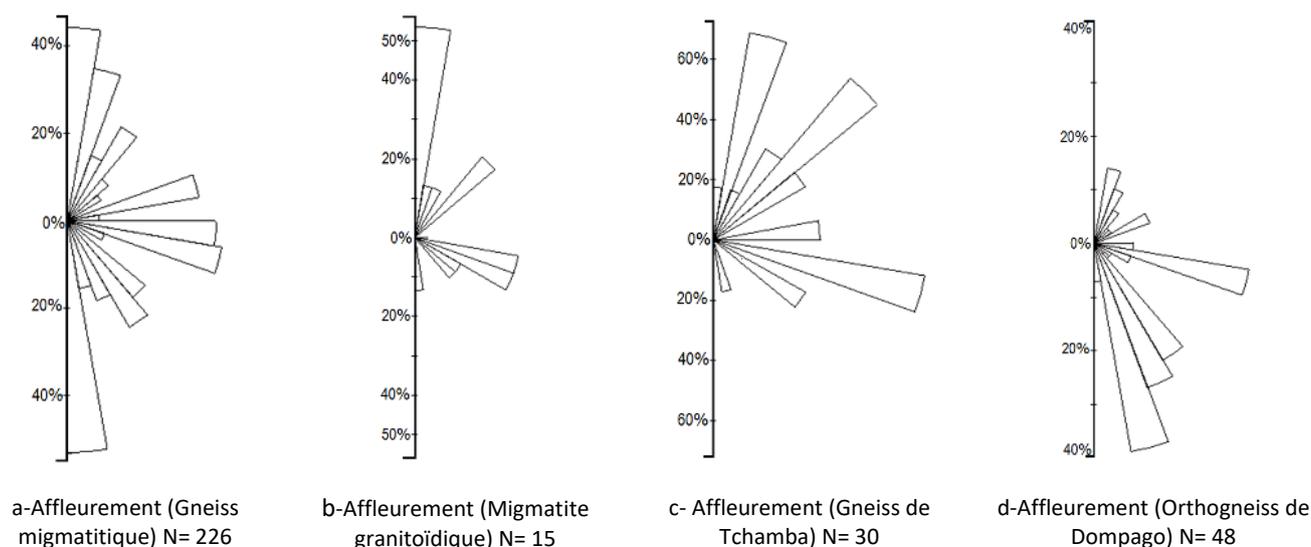


Fig. 11. Distribution des principales directions des fractures du département de la Donga à l'affleurement

5 DISCUSSION

5.1 TÉLÉDÉTECTION ET CARTOGRAPHIE STRUCTURALE DES ACCIDENTS GÉOLOGIQUES MAJEURS

Le traitement des images satellitaires OLI grâce aux compositions colorées des composantes issues de l'ACPS, aux rapports d'images ($\frac{OLI\ 6}{OLI\ 5}$) et à l'utilisation des filtres directionnels (Sobel, Prewitt et gradient de [13],) ont permis de rehausser les accidents géologiques régionaux du département de la Donga. C'est le cas par exemple du couloir de cisaillement de Kandi à forte tendance structurale formé de Blastomylonites, de l'accident allant de Pélénan à Pénésoulou (PP), l'accident allant de Yorossonga à Kpébouko et l'accident allant de Prèkètè à Biguina (BG). La mise en œuvre des techniques de télédétection au cours de cette étude a facilité la détection et la cartographie de certaines fractures non connues jusqu'à ce jour. Le bel exemple est le faisceau d'accidents formant un couloir allant de Singré à Karhup-Malero nommé la faille de Singré. Cette faille de direction N45 se prolonge au Togo et est bien visible sur les images satellitaires.

Dans le département de la Donga, plusieurs grandes structures linéaires d'origine tectoniques ont été mises en évidence et cartographiées à l'aide du rapport de bandes $\frac{OLI\ 6}{OLI\ 5}$. Cet indice a d'ailleurs fourni de très bons résultats dans plusieurs régions du monde notamment, à Korhogo avec [12], à Bondoukou avec [16], avec [3] dans les chaînes des Dan et en Grèce avec [22] sur le terrain montagneux de l'île de Naxos. La cartographie des discontinuités images a davantage été parfaite, grâce à l'application de la technique de l'analyse des filtres directionnels (Sobel, Prewitt et gradient de [13]). Ces méthodes ont été utilisées en Côte d'Ivoire et elles ont donné des résultats satisfaisants dans la région de Man [3], à Korhogo [12], à Bondoukou [16].

En télédétection, la vision synoptique présente l'avantage de montrer l'entité structurale ou lithologique à des échelles locales à régionales. De plus, elle met en évidence les relations existantes entre les différents éléments structuraux, ce qui permet de donner une orientation plus réaliste à l'interprétation des phénomènes géologiques et hydrogéologiques en place dans la région. Néanmoins, la densité de la végétation accompagnée parfois d'une épaisse couche d'altération introduit dans les images des valeurs radiométriques qui rendent difficiles et très souvent impossibles la cartographie de certains accidents géologiques régionaux.

Cette méthode doit toutefois être prise avec certaines retenues car elle présente certaines limites (expérience de l'utilisateur et l'interprétation faite) comme l'ont montré les travaux de [23]. Malgré ces limites, la télédétection constitue un puissant et incontestable outil dans la cartographie des discontinuités tectoniques même les plus discrètes pour la prospection hydrogéologique dans les milieux fracturés. En témoignent les travaux de [2], [3], [11], [12], [17], [20], [22], [24] qui utilisent les techniques de télédétection pour l'étude des ressources en eaux.

5.2 CORRÉLATION LINÉAMENTS –ALIGNEMENT DES VÉGÉTAUX –COURS D’EAU

Pour une amélioration substantielle des résultats obtenus, plusieurs missions de vérification et de validation sur le terrain ont été effectuées. Ces missions ont nécessité l’utilisation de la méthode géologique, géomorphologique, hydrogéologique et botanique. Ce qui a permis la validation complète des différentes cartes de linéaments établies dans le cadre de l’étude.

Les résultats de cette étude sont en accord avec ceux obtenus en Afrique de l’Ouest par [15] et [21] respectivement au Burkina Faso et au Niger. L’influence du système de la tectonique sur le réseau hydrographique a aussi été révélée dans le socle précambrien ivoirien [3], [16] et au Nigeria [25]. Selon ces auteurs, l’altération qui se développe sur les zones les plus fracturées est à l’origine des plages humides favorisant le développement de la couverture végétale en zones de socle. En matière d’hydrogéologie de socle cristallin, les chances de succès des campagnes de prospection de forages d’eau sont plus grandes lorsqu’on s’adressera préférentiellement par ordre, aux linéaments de type B, de type A, de type C et de type D.

5.3 MESURES STRUCTURALES ET DISTRIBUTION DIRECTIONNELLE DES FRACTURES RELEVÉES A L’AFFLEUREMENT

La distribution directionnelle des fracturations relevées à l’affleurement dans le socle cristallin du département de la Donga indique deux directions majeures N-S (N0-10) et NE-SW (N10-40) dues à la variation de l’orientation des champs de contraintes au cours des phases tardives de l’orogénèse panafricaine (600 ± 100 Ma). Ces résultats obtenus sont comparables aux travaux menés par plusieurs auteurs dans le socle précambrien de l’Afrique de Ouest. Ainsi, dans le socle précambrien du Liptako (Niger), [21], [26] ont mis en évidence les directions NE-SO, N-S et NO-SE. Au Nigeria, dans le socle Précambrien de Cross River [25] ont obtenu les mêmes directions, avec des variations mineures dans la direction E-W. Au Burkina Faso, l’analyse directionnelle des fractures à partir des photographies aériennes, des images satellites et des données de terrain, confirme ces différentes directions [15], [27] [28]. Des résultats analogues ont été obtenus dans le socle précambrien de la Côte d’Ivoire par [3], [5], [12], [16]. Les traits structuraux majeurs et les linéaments repérés sur les images Landsat OLI 8 correspondent à des accidents géologiques qui ont affecté le socle cristallin du département de la Donga. Cette méthode validée par les mesures structurales de terrain et des données géologiques, confirme la validité de la méthode utilisée. Ces accidents géologiques cartographiés sont des indicateurs de la présence des réservoirs d’eaux souterraines et de ce fait, elles constituent un support scientifique très capital dans la détermination et la connaissance de la structure des aquifères.

6 CONCLUSION

Le présent travail s’est articulé autour de deux grandes activités que sont le traitement des images satellitaires qui a abouti à l’extraction des linéaments structuraux et la validation des linéaments sur le terrain.

Les études de fracturation, rappelons-le, n’étaient que fragmentaires car elles étaient axées sur la détermination des orientations des fractures par tâtonnement. Notre contribution a été d’un apport très déterminant car elle a permis de cartographier les réseaux de fractures. Ces résultats ont été validés par plusieurs études structurales de terrain qui ont démontré l’existence, dans la région, d’un style tectonique par pli d’aplatissement, par cisaillement ductile avec des plis asymétriques intrafoliaires et enfin, par un cisaillement cassant.

Afin d’orienter les futurs travaux, une étude sur les directions principales des fractures a été effectuée. Ainsi, d’après les résultats, les directions de fractures les plus majoritaires sont les classes de direction N-S (0-10), NE-SO (10-40) et dans une certaine mesure E-W (80-110).

Les diverses méthodes employées pour l’identification des réseaux de fractures susceptibles de former des réservoirs fracturés ont montré leur utilité à cet effet. Car elles ont permis de recueillir certaines informations jusqu’ici inexistantes dans la région et de contribuer à une meilleure connaissance des réservoirs fracturés pour les futures prospections dans le département de la Donga. De toute évidence, les résultats acquis au terme de cette étude montrent que l’on dispose à l’heure actuelle d’assez de données très intéressantes pouvant conduire dans le futur à la discrimination et à la caractérisation de la géométrie des réservoirs fracturés.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée grâce au Projet Eau-Socle-Donga financé par le Fonds National de la Recherche Scientifique et de l’Innovation Technologique (FNRSIT).

RÉFÉRENCES

- [1] J.M. Vouillamoz, F.M.A. Lawson, N. Yalo, M. Descloitres, "The use of magnetic resonance sounding for quantifying specific yield and transmissivity in hard rock aquifers: The example of Benin", *J. Appl. Geophys.*, 107, pp. 16–24, 2014.
- [2] J. Biémi, 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 Sc. Nat, Univ. Abidjan, 493 p, 1992.
- [3] 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 statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale, Thèse de 3ème cycle, Université de Cocody-Abidjan, (Côte d'Ivoire), 194 p, 1999.
- [4] J-C. Maréchal, R. Wyns, P. Lachassagne, K. Subrahmanyam, F. Touchard, "Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle : concordance avec la structure géologique des profils d'altération", *Comptes Rendus Geoscience*, 335, pp. 451-460, 2003.
- [5] T. Lasm, F. Kouamé, N. Soro, J. P. Jourda, J. Biémi, "Analyse géostatistique de la fracturation extraite de l'imagerie spatiale aéroportée et satellitaire. Application à la région de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire)", *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie* 5, p.135-154, 2004.
- [6] R. Wyns, J-M. Baltassat, P. Lachassagne, A. Legtchenko, J. Vairon, and F. Mathieu, "Application of Proton Magnetic Resonance Soundings to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France)", *Bulletin de la Société Géologique de France*, 175 (1), pp. 21-34, 2004.
- [7] L. Adissin Glodji, La zone de cisaillement de Kandi et le magmatisme associé dans la région de Savalou-Dassa (Bénin) : étude structurale, pétrologique et géochronologique, Thèse de doctorat unique des Universités Jean Monnet Saint-Etienne et d'Abomey Calavi, 277 p, 2012.
- [8] P. Affaton, J.L. Lasserre, L.T. Lawson, et P.L. Vincent, "Notice explicative des cartes géologiques au 1/200 000 de la République du Togo et de la République populaire du Bénin entre les 9° et 10° de latitude nord (feuille Bassari Djougou et feuille Parakou-Nikki)", *Rapp. B.R.G.M*, n° 78 RDM 055AF, Orléans, Fr, 70 p, 1978.
- [9] M. Caen-Vachette, K.J.M. Pinto, M. Roques, "Plutons éburnéens et métamorphisme dans le socle cristallin de la chaîne panafricaine au Togo et au Bénin", *Revue Géologie Dynamique Géographie Physique*, 21, pp. 351-357, 1979.
- [10] T. Lasm, Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyses statistiques et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (Domaine archéen), Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 272 p, 2000.
- [11] M. Youan Ta, K. F. Kouamé, A. Koudou, M. G. Adja, D. Baka, T. Lasm, D. O. Lasme, J. P. Jourda, J. Biémi, "Apport de la Cartographie lithostructurale par imagerie satellitaire Landsat 7 à la connaissance des aquifères du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte D'Ivoire)", *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 7, n°. 3 Aug, pp. 892-910, 2014.
- [12] J.P. Jourda, 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, 2005.
- [13] H. Yésou, J. C. Pion, Y. Besnus, R. Saint Jean, "Amélioration des données SPOT pour la cartographie structurale en milieu tropical. Exemple de la région des chapeaux de fer de Pagala (Togo)", *IIIèmes Jour. Scient. Rés. Télédét. UREF*, Toulouse, 13-16 novembre. 1990, pp.143-164. In. J.M. Dubois, F. Blasco (dir), *Outil microinformatique et Télédétection de l'évolution des milieux*, PUQ/AUPELF UREF. Ed., 492 p, 1993.
- [14] Fontès J., Estève P., Gastellu-Etchegorry J-P, "Validation des résultats de traitements d'images spatiales appliqués à l'étude de la dégradation des écosystèmes ligneux secs du Burkina Faso. La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes", *Edition AUPELF-UREF*, pp. 135-143, 1998
- [15] Youssouf Koussoubé, Alain Nindaoua Savadogo et Samuel Nakolendousse, "Les différentes signatures des fractures de socle cristallin en zone sahélo-soudanienne du Burkina Faso (bassin versant de Bidi, province du Yatenga)", *Revue de Télédétection*, vol. 3, n° 5, p. 419–427, 2003.
- [16] M. Youan Ta, Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Cas de la région de Bondoukou Nord Est de la Côte d'Ivoire, Thèse de doctorat, Université de Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire), 236p, 2008.
- [17] J. Hoffmann, P. Sander, "Remote sensing and GIS in hydrogeology", *Hydrogeology journal*, n° 15, pp.1-3, 2007.
- [18] S. M. Himyari, C. Hoepffner, M. Benzakour, D. E. Hadani, "Etude structurale du haut atlas oriental (Maroc) à l'aide de l'analyse linéaire des images HRV (XS) de Spot", *Télédétection*, Vol. 02, n°4, p. 243-253, 2002.

- [19] I. Savane, Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse d'Etat, Université de Cocody (Côte d'Ivoire), 396 p, 1997.
- [20] Y. Koussoubé, Hydrogéologie en milieu de socle cristallin du Burkina Faso. Cas du bassin versant du bas fond de Bidi (Province du Yatenga). Thèse de 3^e cycle Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal), 210p, 1999.
- [21] S. M. Abdou Babayé, Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako-Niger). Thèse de doctorat, Université de Liège, 265 p, 2012.
- [22] I. Galanos, D. Rokos, "A statistical approach in investigating the hydrogeological significance of remotely sensed lineaments in the crystalline mountainous terrain of the island of Naxos, Greece", *Hydrogeology journal*, vol.14, pp.1569-1581, 2006.
- [23] P. Sander, Lineaments in groundwater exploration: a review of applications and limitations. *Hydrogeology journal* vol.15, pp 71-74, 2007.
- [24] P. Brunner, F. H.-J Hendricks, L. Kgotlhang, P. Bauer-Gottwein, W. Kinzelbach, "How can remote sensing contribute in groundwater modelling?", *Hydrogeology journal* vol.15, pp. 5-18, 2007.
- [25] A.E. Edet, C.S. Okereke, E.O. Esu, Application of remote-sensing data to groundwater exploration: A case study of the Cross River State, southeastern Nigeria. *Hydrogeology Journal*, 6, pp 394- 404, 1998.
- [26] B. Ousmane, Etude géochimique et isotopique des aquifères du socle de la bande sahélienne du Niger (Liptako, Sud-Maradi et Zinder-Est), *Thèse Univ. Niamey*. 175 p, 1998.
- [27] A. N. Savadogo, Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta. Etude régionale du Bassin versant de la Sissil. Thèse Doctorat ès Sci. Nat., Univ. Grenoble 1, Inst. Dolomieu, 350 p, 1984.