

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)

[Contribution of the Lithostructural Mapping By Landsat 7 Imagery To Study the Precambrian Basement Aquifers in Bondoukou Region (Northeast Coast Ivory)]

Marc YOUAN TA¹⁻², Koffi Fernand KOUAME¹⁻², Aimé KOUDOU³, Miessan Germain ADJA⁴, Derving BAKA², Théophile LASME²,
Omer DE LASME⁵, Jean Patrice JOURDA¹⁻², Jean BIEMI¹⁻²

¹Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), U.F.R des Sciences de la Terre et des
Ressources Minières (STRM), Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

²Département 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 Félix Houphouët Boigny de Cocody, 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

³Département des Sciences de l'Environnement,
Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) de Daloa, 02 BP 150 Daloa 02, Côte d'Ivoire

⁴Département des Sciences et Technologies-Section Sciences de la Vie et de la Terre,
Ecole Normale Supérieure d'Abidjan (ENS), Côte d'Ivoire

⁵Université Péléforo Gon Coulibaly de Korhogo, BP 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire

Copyright © 2014 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: This study aimed at a better knowledge of aquifers of fractures of Bondoukou region (north-east of Côte d'Ivoire) by making a map of geological formations and structures from satellite Landsat 7 imagery. The techniques of images merging (Selective Principal Components Analysis, RGB encoding, the index-calculus and the tri-color additive synthesis) allowed to identify and map geological formations those constitute paleoproterozoic field of Bondoukou region. The use of spatio-directionnel filtering methods of Sobel and gradient has led to develop detailed map of lineaments. This map includes about 5000 fractures. The study of fracturing intensity raises the character much fractured of Bondoukou region notably in the north and south parts. The contact area between the prophyroid granodiorite and the volcano-sedimentary domain with strong structural tendency was also highlighted. The analysis of fracture networks reveals that the distribution of the lengths of fractures follows the power law. This law indicates that the fracture networks of Bondoukou region would have reached its optimal stage. The values of spacing of fractures fit better to the gamma law. The modelling all azimuths underlines a probability of more than 62% to meet a fracture within one kilometer of distance. The analysis of the induced permeability permits to identify the main corridors of circulation and concentration of groundwaters. These corridors are strongly in relation with the drainage network with which they are more or less superimposed. This state lets suppose an easy recharge of fractured aquifers of Bondoukou region.

KEYWORDS: Fractured aquifers, Landsat 7 imagery, images merging, filtering methods, power law, gamma law, induced permeability, Côte d'Ivoire.

RESUME: Cette étude avait pour objectif une meilleure connaissance des aquifères de fractures de la région de Bondoukou (nord-est de la Côte d'Ivoire) par la cartographie des formations et structures géologiques effectuée à l'aide des images

Landsat 7. Les techniques de fusion d'images (l'Analyse en Composantes Principales Sélectives, le codage RVB, le calcul des indices et la synthèse trichromique additive) ont permis la mise en évidence et la cartographie des grandes formations géologiques qui forment le domaine paléoprotérozoïque de la région de Bondoukou. L'utilisation des méthodes de filtrage spatio-directionnel de Sobel et gradient a abouti à l'élaboration de la carte linéamentaire détaillée. Celle-ci comporte environ 5000 fractures. L'étude de l'intensité de la fracturation relève le caractère très fracturé de la région de Bondoukou notamment dans les parties nord et sud. La zone de contact entre la granodiorite porphyroïde et l'ensemble volcano-sédimentaire à forte tendance structurale a aussi été mise en évidence. L'analyse des réseaux de fractures révèle que la distribution des longueurs de fractures suit la loi de puissance. Cette loi souligne un stade de développement avancé qu'auraient atteint les réseaux de fractures de la région de Bondoukou. Les valeurs d'espacement de fractures s'ajustent mieux à la loi gamma. La modélisation tous azimuts souligne une probabilité de plus de 62% de rencontrer une fracture à moins d'un kilomètre de distance. L'analyse de la perméabilité induite permet d'identifier les principaux couloirs de circulations et de concentration des eaux souterraines. Ces couloirs sont fortement en relation avec le réseau hydrographique avec lequel ils se superposent plus ou moins. Cet état laisse supposer d'une facile réalimentation des aquifères de fractures de la région de Bondoukou.

MOTS-CLEFS: Aquifère de fractures, images Landsat 7, fusion d'images, méthodes de filtrage, loi de puissance, loi gamma, perméabilité induite, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

La connaissance de la nature géologique d'une région et la géométrie de ces réseaux naturels de fractures conditionne grandement les possibilités d'analyse et de résolution de multiples problèmes actuels tels que le stockage des déchets, l'exploitation des ressources naturelles, la réhabilitation d'aquifères contaminés [1]. Ainsi dans la région de Bondoukou, la résolution des problèmes liés à l'exploration et à l'exploitation minière mais aussi ceux en rapport avec la modélisation, la protection et la gestion durable des ressources en eau souterraine passe-t-elle nécessairement par la cartographie lithostructurale du socle paléoprotérozoïque de cette région. Du fait de la baisse régulière des précipitations, l'avancée galopante de la désertification, la dégradation progressive des facteurs environnementaux ces dernières décennies, cette région connaît de graves problèmes d'approvisionnement en eau potable surtout pendant les longues périodes de saisons sèches. Durant ces périodes, tout le réseau hydrographique et les points d'eau (marigots et sources naturelles) de la région s'assèchent. La seule alternative possible qui s'offre aux autorités de la région reste l'exploitation des ressources en eau souterraine grâce à l'implantation des ouvrages de captage (puits et/ou forage). Des études ont montré que l'utilisation des techniques de traitement d'images satellitaires permet de générer des couches d'informations dont l'exploitation à l'intérieur d'un système d'information géographique conduit à une meilleure compréhension du comportement des aquifères et de cartographier les zones d'accumulation ou de circulation des eaux souterraines [2], [3], [4], [5], [6]. Cette étude se propose alors d'utiliser les images satellitaires de Landsat 7 pour la cartographie des formations géologiques et les accidents les ayant affectés en vue de mieux connaître l'aquifère du socle précambrien de la région de Bondoukou. Elle pourrait constituer un document scientifique important à la prospection hydrogéologique en vue d'aider à l'approvisionnement en eau potable des populations de cette région du nord-est de la Côte d'Ivoire.

2 PRÉSENTATION DU SECTEUR D'ÉTUDE

Le secteur qui fait l'objet de cette étude est situé dans la région de Bondoukou au nord-est de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 2°40' et 3°20' ouest et les latitudes 7°55' et 8°30' nord (Figure 1). Cette zone appartient au domaine Baoulé-Mossi de Côte d'Ivoire. L'orogénèse éburnéenne est l'événement tectonométamorphique majeur qui a le plus affecté les formations géologiques de cette région. Situées à l'est de la faille de Sassandra et à l'échelle du secteur d'étude, ces formations paléoprotérozoïques peuvent être regroupées en trois grands ensembles lithologiques (Figure 1). Un ensemble volcanique et sédimentaire, constitué de plusieurs unités pétrographiques (schistes, amphibolite et métadolérite), affleurant dans les régions sud et centre. Un ensemble intrusif constitué essentiellement de granodiorites plus ou moins métamorphosées et secondairement de granites et de tonalites. Un ensemble tarkwaïen constitué de formations détritiques post-tectoniques représentées par les conglomérats, les grès et les arkoses. Au niveau des événements tectoniques, ils s'avèrent complexes et polyphasées générant parfois des distensions responsables de la mise en place des fractures ouvertes à l'instar des autres provinces fracturées de socle du pays [7], [8]. Au plan hydrogéologique, le secteur d'étude présente deux types d'aquifères qui sont les aquifères d'altérites et les aquifères de fissures (fractures). Ces deux aquifères sont généralement superposés, comme dans la plupart des régions de la Côte d'Ivoire. Les aquifères d'altérites sont les plus

superficiels et ont une fonction capacitive alors que les aquifères de fractures sont les plus profonds et ont une fonction essentiellement conductrice [4].

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 MATÉRIEL

La réalisation de cette étude a nécessité l'utilisation d'un matériel composé de données images, de fonds cartographiques et des données recueillies sur le terrain. Les données images sont les huit (8) bandes acquises le 02 février 2000 par le capteur ETM+ de Landsat 7. Ces images orthorectifiées apparaissent en générale très claires et nettes. Pour couvrir toute la zone d'étude, il a fallu juxtaposer des quadrants 1 de la scène 195-054 (path 195, row 054) et 3 de la scène 195-055 (path 195, row 055).

Les fonds cartographiques couvrant entièrement la zone d'étude sont constitués de cartes topographiques (publiées par le Centre de Cartographie et de Télédétection en 1994), géologiques [7], [8], [9] et photogéologiques [10] toutes établies à l'échelle 1/200000.

Les missions de vérité terrain ont permis de collecter diverses informations relatives à la nature et à la localisation des affleurements, des échantillons de roches recueillis et aux mesures structurales. Ces mesures structurales sont nombreuses et diversifiées. Il s'agit des longueurs, des ouvertures, des espacements et des directions des fractures. L'analyse de l'ensemble de ces informations contribue à valider les résultats d'interprétation des images traitées mais également fournit des informations importantes aidant à l'estimation de la perméabilité induite par les fractures de la région de Bondoukou.

De nombreux logiciels ont été utilisés en vue d'atteindre les objectifs fixés conformément à l'approche méthodologique adoptée. Tous les travaux de traitements de l'image ETM+ ayant abouti à l'établissement de la carte lithostructurale et de celle des linéaments détaillés ont été exécutés à partir du logiciel ENVI 4.4. La caractérisation de la géométrie de l'aquifère de fissures et la compréhension de son fonctionnement hydrodynamique nécessite l'utilisation de plusieurs logiciels. Ce sont : Linwin 2.0, RAFESP, Statistica 6.0, SURFER™ 9, Map-Infos™ 8.0 et EVC.

3.2 MÉTHODES

La 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 lithologique et structurale suivie, des méthodes de la caractérisation géométrique et l'analyse hydrodynamique des réservoirs fissurés.

3.2.1 MÉTHODOLOGIE POUR LA CARTOGRAPHIE LITHOSTRUCTURALE À PARTIR DE LA TÉLÉDÉTECTION

Les différentes méthodes utilisées pour le traitement des images peuvent être regroupées en deux grands ensembles. Il s'agit des techniques de fusion des images et de filtrage spatio-directionnel. Ainsi, l'analyse en composantes principales sélectives (ACPS) a permis de fusionner les images multispectrales du visible (ETM+1, 2, 3) d'une part et de l'infrarouge (ETM+4, 5, 6, 7) d'autre part à la bande panchromatique de haute résolution spatiale (ETM+8). Ces différentes bandes ont également permis l'application de la technique de fusion par codage RVB. Des rapports de bandes à savoir ETM+4/ETM+5, ETM+4/ETM+6 et ETM+4/ETM+7 ont été calculés. Les images issues de ces différents traitements ont été utilisées pour la réalisation de la technique de synthèse trichromique additive. La technique de filtrage par fenêtre mobile est plus pertinente pour la cartographie des discontinuités et des structures linéaires disséminées dans les images satellitaires. Les filtres Sobel et gradient de dimension 7x7 ont été appliqués aux bandes ETM+5, ETM+7, ETM+5 / ETM+4, ACP1₅₈ et ACP1₅₆₇₈. Ces filtres directionnels dont les matrices d'application sont présentées dans les travaux de [4], [5] ont été conçus pour faire ressortir ou masquer des caractéristiques spécifiques d'une image en se basant sur leur fréquence liée à la texture [11]. Les détails de toute la procédure de contrôle et de validation de la cartographie lithostructurale nécessitant l'utilisation des cartes géologiques et photogéologiques existantes mais aussi les informations recueillies sur le terrain, sont présentés dans les travaux de [4], [5]. Les cartes des formations lithologiques et des fractures détaillées établies lors de cette étude pour la région de Bondoukou ont servi à la caractérisation de la géométrie des réservoirs et à l'analyse hydrodynamique des réservoirs fissurés.

3.2.2 MÉTHODOLOGIE POUR LA CARACTÉRISATION DES AQUIFÈRES DISCONTINUS ET ANALYSES HYDRODYNAMIQUES

Dans cette étude, les outils d'analyse statistique et un système hydrogéologique à référence spatiale seront utilisés pour la caractérisation géométrique des aquifères discontinus et la compréhension du fonctionnement des réservoirs fracturés. L'intensité de la fracturation, c'est-à-dire la densité de fracturation exprimée en nombre par mailles de 5 km × 5 km a été étudiée et sa distribution spatiale analysée à travers les différentes formations lithologiques cartographiées par la télédétection. La fracturation de ces roches dures cristallines a été analysée suivant les techniques de l'analyse statistique. Il s'agit essentiellement de l'étude des lois de distribution (exponentiel, lognormal, gamma et puissance) du paramètre de taille et d'espacement. Enfin, la perméabilité induite par le réseau de fractures a été étudiée en vue de procéder à la cartographie des couloirs de circulation d'eaux souterraine de la région de Bondoukou. La méthode proposée par [12] a été utilisée à cet effet. Après la prise en compte des hypothèses simplificatrices de base de cette approche et la détermination de la conductivité hydraulique ($K_f = 1,61 \cdot 10^{-4}$ m/s) de la région et du coefficient empirique de proportionnalité ($C = 0,00559$) entre l'ouverture et la longueur des fractures à l'affleurement, la perméabilité induite (P_i) est calculée automatiquement par le programme (EVC) à partir des formules de Franciss [5]. Pour plus d'informations sur le principe, la méthode et le fondement de la formule de Franciss, nous renvoyons les lecteurs aux documents de [12], [13], [14].

4 RÉSULTATS

4.1 CARTOGRAPHIE DES CONTOURS LITHOLOGIQUES À PARTIR DES IMAGES TRAITÉES

L'observation des tons, des textures, du mode d'agencement des divers objets thématiques contenues dans l'image et de la configuration du réseau hydrographique a permis d'identifier les contours des formations géologiques par comparaison aux données géologiques de la zone d'étude et celles recueillies sur le terrain. La figure 2 présente une composition colorée réalisée à partir des premières composantes issues de l'application des techniques de fusion d'image à savoir les APCS ($ACP_{1_{123}}$ et $ACP_{1_{567}}$) et le rapport de bandes $\frac{ETM+5}{ETM+4}$ en tonalité inverse. Trois grands domaines de teintes se dégagent de l'analyse de cette image.

- un domaine localisé au Nord apparaît au niveau de ces images dans un ton noir à texture rugueuse et grossière, caractérisé à l'Est par un réseau de type dendritique et à l'Ouest par un réseau de type treillis. Il laisse entrevoir le réseau hydrographique et par conséquent la fracturation qui y est rattachée. Ce domaine s'identifie à un vaste ensemble granitique (GD : métatonalite et métagranodiorite) ;

- dans la partie centrale de la zone d'étude se dessine très clairement un domaine dans une texture lisse et plus fine. Les contours Nord, Est et Sud-Est d'une structure en forme de croissant avec les pointes tournées vers le Nord-Est sont bien visibles. Une analyse plus poussée de ce domaine met en évidence un sous-domaine. Il s'agit d'une structure située au Sud-Est du grand domaine, de forme lenticulaire recourbée selon un axe général N-S qui évoque une allure plissée. Le réseau hydrographique, avec des cours d'eau généralement d'ordre 1 y est assez dense. Ce sous-domaine s'identifie aux métavolcanites (MV), alors que le reste du domaine correspondrait à l'ensemble des formations volcano-sédimentaires (VS).

- un domaine dont la teinte est rendue claire par l'influence de la végétation active avec par endroit une coloration vert bleutée et occupant toute la partie sud et ouest de la zone d'étude, est bien visible au niveau de cette image. Ce domaine laisse transparaître clairement trois sous-domaines. À l'extrême Ouest, une structure de forme ovoïdale traversée par deux linéaments de direction NE-SO apparaît. Cette structure correspond au granite à biotite de Bilikié (GB). Au Sud, une structure arrondie, caractérisée par un réseau hydrographique de type radial apparaît également. Cette structure est limitée au Sud par une structure lenticulaire recourbée selon un axe N-S évoquant également une allure plissée. La structure de forme arrondie s'identifie à la formation granodiorite porphyroïde de Bondoukou (BK), celle de forme lenticulaire correspond aux métasédiments du Tarkwaïen (MS). Ce grand domaine correspondrait donc à un grand ensemble intrusif (G) à l'exception des métasédiments.

Une analyse plus détaillée de certaines images traitées permet de cartographier au sein des volcano-sédimentaires l'ensemble lithologique connu sous le nom de métavolcanites. Ces derniers sont rehaussés par la première composante $ACP_{1_{58}}$ (Figure 3). Ces formations apparaissent dans un ton plus clair sur cette composante avec une texture présentant la configuration plus ou moins striée. En effet, elles sont caractérisées par un réseau hydrographique assez dense avec des cours d'eau généralement d'ordre 1. Sur la carte géologique, cette structure de forme lenticulaire recourbée selon un axe général N-S correspond à un ensemble complexe constitué de métaandésites, métarhyolites, métadolérites et de métamicrogabbro [8]. Les compositions colorées $ACP_{1_{47_ACP_{1_{57_ACP_{1_{27}}}}$ et $ACP_{1_{123_ACP_{1_{567}}}$ $\frac{ETM+5}{ETM+4}$ (Figure 4 A et B)

permettent de mieux isoler la structure lenticulaire de direction Nord-Sud, située le long du flanc ouest du domaine (BK). Sur la première composition, elle a une coloration verte, alors que la seconde composition la présente dans une coloration violette pâle. La carte géologique et surtout les données de terrain permettent de conclure qu'il s'agit de formations amphibolitiques (A) associées aux volcano-sédimentaires. La composition colorée $ACP_{1_{123}} - ACP_{1_{567}} - \frac{ETM+5}{ETM+4}$ de la figure 2 permet une cartographie plus ou moins complète des micaschistes (MSC). La structure de forme lenticulaire est mise en évidence par la composition colorée ETM+4 ETM+5 ETM+7 après rehaussement par égalisation. Cette structure s'identifie aux métaгранites à biotite de Wawé (MGB) sur la carte géologique [8]. Elle est localisée à l'Est de la zone d'étude et apparaît dans une coloration bleue pure.

4.2 CARTOGRAPHIE STRUCTURALE À PARTIR DES IMAGES TRAITÉES

L'identification des principaux couloirs a été possible grâce à l'analyse de certaines images traitées. La figure 5 présente le rapport de bandes $\frac{ETM+5}{ETM+4}$. L'analyse de cette image a mis en évidence de nombreux accidents géologiques régionaux dont les principaux sont :

- l'accident allant de Donvagne à Brougoudon (DB) de direction N30° ;
- l'accident allant de Yérékayé à Niangomami (YN) de direction N60° ;
- l'accident allant de Niambrega à Kamala (NK) de direction N50° ;
- l'accident allant de Lamoli à Pétéyé (LP) de direction N20° ;
- le couloir allant de Koboko à Assouanyé (KA) de direction N20° et
- un faisceau d'accident formant un couloir allant de Bilaodi à Koboko (BK) avec des directions N110° et N140° que nous appellerons la faille de Bilaodi.

Cette image permet, en outre, la vectorisation du réseau hydrographique et éventuellement les accidents géologiques qui y sont rattachés. De nombreuses structures linéamentaires régionales non représentées sur les cartes géologiques existantes ont ainsi été identifiées sur les images traitées. Les filtres spatiaux (directionnels de Sobel et gradients asymétriques de Prewitt et de [15]) ont été appliqués sur les images améliorées fournies par les indices $(ETM+5)/(ETM+4)$, les ACPS (ACP158 et ACP1567) et sur quelques bandes brutes (ETM+7) pour le rehaussement des linéaments. Alors que les filtres Sobel rehaussent les linéaments ou les contours perpendiculaires à leur direction de convolution, ceux de Prewitt et [15] le font dans toutes les directions. Ces filtres ont permis de mettre en évidence un grand nombre de linéaments régionaux et locaux (Figures 6 et 7). Les accidents DB de direction N30° et BK dont la partie de direction N110° sont visibles sur les images filtrées. La carte de la figure 8 présente le résultat final obtenu après l'opération d'extraction manuelle des linéaments effectuée sur les images ETM+ traitées. Ces linéaments des tailles et des directions différentes après validation ont valeur de fracturation. L'interconnexion de ces fractures forme un réseau très dense de près de 5000 fractures.

La figure 9 illustre la carte lithostructurale de la région de Bondoukou. Cette carte résulte de l'analyse et de l'interprétation des images brutes et dérivées ayant abouti à la délimitation des contours géologiques et à la cartographie des accidents locaux et régionaux de la région. Elle fait la synthèse des mises à jour des contours lithologiques, des fractures régionales et couloirs de la région de Bondoukou.

Sur la base de cette connaissance acquise, la caractérisation géométrique et l'analyse hydrodynamique ont été exécutées.

4.3 CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES AQUIFÈRES DE FISSURES DE LA RÉGION DE BONDOUKOU

4.3.1 ÉTUDE DE L'INTENSITÉ DE LA FRACTURATION

La réalisation de la carte d'isovaleurs de distribution de la densité de fracturation exprimée en nombre de fractures par maille, permet de mieux observer ce paramètre.

Une analyse globale de cette carte montre que la région de Bondoukou est très fracturée et que les zones de forte densité (> 35 fractures par maille) occupent plus de la moitié de la surface étudiée. En effet, ces fortes densités de fracturation occupent 2611 km² (soit 55,14 %) des 4735,50 km² que couvre la zone d'étude. Ces zones à forte densité forment deux grands blocs situés au Sud et au Nord tout en occupant toujours la charnière centrale de la zone d'étude avec des prolongements suivant la direction E-O. Une zone de faible densité en nombre de fractures apparaît clairement suivant

l'axe régional Bilikié-Sokola. En général, les zones à faible densité encadrent celles de fortes densités et se localisent au niveau des limites du secteur d'étude, ce qui pourrait s'expliquer par l'effet de bordure.

D'un point de vue géologique, les fortes intensités de fracturation correspondent majoritairement aux domaines des schistes volcano-sédimentaires. Il s'agit des zones à relief accidenté. La zone à forte tendance structurale identifiée par la télédétection est parfaitement illustrée au niveau de la carte de densité de fracturation exprimée en nombre de fracture (entourée en pointillé) (Figure 10). Cette zone correspond certainement à un couloir souterrain qui s'exprime par des petites fractures, mais en nombre important. La granodiorite porphyroïde de Bondoukou qui est une formation intrusive post-tectonique est parfaitement mise en évidence au niveau de cette carte. La partie centrale de cette formation est moins fracturée par rapport à ces contours.

4.3.2 ANALYSE STATISTIQUE DE LA FRACTURATION

La carte de fracturation obtenue après divers traitements compte environ 5000 fractures de tailles variables, comprises dans l'intervalle [0,233 km ; 88,980 km].

Le traitement du champ de fracturation donne environ 921 mesures d'espacement. Ces mesures oscillent entre 5,34 m et 7 583,83 m, soit sur 3 ordres de grandeurs. Les minima, maxima, la moyenne et l'écart-type de chacun des paramètres sont consignés dans le **tableau 1**.

Les longueurs de fractures s'ajustent mieux à la loi de puissance. Celle-ci est définie par l'expression (1) :

$$N(l) = 17022 \times l^{-2,9865} \quad \text{Equation (1)}$$

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

Le résultat de cet ajustement est illustré à la figure 11A. L'analyse du graphe permet de distinguer une portion linéaire ($l \geq 2,23$ km) sur laquelle il est possible d'ajuster une loi de puissance. Le coefficient de détermination ($R^2=0,96$) peut être considérée comme significative. Cet ajustement est donc satisfaisant pour les longueurs de fractures (l) supérieures à 2,23 km

En revanche, les valeurs d'espacements s'ajustent de manière satisfaisante à la loi gamma (Figure 11B). Selon cette modélisation, les blocs fracturés ayant une taille inférieure à 1 km occupent une proportion de 62,8 %. Ainsi, en suivant toutes les directions, on a plus de 62 % de chance de rencontrer une fracture à moins d'un kilomètre de distance.

4.4 ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES HYDRAULIQUES DE LA FRACTURATION

4.4.1 PERMÉABILITÉS INDUITES PAR LES FRACTURES

La perméabilité induite par les fractures dans la région de Bondoukou varie de 1,164 à $9,566 \cdot 10^{-6}$ m/s (soit 4,190 à 34,438 mm/h). La moyenne régionale de la perméabilité induite dans cette région du pays est de l'ordre de 10^{-6} . Les différentes valeurs de perméabilité induites calculées ont été utilisées pour générer la carte de perméabilités de la région de Bondoukou. Cette carte montre une variabilité spatiale de la perméabilité. Les zones à fortes perméabilités induites coïncident avec celles de fortes densités de fracturation (Figure 12).

4.4.2 COULOIRS SOUTERRAINS DE CIRCULATION ET AXES PRÉFÉRENTIELS D'ALIMENTATION DES NAPPES

La superposition dans un même plan, à l'intérieur d'un SIHRS de la carte des variations spatiales des perméabilités induites (Kmoy) et la carte des principaux cours d'eaux permet d'étudier les couloirs de circulation des eaux souterraines (Figure 13). L'identification de ces couloirs est l'aboutissement de la détermination des perméabilités induites par la méthode de Franciss. Ces couloirs sont définis par l'allongement suivant une direction des courbes (concentriques) d'isovaleurs à perméabilité élevée. Sur cette carte de synthèse apparaissent deux principaux axes à perméabilité élevée. Ces axes sont assimilés à des axes préférentiels d'écoulement souterrain ou couloirs de circulations des eaux souterraines.

Le premier axe à forte valeur de perméabilité de direction NE-SO traverse toute la zone d'étude en partant de Lamoli (au SO) jusqu'à Kamala (NE) en se superposant à l'accident régionale (NK) allant de Niambra à Kamala détecté sur les images satellitaires. Les principaux cours d'eau du réseau hydrographique de type dendritique épouse exactement cette direction et se superposent parfaitement sur ce couloir de circulation des eaux souterraines. Le deuxième axe est de direction NS et passe par la localité de Laoudi-Bâ. La partie sud de ce couloir correspond à la zone identifiée à l'aide de la télédétection

comme étant à haute tendance structurale (couloir KA ; Koboko - Assouanyé). Ces axes qui s'entrecroisent dans la partie centrale de la zone d'étude sont reliés au Sud par la grande faille de Bilaodi de direction NO-SE (Figure 9). Ils seraient probablement les axes préférentiels d'alimentation de la nappe souterraine. Il s'est développé également des axes secondaires avec des perméabilités relativement faibles. Les axes secondaires sont d'extension modeste. L'un est très bien visible à l'Est de la ville de Bondoukou ceinturant pratiquement cette agglomération. Un cours d'eau se loge parfaitement dans ce couloir occasionnant une recharge lente des nappes souterraines par le biais d'une perméabilité relativement faible. Un autre couloir de direction NE-SO est situé à l'Ouest de la localité de Bilaodi. Au Nord-Ouest de la zone d'étude, on note localement la présence des réservoirs de concentration des eaux souterraines au niveau du réseau hydrographique de type treillis.

4.4.3 UTILITÉ DES ZONES À FAIBLES PERMÉABILITÉS INDUITES

Les zones à faibles perméabilités sont recherchées pour l'implantation des infrastructures d'importance vitale tel un barrage (Figure 13). En effet, ces zones limitent les infiltrations et donc empêchent le barrage de se vider.

Le barrage permet la subsistance de la pratique des cultures maraîchères dans cette partie de la région de Bondoukou contribuant ainsi à sauvegarder un pan important de l'économie nécessaire au développement durable de toute la région. L'implantation du barrage de Boda situé au Nord-Est de la ville de Bondoukou a obéi à cette logique. La figure 13 montre bien l'implantation du barrage de Boda dans une zone où la perméabilité induite par les fractures ne dépasse guère 3.10^{-6} m/s (zone à très faible perméabilité induite). Ceci confirme la validation de la carte de fracturation issue des traitements des images satellitaires.

5 DISCUSSION

5.1 TÉLÉDÉTECTION ET CARTOGRAPHIE LITHOSTRUCTURALE

Les images satellitaires ETM+ de Landsat 7 ont été prises le 02 février 2000. Cette période correspond à la saison sèche dans la région de Bondoukou. Le ciel étant bien dégagé, les images satellitaires prises sont propres et sans bruits. Elles se prêtent donc très bien à la cartographie des objets géologiques de cette région.

L'ACPS, en fusionnant les images des différentes parties du spectre électromagnétique, a permis de rehausser les différences entre les propriétés spectrales des diverses formations lithologiques facilitant ainsi leur cartographie. Les compositions colorées des composantes issues de l'ACPS et des indices ont également augmenté le contraste entre les propriétés spectrales des différentes entités géologiques de la zone d'étude. L'analyse et l'interprétation de toutes ces images dérivées ont abouti à l'actualisation de la carte des formations géologiques de la région de Bondoukou. Cette actualisation a concerné les limites Est (région Sokola) et Sud-Ouest (région de Hérébo) des schistes volcano-sédimentaires. La limite Sud-Ouest de ces formations serait imposée par la faille de Bilaodi (BK) de direction NO-SE. De même, certaines limites Nord-Ouest seraient définies par l'accident régional allant de Niambra à Kamala (NK). L'actualisation des limites géologiques a également concerné les contours des granites à biotite de Bilikié (GB) à l'Ouest et ceux des métagranites à biotite de Wawé (MGB) à l'Est, par rapport à leurs limites sur les cartes géologiques existantes. De plus, la limite séparant les métagranodiorites (GD) du Nord des formations granitiques (G) du Sud inexistante sur les cartes géologiques déjà réalisées, a été rehaussée et cartographiée. Les limites de la granodiorite porphyroïde de Bondoukou et celles des formations tarkwaïennes (métasédiments) ont été plus ou moins re-précisées ou confirmées par endroits.

Le traitement des images par les techniques d'ACPS, de combinaison d'images et la composition colorée ont donc permis la réalisation de la carte géologique actualisée de la région de Bondoukou. Des résultats similaires ont été obtenus par [2], [3], [5], [13], [14], [16]. Ces auteurs ont utilisé ces techniques de traitements des images satellitaires pour la cartographie des formations géologiques de leur zone d'étude respective. L'utilisation des huit (8) bandes de Landsat 7 a fortement contribué à améliorer la qualité de la discrimination des éléments géologiques. En effet, la fusion des bandes à hautes résolutions spectrales (bandes 1 à 7) et de la bande panchromatique à haute résolution spatiale, génère des images riches dont l'analyse et l'interprétation ont abouti à l'actualisation de la carte géologique de la région de Bondoukou. Malgré cette richesse des images dérivées, les limites entre certaines surfaces homogènes sont parfois difficiles voire impossibles à cartographier. En effet, il apparaît entre ces surfaces homogènes, des zones de transition au niveau desquelles, la variation des tons des couleurs ou des niveaux de gris est très faible. Le contraste demeure très faible malgré les rehaussements effectués. La cartographie des limites séparant les micaschistes des métagranodiorites au Nord et de la granodiorite porphyroïde au Sud a rencontré cette difficulté. La faible extension des nombreuses formations de complexe volcano-sédimentaires rend impossible leur parfaite cartographie. C'est également le cas de certaines formations gneissiques. Ces obstacles (limites)

rencontrés par la télédétection sont surmontés par les études (pétrologie, géochimie, géochronologie, etc.) effectuées à partir des échantillons récoltés sur le terrain [7], [8], [9], [17]. Ces auteurs ont proposé une cartographie de plusieurs unités géologiques au sein de l'ensemble volcano-sédimentaires. Certaines unités (métaandésite) ont une superficie de seulement 0,36 km². Des études de pétrologie et de géochronologie ont été réalisées par [17] dans la région de Bondoukou, notamment sur la granodiorite porphyroïde et les formations attribuées au Tarkwaïen du Ghana. La cartographie résultant de ces études fixe les contours lithologiques qui restent globalement similaires à ceux définis par la télédétection.

Le traitement des images satellitaires ETM+ grâce aux combinaisons d'images $\left(\frac{ETM+5}{ETM+4}\right)$ et à l'application des filtres directionnels (Sobel, Prévitt et gradient de [15]) ont permis la mise en évidence dans la région de Bondoukou des accidents d'extensions régionale et locale. C'est le cas par exemple des failles de Bilaodi (BK), de Bilikié (DB), et du couloir (KA) a forte tendance structurale bordant le flanc ouest de la granodiorite porphyroïde de Bondoukou.

Ces accidents sont dans bien des cas jusque-là mal connus, car ils n'ont jamais été répertoriés ou signalés antérieurement. La mise en œuvre des techniques de télédétection au cours de cette étude a facilité la détection et la cartographie de ces fractures non connues jusqu'à ce jour. L'accident de Bilaodi, orienté NO-SE bien visible sur les images satellitaires est constitué en réalité de plusieurs faisceaux. Il correspond à la faille passant par la localité portant le même nom. Cette faille a été cartographiée par la SODEMI [8], avec une longueur bien inférieure à celle déterminée sur les images traitées. En réalité, l'accident de Bilaodi se prolonge jusque dans les formations de métasédiments au Sud de la granodiorite de Bondoukou et constituerait la limite Sud-Ouest des Schistes volcano-sédimentaires. Dans la région de Bondoukou, plusieurs grandes structures linéaires d'origine tectoniques ont été cartographiées à l'aide du rapport de bandes $\frac{ETM+5}{ETM+4}$. Cet indice a d'ailleurs fourni de très bons résultats dans la région de Korhogo [2]. En effet selon cet auteur, ce rapport a permis la cartographie des éléments structuraux et les paléochenaux imprimés dans le bed rock. Des résultats similaires ont été obtenus par [14] dans les chaînes des Dan et des Toura et par [18] sur le terrain montagneux de l'île de Naxos en Grèce. La cartographie des discontinuités images a davantage été parfaite, grâce à l'application de la technique de filtrage directionnel (Sobel, Prévitt et gradient de [15]). Ces méthodes ont été utilisées avec succès à Korhogo [2] et dans la région de Man [14].

5.2 ANALYSE STATISTIQUE DES PARAMÈTRES DE LA FRACTURATION ET PERMÉABILITÉ INDUITE

L'analyse des paramètres géométriques de la fracturation indique que les longueurs de fractures sont distribuées suivant une loi de puissance. L'exposant caractéristique de la loi de puissance (α) est égal à 2,99 et est en accord avec les données de littératures comprises généralement entre 1 et 3 [1], [2], [19]. Cet exposant peut varier d'un champ à un autre comme l'attestent les travaux de [1], [2], [19], [20], [21]. Cet exposant α fixe la proportion de grandes fractures par rapport aux petites. Les variations de l'exposant caractéristique (α) de la loi de puissance sont le signe que les réseaux observés dans la nature sont à différents stades de maturité, c'est-à-dire de développement [2], [19], [20], [21]. La distribution des longueurs de fractures suivant la loi de puissance indique que les réseaux de fractures de la région de Bondoukou auraient atteint un stade de développement très avancé comme le soutiennent [4], [19], [20], [21], [22]. Pour ces auteurs, tous les réseaux de fractures naturels au terme de leur développement doivent avoir leurs longueurs de fractures distribuées suivant une loi de puissance. C'est le cas de la fracturation dans les roches dures cristallines. Des résultats analogues ont été obtenus par différents auteurs [1], [2]. La loi de distribution constitue donc un indicateur de stade de développement des réseaux de fractures dont le stade final correspond à une loi de puissance. Un réseau de fracture se développe par la mise en place de nouvelles fractures sous l'action de nouvelle contrainte. Pour un réseau ayant atteint la maturité (stade de développement très avancé), même en cas de nouvelle contrainte, il ne peut y avoir de mise en place de nouvelles fractures, mais seulement les anciennes fractures seront remobilisées. La loi de puissance dans la région de Bondoukou, caractérise les longueurs de fractures supérieures à 2,23 km. Pour les fractures de tailles inférieures, il y a un problème de sous échantillonnage qui ne permet pas de rendre compte des petites fractures [1] [19]. Les résultats de certains travaux [19], [23], [24] suggèrent pour une meilleure caractérisation, un échantillonnage à différentes échelles et de recalculer les données pour obtenir une seule distribution.

L'espacement des fractures, un paramètre géométrique important qui conditionne la taille des blocs fracturés et est susceptible de renseigner sur le comportement et/ou la perméabilité du système de fractures. Il contrôle aussi la mise en place des nouvelles fractures. Les études des espacements menées sur des roches de nature et de compétence différentes ont permis de souligner l'intérêt de ce paramètre dans la fracturation [1], [19], [25], [26]. En dépit des nombreuses études menées jusqu'ici sur l'espacement des fractures, la loi de distribution de ce paramètre reste très controversée dans la littérature : loi exponentielle négative [27], loi lognormale [28], lois normale et Gamma [25], loi de Weibull [29], loi de puissance [1], [2] [30].

Le paramètre de proximité dans les roches dures du Paléoprotérozoïque de Bondoukou est distribué suivant une loi gamma. Des résultats similaires ont été obtenus par divers auteurs [19], [25]. Tout comme les paramètres de taille, les espacements peuvent être affectés par des biais liés aux effets de bords et au positionnement exact des fractures [25], [26]. Les travaux sur les modèles analogiques et les simulations numériques de champ de fractures conduits par [26] ont montré que la distribution des espacements évolue également avec le développement des familles de fractures et la déformation. Le stade initial de développement correspond à la distribution exponentielle des espacements et le stade final de maturité correspond à la distribution normale. [26] suggèrent d'utiliser la distribution des espacements comme un indicateur de stade de développement des familles de fractures. [25] et [31] indiquent que la connaissance de la loi de distribution des espacements est susceptible de fournir des informations sur la genèse et l'évolution des systèmes de fractures. D'autres paramètres peuvent affecter la distribution des espacements des fractures dans les roches, notamment l'intensité de la déformation, la nature de la roche, la température et la profondeur d'enfouissement de la roche, etc. L'approche développée par [26] n'est utilisable que pour des familles de fractures génétiquement liées. Elle paraît peu applicable dans un contexte de socle ancien tel que celui de la région de Bondoukou, présentant plusieurs phases de déformations [7], [8].

L'étude comparative régionale des valeurs de perméabilités induites calculées faite par [2] a été élargie aux résultats obtenus dans la région de Bondoukou. Cette étude révèle que les valeurs de perméabilité induites calculées dans la région de Bondoukou sont similaires à celles de [2] dans la région de Korhogo, [13] sur le bassin de la Marahoué, [14] à Man et [32] dans la région du Yatenga. L'analyse de l'échelle comparative des perméabilités induites calculées de l'Afrique de l'Ouest a fait dire à [2] que la taille de la maille n'agit pas beaucoup sur les valeurs de perméabilités induites calculées. Elles sont plutôt fortement liées à la valeur de la conductivité hydraulique K_f et au paramètre de la densité de linéaments (exprimée en longueur cumulée). Dans la région de Bondoukou, l'analyse de la relation qui lie les longueurs cumulées de fractures aux perméabilités induites maximales permet de confirmer l'analyse faite par [2]. En effet, une forte corrélation lie ces deux paramètres [4]. Ce constat serait fortement lié à la disposition spatiale des fractures et surtout à la grande variabilité de l'orientation desdites fractures de la région de Bondoukou. En effet si toutes les fractures étaient parallèles avec donc une direction unique, il n'aurait pas eu d'interconnexion entre les fractures ce qui engendrerait une faible perméabilité induite des formations géologiques ainsi affectées.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES D'AVENIR

Les méthodes de fusion d'image que sont l'ACPS (ACP_{158}), de combinaisons d'images ($\frac{ETM+6}{ETM+7}$) et de compositions colorées ($ETM+4$ $ETM+5$ $ETM+7$, ACP_{123} – ACP_{1567} – $\frac{ETM+5}{ETM+4}$ (en tonalité inverse), ACP_{158} – $ACP_{1567(inv)}$ – $ETM+4$, ACP_{147} – ACP_{157} – ACP_{127} etc.) ont permis la cartographie lithologique des grandes formations géologiques de la région de Bondoukou. Ainsi, les contours des différentes formations intrusives (granodiorite porphyroïde, granite à biotite, métagranite à biotite et métagranodiorite) et tarkwaïennes mais aussi ceux des formations volcano-sédimentaires (schistes volcano-sédimentaires, micaschistes, métavolcanites, amphibolites) ont été cartographiés. Cette cartographie réalisée grâce à la télédétection a contribué à l'actualisation de la carte des grandes formations géologiques de la région de Bondoukou. La cartographie des structures linéaires (linéaments) a été possible grâce à l'utilisation de l'indice $\frac{ETM+6}{ETM+7}$, et des techniques de filtrages spatiaux (filtres spatiaux de type Sobel 7×7 , Prévitt et [15] Yésou *et al.*, (1993)). Effectuées aussi bien sur les images brutes que sur les nouvelles images issues des traitements précédents, ces techniques ont permis d'extraire manuellement les linéaments. Cette extraction a abouti à la cartographie des nombreux accidents et couloirs régionaux et la réalisation d'une carte détaillée de linéaments de la région de Bondoukou comportant après validation environ 5000 fractures. Ainsi, de nombreuses fractures régionales non matérialisées sur les cartes existantes ont été repérées, cartographiées et le tracé de certaines ont été améliorées. L'étude de l'intensité de la fracturation a révélé que les régions Sud et Nord de la zone d'étude sont fortement fracturées. Les formations de schistes volcano-sédimentaires sont les plus affectées par les fractures et leurs contacts avec les formations intrudées notamment la granodiorite porphyroïde constituent de véritables zones à forte tendance structurale.

L'analyse statistique des réseaux de fractures relève que la distribution des longueurs de fractures obéit à une loi de puissance avec la pente égale à $\alpha = 2,99$. En réalité, cette loi n'est applicable que pour les longueurs de fractures ℓ supérieures à 2,23 km. Pour les valeurs de $\ell < 2,23$ km, l'on est confronté à un problème de sous échantillonnage.

La distribution des espacements de fractures se fait suivant une loi gamma. Selon cette modélisation, on a plus de 62 % de chance de rencontrer une fracture à moins d'un kilomètre de distance en suivant toutes les directions.

L'étude des caractéristiques hydrauliques de la fracturation a permis de calculer la perméabilité induite. Celle-ci varie de 1,164 à 9,566.10⁻⁶m/s (soit 4,190 à 34,438 mm/h). L'analyse de ce paramètre a fait ressortir deux axes préférentiels d'écoulement souterrain ou couloirs de circulations des eaux souterraines. Il s'agit des axes à forte valeur de perméabilité de direction NE-SO (Axe Lamoli – Kamala) et celle de direction N-S passant par la localité de Laoudi-Bâ. Des axes secondaires et des zones de concentration des eaux souterraines ont également été identifiés.

L'utilisation future des techniques de géophysique basée sur les acquis de cette étude permettra de déterminer le positionnement exact au sol des méga fractures et celles susceptibles de contenir de l'eau en vue de leur exploitation. Ces acquis pourront aider à développer un modèle d'écoulement souterrain par l'intégration des équations mathématiques de modélisation des différents paramètres géométriques et hydrodynamiques établies. L'intégration de ces données conduirait à la mise en place d'un système d'information géographique en vue d'une gestion rationnelle des ressources de la région ayant fait l'objet de cette étude.

7 TABLEAUX ET FIGURES

7.1 TABLEAU

Tableau 1. Echantillonnage des paramètres géométriques extraits des images

	Effectifs	Minimum (km)	Maximum (km)	Moyenne (km)	Ecart type (km)
Longueurs	4992	0,233	88,980	2,444	2,554
Espacements	921	0,005	7,583	1,005	0,820

7.2 FIGURES

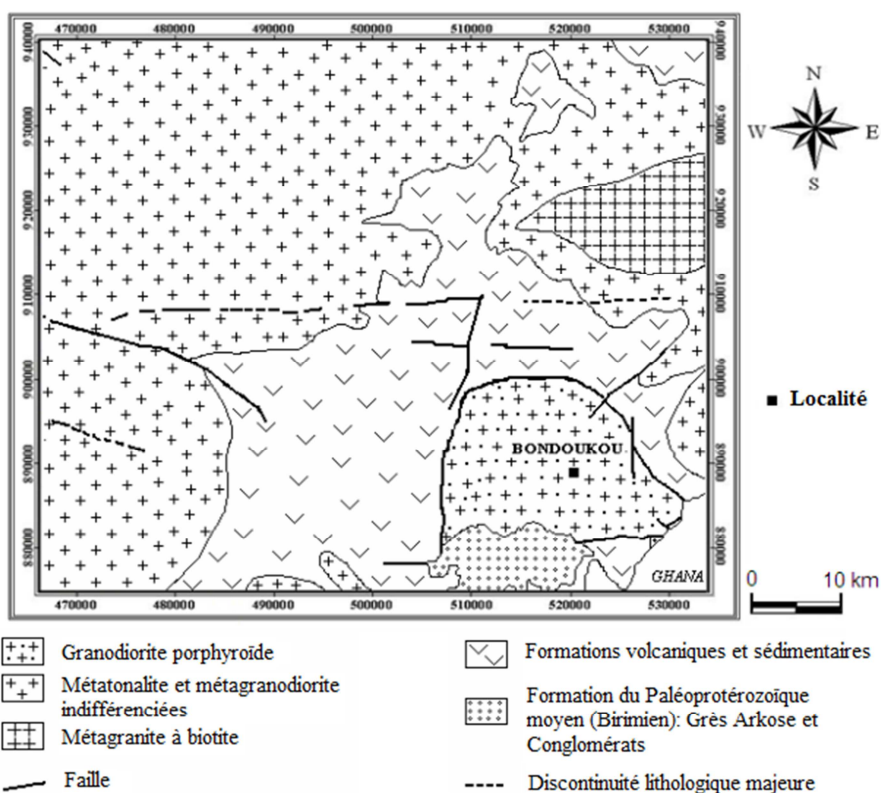


Fig.1. Présentation de la zone d'étude et aperçu géologique de la région de Bondoukou

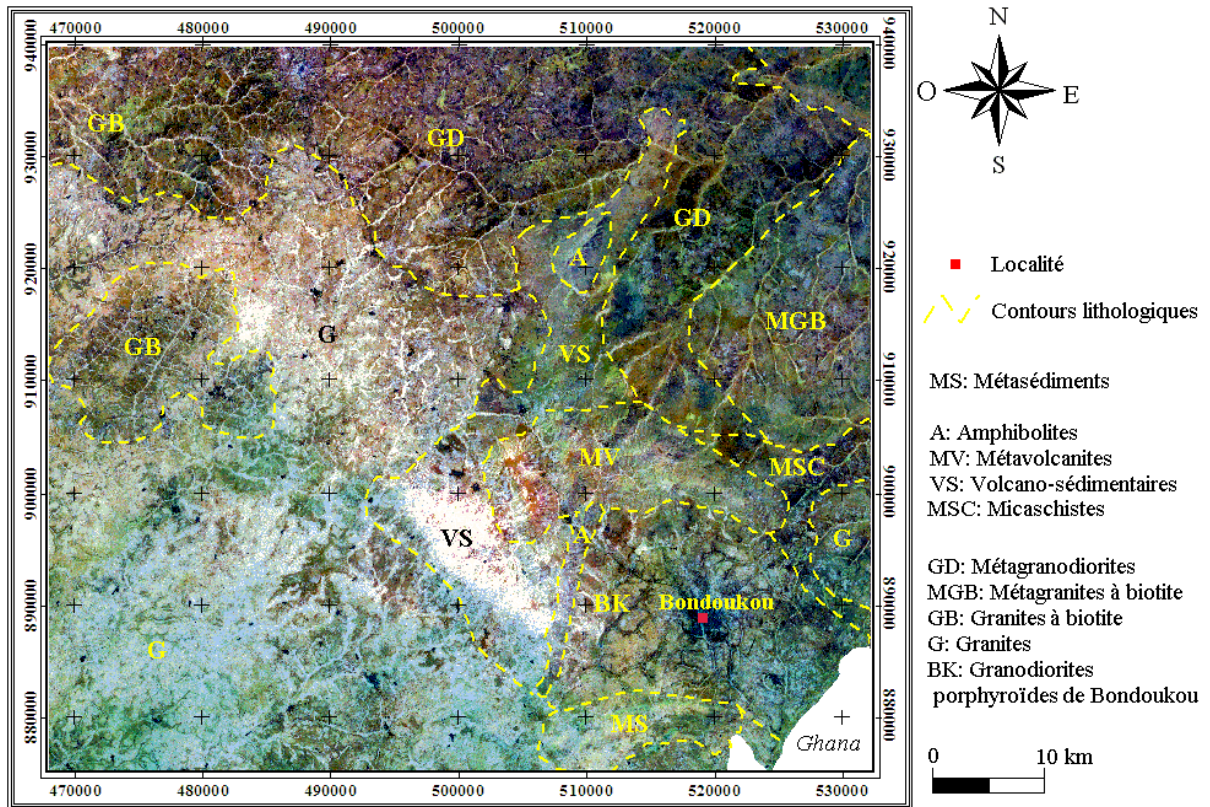


Fig. 2. Composition colorée $ACP_{1123}-ACP_{1567}-\frac{ETM+5}{ETM+4}$ en couleurs inverses

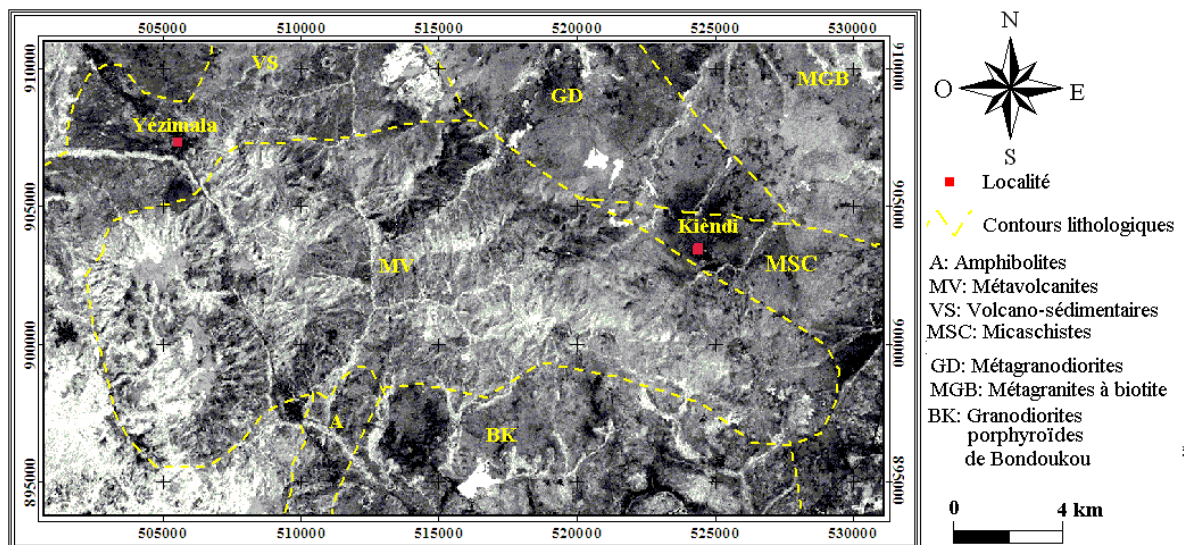


Fig. 3. Première composante ACP_{158} rehaussant les Métavolcanites

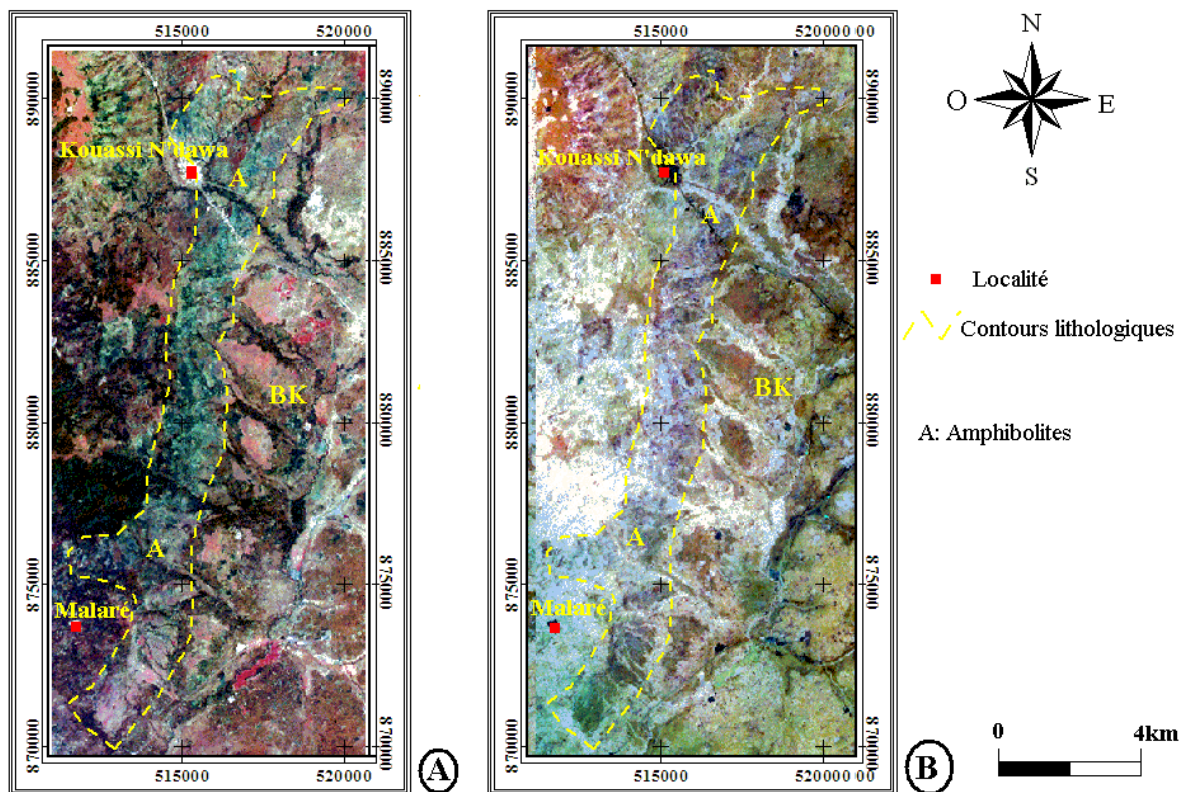


Fig. 4. Différentes compositions colorées A ($ACP1_{47_ACP1_{57_ACP1_{27}}$) et B ($ACP1_{123_ACP1_{567_}\frac{ETM+5}{ETM+4}}$) rehaussant les amphibolites.

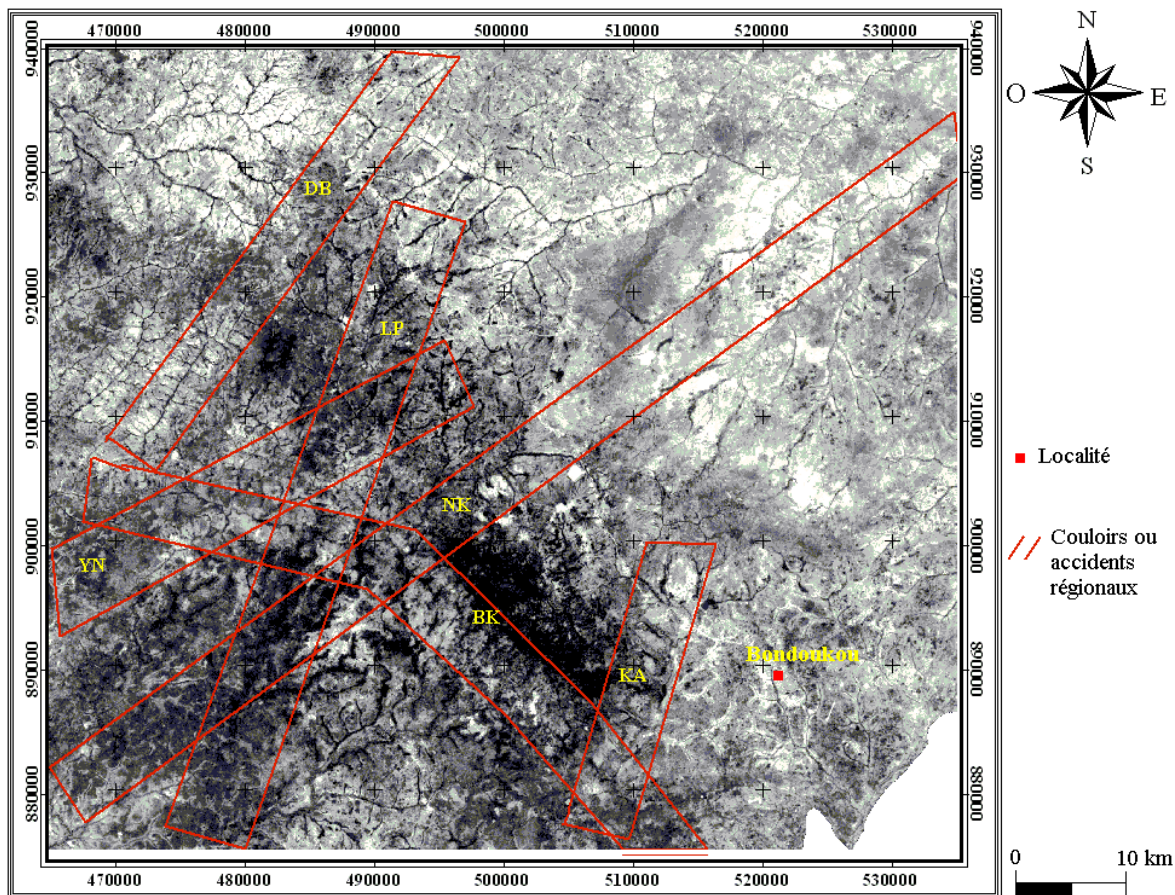


Fig. 5. Indice ETM+5/ETM+4 permettant de rehausser les principaux couloirs.

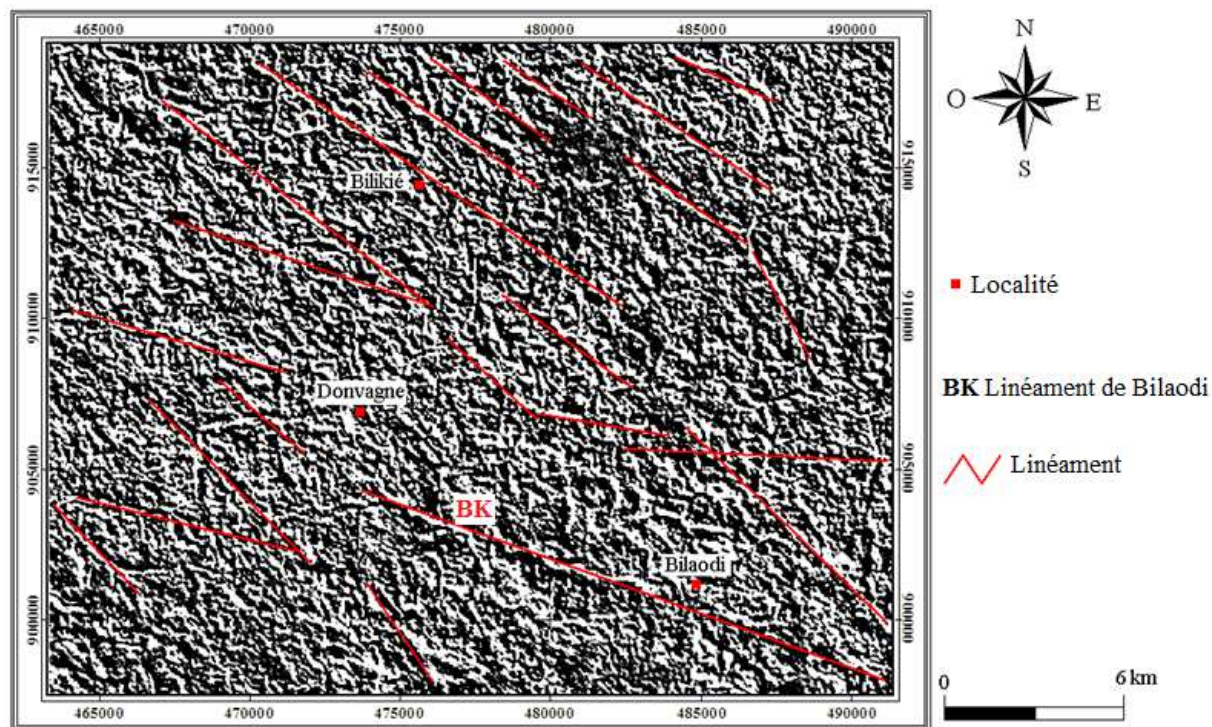


Fig. 6. Filtre Sobel (NE-SO) appliqué à ACP₁₇ rehaussant les accidents NO-SE.

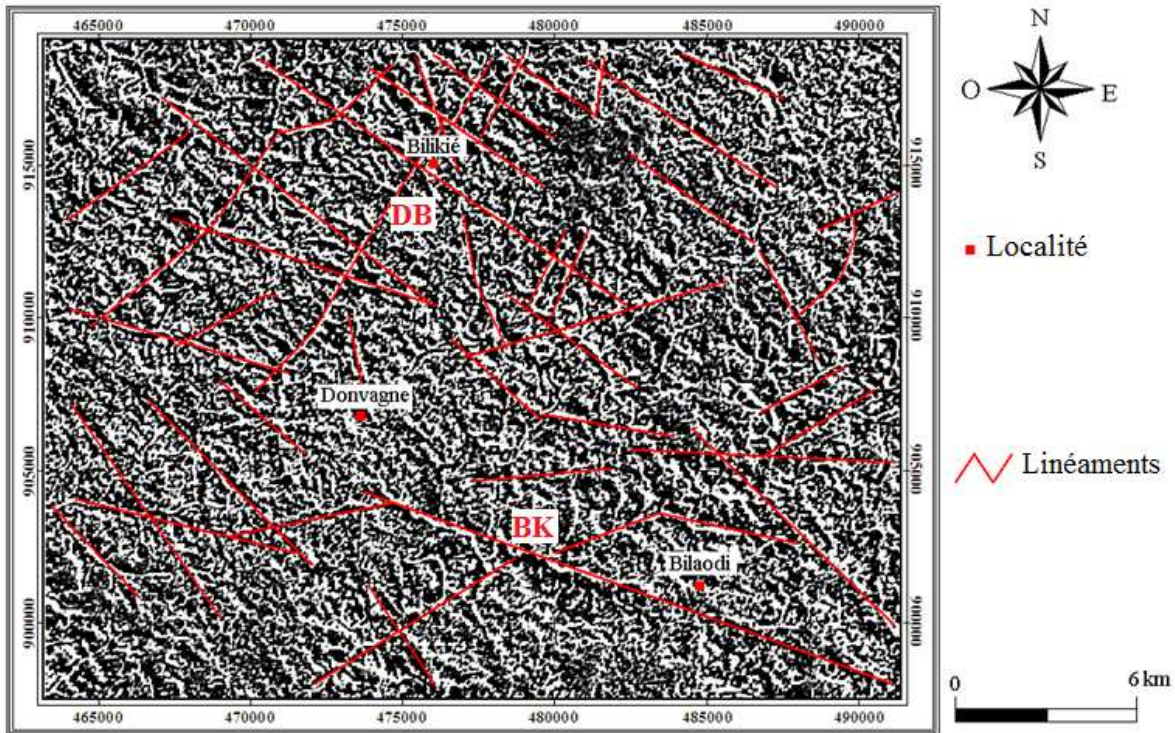


Fig. 7. Filtre de Prévitt appliqué à ACP₁₅₇ rehaussant des accidents régionaux.

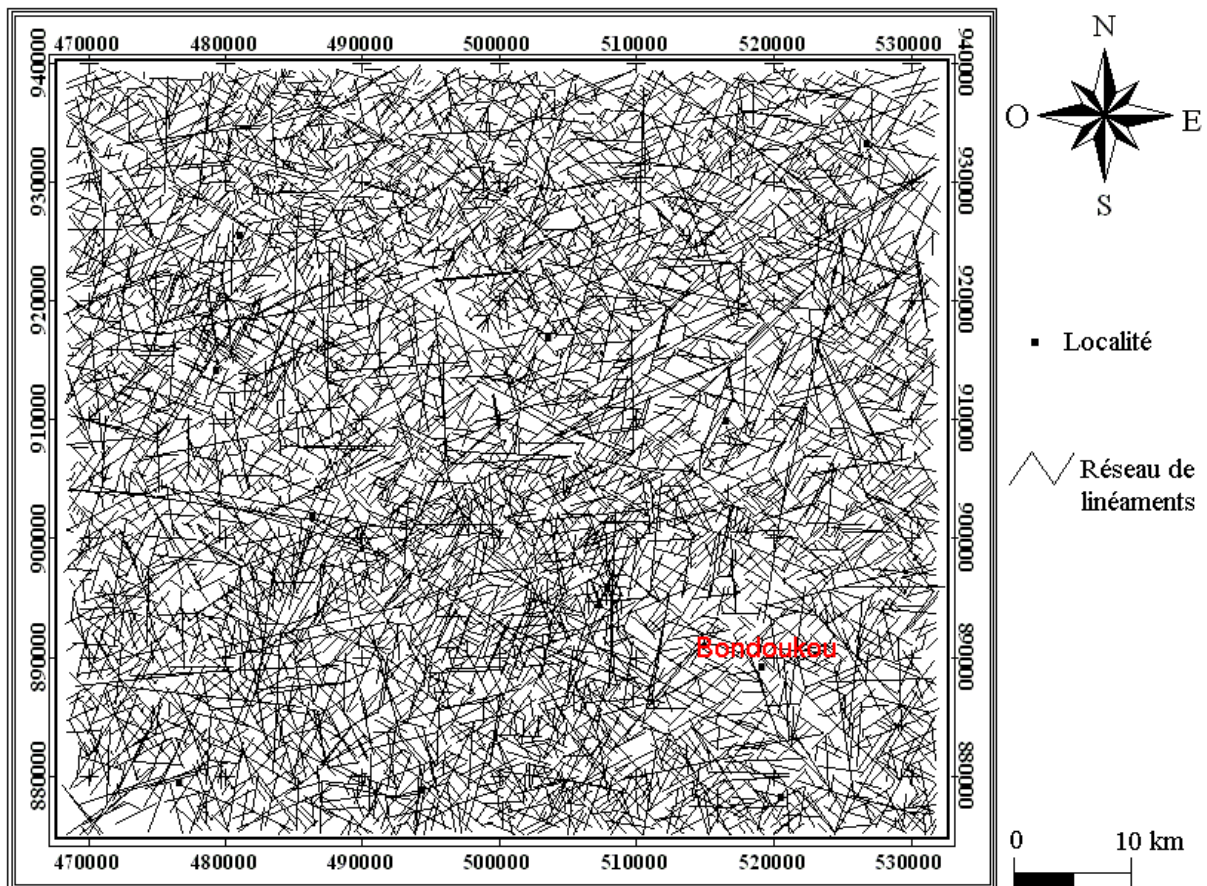


Fig. 8. Carte détaillée des fractures de la région de Bondoukou établie à partir des images ETM+ de Landsat 7.

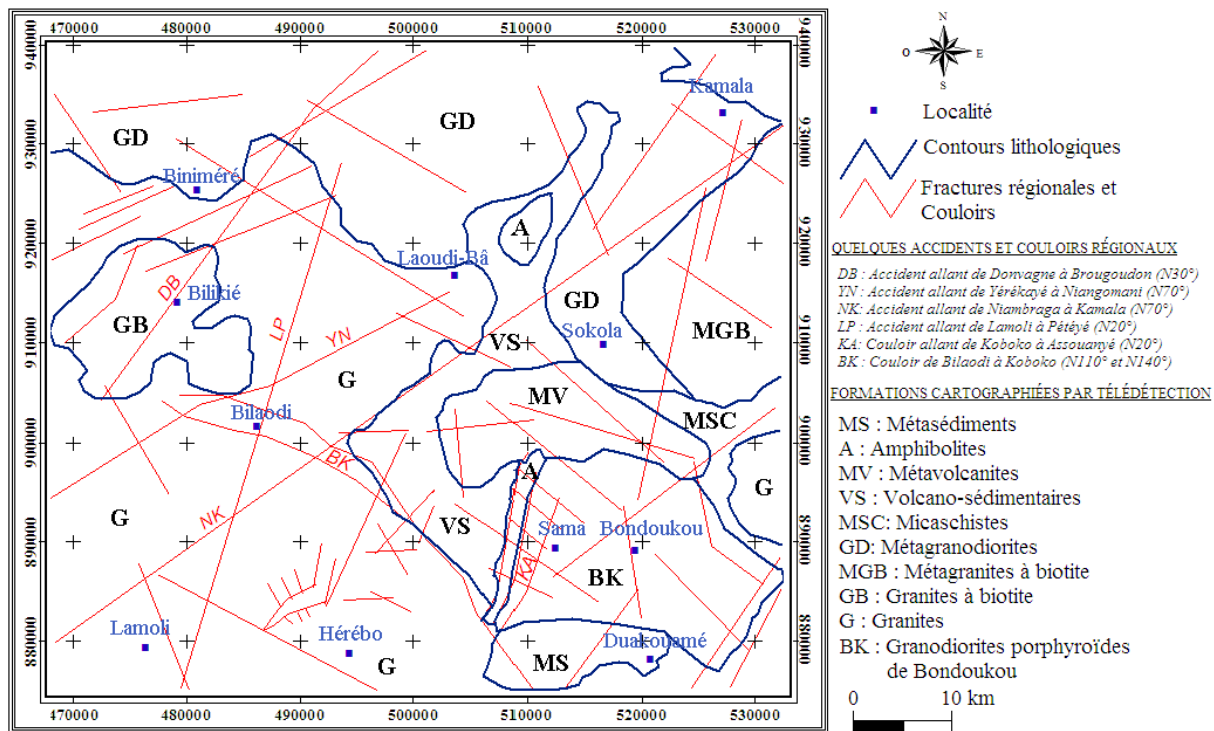


Fig. 9. Carte lithostructurale de la région de Bondoukou réalisée à partir de l'interprétation des images satellitaires de Landsat 7.

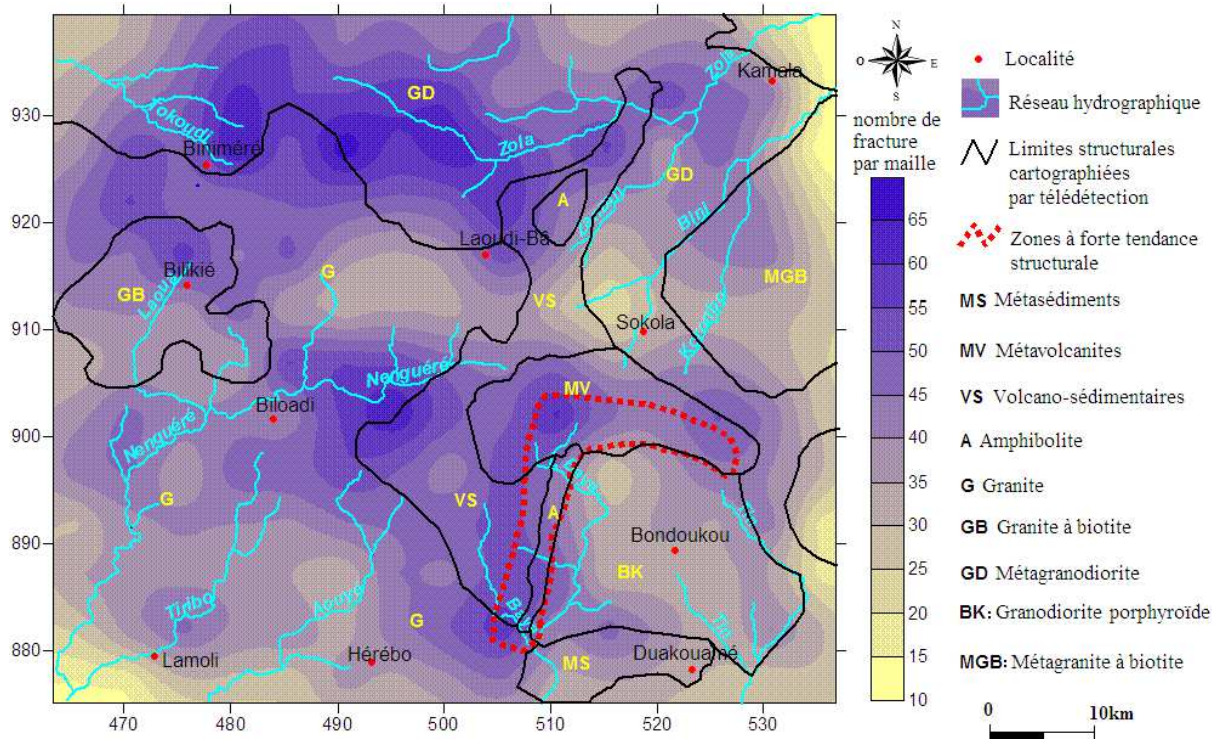


Fig. 10. Superposition à l'intérieur du SIHRS, de la densité de fracturation exprimée en nombre de fractures, des cours d'eau principaux et des grands ensembles géologiques de la région de Bondoukou.

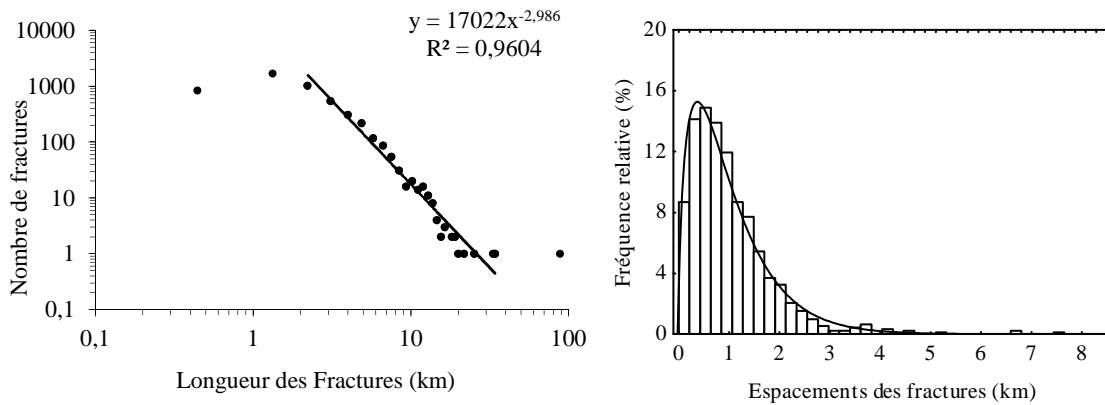


Fig. 11. Distribution des longueurs et espacements des fractures : données issues des images satellitaires. A : Ajustement des longueurs de fracture à une loi de puissance ; B : Ajustement des espacements de fracture à une loi gamma.

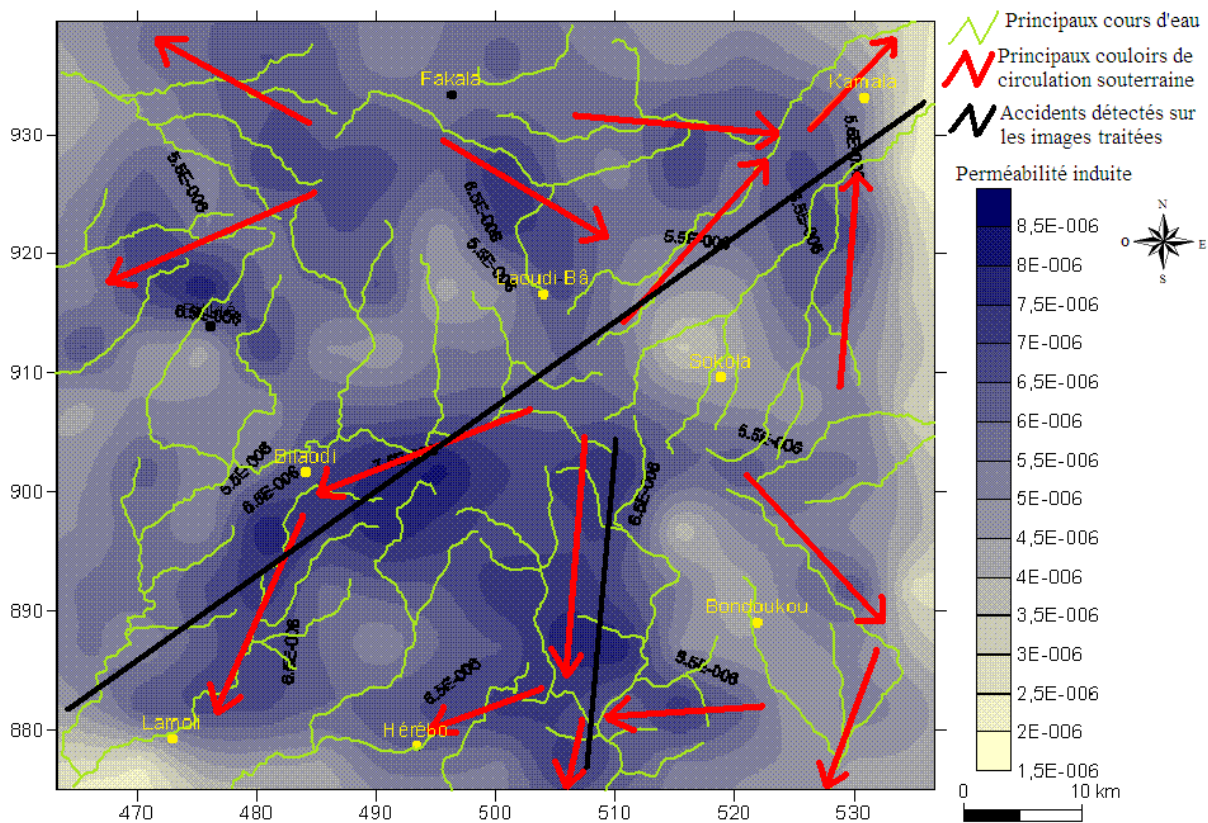


Fig. 12. Couloir souterrain de circulation d'eau et axes préférentiels d'alimentation des nappes.

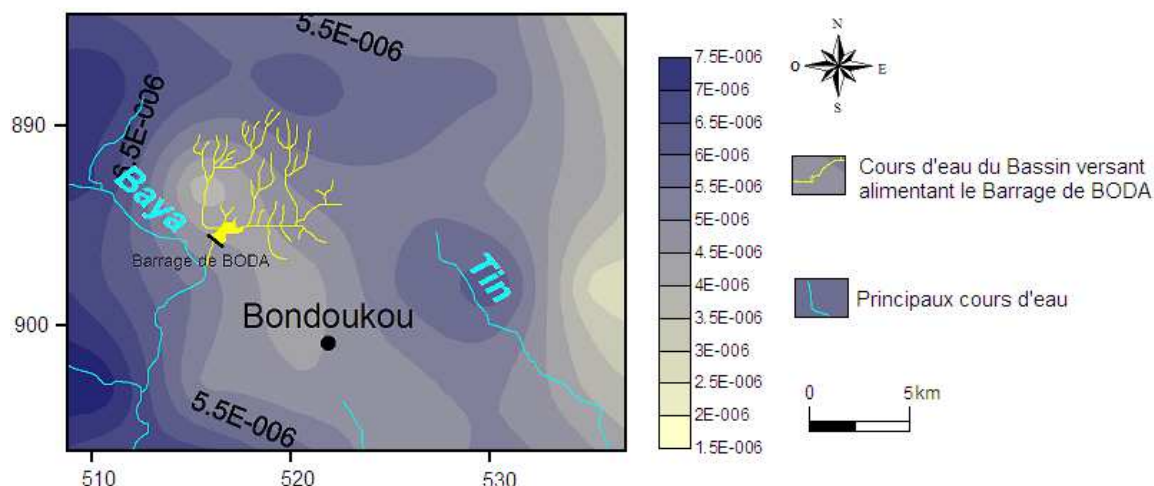


Fig. 13. Barrage et faible perméabilité induite par les fractures.

REMERCIEMENTS

Les auteurs voudraient remercier et témoigner leur reconnaissance aux instructeurs anonymes pour leurs critiques constructives et pertinentes suggestions qui contribuent à l'amélioration de ce document.

REFERENCES

- [1] J. Bodin, M. Razack, "L'analyse d'images appliquée au traitement automatique de champs de fractures. Propriétés géométriques et lois d'échelle," *Bull. Soc. Géol. Fr.*, t. 170, no.4, pp. 579-593, 1999.
- [2] 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'hydrotechniquespatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire*, Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody, 430 p, 2005.
- [3] J. P. Jourda, M. B. Saley, E. V. Djagoua, K. J. 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 de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation" *Revue de Télédétection*, vol. 5, no. 4, pp. 339-357, 2006.
- [4] 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 Unique de Doctorat, Université de Cocody, 237 p, 2008.
- [5] M. Youan Ta, T. Lasm, J. P. Jourda, K. F. Kouame, 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)", *Télédétection*, 8(2), pp. 119-135, 2008.
- [6] M. Youan Ta, T. Lasm, J. P. Jourda, M. B. Saley, G. M. Adja, K. Kouame, J. Biemi, "Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère. Cas de Bondoukou (Côte d'Ivoire)", *Revue Internationale de Géomatique*, 21(1), pp. 43-71, 2011.
- [7] C. Delor, Y. Simeon, M. Vidal, Z. Zeade, Y. Kone, M. Adou, J. Dibouahi, D. B. Irie, B. D. Ya, D. N'da, A. Pouclet, G. Konan, I. Diaby, J-C. Chiron, A. Dommanget, A. Kouamelan, J. J. Peucat, A. Cocherie et J.P. CAUTRU, "Carte géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, feuille Nassian", *Mémoire n°9 de la Direction des Mine et de la Géologie*, Abidjan, 1995.
- [8] Z. Zeade, C. Delor, Y. Simeon, B. D. Yao, M. Vidal, P. Sonnendrucker, I. Diaby, J. P. Cautru, "Notice explicative de la carte Géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, Feuille Bondoukou", *Mémoire de la Direction des Mines et de la Géologie de la Côte d'Ivoire*, n°10 Abidjan, Côte d'Ivoire, 1995.
- [9] Y. Siméon, C. Delor, Z. Zeade, Y. Kone, B. Yao, M. Vidal, I. Diaby, G. Konan, B. I. Dje, D. N'da, A. Dommanget, J. P. Cautru, C. Guerrot et J-C. Chiron, "Notice explicative de la carte géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, feuille Agnibilékro", *Mémoire de la Direction des Mines et de la Géologie de la Côte d'Ivoire*, n°8 Abidjan, Côte d'Ivoire, 1995.
- [10] F. G. Caldini, M. Posavec, M. J. Azuelos "Carte photogéologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, Feuille de Nassian", *Commission du Canada, Société pour de Développement Minier de la Côte d'Ivoire (SODEMI)*, 1978.

- [11] 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", *Télétection*, Vol. 02, no. 4, pp. 243-253, 2002.
- [12] F. O. Franciss, *Contribution à l'étude du mouvement d'eau à travers les milieux fissurés. Géomorphologie et Géologie du Brésil*, Thèse Doct. Ing., Univ. Grenoble I, 108 p, 1970.
- [13] 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.
- [14] 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 3ème cycle, Univ. Cocody-Abidjan, (Côte d'Ivoire), 194 p, 1999.
- [15] 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.
- [16] N. Raharitsizafy, L. J. R. Raharison, S. A. Rakotondraompiana, "Révision des cartes géologiques de la région de Beloha-Sadabe (Centre-Est de Madagascar) à partir des données de terrain et de télédétection", *Résumé IX^{èmes} journées du Réseau Télédétection*, 2000.
- [17] S. Toure, *Pétrologie et géochronologie du massif granitoïde de Bondoukou. Nord-Est de la Côte d'Ivoire. Évolution magmatique et contexte géodynamique au Protérozoïque inférieur. Relations avec le volcano-détritique du Zanzan, Koun, Tanda.. attribué au Tarkwaïen du Ghana. Implications paléogéographiques*, Thèse de Doctorat Es Nat., Univ. d'Abobo-Adjamé 434 p, 2007.
- [18] 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.
- [19] 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 unique de doctorat, Université de Poitiers, 272 p, 2000.
- [20] J. R. De Dreuzy, *Analyse des propriétés hydrauliques des réseaux de fractures*, Université de Rennes, PhD. Université Rennes 1, France, 101 p, 2000.
- [21] C. Darcel, *Corrélation dans les réseaux de fractures : caractérisation et conséquences sur les propriétés hydrauliques*, Thèse de doctorat, Université Rennes 1, France, 102, 223 p, 2002.
- [22] T. Lasm, et M. Razack, "Lois d'échelle dans la fracturation des roches dures cristallines et dans le réseau hydrographique associé", *Compte Rendu Académie des Sciences Paris, Science de la Terre et des planètes*, no. 333, pp. 225-232, 2001.
- [23] C. Castaing, P. Dutartre, P. Loiseau, P. Martin, T. Pointet, "Etude pluridisciplinaire d'un réseau de discontinuités-image SPOT en milieu granitique couvert. Implication en hydrogéologie des milieux fissurés", *Hydrogéol.*, no.1, pp 12-25, 1989.
- [24] N. Odling, "Scaling and connectivity of joint systems in sandstones from western Norway", *Journal of Structural Geology*, Vol. 19 no. 10, pp 1257-1271, 1997.
- [25] Q. Huang, J. Angelier, "Fracture spacing and its relation to bed thickness", *Géol. Mag.*, no. 126, Vol. 4., pp. 355-362, 1989.
- [26] T. Rives, M. Razack, J. P. Petit, K. D. Rawnley, "Joints spacing : analogue and numerical simulations", *J. Struct. Geol.*, Vol. 14, no. 8/9, pp. 925-937, 1992.
- [27] G. B. Baecher, N. A. Lanney & H. H. Einstein, "Statistical description of rock properties and sampling", Proc.18th U. S. Symp. on Rock Mech., AIME, 5CI-I à 5CI-B, 1977.
- [28] A. Rouleau, J. E. Gale, "Statistical characterization of the fracture system in stripa granite, Sweden", Int. J. Rock. Mech.& Mining Sc.& Geomech. Abs., 22, pp. 353-367, 1985.
- [29] W. E. Bardsley, T. J. Major, M. J. Selby, "Note on a Weibull property for joint spacing analysis", Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 27, no. 2, pp 133-134,1990.
- [30] P. A. Gillespie, C. B. Howard, J. J. Walsh, J. Watterson, "Measurement and characterization of spatial distributions of fractures", *Tectophys.*, Vol. 226, pp. 113-1141, 1993.
- [31] W. Narr, J. Suppe, "Joints spacing in sedimentary rocks", *J. Struct. Geol.*, Vol. 13, no. 9, pp. 1037-1047, 1991.
- [32] 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, 1996.