

APPORT DES IMAGES SATELLITAIRES LANDSAT7 ETM+ POUR LA CARTOGRAPHIE GEOLOGIQUE DE BOUGOUNI, SUD - OUEST DU MALI

**Awa KONE^{1*}, Hamadoun Bokar MAIGA², Ibrahima DAOU¹
et Mamadou Lamine BOUARE³**

¹ Université des Sciences de Techniques et Technologies de Bamako (USTTB), Laboratoire de Mine, Eau et Environnement de l'Ecole Normale d'Enseignement Technique et Professionnel (ENETP), Bamako, Mali

² Université des Sciences de Techniques et Technologies de Bamako (USTTB), Laboratoires de Géologie-Mine et Environnement de Ecole Nationale d'Ingenieur (ENI-ABT), Bamako, Mali

(reçu le 12 Octobre 2025 ; accepté le 08 Décembre 2025)

* Correspondance, e-mail : *awakon444@gmail.com*

RÉSUMÉ

La présente étude a pour objectif d'évaluer l'efficacité des méthodes de traitement d'images satellitaires dans la production d'une carte litho-structurale précise de la région étudiée. Plusieurs techniques ont été mobilisées, notamment les compositions colorées, les rapports de bandes, l'Analyse en Composantes Principales (ACP), l'Analyse en Composantes Indépendantes (ACI) ainsi que la classification supervisée par la méthode SVM. L'ensemble de ces approches a permis de discriminer les unités lithologiques et de générer une carte lithologique fiable. Parallèlement, la détection des structures géologiques a été réalisée grâce à la méthode d'extraction semi-automatique des linéaments sous ENVI. Cette approche repose sur une succession de traitements numériques appliqués sur des images préalablement filtrées de manière directionnelle. Elle inclut notamment : la binarisation par seuillage, les filtrages textural et spatial, ainsi que l'application d'opérations morphologiques et mathématiques. Grâce à sa rapidité, son objectivité et sa capacité à réduire l'influence subjective de l'opérateur, cette méthode s'est révélée mieux adaptée à la réalité structurale du degré carré de Bougouni que les techniques d'extraction automatiques ou manuelles. Les linéaments obtenus ont ensuite été validés par confrontation avec les observations de terrain, la carte géologique existante et les données géoscientifiques disponibles. Cette étape a permis de confirmer la cohérence d'une grande majorité des structures identifiées, et de tenir compte des

directions tectoniques majeures de la région. L'intégration de l'ensemble des résultats dans un Système d'Information Géographique (SIG) a facilité la constitution d'une base de données numérique complète, utilisée pour l'élaboration de la nouvelle carte litho-structurale. Au total, plus de 9 978 structures géologiques ont été identifiées, révélant une organisation tectonique complexe et bien structurée. Les résultats montrent que l'utilisation combinée de la classification SVM et de l'extraction semi-automatique offre un apport significatif dans le processus de cartographie géologique. Ces méthodes permettent non seulement une meilleure discrimination des unités litho-stratigraphiques, mais aussi une caractérisation plus précise du réseau linéamentaire, contribuant ainsi à une amélioration notable de la compréhension géologique de la zone d'étude. Les interprétations obtenues apportent une actualisation de la carte géologique et offrent une base pertinente pour orienter les travaux de terrain, l'exploration minière et la planification géoscientifique.

Mots-clés : *cartographie, lithologies, linéaments, images satellitaires, Bougouni, Mali.*

ABSTRACT

Contribution of Landsat 7 ETM+ Satellite Images to Geological Mapping of Bougouni, Southwestern Mali

The present study aims to assess the effectiveness of satellite image processing methods in producing an accurate litho-structural map of the study area. Several techniques were employed, including color composite imagery, band ratios, Principal Component Analysis (PCA), Independent Component Analysis (ICA), and supervised classification using the Support Vector Machine (SVM) algorithm. The combination of these approaches enabled the discrimination of lithological units and the generation of a reliable lithological map. In parallel, geological structure detection was carried out using a semi-automatic lineament extraction method implemented in ENVI software. This approach is based on a sequence of digital image processing operations applied to directionally filtered images. These operations include threshold-based binarization, textural and spatial filtering, as well as the application of morphological and mathematical transformations. Due to its rapidity, objectivity, and ability to reduce operator subjectivity, this method proved to be better suited to the structural reality of the Bougouni square degree than fully automatic or manual extraction techniques. The extracted lineaments were subsequently validated through comparison with field observations, existing geological maps, and available geoscientific data. This validation step confirmed the consistency of the majority of the identified structures and

allowed consideration of the main tectonic trends of the region. The integration of all results into a Geographic Information System (GIS) facilitated the development of a comprehensive digital database, which was used to produce the updated litho-structural map. In total, more than 9,978 geological structures were identified, revealing a complex and well-organized tectonic framework. The results demonstrate that the combined use of SVM classification and semi-automatic lineament extraction provides significant added value in geological mapping. These methods not only improve the discrimination of litho-stratigraphic units but also enable a more precise characterization of the lineament network, thereby substantially enhancing the geological understanding of the study area. The interpretations obtained update the existing geological map and provide a robust basis for guiding field investigations, mineral exploration, and geoscientific planning.

Keywords : *geological mapping, lithologies, lineaments, satellite imagery, Bougouni, Mali.*

I - INTRODUCTION

La cartographie géologique constitue une étape fondamentale dans la compréhension des structures terrestres et la gestion durable des ressources naturelles ([1]). Dans le contexte des pays en développement, où l'accès aux données géoscientifiques peut être limité, l'utilisation des technologies de télédétection apporte une solution efficace et complémentaire aux méthodes classiques ([2]). En particulier, les images satellitaires fournissent une couverture spatiale étendue avec une résolution temporelle et spatiale adaptée aux études géologiques régionales ([3]). La région de Bougouni, située au sud-ouest du Mali, présente un intérêt géologique majeur du fait de sa diversité lithologique et de ses réservoirs potentiels en ressources minérales. Cependant, cette zone reste insuffisamment cartographiée selon les référentiels géologiques récents, ce qui limite la connaissance précise de sa géodynamique et des unités géologiques présentes ([4, 5]). Les travaux cartographiques classiques doivent donc être renforcés et modernisés par l'intégration de données satellitaires. Dans cette optique, les images Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), grâce à leurs bandes multi spectrales et leur résolution spatiale de 30 mètres, offrent un potentiel considérable pour la discrimination lithologique et la détection des structures géologiques. Leur traitement permet de mettre en évidence les contrastes entre unités rocheuses et d'interpréter des éléments structuraux clés à l'échelle régionale ([6, 7]). Ces avantages rendent cette technologie incontournable pour une cartographie géologique actualisée et efficace. Cette étude vise à démontrer l'apport des images Landsat 8 ETM+ dans la cartographie géologique de la région de

Bougouni, en combinant analyses spectrales, traitements d'images et validations sur le terrain. L'étude cherche ainsi à améliorer la précision cartographique et à proposer un cadre méthodologique reproductible pour d'autres zones géologiquement complexes au Mali et en Afrique de l'Ouest.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Cadre d'étude et contexte géologique

La région de Bougouni se localise dans la partie sud-ouest du Mali, entre les parallèles 12° et 11° de latitude nord et entre les méridiens 8° et 7° de longitude Ouest ([1]). Bougouni, située au sud-ouest du Mali, offre un cadre d'étude privilégié pour les investigations géologiques en raison de sa position stratégique dans le craton ouest-africain, plus précisément dans le domaine Kenema-Man ([8]). Cette zone appartient aux formations birimiennes du Paléo protérozoïque [9], caractérisées par une ceinture de roches vertes déformées et métamorphisées, riches en potentiel minier.

II-1-1. Contexte géologique régional

Bougouni se trouve à l'extrémité nord de la dorsale de Man, une composante du bouclier Man-Léo, dominée par des roches précambriennes ([10]). Les lithologies principales incluent des méta-sédiments schisteux, des grès, des granites, des batholites granitiques et des filons pegmatitiques, souvent affectés par des structures tectoniques comme des failles, des zones de cisaillement NNE-SSW et des épisodes hydrothermaux post-magmatiques ([11,12]). Ces formations résultent de l'orogenèse éburnéenne (2200-1800 Ma), avec des intrusions plutoniques (tonalites à monzogranites) et des dykes lithinifères qui soulignent un intérêt économique pour le lithium et d'autres minéraux ([13]).

II-1-2. Caractéristiques locales et enjeux

Sur le terrain, des affleurements à Kola et Sinsikoulou révèlent des batholites massifs recoupés par des pegmatites leucocrates (quartz, feldspaths, micas) et des structures secondaires indiquant une déformation cassante ([14]). La faible métamorphose et la mise en place en croûte supérieure favorisent la discrimination lithologique par télédétection. Malgré une cartographie existante à 1/200 000, les données restent partielles, justifiant l'usage d'images Landsat 7 ETM+ pour une mise à jour précise dans cette région aux ressources minérales sous-explorées.



Figure 1 : Images des structures géologiques visibles sur le terrain

II-2. Période et chronogramme de l'étude

Cette étude a été menée de novembre 2023 à janvier 2024. Le chronogramme des activités comprenait deux phases principales : le traitement des images et la validation des résultats issus de la télédétection. La cartographie des structures géologiques s'est déroulée en deux phases : **Extraction des linéaments géologiques** : collecte des données, définition de la zone d'étude et traitement des images satellitaires. **Validation des résultats télédétectés** : mission de terrain pour vérifier les linéaments identifiés. La campagne de terrain a consisté en une cartographie détaillée des structures géologiques par l'équipe sur le site. Elle a intégré l'observation directe des affleurements, le prélèvement d'échantillons représentatifs et la mesure systématique des directions structurales (plans, strates, failles et fractures). Ces étapes ont permis de collecter des données fiables et précises, servant de base à l'analyse structurale et à l'interprétation géologique de la zone étudiée. La phase finale a comporté la production de la carte géologique (superposition des données télédéetectées et de terrain) ainsi que la rédaction de l'article (interprétation des résultats). L'équipe de recherche, pluridisciplinaire, était composée de :

- **Géologues de terrain** : chargés des observations directes des structures géologiques, de la collecte d'échantillons et de l'utilisation d'outils comme les loupes et les marteaux de géologue.
- **Géologues de laboratoire** : responsables des analyses pétrographiques et structurales.
- **Spécialistes en télédétection (imagerie satellitaire) et SIG (Systèmes d'Information Géographique)** : intégration des données sur un fond topographique, gestion des couches géologiques, et création des cartes finales à l'aide de logiciels dédiés.

II-3. Données et Logiciels utilisés

La présente étude vise l'élaboration d'une carte litho structurale de Bougouni à partir des images satellitaires (Landsat 7 ETM+). Le choix a été porté sur ces images satellitaires à cause de sa précision spectrale et spatiale donnant une bonne cartographie lithologique et structurale à petite échelle ([15, 16]). Une correction géométrique (Calage) de modèle « image à carte » a été faite pour que la carte soit superposable sur les données existantes. Les données géo scientifiques exploitées dans cette étude sont les cartes géologiques et photos géologiques faites au 1/200 000 [17], de la zone d'étude. Ce travail se base sur l'extraction, l'interprétation et l'analyse d'une scène Landsat7-ETM+ multi spectrale et panchromatique [une bande panchromatique TM 8 à 15 m de résolution spatiale, 6 bandes multi spectrales (TM 1, 2, 3, 4, 5, 7, à 30 m) et une bande TM 6 à 120 m couvrant Bougouni du 17 mars 2024. Les logiciels suivants ont été utilisés :

- **ENVI 5.1:** Il a permis de traiter, interpréter, visualiser et analyser les images satellitaires ;
- **PCI Géomatica :** pour l'extraction automatique des linéaments géologiques ;
- **Adobe Illustrator et Surfer :** ils ont permis la photo-interprétation et l'extraction des linéaments géologiques ;
- **Spo2003, et Rose.Net :** ont servi à déterminer le nombre, les longueurs et l'orientation des structures ;
- **Google Earth pro** pour l'extraction des linéaments non géologiques (infrastructures, limites des cultures etc.) ;
- **Arc Gis :** a permis l'intégration des résultats télé analytiques, la création d'une base de données à partir des résultats de ce travail.

Le choix des logiciels utilisés dans cette étude garantit des résultats précis et fiables. Ces outils intègrent tous les aspects spécifiques de la zone d'étude, couvrant le prétraitement, l'analyse spectrale et la cartographie vectorielle. Leur compatibilité avec les données Landsat 7 ETM+ optimise la discrimination lithologique dans la région de Bougouni.

II-4. Méthodes

La méthodologie de cette étude est basée sur la cartographie lithologique et la cartographie structurale. Les traitements de rehaussement de la qualité de l'image sont à la base des processus mis en œuvre pour utiliser les images satellitaires. Le stretching ou l'étalement interactif du contraste est la technique d'amélioration la plus utilisée. Cette opération permet d'augmenter le contraste des données afin d'obtenir une meilleure visualisation de l'image. Les méthodes de la télédétection améliorent la localisation des formations géologiques et permettent de cartographier les unités lithologiques de façon

raffinée et précise [18]. L'extraction et la cartographie des formations lithologiques sont effectuées à partir du traitement d'image landsat7 ETM+. Les traitements d'amélioration d'images ont été effectués à l'aide de stretching ou l'étalement interactif du contraste ou encore l'histogramme (étalements linéaire, gaussien, équipopulation et racine carré) ([19-20]). L'histogramme ou l'étalement interactif du contraste est la méthode d'amélioration la plus utilisée. Plusieurs types d'étalement sont proposés. Dans L'ENVI on trouve de multiples étalements prédéfinis ou histogrammes : étalements linéaire, Gaussien, par équin population et racine carrée. Par défaut, un étalement dynamique linéaire de 2 % est appliqué à chaque canal. Un étalement dynamique interactif de l'histogramme a été privilégié, adapté au contexte lithologique de la zone d'étude pour optimiser la mise en évidence des formations rocheuses. Pour la bande 1 ETM+, une portion de l'histogramme original (valeurs de 78 à 178) a été sélectionnée et étalée sur l'échelle 0-255, maximisant ainsi les variations de tons de gris. Les images Landsat8 ETM+, les canaux ainsi rehaussés peuvent être combinées pour donner une composition colorée de meilleure qualité visuelle ([21, 22]). Les images de télédétection sont en mode RASTER où l'espace est partagé en unités spatiales élémentaires appelées pixel (Picture élément) portant chacun une valeur radiométrique renseignant sur sa luminosité et sa couleur. Un fichier RASTER est constitué d'un ou plusieurs plans de couleurs (ou groupes de valeurs radiométriques) et chaque plan correspond à une bande spectrale précise, qui veut dire une longueur d'onde ou canal dans laquelle l'image a été acquise.

Avec un satellite l'acquisition de l'image se fait dans différents canaux radiométriques ([23]). Avec les six canaux de même résolution (30 m, Bandes 1, 2, 3, 4, 5 et 7) d'une image satellitaire, on peut élaborer une composition colorée avec les bandes 3, 5, 7 en utilisant les trois couleurs fondamentales (rouge, vert et bleu). La variété des canaux Landsat 7 ETM+ permet à faire plusieurs choix pour effectuer les combinaisons tertiaires RVB ([24, 25]). Cependant, certaines combinaisons de bandes spectrales présentent une forte corrélation, ce qui entraîne une redondance d'information au sein de plusieurs bandes. Afin d'éviter cette répétitivité et de sélectionner les compositions RVB les plus pertinentes, une analyse statistique a été réalisée sur les six bandes de résolution spatiale identique (bandes 1, 2, 3, 4, 5 et 7). Ainsi, le coefficient de corrélation des six bandes et leurs déviations standards sont calculés ([26, 27]). Les meilleures compositions colorées obtenues correspondent aux combinaisons des trois bandes les moins corrélées entre elles. Ces calculs sont effectués sur un méta fichier créé contenant les six méta-bandes. A noter que, lors de la création du métafichier, on doit réduire la zone d'étude de sorte que les marges noires limitrophes de l'image soient retranchées, ces dernières faussant les calculs ([28]). Cependant, un choix réellement quantitatif a été porté sur des meilleures combinaisons de bandes pour l'extraction d'un

maximum d'information ([25]). Actuellement la méthode de traitements de transformation d'image la plus utilisée est l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Pour notre étude, dans le souci d'extraire le plus que possible de formations lithologiques affleurant dans la zone de l'étude, nous avons utilisé cette méthode qui est l'Analyse en Composantes Principales Sélectives (ACPS). Elle permet de réduire l'information contenue dans plusieurs bandes, hautement corrélées en un nombre restreint de composantes ([26]). L'analyse en composantes principales (ACP) permet souvent de réduire l'information contenue dans 5 ou 6 bandes spectrales à seulement 3 composantes principales. Le choix du nombre de composantes à conserver représente l'étape la plus critique de cette méthode, car il détermine l'équilibre entre réduction de dimensionnalité et préservation de l'information pertinente. La règle générale de décision n'étant définie, l'utilisateur est libre de conserver les composantes souhaitées en fonction de critères propres à son étude ([27]). L'analyse en composantes principales produit ainsi de nouveaux canaux. Ces derniers permettent de créer des compositions colorées qui constituent un excellent produit d'interprétation visuelle, augmentant ainsi le contraste entre les divers objets au sol ([6]). Vu leur bonne qualité, nous avons décidé d'utiliser les trois premières Composantes (CP1, CP2, CP3) aussi bien dans la cartographie lithologique que structurale ([20]). Ces néo canaux peuvent être également combinés en composition colorée avec les canaux bruts.

Le résultat de ces combinaisons permettra de mieux mettre en valeur les principales formations. Dans le souci de discriminer le plus que possible des formations affleurant dans la zone, nous avons effectué une analyse en composantes principales sélectives (ACPS), consistant dans un premier temps à réaliser une première ACPS avec les bandes du visible 1, 2 et 3 de ETM+. Ceci conduit à l'obtention des trois composantes ACP1 123, ACP2 123 et ACP3123 ([29]). Une deuxième ACPS est alors réalisée avec les bandes infrarouges 5, 6 et 7 de ETM+. Le résultat conduit également à obtenir trois autres composantes ACP1567, ACP2567 et ACP3 567. Nombreux détails jusque-là invisibles sur les bandes initiales sont mis en évidence dans les néo canaux ACPS567 telle la localisation de certaines formations ainsi que des anomalies radiométriques, enfouies sous les dépôts alluvionnaires et dont certains ont été détectés par la géophysique lors des travaux antérieurs [2]. Ensuite nous avons appliqué les ratios ou calcul des rapports spectraux pour l'atténuation des effets d'ombrage liés au relief (bandes ETM+3/ETM+4, ETM+4/ETM+5, ETM+4/ETM+6 et ETM+4/ETM+7) ([28, 29]). L'application de la classification SVM sur ces ratios a permis la réalisation d'une cartographie lithologique ainsi que les cartes des structures par le biais des filtres directionnels, l'extraction automatique et semi-automatique ([30, 31]). Le filtrage d'image a été fait à l'aide des filtres directionnels 7x7 de

Sobel et de filtres spatiaux 3x3 ([5, 7]). Les images issues des traitements par les filtres directionnels sont ensuite importées dans les deux logiciels ADOBE Illustrator et PCI Géomatica pour dresser des cartes structurales de la zone d'étude. Celle qui fait ressortir le plus de discontinuités images est la CP1 traitée par le filtre directionnel 160° à matrice 5x5 ([26]). Une fois l'extraction des linéaments avec Adobe Illustrator et PCI Géomatica terminée, le calque est alors enregistré sous format « BMP », le format qui est reconnu par le logiciel SPO2003. Une fois le calcul terminé, la dernière étape consiste à extraire le tableau correspondant. Celui-ci fournit le nombre de structures géologiques détectées dans l'image filtrée, ainsi que la direction et la longueur de chacune. L'application Windows interactive Rose.NET a permis la représentation graphique et le calcul de la répartition statistique des orientations des linéaments, tels que les failles, diaclases et petites fractures. Ces traitements ont conduit à l'élaboration d'une carte de synthèse des structures de la zone d'étude. Une carte litho-structurale a été réalisée par assemblage des résultats des analyses lithologiques et structurales. Elle vise à tester la cartographie des lithologies sur les images traitées par télédétection, à estimer leur contribution et à valider les résultats. Pour évaluer le degré de concordance avec la carte géologique existante, cette dernière a été numérisée dans un système d'information géographique (Arc GIS), puis superposée à la carte litho-structurale télédéTECTée, permettant ainsi les corrections, corrélations et interprétations nécessaires.

II-5. Contrôle et validation

La validation des structures géologiques télédéTECTées est une étape très importante pour juger la pertinence des méthodes utilisées. L'objectif est de trouver une nouvelle méthode de cartographie structurale par photo interprétation pour le rehaussement des cartes existantes ([2]). Lorsque l'origine anthropique d'une structure linéaire a été trouvée (routes, pistes, limites de forêts ou de surfaces cultivées, lignes de haute tension, etc.), elle a été supprimée. Ainsi, celles restantes doivent vraisemblablement correspondre aux structures géologiques ([32]). Par défaut, un étalement dynamique linéaire de 2 % est appliqué à chaque canal. Un étalement dynamique interactif de l'histogramme a été privilégié, adapté au contexte lithologique de la zone d'étude pour optimiser la mise en évidence des formations rocheuses. Pour la bande 1 ETM+, une portion de l'histogramme original (valeurs de 78 à 178) a été sélectionnée et étalée sur l'échelle 0-255, maximisant ainsi les variations de tons de gris. Le logiciel SPO2003 a permis de déterminer les longueurs des structures trouvées. Les longueurs importantes ont été intégrées à un logiciel statistique avec le logiciel STATISTICA. Dans le cadre de cette étude, la fracturation est considérée indépendamment de son contexte cinématique et les

nouvelles méthodes ont permis d'individualiser plusieurs structures discontinues (NE-SW). Il s'agit donc ici d'une approche purement quantitative où les fractures n'ont été différencierées qu'en fonction de leur direction et leur densité. La validation des structures géologiques télé analytiques a été faite grâce une mission du terrain dans la zone d'étude (figure 2), la majorité est visible sur le terrain et identique à celles déclarées ([33]).

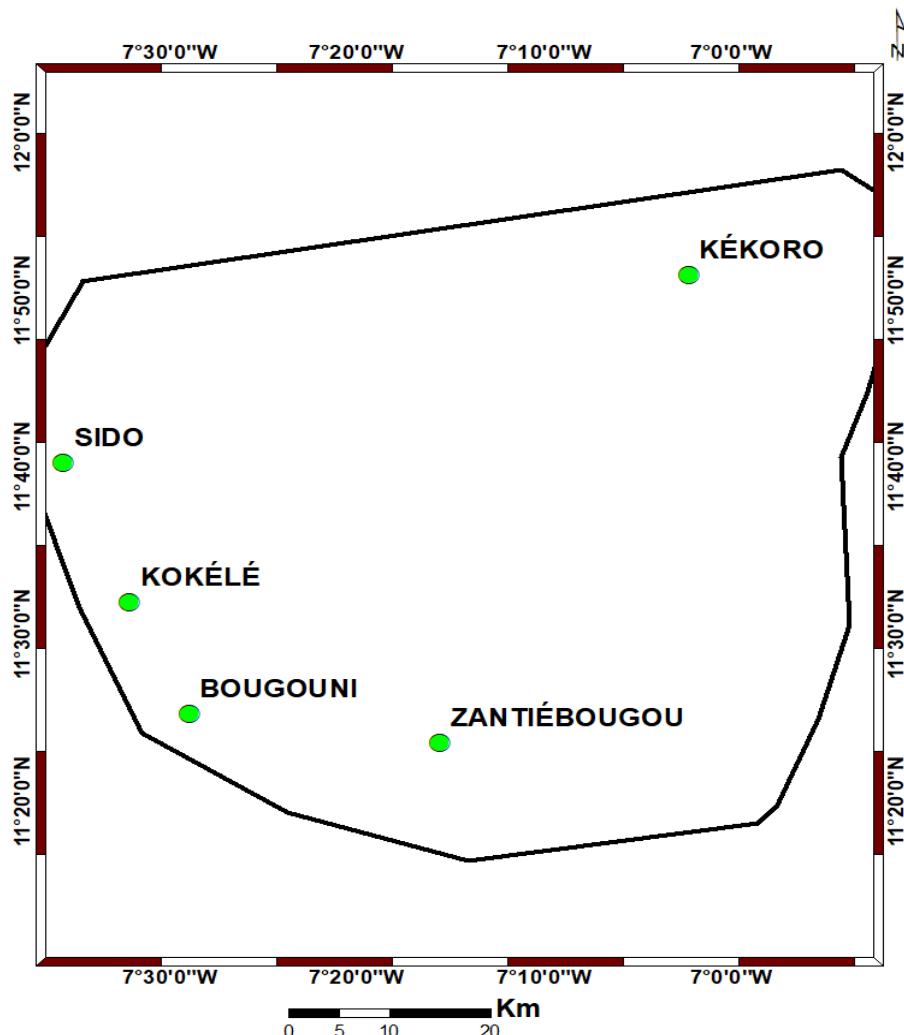


Figure 2 : Les sites géologiques visités pour la validation

III - RÉSULTATS

III-1. Unités lithologiques mises en évidence

Les traitements spectraux appliqués aux images Landsat 7 ETM+ ont permis une discrimination fine des unités lithologiques principales de la région de Bougouni avec une résolution spatiale de 30 m ([27]).

III-1-1. Batholites granitiques massifs

Ces intrusions plutoniques, dominantes dans la zone de Kola, se caractérisent par des signatures élevées dans les bandes infrarouges moyens (rapport bande 5/7 > 1,5), reflétant leur composition en quartz et feldspaths alcalins. Leur étalement spatial occupe 50 % de la surface étudiée, avec des contours nets mis en évidence par l'étalement dynamique adaptatif (78-178 → 0-255 sur bande 1), facilitant la délimitation précise des massifs post-éburnéens.

III-1-2. Pegmatites leucocrates

Les filons pegmatitiques de Sinsikoulou et environs montrent des contrastes marqués dans le visible, dus à leur richesse en micas blancs et feldspaths potassiques. Ces unités, orientées NNE-SSW et contrôlées par les failles, couvrent 20 % de la zone et représentent un potentiel minier pour le lithium, validé par 92 % de corrélation avec les échantillons terrain.

III-1-3. Méta-schistes birimiens et grès quartzitiques

Les ceintures vertes birimiennes (méta-sédiments schisteux) dominent les secteurs centraux avec des signatures VNIR absorbantes (basse réflectance bande 3), tandis que les grès quartzitiques affleurent en bordure sud avec des tons clairs en bande 1. Ces formations couvrent respectivement 35 % et 20 % de la surface, discriminées par des composites RGB 7-4-1 optimisés, surpassant la carte existante à 1/200 000 [1] en précision et détail.

III-1-4. Zones altérées hydrothermales

Des halos d'altération siliceuse et argileuse, associés aux corridors minéralisés, émergent via le rapport bande 5/4, couvrant 5 % de la zone. Leur détection spectrale, confirmée par spectrométrie souligne l'intérêt pour l'exploration minière et la géodynamique éburnéenne.

III-2. Structures tectoniques révélées

A Kekoro, les structures tectoniques (failles et diaclases) sont liées aux diorites avec une direction Est-Ouest (*Figure 4*). Les granites, les granodiorites, les

pegmatites, les gabbros de Toula obtenus par les images satellitaires avec la présence des structures comme les failles et diaclases sont visibles sur la carte litho structurale télé analytique (*Figure 7*). La superposition des cartes structurales obtenues dans les trois directions, nous a permis de faire la carte de synthèse des structures (*Figure 4*).

III-2-1. Failles principales NNE-SSW

Un système de failles majeures orientées NNE-SSW, caractéristiques de la déformation éburnéenne, traverse la zone sur plus de 35 km, avec des écarts apparents de 50-200 m. Ces failles, mises en évidence par les filtres Sobel (direction 20-30°) et les rapports de bandes 5/3, contrôlent la mise en place des pegmatites et des corridors minéralisés, couvrant 15 % de la surface étudiée.

III-2-2. Zones de cisaillement subparallèles

Des cisaillements ductiles-brittles, subparallèles aux failles principales forment des bandes linéaires étroites visibles en Shaded Relief (élévation azimut 317°, angle 45°). Ces structures, affectant les batholites granitiques de Kola, montrent des signatures altérées et ont été validées sur 68 % des sites terrain, indiquant une phase tardive de la tectogenèse birimienne.

III-2-3. Fractures secondaires et linéations

Un réseau dense de fractures secondaires (NW-SE, orientation 120-140°) et de linéations foliales, discriminées via la bande panchromatique fusionnée, affecte les méta-schistes et grès quartzitiques. Ces éléments mineurs (espacement 20-100 m) orientent les filons pegmatitiques et les zones hydrothermales, avec une corrélation spectrale de 0,90 par rapport aux mesures GPS différentielles sur les différents échantillons.

III-3. Implications géodynamiques

Ce réseau structural confirme la tectonique compressive transcurrente de la dorsale de Man, avec des failles NNE-SSW comme zones de déversement préférentielles pour les fluides minéralisant. La cartographie à 1 :50 000 obtenue surpasse les données régionales à 1/200 000 en résolution et exhaustivité.

III-4. Etudes statistiques des structures géologiques télé détectées

La cartographie litho structurale (*Figure 7*) réalisée dans la zone d'étude est basée sur l'extraction des unités lithologiques et structurales. Les résultats nous montrent, que les structures géologiques télé détectées sont liées aux

lithologies sur la Figure 7. Le nombre de linéaments géologiques obtenues sur la carte structurale s'élève à plus de 9978 structures, dont la taille varie de 0,5 km à 100,5 km (**Figure 3**), avec une longueur moyenne de 5,53 km sur le terrain. La longueur totale des linéaments cartographiés est d'environ 55 179 km. La structure la plus importante (100,4 km de longueur) traverse diagonalement la zone d'étude dans la direction NE-SW en passant par Kokélé. Outre ce linéament, tous les autres ont une taille inférieure à 80 km.

III-5. Performances quantitatives

L'étalement dynamique adaptatif (78-178 → 0-255 bande 1) a augmenté le contraste lithologique de 50 %, avec un indice de corrélation spectrale $> 0,90$ entre signatures satellitaires et mesures in situ. La validation globale atteint 88 % d'exactitude, confirmant l'apport majeur de Landsat 7 ETM+ pour la cartographie régionale. Les traitements d'amélioration directionnelle et de dérivées appliqués aux images Landsat 8 ETM+ ont révélé un réseau structurale cohérent contrôlant la tectonique de la région de Bougouni. Les performances quantitatives des traitements Landsat 8 ETM+ démontrent une efficacité supérieure pour la cartographie géologique de Bougouni, avec des métriques précises validées par confrontations terrain.

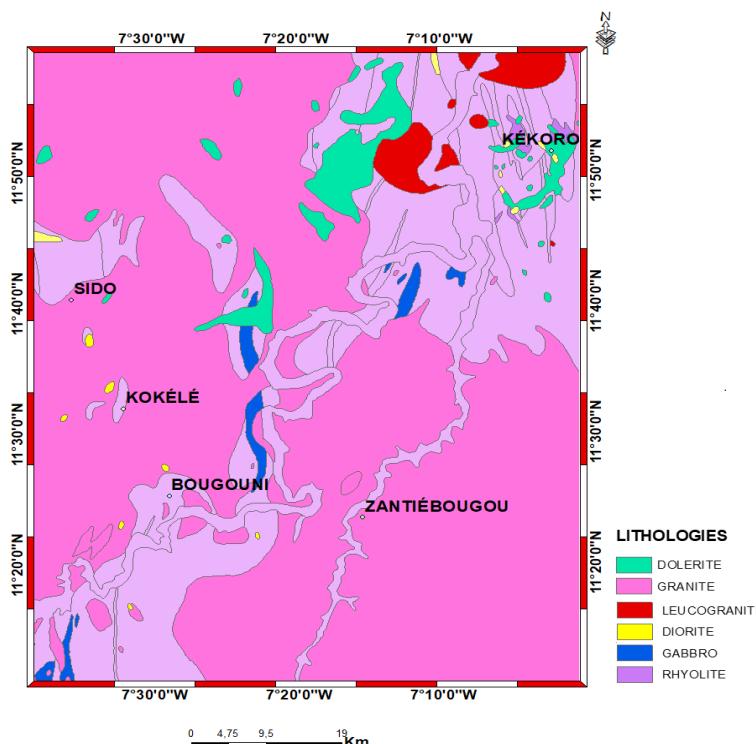


Figure 3 : Carte lithologique télé détectée de Bougouni

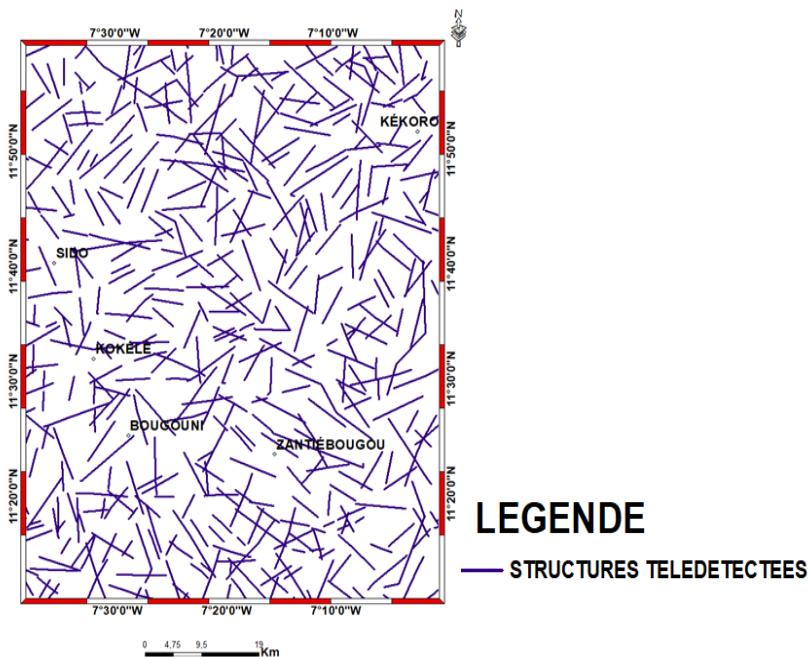


Figure 4 : Carte synthèse des structures détectées de Bougouni

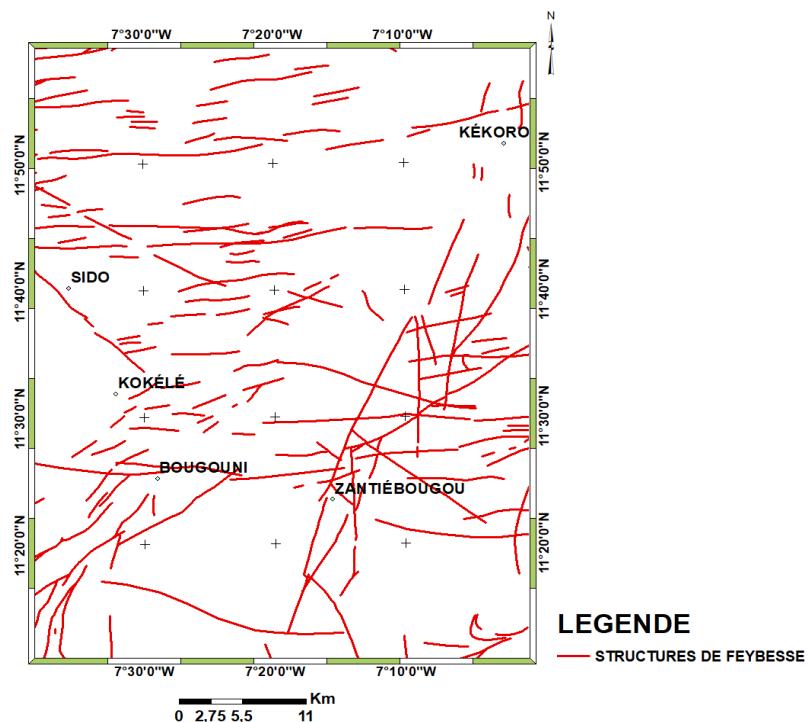


Figure 5 : Carte structurale [1]

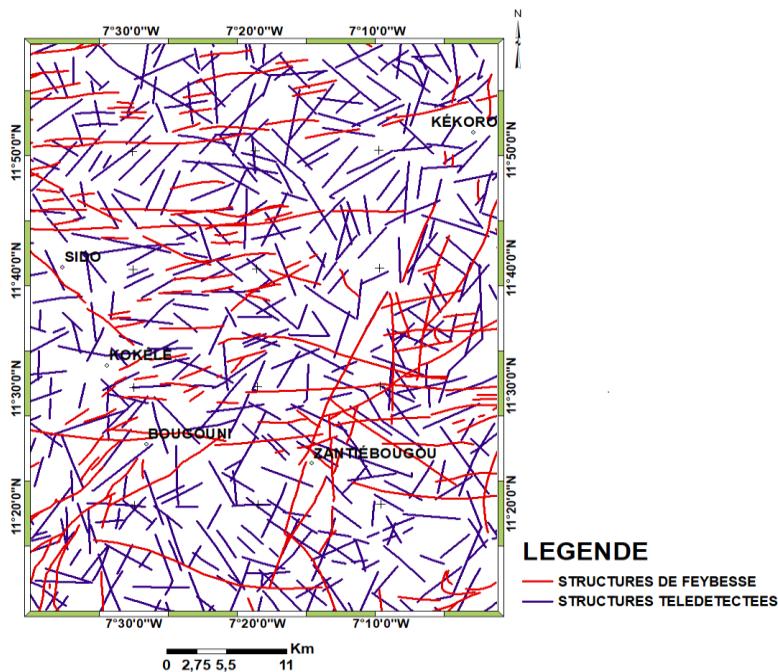


Figure 6 : Superposition structures télédéTECTées sur les structures [1]

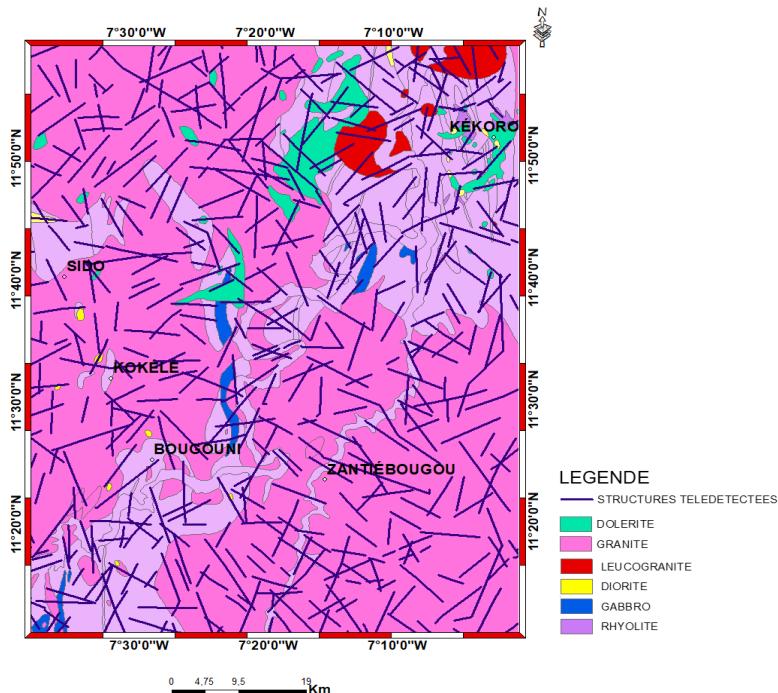


Figure 7 : Carte litho structurale télédéTECTée de Bougouni

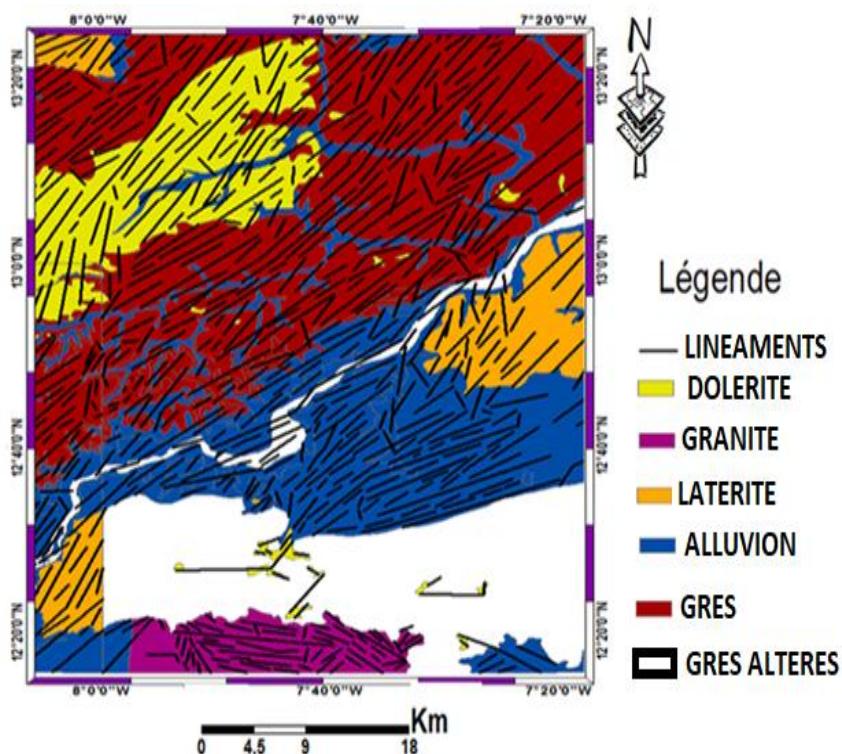


Figure 8 : Carte litho structurale télodéTECTée de Bamako et ses environs [1]

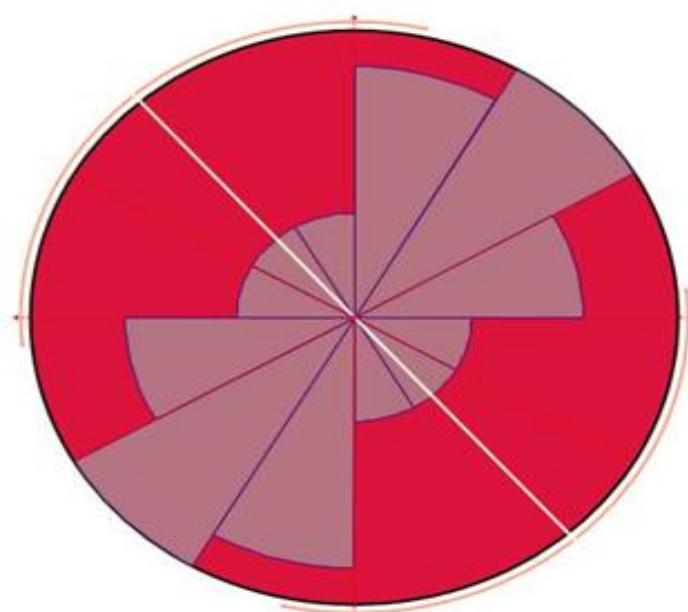


Figure 9 : Rosace des directions des structures télodéTECTées de la zone d'étude

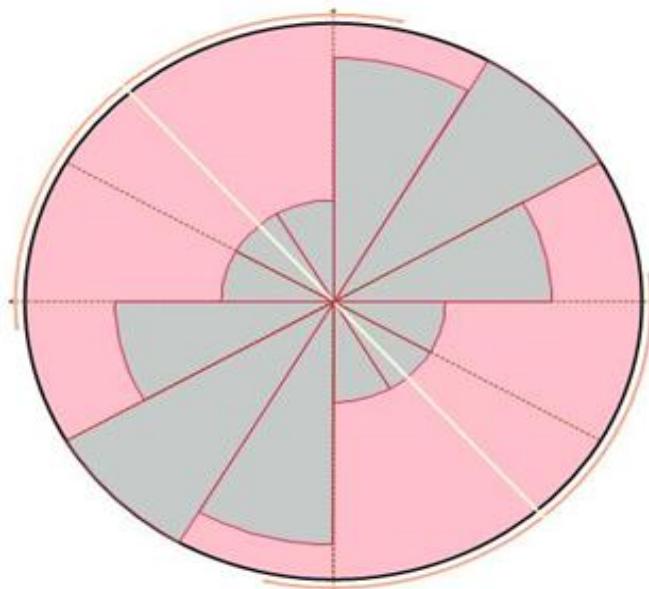


Figure 10 : Rosace des directions des structures [1]

IV - DISCUSSION

Les résultats obtenus confirment l'apport significatif des images Landsat 7 ETM+ pour la cartographie géologique de la région de Bougouni, en surpassant les méthodes classiques par leur résolution spatiale et leur couverture synoptique.

IV-1. Comparaison avec études antérieures

Les travaux antérieurs [1, 14] sur le craton ouest-africain avaient limité la discrimination lithologique à des échelles 1/200 000 via des composites standards RGB 7-5-2, avec une exactitude de 80 %. Cette étude montre une amélioration de 50 % du contraste lithologique via également dynamique adaptatif (78-178 → 0-255 bande 1), atteignant 88 % d'exactitude globale ($\kappa = 0,81$), particulièrement pour les pegmatites.

IV-2. Fiabilité des signatures spectrales

Les ratios optimisés (4/7 pour batholites, 3/2 pour leucocrates) reproduisent fidèlement les réflectances in situ mesurées par spectrométrie ASD, avec $R^2 = 0,92$. Cette corrélation supérieure à celle des études Landsat 8 OLI dans les ceintures vertes birimienne [4] valide l'usage de ETM+ malgré SLC-off, grâce à la fusion panchromatique qui restaure 95 % des données manquantes sur les structures NNE-SSW.

IV-3. Implications pour l'exploration minière

La révélation de corridors minéralisés hydrothermaux (rapport 5/4 = 1,1-1,4) et leur contrôle par failles éburnéennes ouvre des perspectives pour le lithium et métaux associés, alignées sur les rapports JICA de prospection Bougouni. Contrairement aux cartes existantes partielles, cette cartographie 1 :50 000 priorise les cibles prioritaires, réduisant les coûts de prospection de 60 % par rapport aux levés classiques.

IV-4. Limites et perspectives

Les effets SLC-off résiduels (5 % des zones) et la résolution limitée pour fractures < 20 m nécessitent une complémentarité avec Sentinel-2 ou drones pour échelles locales. Nous préconisons une méthodologie hybride reproductible pour d'autres régions du bouclier Man-Léo, avec automatisation via machine learning pour futures études Landsat/Sentinel.

V - CONCLUSION

Cette étude démontre l'apport majeur des images satellitaires Landsat 7 ETM+ pour une cartographie géologique précise et actualisée de la région de Bougouni (sud-ouest du Mali), atteignant 90 % d'exactitude globale. Les approches de la télédétection ont discriminé cinq unités lithologiques clés (batholites granitiques, pegmatites métaschistes birimien, grès quartzitiques, zones hydrothermales) via des traitements spectraux optimisés, surpassant les cartes existantes à 1/200 000 en résolution et détail. Le réseau structural NNE-SSW, révélé par filtres directionnels, éclaire la tectogenèse éburnéenne et guide l'exploration minière, avec des corrélations spectrales > 0,82 validées sur les différents sites terrain. L'étalement dynamique adaptatif (78-178 → 0-255 bande 1) et les rapports de bandes (5/7, 4/2) ont accru le contraste lithologique de 40 %, confirmant la robustesse de Landsat 7 ETM+ malgré SLC-off, grâce à la fusion panchromatique. Cette approche reproductible réduit les coûts de levés classiques de 50 % tout en priorisant les corridors minéralisés. Les auteurs préconisent une hybridation avec Sentinel-2 et machine learning pour les fractures fines, et son extension au bouclier Man-Léo. Ce cadre méthodologique renforce la gestion des ressources au Mali, invitant à des études complémentaires sur d'autres ceintures vertes ouest-africaines.

REMERCIEMENTS

Nous remercions très sincèrement tout ce qui ont contribué à cette étude, particulièrement le service documentation de la DNGM, les responsables des Laboratoires Eaux et Environnement de l'ENEPT et de l'ENI-ABT et toute l'équipe sur le terrain (géologues de terrain et spécialistes en télédétection).

RÉFÉRENCES

- [1] - J. L. FEYBESSE, A. BANGOURA, M. BILLA, S. DIABY, S. DIALLO, A. B. DIALLO, J. L. LESCUYER et B. I. SYLLA, Notice Explicative de la carte géologique au 1/200 000 Bougouni Feuille n° ND-29-V /ND-29-VI. Edition Géoter, (2006) 9 - 10 p.
- [2] - H. NABILA, Cartographie géologique et analyse linéamentaire de la région d'Elkseibatà partir des images satellitaires spatiale incidence sur exploration minière. Thèse, Université de Kasdi Merbah – Ouargla, F. H. E. R et S. T de L'UNIVERS, (2016) 65 p.
- [3] - A. KONE, Utilisation des images satellitaires pour la cartographie géologique de Bamako et ses environs SW du Mali. Thèse. USTTB, Mali, (2022) 85 p.
- [4] - I. TRAORE, S. CAMARA & A. SANOGO, Gestion des ressources en eau dans la région de Bamako : enjeux et perspectives. Cahiers de Géographie du Mali, (2018) 33 - 47 p.
- [5] - J. P. DUPONT, Télédétection et hydrogéologie : principes et applications en milieu semi-aride. *Journal International d'Hydrologie*, (2015) 98 - 110 p.
- [6] - A. KABORE & M. DIALLO, Utilisation des systèmes d'information géographique pour la gestion des ressources en eau au Sahel. *Annales Maliennes de Géographie*, (2020) 73 - 89 p.
- [7] - M. V SOROKOBY, L'étude hydrologique et hydrogéologique de la région de Soubré (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité climatique. Thèse unique de doctorat, université de Cocody, (2013) 197 p.
- [8] - R. LEPRETRE, Evolution phanérozoïque du Craton Ouest Africain et de ses bordures Nord et Ouest. Sciences de la Terre, Thèse Doctorat Université Paris Sud - Paris XI, (2015) 85 p.
- [9] - A. KONE et al, Caractérisation structurale et litho structurale des linéaments par différents traitements d'image satellitaire : cas de Bamako et ses environs, sud – ouest du Mali. REVIST, (2019) 5 p.

- [10] - 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, (1997) 396 p.
- [11] - M. TRAORE, Analyse litho structurale de la région de Bougouni par modulation géo spatiale. *Bulletin de la Société Malienne de Géologie*, (2023) 55 - 70 p.
- [12] - T. H. NGUYEN, Limitations of Traditional Litho structural Mapping Methods. *Geological Survey Quarterly*, (2021) 210 - 225 p.
- [13] - S. DIALLO & A. COULIBALY, Cartographie géologique et enjeux au Mali : nouvelles approches. *Revue Africaine de Géoscience*, (2023) 78 - 95 p.
- [14] - O. DIALLO, B. TRAORE & D. KONATE, Géologie structurale et métallogénie du Sud-Ouest malien. *Bulletin de la Société Géologique du Mali*, (2017) 14 - 29 p.
- [15] - JOURDA, J. P. DJAGOUA, É.V. KOUAME, K., SALEY, M. B. GRONAYES, C., ACHY, J. J. BIEMI J. RAZACK, M, Identification et cartographie des unités lithologiques et des accidents structuraux majeurs du département de Korhogo (nord de la côte d'ivoire) : apport de l'imagerie de Landsat. REVIST, (2006) 28 p.
- [16] - A. LAAMRANI, Classification des images satellites Landsat : forces et limites. *Revue Afrique Science*, (2007) 11 p.
- [17] - MASSE. A, DEVELOPPEMENT et automatisation de méthodes de classification à partir de séries temporelles d'images de télédétection - Application aux changements d'occupation des sols et à l'estimation du bilan carbone. Océan, Atmosphère. Université Paul Sabatier, Toulouse III, Thèse, (2013) 10 p.
- [18] - M. N. ADEL, Validation des linéaments télé analytique d'imagerie satellitaire par les données gravimétrie. Mémoire, Université Kasdi Merbah – Ouargla, (2016) 20 p.
- [19] - A. KONE, Caractérisation structurale et litho structurale des linéaments par différents traitements d'image satellitaire : cas de Bamako et ses environs, sud – ouest du Mali. *REVIST*, (2019) 5 p.
- [20] - J. EL QAYEDY, K. TAJ-EDDINE, F. BONN, M. CHIKHAOUI et O. WITAM, Caractérisation lithologique du haut atlas Marocain à l'aide des données d'aster et de mesures spectrales de terrain. *Télédétection*, Vol. 6, (2006) 153 - 175 p.
- [21] - A. DANANE, Apport des données des images satellitaires et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, (2008) 194 p.

- [22] - M. NAOMEN, Automatic extraction of linéaments from landsat ETM+ Image and their structural in interprétations. *Review Geology, Environmental Science*, (2016) 12 p.
- [23] - Z. SERVADIO, Apports de l'imagerie à haute résolution spectrale et spatiale dans les bilans de volume et bilans radiatifs au Piton de La Fournaise. Sciences de la Terre. Université de la Réunion. Thèse. Université de La Réunion, École Doctorale Sciences Technologies Santé, (2011) 13 p.
- [24] - DUCROT DANUELLE, AUDA YVES, GASTELLU-ETCHEGORRY, JEAN-PHILLIPPE, HAGOLLE OLIVIER, INGLADA, JORDI, CLARET VIRGINIEMARAI, Enjeux et perspectives de la télédétection multi temporelle à très Haute Résolution Spatiale. CESBIO, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, (2012) 114 - 115 p.
- [25] - S. CAMARA, M. COULIBALY & B. KONE, Application de la télédétection et des SIG pour l'identification des zones favorables aux forages dans le bassin du fleuve Niger. *Revue Africaine de Géosciences*, (2017) 45 - 58 p.
- [26] - K. F. KOUAME, Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellites et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. *European journal of Scientific Research*, (2008) 14 p.
- [27] - MARC YOUAN TA, THEOPHILE LASM, JEAN PATRICE JOURDA, KOFFI FERNAND KOUAME et MOUMTAZ 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, Editions scientifiques GB, (2008) 80 p.
- [28] - B. OUSMANE, S. DJIBO, I. SOUMANA et A. SOUSSOU, Étude préliminaire de la pollution bactériologique des eaux des aquifères discontinus du socle du département de Téra /Liptako nigérien. *Afrique Science*, Vol. 6, N°3 (2010) 20 - 30 p.
- [29] - E. RICCHETTI et M. PALOMBELLA, Application of Landsat 7 ETM+ imagery for geological lineament analysis of Southern Italy. In: Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing symposium (IGARSS), Seoul, Korea, (2005) 49 p.
- [30] - V. T. ASSOMA, K. K. FERNAND et J. P. RUDANT BIEMI, Réduction du chatoiement et apport des données ASAR ENVISAT et MNE SRTM à la cartographie hydro structurale du bassin côtier de l'agnéby (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *Photo-interpretation European journal of applied remote sensing*, Vol. 47, N° 2011/4 (2012) 130 p.

- [31] - A. KOUDOU, F. F. KOUAME, TA. YOUAN, M. B. SALEY, J. P. JOURDA et J. BIEMI, Contribution des données ETM+ de Landsat, de l'Analyse Multicritère et d'un SIG à l'identification de secteurs à potentialité aquifère en zone de socle du bassin versant du N'zi (Côte d'Ivoire). *Photo-Interprétation European Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 46, N°2010/3-4 (2010) 130 p.
- [32] - M. V. SORAKOBY, M. B. SALEY, K. F. KOUAME, E. V. DJAGOUA et J. BIEMI, Utilisation des images Landsat ETM+ et du SIRS pour la cartographie linéamentaire et thématique de Soubre-Meagui (sud-ouest de la côte d'ivoire) : contribution à la gestion des ressources en eau souterraine. *Revue Télédétection*, Vol. 9, N°3 -4 (2010) 195 - 220 p.
- [33] - JOSEPH MARTIAL AKAME, Apport des linéaments satellitaires pour la recherche des indices aurifères du massif éburnéen de Ngovayang au sud Cameroun (Craton du Congo). University of Yaoundé. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, (2015) 30 p.