

Contribution des images satellitales Landsat 8 ETM+ à la cartographie litho structurale de Massigui Sud-Ouest du Mali, Afrique de l'Ouest

Awa KONE^{1*}, Ibrahima DAOU¹, Hamadoun Bokar MAIGA² et Mamadou Lamine BOUARE²

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 06 Décembre 2025)

* Correspondance, courriel : awakon444@gmail.com

Résumé

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence les linéaments géologiques et de caractériser les unités lithologiques de la région de Massigui, dans le Birimien de l'Afrique de l'Ouest, à l'aide d'images satellitales LANDSAT8 ETM+. Cette approche vise à démontrer l'apport des techniques de télédétection pour améliorer la cartographie géologique, tant en termes de précision que de gain de temps, tout en offrant un outil utile pour l'exploration minière et les recherches hydrogéologiques. L'étude repose sur des images LANDSAT ETM+ rehaussées et filtrées, intégrant des traitements texturaux et spatiaux. La cartographie lithologique a été réalisée par classification supervisée utilisant la méthode SVM. Les linéaments géologiques ont été extraits à l'aide de méthodes automatiques et semi-automatiques, incluant des techniques de compositions colorées, rapports de bandes, analyse en composantes principales (ACP), et filtres Sobel et directionnel. Les données satellitaires ont été combinées avec des informations préexistantes et des observations de terrain pour renforcer l'interprétation. Les traitements numériques ont permis une discrimination lithologique précise et la mise en évidence des structures tectoniques de la zone d'étude. Plus de 9 876 linéaments ont été identifiés, avec une direction subméridienne dominante, indiquant des structures anciennes, tandis que les linéaments dans d'autres orientations paraissent plus récents. La superposition des différentes données a abouti à l'élaboration d'une nouvelle carte litho-structurale de Massigui, constituant une esquisse litho-structurale télé-analytique détaillée et fiable. Cette étude démontre que l'intégration des images satellitaires LANDSAT ETM+ et des méthodes de traitement numérique constitue un outil efficace pour la cartographie lithologique et structurale. La caractérisation précise des linéaments et des unités lithologiques renforce les bases pour les recherches en exploration minière et hydrogéologie dans la région. Les résultats obtenus apportent une contribution notable à la communauté scientifique en offrant une méthodologie reproductible et un jeu de données géo-référencées pouvant guider de futures investigations géologiques et tectoniques dans le Birimien ouest-africain.

Mots-clés : *images Landsat 8 ETM+, linéaments, cartographie litho structurale, Massigui.*

Abstract

Contribution des images satellitaires Landsat 8 ETM+ à la cartographie litho structurale de Massigui Sud-Ouest du Mali, Afrique de l'Ouest

The objective of this study is to highlight geological features and characterize lithological units in the Massigui region of the Birimian in West Africa using LANDSAT8 ETM+ satellite images. This approach aims to demonstrate the contribution of remote sensing techniques to improving geological mapping, both in terms of accuracy and time savings, while providing a useful tool for mineral exploration and hydrogeological research. The study is based on enhanced and filtered LANDSAT ETM+ images, incorporating textural and spatial processing. Lithological mapping was performed by supervised classification using the SVM method. Geological lineaments were extracted using automatic and semi-automatic methods, including color composition techniques, band ratios, principal component analysis (PCA), and Sobel and directional filters. Satellite data were combined with pre-existing information and field observations to reinforce the interpretation. Digital processing enabled accurate lithological discrimination and highlighted the tectonic structures of the study area. More than 9,876 lineaments were identified, with a dominant sub meridian direction, indicating ancient structures, while lineaments in other orientations appear to be more recent. The superimposition of different data sets led to the development of a new litho structural map of Massigui, providing a detailed and reliable tele-analytical litho structural sketch. This study demonstrates that the integration of LANDSAT ETM+ satellite images and digital processing methods is an effective tool for lithological and structural mapping. The precise characterization of lineaments and lithological units strengthens the basis for mining exploration and hydrogeological research in the region. The results obtained make a significant contribution to the scientific community by providing a reproducible methodology and a set of geo-referenced data that can guide future geological and tectonic investigations in the West African Birimian.

Keywords : *Landsat 8 ETM+ images, lineaments, litho-structural mapping, Massigui.*

1. Introduction

Dans de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest, l'essentiel de l'eau potable provient des socles précambriens plutoniques et métamorphiques, où la perméabilité dépend à la fois de l'existence de fractures dans le profil d'altération et des linéaments tectoniques [1]. Cette perméabilité est variable, contrôlée par la densité, l'orientation et l'ouverture des fractures, qui tendent à se concentrer près des grandes discontinuités du socle. Les linéaments identifiés par télédétection sont considérés comme des discontinuités mécaniques représentatives du substratum, et leur cartographie offre une information spatialisée précieuse pour l'exploration minière et l'hydrogéologie. Cependant, leur détection peut être biaisée : les linéaments courts sont moins facilement détectés, ce qui affecte l'évaluation statistique de la fracturation [2]. La problématique de cette étude réside dans la validation des linéaments détectés par images satellitaires à l'aide de données hydrogéologiques de terrain. Pour y répondre, les images de LANDSAT ont été traitées par rehaussement, rapports de bandes, analyse en composantes principales (ACP) et filtres directionnels, suivis d'une extraction automatique et semi-automatique des linéaments. La validation par les forages de Bamako et environs permet d'assurer la fiabilité des structures identifiées [3]. L'objectif principal est de fournir une cartographie précise et validée des linéaments du socle précambrien, renforçant les bases pour la gestion durable des ressources en eau et les programmes d'exploration minière. Cette approche démontre l'intérêt de la télédétection comme outil efficace pour l'analyse structurale et hydrogéologique à l'échelle régionale.

2. Matériel et méthodes

2-1. Lieu d'étude - Ensembles géologiques du Massigui

Le Degré Carré de Massigui (Mali Sud) se localise dans la partie sud-ouest du Mali, entre les parallèles 11° et 12° de latitude nord et entre les méridiens 9° et 8° de longitude ouest. La plus grande partie du degré Carré de Massigui se trouve sur la région de Sikasso, et sur les cercles de Sikasso à l'Est, Kolondiéba au Sud, Bougouni à l'Ouest, et Dioila au Nord. Géographiquement, Massigui est traversée par une succession de collines gréseuses de direction NW-SE [4, 5]. Le reste de Massigui est composé de croupes, de plaines d'accumulation et d'érosion et de glacis au pied de la limite avec le Néo protérozoïque. Les formations paléo protérozoïques occupent les deux tiers de la carte et s'étendent au sud-ouest des sédiments du bassin de Taoudéni [6]. D'une manière générale, le socle paléo protérozoïque est peu affleurant, il est mieux exposé au sud et au sud-ouest de Kolondiéba et parfois au pied des falaises de grès post-paléo protérozoïques. Le Degré Carré de Massigui (Mali Sud) est composé de roches métavolcano-sédimentaires et de grandes masses de roches plutoniques d'âge paléo protérozoïque [7]. Le secteur étudié est affecté par une zone de cisaillement majeure d'échelle crustale, développée à l'interface entre le batholite de Massigui et les formations métavolcano-sédimentaires encaissantes. Cette structure tectonique est marquée par la présence de nombreux corps intrusifs dioritiques et granitoïdiques qui la jalonnent. La compréhension de l'organisation et du fonctionnement de cette zone de cisaillement constitue un enjeu majeur à l'échelle régionale, tant pour la reconstitution de l'évolution géodynamique que pour l'analyse des contrôles structuraux associés [8]. Les roches paléo protérozoïques sont peu affleurantes et la région est recouverte par d'abondantes formations latéritiques qui empêchent de voir les contacts entre les différents ensembles litho structuraux et peu d'études géologiques fondamentales ont été faites sur la région malgré son fort potentiel minier. Les travaux antérieurs montrent une mise en place parentée des roches dioritiques et granitoïdiques qui jalonnent la zone de cisaillement du Banifing. La mise en place de ces corps intrusifs est étroitement contrôlée par l'activité de l'accident cisailant majeur du Banifing [9,10]. Le long de cette structure tectonique se développe une suite magmatique cohérente, caractérisée par une évolution pétrologique continue allant des diorites aux granites, en passant par des termes intermédiaires tels que les monzodiorites et les granodiorites. Cet ensemble intrusif, témoignant d'un processus évolutif complet de différenciation magmatique, est désigné sous l'appellation de suite plutonique du Banifing [11].

2-2. Période d'étude et déroulement des activités sur le terrain

Cette étude a été effectuée entre février 2023 au septembre 2025. Le chronogramme des activités comprenait deux phases : traitements des images et validation des résultats télé détectés. La cartographie des structures géologiques a été effectuée en deux phases : l'extraction des linéaments géologiques (collecte de données, définition de la zone et traitements d'images satellitaires) et la validation des résultats télé détectés, pour cela nous avons effectué une mission sur le terrain. La méthodologie adoptée repose sur une approche intégrée combinant travaux de terrain et traitement des données. Les investigations de terrain ont porté sur une cartographie structurale détaillée, comprenant les observations géologiques systématiques, les prélèvements d'échantillons représentatifs et la réalisation de mesures structurales (directions et pendages). L'ensemble des données acquises a ensuite fait l'objet d'un traitement, d'une intégration et d'une interprétation croisée, conduisant à l'élaboration de la carte géologique finale. Enfin, la synthèse des résultats obtenus a permis la rédaction de l'article, basée sur la superposition et l'analyse critique des différentes sources d'information. L'équipe de recherche de cette étude de cartographie géologique est pluridisciplinaire, composée des géologues de terrain qui collectent des données sur le terrain et les spécialiste en télédétection (Imagerie satellitaire) et SIG (Systèmes d'Information Géographique) pour la modélisation et la

gestion des données. Les géologues de terrain effectuaient des observations directes des structures géologiques, collectent des échantillons et utilisent des outils comme les loupes et les marteaux de géologue. Les travaux de laboratoire ont été consacrés aux analyses pétrographiques et structurales réalisées par les géologues. Parallèlement, les spécialistes en imagerie satellitaire et en systèmes d'information géographique (SIG) ont assuré l'intégration des données acquises sur un fond topographique de référence, la gestion et l'analyse des couches géologiques et structurales, ainsi que la production des cartes finales à l'aide de logiciels spécialisés.

2-3. Matériel et logiciels utilisés

L'étude décrit la réalisation d'une carte litho structurale de Massigui à partir des images satellitaires (Landsat 8 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 [12, 13]. Les données géo scientifiques exploitées dans cette étude sont les cartes, géologiques et photos géologiques faites au 1/200 000 [1] de la zone d'étude. Ce travail se base sur l'extraction, l'interprétation et l'analyse d'une scène Landsat8-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 Massigui du 17 Mars 2022. Les logiciels utilisés sont ENVI 5.1, PCI Géomatica, Adobe Illustrator et Surfer, Sp02003, et Rose.Net, Google Earth pro et Arc Gis.

2-4. Méthodes

La réalisation d'une carte géologique télé détectée doit respecter les différentes étapes de traitements d'images satellitaires. Les images ayant été préalablement géo référencées et ortho rectifiées, nous avons procédé à des traitements aboutissant à des images en compositions colorées. La méthodologie de cette étude est basée sur la cartographie litho 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 méthode de rehaussement la plus utilisée. Cette technique permet d'augmenter le contraste des données afin d'obtenir une meilleure visualisation de l'image. L'approche de la télédétection rehausse la localisation des formations géologiques et permet de cartographier les unités lithologiques de façon raffinée et précise [14, 15]. L'extraction des formations lithologiques est effectuée à partir du traitement d'image landsat8 ETM+. Les traitements de rehaussement d'images ont été réalisés à l'aide de stretching ou l'étalement interactif du contraste ou encore l'histogramme (étalements linéaire, gaussien, équipopulation et racine carré) [16 - 17]. L'histogramme ou l'étalement interactif du contraste est la méthode de rehaussement 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 de dynamique linéaire de 2 % est appliqué à tout canal. Nous avons préféré un étalement dynamique interactif de l'histogramme variable selon le contexte de la zone l'étude (les formations lithologiques à faire ressortir). Nous sélectionnons une partie de l'histogramme d'origine dont les valeurs varient de 78 à 178 (pour la bande 1 ETM+) et nous réalisons un étalement sur des valeurs allant de 0 à 255 pour faire ressortir le maximum de variations dans les tons de gris. Les images Landsat8 ETM+, les canaux ainsi améliorés peuvent être associés pour donner une composition colorée de meilleure qualité visuelle [18,19]. Les images de télédétection sont généralement représentées sous forme raster, un mode de structuration des données dans lequel l'espace géographique est subdivisé en unités spatiales élémentaires appelées pixels. Chaque pixel est associé à une valeur radiométrique traduisant l'intensité du rayonnement électromagnétique enregistré par le capteur, laquelle renseigne sur la luminosité et la couleur de la surface observée. Un fichier raster est constitué d'un ou de plusieurs plans d'information,

également appelés bandes spectrales, correspondant chacun à une longueur d'onde ou à un canal radiométrique spécifique. L'acquisition des images satellitaires s'effectue ainsi simultanément dans plusieurs canaux du spectre électromagnétique, permettant une analyse multi spectrale détaillée des objets de surface [20, 21]. Dans le cas du satellite Landsat 7 ETM+, six bandes spectrales présentant une résolution spatiale identique de 30 m (bandes 1, 2, 3, 4, 5 et 7) sont couramment utilisées. Ces bandes peuvent être combinées afin de produire des compositions colorées en affectant trois bandes distinctes aux couleurs fondamentales rouge, vert et bleu (RVB). La combinaison des bandes 3, 5 et 7 constitue l'une des associations les plus utilisées pour l'interprétation géologique. La richesse spectrale du capteur Landsat 7 ETM+ offre ainsi une large gamme de combinaisons colorées tertiaires RVB, permettant d'adapter le traitement des images aux objectifs spécifiques d'analyse et d'améliorer la discrimination des unités lithologiques et des structures géologiques [22, 23]. Cependant, il arrive que ces combinaisons soient très corrélables, c'est-à-dire que l'information portée se répète dans plusieurs bandes. Pour éviter cette répétitivité et choisir les compositions RVB les plus importantes, une étude statistique pour les six bandes de même résolution spatiale (1, 2, 3, 4, 5 et 7) est effectuée. Ainsi, le coefficient de corrélation des six bandes et leurs déviations standards est calculé [7 - 24]. Les meilleures compositions colorées retenues 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 [25]. Dans le but d'optimiser l'extraction de l'information spectrale, un choix strictement quantitatif des meilleures combinaisons de bandes a été retenu afin de maximiser la discrimination des unités géologiques [26, 27]. Parmi les méthodes de transformation d'images les plus largement utilisées, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) constitue un outil privilégié pour la synthèse et l'interprétation des données multi spectrales.

Dans le cadre de la présente étude, et afin de mettre en évidence le plus grand nombre possible de formations lithologiques affleurantes au sein de la zone d'étude, la méthode d'Analyse en Composantes Principales Sélectives (ACPS) a été appliquée. Cette approche permet de réduire l'information initialement contenue dans plusieurs bandes spectrales fortement corrélées en un nombre restreint de composantes principales indépendantes, tout en conservant l'essentiel de la variance spectrale pertinente pour l'analyse géologique [28]. Parfois l'information comprise dans 5 ou 6 bandes est réduite par cette analyse en seulement 3 composantes. Le choix du nombre de composantes principales à conserver constitue l'étape la plus importante de l'ACP. Aucune 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 [3]. 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 [29]. 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 réalisé 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 ACP3 123 [3]. 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 ACP1 567, ACP2 567 et ACP3 567. Nombreux détails jusque-là invisibles sur les bandes initiales sont mis en évidence dans les néo canaux ACP567 telle la localisation de certaines formations ainsi que des anomalies radiométriques, enfouies sous les dépôts alluvionnaires et dont certains ont été détectés la géophysique lors des travaux antérieurs [3].

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+7, ETM+4/ETM+3, ETM+4/ETM+6 et ETM+4/ETM+5) [28]. 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 5x5 de Sobel et de filtres spatiaux 7x7 [5 - 7]. Ainsi, différents filtres directionnels ont été appliqués (N00° ; N45° ; N80° ; N160°). Les images issues des traitements par les filtres directionnels sont ensuite importées dans les deux logiciels ADOBE Illustrator et PCI Géomatica pour établir 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. 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. La dernière étape, lorsque le calcul est terminé, consiste à demander le tableau correspondant, sur lequel nous obtenons le nombre de structures géologiques représenté dans l'image filtrée avec la direction et la longueur de chacun d'entre eux. Rose.NET, une application Windows interactive a permis la représentation graphique et le calcul de la répartition statistique de l'orientation de linéaments comme les failles, les diaclases, et petites fractures [32, 33]. Ces procédés nous ont permis de faire une carte de synthèse des structures de la zone d'étude. La carte litho-structurale a été élaborée à partir des résultats des analyses lithologiques et structurales, dans le but de tester la cartographie des différentes unités lithologiques obtenues par traitement d'images, d'évaluer leur pertinence et de valider les résultats. Pour mesurer le degré de concordance avec la carte géologique existante, cette dernière a été digitalisée et intégrée dans un système d'informations géographiques (SIG, Arc GIS). La carte litho-structurale dérivée de la télédétection a ensuite été superposée à la carte géologique digitalisée, afin de procéder à la correction, à la corrélation et à l'interprétation des unités lithologiques et structurales.

2-5. Validation des données de la carte litho structurale télé détectée

Le contrôle et de validation des formations géologiques télé détectées est une phase très importante pour juger de la pertinence des méthodes utilisées. L'objectif est de trouver une nouvelle méthode de cartographie lithostructurale par photo interprétation pour le rehaussement des cartes préexistantes [1 - 3]. Lorsque l'origine anthropique d'une structure linéaire a été prouvée (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 [6]. La carte structurale obtenue dans ce travail n'est certes pas exhaustive mais est représentative de la fracturation de Massigui [34]. Elle servira de base pour la caractérisation des structures géologiques. Les réseaux de linéaments ont donc été analysés suivant les techniques de l'analyse statistique et géostatistique de distribution des longueurs des linéaments et avec le logiciel SPO2003 et dans le second cas, d'analyser la rosace diagramme de l'orientation des fracturations (ROSET.NET). 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 différenciées qu'en fonction de leur direction (ROSE .NET) et leur densité. La validation des structures géologiques télé analytiques a été faite grâce une mission du terrain dans la zone d'étude, la majorité est visible sur le terrain et identique à celles déclarées [1].

3. Résultats

3-1. Cartographie lithologique

L'image obtenue par classification supervisée (*Figure 1*) présente une excellente qualité, permettant une identification précise des unités lithologiques de la zone d'étude. Malgré certaines similitudes spectrales entre des formations comme les alluvions, gabbros, granites, grauwackes, quartzites, roches basiques et sédiments, la combinaison de bandes utilisée dans cette étude permet une distinction efficace des principales formations. Cette cartographie télé-analytique offre ainsi une vue exhaustive et détaillée des unités paléo-protérozoïques, néo-protérozoïques et quaternaires de Massigui.

3-1-1. Granites

Les granites constituent la formation dominante de la zone. L'ACPS appliquée sur les bandes multi spectrales permet de distinguer les différents types de granites présents dans la région, notamment les intrusions situées au Sud-Ouest de la zone d'étude. Cette approche permet également de confirmer que les affleurements au nord de la zone ne correspondent pas à la série de Sanso, mais appartiennent à une lithologie différente, avec une signature spectrale distincte. La cartographie supervisée renforce ainsi la précision de l'identification et de la localisation des intrusions granitiques.

3-1-2. Gabbros

Les gabbros apparaissent comme des formations relativement homogènes, mais leur distinction par rapport aux roches basiques et aux quartzites est facilitée par la classification supervisée. La cartographie montre que ces gabbros sont dispersés dans certaines zones de la carte, formant des intrusions ponctuelles ou linéaires, souvent associées à des structures tectoniques. Cette identification permet d'affiner la compréhension structurale et la distribution lithologique de la zone d'étude.

3-1-3. Grauwackes et Quartzites

Les grauwackes et quartzites sont des formations sédimentaires présentes dans la région. La télédétection, par combinaison de bandes et traitement ACPS, permet de séparer ces unités des formations basiques et granitiques, malgré des réponses spectrales proches. Ces roches affleurent principalement dans des zones linéaires ou tabulaires, indiquant des paliers structuraux ou des couloirs tectoniques anciens, essentiels pour la reconstruction géologique de Massigui.

3-1-4. Roches basiques

Les roches basiques se caractérisent par des signatures spectrales intermédiaires entre les gabbros et les quartzites. La cartographie permet de localiser précisément ces formations, souvent associées à des intrusions ou des extensions linéaires. Leur identification contribue à l'interprétation de l'histoire magmatique et tectonique de la zone.

3-1-5. Sédiments et Alluvions

Les sédiments et alluvions quaternaires sont reconnaissables par leur faible réflectance et homogénéité spectrale. Ils sont principalement situés dans les vallées et les zones basses, correspondant aux zones de dépôt récent. La classification supervisée permet de délimiter ces zones avec précision, facilitant ainsi la distinction entre formations anciennes et récentes et améliorant la cartographie des unités litho-structurales sur l'ensemble de la zone d'étude.

3-1-6. Apports de la cartographie télé-analytique

La cartographie litho-structurale issue de la télédétection apporte des avantages méthodologiques et scientifiques significatifs pour l'étude géologique de la zone de Massigui. Premièrement, elle permet une identification précise et rapide des différentes unités lithologiques, y compris celles qui présentent des affleurements limités ou dispersés, souvent difficiles à détecter sur le terrain. La combinaison des bandes multi spectrales et l'application de l'Analyse en Composantes Principales Sélectives (ACPS) offrent une réduction efficace de la redondance de l'information et un renforcement du contraste spectral entre formations, ce qui améliore la discrimination lithologique. Deuxièmement, cette cartographie facilite la reconstitution structurale et géologique. En intégrant les données télé-détectées dans un SIG (ArcGIS), il devient possible de superposer les cartes existantes avec la carte litho-structurale télé détectée, permettant ainsi de corriger certaines interprétations et d'identifier des discordances entre les cartes traditionnelles et les observations spectrales. Cette approche est particulièrement utile pour vérifier l'appartenance des affleurements aux séries géologiques (paléo-protérozoïques, néo-protérozoïques et quaternaires) et pour confirmer les limites des intrusions granitiques et basaltiques. Troisièmement, la cartographie télé-analytique contribue à la délimitation fine des zones d'intérêt pour l'exploration et les études détaillées. Les formations granitiques du Sud-Ouest, les affleurements néo-protérozoïques du nord, ainsi que les sédiments et alluvions quaternaires sont cartographiés avec une précision accrue, ce qui permet de prioriser les zones à étudier sur le terrain et de planifier des campagnes géologiques et géophysiques plus efficaces. Quatrièmement, elle constitue un outil complémentaire pour la validation des cartographies antérieures, telles que celles réalisées par [1 - 3], qui ne considéraient que le socle précambrien Birrimien. La cartographie télé-analytique enrichit ces travaux en intégrant l'ensemble des formations présentes dans la zone d'étude, incluant les unités néo-protérozoïques et quaternaires, ce qui améliore la compréhension chrono stratigraphique et structurale. Enfin, cette approche présente un avantage opérationnel important : elle permet de couvrir de vastes zones avec un minimum de contraintes logistiques et de ressources, tout en offrant des données cohérentes et facilement intégrables dans des systèmes d'information géographique pour des analyses spatiales avancées. Elle représente ainsi un outil stratégique pour la cartographie litho-structurale moderne, la planification de travaux de terrain et la mise en place de modèles géologiques fiables.

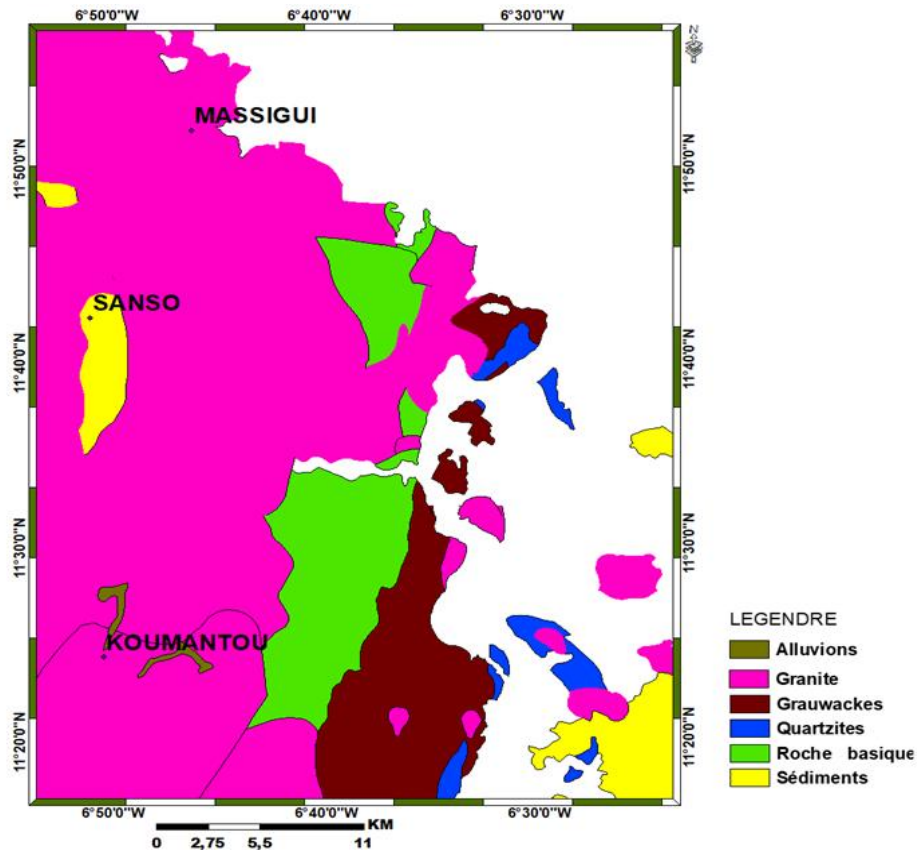


Figure 1 : Carte lithologique télé détectée de Massigui

3-2. Cartographie structurale

3-2-1. Caractéristiques générales des linéaments

La cartographie structurale a permis l'identification de 9 876 linéaments géologiques sur l'ensemble de la zone d'étude (**Figure 3**). Les longueurs des linéaments varient de 0,5 km à 100,5 km, avec une longueur moyenne de 5,53 km. La longueur cumulée des structures cartographiées est estimée à environ 54 615 km, traduisant une structuration tectonique dense. Le linéament le plus long, d'environ 100 km, traverse la zone d'étude selon une direction NNE–SSW, en passant par Kolondièba, tandis que l'ensemble des autres structures présente des longueurs inférieures à 80 km.

3-2-2. Carte de synthèse des linéaments

La superposition des cartes de linéaments extraites à partir des images filtrées selon les trois directions principales a permis l'élaboration d'une carte de synthèse des linéaments (**Figure 2**). Cette approche intégrative a consisté à fusionner les informations structurales continues issues des différents filtres directionnels, tout en éliminant les redondances. La carte obtenue ne retient que les segments uniques de linéaments, offrant une représentation fiable et exhaustive de l'organisation structurale de la zone étudiée.

3-2-3. Analyse directionnelle et rosace des linéaments

L'analyse de la rosace des directions (**Figure 5**) montre une dispersion des linéaments dans l'ensemble des orientations comprises entre 0° et 180°, bien que certaines directions dominantes se dégagent nettement. Les principaux groupes directionnels correspondent aux orientations NNE–SSW, NE–SW, SE–NW et SSE–NNW.

Deux directions majeures de fracturation sont identifiées : $N40^{\circ}$ à 50° et $N130^{\circ}$ à 140° , accompagnées de directions secondaires moins marquées. La direction NNE–SSW est prédominante et regroupe environ 51 % des linéaments cartographiés. Les familles NE–SW et SE–NW représentent respectivement 28 % et 10 % des fréquences, tandis que les autres orientations sont faiblement représentées.

3-2-4. Interprétation structurale

Les directions principales $N40^{\circ}$ à 80° et $N130^{\circ}$ à 140° , associées aux formations birrimiennes, ont également été reconnues par [1], dans la région de Massigui, confirmant la cohérence régionale des résultats. La direction NNE–SSW correspond à l'orientation dominante de la foliation régionale, la direction NE–SW est attribuée à la fracturation générale, tandis que la direction SE–NW est associée aux grands décrochements tectoniques. Sur le plan spatial, une forte densité de linéaments est observée dans les zones orientées NNE–SSW, traduisant l'existence de couloirs structuraux majeurs. À l'inverse, les secteurs NW et SE présentent une faible densité structurale, indiquant une déformation tectonique moins marquée.

3-2-5. Carte litho-structurale

L'ensemble des résultats issus des analyses lithologiques et structurales a permis l'élaboration d'une carte litho-structurale à l'échelle 1/50 000. Cette carte vise à évaluer l'apport des images satellitaires traitées à la discrimination des lithologies, à valider les structures identifiées et à tester la pertinence de l'approche télé-analytique dans la cartographie géologique de la zone d'étude (*Tableau 1*).

Tableau 1 : Synthèse des linéaments du calcul sous SPO2003, montrant la distribution de l'orientation des linéaments télé analytiques de la zone d'étude

Notation	Angle (°)	Direction	Nombres de linéaments	Lineaments par %
1	00 – 30	NNE-SSW	4590	51
2	30 – 60	NE – SW	3030	28
3	60 – 90	SE– NW	960	10
4	90 – 120	ESE-WNW	650	5.5
5	120-150	SSE-N NW	390	3.5
6	150 -180	ENE-W SW	256	2
Total			9876	100

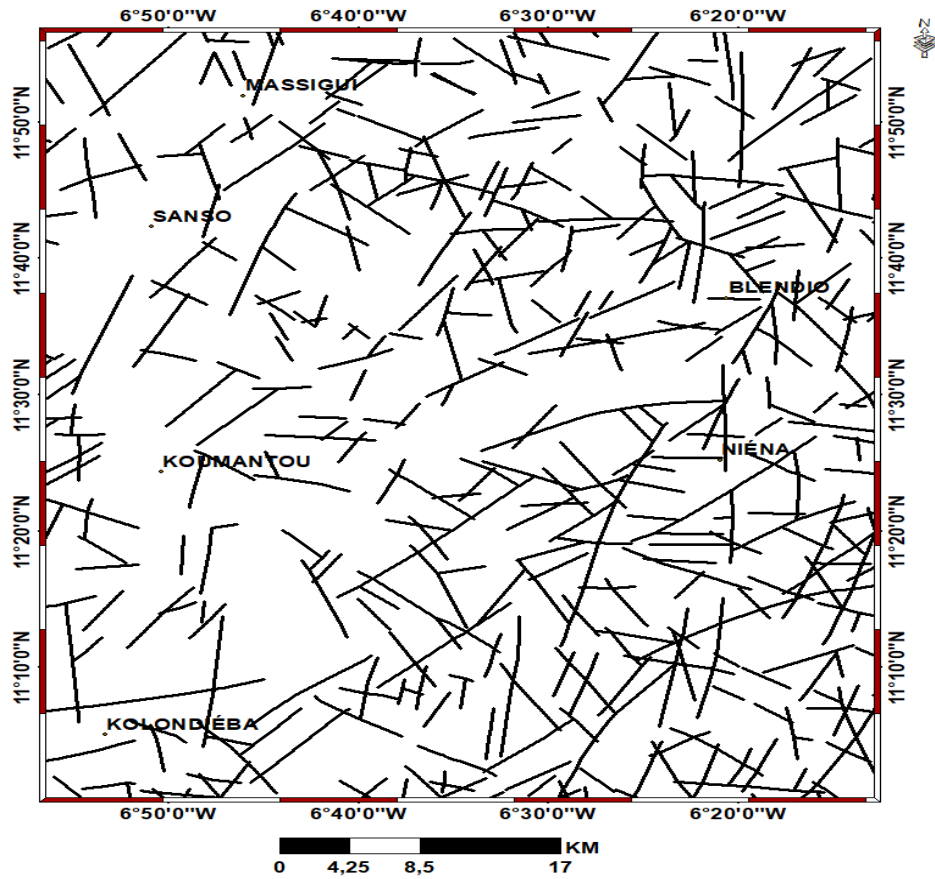


Figure 2 : *Carte synthèse des linéaments télé détectés Massigui*

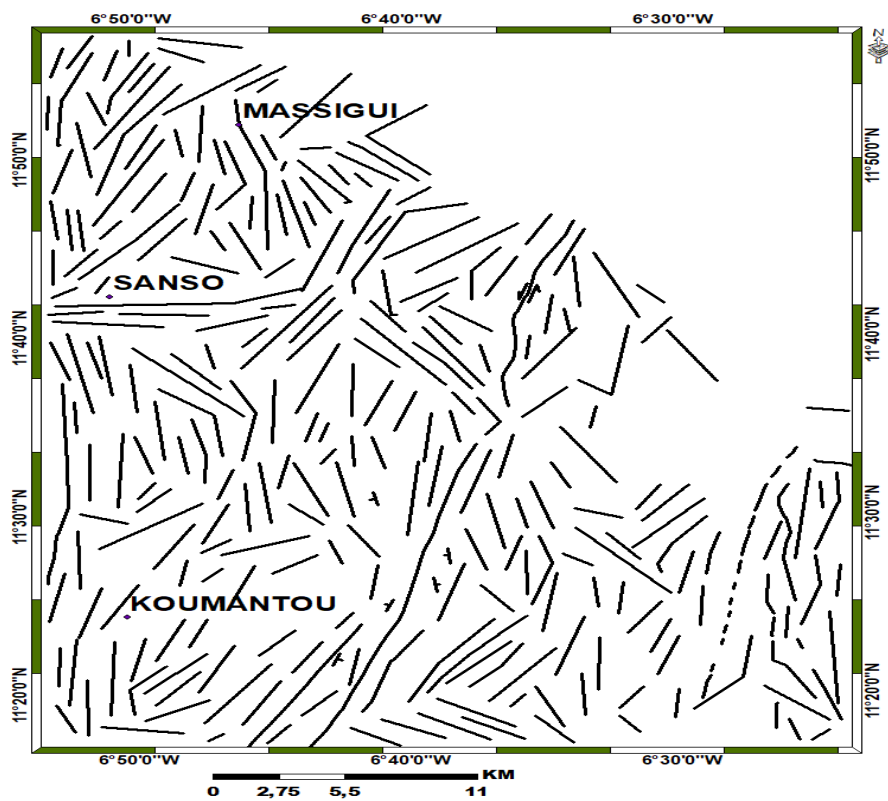


Figure 3 : *Carte linéamentaire [1]*

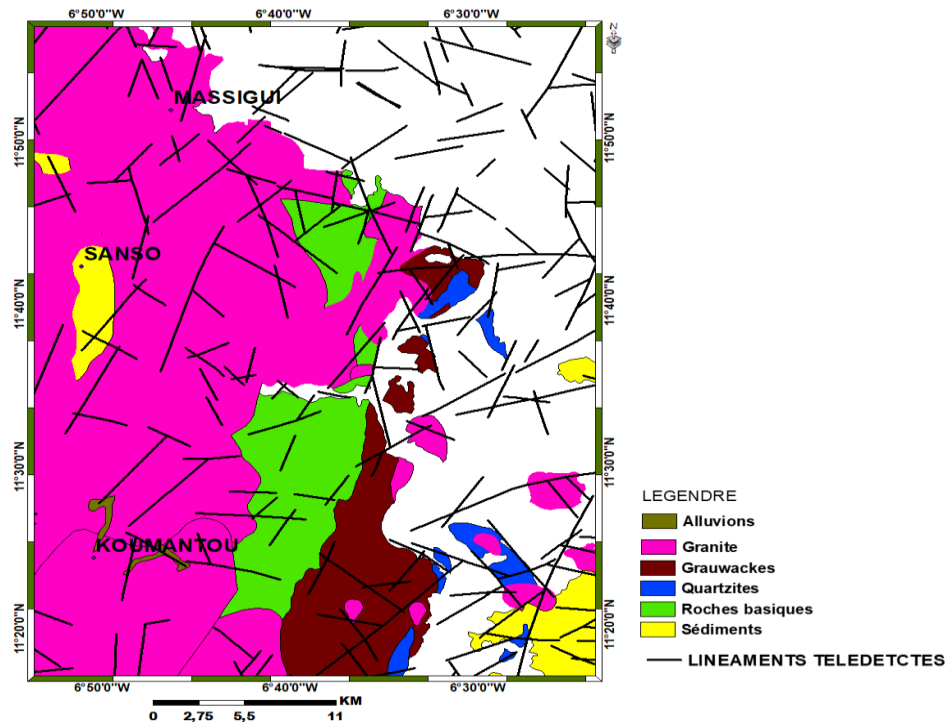


Figure 4 : Carte litho structurale télédéteectée de Massigui

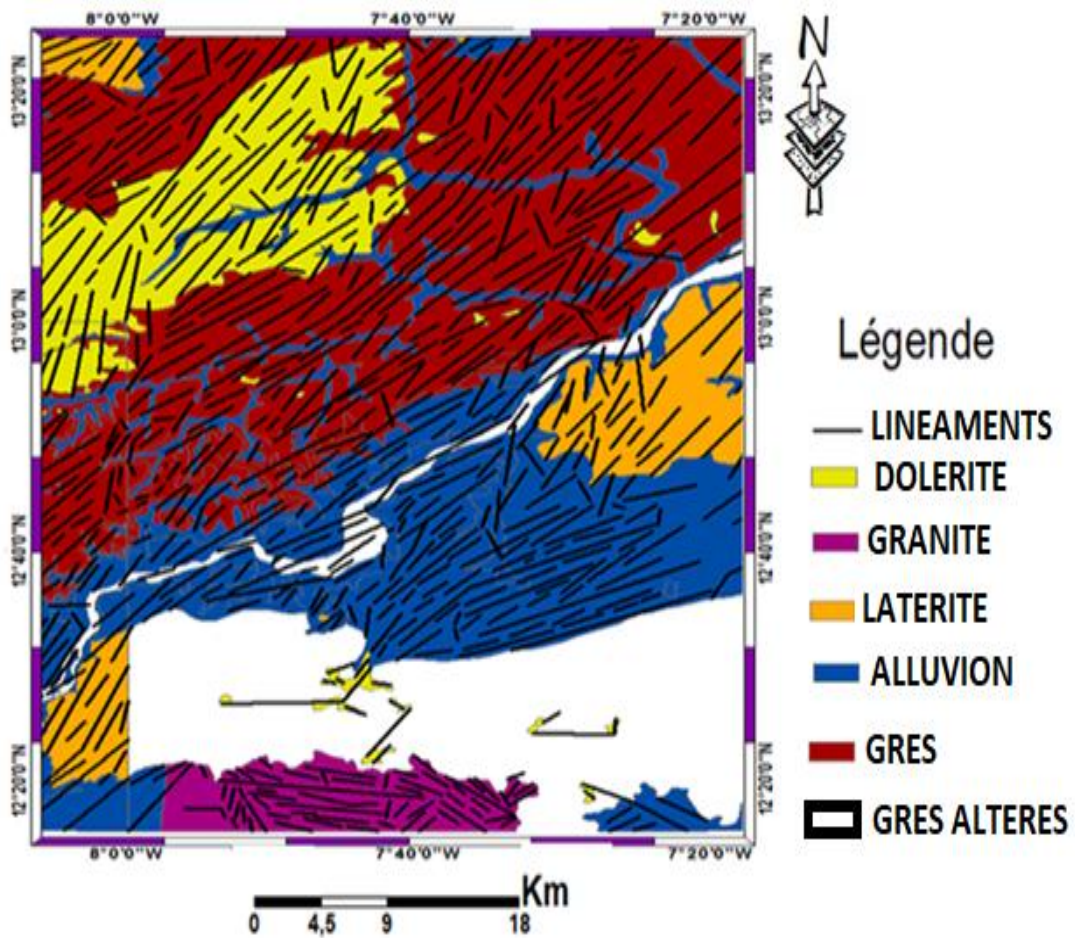


Figure 5 : Carte litho structurale tél analytique de Bamako et ses environs [3]

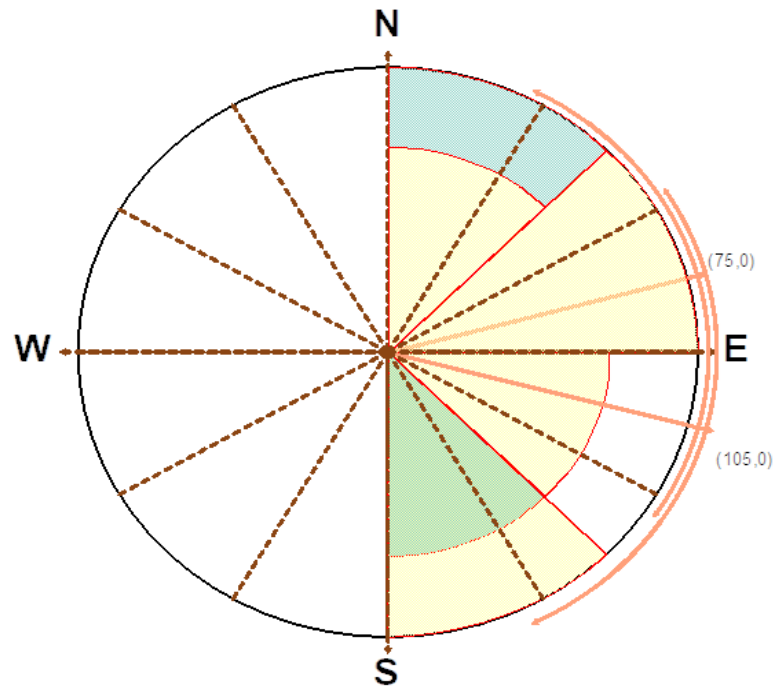


Figure 6 : *Rosace des directions des linéaments télé détectées de Massigui*

4. Discussion

4-1. Apport des images satellitaires à la cartographie litho-structurale

La réalisation de la carte litho-structurale télé-analytique de Massigui (Sud-Ouest malien) a été rendue possible grâce à l'exploitation et au traitement avancé des images satellitaires. Ces traitements ont permis la mise en évidence des réseaux de linéaments majeurs, traduisant l'architecture tectonique du socle cristallin. L'approche télé-analytique s'avère ainsi particulièrement adaptée aux régions à accès limité et à forte hétérogénéité géologique, comme le Sud-Ouest du Mali.

4-2. Limites de l'extraction photo-visuelle des linéaments

La méthode d'extraction photo-visuelle des linéaments repose essentiellement sur l'interprétation humaine et demeure fortement dépendante de la sensibilité de l'observateur. Cette subjectivité constitue une limite majeure, susceptible d'engendrer des biais dans l'identification et la continuité des structures. Par ailleurs, la lisibilité variable des images, liée à la résolution spatiale, au contraste spectral et aux conditions d'éclairage, compromet la fiabilité de cette approche. Ainsi, même appliquée à des images satellitaires de haute résolution, la méthode photo-visuelle ne permet pas une cartographie litho-structurale exhaustive et précise, notamment dans les zones fortement fracturées ou recouvertes par des formations superficielles.

4-3. Avantages des méthodes automatiques et semi-automatiques

À l'inverse, les méthodes d'extraction automatique et semi-automatique des linéaments, assistées par ordinateur, offrent une amélioration significative de la lisibilité et de la détection des structures géologiques. Elles permettent une analyse multi spectrale et multidirectionnelle des images satellitaires à travers l'application de filtres de rehaussement, optimisant ainsi l'identification des discontinuités structurales. Ces approches réduisent considérablement la subjectivité de l'interprétation et favorisent l'obtention d'une cartographie structurale plus objective et reproductible, se rapprochant davantage de la réalité géologique du terrain.

4-4. Contribution des filtres directionnels et de la classification SVM

Les aires caractérisées par des faciès lithologiques distincts sont particulièrement bien identifiables à partir des images satellitaires issues de la classification SVM, ainsi que sur certaines images filtrées. L'interprétation des images obtenues par l'application de filtres directionnels sur la bande panchromatique, notamment NNE–SSW et Sobel NE–SW, met en évidence une forte concentration des réseaux linéamentaires. Les filtres appliqués à la bande panchromatique révèlent principalement des linéaments orientés NNE–SSW et NE–SW, tandis que le filtre Sobel NE–SW appliqué à la bande 5 accentue davantage les linéaments de direction SE–NW. De même, le filtre Sobel NW–SE sur la bande 7 met en évidence des linéaments orientés quasi E–W. Les linéaments N–S sont détectés de manière cohérente par l'ensemble des filtres exploités. Il est important de souligner que les plus fortes densités de linéaments sont observées sur les images filtrées de la bande panchromatique et sur le filtre E–W appliqué à la bande 7, confirmant l'efficacité de ces traitements pour l'analyse structurale.

4-5. Validation des linéaments et contexte tectonique régional

Après élimination des structures anthropiques (routes, lignes électriques, infrastructures linéaires), plusieurs linéaments ont été validés comme fractures et failles géologiques par confrontation avec les cartes géologiques existantes et par des observations de terrain. La forte densité de fractures observée dans la zone d'étude s'explique par la nature cristallophyllienne du socle, particulièrement propice à une déformation tectonique intense. Les données issues des cartes géologiques préexistantes, notamment la carte géologique de [1], indiquent que les directions majeures de fracturation dans le Sud-Ouest du Mali s'étendent entre $N00^{\circ}$ et $N180^{\circ}$, avec des orientations privilégiées autour de $N75^{\circ}$, $N105^{\circ}$ et $N160^{\circ}$. Plusieurs auteurs [1 - 35] ont également identifié à Massigui des directions majeures de fracturation telles que $N00^{\circ}$, $N10^{\circ}$, $N20^{\circ}$, $N30^{\circ}$, $N40^{\circ}$, $N50^{\circ}$, $N60^{\circ}$, $N130^{\circ}$, $N160^{\circ}$ et $N180^{\circ}$, sans toutefois préciser systématiquement le sens des mouvements associés.

4-6. Nouveaux apports structuraux de la cartographie télé-analytique

La carte litho-structurale télé-analytique élaborée dans cette étude a permis d'identifier de nouvelles directions majeures de fracturation jusque-là non cartographiées. Il s'agit notamment de :

- fractures $N80^{\circ}$ à $N95^{\circ}$ à mouvement dextre ;
- fractures $N120^{\circ}$ à $N130^{\circ}$ à mouvement senestre ;
- fractures $N150^{\circ}$ à $N160^{\circ}$ à mouvement senestre.

Ces nouvelles données structurales constituent un apport significatif à la connaissance tectonique de la région et permettent une meilleure compréhension de la cinématique des systèmes de failles. L'analyse conjointe des structures et des lithologies a également permis de mettre en évidence des aires litho-structurales distinctes, reflétant l'évolution tectono-métamorphique du socle.

4-7. Implications pour la prospection minière

La région de Massigui connaît actuellement une dynamique soutenue de prospection minière, représentant un enjeu économique majeur pour le Mali. Cette activité est particulièrement concentrée dans la zone centrale, caractérisée par les réseaux de fractures de Sanso et Kolondiba, où opèrent plusieurs compagnies minières et hydrogéologiques. La nouvelle cartographie litho-structurale proposée, combinée à l'établissement d'une chronologie relative des failles et des zones de cisaillement, constitue un outil d'aide à la décision stratégique. Elle permet d'optimiser le ciblage des structures favorables à la minéralisation et d'améliorer la compréhension du contrôle structural des gisements, en accord avec les travaux antérieurs [3].

5. Conclusion

Cette étude a permis de démontrer l'efficacité de la télédétection et des traitements d'images satellitaires dans la cartographie litho-structurale de la région de Massigui, au Sud-Ouest du Mali. La classification supervisée, combinée aux analyses spectrales et structurales, a conduit à une discrimination fiable des principales unités lithologiques paléo-protérozoïques, néo-protérozoïques et quaternaires, malgré certaines similitudes spectrales entre formations. La cartographie structurale a mis en évidence un réseau dense de 9 876 linéaments, traduisant une tectonique marquée, dominée par l'orientation NNE–SSW qui représente environ 51 % des structures identifiées. L'analyse directionnelle confirme l'existence de directions majeures de fracturation NE–SW et SE–NW, associées respectivement à la fracturation générale et aux grands décrochements tectoniques. La carte litho-structurale obtenue à l'échelle 1/50 000 synthétise de manière cohérente les informations lithologiques et structurales et confirme la pertinence de l'approche télé-analytique. Les résultats montrent une bonne concordance avec les données géologiques régionales antérieures, tout en apportant une précision accrue sur la distribution des lithologies et des structures. Cette étude constitue ainsi une contribution significative à la connaissance géologique de Massigui et fournit un outil opérationnel pour la prospection minière, la recherche hydrogéologique et la planification de travaux géologiques futurs.

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] - A. MASSE, 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] - CHABOU, MOULLEY CHARAF, " Datation Ar39- Ar40 et Géochimie de la Province Magmatique de l’Atlantique Central dans le Sud-ouest algérien ". Thèse Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, (2008) 106 p.
- [20] - EL QAYEDY J., TAJ-EDDINE K., BONN F., CHIKHAOUI M., WITAM O, 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 Mandanané 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. *European journal of Scientific Research*, (2008) 14 p.
- [27] - MARC YOUAN TA, THEOPHILE LASM, JEAN PATRICE JOURDA, KOFFI FERNAND KOUAME, 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*, N°2010/3-4, Vol. 46, (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.
- [34] - A. KOCAL, HS. DUZGUN et C. KARPUZ, " Discontinuity mapping with automatic lineament extraction from high resolution satellite imagery". In: *Proceedings of the XX the ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey, (2004) 30 p.
- [35] - J. FABRE, " Géologie du Sahara occidental et central ". Dépt. Géol. et de Min. ; Musée Royal de l'Afrique centrale (K.M.M.A.) Belgique tervuren African, collection, Vol. 108, (2005) 372 p.