

**CARACTÉRISATION STRUCTURALE ET LITHO STRUCTURALE
DES LINÉAMENTS PAR DIFFÉRENTS TRAITEMENTS D'IMAGE
SATELLITAIRE : CAS DE BAMAKO ET SES ENVIRONS,
SUD – OUEST DU MALI**

**Awa KONE^{1*}, Mamadou Lamine BOUARE¹, Ibrahima DAOU^{2*}
et Hamadoun Bokar MAIGA²**

¹*Ecole Doctorale des sciences et Technologies du Mali (EDSTM)*

²*Ecole Nationale d'Ingénieurs Abderrahmane Baba Touré (ENI-ABT),
Laboratoire de recherche eau/ environnement, BP 242 Bamako, Mali*

³*Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée de
Katibougou (IPR/IFRA), BP 224, Mali*

* Correspondance, e-mail : awakon19@yahoo.fr

RÉSUMÉ

En cartographie géologique la corrélation, l'analyse et l'exploitation de l'imagerie optique et en particulier des données spectrales numériques Landsat 7 ETM+ sont d'un apport considérable. Dans la zone d'étude Bamako et environs (Sud-ouest malien) où les seules cartes géologiques existantes datent avant l'indépendance (Cartes au 1/200.000 projet sysmin), cette technique constitue une source d'information très appréciable et offre un excellent outil pour une cartographie géologique plus performante en matière de qualité et de gain de temps. L'étude débute par une cartographie linéamentaire par l'imagerie satellitaire à travers une extraction automatique à partir d'images LANDSAT ETM+ rehaussées et filtrées texturalement et spatialement. Les travaux de télédétection, couplés aux données antérieures de terrain ont permis l'extraction et l'interprétation des linéaments obtenus par des images satellitaires de la zone d'étude. La présente étude vise à évaluer la contribution de cette méthodologie dans la caractérisation des différentes unités litho-stratigraphiques et à définir le réseau linéamentaire (plus 948 linéaments) de la zone d'étude. Les techniques de traitements utilisées (compositions colorées, rapports de bandes, analyse en composantes principales et filtres Sobel et directionnel) ont abouti à une très bonne discrimination lithologique et à une cartographie des accidents tectoniques de la zone d'étude où la direction subméridienne est remarquablement exprimée. La superposition des différents résultats de ces traitements numériques nous a permis la confection d'une nouvelle carte litho structurale de la zone d'étude

qui, comparée à la carte litho structurale de la compilation du projet PASTM et SYSMIN comme outil de référence et de vérification, nous a permis de proposer certaines mises à jours de cette dernière.

Mots-clés : *télé-détection, Bamako et ses environs, Landsat 7 ETM+, traitements numériques, linéaments, cartographie géologique.*

ABSTRACT

Structural and litho structural characterization of lineaments by different satellite image processing: Case of Bamako and its surroundings, south-west of Mali

In geological mapping the correlation, analysis and exploitation of optical imagery and in particular Landsat 7 ETM+ digital spectral data are of considerable benefit. In the study area Bamako and surroundings (south-west of Mali) where the only existing geological maps date before independence (Maps 1 / 200,000 sysmin project), this technique is a very valuable source of information and offers an excellent tool for a geological mapping more efficient in terms of quality and time saving. The study begins with a linear cartography by satellite imagery through an automatic extraction from LANDSAT ETM + images enhanced and filtered texturally and spatially. The remote sensing works, coupled with the previous field data, allowed the extraction and interpretation of the lineaments obtained by satellite images of the study area. The present study aims to evaluate the contribution of this methodology in the characterization of different litho-stratigraphic units and to define the linear network (plus 948 lineaments) of the study area. The treatment techniques used (color compositions, band ratios, principal component analysis and Sobel and directional filters) have resulted in very good lithological discrimination and mapping of tectonic accidents in the study area where the sub-meridian direction is remarkably expressed. The superposition of the different results of these digital treatments allowed us to create a new litho structural map of the study area which, compared to the litho structural map of the compilation of the PASTM project and SYSMIN as a reference and verification tool, allowed us to offer some updates of the latter

Keywords : *remote sensing, Bamako and surroundings, Landsat 7 ETM +, digital processing, linear, geological mapping.*

I - INTRODUCTION

D'après les nombreux travaux de terrains (lithologique, structurale, métamorphique, géochimique, géochronologique et géophysique), il est démontré que Bamako et ses environs fait partie intégrante des formations barrémiennes de l'unité du Mali Sud-ouest [1 - 6]. La carte géologique du SW Mali établie d'après ces études, montre une grande variété aussi bien dans sa composition lithologique que structurale. Les linéaments géologiques issus de cette carte sont constitués de linéaments liés au socle rocheux et aux accidents tectoniques. Ces derniers sont insignifiants et peu précis lorsque l'on ramène l'observateur à une échelle plus grande (1/500 000 par exemple). Le problème majeur reste donc la corrélation de ces linéaments avec les éléments structuraux comme les failles, les fractures, les axes de plis, la foliation, les contacts lithologiques et les phases de déformation. L'objectif de cet article est de donner une signification structurale par interprétation d'une carte de linéaments de Bamako et ses environs extraite par les méthodes de traitements d'image Landsat. La géologie structurale est devenue un des outils privilégiés du géologue prospecteur car elle est le seul moyen actuel économique et universel de découvrir sans construction préalable. L'apport de la télédétection dans ce domaine est de plus en plus perceptible : l'analyse structurale sur les affleurements et inventaire des discontinuités sur l'image spatiale sont parfaitement complémentaires.

Mais cette imagerie reste tributaire d'un certain nombre de paramètres, comme : l'éclairement solaire, les perturbations atmosphériques du rayonnement solaire incident et réfléchi et le couvert nuageux. De plus, il est à noter les données de télédétection optique manquent du pouvoir de pénétration nécessaire à la connaissance de certains phénomènes. A titre d'exemple, la cartographie géologique de Bamako et ses environs ne peut être réalisée à partir des seules images optiques, à cause des constructions des infrastructures masquant les structures géologiques et le paléo réseau hydrographique. Leur cartographie par cette méthode rend le structuraliste incertain sur certains linéaments et risque de passer à côté de certaines autres structures. C'est dans cette optique que s'inscrit ce travail de recherche ayant pour objectif principal faire la cartographie structurale (linéament aire) et litho structurale à travers des images satellitaires de la zone d'étude. Il peut exister plusieurs causes naturelles à l'origine d'un linéament : ligne de crêtes topographiques, contact entre formations des lithologies différentes, ligne de fracture ou de faille. Ils peuvent être identifiés visuellement par leur effet sur le paysage. Les linéaments peuvent aussi avoir des causes d'origine humaine comme les limites de cultures, les routes et autres constructions. Dans ce cas, ils ne sont pas, en principe, liés à la géologie mais ils peuvent l'être dans certains cas.

Cependant, si l'on considère l'ensemble des travaux publiés, on constate que les structures géologiques contrôlent tellement la morphologie de la surface terrestre que, dans presque tous les cas, les linéaments extraits d'une image satellitaire caractérisent ces structures à un très fort degré [8]. Les résultats de ce travail ont été vérifiés par une mission de terrain et les données bibliographiques. Compte tenu de nos résultats cartographiques, nous tenterons de ressortir la logique de répartitions des nombreuses minéralisations décrites dans la zone d'étude. L'imagerie spatiale, de par les propriétés des données qu'elle fournit, pourrait offrir une vision nouvelle de Bamako ses environs. Dans de tels environnements, les images optiques sont de plus en plus utilisées pour la cartographie géologique de surface, permettent de mettre en évidence certaines anomalies, qui passent inaperçues sur terrain et qui ne sont détectées que par des méthodes géophysiques.

II - CADRE D'ÉTUDE ET CONTEXTE GÉOLOGIQUE

La feuille de Bamako et ses environs est située dans la partie sud-ouest du Mali, entre les parallèles 14° et 12° de latitude nord et entre les méridiens 9° et 7° de longitude ouest [7]. D'un point de vue administratif, la plus grande partie de la feuille se trouve sur la région de Koulikoro, sur les cercles de Kati, Dioila, Kangaba (au Sud-ouest), Kita (au Nord-Ouest), Koulikoro au Nord et Bougouni au Sud et contient la plupart des communes urbaines de la capitale. Géographiquement, la feuille se trouve à l'extrémité Sud-Est des plateaux Manding, dans la plaine du fleuve Niger et de ses affluents. Le modèle topographique de la feuille de Bamako et ses environs met en évidence deux zones distinctes : une première zone de collines gréseuses très érodées au relief très accidenté dans la partie Nord-ouest de la feuille, qui constituent la pointe orientale des Plateaux Mandingues (dont l'altitude moyenne est de 500 m). Le reste de la feuille est une grande plaine d'altitude homogène (entre 300 et 400 m) constituée d'alluvions, de glacis et de quelques collines dans la partie Sud dont le cours est composé de multiples bras, zones humides et îles sableuses. Le réseau hydrographique est constitué de deux cours d'eau très importants.

D'une part, le Niger, qui prend sa source dans le Fouta-Djalon en République de Guinée Conakry. Il est appelé « Djoliba » dans la partie supérieure de son cours jusqu'aux alentours de Bamako où il emprunte une étroite vallée rocheuse barrée par les rapides de Sotuba. Il s'évase à nouveau après Koulikoro. Au centre sud de la feuille se trouve le Banifing qui se jette dans le Baoulé au niveau de la forêt classée de Soussan. Le Baoulé devient ensuite un affluent du Bani qui se jette lui-même dans le Niger, dans la région de Mopti. Le reste du réseau est dense et dendritique, composé de cours d'eau

essentiellement temporaires. La proximité du Niger se manifeste par un recouvrement important du socle Paléo protérozoïque par des dépôts alluviaux sableux ou limoneux et les latérites fortes nombreuses masquent également les terrains birimiens. Le socle affleure parfois très bien en dessous des falaises de sédiments post-paléo protérozoïques et de dolérites crétacé. D'un point de vue géologique, le Mali appartient au Craton Ouest africain qui est constitué en majeure partie de terrains archéens et paléo protérozoïques, d'âge supérieur ou égal à 2000 Ma, sur lesquels reposent en discordance les sédiments néo protérozoïques et Paléozoïques du bassin de Taoudéni. Le Mali est situé dans la partie Sud du Craton Ouest africain appelée dorsale de Léo (ou de Man). Dans sa partie Sud-ouest (Ouest de la Côte d'Ivoire, Libéria, Sierra Léone, Sud la Guinée) la dorsale est composée essentiellement de terrains archéens. D'après les différents travaux cartographiques soulignent que la feuille comprend principalement des sédiments et des granites avec ponctuellement des formations volcaniques de composition basique intermédiaire. La surface de la zone est dentelée de crêtes rocheuses discontinues de direction NE-SW [4, 6] très accidentée. Les aires d'affleurement rocheux (alluvions, granites à biotite, dolérites, filons de quartz, grès fins, moyens et grossiers, argilites silteuses micacées, volcano-sédiments acides, granites, et formations néo protérozoïque). La cartographie des phénomènes structuraux joue un rôle essentiel au cours des différentes phases de prospection des ressources du sous-sol.

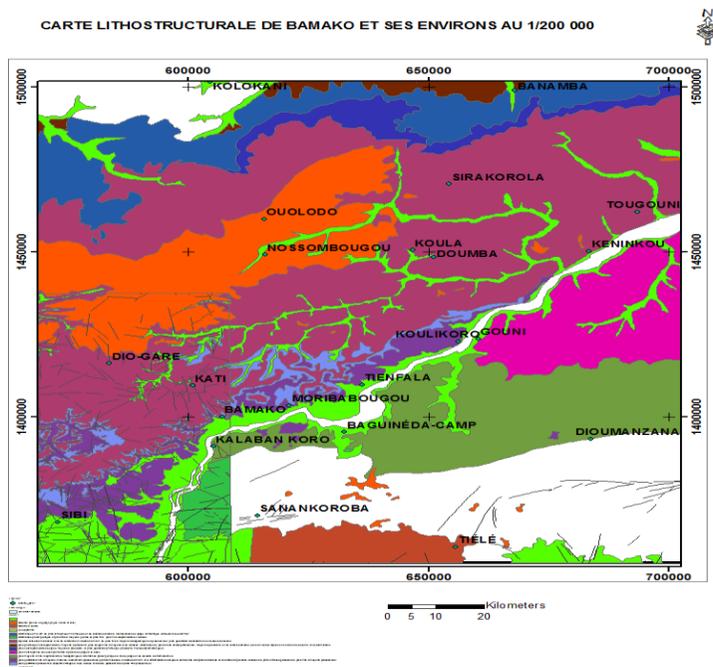


Figure 1 : *Carte litho structurale de la zone d'étude*

III - MATÉRIEL ET MÉTHODES

III-1. Matériel

La base de données cartographiques utilisée dans le cadre de cette étude comporte les cartes géologiques établies au 1/200 000 pour les localités Mali sud et Ouest (projet SYSMIN 2006 et PASTM 2004), de Bamako et ses environs. Les cartes photo géologiques établies au 1/200 000 pour ces localités ont également été utilisées. La présente étude s'appuie sur le traitement et l'interprétation d'une scène Landsat 7 ETM+ [9] 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 Bamako et ses environs, spath 199 Row 051 du 17 Mars 2018. Il s'agit des bandes ETM+1 (bleu), ETM+2 (vert) ETM+3 (rouge), ETM+4 (proche infrarouge), ETM+5 (infrarouge moyen), ETM+7(Infrarouge lointain) toutes avec des pixels carrés de 30 m et la bande ETM+6 (infrarouge thermique) des pixels de 120 m. Pour faire, nous nous sommes servis des logiciels (ENVI, Abbe Illustrator, PCI Géomtical, Sp02003, Rose.Net, et Arc gis).

III-2. Méthodologie

Les techniques de la télédétection améliorent la localisation des structures géologiques et permettent de cartographier les linéaments ainsi que les lithologies de façon raffinées et précise [10]. La localisation et l'extraction des linéaments se sont faites à partir du traitement d'image landsat ETM. Le rehaussement d'image a été effectué à l'aide de composition colorée, rapport des bandes ou bande ratios et d'analyse en composantes principales [11 - 13]. Le filtrage d'image a été fait à l'aide des filtres directionnelles 7x7 de Sobel et de filtres spatiaux 3x3 [14 - 17]. 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 linéamentaires 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 7x7 [18]. Elle a permis de déterminer des linéaments extraits comme étant des filons, panneaux, dykes et failles incluant, entre autre, tous les accidents signalés dans les travaux antérieurs (projet [4, 6]) qui ressortent de manière très claire. 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 dykes représenté dans l'image 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 (failles, dykes, et autres fractures [19, 20]). Ces procédés nous ont permis d'établir à terme une carte de synthèse de linéament de la zone d'étude. La carte ainsi obtenue, a été superposée à la carte géologique à l'aide d'un SIG (Arc gis 10.4.1) pour correction, corrélation et interprétation.

IV - CONTRÔLE ET VALIDATION

La phase de contrôle et de validation des structures géologiques extraites du traitement numérique des images ETM+ est indispensable pour juger de la pertinence de la méthode utilisée. Les structures identifiées à partir des images Landsat 7 ETM+ ont fait l'objet d'une analyse fréquentielle où les directions principales ont été comparées à celles des accidents relevés sur la carte photo géologique (projet PASTM (2004) [6] et le projet SYSMIN (2006) [4]) Les données auxiliaires issues des cartes géologiques et photo géologiques ont été comparées aux structures linéaires ou alignement morpho-structuraux (A.M.S.) extraites des images satellitaires afin de leur donner une signification structurale (projet PASTM (2004) [6] et le projet SYSMIN (2006) [4]). 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 (projet SYSMIN 2006 et PASTM 2004).

La carte détaillée des réseaux de fractures obtenue dans le cadre de cette étude n'est certes pas exhaustive mais est représentative de la fracturation de Bamako et ses environs. 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. Ces longueurs ont été intégrées à une étude statistique avec le logiciel STATISTICA 6.0. Dans le cadre de cette étude, la fracturation est considérée indépendamment de son contexte cinématique, approche abordée par les études antérieures. 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. Une mission du terrain a été faite pour la validation des structures géologiques trouvées par les traitements télé analytiques dans la zone d'étude, la majorité est visible sur le terrain, qui sont identiques à celles déclarées par le projet PASTM (2004) [6] et le projet SYSMIN (2006) [4].

V - RÉSULTATS

La cartographie des linéaments réalisée dans la zone d'étude est basée sur le traçage direct des structures linéaires et circulaires sur les diverses images filtrées. La superposition des cartes de linéaments obtenues dans les trois directions, nous a permis de réaliser la carte de synthèse des linéaments. La carte de synthèse des linéaments représente l'ensemble des segments uniques résultants de la superposition de l'information continue dans les trois images filtrées. Elle regroupe au total plus de 948 linéaments. L'analyse de la rosace de la carte de synthèse indique une dispersion des linéaments dans toutes les directions (0° à 180°), néanmoins certains groupes se dégagent. Il s'agit notamment des linéaments orientés : NNE-SSW ($N20^{\circ}$ à 30° et $N30^{\circ}$ à 40°) ; NE-SW ($N40^{\circ}$ à 50° et $N50^{\circ}$ à 60°) ; SE-NW ($N120^{\circ}$ à 130° et $N130^{\circ}$ à 140°) et SSE-NNW ($N140^{\circ}$ à 150° et $N150^{\circ}$ à 160°). Parmi ces groupes, on dénombre deux directions principales de fracturation à savoir $N40^{\circ}$ à 50° et $N130^{\circ}$ à 140° et six directions secondaires d'orientation $N20^{\circ}$ à 30° ; $N30^{\circ}$ à 40° ; $N50^{\circ}$ à 60° ; $N120^{\circ}$ à 130° ; $N140^{\circ}$ à 150° ; $N150^{\circ}$ à 160° . Le reste des linéaments peu marqués sur la rosace adopte une direction $N0^{\circ}$ à 10° ; $N10^{\circ}$ à 20° ; $N60^{\circ}$ à 70° ; $N70^{\circ}$ à 80° ; $N80^{\circ}$ à 90° ; $N90^{\circ}$ à 100° ; $N100^{\circ}$ à 110° ; $N110^{\circ}$ à 120° ; $N160^{\circ}$ à 170° et $N170^{\circ}$ à 180° .

Ces deux directions principales ($N40^{\circ}$ à 80° et $N130^{\circ}$ à 140°) correspondant aux directions des formations birrimiennes ont été aussi mises en évidence par le projet PASTM (2004) [6] et le projet SYSMIN (2006) [4] dans Bamako et ses environs. L'orientation NNE-SSW est prédominante, regroupant en elle seule 56.96 % de l'information. Les linéaments appartenant à la famille NE-SW regroupent 31.64 % des fréquences. La famille SE-NW regroupe 5.27 %. Quant aux autres directions, elles sont faiblement représentées. On note également en direction NNE-SSW de la carte, une zone à forte densité de linéaments, alors que dans les secteurs NW et SE de la carte, on note une faible représentation. La direction NNE-SSW la plus importante est la direction d'orientation de la foliation générale,

- la direction NE-SW est attribuée à la fracturation générale,
- la direction SE-NW est responsable des grands décrochements.

Les trois directions d'orientation des linéaments géologiques se retrouvent également au niveau des données d'images satellitaires. La carte géologique du SW-Mali montre une grande variété aussi bien dans sa composition lithologique que structurale. Les linéaments géologiques, issus de cette carte sont constitués de linéaments liés au socle rocheux et aux accidents tectoniques (Compilation SYSMIN, 2006[4] et PASTM 2004[6]). Ces linéaments sont repartis selon trois directions. Une carte litho structurale au 1/100 000ème est réalisée à partir de l'assemblage des différents résultats des analyses

lithologiques et structurales en vue de tester la cartographie des différentes lithologies sur ces images obtenues par traitements, estimer leur apport et valider leurs résultats. Pour faire, la méthodologie utilisée est accompagnée d'un travail parallèle bibliographique et de terrain (dans le cas Bamako et ses environs par la carte géologique du projet SYMIN 2006 [4] et PASTM 2004[6]) comme outil de référence, d'examen et de confirmation. Pour estimer le degré de concordance avec la carte géologique du projet SYMIN 2006[4] celle de PASTM [6], cette dernière a été digitalisée et incorporée dans un système d'informations géographiques (SIG) dans le logiciel Arc Gis, puis superposée à d'autres calques comportant la carte linéamentaire obtenue sous PCI Géomatica, et les différentes images issues des traitements utilisés pour dresser la carte lithologique de la zone. La nouvelle carte litho structurale obtenue est précise et apporte des mises-à-jours à la carte géologique existante. Les différents résultats voire les *Tableaux* et les *Figures* ci-dessous.

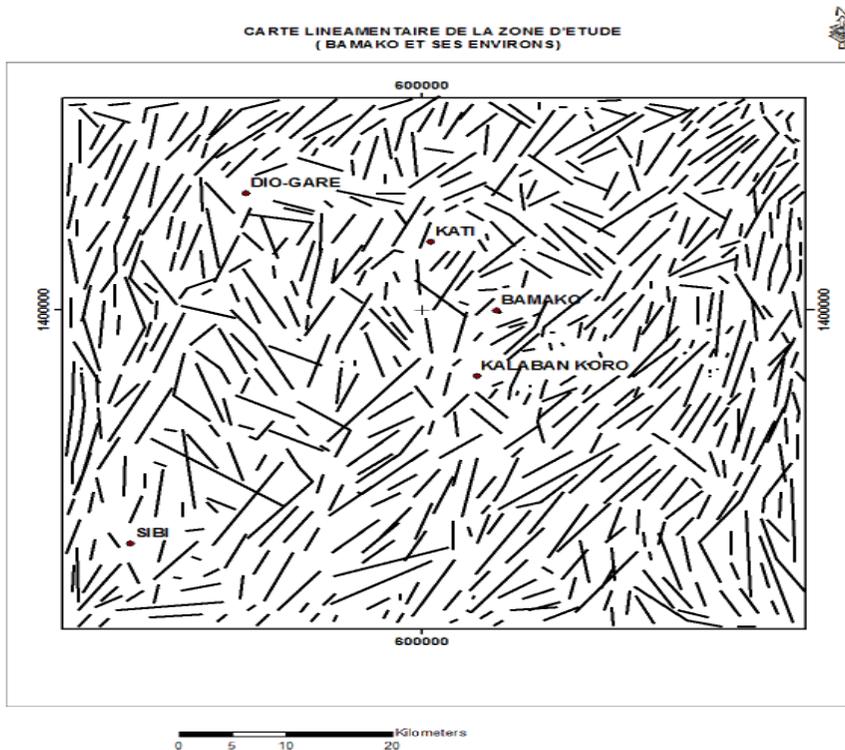


Figure 2 : Carte synthèse de linéaments de la zone d'étude

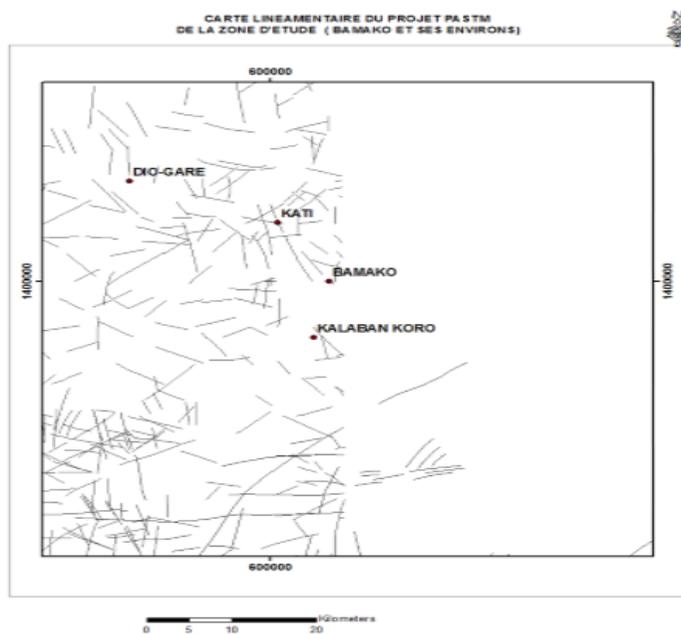


Figure 3 : Carte synthèse de linéaments du projet PASTM(2004)



Figure 4 : Carte synthèse de linéaments du projet SYMIN(2006)

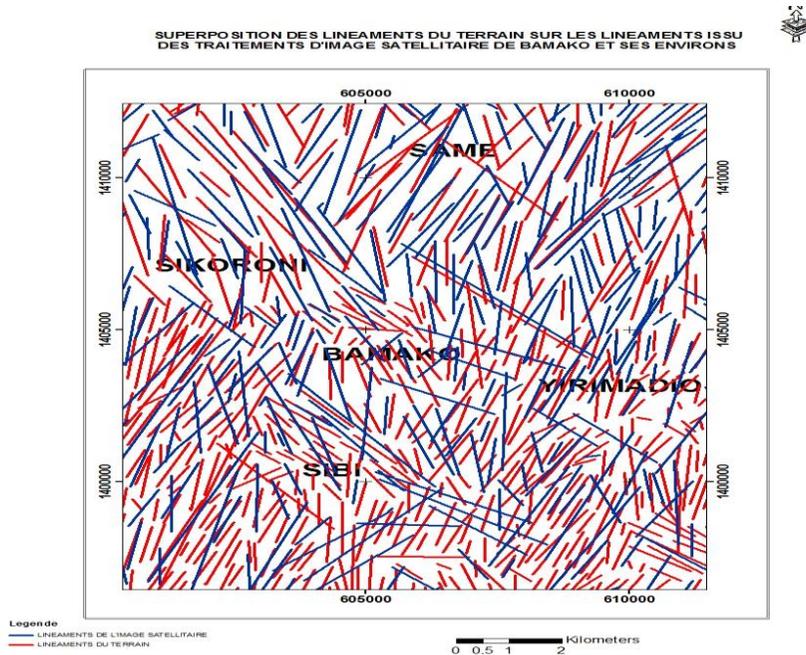


Figure 5 : *Superposition des linéaments du terrain sur les linéaments issus des traitements télé analytiques*

Tableau 1 : *Synthèse des résultats du calcul sous SPO 2003, montrant la distribution de l'orientation des linéaments de la carte linéament aire de zone d'étude*

Notation	Angle(°)	Direction	Nombre de linéaments	%
1	00 - 30	N NE – S SW	540	56.96
2	30 - 60	NE – SW	300	31.64
3	60 - 90	ENE – W SW	12	1.27
4	90 - 120	ESE – W NW	6	0.63
5	120 - 150	SE – NW	50	5.27
6	150 - 180	S SE – N NW	40	4.23
Total			948	100

Tableau 2 : Synthèse des résultats du calcul sous SPO 2003, montrant la distribution de l'orientation des linéaments de la carte linéamentaire du projet PASTM

Natation	Angle(°)	Direction	Nombre de linéaments	%
1	00 - 30	N NE – S SW	200	50.25
2	30 - 60	NE – SW	98	24.62
3	60 - 90	ENE – W SW	10	2.51
4	90 - 120	ESE – W NW	20	5.03
5	120 - 150	SE – NW	55	13.82
6	150 - 180	S SE – N NW	15	3.77
Total			398	100

Tableau 3 : Synthèse des résultats du calcul sous SPO 2003, montrant la distribution de l'orientation des linéaments de la carte linéamentaire du projet SYSMIN

Natation	Angle(°)	Direction	Nombre de linéaments	%
1	00 - 30	N NE – S SW	128	51.68
2	30 - 60	NE – SW	70	28.29
3	60 - 90	ENE – W SW	10	4.04
4	90 - 120	ESE – W NW	5	1.51
5	120 - 150	SE – NW	30	12.97
6	150 - 180	S SE – N NW	5	1.51
Total			248	100

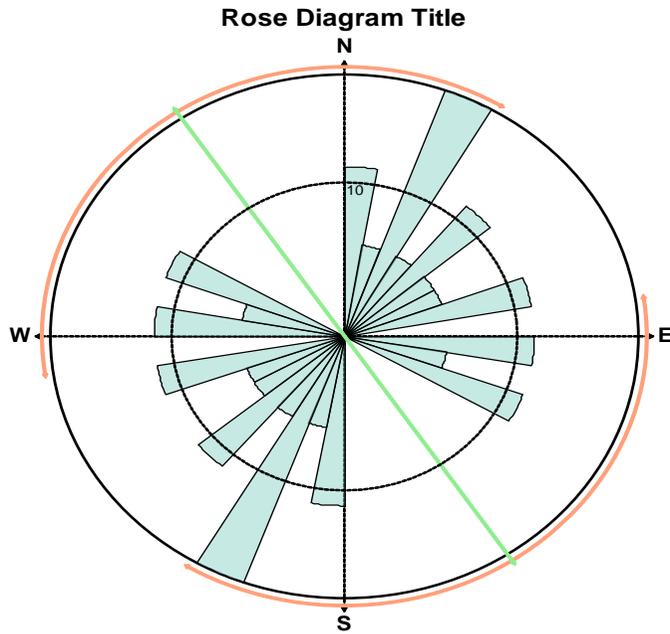


Figure 6 : *Rosace des directions des linéaments de la zone d'étude (Bamako et ses environs)*

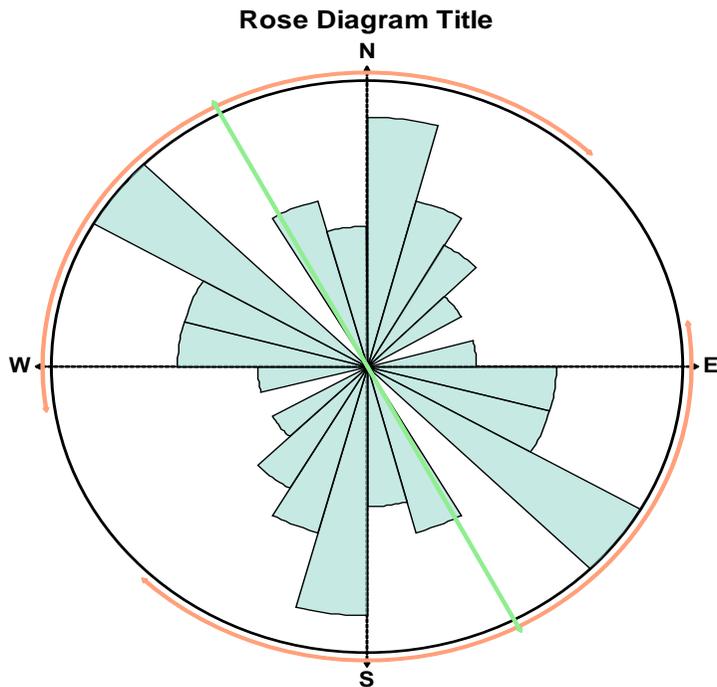


Figure 7 : *Rosace des directions des linéaments du projet PASTM*

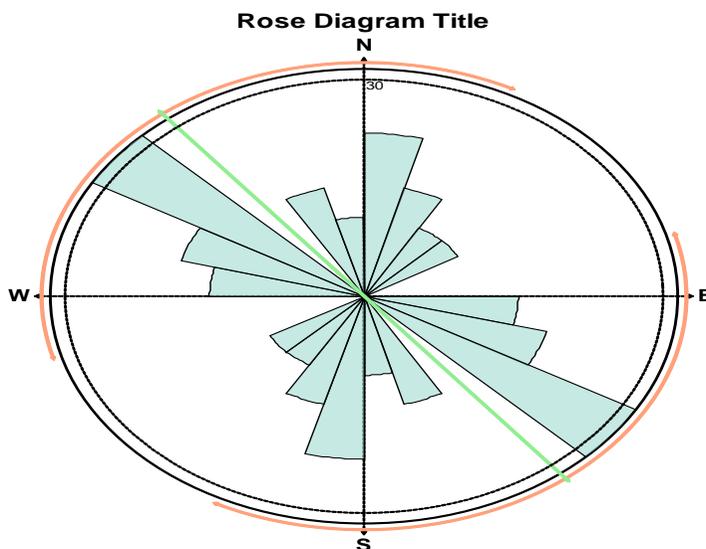


Figure 8 : Rosace des directions des linéaments du projet SYSMIN

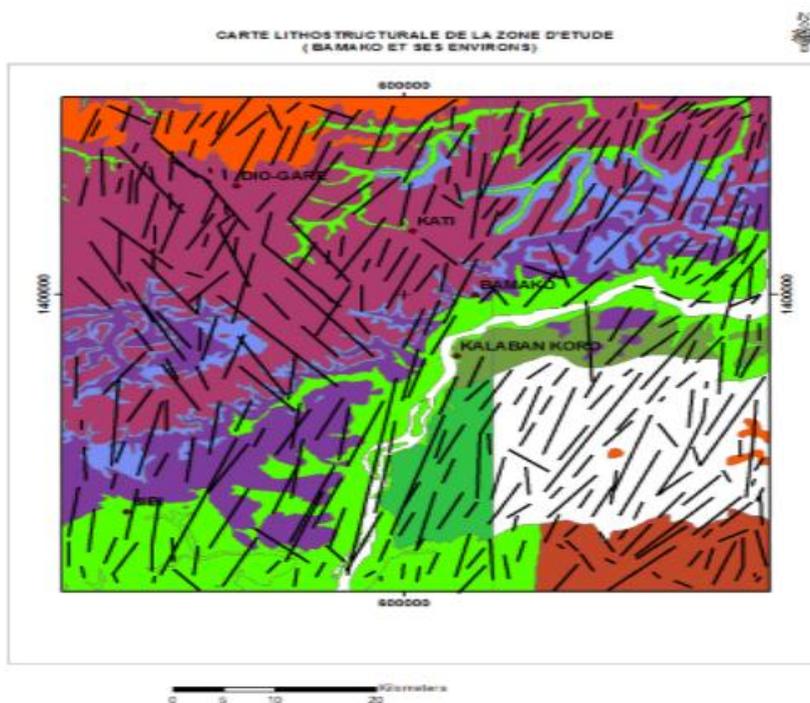


Figure 9 : Synthèse de la carte litho structurale, au 1/100 000ème, de la zone d'étude (Bamako ses environs, au Sud-ouest du Mali)

VI - DISCUSSION

La superposition des données d'images satellitaires et des données de la carte géologique permet d'identifier un certain nombre de linéaments tracés comme étant la foliation générale, failles, décrochements, pli reconnu sur le terrain. Il ressort de cette analyse que la direction préférentielle NNE – SSW représentée dans la zone entière, serait liée à la foliation générale lors de la deuxième phase de déformation et à un système de plis dissymétriques à plongement SSW qualifiés de plis d'accompagnement de la foliation (compilation du projet PASTM 2002[6] reprenant ainsi la foliation lors de la phase de déformation (compilation projet SYSMIN2006 [4], PASTM [6]. La direction SSW représente l'ensemble des structures cassantes (fracture, diaclase, filon, paraclase et autres fractures) attribuée à la phase de déformation terminale ; quant à la direction NNE – SSW, elle correspondrait à un système de grands décrochements transversaux (faille et cisaillement). Ces linéaments issus de l'image satellitaire sont souvent parfaitement superposés ou légèrement décalés par rapport aux éléments structuraux du terrain ou encore sont dans le prolongement de ces derniers. Etant donnée la précision de l'image satellitaire (inférieur à 60 m, de l'ordre de deux pixels), ce décalage entre les linéaments satellitaires et géologiques peut s'expliquer d'une part, par le géocodage [21] et le rééchantillonnage qui introduisent de l'imprécision dans l'image traitée [22].

D'autre part, les cartes géologiques de compilation introduisent de l'imprécision par l'interprétation des contacts, les changements d'échelle (et parfois de changement de projection) et la largeur des lignes. L'observation de la carte de linéaments géologiques, permet de constater également une tendance NNE – SSW dans l'orientation des structures souples (foliation, plis). Au NE et SW de la carte, on a plutôt une tendance les formations alluvionnaires dominées par les fractures, failles, décrochement et cisaillement. Cette constatation confirmerait la répartition des éléments structuraux selon deux secteurs tectoniques d'apparence morphologique différente : l'axe NNE –SW représentant l'étirement de la chaîne dominé par les structures souples et l'axe NE-SW représentant la compression dominé par les structures fragiles. Il faut noter que l'orientation préférentielle NNE – SSW remarquée par l'image satellitaire (57 %) s'avère être également celle des linéaments liés au socle rocheux [23]. De ces analyses, il ressort que nous pouvons associer une bonne partie de nos observations à des structures déjà existantes avec une plus grande précision.

VII - CONCLUSION

Le but de ce travail était d'apporter une compréhension structurale de Bamako et ses environs à travers l'étude des linéaments obtenus par traitement d'images satellitaires. L'approche méthodologique simple basée sur l'utilisation d'image corrigée géométriquement, le rehaussement d'image et le filtrage directionnel a permis l'élaboration d'une carte de linéaments précise et raffinée de la zone d'étude. L'analyse statistique des linéaments à l'aide des rosaces directionnelles a démontré une répartition particulière de l'orientation de ces derniers selon la direction préférentielle NNE – SSW avec 57 % de fréquence. La confrontation de ces résultats avec les données géologiques à partir d'un SIG a permis de faire un lien géologique entre les différents éléments et faciliter leur interprét

RÉFÉRENCES

- [1] - B. BESSOLES “Géologie de l’Afrique, le craton ouest africain”, thèse, N°88 (1977)
- [2] - “Notice Explicative de la carte géologique au 1/200 000 BAMAKO EST ET OUEST Feuille n° ND-29-V /ND-29-VI Edition”Géoter (2004)
- [3] - J. PENAYE, S. F.TOTEU, R. TCHAMENI, W. R.VANSCHMUS,., “J. Tchakounté, A. Ganwa, D. Minyem, E. N. Nsifa. The 2.1Ga West Central African Belt in Cameroon: extension and evolution. Journal of African Earth Sciences”(2004) 159 - 164
- [4] - Notice Explicative de la carte géologique au 1/200 000 BAMAKO EST ET OUEST Feuille n° ND-29-V /ND-29-VI” Edition projet Sysmin (2006) 13
- [5] - J. GUILLET. “La télédétection et ses applications pédagogiques ”Bulletin de l’EPIN n°61 (2004)
- [6] - “Notice Explicative de la carte géologique au 1/200 000 BAMAKO EST ET OUEST Feuille n° ND-29-V /ND-29-VI”, Edition projet PASTM, (2004)
- [7] - “Couverture Photographique du MALI, Situation au 31 Décembre”(1977)
- [8] - SCANVIC, “Evolution structurale de la province triasique (Algérie)”. - Doct. Univ. Paris VI, (1987)
- [9] - JANUARY, “Apport de la télédétection à la cartographie de l'évolution spatio-temporelle de la dynamique de l'occupation du sol dans la région des Lacs (Centre de la Côte d'Ivoire)”, thèse (2014)
- [10] - JULIE .BET. BEDER, “Fracturation des roches dures et la prospection hydrogéologique” thèse (1986)
- [11] - STEPHANE. FAURE, “Identification des linéaments géophysique et leurs relations avec la minéralisation, Exploration ”Québec (2009)
- [12] - GIRBERT, “la chaine- structure géologique et linéaments, apport de la télédétection”, Beauce (Québec) (1999)

- [13] - IMESSAOUDENE. NARIMENE, “Utilisation de la télédétection pour la cartographie géologique du Massif des Eglab et de sa bordure sédimentaire (Sud-ouest algérien) ”, Mémoire de fin d’étude (2012)
- [14] - C. LACINA, “ interprétation structurale des linéaments par traitement d’images”, thèse(1996)
- [15] - ISMAIL. BENSAFI et RACHIDSDHOUM, “Apport de la télédétection pour exploration géologique zones arides” Memoire de fin d’étude, (2012)
- [16] - LAGHOUG MOHAMED. YACINE, “Apport de la télédétection (images LandsAT 7 ETM+) pour la cartographie géologique de la région d’Aflou (Atlas saharien) ”, Mémoire de fin d’étude (2011)
- [17] - HAMMAD .NABILA, “ cartographie géologique et analyse linéamentaire de larégion d’Elkseibatà partir des images satellitaires spatiale incidence sur exploration minière”, Algérie, (2016)
- [18] - JEROME DUBOIS, “ Mémoire, Identification des linéaments dans l’image satellitaire par Ajustement et suivi de segment”(1999)
- [19] - NAOMEN, “Automatic extraction of linéaments from landsatETM+ Image and their structural interprétation”, article (2016)
- [20] - ZANAH SERVADIO, “Apport de l’imagerie à haute résolution spectrale, spatiale dans les bilans le volume et bilans rédiatifs”, Québec (2013)
- [21] - MOSLEM OULED SGHAIER, “ Extraction des structures linéaires à partir des images satellitaires à très haute résolution pour l’aide à la gestion des catastrophes majeures”, École de technologie supérieure Université du QUÉBEC, Thèse (2017)
- [22] - G. ROUSSEL, “Développement et évaluation de nouvelles méthodes de classification spatiale-spectrale d’images hyper spectrales”, Thèse, (2012)
- [23] - LAMZOURI. Hala, “ Extraction des linéaments géologique à partir des images Landsat : Cas de la plaine de Tamlilt (Haute Atlas Oriental)”, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Mémoire de fin d’étude (2014)