

Analyse des images satellitales radar RSO-ERS et optique ETM+ de Landsat 7 comme outils de prospection minière : application aux localités de Tiébissou et de Tienko en Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest)

Barthélémy Gnammytchet KOFFI^{1*}, Gbélé OUATTARA¹, Fernand Koffi KOUAME²
et Jean-Paul DEROIN³

¹ Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro - Laboratoire de Génie Civil, Géosciences et Sciences Géographiques/ Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi) BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

² Centre Universitaire de Recherche Appliquée en Télédétection (CURAT) - Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, Côte d'Ivoire

³ Université de Bordeaux 3 - Laboratoire de Matériaux et de Géologie de l'Ingénieur, France

* Correspondance, courriel : kofgnam@yahoo.fr

Résumé

L'approche géologique par l'imagerie satellitale ETM+ de LANDSAT 7 et RSO d'ERS, à haute résolution, donne des résultats nouveaux qui améliorent les cartes géologiques préexistantes. Ainsi, dans la localité de Tiébissou (Centre de la Côte d'Ivoire), le contour du granite de Grogro intrusif est précisé comme celui du granite à biotite. Au sein de l'unité métavolcano-sédimentaire, des aires granitiques sont signalées. Quatre principales familles de fractures sont détectées. Il s'agit, des zones de fractures de Molonou, de Komorossou et d'Ando Zumé de direction NO-SE (N130° à N150°) ; des fractures de Sakiaré, de Propronou et de Bofia de direction E-O (N080° à N100°) ; des fractures de Grogro, de Niamienkro, d'Akrétia et de Tiébissou de direction NS à NNE-SSO (N170° à N020°) et enfin des zones de fractures de Ngangro et de Suibonou de direction NE-SO (N040° à N060°). Certaines de ces zones de fractures ont pu être identifiées sur le terrain.

Ce sont par exemple, les zones de fractures de Propronou et de Bofia de direction E-O ; des zones de fractures de Molonou d'orientation NE-SO. Trois directions majeures des filons de quartz apparaissent (N090° à N110°, N060° et N140°). Dans la localité de Tienko, située dans l'extrême Nord de la Côte d'Ivoire, aux confins de la Côte d'Ivoire et du Mali, la forme de la granodiorite de Kimbirila est précisée pour la première fois. Elle a un caractère intrusif car le massif a une forme \pm arrondie en carte. Le tracé des zones de failles connues comme celles du Sassandra et du Banifing est précisé. La zone de failles de Konéla, cartographiée également pour la première fois, de direction NO-SE se surimpose à des anomalies géochimiques aurifères mises en évidence par une compagnie minière de la place. Ces exemples montrent que l'analyse des images satellitales est un outil, au même titre que par exemple, la géophysique de prospection minière. Les spatio-cartes géologiques obtenues peuvent permettre de mieux planifier les travaux miniers sur le terrain.

Mots-clés : *images satellitales, Radar RSO-ERS, ETM+ - LANDSAT 7, prospection minière, Tiébissou, Tienko, Côte d'Ivoire, Afrique de l'Ouest.*

Abstract**Image Analysis satellite ERS-SAR radar and optical Landsat 7 ETM+ as a tool for mineral exploration: Application to localities Tiébissou and Tienko in Côte d'Ivoire (West Africa)**

The geological approach with remote sensing imagery from Landsat 7 ETM+ and high resolution SAR-ERS, provides new results that enhance existing geological maps. Thus, in the locality of Tiébissou (Centre of Côte d'Ivoire), the outline of the Grogro intrusive granite is specified as the biotite-rich granite. Within the metavolcano-sedimentary unit, granitic formations reported. Four main families of fractures are described: faults zones of Molonou, Komorossou and Ando Zume with NW- SE (N130° to N150°) directions; faults of Sakiaré, Propronou and Bofia with E-W (N080° to N100°) directions; faults of Grogro, Niamienkro, Akrétia and Tiébissou with N-S to NNE-SSW (N170° to N020°) directions and finally the faults zones of Ngangro and Suibonou with NE-SW directions (N040° to N060°).

Some of these faults zones were identified in the field. These are, for example, faults zones of Propronou and Bofia with E-W direction; faults zones of Molonou NE-SW. Three major directions of quartz veins appear (N090° to N110°, N060° and N140°). In the Tienko area, located in the extreme north of Côte d'Ivoire, on the borders of Côte d'Ivoire and Mali, the shape of the Kimbirila granodiorite is specified for the first time. It is a rounded massive intrusive rock. The layout of the fault zones known as those of Sassandra and Banifing are specified.

The fault zone Konela, also mapped for the first time, with NW-SE direction is superimposed on the geochemical anomalies of gold highlighted by a mining company.

These examples show that the analysis of remote sensing imagery is a tool, as well as, geophysical mineral exploration. Spatial geological maps obtained can be used to better plan the mining research or works on the ground.

Keywords : *remote sensing imagery, SAR-ERS, ETM+ of LANDSAT 7, Mining exploration, Tiébissou, Tienko, Côte d'Ivoire, West Africa.*

1. Introduction

De nombreuses compagnies de recherche minière ont acquis des permis sur la Dorsale de Man (Craton Ouest Africain) et plus précisément en Côte d'Ivoire. Celles-ci pour une meilleure conduite des travaux sur le terrain, ont besoin de données cartographiques de bonne qualité. En Côte d'Ivoire, des cartes géologiques existent, mais elles sont souvent anciennes et incomplètes (par exemple, [1, 2]). Des cartes géologiques plus détaillées au 1/200 000 ont été récemment établies (par exemple, [3, 4]). Des cartes à plus grande échelle au 1/100 000 ont aussi dressées, dans le cadre du projet de coopération géologique ivoiro-allemande [5, 6]. Ces nouvelles cartes géologiques sont pour la plupart encore provisoires. En plus, tout le territoire n'est pas encore couvert.

Sous ces latitudes, compte tenu de la rareté des affleurements et de la couverture latéritique qui cache le substratum géologique, la cartographie géologique sur le terrain est assez difficile. Les images satellitales, grâce à leur vision synthétique et synoptique peuvent permettre d'extraire les zones de fractures potentiellement porteuses de minéralisation. Ce travail a pour objectif de montrer, à partir des deux exemples concrets choisis, d'une part, dans le Centre et, d'autre part, dans le Nord de la Côte d'Ivoire, que l'analyse des images spatiales est un outil de prospection minière. En effet, elles peuvent permettre la mise

à jour rapide et à moindre coût des cartes géologiques régionales. Les spatio-cartes sont donc de ce fait des documents de base essentiels pour une meilleure planification des travaux de prospection sur le terrain.

2. Sites d'étude

2-1. Localité de Tiébissou

2-1-1. Localisation

La zone d'étude est localisée à l'ouest de la ville de Tiébissou (*Figure 1*) [7]. Sur le plan administratif, elle a dans sa partie Sud des populations Ahitou rattachées à Tiébissou et dans sa partie Nord des populations Fahouafoué rattachées au département de Sakassou. La zone d'étude est située approximativement entre les longitudes: 5° 08'W à 5° 30' et latitudes: 7° 00'N à 7° 20'.

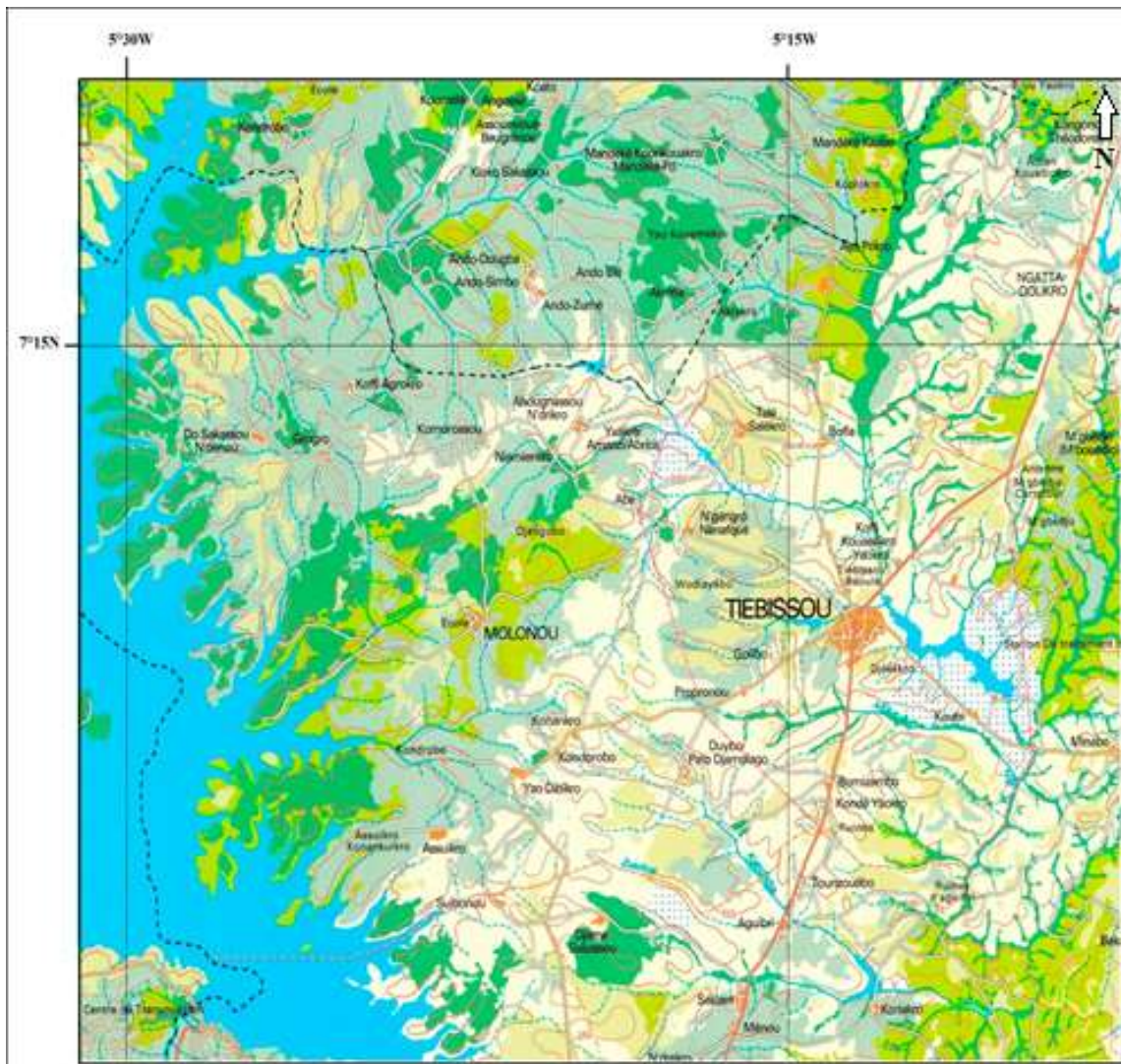
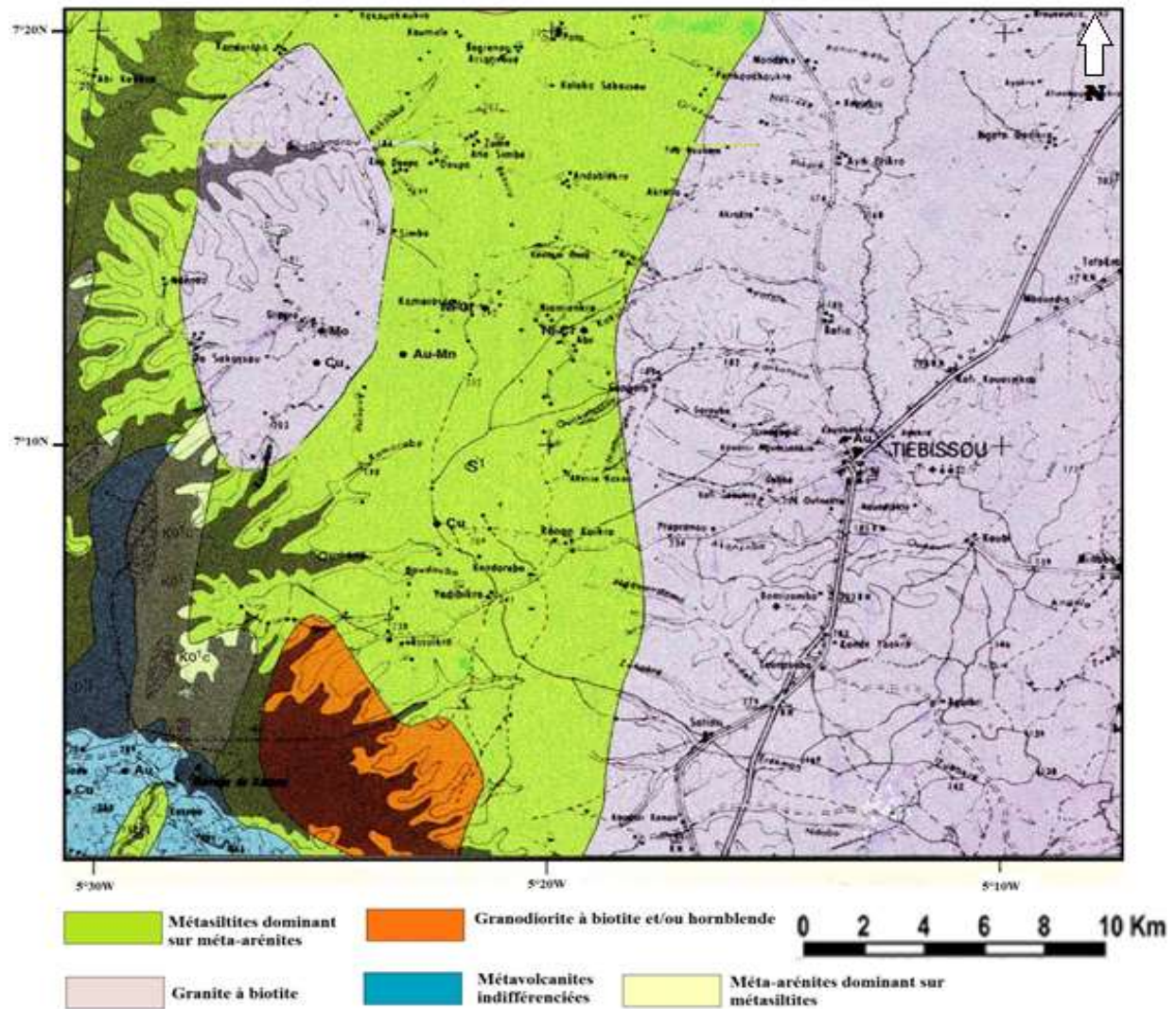


Figure 1: Localisation de la zone d'étude de Tiébissou [7]

2-1-2. Contexte géomorphologique et géologique

Le site d'étude de Tiébissou se trouve dans le Centre de la Côte d'Ivoire. Son relief est plat. Il est constitué d'une succession monotone de vallées et de collines typiques des régions à socle précambrien d'Afrique de l'Ouest. La végétation est faite de forêts et de savanes arbustives. L'altération météorique a développé une épaisse couche latéritique et sableuse qui recouvre le substratum géologique. Selon la carte géologique (Figure 2) [8], la zone est faite de méta-siltites dominant sur méta-arénites, de granites à biotite, de méta-volcanites indifférenciées et de granodiorite à biotite et/ou hornblende.



2-2. Localité de Tienko

2-2-2. Localisation

La région d'étude dénommée « localité de Tienko » se situe dans la région de la ville de Tienko, dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire (Figure 3) [9]. Approximativement, elle se situe entre les latitudes 7°20' et 7°45' Nord et les longitudes 10°10' et 10°30' Ouest.

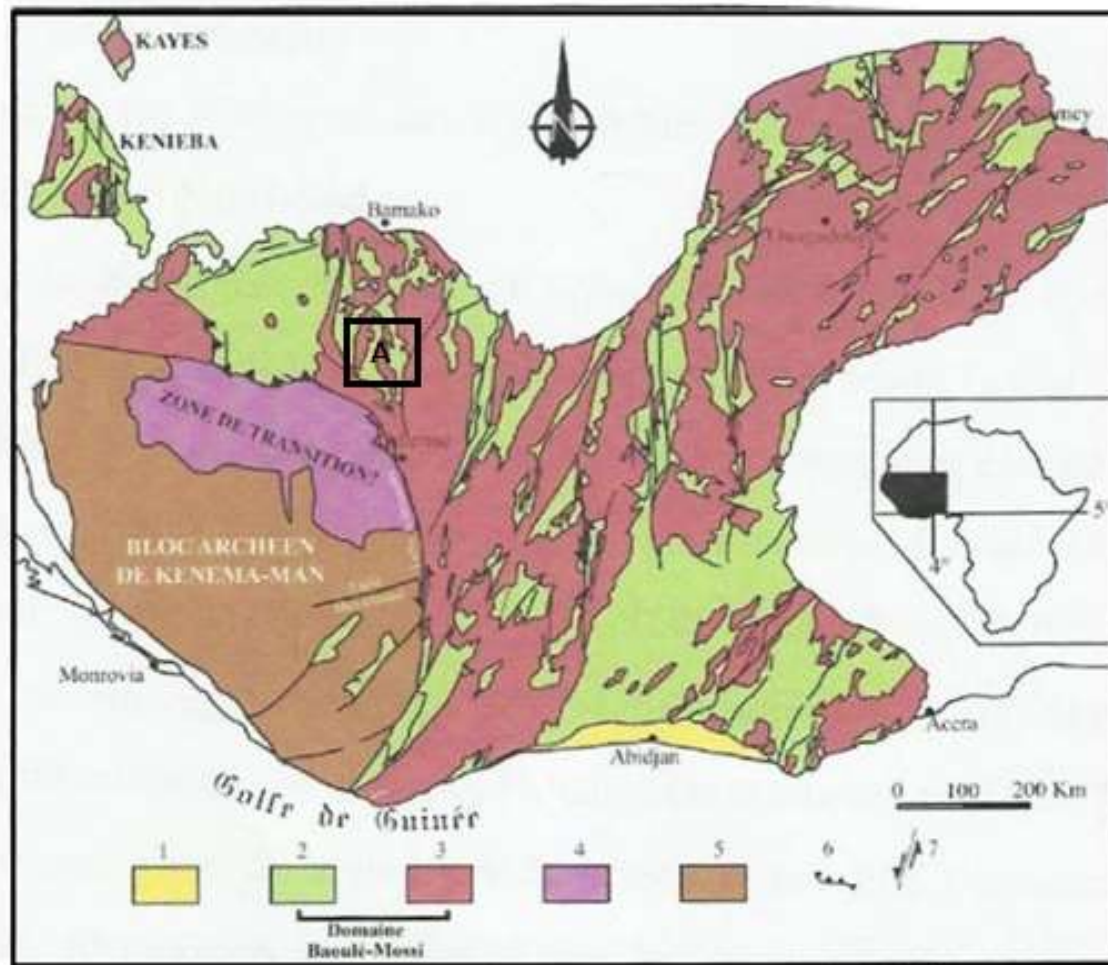


Figure 3: Carte géologique simplifiée de la dorsale de Man (d'après Feybesse et Milési, [9]). A. Région de Tienko (région d'étude).

1: bassin sédimentaire côtier; 2: zone de transition entre l'archéen et le paléoprotérozoïque; 3: granitoïdes; 4: bassins sédimentaires à volcano-sédimentaires d'âge birimien; 5: domaine archéen; 6: chevauchement; 7: couloirs de déformation ductile. bS : bassin de Siguiri; bY : bassin de Yanfolila-Kalana; bB: bassin du Ba-Oulé; bBo: bassin de Boundiali; bKM: bassin de Katiola-Marabadiassa; bC: bassin de la Comoé.

2-2-2. Contexte géomorphologique

Le site d'étude de Tienko appartient au domaine Baoulé-Mossi (Paléoprotérozoïque) et subit un climat tropical de type soudanien, à deux saisons contrastées : des pluies de juin à septembre et une saison sèche d'octobre à mai. La température moyenne annuelle est de 28°C. La région est drainée par deux importants cours d'eau qui sont le Ba-Oulé et le Deguini.

Cet environnement sub-tropical sur socle précambrien a développé une pénéplaine à moins de 300 m d'altitude avec des inselbergs granitiques montant à 950 m. Le substratum géologique presque entièrement recouvert par une épaisse couche latéritique comprend principalement des granitoïdes et des formations volcano-sédimentaires.

3. Matériel et méthodes

3-1. Matériel

Pour ce travail, nous avons utilisé un certain nombre de matériel ; à savoir :

- des cartes topographiques [7, 10];
- des cartes géologiques et photo-géologiques [8, 11, 12,13];
- des images satellitales optiques ETM+ de satellite LANDSAT 7 et une image du Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) du satellite « European Remote Sensing » (ERS) acquise en orbite ascendante (orbite 4619 ; frame 3393 ; date : 03-06-1992) ;
- des logiciels tels que, ENVI 4.5, Photo plus, Map-info et Adobe Illustrator® 10 pour le traitement des images et l'infographie;
- d'outils de travail d'un géologue de terrain (Boussole, G.P.S. marteau, appareil photographique, de marqueurs indélébiles, de sacs d'échantillonnage, etc.);
- et des données pétrographiques et structurales recueillies sur le terrain.

3-2. Méthodes

Les images satellitales ont subi deux (2) phases d'analyse. D'abord, une analyse numérique (traitements) et ensuite une analyse analogique (photo-interprétation).

3-2-1. Traitement des images spatiales

3-2-2-1. Image optique ETM+ de LANDSAT 7

La cartographie des zones de fractures a été rendue possible grâce aux différents traitements appliqués aux images corrigées ETM+ de Landsat 7. Les méthodes utilisées pour le traitement de l'image comprennent les techniques d'amélioration du contraste des images (étalement linéaire de l'histogramme et le filtre Gaussien), les compositions colorées et les techniques de filtrage spatial (les filtres Gradient et de Sobel).

L'organigramme de la *Figure 4* résume les grandes lignes de toutes ces opérations.

Amélioration du contraste de l'image

Pour l'amélioration du contraste de l'image, deux méthodes ont été utilisées. Ce sont le l'étalement dynamique de l'histogramme (Stretching) et le filtre Gaussien.

- le stretching

Cette opération permet d'augmenter le contraste des données afin d'obtenir une meilleure visualisation de l'image. Ce traitement permet l'étirement des contrastes pour augmenter la distribution des tons entre les éléments d'une image, en pâlisant davantage les régions claires et en assombrissant davantage les régions plus foncées.

- Le filtre Gaussien

Il permet d'augmenter le contraste de l'image grâce à une fonction de convolution gaussienne de taille spécifiée. Nous avons utilisé dans notre cas le filtre passe haut et une matrice de type 7*7 (*Tableau 1*).

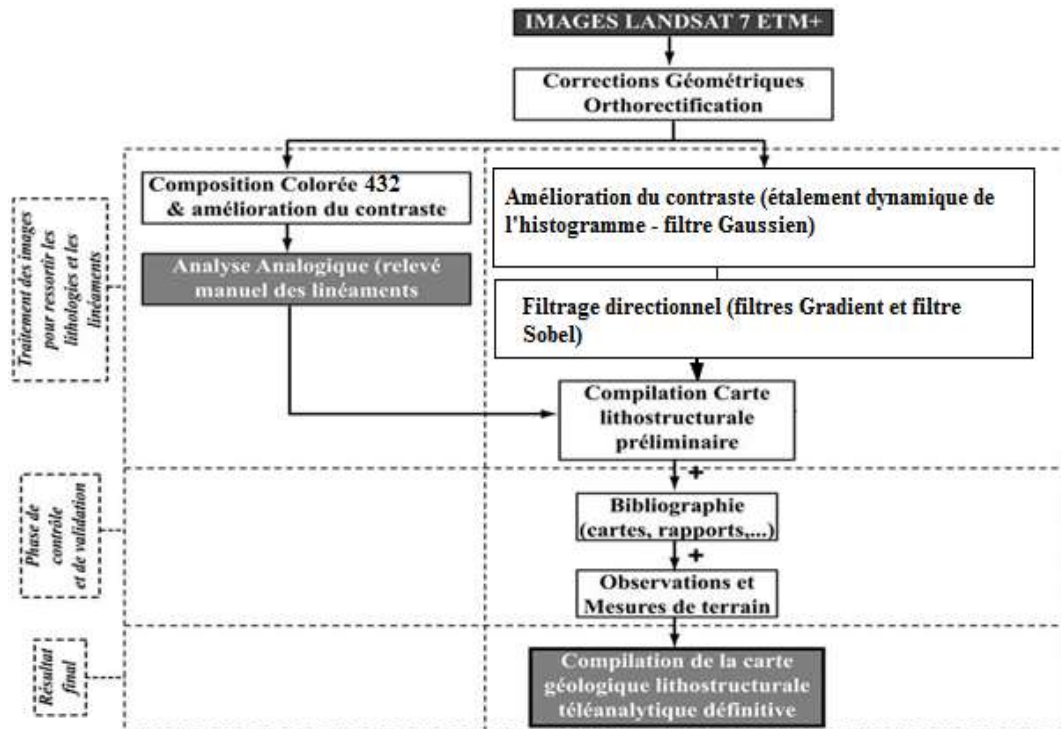


Figure 4 : Chaîne de traitement d'une scène satellitale Landsat 7 ETM+

Tableau 1 : Matrice du filtre Gaussien

-0.0000	-0.0000	-0.0003	-0.0006	-0.0003	-0.0000	-0.0000
-0.0000	-0.0011	-0.0079	-0.0153	-0.0079	-0.0011	-0.0000
-0.0003	-0.0079	-0.0563	-0.1082	-0.0563	-0.0079	-0.0003
-0.0006	-0.0153	-0.1082	0.7921	-0.1082	-0.0153	-0.0006
-0.0003	-0.0079	-0.0563	-0.1082	-0.0563	-0.0079	-0.0003
-0.0000	-0.0011	-0.0079	-0.0153	-0.0079	-0.0011	-0.0000
-0.0000	-0.0000	-0.0003	-0.0006	-0.0003	-0.0000	-0.0000

Compositions colorées

Après l'amélioration du contraste des images brutes, une composition colorée couleur infra rouge a été réalisée avec les bandes 4 (infrarouge), 3 (rouge) et 2 (vert). Ces bandes, ont été affectées respectivement au rouge, au vert et au bleu (RVB).

Les techniques de filtrage spatial

Les filtres directionnels Gradient (de types 7×7) (*tableau 2*) et de Sobel ont été utilisés pour mieux les discriminer et cartographier l'essentiel des linéaments de la région d'étude. Le filtre Gradient permet d'accroître les caractéristiques de l'image dans une direction donnée en introduisant un effet de relief plus ou moins accentué selon son type. Les zones uniformes de l'image sont ramenées à la valeur zéro alors que

les zones hétérogènes présentent des contours clairs. Le filtre directionnel de Sobel est conçu de façon à faire ressortir ou masquer des caractéristiques spécifiques d'une image en se basant sur leur fréquence liée à la texture. Le filtre directionnel de Sobel accentue les discontinuités lithologiques et structurales dans les quatre directions N-S (00°); NE-SO (45°); NO-SE (140°); E-O (90°).

Tableau 2 : Matrice des filtres Gradient

-1.0000	-1.0000	-1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000
-1.0000	-1.0000	-1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000
-1.0000	-1.0000	-1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000
-1.0000	-1.0000	-1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
-1.0000	-1.0000	-1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
-1.0000	-1.0000	-1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
-1.0000	-1.0000	-1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Filtre Gradient 00°							Filtre Gradient 90°						
-1.4142	-1.4142	-1.4142	-0.7071	0.0000	0.0000	0.0000	0.1233	0.1233	0.1233	-0.6428	-1.4088	-1.4088	-1.4088
-1.4142	-1.4142	-1.4142	-0.7071	0.0000	0.0000	0.0000	0.1233	0.1233	0.1233	-0.6428	-1.4088	-1.4088	-1.4088
-1.4142	-1.4142	-1.4142	-0.7071	0.0000	0.0000	0.0000	0.1233	0.1233	0.1233	-0.6428	-1.4088	-1.4088	-1.4088
-0.7071	-0.7071	-0.7071	0.0000	0.7071	0.7071	0.7071	0.7660	0.7660	0.7660	0.0000	-0.7660	-0.7660	-0.7660
0.0000	0.0000	0.0000	0.7071	1.4142	1.4142	1.4142	1.4088	1.4088	1.4088	0.6428	-0.1233	-0.1233	-0.1233
0.0000	0.0000	0.0000	0.7071	1.4142	1.4142	1.4142	1.4088	1.4088	1.4088	0.6428	-0.1233	-0.1233	-0.1233
0.0000	0.0000	0.0000	0.7071	1.4142	1.4142	1.4142	1.4088	1.4088	1.4088	0.6428	-0.1233	-0.1233	-0.1233
Filtre Gradient 45°							Filtre Gradient 140°						

3-2-2.2. Image radar RSO - ERS

A cause de la visée radar oblique et de l'acquisition séquentielle des lignes des images RSO de ERS, celles-ci sont acquises retournées, et par conséquent non superposables automatiquement à une carte. Elles ont donc été inversées par effet «miroir» avant toute comparaison avec d'autres données cartographiques. L'image RSO de ERS acquise en orbite descendante a subi un retournement Est-Ouest. Aussi, afin de la rendre exploitable pour l'analyse thématique, elle a subi divers autres types d'opérations de prétraitements et traitements. Elle a été géoreférencée à l'aide des cartes topographiques disponibles et des points de contrôle GPS pris sur le terrain puis, un traitement multi-vues pour éliminer le scintillement, dû à l'addition de manière cohérente des ondes réfléchies dans un même pixel. Ensuite, elle a subi un étalement linéaire de l'histogramme pour améliorer la lisibilité des images. Elle a été produite en négatif, par simple inversion des teintes de gris. L'intérêt majeur des images en négatif est de donner une vision plus naturelle du paysage en simulant des ombres pour les flancs raccourcis face au radar et des teintes plus claires pour les versants dos au radar. Enfin, les techniques de filtrage spatial ont été appliquées également sur les images radar. Il s'agit des filtres directionnels de Sobel et Gradient (de types 7×7) qui ont permis de mieux discriminer les zones de fractures.

3-2.2. Photo-interprétation

Le signal radar est sensible à la pente topographique, à la rugosité et à l'humidité du sol. Ces facteurs s'expriment sur les images par des variations de texture, de forme et de niveaux de gris. Il exprime donc mieux les linéarités et les structures circulaires. Le radar est insensible à la couverture nuageuse et pénètre

partiellement la végétation. Il est très sensible aux faibles variations de pente. La méthode de travail utilisée est l'interprétation visuelle des images en noir et blanc (RSO/ERS) et/ou en composition colorée (ETM+ de Landsat 7) sur tirage papier.

Pour les zones complexes, l'observation des images sur station de travail a permis de procéder rapidement à des améliorations de contraste et à des changements d'échelle. L'analyse s'est faite d'abord à petite échelle pour apprécier l'aspect des objets d'ampleur régionale. Ensuite, le zoom sur des portions d'une image à plus grande échelle a permis d'observer les détails.. Les données pétrographique et structurale recueillies sur le terrain ont permis de valider les résultats de la photo-interprétation.

3-3. Méthodes

La démarche méthodologique globale adoptée pour ce travail est la suivante (*Figure 4*):

- acquisition de l'image brute et extraction de la zone d'étude;
- première phase d'opérations de traitements des images;
- première phase d'analyse des images (Analyse analogique);
- première campagne d'étude sur le terrain;
- deuxième phase d'opérations de prétraitements et de traitements des images;
- seconde phase d'analyse des images (Analyse numérique);
- deuxième campagne de terrain;
- confection de la spatio-carte structurale finale.

4. Résultats et discussion

4-1. Localité de Tiébissou

4-1-1. Cartographie lithologique

L'imagerie optique ETM+ de LANDSAT 7 (*Figure 5a*), grâce aux critères de couleur, forme et de texture, a permis d'apporter des modifications notables à la carte géologique de la région. Ainsi, le contour du granite de Grogro intrusif est précisé comme celui du vaste domaine granitique à biotite de Tiébissou. Au sein de l'unité volcano-méta-sédimentaire des aires granitoïdes sont signalées (*Figure 5b*). Sur le terrain, la rareté des affleurements causé par l'importante météorisation et aussi par la densité du couvert végétal, ont rendu assez difficile la discrimination des différents faciès pétrographiques. Cependant, l'examen minutieux de la nature du sol et aussi du type de végétation, a aidé à tracer les contours des grandes unités pétrographiques. Les unités granitiques sont couvertes par un sol sableux et par un couvert végétal de type savane arbustive. L'unité métavolcano-sédimentaire est couverte par un sol latéritique et par un couvert végétal de type forêt dense ± dégradée, avec beaucoup d'espèces végétales d'épineux. Quelques rares affleurements des volantes ont pu être observés.

Des affleurements du granite de Grogro intrusif ont été observés sur trois (3) sites. [120: (N7°10'07", W5°26'25"); 121: (N7°10'42", W5°26'15"); 123: (N7°13'27", W5°27'16") (*Figures 6, 7 et 8A*)]. Le massif montre deux (2) faciès: un premier faciès à texture grenue grossière porphyroïde (porphyritique) et un second faciès à texture grenue moyenne porphyroïde. Il s'agit du faciès de bordure (*Figure 8A*, site 123). Le massif contient en enclaves des méta-sédiments et des roches magmatiques basiques et ultrabasiques localement orientées NS (site 120, *Figure 6A*). En ce qui concerne l'unité volcano-méta-sédimentaire, des volantes et des affleurements assez altérés ont été observés. Aux sites [107 : (N7°07'26", W5°19'15"); 112

: (N7°11'17", W5°17'22"); 126 : (N7°12'48", W5°23'44"), des affleurements altérés de méta-sédiments schisteux sont observables. Ceux-ci sont marqués par une schistosité de direction N040° (Figure 8B). Des volantes de roches sub-volcaniques (basaltes, andésites séritisées), de grauwakes et d'oxydes de manganèse ont été observées au site [108 : (N7°08'17", W5°21'24")] sur le tronçon Konankro—Molonou.

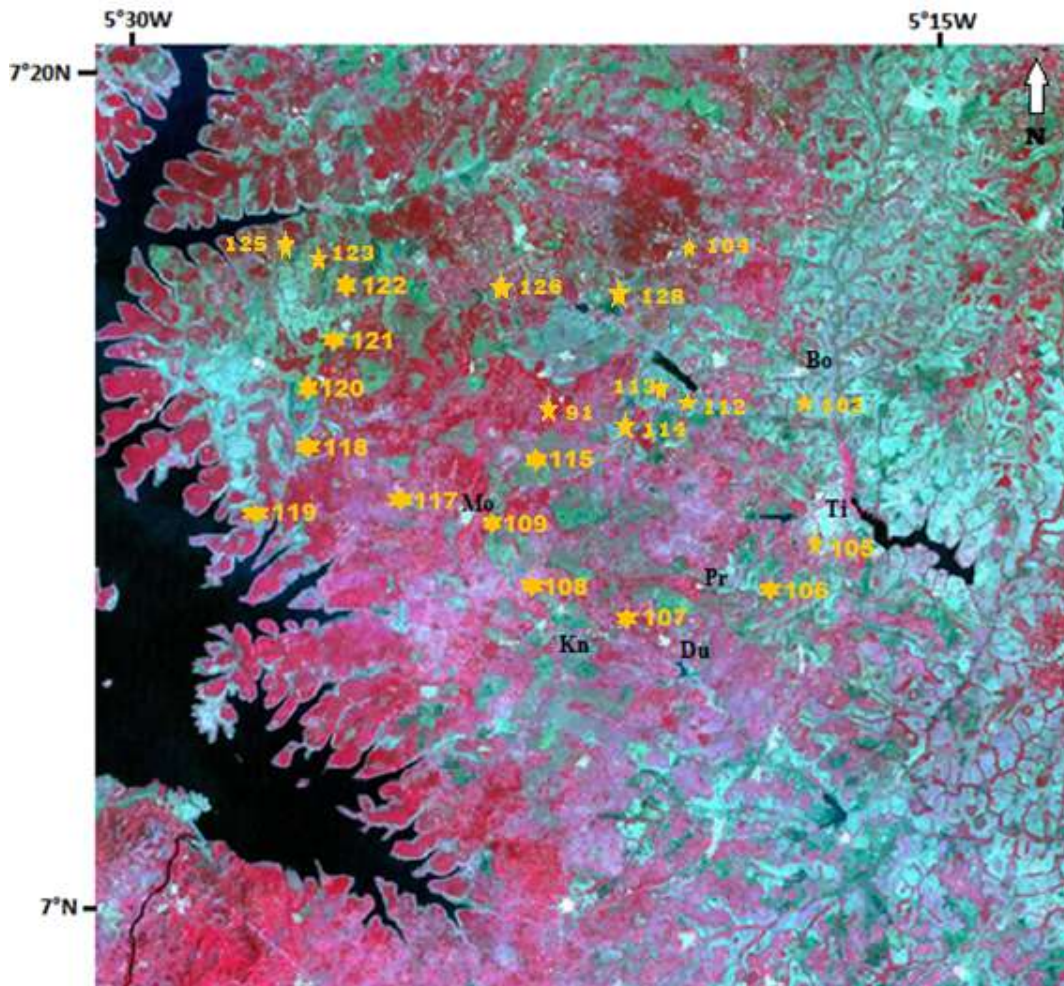


Figure 5a : Image ETM+ de LANDSAT 7 en composition colorée infrarouge couleurs 432 et localisation des sites d'observations.

Ti=Tiébissou ; Mo=Molonou ; Pr=Propronou ; Ko=Komorossou ; Az=Ando Zumé ; Ak=Akrétia ; Bo=Bofia ; Ts=Taki Salékro ; Yu=Yuakré ; Ng=NGangro ; Ni=Niamienkro ; Kn=Konankro ; Du=Duybo ; Gr=Grogro ; Nd=Ndenou ; Ka=Koffi Agrokro

4-1-2. Cartographie structurale

L'analyse de l'image satellitale optique ETM+ de LANDSAT 7 (Figure 5a) fait ressortir les grandes familles de fractures suivantes (**Figure 5b**):

NO-SE (N140° à N150°), (F_{Mo}, F_{Ko}, F_{Az}); E-O (N080° à 100°), (F_{Sa}, F_{Pr}, F_{Bo}); NS à NNE-SSO (N170° à N020°), (F_{Gg}, F_{Ni}, F_{AK}, F_{Tia}); NE-SO (N040° à N060°), (F_{Ng}, F_{Fy}).

Les campagnes sur le terrain ont permis de confirmer l'existence de certaines zones de fractures et également de relever d'autres plus discrètes sur l'image. Au site 120, un affleurement du granite intrusif de

Grogro contenant des enclaves sombres étirées $N00^{\circ}$ est recoupé par des fractures $N90^{\circ}$, $N120^{\circ}$ et $N170^{\circ}$ (Figure 6A). Sur le même site, le granite est affecté par des fractures $N140^{\circ}$ senestres et une fente de tension $N110^{\circ}$ (Figure 6B). D'autres directions de fractures sont observables au site 120 (Figure 7 A et B). Au site 123, le faciès fin de bordure du granite à biotite de Grogro est affecté par une fracture $N80^{\circ}$ senestre portant des stries de pitch 80° N (Figure 8A).

Aux sites [102: ($N7^{\circ}12'03''$, $W5^{\circ}14'18''$); 106 : ($N7^{\circ}08'36''$, $W5^{\circ}14'50''$) et 091 : ($N7^{\circ}11'56''$, $W5^{\circ}21'23''$)], des filons de quartz de puissance moyenne de 20 mètres et de direction $N 080^{\circ}$ à $N110$ ont été observés (Figure 9). Celui du site 106 est recoupé par des fractures orientées $N170^{\circ}$ senestres (Figure 9A). Au site [122 : ($N7^{\circ}11'13''$, $W5^{\circ}25'56''$)], un filon de quartz de direction $N140^{\circ}$ est observable (Figure 9B). Les rosaces (Figure 10) montrent au niveau des filons de quartz trois directions majeures qui sont $N090^{\circ}$ à $N110^{\circ}$; $N140^{\circ}$ et $N060^{\circ}$. Au niveau des fractures, on note quatre directions majeures qui sont $N090^{\circ}$ dextre; $N130^{\circ}$ à $N150^{\circ}$ dextre; $N060^{\circ}$ senestre et $N170^{\circ}$ à $N000^{\circ}$ senestres et/ou dextres.

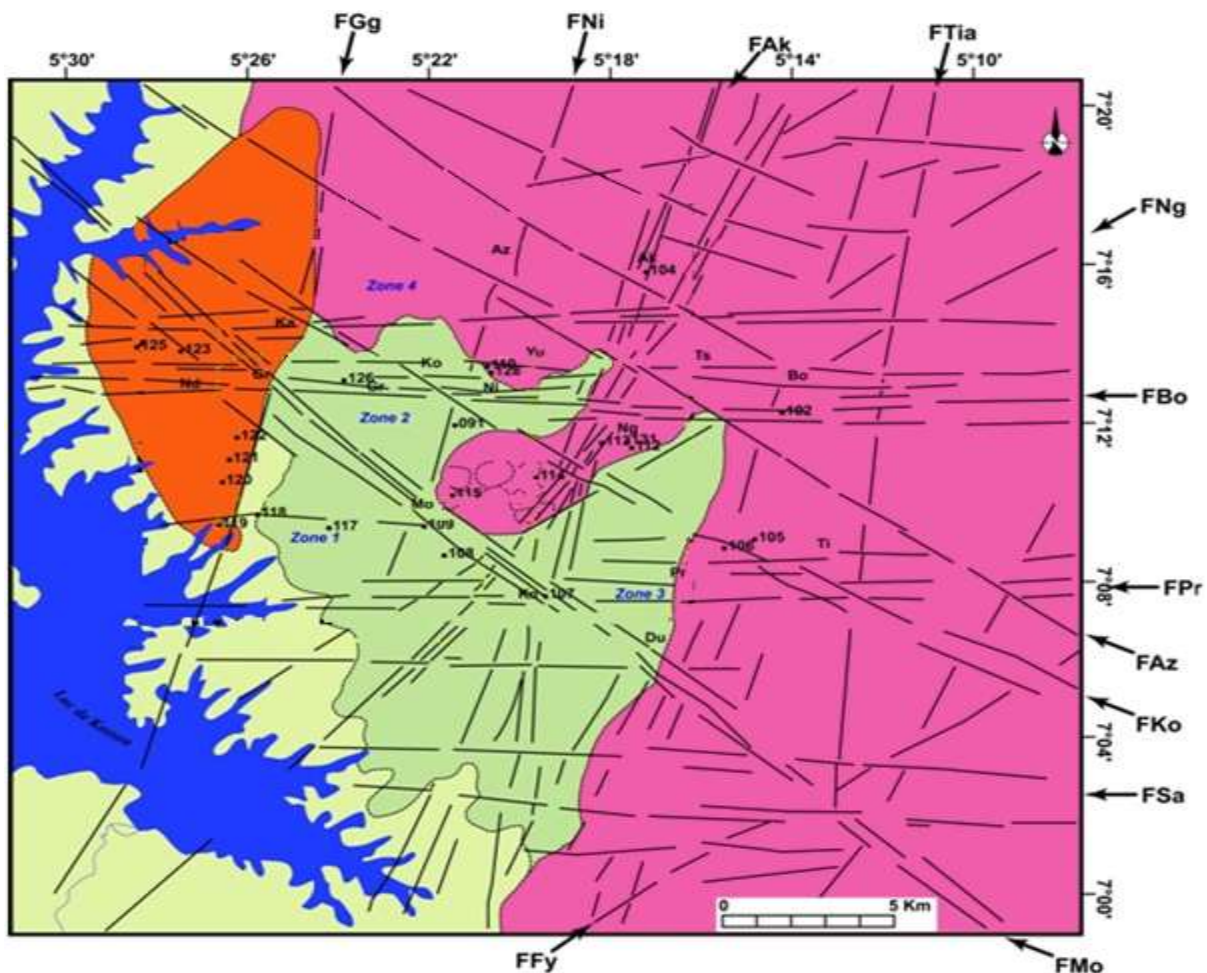


Figure 5b : Carte géologique télanalytique obtenue à partir de l'image de la Figure 5b.

FMo=fractures de Molonou ; FKo=fractures de Komorossou ; FAz=fractures d'Ando Zumé ; FSa=fractures de Sakiaré0 ; FPr=fractures de Propronou ; FBo=fractures de Bofia ; FGg=fractures de Grogro ; FNi=fractures de Niamienkro ; FAK=fractures d'Akrétia ; FTia=fractures de Tiébissou ; FNg=fractures de Ngangro ; FFy=Fractures de Suibonou.

1=aire granitique de Tiébissou ; 2=granite de Grogro ; 3=unité volcano-sédimentaire de Tiébissou ; 4= unité volcano-sédimentaire des monts Yaouré.



A : Affleurement de granite intrusif de Grogro avec des enclaves sombres étirées N00° recoupé par des fractures N90°, N120° et N170° (site 120).



B : Affleurement du granite à biotite de Grogro recoupé par des fractures N140° senestres et une fente de tension N110°.

Figure 6 : Zones de fractures affectant le granite à biotite de Grogro



A : *Affleurement de granite à biotite de Grogro avec filon de quartz-tourmaline recoupant un filon de quartz N50° en senestre.*



B : *Affleurement de Grogro, filon de quartz N50° recoupé par une fracture N100°*

Figure 7: *Zones de fractures affectant le granite à biotite de Grogro*



A : *Faciès fin de bordure du granite de Grogro (site 123) avec fractures N80° portant des stries de pitch 80°N.*



B : *Affleurement de schistes à N'Gangro avec une schistosité S1 N40-50°SE (site 112).*

Figure 8 : *Affleurement du granite à biotite de Grogro et affleurement de schiste altéré*

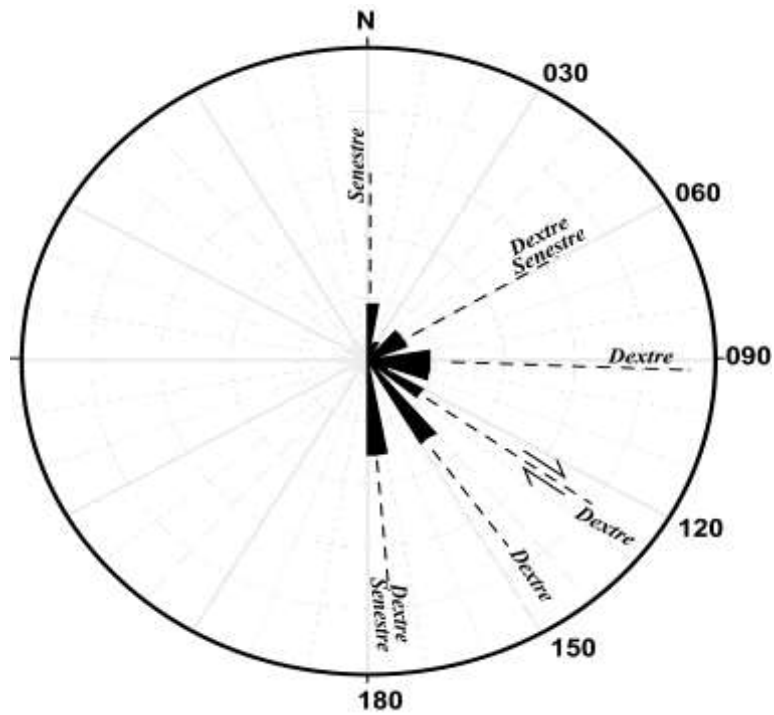
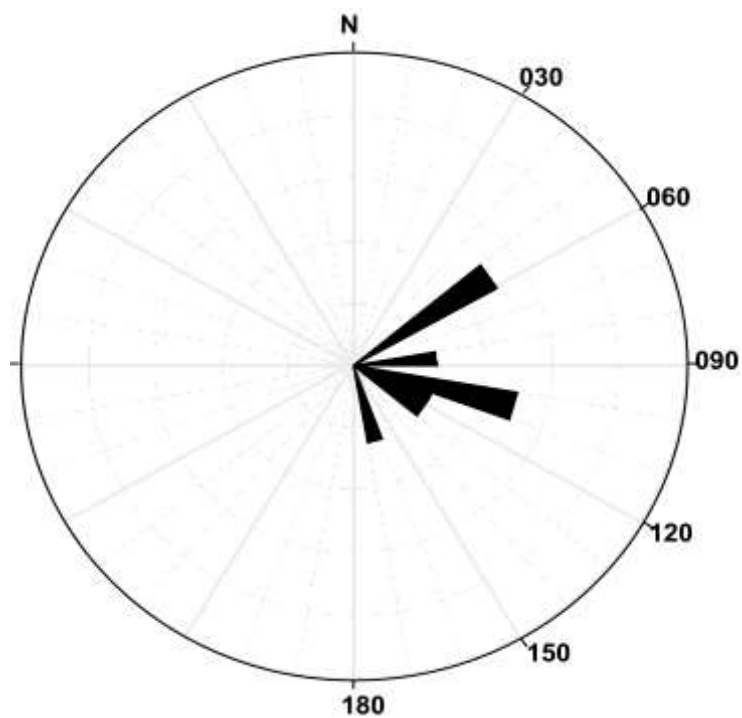


A : *Filon de quartz de Propronou de direction N80°, recoupé par des fractures N170° (site 106)*



B : *Filon de quartz N140° (site 122).*

Figure 9 : *Photographies de filons de quartz*

Rosaces des fractures et des filons*A : Rosace des principales fractures**B : Rosace des principaux filons de quartz***Figure 10 : Rosaces des fractures et des filons**

4-2. Localité de Tienko

4-2-1. Cartographie pétrographique

Sur l'image radar RSO-ERS (*Figure 11a*), les faciès granitiques sont reconnaissables par leur texture façonnée par des arcs de cercle et un réseau de drainage de type dendritique. Les séries volcano-sédimentaires sont caractérisées par des discontinuités lithologiques des méta-sédiments encaissants.

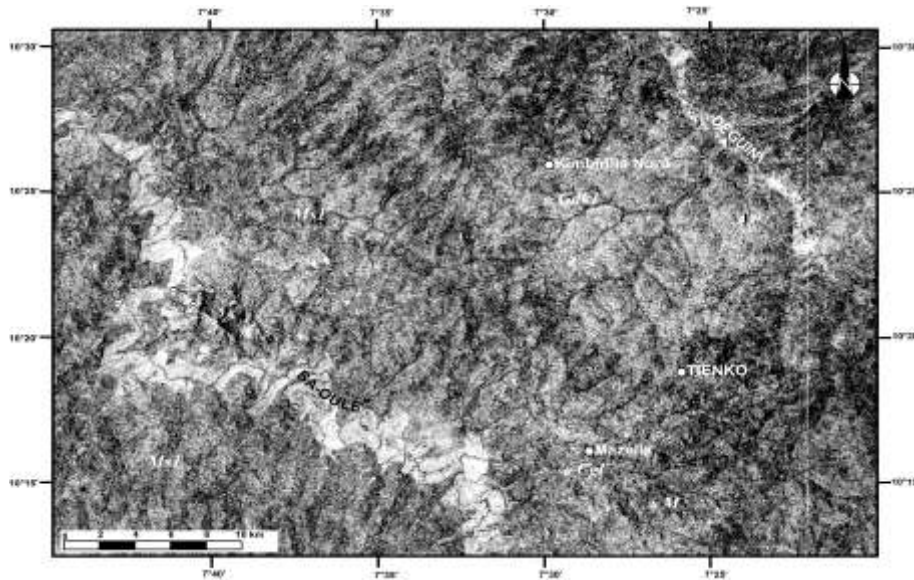


Figure 11a : Image (en négatif) radar ERS-1 de la région de Tienko (nœud ascendant ; orbite 4619 ; frame 3393 ; date : 03-06-1992). Ms1, Cgl, Gdk1 et M sont les sites étudiés sur le terrain.

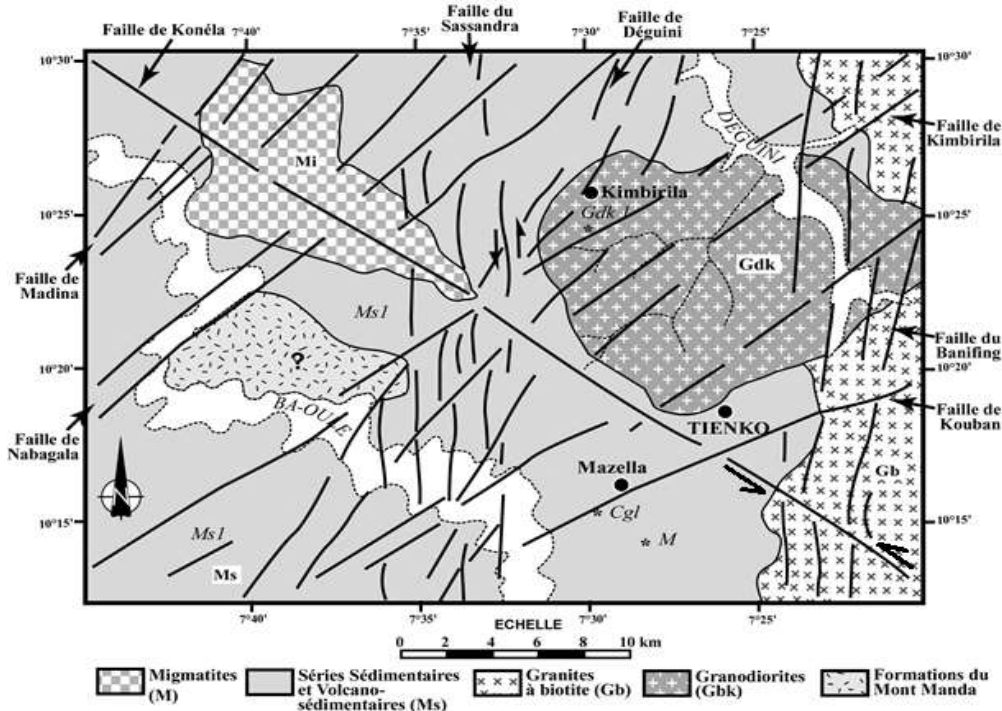


Figure 11b : Carte géologique télanalytique obtenue à partir de l'image radar ERS de la figure 11a.

La granodiorite de Kimbirila (Gdk) était certes connue sur le terrain mais nous montrons son caractère intrusif car le massif a une forme \pm arrondie en carte (**Figure 11b**). Elle se distingue par une teinte gris-claire en image négative et un réseau de drainage de type dendritique à drains fins espacés de 2 à 5 km. La granodiorite a une texture grenue et est constituée essentiellement de quartz, plagioclase, microcline, biotite, chlorite, sphène, épidote et de pyroxène déstabilisé en amphibole. La granodiorite, dans la ville de Tienko, est affectée par des déformations sub-verticales de direction $N030^\circ$ dues probablement au couloir de failles ductiles du Banifing, alors qu'entre Tienko et Kimbirila, elle est exempte de déformations visibles à l'affleurement. Les granites à biotite (Gb) se caractérisent par une teinte d'ensemble gris-claire à sombre en image négative due probablement à l'occupation du sol par la végétation, un réseau de drainage de type dendritique à drains plus marqués espacés d'environ 3 km et surtout par de nombreuses structures circulaires caractéristiques des substratums granitiques. La série volcano-sédimentaire (Ms1), d'après les cartes géologiques préexistantes est composée de schistes, de grauwackes et de brèches volcaniques. Elle se caractérise sur l'image radar RSO-ERS par une teinte en négatif, un réseau de drainage de type parallèle avec des drains de direction préférentielle NNE-SSO, espacés d'environ 2 km. Nous y avons observé sur le terrain au site Cgl (**Figure 11b**), des conglomérats polygéniques contenant des galets de schistes, de laves et de granitoïdes. Ces conglomérats sont marqués par une schistosité de direction $N025^\circ \rightarrow 60SE$. Cette série comprend également des formations schisteuses fortement altérées.

4-2-2. Cartographie des zones de fractures

L'image radar permet de préciser le tracé des zones de failles connues sur le terrain et également d'identifier de nouvelles. La zone de failles du Sassandra de direction N-S à NNE-SSO, bien visible au Sud de la zone d'étude, dans la région de Samatiguila où elle est large d'environ 25 km, a dans la région d'étude un tracé plus difficile à suivre, reconnaissable seulement par des lignes discontinues (**Figures 11a et 11b**). Sur le terrain, au site Cgl, cette zone de failles du Sassandra forme des plans mylonitiques de direction $N025^\circ \rightarrow 60SE$ et une linéation d'étirement horizontale. La relation entre les structures S et C ainsi que la rotation des galets, indiquent un cisaillement senestre (**Figure 12A et 12B**). La zone de failles du Banifing est certes connue en partie sur le terrain en Côte d'Ivoire [14] et aussi au Mali [15], cependant, la vision synoptique qu'offre l'image radar, permet de préciser son tracé. Elle affecte une zone large d'environ 10 km et est caractérisée par des lignes parallèles de direction NNE-SSO. Il s'agit d'une zone de cisaillement ductile senestre sub-vertical de direction NNE-SSO caractérisée par une linéation d'étirement sub-horizontale. De nouvelles zones de failles sont cartographiées dont les plus longues (plus de 100 km) sont : 1) les failles de Madina (Fnd) et de Nabagala (Fna) d'orientation NE-SO, 2) la faille de Kouban (Fko) de direction N-S et 3) la zone de failles majeures de Konéba (Fkn) de direction NO-SE (**Figure 11b**). Ces couloirs de déformations ductiles sont caractérisés par des lignes discontinues.

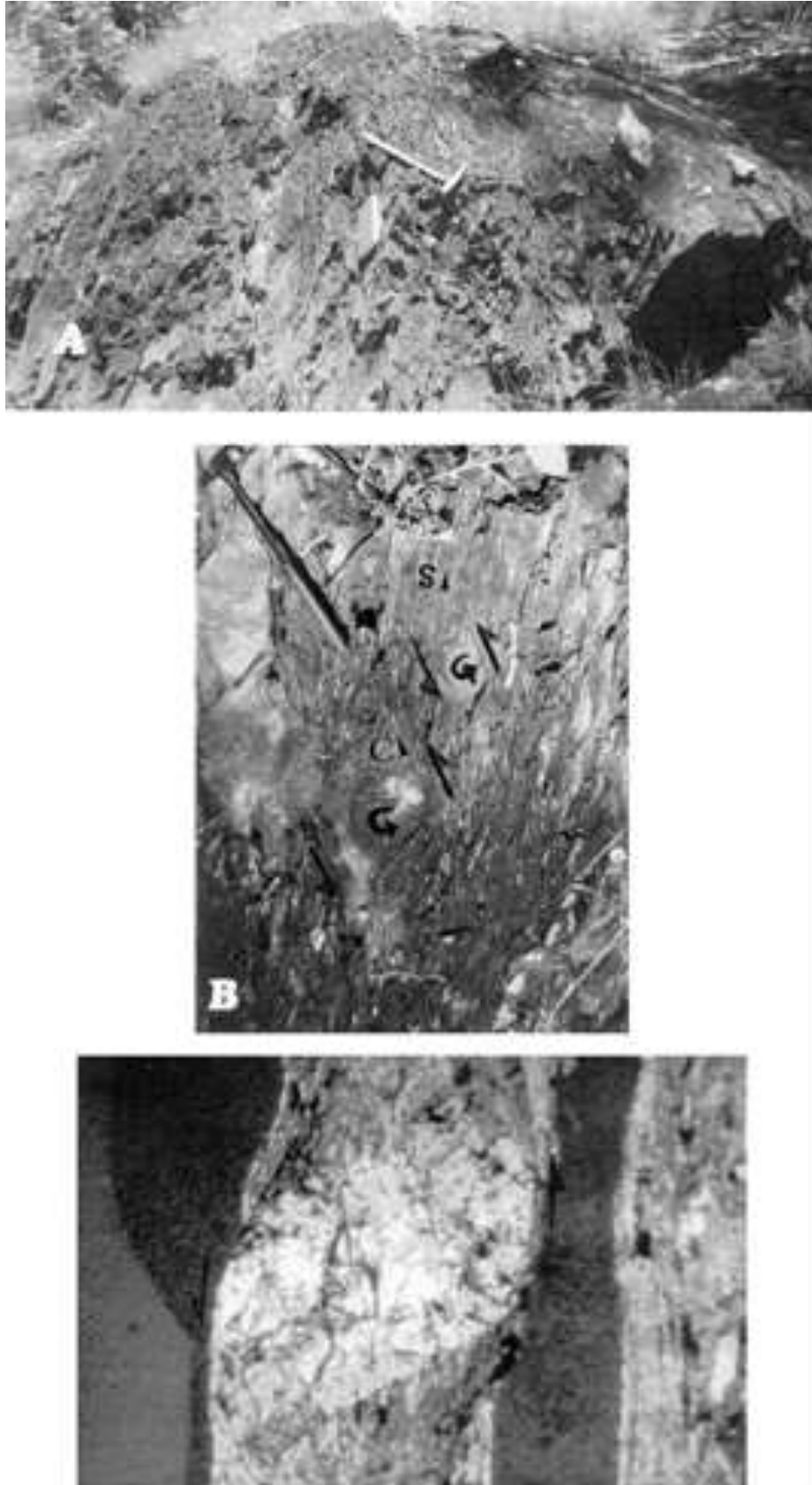


Figure 12 : *Quelques photographies du conglomérat polygénique*

5. Conclusion

Malgré la rareté des affleurements sur le site, ce travail, à partir essentiellement de l'analyse des images satellitaires radar RSO-ERS et LANDSAT ETM+, donne des résultats satisfaisants. Le contour des grands ensembles pétrographiques est précisé (volcano-méta-sédimentaires et aires granitiques). Les zones de fractures majeures sont identifiées. Ces résultats donnent de nouvelles perspectives encourageantes pour la suite des travaux.

La cartographie géologique traditionnelle sur le terrain et à l'aide des photos aériennes, en Afrique de l'Ouest et précisément en Côte d'Ivoire est difficile à cause de la rareté des affleurements due à la forte météorisation qui a développé une épaisse couche latéritique couvrant le substratum géologique. Cette difficulté est également liée à une importante pénéplation et l'existence d'une couverture végétale assez dense. Des cartes géologiques existent mais sont à petites échelles (1/1.000.000, 1/500.000 et 1/200.000) et imprécises. Or toute prospection du sol et du sous-sol nécessite des cartes géologiques fiables. L'objectif de ce travail est de montrer que l'imagerie Radar ERS permet l'élaboration rapide et à moindre coût de cartes géologiques fiables pour une meilleure planification de la recherche minière.

Dans la localité de Tiébissou (Centre de la Côte d'Ivoire), le contour du granite de Grogro intrusif est précisé comme celui du granite à biotite. Au sein de l'unité métavolcano-sédimentaire, des aires granitiques sont signalées. Quatre principales familles de fractures sont détectées. Il s'agit, des zones de fractures de Molonou, de Komorossou et d'Ando Zumé de direction NO-SE (N130° à N150°) ; des fractures de Sakiaré, de Propronou et de Bofia de direction E-O (N080° à N100°) ; des fractures de Grogro, de Niamienkro, d'Akrétia et de Tiébissou de direction NS à NNE-SSO (N170° à N020°) et enfin des zones de fractures de Ngangro et de Suibonou de direction NE-SO (N040° à N060°). Certaines de ces zones de fractures ont pu être identifiées sur le terrain. Ce sont par exemple, les zones de fractures de Propronou et de Bofia de direction E-O ; des zones de fractures de Molonou d'orientation NE-SO. Trois directions majeures des filons de quartz apparaissent (N090° à N110°, N060° et N140°).

Dans la région de Tienko, l'imagerie radar ERS permet de préciser la forme de la granodiorite de Kimbirila. Elle a un caractère intrusif. Le tracé des zones de failles connues comme celles du Sassandra et du Banifing est précisé. La zone de failles de Konéla, cartographiée pour la première fois, de direction NO-SE se surimpose à des anomalies géochimiques aurifères obtenues par une compagnie minière de la place.

Ces résultats géologiques obtenus dans ces régions, dont certains méritent d'être vérifiés sur le terrain, montrent que l'imagerie radar ERS permet une mise à jour rapide et à moindre coût des cartes géologiques. Ces résultats peuvent permettre de mieux concevoir le plan minier ivoirien et de cibler les zones favorables à prospecter dans une concession minière.

Références

- [1] - M. ARNOULD, "Carte géologique de reconnaissance à 1/500.000. feuille Katiola", Dir. Mines Géol. Côte-d'Ivoire, Abidjan, (1963)
- [2] - R. COUTURE, "Carte géologique de reconnaissance à 1/500.000, feuille Odienné", Dir. Mines Géol. Côte-d'Ivoire, Abidjan, (1968)
- [3] - C. DELOR, Y. SIMEON, M. VIDAL, Z. ZEADE, Y. KONE, M. ADOU, J. DIBOUAHI, D.B. IRIE, B.D. YAO, A. POUCKET, A. KOUAMELAN, J.J. PEUCAT, A. COCHERIE et J.P. CAUTRU, "Carte géologique de la Côte-d'Ivoire à 1/200 000, feuille de Nassian", Ministère des Mines et de l'Energie, Direction de la Géologie, Abidjan, Côte-d'Ivoire, 9 (1995)

- [4] - Y. SIMEON, C. DELOR, Z. ZEADE, Y. KONE, B.D.YAO, M. VIDAL, I. DIABY, G. KONAN, B.I. DJE, D. N'DA, A. DOMMANGET, J.P. CAUTRU, C. GUERROT et J.C. CHIRON, "Carte géologique de la Côte-d'Ivoire à 1/200 000, feuille de Agnibilékro-Kouamé-Dari", Ministère des Mines et de l'Energie, Direction de la Géologie, Abidjan, Côte-d'Ivoire, 8 (1995)
- [5] - G. LÜDTKE, "Géologie de la région Haute Comoé nord, Bulletin n°1", Direction de la Géologie, Abidjan, (1998), 178 p
- [6] - G. LÜDTKE, "Géologie de la région Haute Comoé sud, Bulletin n°2", Direction de la Géologie, Abidjan, (1999), 164 p
- [7] - CENTRE DE CARTOGRAPHIE ET DE TELEDETECTION (CCT), Abidjan, Côte d'Ivoire, "Carte topographique, Feuille de BOUAKE au 1/200 000", (2008)
- [8] - C. DELOR, D.B. YAO, O. AGOH, Y. SIMEON et I. DIABY, "Carte géologique provisoire de la Côte d'Ivoire à 1/200.000, feuille de Bouaké", Ministère des Mines et de l'Energie, Direction de la Géologie, Abidjan, Côte-d'Ivoire, (1995)
- [9] - J.P. MILESI, P.LEDRU, J.L. FEYBESSE, A. DOMMANGET, M.F. OUEDRAOGO, E. MARCOUX, A.E. PROST, C. VINCHON, J.P. SYLVAIN, V. JOHAN, M. TEGYEY, J.Y. CALVEZ et PH. LAGNY, "Les minéralisations aurifères de l'Afrique de l'Ouest. Leurs relations avec l'évolution lithostructurale au Protérozoïque inférieur", Chron. Rech. Min., 497 (1989) 3-98
- [10] - CENTRE DE CARTOGRAPHIE ET DE TELEDETECTION (CCT), "Carte topographique de Tienko au 1/200.000, Feuille NC-29-XVI", (1993)
- [11] - DIRECTION NATIONALE DE LA GEOLOGIE ET DES MINES (DNGM), "Carte photo-géologique du Mali Occidental au 1/200000, Feuille de Yanfolila", (1988).
- [12] - R. COUTURE, "Carte géologique de reconnaissance à 1/500 000, feuille d'Odienné. Dir. Mines et Géol. Côte-d'Ivoire", (1968)
- [13] - SOCIETE POUR LE DEVELOPPEMENT MINIER IVOIRIEN (SODEMI), "Carte photo-géologique à 1/200 000, feuille de Tienko-Odienné", (1978)
- [14] - K. POTHIN et A. TAHUA, "Etude de la fracturation de la région d'Odienné par une exploration combinée des photographies aériennes, des images satellitaires, des cartes aéromagnétique et radiométrique. Actes du colloque Int. de Télédétection, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire", (1987)
- [15] - J.P. LIÉGOIS, W. CLAESSENS, D. CAMARA, J. KLERKX, "Eburnean orogeny in Southern Mali. Geology, tectonics, and U-Pb and Rb-Sr geochronology", Precambrian Res., 50 (1991) 111-136