

CARTOGRAPHIE PAR TÉLÉDÉTECTION DES FORMATIONS DU RECOUVREMENT DE L'INDICE D'OR BAOULÉ-EST, CENTRE DE LA CÔTE D'IVOIRE

Kadio Hilaire NIAMKE^{1*}, Brou Etienne N'Dri¹, Aimé KOUDOU¹ et Koffi Fernand KOUAME²

¹*Laboratoire de Géosciences, UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire*

²*Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection, UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Félix Houphouët-Boigny, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

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

RÉSUMÉ

Ce travail est une contribution des méthodes indirectes à la cartographie géologique par télédétection. L'objectif principal est de déterminer la distribution spatiale des différentes formations du recouvrement qui sont l'objet essentiel de la prospection géochimique. Le prétraitement de l'image Landsat 7 ETM+ a consisté à étudier des bandes qui excluent les informations de la topographie (végétation et affleurements). Le rapport ETM + 5 / ETM + 7 fut suivi par l'application du filtre laplacien afin de rehausser les surfaces discordantes et leurs variations internes. Ce cheminement a montré que les arènes granitiques occupent le Nord-Ouest. Les alluvions qui sont disposés dans le lit majeur du N'Zi ont été discriminés en vases, sables et graviers. Les latérites et les argiles occupent 80 % de la zone d'étude. Ceci est un excellent résultat pour la prospection géochimique.

Mots-clés : *télédétection, prospection géochimique, rapport de bandes, filtre laplacien, alluvions, arène granitique, latérite.*

ABSTRACT

Baoule-East (mid region of Côte d'Ivoire) gold occurrence geological cover mapping by remote sensing

This work is a contribution of indirects proceedings to geological mapping by remote sensing. The main goal is to find spatial arrangement of geological

cover which are essential subject of geochemistry survey. Preliminary Landsat 7 treatment has studied channel which get out topographic contents (vegetation and outcrops). ETM + 5 / ETM + 7 was followed by laplacian filter application in the goal of enhance cover surfaces and them variability. This proceedings has show that granites arena's are located at north west. Alluvium which are setting along N'zi river are discriminated in mud, sand and gravels. Laterite and argiles represented 80 % of study area. This is a good results for geochemistry prospection.

Keywords : *remote sensing, geochemistry exploration, image channel rate, laplacian filter, alluvium, granit arena's, laterite.*

I - INTRODUCTION

L'une des méthodes de la seconde étape de la prospection minière (recherche des indices et anomalies) est la prospection géochimique. La prospection géochimique a pour objet la couverture qui est le constituant superficiel du profil d'altération [1] dont il évalue le potentiel en substance utile par la matérialisation des auréoles de dispersion. Les auréoles de dispersion ne sont en réalité que l'augmentation du volume par la minéralisation après la dislocation d'un gîte primaire [2]. L'étude de l'auréole de dispersion est donc essentielle dans la recherche du gîte primaire. Cette assertion n'est valable que lorsque la couverture est de type résiduel [3]. De ce fait, une cartographie établissant la répartition en fonction de leur nature des formations de recouvrement facilitera le choix des sites pour la découverte du gîte primaire voire du gisement. Cette cartographie est une opération de terrain longue et coûteuse que l'application de la télédétection pourrait faciliter et rentabiliser par la détermination au préalable sur image des sites à constituants transportés (argiles, alluvions, éluvions, etc.).

En effet, selon [2, 4], la combinaison de la morphologie des drains et de la couverture végétale est un excellent moyen de détection des formations géologiques du substratum et des recouvrements superficiels. L'indice Baoulé-Est présente les caractéristiques techniques et sociales pour constituer un excellent champ d'expérimentation. Qualifié d'indice majeur du centre de la Côte d'Ivoire par le Bureau Minier de la France d'Outre-Mer (BUMIFOM), l'indice Baoulé-Est contrairement à ceux d'Angovia et d'Agbaou n'a pas abouti à un gisement. Au plan national, le secteur minier, précisément l'exploitation de l'or, fut choisie comme étant l'un des pôles de la diversification d'une économie agricole et fiscale. Sur le plan local, la valorisation de l'indice constituerait à n'en point douter, un souffle nouveau à cette région dont la jeunesse déscolarisée en place, est désœuvrée, tandis que l'autre émigrée s'est orientée vers les forêts du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire

privant ainsi la région de la majorité de sa population active. C'est dans ce cadre, que dans un souci de réduire le risque technique (cheminement et outils inadaptés pour la prospection), fut élaboré et conduit le projet du présent article dont le thème est : Cartographie par télédétection des formations du recouvrement de l'indice d'or Baoulé-Est (Centre de la Côte d'Ivoire). L'objectif principal de ce travail est de déterminer la distribution spatiale des différentes formations du recouvrement. Notre contribution se fixe les objectifs spécifiques suivants :

- produire une image rehaussée qui met en évidence les drains du réseau hydrographique ;
- produire une image rehaussée qui permet la discrimination des surfaces ;
- valider par la vérité-terrain la contribution de la télédétection à la cartographie des formations du recouvrement.

II - PRÉSENTATION DU MILIEU D'ÉTUDE

La zone d'étude est une région du centre de la Côte d'Ivoire comprise entre les longitudes 4°00'O et 4°45'O et les latitudes 6°30'N et 7°00'N (Ivoiregéo, 2002). Elle est à cheval sur les régions administratives du N'Zi, du Moronou et de l'Iffou dont les chefs-lieux sont respectivement Dimbokro, Bongouanou et Daoukro (*Figure 1*). La zone d'étude couvre les bassins versants du N'zi et de l'Agnéby (*Figure 2*). Les affluents du N'Zi (Ourougo, Mandia, Boya, Songan, N'tipin) occupent 80 % de la zone d'étude. Ceux de l'Agnéby dans la partie Est ne représentent que 20 % du secteur. Le tracé du N'Zi est méandrique. Il circule dans des vallées larges au sein d'un ensemble monotone caractérisé par des plateaux. L'écoulement est doublement orienté ESE et ENE. L'Agnéby est représenté par l'Agbo et ses affluents. L'Agbo circule dans des vallées étroites et entaillées. La carte géologique (*Figure 3*) produite par [5] montre une vaste aire de granitoïdes dans l'Ouest. Ils constituent des entités circonscrites de dimensions modestes aux seins des schistes. En dehors du bloc Ouest, la région est essentiellement constituée d'une variation latérale de schistes silteux, schistes arénacés fines arkosiques. Elle est parfaitement intégrée dans le paléobassin de la Comoé [6, 7]. Au Nord-Ouest, il est observé la terminaison Sud d'une formation ampélitique. Cette formation décrit un biseau relativement étroit entre la vaste aire granitique et les schistes. Les formations de recouvrement sont représentées par les sables et les vases fluviatiles. Les sables et les vases fluviatiles de ce paysage géologique datent du Quaternaire. Elles occupent la large vallée du N'Zi.

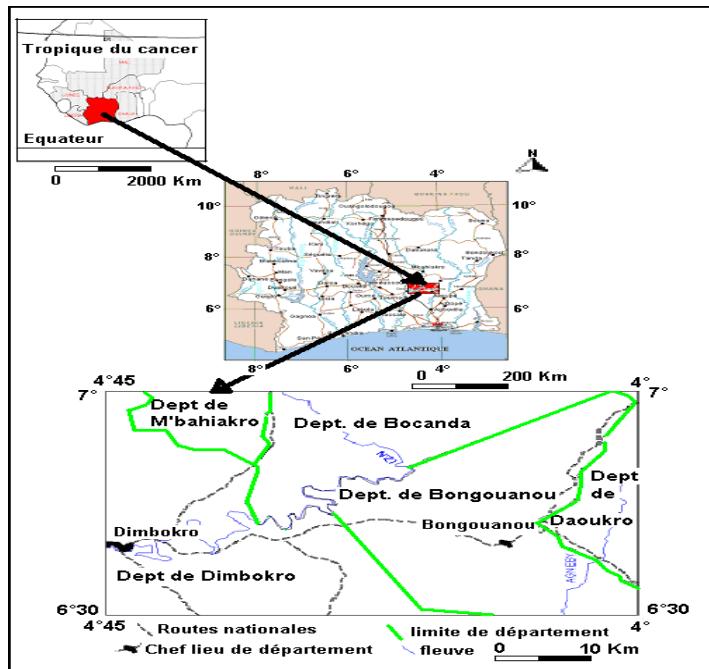


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (Ivoiregéo, 2002 ; CCT, 1994)

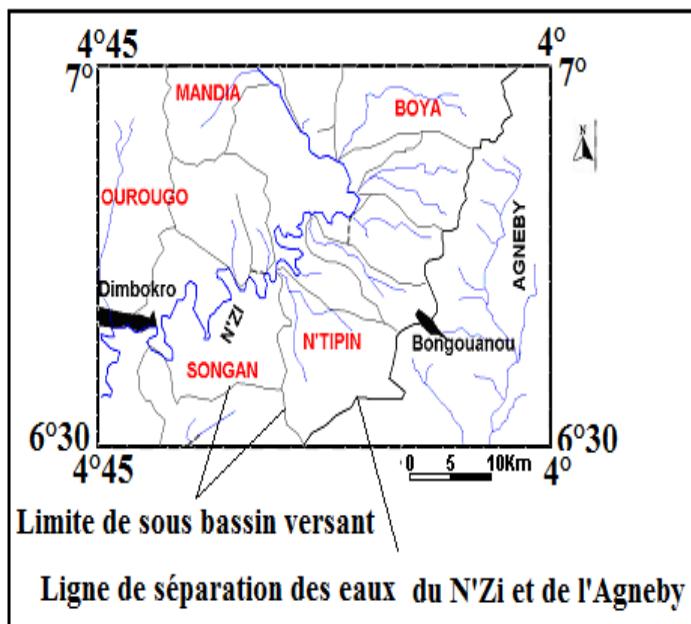


Figure 2 : Principaux sous bassins versants de la région d'étude (extrait de la carte topographique de Dimbokro au 1/200000 du CCT 1995)

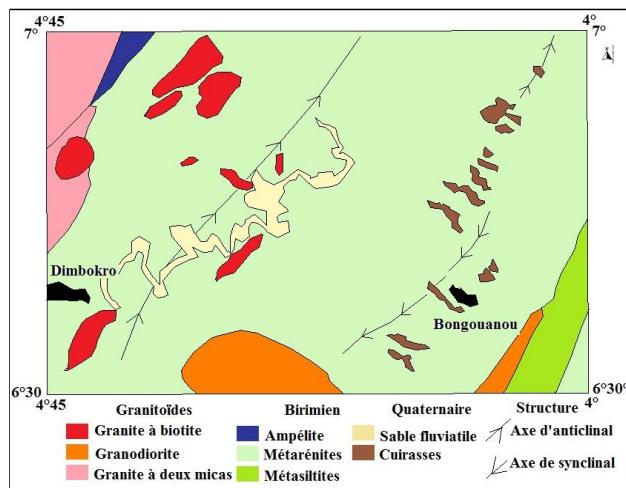


Figure 3 : Carte géologique de la région d'étude [5]

III - MARTÉRIEL ET MÉTHODES

III-1. Matériel

L'imagerie Landsat 7 ETM+ a constitué le support de l'étude géologique par télédétection. L'image utilisée est une portion extraite de la scène 196-55 acquise le 02 Avril 2002. Cette image a 8 bandes, La bande complémentaire étant le canal panchromatique qui a une résolution de 15 m. Les canaux du visible et les bandes du PIR, IR, IRL ont une résolution de 30m ; le canal thermique (IRT) a une résolution spatiale de 60 m.

Les données cartographiques prises toutes à l'échelle 1/200000 sous formes numériques sont :

- la carte topographique de Dimbokro produite par le CCT en 1995 à partir des données de l'Institut de Géographie National Paris récoltées en 1966 ;
- la carte géologique de Dimbokro produit par la Direction de la Géologie.

Les travaux ont été réalisés à l'aide du logiciel Envi V 3.2 qui regroupe en son sein des fonctionnalités multiples relatives au traitement des images et à la cartographie thématique. Le logiciel Envi V 3.2 contient en son sein des modules qui permettent de réaliser l'extraction de l'information souhaitée. Cette fonctionnalité facilite les opérations car elle évite l'exportation des thèmes de l'image vers d'autres logiciels et son lot de pertes d'informations [8].

III-2. Prétraitement de l'image

Dans le cas de notre étude, les techniques de prétraitement utilisées furent :

- les statistiques radiométriques ;
- le contenu visuel des images ;
- l'étude des corrélations existant entre les différentes bandes de l'image.

Les statistiques radiométriques furent obtenues automatiquement. Elles ont porté sur la répartition des pixels sur l'échelle des niveaux de gris. Les techniques d'étalement radiométriques (étalement linéaire, égalisation, racine carrée, etc.) qui ont assuré la visualisation du contenu des bandes furent fonction de l'allure de la répartition des pixels. L'étude corrélative des canaux fut une étude automatique réalisée à l'aide du module "Scater plot" du logiciel Envi V 3.2. Ce module récapitule le coefficient de corrélation des bandes deux à deux sur un graphe orthonormé. Le but de cette étude corrélative fut de révéler l'importance de la redondance et de la disparité des informations contenues dans l'image. Le but assigné au prétraitement est de définir les méthodes de traitement qui conviendraient à la mise en évidence des informations recherchées [9].

III-3. Rapport de bandes ETM + 5 / ETM + 7

Le rapport de bandes ETM + 5 (infra rouge) et / ETM + 7 (infrarouge lointain) a été retenu afin de discriminer les informations superficielles. Ces bandes sont caractérisées par une bonne corrélation. Elles ont la particularité d'exclure, les principales informations du visible (végétation pour ETM + 5, affleurement pour ETM + 7). Ce rapport présente des avantages multiples dans la cartographie géologique. En effet, il relève les composantes qui n'ont aucun lien avec la végétation ainsi que les délimitations. Il a également pour objectif d'atténuer les effets de la topographie. Ce rapport permet également de révéler les variations en termes d'humidité. Ce rapport est un excellent séparateur des surfaces qui drainent l'eau et assurent le ruissellement de celles qui les accumulent (alluvions, éluvions).

III-4. Application du filtre laplacien

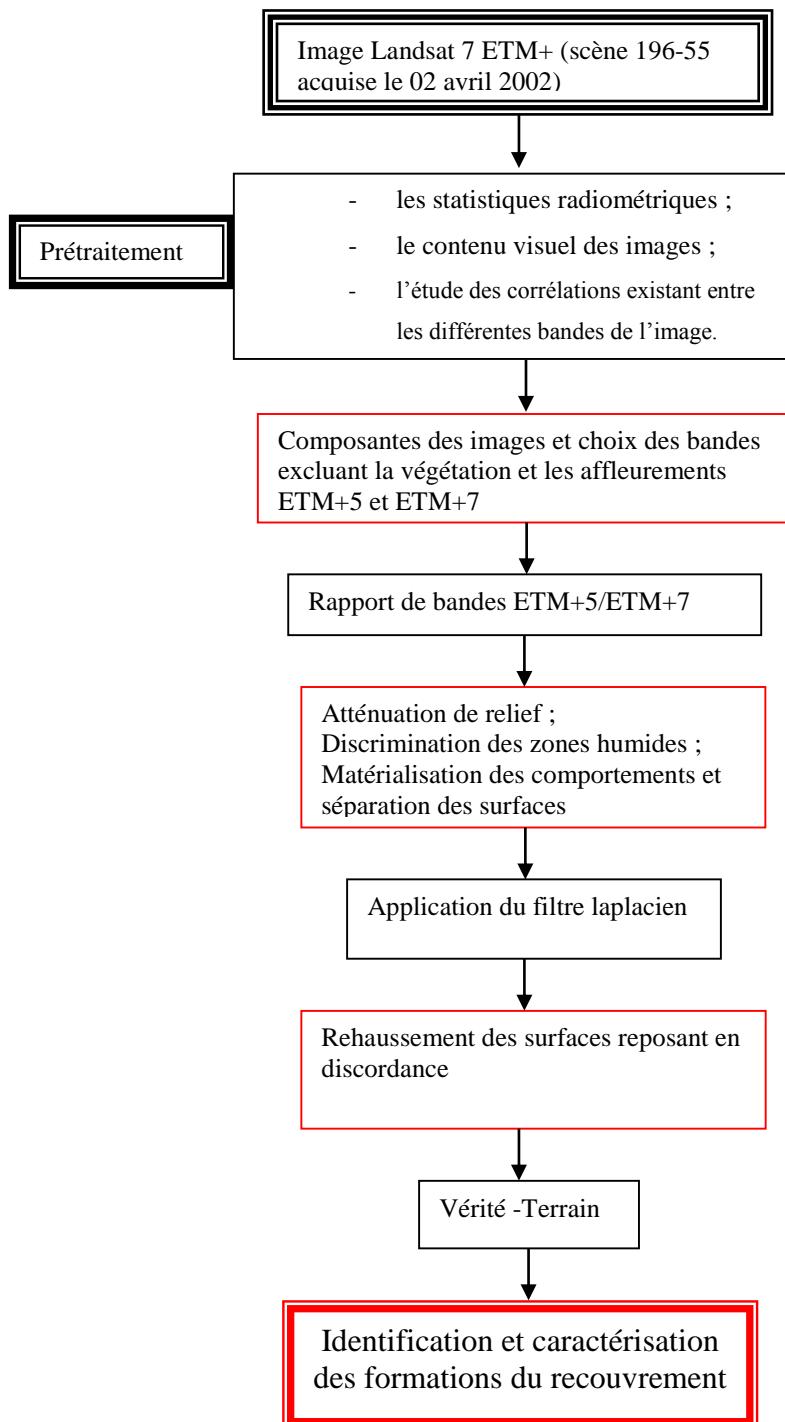
Le filtre laplacien a été appliqué sur le rapport de bandes ETM + 5 / ETM + 7 afin de rehausser les contours qui y sont contenus. Ce filtre assure un balayage selon la matrice 3 x 3 qui est récapitulé dans le **Tableau 1**. Ce filtre rehausse comme l'indique la matrice (**Tableau 1**) les contours en déployant au centre de l'objet une intensité lumineuse quadruplée de signe contraire. Cette particularité fait de ce filtre un excellent outil pour rehausser les surfaces qui reposent en discordance [10]. C'est le cas des formations alluviales.

Tableau 1 : Filtre laplacien

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

III-5. Vérité-terrain

Deux missions de terrains ont été réalisées afin de valider les résultats des traitements de l'image. Ces vérités-Terrains ont consisté en l'identification et la description des formations de recouvrements sur les sites mis en évidence par le traitement de l'image. La première mission réalisée au cours de la saison sèche a permis d'étudier les dépôts récents (Janvier 2003). La seconde mission s'est déroulée durant de la saison des pluies (Juin 2003). Cette dernière mission a permis l'étude des anciennes terrasses. Il important de noter que les sites sont très accessibles durant la saison sèche. La **Figure 4** est le récapitulatif du cheminement de la méthode.

**Figure 4 : Cheminement de la méthode**

IV - RÉSULTATS

IV-1. Résultats du prétraitement

Les résultats de l'étude corrélative sont consignés dans le **Tableau 2**. Il s'est avéré que les bandes ETM + 2, ETM + 3 révèlent la meilleure des corrélations ($R = 0,92$) tandis que, ETM + 2 et ETM + 4 présentent la plus faible des corrélations ($R = 0,17$). La bande du capteur infrarouge (ETM + 5) et celle de l'infrarouge lointain présente une bonne corrélation ($R = 0,72$). C'est un constat logique dans la mesure où ces capteurs émettent des ondes qui atténuent tous corps qui s'expriment fortement dans le visible (ETM + 1, ETM + 2, ETM + 3). Ces bandes, de par leur nature et corrélation, ont été l'objet du rapport de bandes et du filtre laplacien.

Tableau 2 : Coefficient de corrélation des bandes de l'image ETM + 7

E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
E2	1	0,92	-0,17	0,64	0,54	0,60
E3		1	0,23	0,76	0,70	0,80
E4			1	-0,23	-0,59	-0,47
E5				1	0,49	0,79
E6					1	0,71
E7						1

IV-2. Disposition des formations du recouvrement

Le rapport de bandes ETM + 5 / ETM + 7 (**Figure 5**) a complètement atténué la topographie à l'exception des agglomérations humaines qui du reste sont matérialisées par des teintes sombres proches de celles des formations du recouvrement. Ces composantes terrestres de recouvrement qui sont matérialisées par les teintes sombres sont disposées globalement autour du N'zi et de ses affluents de la rive droite. Elles décrivent les lits des affluents du N'zi à l'exception de la Mandia où elles occupent une zone bien au-delà du lit. L'observation de la teinte des formations de recouvrement indique une variabilité de tons constituants des surfaces distinctes juxtaposées. Ces différentes surfaces indiquent leur variabilité. Les teintes noires qui occupent le voisinage du N'Zi correspondent aux alluvions. Les teintes grises occupent le voisinage de la Mandia selon un espace qui est largement au-delà de son lit majeur. Ces formations de recouvrement qui sont situées dans la zone granitique du fait de cette disposition seraient probablement des arènes granitiques. La manifestation des teintes similaires est également observée dans le Nord-Ouest. Ces arènes granitiques ne sont pas présentes au Nord de

Dimbokro. Or, cette zone fait partie de la vaste aire granitique. Il est évident que la mise en place des arènes granitiques est le fait de la combinaison de facteurs autre que le contexte granitique. Sur la rive gauche du N'Zi, malgré l'important réseau hydrographique, les formations du recouvrement ne sont pas matérialisées à l'échelle de l'image satellitaire. Le fort couvert végétal est probablement à l'origine de cette observation.

IV-3. Discrimination au sein des alluvions

Le filtre laplacien a généré des “structures creuses” aux limites distinctes (**Figure 6**). Ces structures décrivent le lit des affluents de la rive droite du N'Zi ainsi que les agglomérations humaines. La comparaison de ces “structures creuses” avec les formations de recouvrement mis en évidence par le rapport de bandes ETM + 5 / ETM + 7, montre qu’elles ne représentent que l’une des composantes. Les agglomérations humaines constituent des zones peu humides. En attribuant ce caractère à l’ensemble des structures creuses, il est possible d’affirmer que ces entités représentent la partie des alluvions qui réfléchit le moins l’humidité. Il s’agit donc de matériaux au volume intersticiel peu important (vase, argile). Les autres composantes alluviales correspondraient par opposition au sable et au gravier (volume interstiel important).

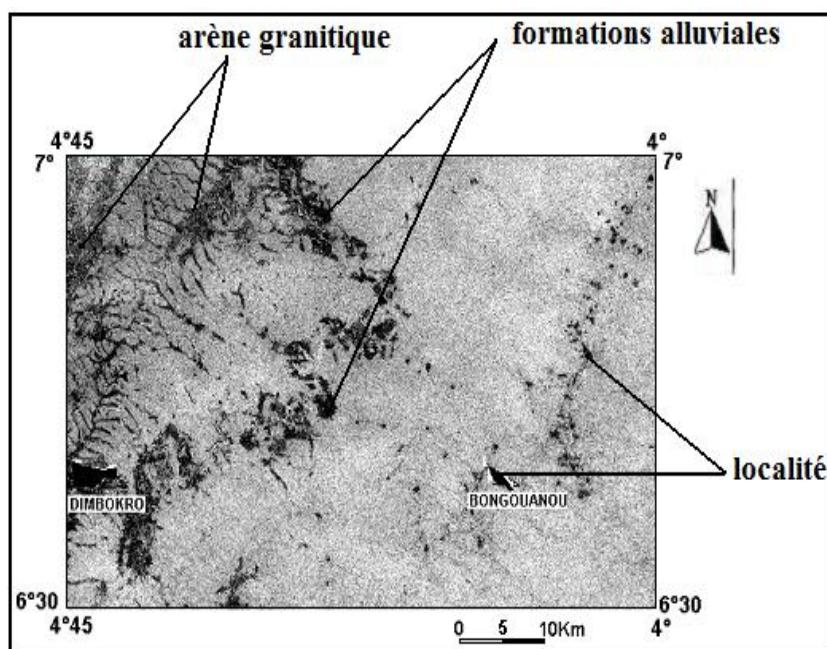


Figure 5 : Résultats du rapport de bande ETM + 5 / ETM + 7

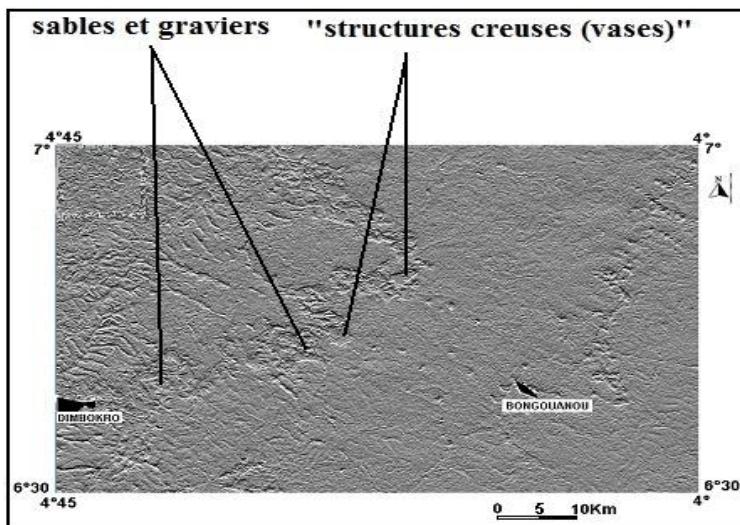


Figure 6 : Rapport de bandes ETM + 5 / ETM + 7 filtré

IV-4. Identification et caractéristiques des formations du recouvrement

Les sables fluviatiles sont observés dans la vallée du N'Zi au Sud de Dimbokro et au Sud de Bengassou. Dans la vallée de la Mandia, ils sont présents à Aérokro. A Dida-Moessou (environnement granitique affleurant), le matériau arénacé (*Figure 7*) est caractérisé par une granulométrie fine (inférieure au millimètre). Les grains sont anguleux, peu émoussés et généralement mats avec une faible proportion (< 5 %) de grains luisants (transport insignifiant du matériau). Le dépôt s'est fait en vrac. Constituant un relief en hauteur isolé dans la vallée du N'Zi, la colline qui surmonte le village de Golikro est une ancienne terrasse. Elle est constituée de graviers dont la cohésion est assurée par du matériau argileux moyennement riche en fer. Les parties hautes se sont transformées à la faveur de l'induration en cuirasse ferrugineuse. Ce matériau dont le diamètre moyen est compris entre 2 cm et 4 cm, est bien classé (équigranulaire). Il comporte néanmoins des pierres et des blocs (boulders) en faible proportion. Les observations de terrain ont largement confirmé les délimitations faites à partir de l'exploitation de l'image satellitaire. Les arènes sont localisées au Nord-Ouest (dans le voisinage de la Mandia) et à l'Ouest. Les formations alluviales occupent tout le voisinage du N'Zi ainsi que le Centre-Ouest et le Sud-Ouest. Au sein de ces formations, les vases sont uniquement localisées dans le voisinage du N'Zi. Aucune formation alluviale significative n'est révélée dans la partie Est de la zone d'étude. Cette zone est pourtant caractérisée par un important réseau hydrographique. Les latérites et les argiles constituent les formations qui sont observées à l'Est et dans les zones où les expressions des formations alluviales et des arènes granitiques

sont nulles. En effet, ces formations étant les principales unités de recouvrement en région intertropicale, elles ne peuvent s'exprimer sous forme de discordance dans le paysage géologique au sein des images [11]. C'est ainsi que toutes les zones sans expression discordantes ont été assimilées aux latérites et aux argiles.



a) Arène de Dida-Moessou

b) Gravier bien classé de Golikro

Figure 7 : Produits de l'altération météorique, a) arène de Dida-Moessou, b) gravier bien classé de Golikro

V - DISCUSSION

La distinction à partir des rapports de bandes des matériaux à très fine granulométrie et des matériaux grossiers a été faite. Cet aspect des travaux est une importante avancée car il permet de distinguer les anciennes terrasses alluviales qui aujourd’hui constituent des reliefs en hauteur (Golikro) des alluvions récentes. Une autre avancée des résultats obtenus est que la latérite et les formations associées (les argiles) ont été identifiées par élimination. En effet, la méthode appliquée s'est contentée de mettre en évidence toutes les formations de recouvrement à l'exception des latérites. Ce fut un choix volontaire car les latérites constituent l'essentiel du recouvrement en région intertropicale sous couvert végétal relativement important [12]. De plus elles sont caractérisées par une variabilité qui a conduit à les classifier en fonction de la nature du substratum [13]. L'une des raisons qui a suscité la cartographie des formations superficielles est le rôle important qu'elles ont dans la révélation des gîtes primaires. A ce sujet, il est opportun de rappeler qu'uniquement les latérites sont disposées à fournir des informations sur le

potentiel du substratum car elles constituent des dépôts *in situ*. A ce titre, la cartographie des dites formations a montré qu'elles occupent au moins 60 % de la superficie de la région d'étude. Cette situation offre à la prospection de rechercher le potentiel en sol qui est l'une des principales étapes sur une superficie significative. Par conséquent, un plus grand nombre de pièges peuvent être testés. Par la même occasion, l'excellente délimitation des arènes qui sont des formations qui n'est pas matérialisée sur la carte géologique de [5] permet l'éviction de ce matériau *in situ* qui ne peut toutefois pas être riche dans le contexte géologique du Baoulé-Est [14]. Les alluvions ne peuvent pas être placés dans le même cas de **Figure**. En effet, ils ont été en partie cartographiés par [5] le long du N'Zi. L'apport au niveau de l'étude est qu'ils sont observés au-delà du voisinage du N'Zi, précisément dans le Centre-Ouest et le Sud-Ouest.

VI - CONCLUSION

Il ressort de cette étude les faits marquants ci-après présentés. Les arènes granitiques occupent le Nord-Ouest. Les alluvions sont localisés dans le lit majeur du N'Zi. Elles représentent des sites présentant un obstacle pour l'écoulement. Elles occupent des espaces moins importants que le laissent supposé l'ancienne cartographie géologique. Au sein des alluvions la discrimination entre les vases et les sables a été possible grâce à la différence d'humidité qui les caractérise. Cartographier volontairement par élimination, les latérites et les argiles occupent 90 % de la zone d'étude. C'est un atout important pour la prospection géochimique dont il est l'objet le plus significatif à cause du lien direct qu'il a avec le socle. Les anciennes terrasses anciennes de Golikro ont été circonscrites. Elles occupent la terre ferme tandis que les alluvions récentes sont disposées dans la vallée large du N'Zi. Cette étude peut être renforcée par une ségrégation au sein des formations du recouvrement de la latérite (témoin d'une information proximale) et des argiles (témoins d'une information distale). Le challenge consisterait à révéler leurs différentes signatures spectrales par des procédés d'étalement, vu que leurs réflectances sont proches.

RÉFÉRENCES

- [1] - B. BESSOLES, Géologie de l'Afrique : le craton Ouest-africain, Mém. BRGM, France, N°88, (1977) 403 p.
- [2] - F. SABINS, Exploration proceeding 84. Remote sensing processing, (1984) 400 p.
- [3] - J. TRICART, J. TRAUTMAN et F. BONN, La télédétection appliquée à la géomorphologie continentale et aux systèmes d'écologie

- géographiques. Précis de télédétection. Applications thématiques, Vol. 2, (1996) 59 - 89 p.
- [4] - J. P. DEROIN, J. CHOROWICZ, A. L. G. TAMAIN, T. DEROIN, PH. DUTARTRE, J. F. MALON et J. Y. SCANVIC, Combinaison d'images de télédétection et de données exogènes pour la compréhension géologique des paysages. Application à la cartographie lithologique et à l'analyse structurale en pays Cevenol (massif central français), Bulletin de la Société française de photogrammétrie et de télédétection, N°122, (1991) 53 - 57 p.
 - [5] - C. DELOR, Y. SIMEON, A. KOUAMELAN, J. J. PEUCAT, Persistance de processus archaïques de création crustal au birimien (Paléoprotérozoïque) en Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest), Réunion des Sciences de la Terre. S. G. Fr., N°10, (1995).
 - [6] - B. TAGINI et M. GOBERT, Carte géologique de la Côte d'Ivoire – SODEMI, (1972).
 - [7] - I. YACE, Initiation à la géologie : l'exemple de la Côte d'Ivoire et de l'Afrique de l'Ouest, SODEMI, CEDA, (2002) 183 p.
 - [8] - J. P. LACOMBE, Initiation au Logiciel ENVI 3.2. Télédétection spatiale. Cahier de travaux dirigés. Ecole Normale Supérieure Agronomique de Toulouse, (2001) 87 p.
 - [9] - M. GONZALES, Digital image processing, Wesley publishing company, (1993) 716 p.
 - [10] - M. SAAIDI, Combinaison de données multi-sources pour l'étude structurale du bassin de Guercif. Liens structuraux avec le moyen atlas (Maroc), Photo-interprétation, N°1996-3/4, (1996) 89 - 98 p.
 - [11] - J. Y. SCANVIC, Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre. Bureau de recherches géologiques et minières, Manuel et méthodes, N°7, (1983) 40 p.
 - [12] - A. COTONNEC et *al*, Approche par télédétection et cartographie des espaces sahéliens mauritaniens. CFC, N° 207, (2011) 20 p.
 - [13] - J P. FAILLAT, Hétérogénéité et effet d'échelle dans les aquifères fissurés. Approches par pompages d'essai sur station expérimentale (Afrique de l'Ouest), BRGM, Hydrogéol, N°1, (1986) 65 - 76 p.
 - [14] - B. TAGINI, Esquisse structurale de la Côte-d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale. Thèse de l'Université Lausanne (Suisse). Bull., SODEMI, N° 5, (1971) 302 p.
 - [15] - IVOIREGEO, Côte d'Ivoire géographie. www.africanchess.com, (2002).