Télédétection, 2004, vol. 4, n° 3, p. 277–288

© 2004 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*

CONTRIBUTION DE LA TÉLÉDÉTECTION À LA RECHERCHE DE GISEMENT D'OR DANS LA RÉGION D'ANGOVIA EN CÔTE D'IVOIRE

KOUADIO AFFIAN[a], FULGENCE BROU ANOH[a], ÉRIC VALÈRE DJAGOUA[a], MARC ROBIN[c], MARIE CHRISTINE AZAGOH[a], PIERRE N'GUESSAN[b], FERNAND KOUAMÉ[a], MAHAMAN BACHIR SALEY[a] et JEAN BIÉMI[a]

[a] *Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), Unité de Formation et de Recherche en Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, 22 B.P. 582, Abidjan 22, Côte d'Ivoire. Téléphone : (225) 22 44 52 70 ; télécopie : (225) 22 44 35 00 Courriel : k_affian@yahoo.fr*

[b] *CMA Compagnie Minière d'Afrique, 08 B.P. 872, Abidjan 08, Côte d'Ivoire. Téléphone : 225 22 44 63 63*

[c] *Université de Nantes, UMR-CNRS 6554 LETG-Géollitomer, B.P. 81227, 44312 Nantes cedex 3 (France). Téléphone : 33 02 40 14 11 59*

(soumis : 9 mars 2004 ; révisé : 11 mai 2004 ; accepté 18 août 2004)

L'utilisation de la télédétection préconisée dans cet article vise à orienter les prospecteurs vers des zones susceptibles de contenir des concentrations intéressantes de minerais d'or dans la région d'Angovia, en Côte d'Ivoire. La démarche a consisté à retrouver les directions de fractures et les zones de relais de fracture (N-S et NNE-SSO) qui conditionnent la minéralisation de l'or et à mettre en rapport ces directions, avec les anomalies de concentration géochimique de l'or dans le sol. À l'aide de techniques de traitement numérique, de rehaussement et de filtre de SOBEL appliquées à une image HRV(P) de SPOT, la fracturation fine de la région d'Angovia a été mise en évidence. En plus des directions sub-méridiennes, il a été souligné en particulier la présence de directions de fracture orientées 40-70°, 100-120° et 150°-170°. Ce résultat contribue à améliorer la connaissance structurale de la zone d'Angovia. L'incorporation dans un système d'information géographique de données de terrain, telles que le réseau de fractures et les anomalies géochimiques, a permis d'identifier 15 sites prometteurs dans la région d'Angovia. Parmi ces 15 sites, 2 semblent être particulièrement intéressants.

Mots-clefs : télédétection ; S.I.G. ; or ; recherche minière ; Côte d'Ivoire.

CONTRIBUTION OF REMOTE SENSING IN MINING RESEARCH OF GOLD IN THE AREA OF ANGOVIA IN IVORY COAST

The use of remote sensing aims at guiding prospectors into aereas susceptible of containing important concentation of mineral deposits in Angovia sector. The methodology used consisted of finding fractures and fracture directions (N-S and NNE-SSW) that govern gold mineralisation in the Angovia sector and then relating these directions to geochemical anomalies of gold. With the help of numerical techniques, notably image enhancement and the application of SOBEL filter to a panchromatic SPOT image, the fractures of Angovia sector were enhanced. It was highlighted in particular, in addition to the sub-meridian directions, the following fracture directions (40-70°, 100-120° and 150-170°). This result contribute to improve the structural knowledge of the Angovia zone. The incorporation into GIS system of field data (measurements of fractures and geochemical anomalies) allowed to identify 15 sites of which 2 appear to be promising zones of gold mineralization.

Keywords : Remote sensing ; GIS ; gold ; mining research ; Ivory Coast.

1. INTRODUCTION

Soucieuse de diversifier son économie, la Côte d'Ivoire a entrepris depuis peu de mettre un accent particulier sur l'exploitation des richesses de son sous-sol. Le CURAT (Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection) a apporté sa contribution à cet effort, en définissant un axe de recherche en rapport avec la recherche minière. L'axe de recherche est basé sur des outils modernes de la télédétection et les systèmes d'information géographiques. Cet article, qui est le fruit de la collaboration scientifique entre la C.M.A. (Compagnie Minière d'Afrique) et le CURAT, concerne la région d'Angovia située dans le centre de la Côte d'Ivoire (figure 1). Dans cette région, une

mine d'or à ciel ouvert a été mise en exploitation par la C.M.A. depuis 1998. L'objectif affiché est de retrouver des zones de concentration intéressantes pour permettre à la C.M.A. d'étendre ses activités dans ces zones, une fois que la première mine en activité sera fermée. Pour ce faire, nous nous sommes basés de façon générale sur les travaux réalisés dans le domaine de la géologie en Côte d'Ivoire et, en particulier, sur les connaissances géologiques acquises sur le site actuel pour l'exploitation de l'or.

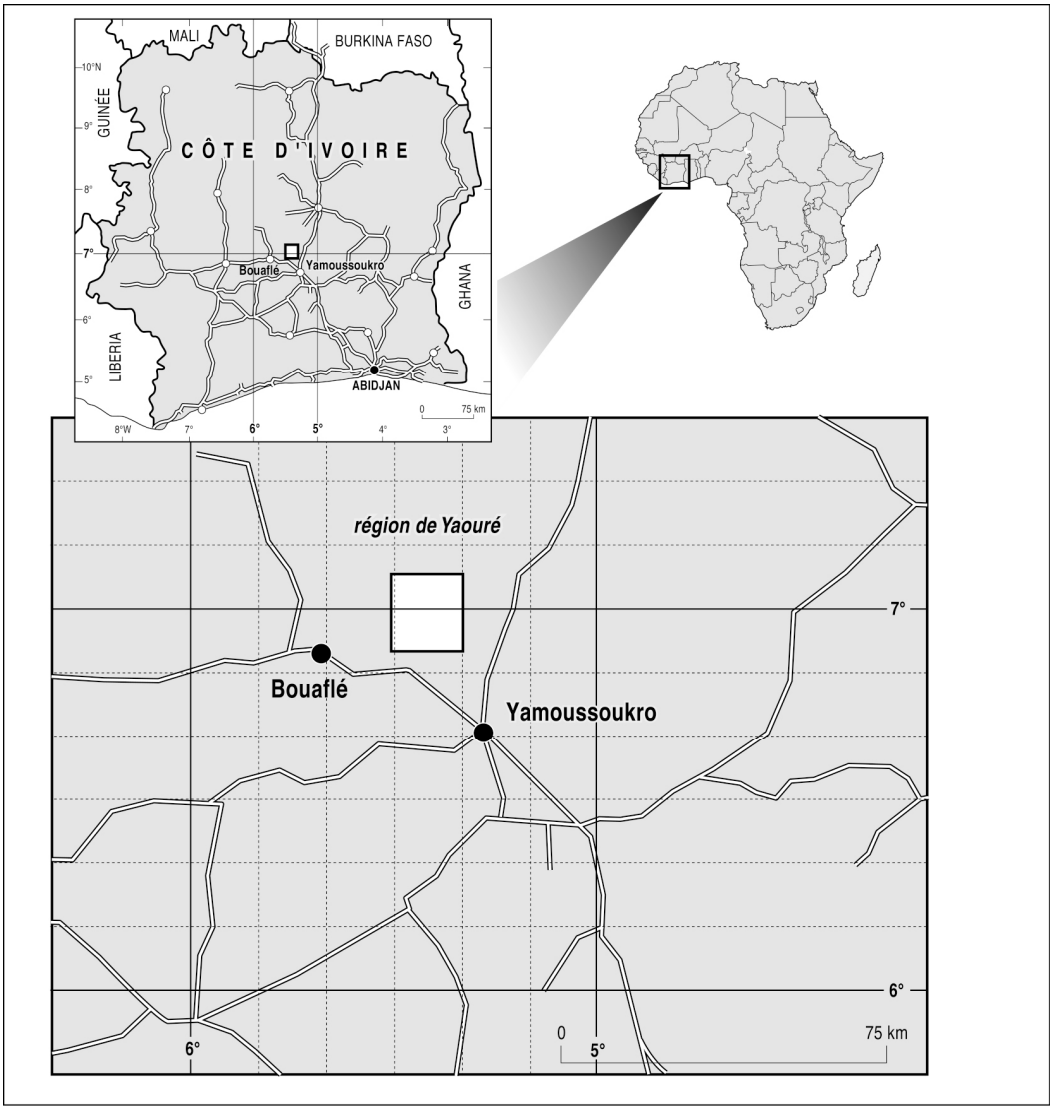


FIGURE 1 Localisation de la région d'étude. *Location of the study area.*

Sur le plan géologique, la Côte d'Ivoire fait partie du craton ouest-africain (Bessoles, 1977). Les formations géologiques de la Côte d'Ivoire sont très inégalement réparties. En effet, on note la présence d'un socle d'âge précambrien (Roques, 1948 ; Tagini, 1971 ; Tagini et Gobert, 1981 ; Vidal, 1987 ; Pothin, 1988 ; Biémi,1992 ; Kouamélan, 1996 ; Yacé, 1977, 2002) qui représente 97,5 % du territoire. Les 2,5 % de la superficie du territoire restant sont constitués par les formations du bassin sédimentaire d'âge secondaire-tertiaire. En forme de croissant, ce bassin sédimentaire est plaqué en bordure de l'océan Atlantique (Archambault *et al.*, 1951a et 1951b ; Spengler et Delteil, 1966 ; Martin, 1973 ; Baldi-beke *et al.*, 1987 ; Tastet, 1979 ; Simon et Amakou, 1984 ; Blarez, 1986 ; Affian, 1986 ; Digbehi, 1987 ; Aka, 1991).

La lithologie du socle reflète la variété des formations que l'on rencontre à travers le pays. Les grandes unités lithologiques rencontrées sont issues des trois cycles orogéniques suivants : le Léonien (3 500-2 900 Ma), le Libérien (2 900-2 500 Ma) et l'Éburnéen (2 500-1 500 Ma). Les cycles léonien et libérien sont formés de roches cristallines et cristallophylliennes alors que le cycle éburnéen, qui affecte les formations birrimiennes, est formé de roches cristallines et méta-volcano-sédimentaires.

Dans le bassin sédimentaire, les formations qui affleurent appartiennent en grande partie au Continental terminal qui est attribué au Mio-Pliocène. On rencontre également quelques rares affleurements de dépôts marins plus anciens, d'âge Crétacé supérieur, Paléocène ou Éocène et, enfin, de sables quaternaire en bordure du littoral. La lithologie de ces formations sédimentaires est composée pour l'essentiel d'argiles, d'argiles sableuses, d'argiles bariolées, de sables, des sables argileux, de grès et de graviers.

Dans la région du Yaouré, on rencontre les formations birrimiennes qui sont caractéristiques du cycle éburnéen (Fabre *et al.*, 1990 ; Fabre et Morel, 1993 ; Feybesse, 2000). Les affleurements sont constitués pour l'essentiel de métagabbro, d'amphibolite, de granodiorite, de méta-arénite et de schiste (figure 2). La pétrographie des roches rencontrées dans quelques monts de la région du Yaouré est décrite par Fabre *et al.* (1990), Fabre et Morel (1993) et Feybesse (2000) comme des roches vertes massives, à grains très fins, parcourues de *filonnets* de calcite, de chlorite et d'épidote. Les faciès à grains moyens et à structure ophitique encore reconnaissables sont finement pyriteux et légèrement carbonatés, avec des passées particulièrement riches en minéraux ferroma-gnésiens.

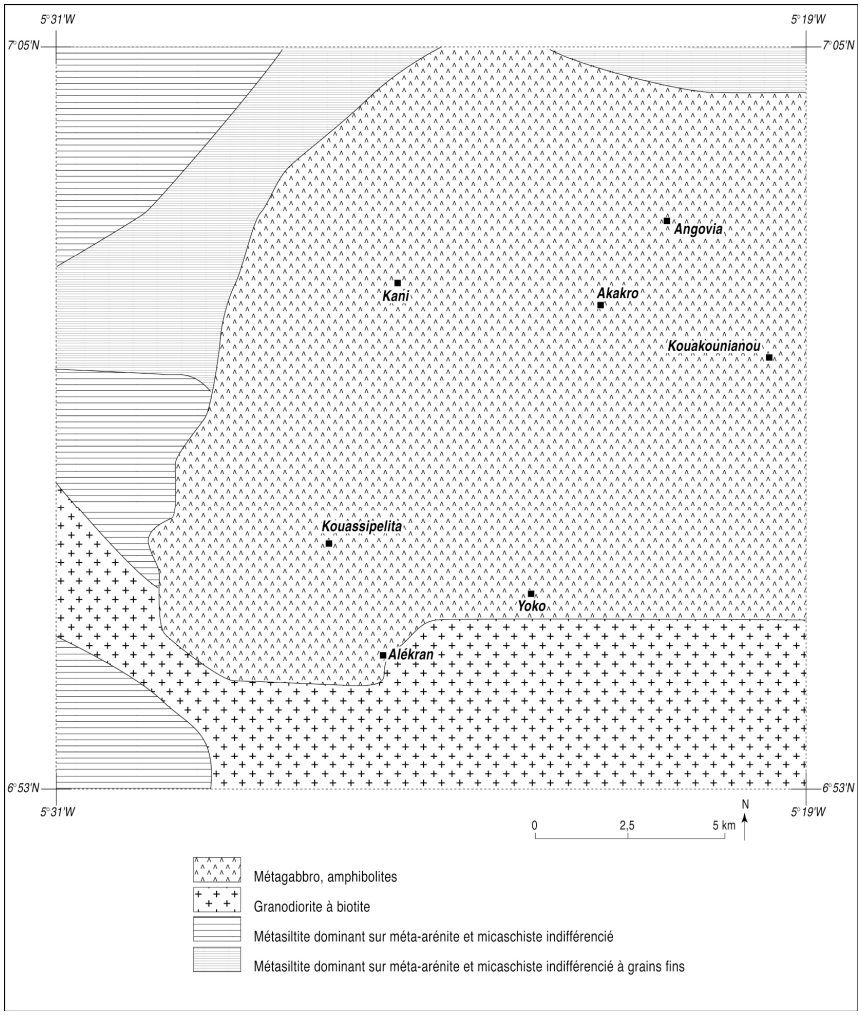


FIGURE 2 Carte géologique du site de l'étude. *Geological map of the study area.*

Dans le cas de la mine en activité, Feybesse (2000) a décrit les différents indices qui signalent la présence du minerai d'or. Il a noté que l'or se concentre dans les fractures qui varient de la direction N-S à la direction NNE-SSO (zone de relais de fracture). La présence du minerai d'or se signale également par une anomalie géochimique qui se traduit par une concentration élevée en or (> 2 g/t) dans les échantillons de sédiments. Cet or se rencontre enfin dans les altérites et les filons de quartz injectés dans les fractures).

L'hypothèse retenue dans la présente recherche s'appuie sur le fait que la zone faisant l'objet de la recherche étant située dans le même environnement géologique que la mine en exploitation, l'on peut s'attendre à rencontrer une même concentration d'or dans les mêmes conditions. Il s'agit donc de rechercher des zones où tous les critères qui indiquent la présence du minerai d'or déjà identifiés dans la mine en exploitation sont réunis.

Les outils d'analyse utilisés sont la télédétection et le système d'information géographique. Le premier, pour sa capacité de vision synoptique et sa possibilité d'analyse des directions structurales, et le second pour la possibilité de croisement des informations géoréférencées. La combinaison de ces deux méthodes pourrait permettre de déterminer des zones cibles, favorables à la présence de minerai d'or.

2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

La région d'Angovia appartient à l'unité du Yaouré, située au centre de la Côte d'Ivoire, dans la sous-préfecture de Bouaflé. Le secteur d'étude est compris entre les latitudes 6°53' et 7°05' nord et les longitudes 5°19' et 5°31' ouest (figure 1).

La végétation est de type savane et forêt-galerie fortement dégradée. Cette dégradation est due à la pratique de l'agriculture extensive par les populations locales qui s'adonnent à la culture du café, du cacao, de l'igname et de la banane. Le relief est constitué de plaines et d'un ensemble de collines communément appelé les montagnes du Yaouré. Les altitudes varient entre 180 m et 400 m. L'image HRV(P) de SPOT du site de l'étude, représentée sur la figure 3, montre le contour du lac de Kossou. Cette retenue d'eau artificielle, qui couvre 1 500 km^2, a été conçue pour réguler le débit du fleuve Bandama et permettre la construction, en aval, d'un barrage hydroélectrique. La mise en eau de ce barrage, qui a été réalisée entre 1969 et 1971, s'est faite au prix de 200 villages engloutis et de 75 000 personnes déplacées.

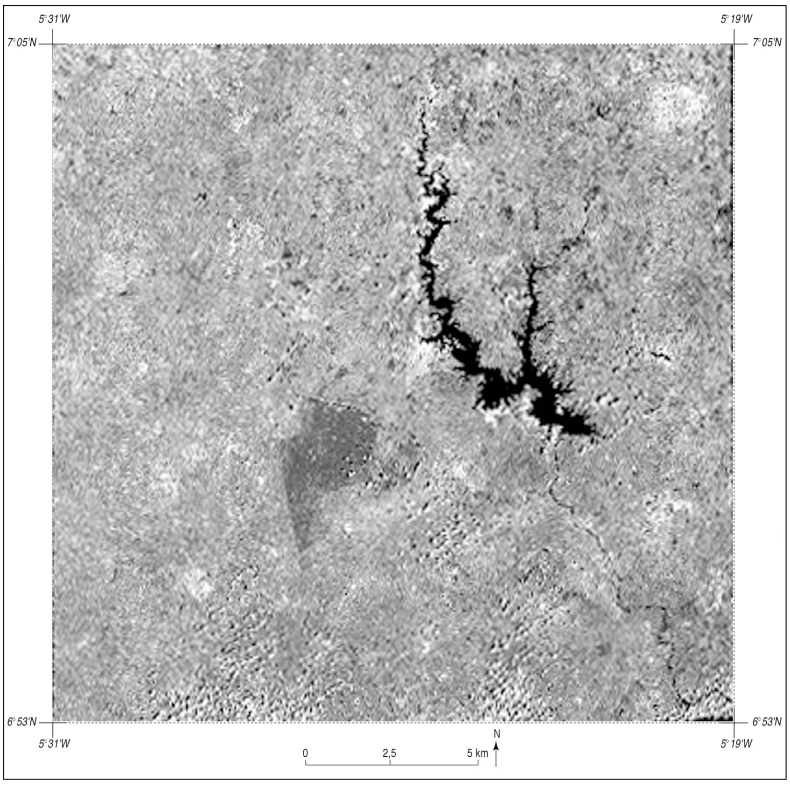


FIGURE 3 Image HRV(P) de SPOT non rehaussée du site d'étude. *Unenhanced SPOT HRV-P image of the study area.*

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Les logiciels EASI PACE de PCI V6.2, LINWIN et MAP-INFO ont servi, respectivement, au traitement de l'image satellitaire, à l'étude de la distribution des différentes directions de fractures et au croisement des informations géoréférencées.

La méthodologie a consisté à prendre en compte les indices qui signalent la présence du minerai d'or (Febeysse, 2000), à savoir les anomalies géochimiques des sédiments (concentration d'or dans les échantillons de sédiments supérieure à 2 g/t), les relais de fracture (passage des directions de fracture du N-S au NNE-SSO), puis à les spatialiser.

La prise en compte des indices énumérés a nécessité la réalisation de nouvelles cartes, notamment les cartes de la fracturation, des zones de relais de fracture et des anomalies géochimiques d'or dans les sédiments. Chacune de ces cartes étant consignée en couche d'information dans un système d'information géographique (SIG), une opération d'intersection a pu s'appliquer à ces couches pour définir les zones de convergence des critères retenus.

L'établissement de la carte de la fracturation s'est appuyé sur l'image HRV(P) de SPOT du 17 mars 1994. Pour ce faire, dans un premier temps, il a fallu réaliser une mosaïque à partir des cartes topographiques au 1/50 000, des feuilles de Bouaké (NB-30-XIX-2a, NB-30-XIX-1b) et de Gagnoa (NB-30-XIII-3d) afin d'extraire la zone d'étude (figure 3). Ensuite, une correction géométrique de l'image a été réalisée à partir de points de calage extraits des cartes topographiques. Ces points de calage s'appuient sur les confluences des cours d'eau et les points de rencontre entre les routes et le réseau hydrographique. La difficulté à faire coïncider le même point repéré à la fois sur l'image et sur les cartes topographiques conduit à produire des erreurs résiduelles après les opérations de correction. À l'issu des corrections géométriques effectuées, l'erreur résiduelle relevée est de 5 m, ce qui équivaut à un demi pixel pour une image HRV(P) qui a une résolution de 10 m.

Pour obtenir les linéaments orientés dans toutes les directions de la zone d'étude, des filtres directionnels N-S, E-O, NE-SO, NO-SE ont été appliqués sur l'image HRV. La numérisation manuelle à l'écran a permis le relevé de toutes les discontinuités linéaires qui apparaissent dans la texture de l'image. Des campagnes de terrain au cours desquelles la position au GPS et la direction des fractures, des joints et de diaclases ont été relevées ont permis d'affirmer l'origine tectonique des linéaments qui ont été sélectionnés sur la carte finale.

Les travaux de Febeysse (2000) ayant montré que le corps minéralisé de la mine d'Angovia a une longueur de 1 700 m, au cours de cette étude, on a effectué un carroyage de la zone d'étude selon un maillage carré de 2 km de côté pour tenir compte de la dimension du corps minéralisé présent dans la mine en exploitation. À l'intérieur de chaque maille carrée ainsi obtenue, ont été établies des rosaces de direction des fractures recensées. Cette approche permet de déterminer spatialement les familles de fractures dont les directions varient en définissant « des zones de relais ». Ici, les zones de relais recherchées sont les endroits où les fractures ont des orientations qui passent de la direction N-S à la direction NNE-SSO.

Les anomalies géochimiques ont été obtenues au moyen du traitement des échantillons de sédiments. Ce traitement a consisté en l'analyse chimique des échantillons de sédiments prélevés par la C.M.A. selon un maillage de 50 m. L'analyse de l'or cyanurable a été faite par absorption atomique grâce au spectrophotomètre Varian AS 55.

4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

Les résultats des différentes analyses effectuées sont présentés sous forme de carte. La superposition de ces cartes opérée dans un SIG, permet de déterminer les zones susceptibles de contenir du minerai d'or.

4.1. Carte des linéaments

Les filtres directionnels de Sobel (N-S, E-O, NE-SO et NO-SE) appliqués à l'image satellitaire ont permis de produire les images des figures 4 à 7.

Le relevé manuel à l'écran des linéaments mis en évidence par les filtres directionnels a servi à la réalisation de la carte de la fracturation présentée sur la figure 8. Le report des directions de ces fractures sur une rosace de direction (figure 9), montre que les directions N-S, 10°-20°, 40°-50°, 60°-70°, 100°-120° et 150°-170° sont les plus fréquentes.

Pour confirmer l'origine tectonique ou structurale des linéaments mis en évidence sur l'image HRV, des missions de terrain ont été réalisées pour effectuer des mesures des caractéristiques des différents éléments structuraux observables sur les affleurements. Il a été ainsi noté que, sur les affleurements, la direction N 0°-20° correspond à la fois à des directions de fracture, de schistosité de fractures et de filons de quartz. La direction N 45°-50° correspond à des couloirs de cisaillement senestres qui entraînent souvent des fractures et des schistosités de crénulation. La direction N 160°-170° correspond à des couloirs de cisaillement senestres sur certains affleurements et dextres sur d'autres affleurements. La direction N 90°-120° est celle des

fractures remplies en quelques endroits par de l'aplite. Ces fractures sont recoupées par les cisaillements N 45°-50° et N 160°-170°.

Ces résultats montrent que les directions majeures mises en évidence sur l'image HRV(P) se retrouvent bien sur le terrain.

La carte des fractures qui se trouve ainsi validée par des mesures de terrain (mesure de directions de faille, de filons de quartz, de diaclases et de joints) montre que la zone d'étude apparaît plus fracturée que ne le suggère les travaux antérieurs (Fabre et Morel, 1993). Ces fractures affectent indifféremment toutes les formations géologiques présentes.

En définitive, bien que fastidieux, le relevé à l'écran des linéaments apparaît comme un moyen efficace pour la mise en évidence des réseaux de fracture dans la région d'Angovia.

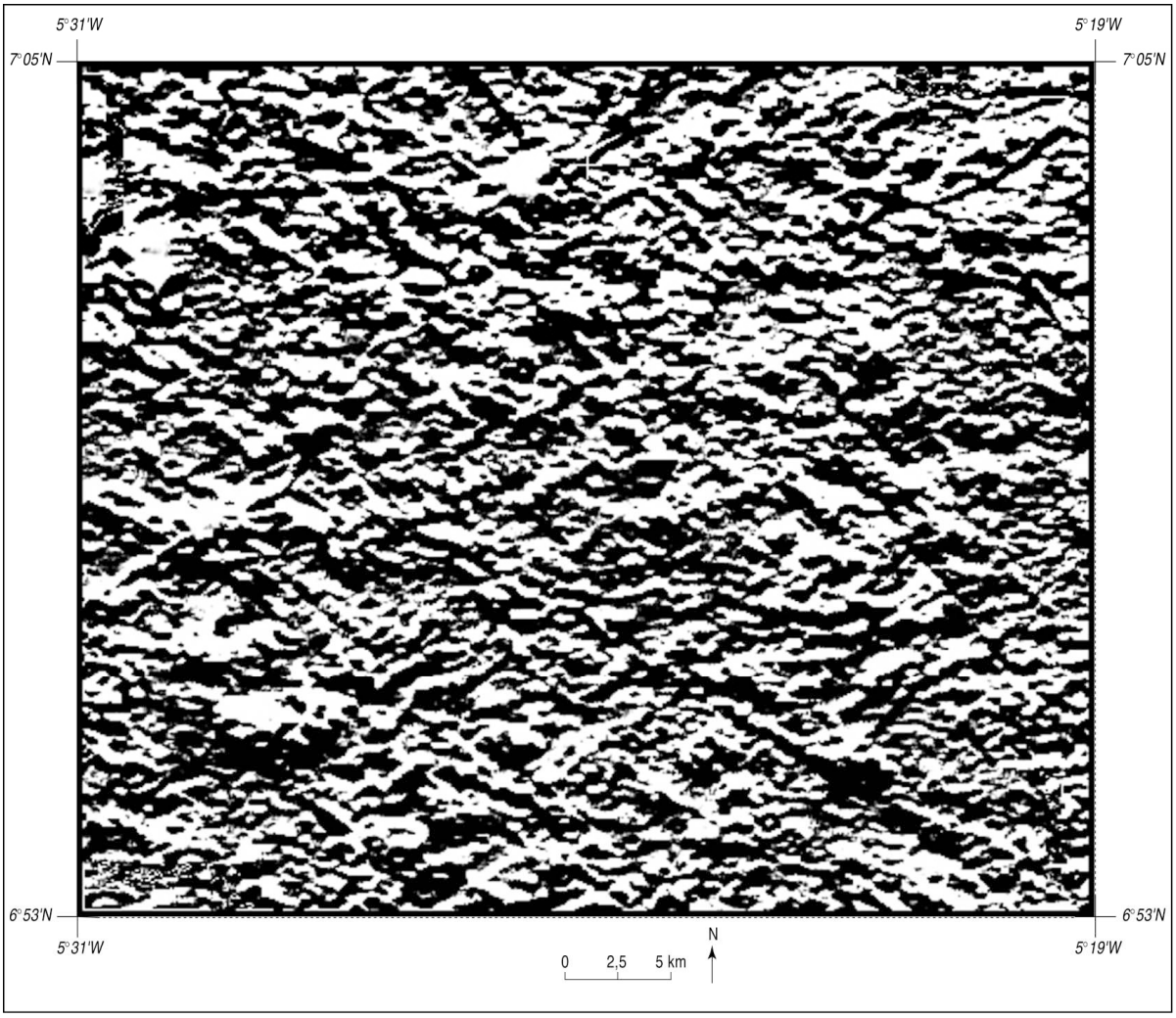


FIGURE 4 Filtre directionnel de Sobel N-S, avec une matrice de 7 × 7, permettant de rehausser les discontinuités-images dans la direction E-O. *Image enhanced with a 7 × 7 Sobel N-S filter showing image discontinuities in the E-W direction.*