Télédétection, 2006, vol. 6, n° 2, p. 103-121
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

CONTRIBUTION DES IMAGES D'ASTER DE TERRA ET D'UN MODÈLE NUMÉRIQUE D'ALTITUDE À LA CARTOGRAPHIE MORPHOSTRUCTURALE DU MASSIF DES TOURA (OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE)

Koffi Fernand KOUAMÉ[1,2], Marie Josée PENVEN[2], Boyossoro Hélène KOUADIO[1], Mahaman Bachir SALEY[1] et Céansiet Célin GRONAYES[3]

1) Centre universitaire de recherche et d'application en télédétection (CURAT),
U.F.R des Sciences de la Terre et des ressources minières,
Université de Cocody, 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.
Téléphone télécopieur : + (225) 22-445-270
Courriel : kouamef@yahoo.fr ; saley@caramail.com ; kbhel@yahoo.fr

2) Laboratoire climat et occupation du sol par télédétection (COSTEL),
UMR 6554 CNRS, Université de Rennes 2,
Place du Recteur Henri Le Moal, 35 043 Rennes Cedex, France.
Téléphone : + (33) 0 299-141-844
Courriel : marie-josee.penven@uhb.fr

3) Laboratoire de géologie du socle et de métallogénie,
U.F.R des Sciences de la Terre et des ressources minières,
Université de Cocody ; 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.
Téléphone / télécopieur : + (225) 22-443-500
Courriel : gronayes.ceansiet@caramail.com

Soumis le 16 février 2005 ; révisé le 21 décembre 2005 ; accepté le 16 octobre 2006

L'exploitation des images d'ASTER de Terra, d'un modèle numérique d'altitude (MNA) et des variables morphométriques dérivées a permis de faire la cartographie morphostructurale du massif des Toura (ouest de la Côte d'Ivoire). Les divers traitements appliqués aux images d'ASTER, notamment l'analyse en composantes principales, les rapports de bandes, la fusion de données et le filtrage spatial et directionnel ont produit des informations litho-structurales, qui ont été couplées à l'analyse morphométrique du MNA. La caractérisation de l'environnement géologique sur les bandes du proche-infrarouge et de l'infrarouge moyen a permis de discriminer les massifs charnockitiques intrusifs dans les gneiss gris, grâce à un contraste de tonalité et de texture (irrégularités de surface), développé dans la zone de contact. Pour l'identification des discontinuités morphostructurales, les bandes de l'infrarouge moyen d'ASTER ont montré particulièrement leur bonne aptitude pour l'extraction linéamentaire. Le réseau de fractures, identifié et validé par les travaux antérieurs et les levés de terrain, se répartit entre les orientations N 00-20°, N 60-80° et N 110-120° qui se recoupent par endroits, pour créer des morphostructures trigonales et polygonales. Plus à l'est, à proximité du grand couloir de cisaillement du Sassandra, les failles E-O sont déviées vers le sud de 60° pour prendre une orientation N 140-160°. L'utilisation conjointe des images d'ASTER et d'un MNA, ainsi que la visualisation 3D ont permis d'affiner les connaissances structurales du massif des Toura en apportant un complément à l'inventaire des failles, surtout dans le secteur nord, où très peu de failles ont été cartographiées dans les travaux antérieurs.

Mots clés : ASTER, MNA, cartographie morphostructurale, fracturation, massif des Toura, Côte d'Ivoire

THE CONTRIBUTION OF TERRA ASTER IMAGERY AND A DIGITAL ELEVATION MODEL TO THE MORPHOSTRUCTURAL MAPPING OF THE TOURA RANGE (WESTERN CÔTE D'IVOIRE)

Using ASTER images from Terra and a Digital Elevation Model (DEM) with its generated morphometric variables allowed the morphostructural mapping of the Toura range (Western Côte d'Ivoire). ASTER imagery enhancement procedures included principal components analysis, band ratios, data merging and spatial and directional filtering methods, which produced lithological and structural information that were combined with the morphometric analysis of the DEM. The characterization of the geological environment with VNIR and SWIR bands allowed the discrimination of the charnockitic rocks that intruded the gray gneisses, thanks to a change in tone and texture (body irregularities), along the contact area. For the morphostructural feature mapping, the SWIR ASTER bands particularly showed their capability for lineament extraction. The fracture network, identified and confirmed by earlier studies and field surveys, is distributed in the N 00-20°, N 60-80° and N 110°-120° directions. These intersect in several areas and form particular morphostructures that have trigonal and polygonal shapes. In the Eastern part, near the Sassandra major shear zone, the east-west faults are deviated by 60° to the south taking a 140-160° orientation. The joint use of ASTER images and the DEM as well as 3D representation improved the knowledge of the Toura range structural context, by completing faults inventory, especially in the north, where very few fractures were mapped in previous work.

Key-words : ASTER, DEM, mophostructural mapping, fracturing, Toura range, Côte d'Ivoire

1. INTRODUCTION

La cartographie litho-structurale dans la région semi-montagneuse, située à l'ouest de la Côte d'Ivoire, est rendue difficile à cause du relief, du couvert végétal dense et de l'épais manteau d'altérites surmontant le substratum rocheux. À l'échelle régionale, les travaux de cartographie géologique réalisés, ne font ressortir que très peu de failles (Tagini, 1971 ; Direction de la Géologie, 1995 ; Kouamélan, 1996). Cependant, les travaux de caractérisation pétrographique et structurale, réalisés au niveau des massifs charnockitiques et gneissiques des Toura par Camil et al. (1984), ont permis de relever un réseau de failles plus dense. À l'échelle des affleurements, les observations de terrain permettent de se rendre compte que le réseau de fractures est très dense.

Dans les régions d'accès difficile, la télédétection (optique ou radar) se présente comme un moyen incontournable pour l'établissement et l'actualisation des cartes litho-structurales. La diversité des capteurs satellitaires et leurs caractéristiques techniques (résolutions spatiale, spectrale et temporelle) permettent de disposer d'informations complémentaires qu'il est possible de combiner à des données provenant d'autres sources (Sabins, 1987).

Dans l'ouest de la Côte d'Ivoire, les premiers travaux d'interprétation géologique utilisant des données de télédétection ont été réalisés par Azuelos *et al.* (1978). Ceux-ci ont interprété des photographies aériennes en combinaison avec de la réalité de terrain afin d'élaborer la carte photogéologique de Man à l'échelle de 1 : 200 000. Depuis 1995, l'utilisation des images HRV de SPOT (Biémi *et al.*, 1998) dans le secteur de Biankouma-Man et TM de Landsat (Kouamé *et al.*, 1999) dans le secteur de Man-Danané ont permis d'établir des cartes linéamentaires détaillées, exploitées dans la caractérisation hydrogéologique des réservoirs fracturés de l'ouest de la Côte d'Ivoire (Kouamé, 1999 ; Lasm, 2000).

Depuis 1999, le capteur multibandes ASTER du satellite Terra offre une gamme variée de résolutions spatiales (15 m, 30 m et 90 m) et spectrales (PIR, IRM et IRT) pouvant servir aux applications géologiques (Kahle *et al.*, 1991 ; Fujisada, 1995 ; Yamaguchi *et al.*, 1998). Les données de ce capteur n'ont pas encore été exploitées pour des études géo-structurales du socle archéen de la Côte d'Ivoire, d'où l'intérêt de cette étude.

Dans les régions de montagne, la structuration du relief est contrôlée par divers facteurs, dont les plus importants sont d'ordre physique (nature du substratum et tectonique) et climatique (pluviosité). L'analyse géomorphologique spatialisée (Bonnet et Colbeaux, 1999) est très souvent utilisée afin d'interpréter la structure et le modelé du relief d'une région. Ainsi donc, il est possible d'utiliser le relief pour détecter des discontinuités morphostructurales (Chorowicz *et al.*, 1989 ; Bonnet et Colbeaux, 1999) ainsi que des particularités du réseau de drainage (Deffontaines 2000).

Cet article a pour objectif principal la cartographie des structures géologiques du massif des Toura, à l'ouest de la Côte d'Ivoire. Les images multibandes d'ASTER sont exploitées en synergie avec les données topographiques, notamment un modèle numérique d'altitude (MNA) et les attributs géomorphologiques dérivés tels que la pente, l'estompage, l'orientation des facettes, les courbures et les convexités.

L'analyse des images d'ASTER a pour but d'extraire diverses informations thématiques (lithologie et structure) se prêtant aussi bien à une interprétation visuelle directe qu'à une intégration au MNA et aux variables morphométriques dérivées.

L'exploitation optimale de ces informations multi-sources et multi-échelles pourra contribuer à une meilleure connaissance structurale, à la fois locale et régionale du massif des Toura. D'autres sources d'informations, telles que les données géophysiques (champ magnétique total) et les images radar (RSO d'ERS, d'ENVISAT et de RADARSAT) pourront, dans une perspective de recherche, être intégrées aux résultats acquis pour l'amélioration des connaissances géologiques et structurales de l'ouest de la Côte d'Ivoire.

2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

2.1. Cadre géographique

Le massif des Toura est situé dans la région montagneuse de l'ouest de la Côte d'Ivoire, entre les latitudes 7° 20' et 8° N et les longitudes 7° et 7° 40' O (figure 1a). Le massif doit son appellation à la présence des populations du même nom, occupant cet espace avec les populations Yacouba (deux ethnies du groupe Krou).

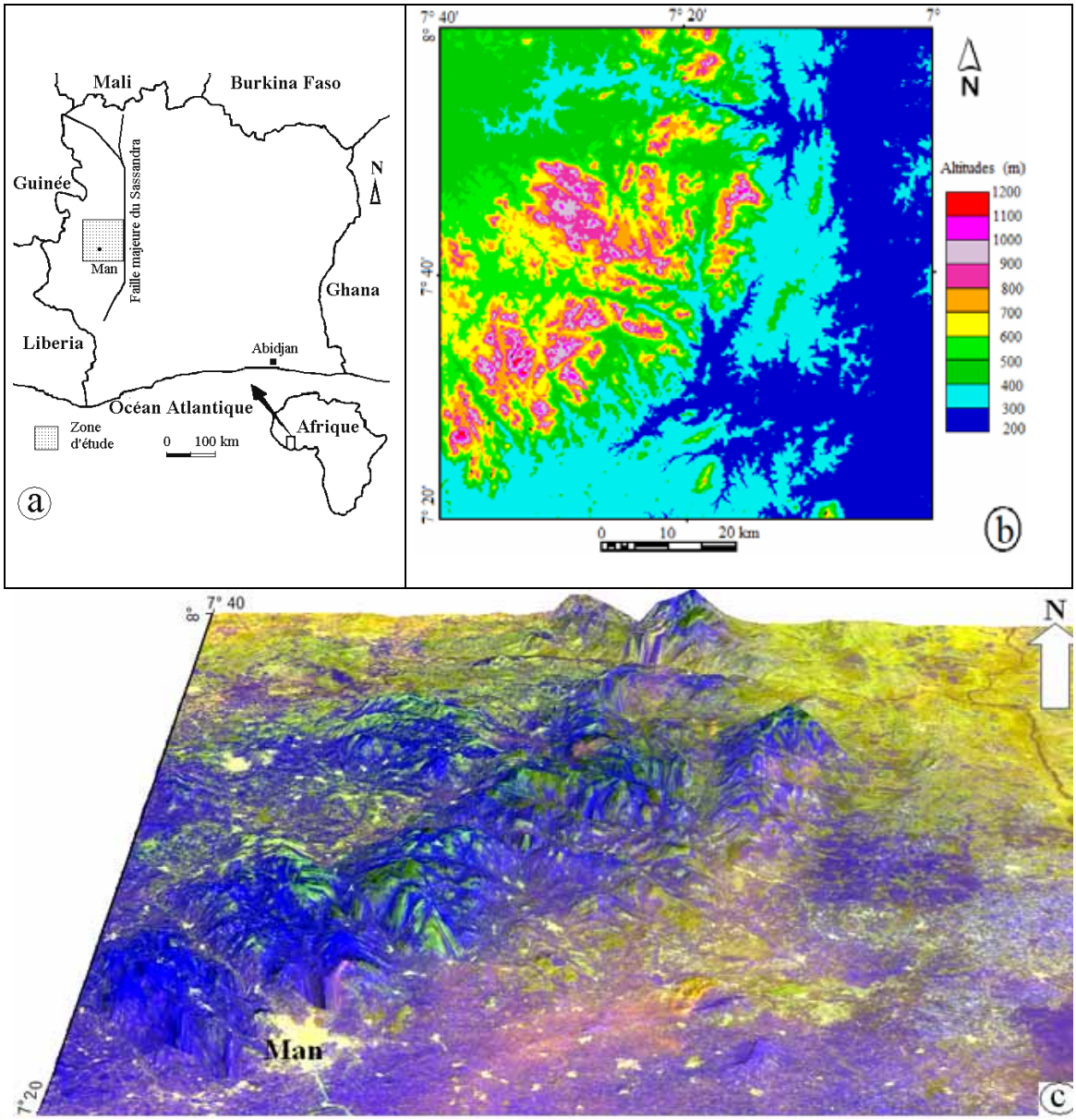


FIGURE 1 : Présentation du massif des Toura : a) situation géographique ; b) carte des altitudes ; c) vue en 3D de la composition colorée des bandes 1, 2 et 3 dans le PIR. *Presentation of the Toura Massif : a) geographical location ; b) elevation map ; c) 3D view of the VNIR 1, 2 and 3 band colour composite*

Le massif des Toura est le prolongement oriental de la chaîne Guinéenne, dont la plus grande partie se trouve en Guinée. C'est le secteur des plus hauts sommets de la Côte d'Ivoire où les massifs ont des formes vigoureuses et des sommets dépassant parfois les 1 000 m (figure 1b) : dent de Man (881 m), Goulan (934 m), Douoton (1 132 m). La dénivelée moyenne est de l'ordre de 900 m. La ville de Man (chef lieu de région) est située au SO, en position de piedmont à une altitude moyenne de 300 m. Constitué de mornes de nature charnockitique et gneissique, alignés selon une orientation N 50-60° E (figure 1c), le massif des Toura est bordé à l'est par la faille majeure d'orientation N-S du Sassandra, au sud par la faille N 70° E de Man-Danané ($F_{M\text{-}D}$), au nord par le fleuve Bafing et à l'ouest par la vallée du fleuve Keugbeu. Ces mornes présentent dans l'ensemble des versants abrupts, affectés par des méga-fractures obliques à sub-verticales s'étendant du sommet à la base.

Le climat est humide (1 600 mm/an) avec deux saisons : une saison des pluies qui dure 8 mois (mars-octobre) et une saison sèche de 4 mois (novembre-février). Les conditions de pluviosité sont propices au développement d'un épais manteau d'altérites et d'une végétation dominée par une forêt dense humide rencontrée, au niveau des aires protégées (du mont Tonkoui, du mont Glas, de Fransobli et du mont Péko), des forêts

sèches, des forêts galeries, des mosaïques forêts-cultures (forêts dégradées).

2.2. Contextes géologique et structural

Le contexte géologique de la Côte d'Ivoire s'intègre à celui du craton ouest africain comme le soulignent les travaux de Tagini (1971), Papon et Lemarchand (1973), Camil (1984), Yacé (1984), Lemoine (1988), Pothin (1988), Kouamélan (1996) et Djro (1998). Situé dans le compartiment méridional du craton ouest africain, le socle précambrien ivoirien (Yacé, 2002) est à cheval sur les deux principaux domaines de la dorsale de Man (Bessoles, 1977), qui sont séparés par la faille majeure d'orientation N-S du Sassandra : à l'ouest le domaine archéen et à l'est le domaine paléoprotérozoïque.

Le massif des Toura appartient au domaine archéen qui a été structuré au cours des mégacylces orogéniques Léonien (3 500-2 900 Ma.) et Libérien (2 900-2 500 Ma.). Ce domaine constitue une vieille plate-forme complexe (Yacé, 2002).

Camil (1984) distingue deux compartiments lithologiques séparés par la faille de Man-Danané d'orientation N 70° E. Le secteur nord est de nature granulitique et le secteur sud de nature anatectique. Kouamélan (1996) complète cette nomenclature en subdivisant le secteur sud en un domaine intermédiaire et un domaine anatectique. La zone intermédiaire correspond à la zone sud de Camil (1984) affectée par la faille de Man-Danané. Le massif des Toura appartient au domaine granulitique nord où les unités lithologiques (figure 2) sont représentées par un ensemble de gneiss gris rubanés injectés de granulites roses à grenat et à hypersthène, des charnockites, des gneiss migmatitiques et un ensemble de quartzites à magnétite comportant des formations associées, dont les diopsidites, les hypersthénites et les ultrabasites (Camil, 1984 ; Kouamélan, 1996). Les charnockites constituent deux massifs associés aux gneiss gris rubanés : le massif de Mangouin de forme sub-circulaire et celui de Man allongé selon une orientation N 60° E sensiblement parallèle à la faille de Man-Danané (Camil, 1984). Les granulites roses forment des lames de puissance variable, sub-concordantes avec le rubanement des gneiss gris.

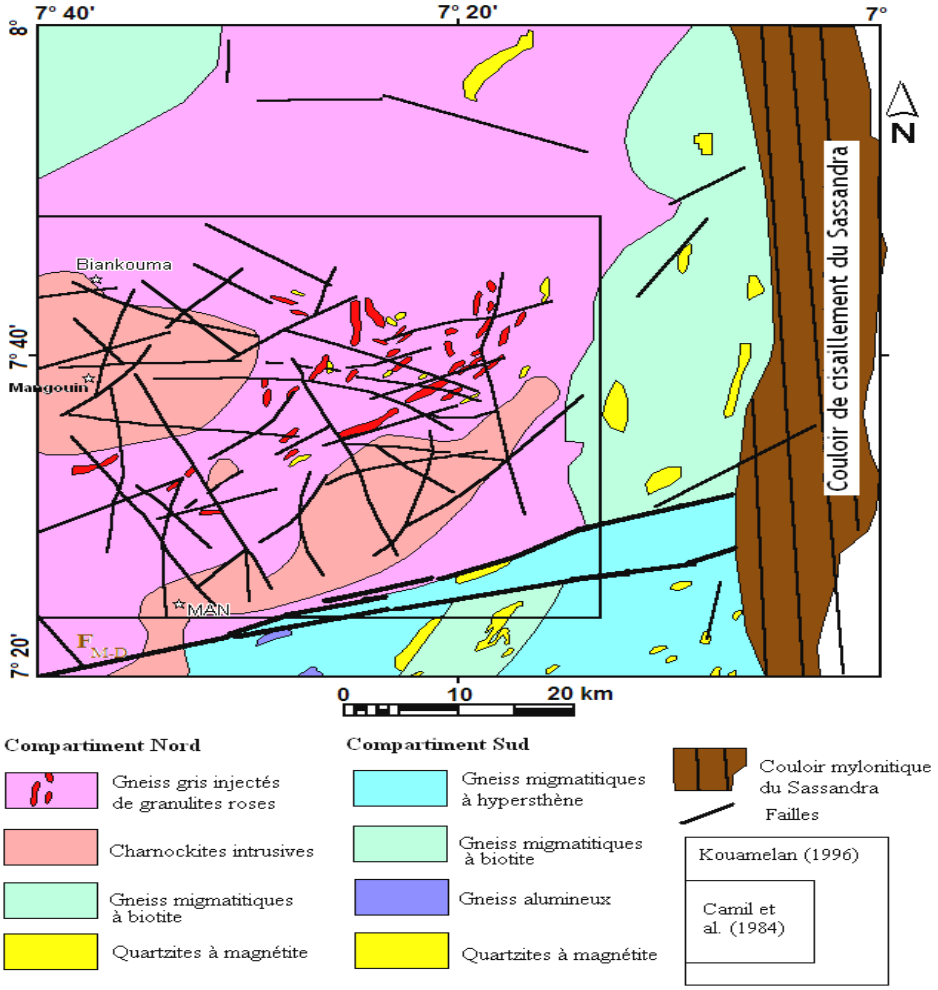


FIGURE 2 : Carte géologique du massif des Toura. *Geological map of the Toura Massif*

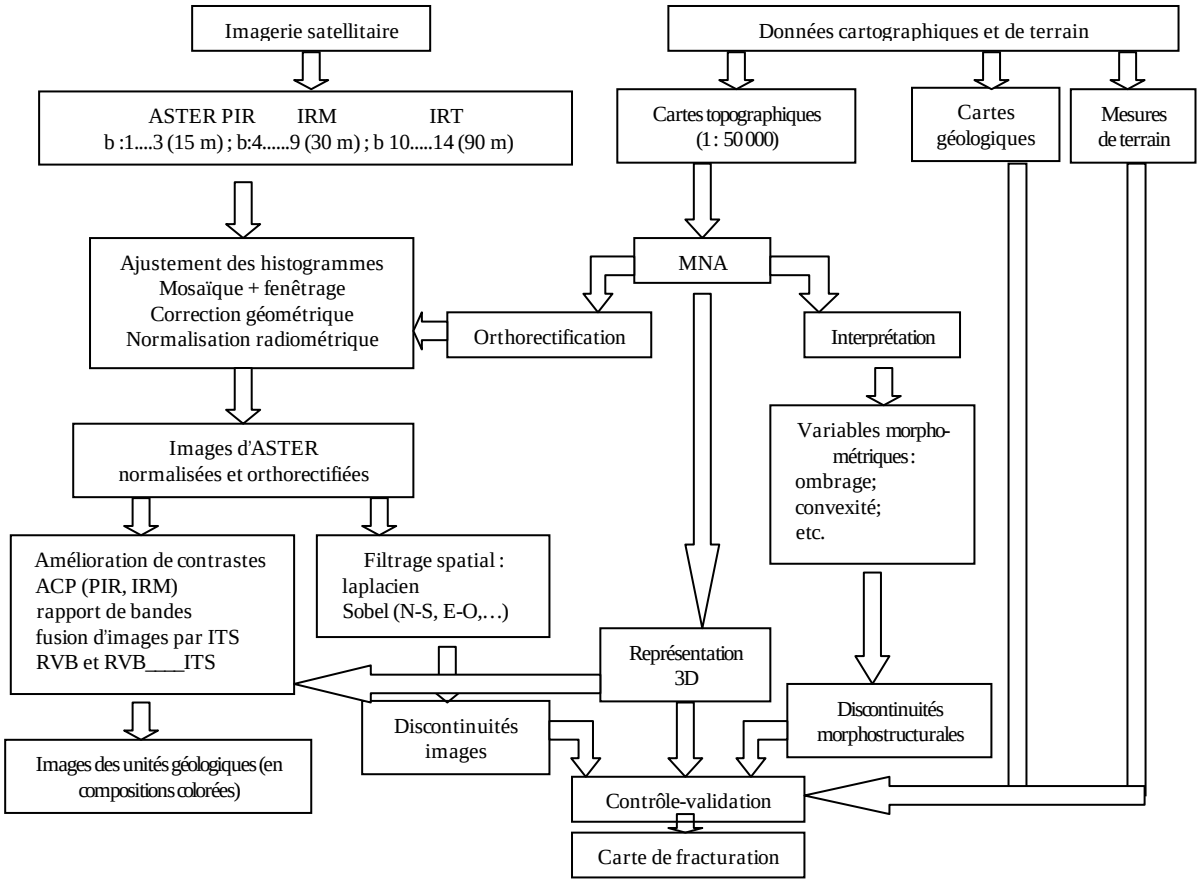


FIGURE 3 : Diagramme de traitement des données *Data processing flow chart*

Au plan structural, les travaux de Camil (1984) révèlent de nombreux accidents régionaux sur la portion SO du massif des Toura (figure 2), où il a conduit ses investigations géologiques. Sur le reste du secteur d'étude, les travaux de Tagini (1971), de la Direction de la Géologie (1995) et de Kouamélan (1996) montrent quelques accidents régionaux. En effet, ces travaux ont privilégié les aspects pétrologique, géochimique et géochronologique, ce qui expliquerait le peu d'intérêt accordé à la caractérisation structurale.

Dans ses travaux, Djro (1998) souligne l'importance de l'activité de la faille majeure du Sassandra dans l'évolution tectono-métamorphique de l'Archéen à l'ouest de la Côte d'Ivoire. Cet auteur a mis en évidence une tectonique polyphasée, caractérisée par quatre épisodes de déformation tectonique, associés chacun à un degré de métamorphisme. Le jeu et le rejeu des accidents (mouvements transcurents et tangentiels), au cours des différentes orogenèses ont abouti au schéma structural polyphasé actuel.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1. Données utilisées

Les images satellitaires qui ont été utilisées proviennent du capteur ASTER (deux images du 24 janvier 2001 et deux images du 30 janvier 2003). Les images d'ASTER comportent trois bandes dans le visible et le proche-infrarouge (PIR : 0,52 - 0,86 µm), de résolution spatiale de 15 m ; 6 bandes de l'infrarouge moyen (IRM : 1,6 - 2,43 µm), de résolution spatiale de 30 m et 5 bandes de l'infrarouge thermique (IRT : 8,12 - 11,65 µm), de résolution spatiale de 90 m (Kahle *et al.*, 1991). Grâce à cette fourchette spectrale et à la variété de résolutions spatiales, ces images constituent une base de données riche en informations géostructurales (Fujisada, 1995 ; Yamaguchi *et al.*, 1998).

Les données auxiliaires comprennent les cartes topographiques de l'IGN à 1 : 50 000, les cartes géologiques de Camil (1984) à 1 : 200 000, de la Direction de la Géologie (1995) à 1 : 200 000 et de Kouamélan (1996) à 1 : 1 000 000. Les données structurales provenant de la carte photogéologique à 1 : 200 000 (Azuelos *et al.*, 1978), ainsi que des mesures de terrain complètent la base de données.

Le traitement des images d'ASTER et des données topographiques a été effectué au Centre universitaire de recherche et d'application en télédétection (CURAT) de l'Université de Cocody, sur une station équipée avec les logiciels de traitement d'images EASI PACE de PCI et ENVI ainsi que des systèmes d'informations géographiques MapInfo et ArcView.

Les diverses opérations qui ont permis l'exploitation combinée des images d'ASTER, du MNA et des variables morphométriques dérivées sont présentées sur la figure 3.

3.2. Constitution de la base de données lithostructurales

3.2.1. Numérisation cartographique

Les différentes cartes géologiques établies au cours des travaux antérieurs (Camil, 1984 ; Direction de la Géologie, 1995 ; Kouamélan, 1996) sont numérisées et projetées dans un même référentiel (WGS 84), afin de produire la géologique de synthèse (figure 2).

La carte photogéologique établie par Azuelos *et al.* (1978) est numérisée pour représenter le réseau de fractures. Sur la carte de Camil *et al.* (1984), qui concerne le secteur sud-ouest du massif des Toura, le réseau de fractures est aussi numérisé. Les différents fichiers obtenus sont utilisés pour la comparaison et la vérification des différents objets géologiques révélés par le traitement des images d'ASTER.

Les courbes de niveaux équidistantes de 20 m, sont numérisées à partir des cartes topographiques à l'échelle de 1 : 50 000. Elles sont ensuite utilisées pour construire le MNA au pas spatial de 30 m. L'application d'un filtre médian au MNA permet d'atténuer les artéfacts liés à l'interpolation des altitudes. Les résolutions (spatiale et altitudinale) sont acceptables pour les analyses morphostructurales envisagées. Le MNA est utilisé pour l'analyse morphostructurale et la représentation en 3D des états de surface.

3.2.2. Prétraitements des images d'ASTER

Les prétraitements ont porté sur l'orthorectification et la normalisation radiométrique. Dans une première étape, une mosaïque des quatre images d'ASTER couvrant le massif des Toura est réalisée après un ajustement des histogrammes au niveau des zones de recouvrement. Ensuite le fenêtrage du secteur du massif des Toura est suivi de la correction géométrique à partir de 18 amers relevés sur les cartes topographiques à 1 : 50 000. La transformation géométrique par un polynôme du deuxième degré, associée à un ré-échantillonnage par la méthode du plus proche voisin donne une erreur résiduelle de l'ordre du pixel. L'orthorectification (Cheng and Toutin, 2001) est réalisée en planimétrie et en altimétrie grâce à 12 amers relevés sur le MNA. Cette opération a permis la correction des effets du relief sur la géométrie de l'image et la superposition précise de celles-ci.

Les images d'ASTER (prétraitement de deuxième niveau) ont été corrigées partiellement des effets atmosphériques (Thome *et al.,* 1999). Les valeurs de luminance ainsi obtenues sont fiables pour des régions aux surfaces planes et aux conditions atmosphériques presque homogènes. Dans les environnements où la topographie est relativement accidentée, comme c'est le cas du massif des Toura, une normalisation des canaux est encore nécessaire. Les bandes dans l'IRM et le PIR (5, 3N et 1) sont utilisées dans une fusion de données pour produire une composition colorée en rouge-vert-bleu (RVB), sur laquelle les caractéristiques spectrales moyennes de l'aérodrome de Man et ses environs (site localisé dans le secteur des plateaux au sud du massif des Toura) sont prises pour référence. Une méthode simple, consistant à diviser les signatures spectrales des différentes bandes avec celles de la zone de référence, permet ainsi de les normaliser et de rendre les luminances cohérentes dans les différentes bandes d'ASTER.

3.3. Méthodologie de cartographie lithostructurale

3.3.1. Identification des différentes unités lithologiques

Les différentes unités lithologiques du massif des Toura sont essentiellement de nature cristalline et cristallophyllienne : gneiss gris (G_g), charnockites intrusives (Ch_i), gneiss migmatitiques à biotite ($G_{m\text{-}b}$), gneiss migmatitiques à hypersthène ($G_{m\text{-}h}$), gneiss alumineux (G_a), quartzites à magnétite (Q_m), mylonites de la faille du Sassandra (M_s).

Le rehaussement des bandes d'ASTER en vue de l'interprétation de l'information géologique, est effectué au moyen de différentes techniques de traitement.

Le premier type de traitement est l'analyse en composantes principales (ACP), réalisée afin de faire une synthèse d'informations et une décorrélation des neuf bandes dans le PIR et l'IRM ; ces dernières étant ré-échantillonnées à 15 m pour être conformes à la résolution du PIR. Les trois premières composantes (PC1, 2 et 3) ont été sélectionnées pour leur contenu en informations géologique et structurale, supérieures aux autres composantes principales.

Le deuxième type de traitement a consisté à faire le calcul de divers rapports de bandes : 4/3N, 4/2, 6/4, 8/4, 3N/2. L'utilisation de ces indices permet la réduction des effets topographiques et un rehaussement du contraste de réflectance entre les surfaces minérales.

Le troisième type est la fusion des données par la méthode intensité-teinte-saturation (ITS), technique utilisée pour l'optimisation de l'interprétation géologique (Haydn *et al.,* 1982 ; Gillepsie *et al.,* 1986). Une fusion des bandes dans l'IRM 4, 6 et 8 est réalisée en utilisant la bande 2, de résolution spatiale de 15 m pour le canal (I), tandis que les bandes 4 et 8 de résolution de 30 m, sont affectées respectivement au contrôle de la teinte et de la saturation. Une autre approche de la technique d'ITS est la transformation de l'espace de couleur RVB en ITS où les composantes principales (PC1, 2 et 3) sont utilisées.

Les bandes et les divers indices rehaussés permettent de produire des compositions colorées des bandes (cb), des composantes principales (ccp), des rapports de bandes (crb). L'interprétation visuelle de ces images permet d'identifier des plages homogènes assimilables aux différentes unités lithologiques. Enfin, nous faisons une ana-

lyse qualitative en comparant la carte géologique de synthèse (Camil, 1984 ; Direction de la Géologie ; Kouamélan, 1996) et les unités mises en évidence sur les images d'ASTER.

3.3.2. Cartographie des discontinuités morphostructurales

La cartographie morphostructurale est réalisée à partir tant des images d'ASTER que des données du MNA. Pour l'identification des traits structuraux sur les images satellitaires, les techniques de détection de contour (filtrage spatial directionnel ou gradient) sont utilisées (Kouamé *et al.*, 1999). Les images des capteurs Landsat et SPOT sont les plus utilisées dans la cartographie structurale à des échelles détaillées. Les bandes spectrales de TM de Landsat (TM 2, 3, 4 et 5) ont une correspondance avec les bandes dans le PIR 1, 2, 3N et de l'IRM 4 d'ASTER. Il faut aussi souligner que la résolution spatiale des bandes dans le PIR (15 m) est plus fine que celle des bandes de TM (30 m), ce qui fait des bandes d'ASTER, des bandes adaptées à une cartographie détaillée. La bande de TM 7 est subdivisée en quatre bandes spectrales d'ASTER (IRM 5, 6, 7 et 8), ce qui représente une amélioration spectrale du domaine de l'infrarouge moyen.

Ainsi avons nous utilisé les bandes dans le PIR et l'IRM pour la cartographie morphostructurale du massif des Toura en appliquant une série de filtrages spatiaux directionnels sur les bandes 2, 5, 6 et 8 et la PC1 provenant de l'ACP. Les filtres de matrice de 7 x 7 de Sobel sont appliqués dans les orientations N-S, NE-SO, E-O et NO-SE. À titre d'exemple, sur le tableau 1, on présente les matrices des filtres dans les directions N-S et E - O.

TABLEAU 1 : Filtres directionnels 7 x 7 de Sobel (orientations N-S et E-O). *Directional 7 x 7 Sobel filters (N-S and E-W directions)*

N-S						
1	1	1	2	1	1	1
1	1	2	3	2	1	1
1	2	3	4	3	2	1
0	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1
-1	-1	-2	-3	-2	-1	-1
-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1

E-O						
-1	-1	-1	**0**	1	1	1
-1	-1	-2	**0**	2	1	1
-1	-2	-3	**0**	3	2	1
-2	-3	-4	**0**	4	3	2
-1	-2	-3	**0**	3	2	1
-1	-1	-2	**0**	2	1	1
-1	-1	-1	**0**	1	1	1

Sur les images filtrées, les variations brusques d'intensité soulignent les hautes fréquences spatiales et permettent de rehausser les discontinuités-images. L'interprétation des discontinuités-images permet de cartographier les linéaments. Dans cette étude, le terme « linéament » décrit toute structure ayant un tracé rectiligne ou curviligne (Hobbs, 1904 ; O'Leary *et al.*, 1976) et dont l'interprétation a une signification géologique. Les linéaments géologiques ont des descripteurs directs (failles, joints, contacts lithologiques, dykes, etc.) ou indirects (escarpements, talwegs, contrôle structural du tracé des cours d'eau, etc.) en rapport avec le modelé du relief.

Nous avons procédé à l'extraction des linéaments par interprétation visuelle tant des images filtrées que des compositions colorées des bandes brutes (4, 6 et 8 en RVB) ou transformées (PC1, 2 et 3 en RVB et ITS). Le tracé des linéaments se fait de façon manuelle dans une couche vectorielle surimposée aux images interprétées. Les objets linéaires d'origine anthropique (réseau routier, lignes de transport d'énergie, bordures de forêt classée) sont éliminés afin de ne garder que les linéaments ayant une signification structurale.

La deuxième source de données utilisée pour la cartographie morphostructurale est en rapport avec la physiographie du massif des Toura. Il s'agit du MNA et des attributs morphométriques dérivés. Les variables géomorphologiques sont des témoins majeurs de l'évolution morphogénique du relief et peuvent servir à l'identification de certaines formes en géologie (Chorowicz *et al.*, 1989) ainsi qu'à l'extraction des discontinuités morphostructurales (Bonnet et Colbeaux, 1999 ; Deffontaines, 2000).

Dans un premier temps, l'exploitation du MNA est orientée vers le calcul des variables morphométriques (pente, estompage, orientation des facettes, convexités, courbures, etc.), ainsi que leur analyse afin de pouvoir sélectionner celles qui rehaussent mieux les discontinuités topographiques. Ensuite, une image mixte a été créée en combinant le MNA aux composantes principales PC1, 2 et 3.

L'un des atouts dans l'utilisation des MNA, est la représentation en 3D qu'il est possible de réaliser pour l'analyse du modelé du relief. Les compositions colorées des bandes 4, 6 et 8 et des trois composantes PC1, 2 et 3 de l'ACP ont été représentées en 3D. Ce mode de représentation a facilité la perception des ensembles morphostructuraux du massif des Toura et leur cartographie. L'interprétation visuelle des variables morphométriques dérivées du MNA et des images brutes, transformées et mixtes en 2D ou en 3D permet d'identifier les discontinuités morphostructurales, dont l'extraction est réalisée manuellement. Enfin, les différents résultats obtenus à partir tant des images d'ASTER que du MNA sont comparés. Une confrontation avec les travaux antérieurs de géologie structurale permet de faire une vérification et une validation des objets structuraux relevés

afin de mettre à jour la carte morphostructurale du massif des Toura.

4. ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

4.1. Discrimination des ensembles lithologiques

Les différentes compositions colorées des bandes brutes ou transformées sont utilisées pour faire ressortir les unités homogènes en vue d'interpréter la lithologie du massif des Toura. Afin de faciliter les comparaisons, les limites lithologiques de la carte géologique de synthèse (Camil, 1984 ; Direction de la Géologie, 1995 ; Kouamélan, 1996) ont été surimposées aux résultats des traitements des images d'ASTER. Sur la figure 4a, la composition colorée RVB des bandes dans le PIR 1, 3N et 2 met en évidence le couvert végétal (en vert) relativement dense du massif, les surfaces minérales et les sols nus ou peu couverts qui sont représentés dans une teinte violacée claire à foncée. Le SO et le centre du massif sont très végétalisés et correspondent à la zone de forêt humide. Le secteur de la forêt sèche concerne le nord du massif. Dans le secteur sud, le massif charnockitique (Ch_i) de Man présente un relief apparent allongé dans une orientation N 60° E. Les bandes dans le PIR ont permis de distinguer globalement les surfaces végétales des surfaces minérales, sans faciliter la discrimination des différentes unités minérales. Ainsi, nous avons eu recours à l'interprétation des bandes dans l'IRM. La composition colorée des bandes 4, 6 et 8 en RVB (figure 4b) fait bien ressortir les massifs charnockitiques (Ch_i) intrusifs dans les gneiss gris (G_g). L'encaissant formé de gneiss gris (G_g) présente un contraste de tonalité (figure 4b) avec une teinte marron foncée, par rapport aux éléments intrusifs (Ch_i) en marron clair. Au niveau des ensembles charnockitiques et surtout, pour le massif de Man, on observe une texture irrégulière de surface, marquée par la présence de fractures. Les compositions colorées des composantes principales (PC1, 2 et 3) en RVB (figure 5a) et en ITS, ainsi que celles des rapports de bandes 6/4, 4/3N 3N/2 en RVB et en ITS (figure 5b) permettent aussi de bien discriminer les massifs charnockitiques et les gneiss gris rubanés. Mais, les ensembles migmatitiques (gneiss migmatitiques à biotite, gneiss migmatitiques à hypersthène) restent toujours difficiles à cartographier. La fusion des bandes 4, 6 et 8 dans le PIR, où le canal I est remplacé par la bande 2 de résolution de 15 m, donne un résultat concordant avec ceux obtenus par les méthodes sus-citées.

Le contraste de tonalité entre les charnockites (Ch_i) et les gneiss gris (G_g) est lié à la texture particulière due aux irrégularités de surface dans la zone de contact. Ainsi, il faudrait associer les textures de déformation pour la cartographie des ensembles lithologiques.

Camil *et al.* (1984) montrent que les intrusions charnockitiques du massif des Toura sont tardimétamorphes et ont une déformation plastique sur les bordures. De plus, l'activité de la faille de Man-Danané a eu une grande influence dans le couloir contigu à la bordure sud du massif de Man. La déformation y est très intense et irrégulièrement répartie, avec parfois des faciès rétromorphosés. Cela est caractérisé par la texture particulière qui facilite la discrimination de ces deux unités sur les images d'ASTER. Il devient donc indispensable de cartographier les marqueurs de ces déformations tectoniques, notamment les failles afin de caractériser le schéma structural du massif des Toura.

4.2. Discontinuités morphostructurales

Sur les images d'ASTER, les discontinuités correspondent aux limites entre les zones de textures ou de teintes différentes ainsi qu'aux irrégularités de surface. Les bandes dans l'IRM montrent bien les entailles et l'aspect fragmenté des roches du massif des Toura. Sur la figure 6a, on présente une fenêtre de la bande 6 de l'IRM au niveau de la charnockite intrusive de Man (sur la figure, les flèches indiquent les traces de quelques discontinuités). Les bandes dans l'IRM couvrent l'espace spectral de TM7 de Landsat-5 qui, en matière de cartographie litho-structurale, permet de mieux caractériser les structures géologiques (Mah *et al.*, 1995 ; Kouamé *et al.*, 1999).

Sur la figure 6b, on montre le résultat du filtrage spatial de Sobel selon l'orientation N-S de la composante PC1 de l'ACP, qui rehausse bien les discontinuités-images d'orientation E-O. En exploitant les bandes dans l'IRM, les résultats provenant des différents filtrages et en réalisant des compositions colorées en RVB et en ITS, nous avons pu interpréter les éléments structuraux du massif des Toura pour établir une carte linéamentaire. Dans une seconde phase de l'étude, le MNA et les variables morphométriques dérivées ont été utilisées pour la détection des traits structuraux. Parmi ces variables, certaines font bien ressortir les unités morphologiques et les discontinuités. Il s'agit entre autres de l'estompage, de l'orientation des facettes, des courbures maximale et minimale et de la convexité croisée. L'image d'estompage (figure 7a), obtenue à partir d'un éclairement déterminé par un angle solaire de 60°, présente deux unités géomorphologiques parcourues par des discontinuités linéaires et curvilinéaires : une unité centrale à relief très accidenté et une unité monotone à l'est et au NO. L'orientation des facettes présente la direction moyenne de convergence des flux du réseau de drainage et révèle des discontinuités topographiques associées aux ruptures de pentes des massifs (figure 7b). Cette variable morphométrique met en évidence les axes de transit hydrodynamique au droit des vallées. La courbure maximale (figure 8a) fait bien ressortir les modelés et les discontinuités topographiques du secteur central, où le relief est très accidenté, alors que la convexité croisée, elle, définit les talwegs et les lignes de crêtes (figure 8b).

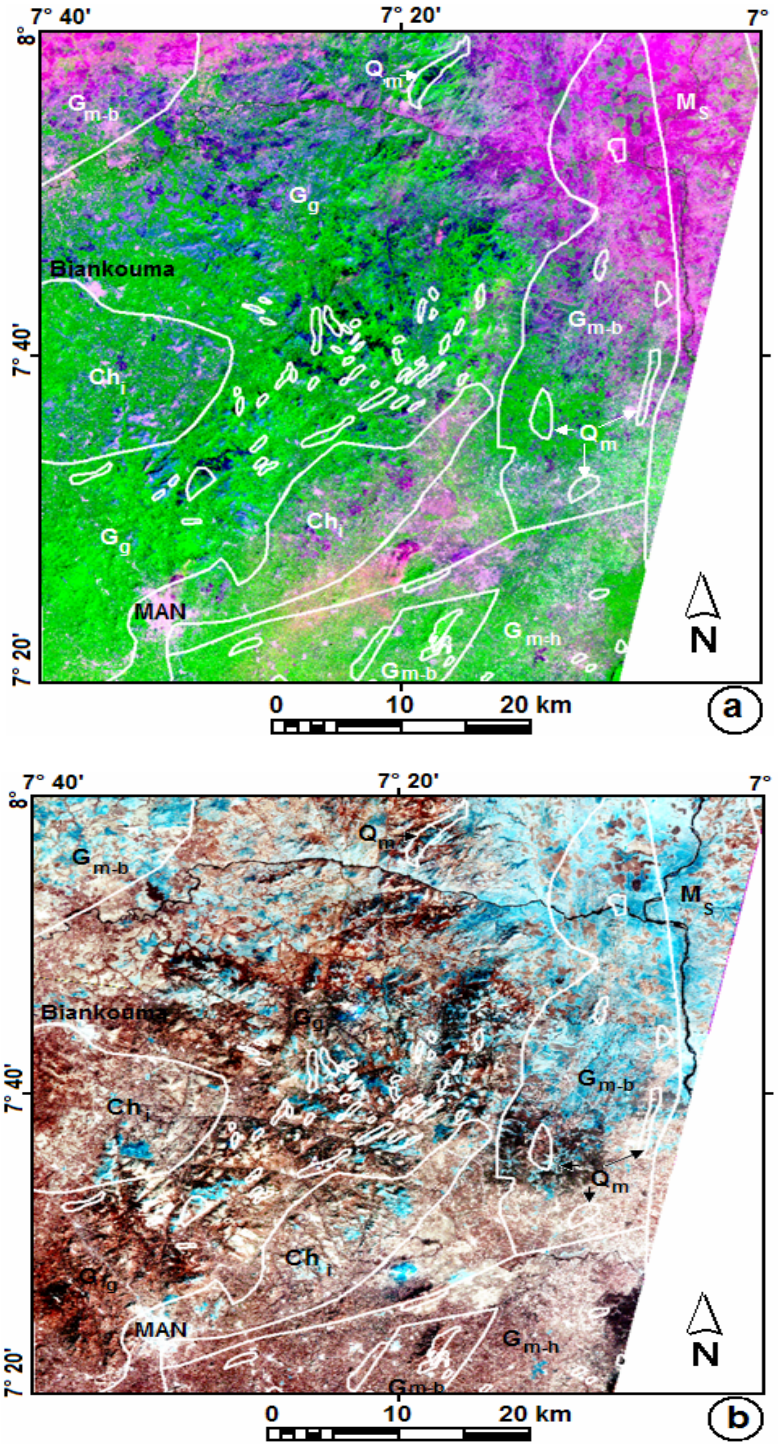


FIGURE 4 : Images en compositions colorées RVB : a) bandes 1, 3N et 2 dans le PIR ; b) bandes 4, 6 et 8 dans l'IRM. *RGB colour composite images : a) VNIR bands 1, 3N and 2 ; b) SWIR bands 4, 6 and 8.*

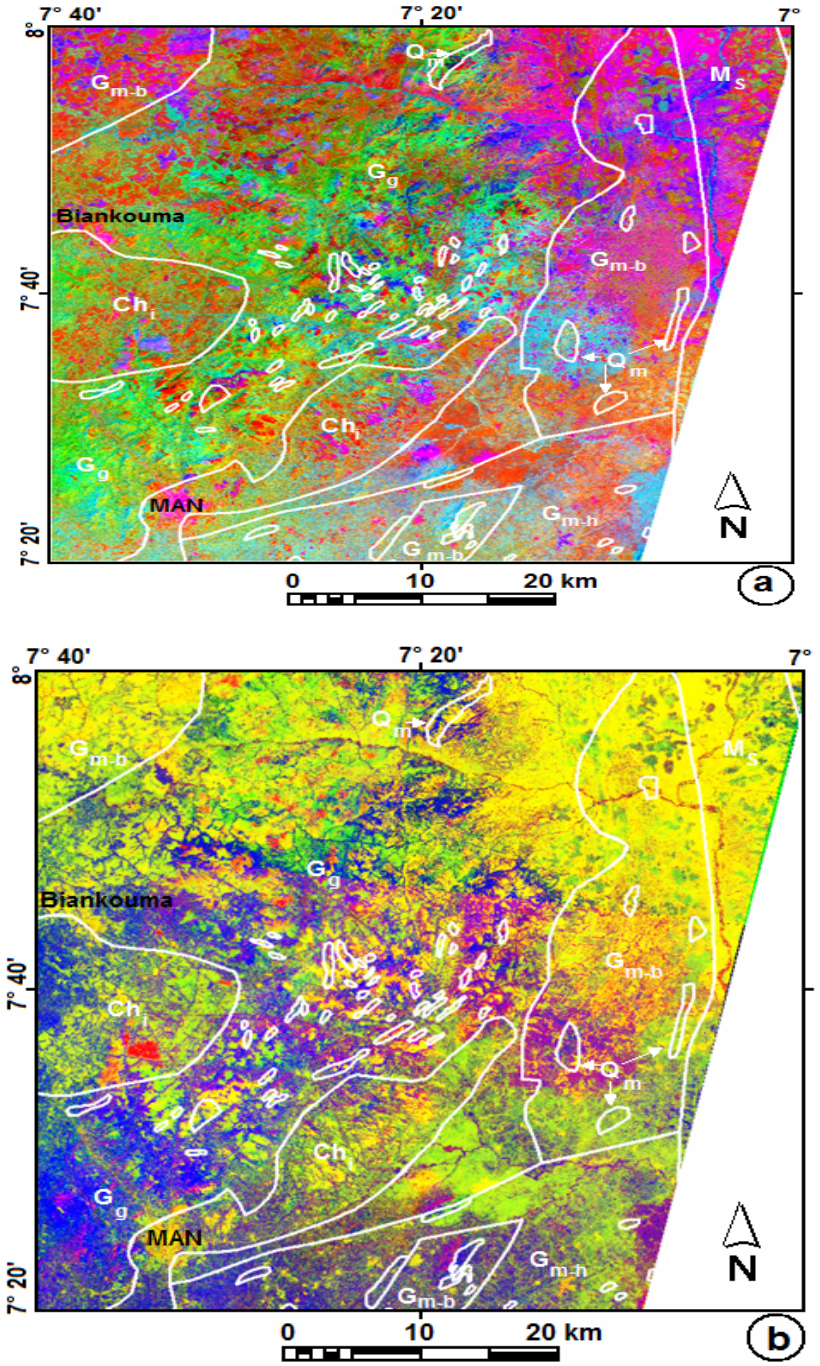


FIGURE 5 : Images en compositions colorées : a) composantes principales PC 1, 2 et 3 en RVB ; b) rapports de bandes 6/4, 4/3N et 3N/2 en ITS. *Colour composite images : a) RGB composite of principal components PC 1, 2 and 3 ; b) IHS composite of band ratios 6/4, 4/3 and 3/2*

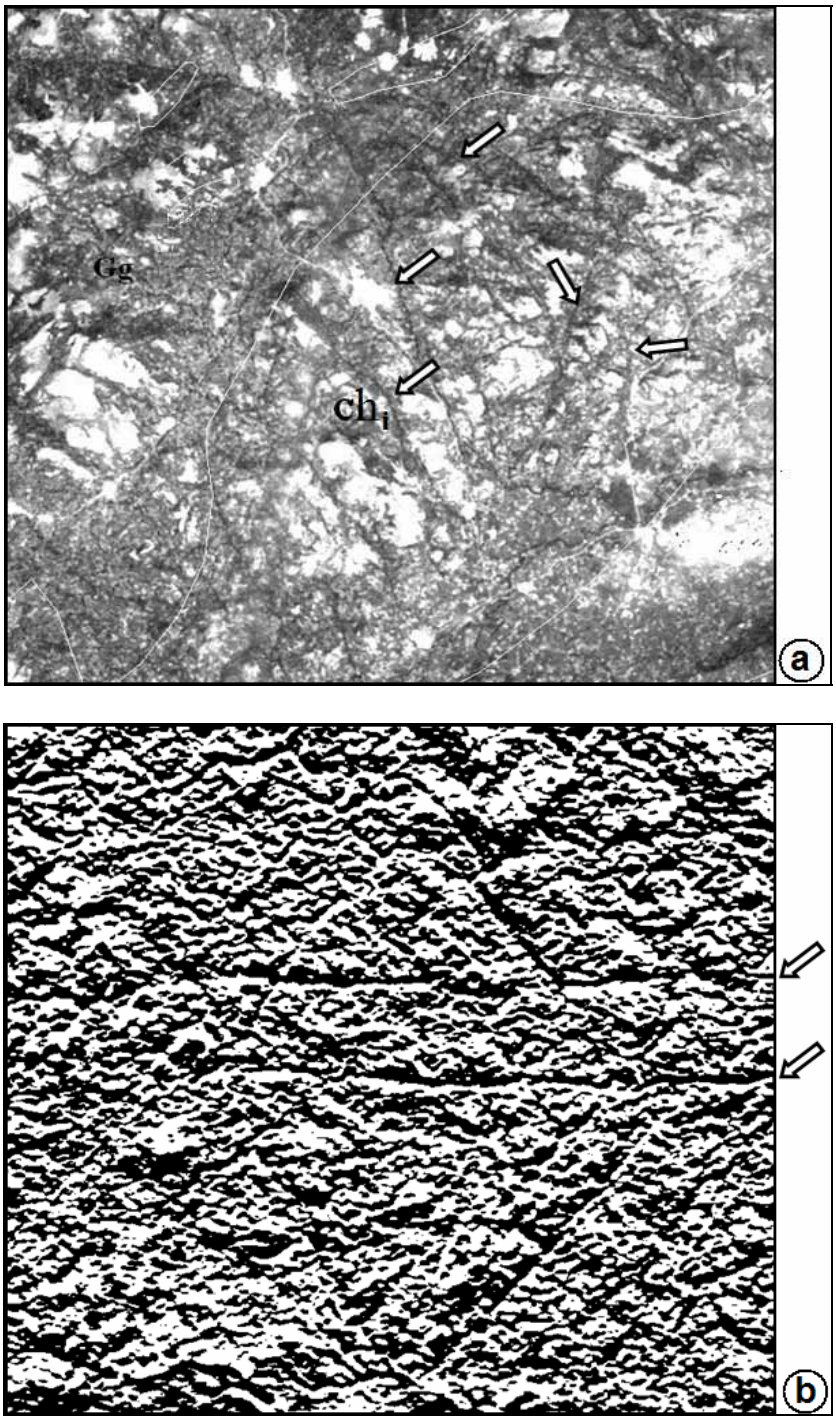


FIGURE 6 : Mise en évidence des linéaments (indiqués par les flèches) : a) bande 6 dans l'IRM montrant les textures particulières de la charnockite de Man (irrégularités de surface) ; b) image issue du filtrage directionnel N-S de Sobel facilitant l'identification des linéaments E-O. *Lineament enhancement (indicated by arrows : a) SWIR 6 band showing particular texture of the charnockite of Man (irregular body) ; b) image from Sobel N-S directional filtering improving E-W lineament identification*

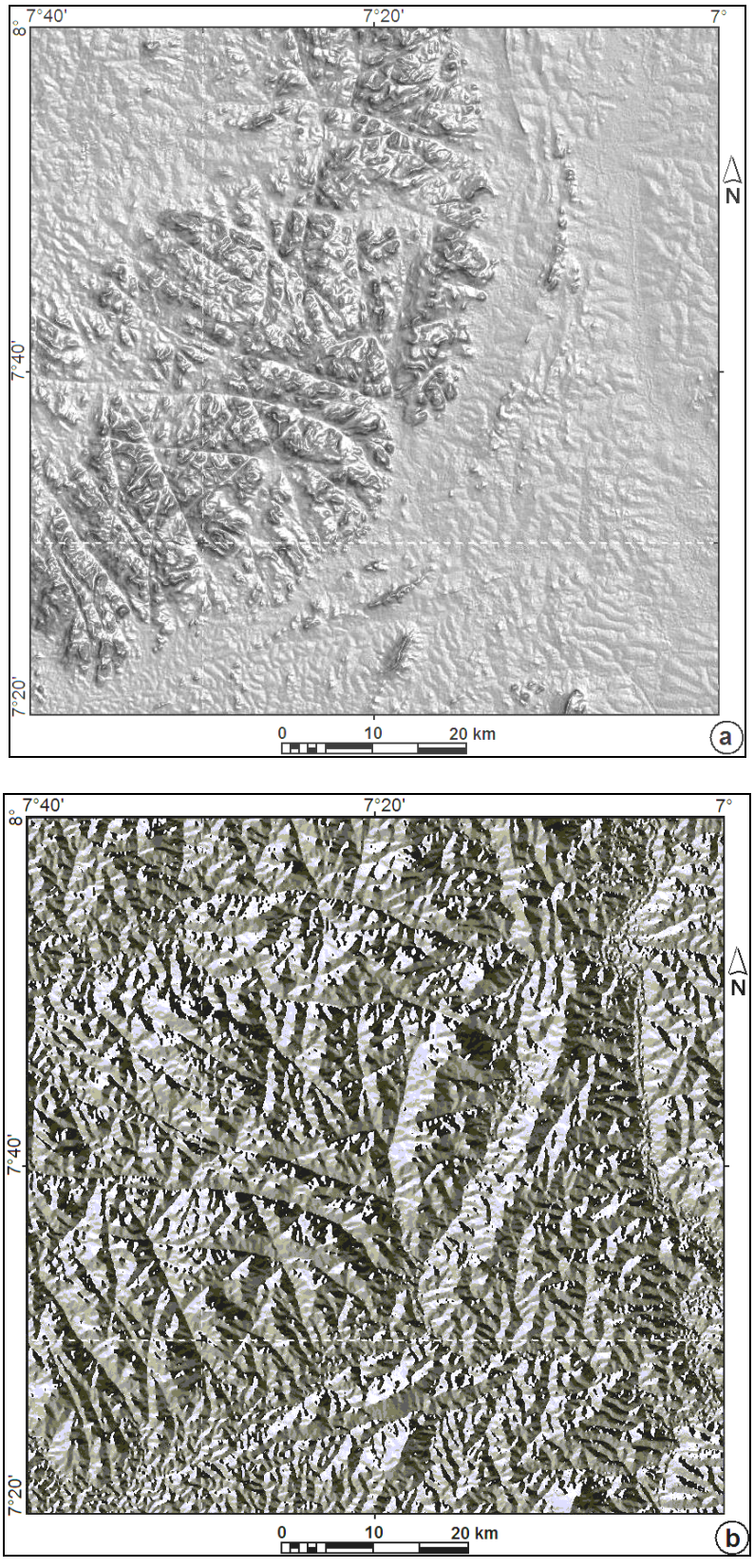


FIGURE 7 : Images dérivées du MNA : a) estompage ; b) orientation des facettes. *Images generated from the DEM : a) shaded image ; b) aspect image*

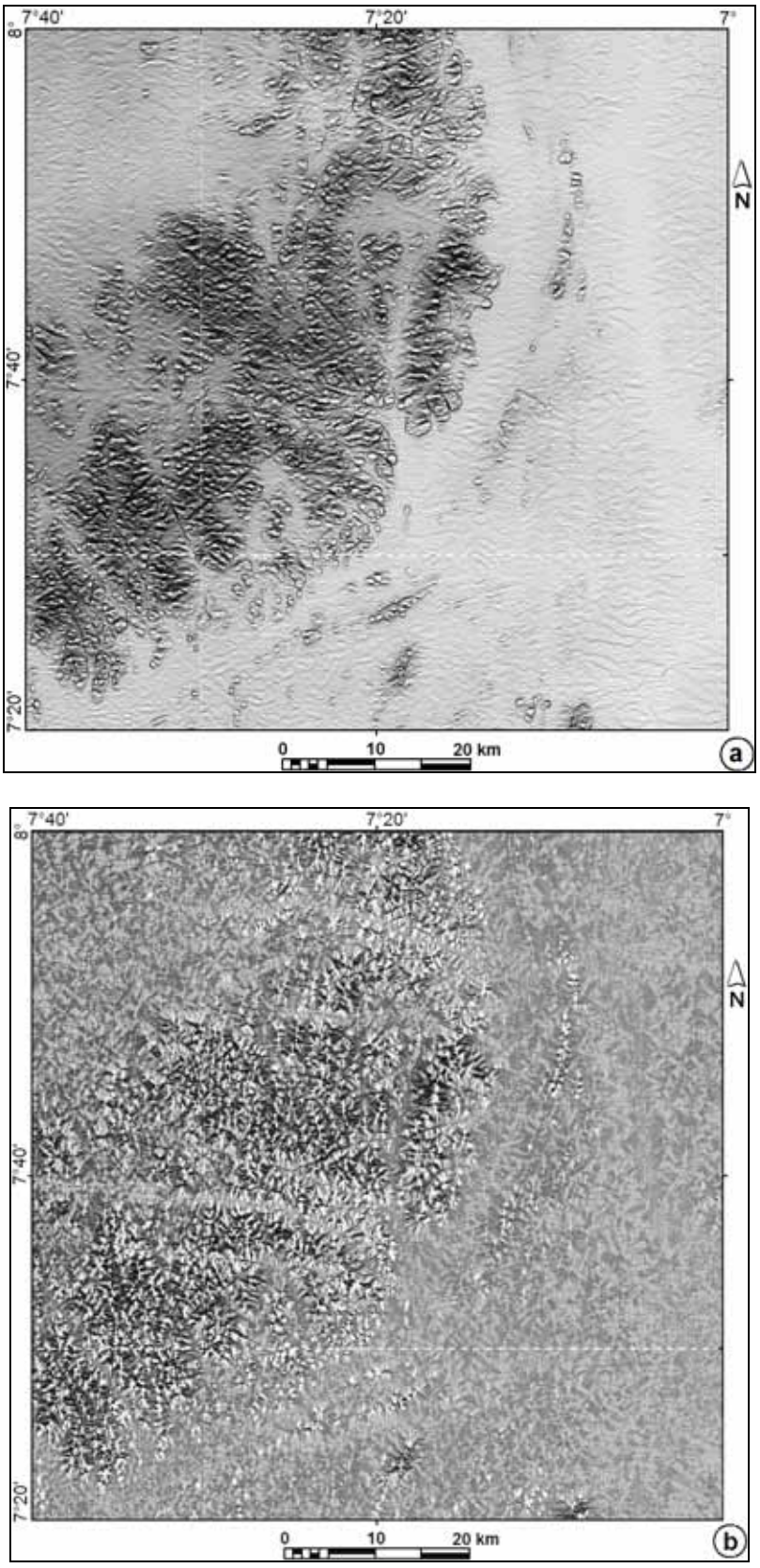


FIGURE 8 : Images dérivées du MNA : a) courbure maximale ; b) convexité croisée. *Images generated from the DEM : a) maximum curvature image ; b) cross sectional convexity image*

Lorsque le MNA est exploité en synergie avec les images d'ASTER, la représentation 3D qu'il permet facilite la perception globale des modelés du massif des Toura. Sur la figure 9a, on montre la composition colorée des bandes 4, 6 et 8 dans l'IRM en RVB, représentée en 3D. Les grandes discontinuités sont perçues à l'échelle régionale si bien que l'interprétation structurale s'en trouve facilitée. Enfin, l'intégration des trois composantes de l'ACP et du MNA a permis de créer une image mixte (figure 9b) dont l'exploitation est complémentaire des techniques citées plus haut. Le relevé linéamentaire effectué manuellement, à partir de l'interprétation visuelle en 2D et en 3D des images et du MNA, a permis d'établir les cartes linéamentaires présentées aux figures 10a et 10b.

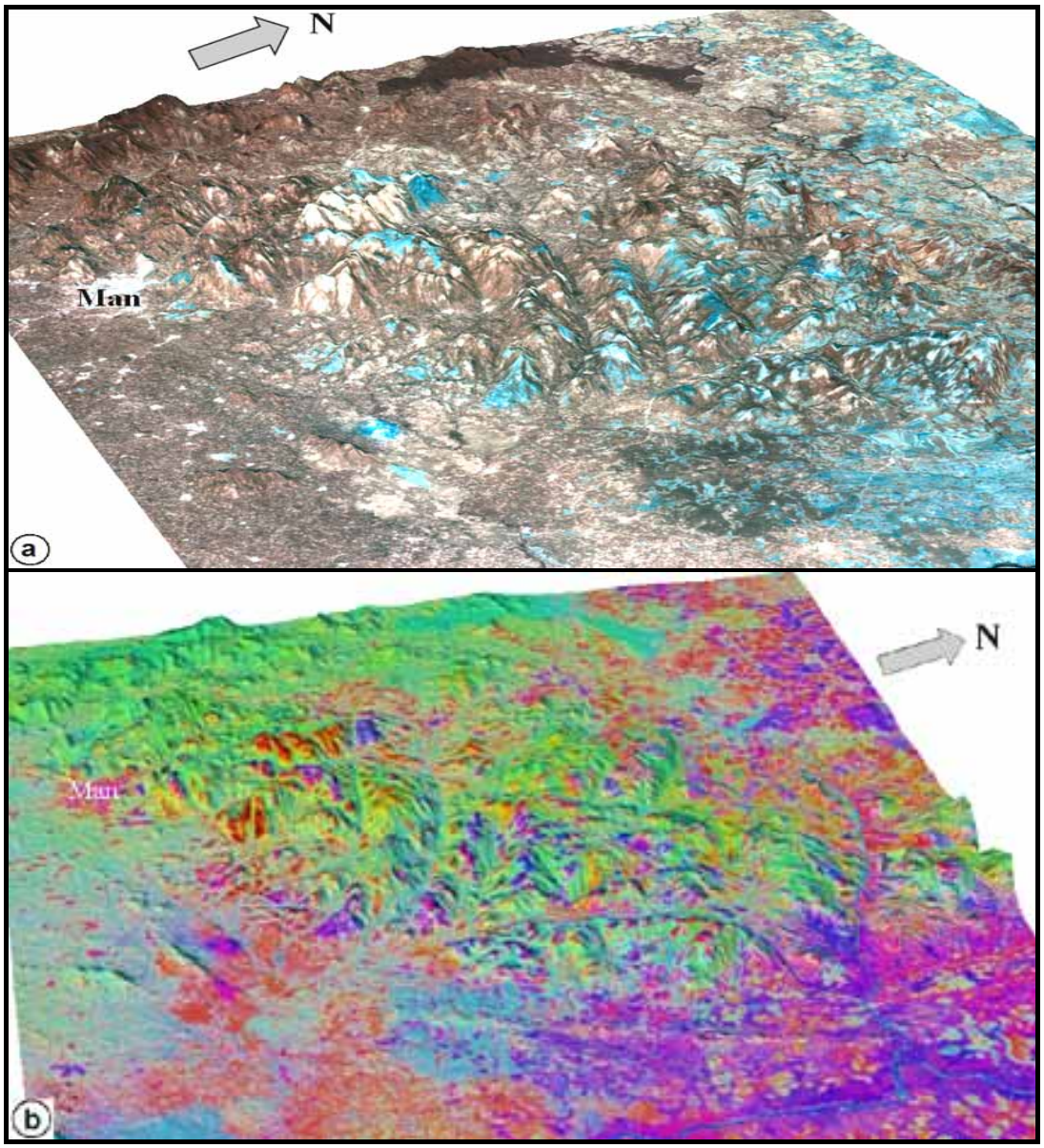
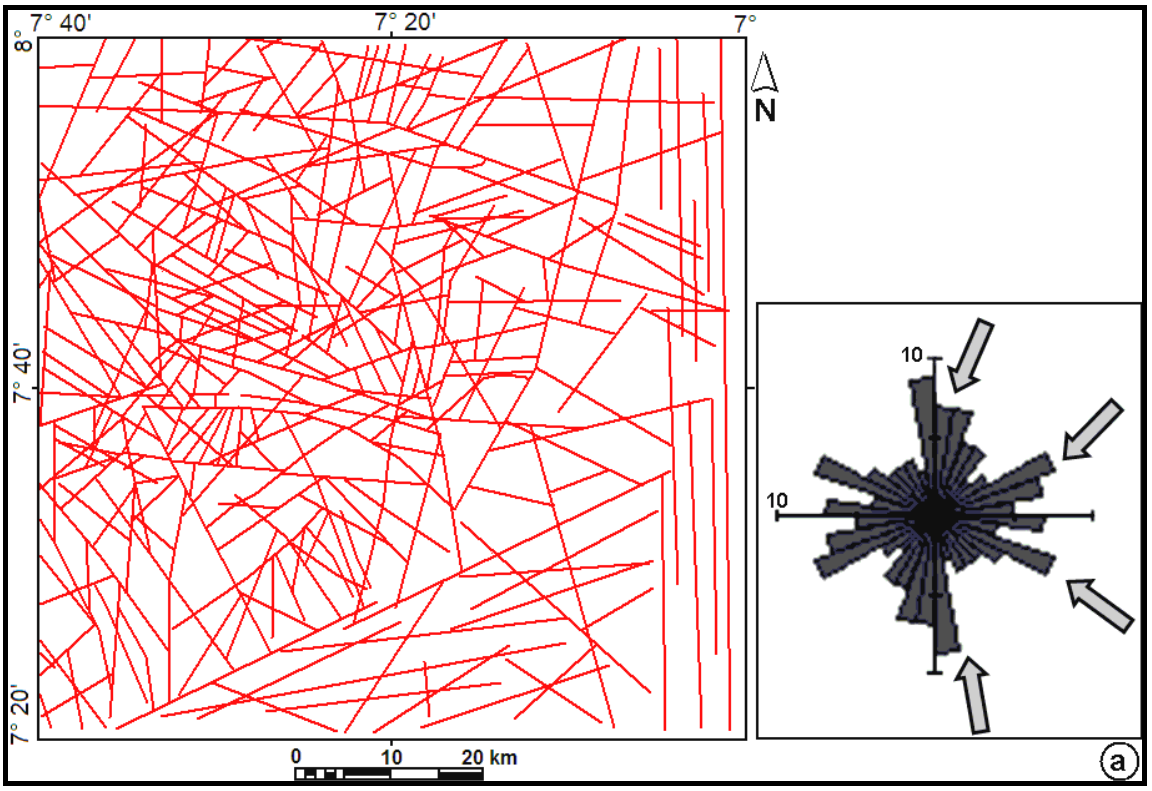


FIGURE 9 : Vue en perspective (Ev = 10) des ensembles morphologiques et des principaux accidents affectant le massif des Toura : a) représentation 3D de la figure 4b ; b) image mixte créée à partir de la fusion des 3 premières composantes de l'ACP avec le MNA. *Perspective view (Ev = 10) of the morphological features and main fractures of the Toura Massif : a) 3D representation of figure 4b ; b) mixed image generated by the principal components fusion with the DEM data*

4.3. Carte morphostructurale du massif des Toura

Les images d'ASTER ont permis de relever 830 linéaments contre 360 pour le MNA et les variables morphométriques dérivées. Les différents objets structuraux interprétés sont comparés aux données structurales existantes (Camil *et al.*, 1984 ; Azuelos *et al.*, 1978). Cette opération permet de caractériser les linéaments comme des objets ayant une nature structurale, pouvant donc être utilisés dans l'interprétation morphostructurale du massif des Toura.

Les orientations majeures qui ressortent sur la carte linéamentaire établie à partir des images d'ASTER (figure 10a) sont : N 00-20°, N 60-80°, N 170-180° et N 120-130°. Sur la figure 10b, on montre que les linéaments interprétés à partir du MNA et des variables morphométriques dérivées se superposent, pour la plupart, à ceux provenant des images d'ASTER. Les principales orientations des linéaments provenant du MNA sont : N 00-20°, N 60-70°, N 160-170° et N 90-100°. La correspondance effective des fractures pluri-kilométriques d'orientation E-O, NE-SO et NO-SE, observées dans la partie centrale du massif des Toura, ainsi que le couloir de la faille de Man-Danané, illustrent bien la concordance des résultats provenant des images d'ASTER et du MNA. Toutefois, certains linéaments se croisent et d'autres ne coïncident pas. Mais, dans l'ensemble, il y a une répartition statistique similaire des orientations et une correspondance géographique entre les objets structuraux relevés sur les deux supports. La synthèse des résultats permet d'exploiter les concordances et la complémentarité de ces deux sources de données.



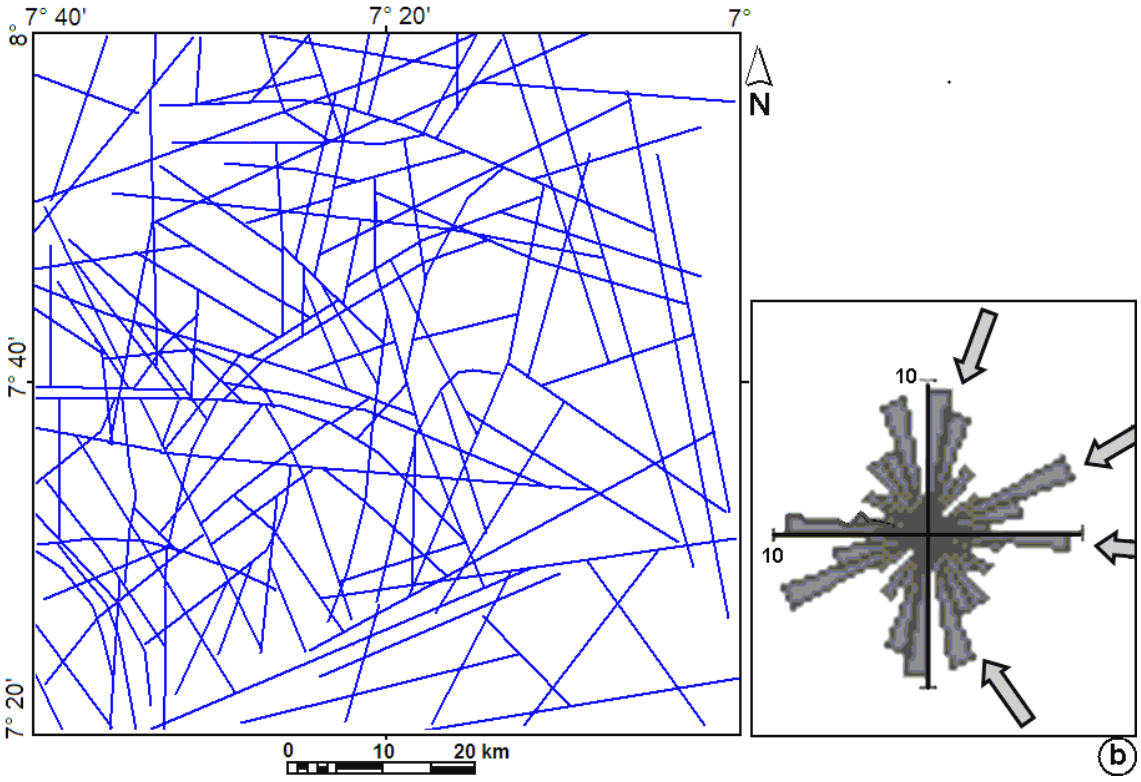


FIGURE 10 : Réseau linéamentaire du massif des Toura : a) carte provenant des images d'ASTER ; b) carte issue du MNA et des variables morphométriques. *Lineament network of the Toura Massif : a) map derived from the ASTER images ; b) map derived from the DEM and morphometric variables*

En comparant les résultats aux travaux antérieurs, on constate que toutes les failles relevées par Camil *et al.* (1984) dans le secteur sud-ouest du massif des Toura (figure 11a) concordent avec les méga-structures identifiées précédemment sur les images et le MNA. Dans les zones non cartographiées par Camil (1984), les images d'ASTER ont permis d'identifier de nombreux accidents qui permettent d'affiner les connaissances structurales du massif.

Les interprétations photogéologiques (Azuelos *et al.*, 1978), elles, donnent un réseau assez dense d'accidents (figure 11b). Les orientations majeures sont N 00-10°, N 100-120° et N 60-80°. Elles concordent avec les principales directions relevées par Camil *et al.* (1984) et sur les cartes établies dans le cadre de ce travail. Plusieurs failles coïncident avec les objets structuraux relevés sur les images d'ASTER. Le pic dans l'orientation N 120°, qui est également mis en évidence sur la carte provenant des images d'ASTER est remarquable, car c'est seulement sur ces deux supports qu'il apparaît. Les failles de cette orientation sont pour la plupart de taille modeste et probablement postérieures à toutes les autres qui les recoupent. Par ailleurs, on observe aussi des objets structuraux qui se croisent ou qui ne concordent pas avec ceux des travaux antérieurs.

La synthèse des résultats et les contrôles et vérifications ont contribué à l'élaboration de la carte morphostructurale finale (figure 11c) qui comporte trois orientations principales (N 00-20°, N 60-80° et N 110-120°) et deux orientations secondaires (N 90-100° et N 160-180°). Ces orientations s'intègrent parfaitement aux orientations tectoniques majeures de l'Afrique de l'Ouest, relevées par Kouamélan (1996).

Les résultats obtenus à partir des images d'ASTER et des variables morphométriques ont permis d'affiner la caractérisation morphostructurale du massif des Toura, en apportant un complément à l'inventaire des failles dans le secteur nord ou très peu de structures ont été cartographiées (Direction de la Géologie, 1995 ; Kouamélan, 1996).

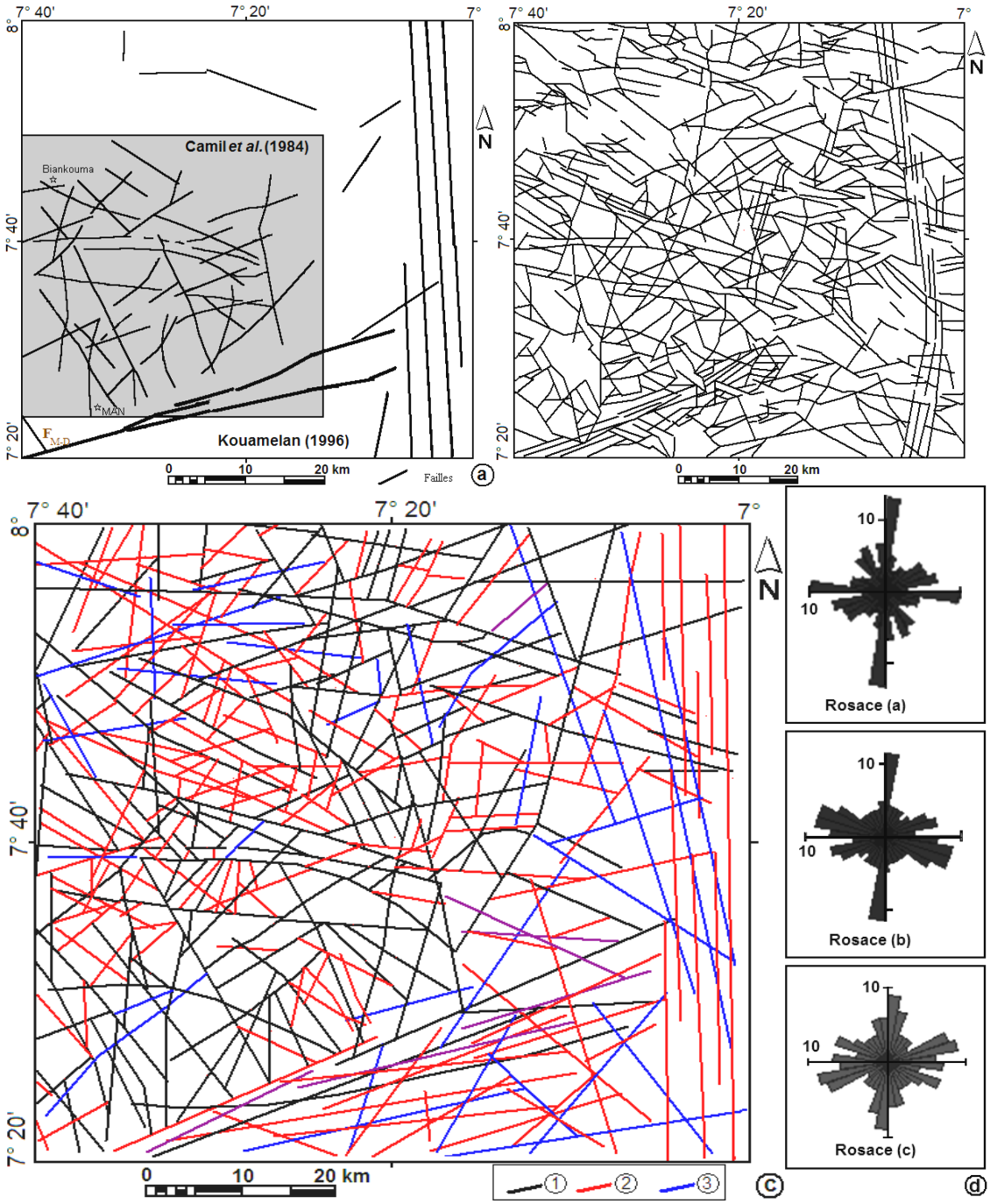


FIGURE 11 : Carte morphostructurale du massif des Toura : a) carte structurale tirée de Camil *et al.* (1984) ; b) carte photogéologique (Azuelos *et al.*, 1978) ; c) carte morphostructurale finale [1) fractures concordantes (ASTER-MNA) ; 2) linéaments relevés sur les images d'ASTER ; 3) linéaments relevés sur les données dérivées du MNA ; d) rosaces directionnelles des différentes cartes. *Morphostructural map of the Toura Massif : a) structural map from Camil et al. (1984) ; b) photogeological map (Azuelos et al., 1978) ; c) final morphostructural map [1) concordant fractures (ASTER and DEM) ; 2) lineament newly mapped with ASTER images ; 3) lineament newly mapped with DEM data ; d) directional rose diagrams of the different maps.*

5. DISCUSSION

L'exploitation des images d'ASTER et des variables morphométriques dérivées d'un MNA constitue une approche de caractérisation morphostructurale permettant de prendre en compte, à la fois la réponse spectrale des états de surface, les formes du relief et la vision synoptique par la représentation 3D.
Dans la cartographie des unités lithologiques du massif des Toura, il a été possible de discriminer seulement les charnockites intrusives et leurs encaissants gneissiques, grâce au contraste de tonalité et de texture de la zone de contact. Les autres formations géologiques ne présentent pas de limites identifiables sur les bandes du PIR et de l'IRM analysées.

L'une des grandes difficultés dans cette cartographie est certainement la nature presque quasi-similaire des formations qui sont dans l'ensemble granitiques (migmatites, gneiss, charnockites), exceptés les quelques lentilles d'ultrabasites. Les exemples des gneiss migmatiques (à biotite, à hypersthène, alumineux) de la carte permettent de le confirmer.

De plus, d'après Camil (1984), ces roches ont des compositions chimiques très variables, allant parfois d'un pôle acide à un pôle basique, en passant par tous les intermédiaires. Dans ces conditions, il est très difficile de faire une discrimination lithologique (Davis and Berlin, 1989) sans une étude préalable sur le terrain permettant de définir les signatures spectrales des minéraux (Hubbard and Crowley, 2005) et des différentes roches (Rowan and Mars, 2003). La caractérisation des signatures spectrales qui permet de comprendre les propriétés des roches (émissivité) peut alors être couplée à l'interprétation des images d'ASTER pour une cartographie pertinente et fiable. Dans les environnements géologiques complexes, la combinaison des bandes dans le PIR et l'IRM en plus de la prise en compte des bandes dans l'IRT, ainsi que les signatures spectrales des roches améliorent considérablement les discriminations lithologiques (Ninomiya and Cudahy, 2005 ; Rowan *et al.*, 2005).

En matière de cartographie morphostructurale, l'application des filtres directionnels de Sobel aux images d'ASTER et surtout aux bandes dans l'IRM a permis de mettre en évidence les discontinuités-images. La carte morphostructurale finale du massif des Toura, avec les orientations principales (N 00-20°, N 60-80° et N 110-120°) et secondaires (N 90-100° et N 160-180°), est en accord avec les travaux antérieurs (Camil *et al.*, 1984 ; Djro, 1998) et s'intègre parfaitement au schéma tectonique de l'Afrique de l'Ouest (Kouamélan, 1996).

Parmi les accidents d'orientation N-S, le grand couloir de cisaillement du Sassandra est le plus important et se retrouve sur toutes les cartes. Djro (1998) lui associe de nombreux épisodes tectoniques, ayant induit des transformations minérales à des degrés différents de métamorphisme. La première phase est un aplatissement (plis semblables et schistosités de flux), qui est accompagné par un métamorphisme de faciès granulite. La seconde est un cisaillement ductile dextre d'orientation N 160° dans le faciès granulite à hornblende et almandin. La troisième est une déformation transpressive (cisaillement pur et cisaillement simple combinés) dans le faciès amphibolite. La dernière phase est un cisaillement fragile senestre d'orientation N 160° dans le faciès des schistes verts. Cette activité très intense de cet accident a eu de nombreuses répercussions sur le schéma structural de l'Ouest ivoirien.

À proximité de ce grand couloir de cisaillement (limite est du massif des Toura), les accidents d'orientation E-O, sont progressivement déviés vers le sud et prennent des orientations N 140-160°. Tout se passe comme si une limite structurale réoriente les failles, ce qui confirme l'histoire du couloir du Sassandra, dont le jeu et le rejeu, au cours des événements tectono-métamorphiques des orogenèses léoniennes (3 500-2 900 Ma.) et libériennes (2 900-2 500 Ma.) ont affecté les ensembles morphostructuraux. L'architecture très fracturée du massif des Toura, observée à partir de imagerie satellitaire, est le témoin de cette déformation tectonique polyphasée.

6. CONCLUSION

L'exploitation des bandes d'ASTER (PIR et IRM), d'un MNA et des variables morphométriques dérivées a contribué à établir une carte morphostructurale du massif des Toura (ouest de la Côte d'Ivoire). Cette approche a permis d'utiliser à la fois la réponse spectrale des objets géologiques, les caractéristiques physiographiques du relief et la représentation 3D. Les résultats de cette étude montrent que le traitement des bandes dans l'IRM améliore considérablement la distinction des éléments structuraux et facilite la cartographie morphostructurale. Dans cet environnement montagneux, l'interprétation des modelés et des discontinuités topographiques a également enrichi la base de données géostructurales.

La carte morphostructurale du massif des Tourra, avec les orientations principales N 00-20°, N 60-80° et N 110-120° et secondaires N 90-100° et N 160-180°, est en accord avec les travaux antérieurs et s'intègre parfaitement au schéma tectonique de l'Afrique de l'Ouest. La correspondance géographique entre les objets structuraux relevés sur les deux supports (ASTER et MNA) et la répartition statistique quasi-similaire des orientations a permis d'exploiter la concordance et la complémentarité de ces deux sources de données. L'architecture très fracturée observée permet de confirmer la complexité structurale du massif des Toura, secteur très proche du couloir de cisaillement d'orientation N-S du Sassandra.

D'autres sources d'informations, telles que les images radar (RSO d'ERS, d'ENVISAT et de RADARSAT) et les données géophysiques, pourront, dans une perspective de recherche, être intégrées aux résultats acquis pour la discrimination des unités lithologiques de ce secteur avant une cartographie plus régionale de l'Archéen de l'ouest de la Côte d'Ivoire.

Remerciements

Les auteurs adressent leurs remerciements à l'Agence universitaire de la Francophonie pour la subvention dont ils ont bénéficié dans le cadre du projet de coopération (PSCI 358.03), ainsi que les évaluateurs dont les commentaires et critiques ont contribué à améliorer la qualité de ce document.

Références

Azuelos, M.J., Posavec, M. et Caldini F.G. (1978) Carte photogéologique de Man. Société pour le Développement Minier de la Côte d'Ivoire, 1 : 200 000.

Bessoles, B. (1977) Géologie de l'Afrique : le craton Ouest-africain. Mémoire du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, paris, n° 88, 403 p.

Biémi, J., Gioan, P., Affian, K., Jourda, J.-P. et Kouamé, K.F. (1998) Système d'information hydrogéologique pour une évaluation du potentiel hydrique en milieu cristallophyllien fissuré : la région de Biankouma-Man (ouest de la Côte d'Ivoire). P. 261-270, *in* J.-M.M. Dubois, M. Bernier, J.-P. Fortin et F. Boivin (réd.) La réalité de terrain en télédétection : pratique et méthodes. Agence universitaire de la Francophonie, Montréal, 356 p.

Bonnet, T. et Colbeaux, J.P. (1999) L'analyse morphologique spatialisée : apports d'une méthode à la détection des accidents, une nécessité dans l'approche hydrodynamique et karstologique des aquifères fissurés. Exemples dans le Nord de la France crayeux. Geodinamica Acta, vol. 12, n° 3-4, p. 223-235.

Camil, J. (1984) Pétrographie, chronologie des ensembles granulitiques archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implications pour l'histoire géologique du craton Ouest africain. Thèse de doctorat d'état, Université d'Abidjan, Abidjan, 306 p.

Camil, J., Tempier, P. et Caen Vachette, M. (1984) Schéma pétrographique, structural et chronologique des formations archéennes de la région de Man (Côte d'Ivoire). Leur rôle dans la cratonisation de l'Ouest Africain. Géologie Africaine, vol. 11, p. -10.

Cheng, P. and Toutin, T. (2001) Orthorectification and DEM generation from high resolution data. 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 5-9 November 2001, Singapore, 6 p.

Chorowicz, J., Cervelle, B., Kim, J., Manoussis, S., Morasse, C., Prudon, D., Rudant, J.-P., Riazanoff, S., Breard, J.Y., Foin, P. et Veillet, I. (1989) Utilisation des modèles numériques de terrain pour la reconnaissance automatique de certaines formes en géologie et géomorphologie. Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, n° 115 (3), p. 5-7.

Davis, P.A. and Berlin, G.L. (1989) Rock discrimination in the complex geologic environment of Jabal Salma, Saudi Arabia, using Landsat TM data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 55, n° 8, p. 1147-1160.

Deffontaines, B. (2000) Formes et déformations de la surface terrestre : approche morphométrique et application. Thèse d'habilitation à diriger la recherche, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 65 p.

Direction de la Géologie (1995) Carte géologique de Man. Ministère des Mines et de l'Énergie de Côte d'Ivoire, Abidjan, 1 : 200 000.

Djro, S.C. (1998) Évolutions tectono-métamorphiques des gneiss granulitiques archéens du secteur de Biankouma-Touba (Nord-Ouest, Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat d'état, Université d'Abidjan, Abidjan, 121 p.

Fujisada, H. (1995) Design and performance of ASTER instrument. Proceedings of SPIE, Paris, 25 September 1995, vol. 2583, p. 16-25.

Gillespie, A.R., Kahle, A.B. and Walker, R.E. (1986) Color enhancement of highly correlated images. I : Decorrelation and HSI contrast stretches. Remote Sensing of Environment, vol. 20, p. 209-235.

Haydn, R., Dalke, G.W., Henkel, J. and Bare, J.E. (1982) Application of the IHS colour transform to the processing of multisensor data and image enhancement. Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Arid and Semi-Arid Lands. Cairo, 12-13 January 1982, p. 599-616.

Hobbs, W.H. (1904) Lineaments of the Atlantic border region. Geological Society of America Bulletin, vol. 15, p. 483-506.

Hubbard, B.E and Crowley, J.K. (2005) Mineral mapping on the Chilean–Bolivian Altiplano using co-orbital ALI, ASTER and Hyperion imagery : Data dimensionality issues and solutions. Remote Sensing of Environment, no 99, p. 173-186.

Kahle, A.B., Palluconi, F.D., Hook, S.J., Realmuto, V.J. and Bothwell, G. (1991) The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer (ASTER). International Journal of Imaging Systems and Technology, vol. 3, p. 144-156.

Kouamé, K.F. (1999) Hydrogéologie des régions de montagne : apports des données de télédétection et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale des aquifères discontinus du secteur Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat de 3e cycle, Université de Cocody, 210 p.

Kouamé, K.F., Gioan, P., Biémi, J. et Affian, K. (1999) Méthode de cartographie des discontinuités images extraites d'images satellitales (exemple de la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire). Télédétection, vol. 1, n° 2, p. 139-156.

Kouamélan, A.N. (1996) Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition archéen-protérozoïque. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, Rennes, 277 p.

Lasm, T. (2000) Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (Domaine Archéen). Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Poitiers, 272 p.

Lemoine, S. (1988) Évolution géologique de la région de Dabakala (Nord-Est de la Côte d'Ivoire) au Protérozoïque inférieur. Possibilités d'extension au reste de la Côte d'Ivoire et au Burkina Faso. Thèse de doctorat d'état, Université de Clermont-Ferrand, Clermont-Ferrand, 334 p.

Mah, A. Taylor, G.R., Lennox, P. and Balia, L. (1995) Lineament analysis of Landsat Thematic Mapper Images, Northern territory, Australia. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 61, n° 6, p. 761-773.

Ninomiya, Y., Fu, B. and Cudahy, T.J. (2005) Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared "radiance-at-sensor" data. Remote Sensing of Environment, vol. 99, p. 127-139.

O'Leary, D.W., Friedman, J.D. and Pohn, H.A. (1976) Lineaments, linear, lineations : some standards for old terms. Geological Society of American Bulletin, vol. 87, p. 1463-1469.

Papon, A. et Lemarchand R. (1973) Géologie et minéralisations du Sud-ouest de la Côte d'Ivoire. Synthèse des travaux de l'opération SASCA (1962-1968). Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Lausanne, mémoire n° 80, 286 p.

Pothin, K.B.K. (1988) Pétrographie et géochimie des formations précambriennes de la région d'Odiénné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat d'état, Université de Côte d'Ivoire, Abidjan, 310 p.

Rowan, L.C. and Mars, J.C. (2003) Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. Remote Sensing of Environment, no 84, p. 350–366.

Rowan, L.C., Mars, J. C. and Simpson, C. J. (2005) Lithologic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). Remote Sensing of Environment, no 99, p. 105–126

Sabins, F.F.Jr. (1987) Remote Sensing : Principles and interpretation. W.H. Freeman and Co., 426 p.

Tagini, B. (1971) Esquisse structurale de la Côte-d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale. Thèse de doctorat d'état, Université de Lausanne, Lausanne, 302 p.

Thome, K., Biggar, S. and Slater, P. (1999) Algorithm theoretical basis document for ASTER level 2B1-surface radiance and ASTER 2B5-surface reflectance. Report of the Remote Sensing Group of the Optical Sciences Center, University of Arizona, 45 p.

Yacé, I. (1984) Le précambrien de l'Afrique de l'Ouest et ses corrélations avec le Brésil oriental. Rapport final du projet PICG/CIFEG, publication occasionnelle, n° 2, 28 p.

Yacé, I. (2002) Initiation à la géologie. L'exemple de la Côte d'Ivoire et de l'Afrique de l'Ouest : pétrologie, géologie régionale. Éditions CEDA, Abidjan, 183 p.

Yamaguchi, Y., Kahle, A., Tsu, H., Kawakami, T. and Pniel, M. (1998) Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36, p. 1062-1071.