Télédétection, 1999, Vol. 1, pp. 139-156
Des tirés à part sont disponibles auprès de l'éditeur
Droit de photocopie soumis à autorisation

© 1999 OPA (Overseas Publishers Association) N.V.
Publié sous licence par
Gordon and Breach Science Publishers
Imprimé en Malaisie

Méthode de cartographie des discontinuités-images extraites d'images satellitales: exemple de la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire

FERNAND KOUAME[a*], PIERRE GIOAN[abt], JEAN BIEMI[a] et KOUADIO AFFIAN[a]

[a]Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (C.U.R.A.T.), Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody-Abidjan, 22 B.P. 801 Abidjan, 22 Côte d'Ivoire et [b]B.P. 511 Cedex 3, Abidjan-Riviéra; Côte d'Ivoire

(soumis le 08 mars 1999 ; accepté le 18 juin 1999)

Une évaluation du potentiel hydrique de la région semi-montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire) est effectuée à partir de données satellitales. Ce travail s'inscrit dans le cadre plus général d'un inventaire des ressources et potentialités hydriques, minières et agricoles de la sous-région regroupant une partie des territoires du Ghana, de Côte d'Ivoire et du Liberia. L'étude, réalisée sur une image TM de Landsat, vient en fait compléter le travail déjà effectué à partir d'une image HRV(P) de SPOT en 1998. Elle couvre un peu plus d'un demi degré carré. Le protocole expérimental adopté : depuis le traitement des données satellitales jusqu'à l'élaboration de la carte des discontinuités-images résultant de l'extraction linéamentaire, fait l'objet de cet article sans toutefois en aborder l'interprétation. La préparation de l'image consiste en traitements préliminaires classiques (corrections géométriques et radiométriques); elle se poursuit par l'application de différents filtres (moyenneur, laplacien de rehaussement, directionnels, gradients) pour aboutir à une image «transformée» d'où sont extraits les linéaments majeurs et secondaires marqueurs de discontinuités-images Deux modes d'extraction sont appliqués : un mode automatique (morphologie mathématique) et un mode dirigé (photo-interprétation). Le document final se présente sous la forme d'une carte

* Correspondance auteur : tél./télécopieur : (225) 43 65 94 ; courriel : gioanp@syfed.ci.refer.org
† (225) 44 52 70 ; télécopieur : (225) 44 35 00 ; courriel : gioanp@syfed.ci.refer.org

de discontinuités-images détaillée constituant un nouveau niveau d'information exploitable au sein d'une base de données à vocation hydrogéologique ou minière par exemple. La difficulté de la validation de terrain dans ces régions, liée à un fort développement latéritique, impose de confirmer la pertinence, en tant qu'objets tectoniques, des discontinuités-images extraites du traitement des données satellitales. Pour ce faire, l'application de divers traitements statistiques et fractals ainsi que la comparaison par une approche complémentaire du type : particularités du réseau hydrographique seront les techniques éprouvées par la suite et constituent l'interprétation proprement dite des discontinuités qui fera l'objet d'une prochaine publication.

Mots-clés: cartographie structurale; images satellitales; traitement numérique; linéaments; extraction des discontinuités-images; Côte d'Ivoire

A Method for Mapping Imagery Discontinuities Extracted from Satellite Imageries: An Example Taken from the Semi-Mountainous Region in Western Côte d'Ivoire

An evaluation of groundwater resources in the semi-mountainous region of Man-Danané in Western Côte d'Ivoire was made using satellite data. This work is a part of a more general inventory of groundwater, mineral and agricultural resources and potentialities in the sub-region regrouping part of Ghana, Côte d'Ivoire and Liberia territories. The study which was done using a Landsat TM imagery actually comes to complete the first work which was done in 1998 using a SPOT HRV(P) imagery. The area covered is just more than a half square degree. The experimental protocol adopted from the preparation of satellite data to the obtention of the imagery discontinuities map resulting from lineament extraction is the object of this article without the interpretation. The preparation of the imagery consists of classical preliminary treatments such as geometric and radiometric corrections followed by the application of different filters such as averaging filter, laplacian enhancement filter, directional filter and gradient filter to obtain a "transformed imagery" from which are extracted the major and minor lineaments imagery discontinuities drawings. Two extraction modes are applied: an automatic mode (mathematical morphology) and a directed mode (photo-interpretation). The final document is in the form of a detailed imagery discontinuities map which is a new information level exploitable within a data base with a mineral or hydrogeological vocation for example. The difficulty of a field validation in those study regions as due to a high lateritic development makes it an obligation to confirm the relevance of imagery discontinuities as tectonic objects extracted from the treatment of satellite data. As a result, the application of various statistical treatments and fractals as well as the comparison through a complementary of the hydrographic network particularities will be confirmed techniques to be used to validate the structural origin of imagery discontinuities as revealed at the end of this first step. The development of those methods being the following step of the real interpretation of discontinuities, will be the object of the next publication.

Keywords: structural mapping; satellite imageries; numerical treatment; lineaments; imagery discontinuities extraction; West Côte d'Ivoire

1. INTRODUCTION

L'évaluation des ressources en eaux souterraines (ISRO, 1999) des aquifères discontinus en milieu de socle cristallophyllien fissuré (Castaing *et al.*,

1989; Biémi *et al.*, 1998) a mis l'accent sur l'importance de la cartographie linéamentaire. Les linéaments, définis par Hobbs en 1904 et dont les diverses définitions ont été inventoriées par Scanvic (1992), correspondent à des éléments linéaires observables sur les données images. Pour Scanvic (1992), «le linéament est moins souvent décrit sur les images satellites de deuxième génération où l'observation est plus précise[...] il est clair que le terme de linéament s'adapte parfaitement à l'étude structurale des régions à fort recouvrement pédo-végétal où le contrôle sur le terrain[...] est difficile[...]» Toutefois, on se conforme au choix de Scanvic (1992) qui «propose d'adopter le terme de discontinuité-image (expression morphologique ou radiométrique linéaire, sans référence précise au terrain) (Castaing *et al.*, 1989)[...] pour qualifier[...] tous les phénomènes linéaires ou curvilignes dont on peut présumer de la nature structurale[...]». En hydrogéologie souterraine, comme en prospection minière (Yésou *et al.*, 1990; Braux *et al.*, 1991), l'analyse des discontinuités-images extraites d'images satellitales constitue la phase préliminaire incontournable à toute étude prospective. C'est donc dans ce cadre qu'un relevé régional des discontinuités a été entrepris par une équipe du Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT) de l'Université de Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire). Il s'agit d'une phase d'évaluation dont l'objectif est la mise au point du protocole expérimental de filtrage et d'extraction des discontinuités. Une première étude faite sur une image HRV(P) de SPOT a été réalisée en 1998 par Biémi *et al.* Celle-ci avait pour objectif l'élaboration d'une technique d'urgence d'évaluation du potentiel hydrique d'une partie seulement de cette même région et faisait appel à des traitements similaires à ceux présentés aujourd'hui pour aboutir à une carte linéamentaire de synthèse. Dans le cas présent, on opère sur une image Landsat TM qui couvre une aire plus importante que celle de l'étude précédente. On procède à la combinaison de diverses techniques de traitement et de filtrage d'images, testées comme étant les mieux appropriées pour établir le relevé des discontinuités-images à valeur de témoins tectoniques constituant un nouveau niveau d'information à intégrer dans une base de données. L'exploitation et l'interprétation de ce relevé des discontinuités d'origine structurale à des fins hydrogéologiques ou de prospection minière, constituent une autre étape de la chaîne de traitement non développée ici.

2. PRÉSENTATION GÉNÉRALE

2.1. Cadre géographique

La zone étudiée est la région semi-montagneuse de Man-Danané (figure 1) qui se situe à l'ouest de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 7°21′ et 7°56′ Nord et les longitudes 7° et 8°05′ Ouest. Le relief se répartit entre deux ensembles morphologiques d'extension inégale:

- un premier ensemble de sommets d'altitude dépassant généralement les 1 000 m, qui correspond au prolongement oriental de la chaîne du Fouta Djalon selon une bande sensiblement NE-SO;
- un deuxième ensemble de bas plateaux au sud et au NO de la figure 1 dont les altitudes ne dépassent guère les 400 m.

Le réseau hydrographique, à densité élevée sous ces latitudes et en raison de la nature du substratum, présente des particularités morphologiques correspondant à celles retenues par Deffontaines et Chorowicz (1991) comme appartenant à un réseau initial et/ou à un réseau en développement.

2.2. Cadre géologique

La géologie de la région a fait l'objet de nombreux travaux dont les plus récents sont ceux de Camil (1984) et de Kouamélan (1996). Du point de vue lithologique, deux compartiments séparés par la faille de Man-Danané d'orientation moyenne N80° (figure 1) sont distingués par Camil (1984). Cette faille, à fonctionnement sénestre apparent, est soulignée par une zone mylonitisée non jalonnée d'intrusions particulières et dont l'extension est beaucoup plus faible que celle de la faille du Sassandra. Le compartiment au Nord de la faille est de nature granulitique. Il est constitué de gneiss gris tonalitiques intrudés par des massifs granodioritiques et charnockitiques. De nombreuses lentilles de granulite rose y sont également injectées. Le compartiment au Sud de la faille est, quant à lui, anatectique, avec un complexe de quartzite à magnétite. Il s'agit de gneiss migmatitiques et charnockitiques, de migmatites et d'un ensemble de quartzites à magnétite (diopsidite, hypersthénite, basite et ultrabasite). Entre les deux compartiments, Kouamélan (1996) distingue une zone intermédiaire granulitique et migmatitique. Les âges établis pour la plupart par Kouamélan (1996) et compilés par Gioan et al. (1998) se répartissent entre 3431 M.a. (Sm-Nd sur roche totale) et 3048 M.a. (Pb-Pb sur zircon) pour un gneiss

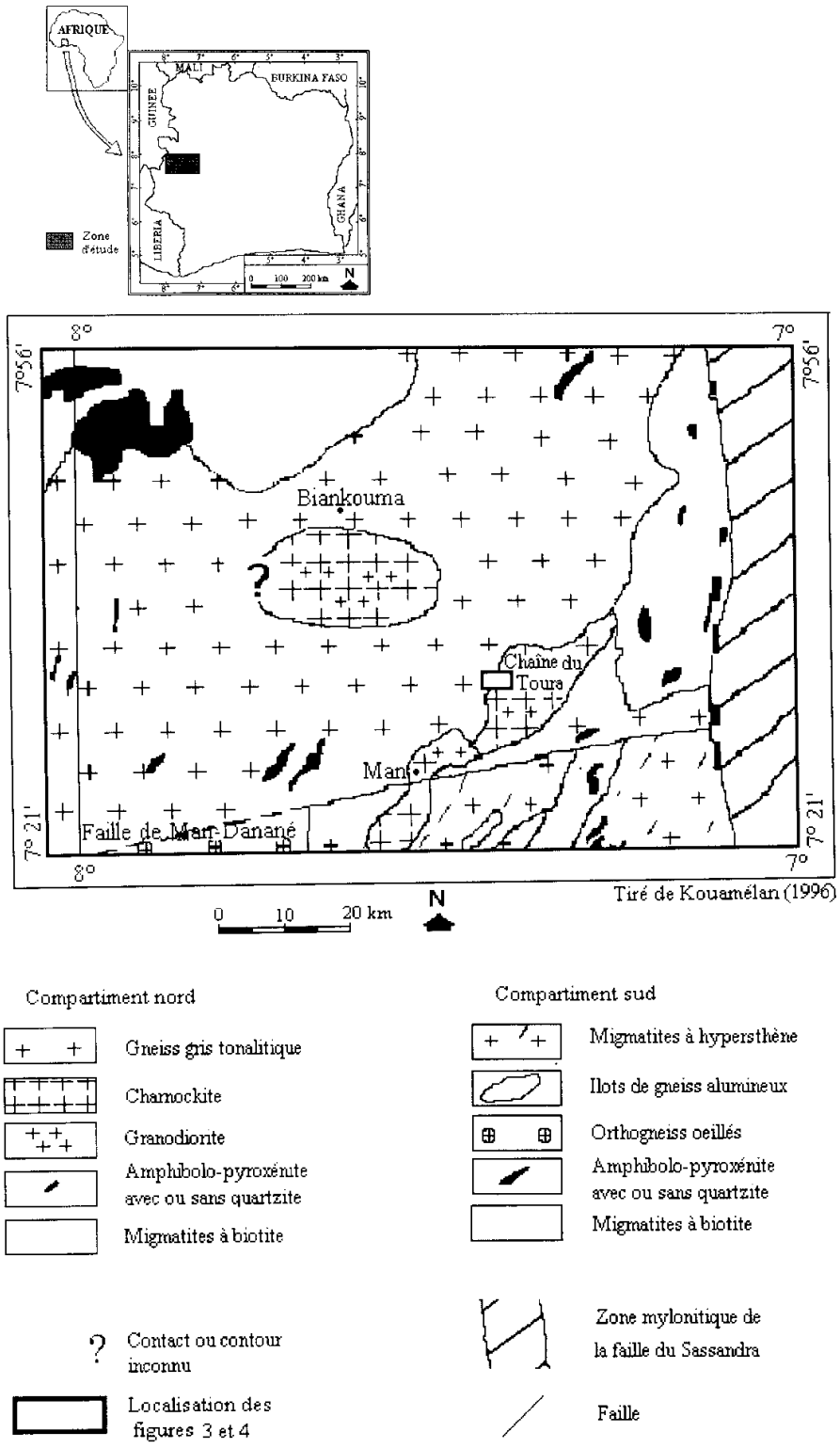


FIGURE 1 Localisation et carte géologique de la zone d'étude

gris (7°46′ N-7°34′ O), des granulites (7°30′ N- 7°31′ O), des mobilisats anatectiques (7°19′ N-7°25′ O) et une charnockite (7°38′ N- 7°36′ O). Une autre tranche d'âge entre 2901 M.a. (U-Pb sur zircon) et 2630 M.a. (Pb-Pb sur zircon) est également obtenue sur des granulites roses (7°30′ N-7°31′O), sur charnockite (7°39′ N-7°37′ O) et granodiorite (7°27′ N-7°23′ O). Enfin, quatre âges (Sm-Nd sur roche totale) réalisés sur mobilisats anatectiques (7°19′ N-7°25′ O) témoignent d'un évènement tectono-métamorphique vers 2200 M.a.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1. Données utilisées

Pour réaliser cette étude, en plus de l'image déjà traitée (Biémi *et al.*, 1998) correspondant à la scène HRV (P) de SPOT 44–335, acquise le 17–03–1988 en saison sèche, on dispose également d'une scène TM de Landsat 198–55, acquise le 4–01–1985 en pleine saison sèche. De plus, on utilise divers documents cartographiques : les cartes topographiques de l'IGN de 1966 au 1/ 50 000, la carte du bilan forestier établie par le Centre de Cartographie et de Télédétection d'Abidjan 1993 au 1/ 200 000, des cartes géologiques de Camil (1984) au 1/ 500 000, de Kouamélan (1996) au 1/ 1 000 000, enfin des cartes photogéologique de la SODEMI-Kenting Earth Sciences (1978) et géologique provisoire de Man-Danané de la Direction des Mines et de la Géologie (1995) toutes deux au 1/ 200 000.

Les divers traitements des images et des données cartographiques ont été effectués au CURAT sur une station équipée des logiciels de traitement d'images EASI PACE de PCI et du système d'information géographique MAP INFO 4.0. L'organigramme de la figure 2 fait le récapitulatif des différentes opérations de rehaussement et de filtrage effectuées pour aboutir à l'extraction des discontinuités-images et précise leur succession chronologique.

3.2. Traitements des images

3.2.1. Prétraitements

Les traitements géométrique et radiométrique de la scène 198–55 TM de Landsat de la région d'étude sont effectués sur les deux quadrants supé-

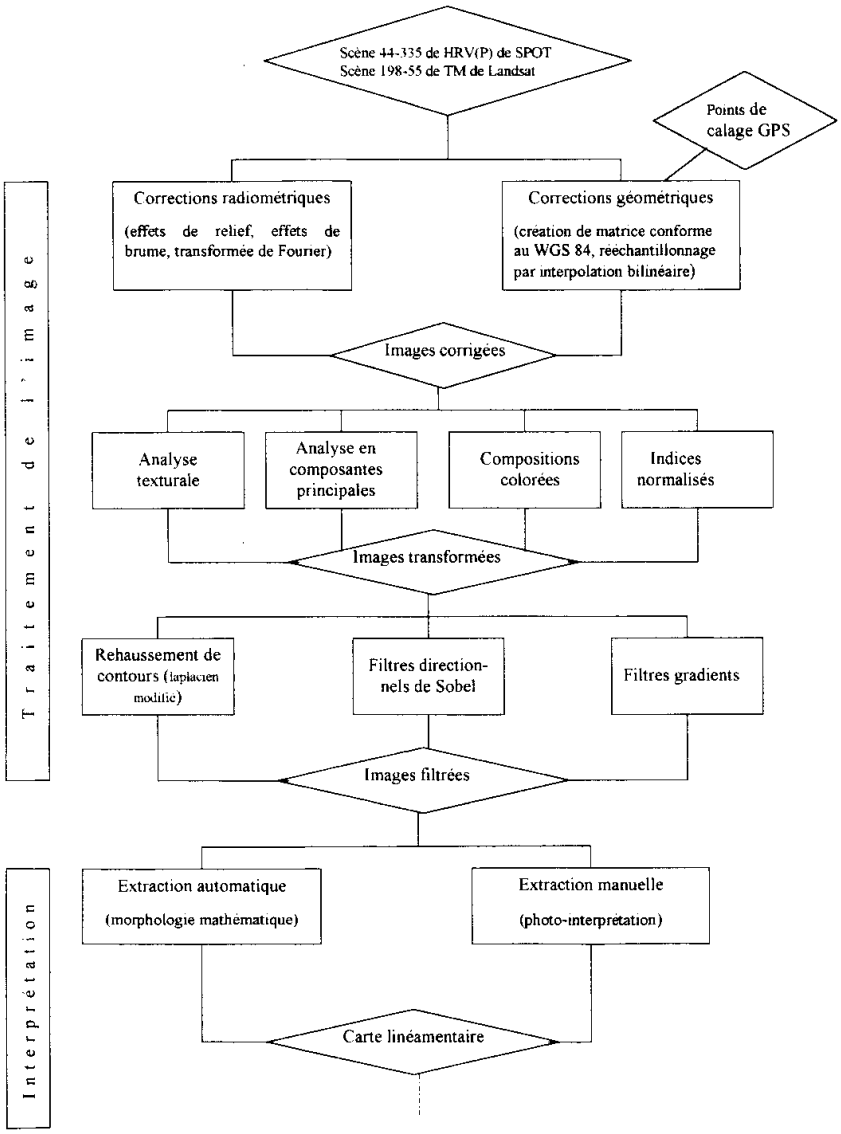


FIGURE 2 Organigramme des traitements d'images réalisés

rieurs. Une correction géométrique d'ordre deux, avec rééchantillonnage bilinéaire, a été réalisée à partir d'un fichier de douze points G.P.S. recueillis lors des campagnes de terrain. L'erreur résiduelle est de l'ordre d'un demi pixel.

La correction radiométrique est effectuée par : d'une part l'application de la transformée de Fourier (Smirnov, 1982) sur la bande TM 3 et d'autre part l'utilisation de filtres passe bas (Moore et Waltz, 1983; Yésou *et al.*, 1993). Ces techniques permettent de réduire voire d'éliminer certains

bruits parasites contenus dans les images. Pour homogénéiser la radiométrie de l'image (Crippen, 1987; 1988) et pour atténuer les effets d'ombrage liés au relief, on procède aux rapports de bandes suivants : TM3/TM4, TM4/TM5, TM4/TM6 et TM4/TM7. Pour réduire l'effet de brume sèche, assimilé à un facteur à caractère additif sur le signal radiométrique, la technique adoptée, moins sophistiquée que celles proposées par Lavreau (1991), consiste tout simplement à soustraire une valeur radiométrique constante estimée de cet effet sur l'ensemble de l'image.

3.2.2. Analyse texturale des images TM

À la différence de l'information spectrale qui est donnée par le niveau de gris ou la classe de niveau de gris dans une image, l'information texturale est déterminée par la forme et la configuration d'un groupe de pixels de niveau de gris différents (Lake, 1991). Cette signature texturale est fonction de l'échelle d'observation des entités spatiales dans une image. La méthode d'analyse de texture utilisée est celle développée par Haralick (1979). Cette méthode statistique utilise les matrices de cooccurence des niveaux de gris pour déterminer les relations entre un pixel donné et son voisinage. Bien qu'elle soit le plus souvent utilisée pour la classification ou la segmentation, cette méthode est utilisée, dans le cas présent, afin de sélectionner les paramètres qui définissent les éléments structurants en vue de procéder à une extraction automatique. Son application est effectuée sur la première composante principale et le canal TM 7. Les trois paramètres : homogénéité, dissemblance, et moyenne représentés sous la forme d'une composition colorée rouge-vert-bleu (R.V.B.) facilitent la discrimination des unités morphostructurales et soulignent les principaux linéaments structuraux. Cette image élaborée à partir des trois paramètres texturaux retenus constitue le document de base de l'extraction automatique par morphologie mathématique. Différentes images dérivées de l'analyse texturale et combinées aux bandes spectrales sont utilisées pour établir la carte du relevé détaillé des discontinuités-images de notre secteur.

3.2.3. Filtrage spatial des images

Notre objectif est maintenant de dégager et d'accentuer les structures linéaires correspondant à des discontinuités lithologiques ou structurales par l'utilisation de différents procédés de filtrage. Notre région d'étude a subi une fracturation intense soulignée en zone de montagne par les

entailles rectilignes des vallées profondes (Biémi *et al.*, 1998; Kouamé, 1997). Diverses méthodes d'amélioration de l'image sont appliquées sur l'ensemble des bandes multispectrales 3, 4, 5, 6 et 7 de TM. Elles aboutissent à des images transformées : indices normalisés, compositions colorées et images issues de l'analyse en composantes principales. Les méthodes de filtrage testées sont identiques à celles éprouvées par Yésou *et al.* (1993). La taille du filtre appliqué influe les longueurs des linéaments rehaussés; en effet, seuls les linéaments et structures de taille supérieure ou égale à la moitié de la fenêtre de convolution (filtre) sont détectés alors que ceux de taille inférieure se confondent avec le bruit de l'image. Sur les bandes multispectrales de TM, les linéaments et structures particulières déjà reconnus sur l'image HRV(P) de taille décamétrique, sont maintenant de taille hectométrique. Mais la finesse de résolution dans notre quête d'objets linéaires ou autres figures géométriques n'est pas absolument nécessaire pour la carte linéamentaire que l'on se propose de dresser. Les discontinuités hectométriques relevées sont donc amplement suffisantes pour les traitements projetés.

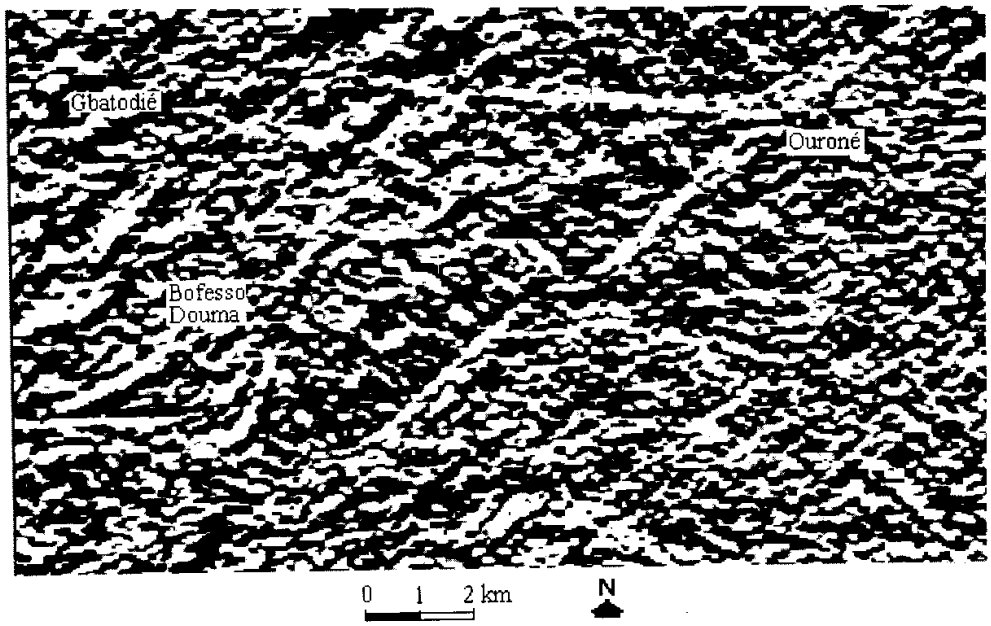
A) Filtres laplaciens de rehaussement de contours

Les filtres laplaciens de rehaussement de contours sont des filtres 3×3 de type haute fréquence (tableau Ia) qui soulignent les zones à variation brusque d'intensité. On constate qu'effectivement, l'application de ce type de filtrage s'accompagne d'un rehaussement des contours et a donc son utilité pour la suite du traitement envisagé. Les néocanaux obtenus sont soit analysés directement soit combinés avec d'autres données brutes (Castaing *et al.*, 1989; Chavez and Bowell, 1988; Yésou and Rolet, 1990).

B) Filtres directionnels

Afin de rehausser les discontinuités-images majeures après un filtrage passe bas, des opérateurs de type Sobel sont appliqués. Il s'agit de filtres, de matrice 7×7 (tableau 1b), sélectionnés à partir des tests de Yésou *et al.* (1993) qui accentuent les directions lithologiques et structurales de notre région d'étude selon les quatre directions suivantes E-O, N-S, NE-SO et NO-SE. Selon le type de filtre appliqué sur les images transformées de première composante de l'analyse en composantes principales, certaines structures seront oblitérées, d'autres, au contraire, révélées. En effet, la matrice constituant le filtre, de par sa nature même, entraîne le gommage

ou du moins l'estompage systématique des structures parallèles à la direction du filtre et au contraire le ravivage de celles qui lui sont orthogonales. Les figures 3a et 3b réalisées sur les fenêtres du même secteur l'une filtrée N-S et l'autre filtrée NO-SE, l'illustrent parfaitement.



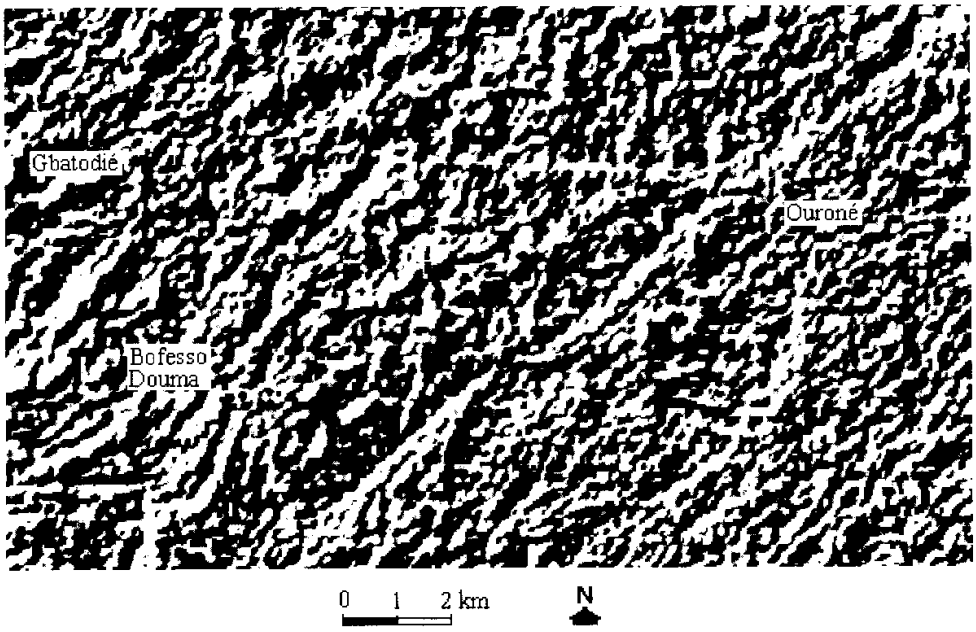


FIGURE 3 a) Fenêtre filtrée Nord-Sud; b) Fenêtre filtrée NO-SE

C) Filtres gradients

Pour compléter le rehaussement de certaines structures, des filtres gradients de type Prewitt (1970) sont utilisés et présentés dans le tableau Ic. Leur effet respectif illustré par les figures 4a et 4b se traduit davantage par un affinage de la discrimination des unités structurales en particulier dans la zone de transition entre la chaîne du Toura et les bas plateaux du Sud de notre secteur d'étude. Avec ce dernier type de manipulation, on met fin à la phase de traitement des images pour aborder celle de l'interprétation proprement dite amorcée avec l'extraction des discontinuités-images.

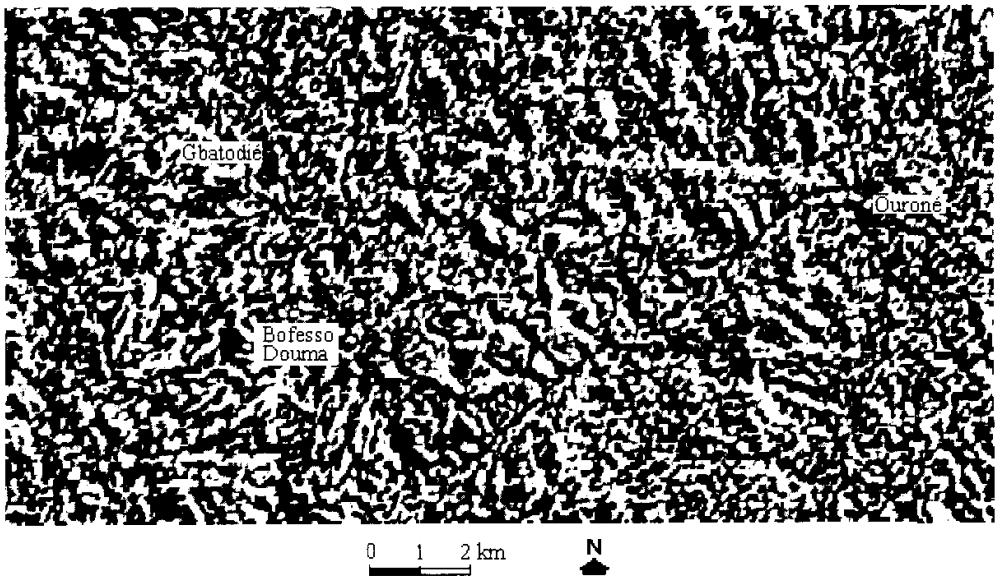
3.3. Extraction des discontinuités-images

Un relevé des discontinuités-images de notre région d'étude a donc été établi à partir de deux méthodes, l'une basée sur l'extraction automatique et l'autre sur l'extraction manuelle.

3.3.1. Extraction automatique par morphologie mathématique

Afin de minimiser les erreurs liées à l'effet d'échelle du support satellitale ainsi que celles attachées à la subjectivité du photo-interprète, une approche objective de rehaussement et d'extraction automatique des linéaments est proposée par Moore et Waltz (1983) qui veulent rendre davantage fiable le réseau de discontinuités linéaires assimilé à celui de la fracturation. La reconnaissance automatique des linéaments sur les images satellitales TM de Landsat fait appel à la théorie des ensembles (critères d'union, d'intersection, d'inclusion, de complément et de différence entre des ensembles d'objets et les éléments structurants). On parvient ainsi à réaliser sur une image toute une série d'opérations telles que érosion, dilatation, ouverture, fermeture qui, par une combinaison des transformations de voisinage, aboutit à l'amincissement et à la squelettisation (Bonn et Rochon, 1992).

L'extraction automatique des discontinuités permet donc de produire des fichiers vectoriels issus des néocanaux de l'analyse texturale. Les paramètres de définition des éléments structurants linéaires ou non demeurent très complexes et portent sur les seuils de longueur, d'angle et de niveau de gradient pour qu'un pixel ou un ensemble de pixels soit considéré comme un seul élément linéaire ou curvilinéaire. Le plus petit détail détectable dans une image satellitale ainsi que la distance minimale entre deux élé-



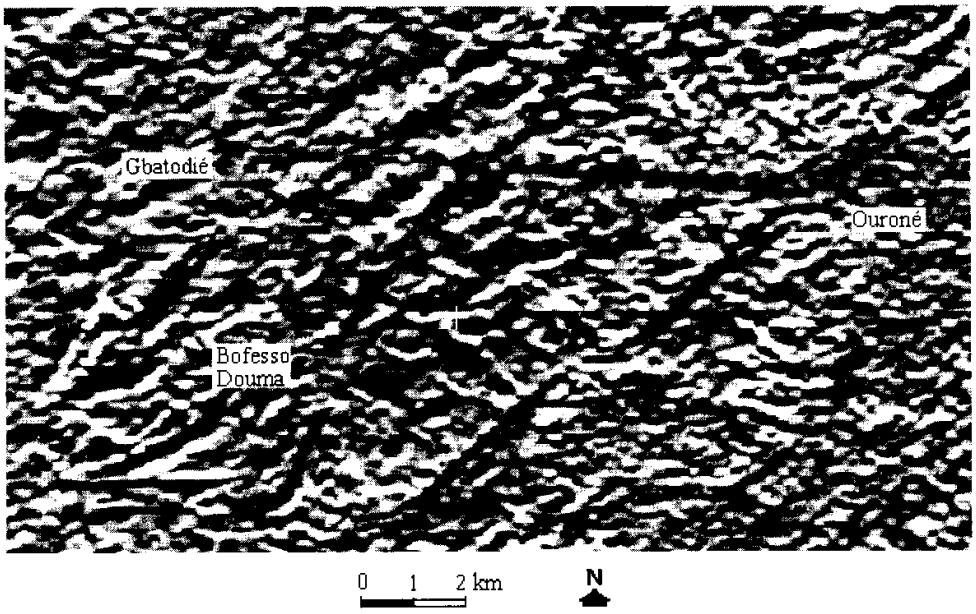


FIGURE 4 a) Fenêtre avec filtre gradient de type Prewitt (1970); b) Fenêtre avec filtre gradient de Yésou *et al.* (1993)

ments distincts vont fortement conditionner le relevé des discontinuités-images. L'extraction automatique, pratiquée dans notre cas, ne nous fournit pas les résultats prévus, sans doute en raison du nombre insuffisant de tests éprouvés mais aussi en raison de la difficulté de sélectionner les

TABLEAU I

a

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

Laplacien vrai

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

Laplacien modifié

b

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

NE-SO						
0	1	1	1	1	1	2
-1	0	2	2	2	3	1
-1	-2	0	3	4	2	1
-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-2	-4	-3	0	2	1
-1	-3	-2	-2	-2	0	1
-2	-1	-1	-1	-1	-1	0

NO-SE						
2	1	1	1	1	1	0
1	3	2	2	2	0	-1
1	2	4	3	0	-2	-1
1	2	3	0	-3	-2	-1
1	2	0	-3	-4	-2	-1
1	0	-2	-2	-2	-3	-1
0	-1	-1	-1	-1	-1	-2

c

1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
-1	-2	-3	-7	1	1	1
-1	-2	-3	-3	1	1	1
-1	-2	-2	-2	1	1	1
-1	-1	-1	-1	1	1	1

1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

paramètres qui caractérisent les discontinuités-images. En effet, le choix des paramètres saisis est laissé au libre arbitre du photo-interprète, ce qui revient indirectement à pratiquer une extraction dirigée.

3.3.2. Extraction manuelle par photo-interprétation

L'extraction manuelle des discontinuités-images a été réalisée sur les compositions colorées TM6 + TM7, ACP2, TM6 – TM7 / TM6 + TM7, sur celles des ratios de canaux TM3 / TM4, TM4 / TM6, TM4 / TM7 ainsi que sur les néocanaux issus du filtrage directionnel. Les discontinuités-images perçues par le photo-interprète sur les compositions colorées sont accentuées et parfois complétées par celles révélées et soulignées sur les néocanaux filtrés. Le photo-interprète procède au relevé des discontinuités-images de façon «comparable au «pointé graphique» des profils sismiques, *line drawing* des géophysiciens» (Yésou *et al.*, 1993). Le tracé des segments s'effectue directement à l'écran en procédant parfois à des grossissements localisés en cas d'incertitude sur l'existence de petits segments. Une fois le tracé de l'ensemble des segments de la zone d'étude terminé, on procède alors au tirage de la carte des discontinuités-images proprement dite sur papier.

4. CARTE DES DISCONTINUITÉS-IMAGES

La carte présentée en figure 5 réunit objets linéaires et non linéaires identifiés et relevés manuellement. Les objets linéaires sont assimilés au réseau de fracture et sont utilisés pour établir la «relation du réseau de linéaments de surface avec les directions majeures d'écoulement souterrain» (Somma *et al.*, 1998), non pas en milieu karstique mais en milieu cristallin. Les objets non linéaires, c'est-à-dire les structures particulières à forme géométrique, identifiés eux par l'analyse texturale et également reconnus à l'extraction manuelle, correspondent pour certains à des structures favorables à des circulations souterraines (Biémi *et al.*, 1991; Savané *et al.*, 1995). La carte des discontinuités-images constitue un nouveau niveau d'information à partir duquel est effectuée l'interprétation proprement dite. En comparant les discontinuités linéaires relevées sur l'image HRV(P) de l'étude de 1998 avec celles obtenues dans le cas présent sur l'image TM, on constate l'existence de très nombreuses similitudes. De même, si on compare la carte des discontinuités issue de l'image TM avec celle résultant de l'interprétation des photographies aériennes de la SODEMI – Kenting Earth Sciences (1978), on remarque là encore de nombreuses corrélations surtout au niveau des principaux accidents recon-

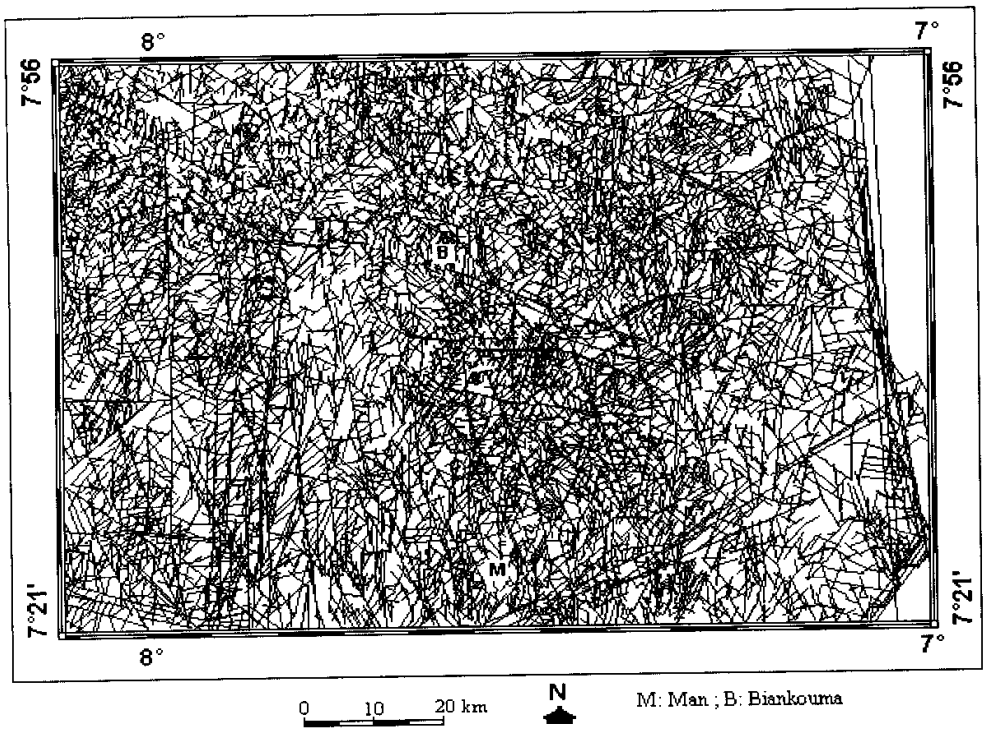


FIGURE 5 Carte détaillée des discontinuités-images

nus. Mais le constat le plus surprenant, reste la différence de densité d'informations entre celle peu élevée issue de la mosaïque photographique et celle beaucoup plus forte issue des données satellitales. Cela signifie que les données satellitales intègrent davantage d'artefacts? Auquel cas, il s'avère nécessaire de procéder à un traitement statistique des discontinuités linéaires afin d'en contrôler leur validité en tant qu'éléments linéaires de nature structurale. Parmi ces artefacts, il faut compter certaines sections rectilignes du réseau hydrographique qui se superposent parfaitement à certaines discontinuités linéaires majeures. Pour conforter la validité du relevé de discontinuités et évaluer son impact sur les circulations d'eau souterraine, nous préconisions déjà (Biémi *et al.*, 1998, p. 269) d'entreprendre une étude statistique sur l'orientation et la longueur des discontinuités relevées associée à celle des particularités morphologiques du réseau hydrographique s'appuyant sur les travaux de Deffontaines et Chorowicz (1991), Deffontaines *et al.* (1992), Deroin et Deffontaines (1995).

5. CONCLUSION

Le protocole expérimental appliqué à l'image Landsat TM afin d'en extraire les discontinuités linéaires diffère peu de celui adopté par Biémi *et al.* (1998) sur l'image HRV (P) de SPOT. La principale différence réside dans leur degré d'urgence respectif. Dans le premier cas, une situation pressante imposait une interprétation linéamentaire réalisée au moyen des spectres de Fourier associée à une photo-interprétation classique avec un contrôle terrain postérieur. Dans le cas présent, l'urgence est moins prononcée ce qui nous permet d'aboutir également à une carte détaillée de discontinuités-images non encore interprétée et constituant elle-même une nouvelle source d'informations à partir de laquelle sera effectuée l'interprétation. On peut toutefois retenir de l'étude de Biémi *et al.* (1998) que la réalité de terrain réalisée depuis révèle non seulement la difficulté d'établir la validité des discontinuités-images en contexte cristallophyllien et sous climat tropical humide (variabilité de l'épaisseur d'altération). La nécessité d'établir une autre base de données linéamentaires s'appuyant sur le réseau hydrographique particulièrement dense sous ces latitudes et sur un tel soubassement géologique se fait ressentir. En effet, on peut estimer qu'un grand nombre de discontinuités-images extraites de l'image satellitale est d'origine hydrographique. Cela signifie aussi que dans la phase interprétative à venir, il conviendra d'aborder l'analyse des discontinuités sous un double aspect statistique et fractal mais également sous l'aspect analyse de gémorphologie structurale et de tectonique selon une approche du type Deffontaines et Chorowicz (1991), Deffontaines *et al.* (1992). Cette combinaison des données des discontinuités linéaires issues mais aussi contrôlées des deux sources : image satellitale et réseau hydrographique, devrait constituer le document de toute première pertinence pour évaluer l'impact réel du réseau de surface sur le réseau d'écoulement souterrain dans un tel contexte géologique et climatologique.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'AUPELF-UREF d'avoir pu bénéficier du soutien de l'Allocation du Fonds Francophone de Recherche qui a financé partiellement cette étude ne constituant, en réalité, qu'une composante d'un plus vaste projet intitulé Fouta Djallon ainsi que les deux rapporteurs pour leurs commentaires détaillés et leurs suggestions pour l'amélioration de la version originale.

Références

Biémi, J., Affian, K., Jourda, J.-P. et Kouamé, F. (1997) Étude par télédétection et système d'information géographique des aquifères discontinus de montagne à l'Ouest de la Côte d'Ivoire (secteur Biankouma-Man). In Régions, régionalisation et développement; Actes des 9e Journées Géographiques de Côte d'Ivoire, Bouaké, 26–30 novembre 1996, *Cahiers de Géographie Tropicale, Institut de Géographie Tropicale/ Université de Cocody-Abidjan*, no 5, p. 256–269.

Biémi, J., Deslandes, S., Gwyn, Q. H.J. et Jourda, J.-P. (1991) Influence des linéaments sur la productivité des forages dans le bassin versant de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire) : apport de la télédétection et d'un système d'information à référence spatiale. p. 43–49 In P. Gagnon (éd.). Télédétection et gestion des ressources. vol.VII, Comptes rendus du septième congrès de l'Association Québécoise de Télédétection, 714 p.

Biémi, J., Gioan, P., Affian, K., Jourda, J.-P. et Kouamé, 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 (dir.) La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes. Série Actualité scientifique, AUPELF-UREF, Montréal, 356 p.

Bonn, F. et Rochon, G. (1992) Précis de télédétection. Principes et méthodes. Vol. 1, Presses de l'Université du Québec AUPELF, Québec, 486 p.

Braux, C., Cassard, D., Delpont, G., Bonnefoy, D., Corpel, J. et Lagny, Ph. (1991) Identification de secteurs à vocation aurifère dans un couloir tectonique régional par interprétation de données satellitaires, géologiques, géophysiques intégrées dans un système d'information géographique. L'exemple du cisaillement sud-armoricain. *Chronique de la Recherche Minière*, no 505, p. 19–34.

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'Etat, Université de Côte d'Ivoire, 306 p.

Castaing, C., Dutartre, Ph., Gouyet, J.-F., Loiseau, P., Martin, P. et Pointet, T. (1989) Étude pluridisciplinaire d'un réseau de discontinuités-image SPOT en milieu granitique couvert. Implications en hydrologie des milieux fissurés. *Bulletin Société Française* de *Photogrammétrie et Télédétection*, vol. 113, no 1, p. 13–23.

Chavez, P.S., and Bowell, J.A. (1988) Comparison of the spectral information content of Landsat Thematic Mapper and SPOT for three different sites in the Phoenix, Arizona region. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, no 12, p. 1699–1708.

Crippen, R.E. (1987) The regression intersection method of adjusting image data for band ratioing. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, no 2, p. 137–155.

Crippen, R.E. (1988) The dangers of underestimating the importance of data adjustment in band ratioing. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9, no 4, p. 767–776.

Deffontaines, B. and Chorowicz, J. (1991) Principles of drainage basin analysis from multisource data : Applicacion to the structural analysis of the ZaireBasin. *Tectonophysics*, no 194, p. 237–263.

Deffontaines, B., Chotin, P., Aït Brahim, L. and Rozanov, M. (1992) Investigation of active faults in Morocco using morphometric methods and drainage pattern analysis. *Geologische Rundschau*, vol. 81, no 1, p. 199–210.

Deroin, J.-P. and Deffontaines, B. (1995) Morphostructural analysis for linking streamflow, lithology and structure : comparison with remote sensing data in the Cévennes (French Massif Central). *Zeitschrift für Geomorfologie N.F.*, vol. 39, no 1, p. 97–116.

Direction des Mines et de la Géologie (1995) Feuille Danané-Man. Carte géologique provisoire de la Côte d'Ivoire à 1 / 200 000.

Gioan, P., Pothin, K.B. et Gronayes, C.C. (1998) Le socle précambrien de Côte d'Ivoire : bilan géochronologique. 17^{e} Réunion des Sciences de la Terre, Brest, 31 mars – 3 avril 1998, Résumés, p 120–121.

Haralick, R. M. (1979) Statistical and structural approaches to texture. *Proceedings of the I.E.E.E.*, vol. 67, no 5, p. 786–804.

Hobbs, W.H. (1904) Lineaments of the Atlantic border regions. *Geological Society of America Bulletin*, no 15, p. 483–506.

ISRO (1999) *Argetting groundwater using IRS-1C Data* http : //www-projet.cst.cnes.fr/ceos/cdrom-98/ceos1/casestud/ground/ground.htm.

Kouamé, K.F. (1997) Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus de montagnes à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Cas du secteur Biankouma-Man. Apports de la télédétection et d'un système d'information géographique. Mémoire D.E.A., Université de Cocody-Abidjan, 91p.

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 de l'Université de Rennes I, Mémoire Géosciences Rennes, no 73, 289 p.

Lake, L.A. (1991) Analyse des méthodes texturales appliquées au traitement des images. Département de Géographie et Télédétection, Université de Sherbrooke, 38p. Moore, G. K. and Waltz, F. A. (1983) Objective procedure for lineament enhancement and extraction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 49, no 5, p. 641–647.

Lavreau, J. (1991) Suppression des aérosols sur l'imagerie Landsat Thematic Mapper. *Proceedings of the 5th International Colloquium : "Physical measurements and signatures in remote sensing"*, ESA SP-319, p. 85–88.

Prewitt, J. M. S. (1970) Filtering and Enhancement. p. 75., in Rosenfeld, A. and Lipkin, B. Picture processing and psychopictories. Academic Press, 420 p.

Savané, I., Bénié, G. B., Gwyn, H.Q. et Biémi, J. (1995) Évaluation des ressources en eau dans le socle par l'étude des fractures à l'aide des données Landsat dans le bassin d'Odienné. p. 111–120, in J.-M.M. Dubois, M.R. Boussema, F. Boivin et P. Lafrance (dir.) Télédétection des ressources en eau. Série Actualité scientifique, Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy, 304 p.

Scanvic, J.Y. (1992) Télédétection aérospatiale et informations géologiques. Manuels et Méthodes, Éditions B.R.G.M., Orléans, no 24, 284 p.

SODEMI – Kenting Earth Sciences (1978) Carte photogéologique, Man, 1 / 200 000. République de Côte d'Ivoire.

Smirnov, M.V. (1982) Digital filtering of lineament patterns. *Sovietic Remote Sensing*, no 1, p. 101 – 111.

Somma, J., Jabbour- Gédéon, B. et Saliba-Badaro, N. (1998) Mise en relation du réseau de linéaments de surface avec les directions majeures d'écoulement souterrain dans un milieu karstique du Mont Liban à l'aide d'images HRV de SPOT et TM de Landsat. p. 289–294, in J.-M. M. Dubois, M. Bernier, J.-P. Fortin et F. Boivin (dir.) La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes. Série Actualité scientifique, AUPELF-UREF, Montréal, 356 p.

Yésou, H., Gwyn, H., Brisson, H. et Bruce, B. (1990) Télédétection et prospection minière : application à la cartographie structurale du secteur du lac Shortt, Abitibi – Québec. Résultats préliminaires. *Bulletin Sciences Géologiques, Strasbourg*, vol. 43, no 1, p. 45–61.

Yésou, H. and Rolet, J. (1990) Regional mapping of the south armorican shear zone (Brittany, France) using remotely sensed SPOT imagery. *Photogrammetria*, vol. 45, p. 419–427.

Yésou, H., Saint Jean, R., Pion, J. C. et Besnus, R. (1993) Amélioration des données SPOT pour la cartographie structurale en milieu tropical. Exemple de la région des chapeaux de fer de Pagala (Togo). p. 143–164, in J.-M. M. Dubois et F. Blasco (réd.) Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux. Série Actualité scientifique, Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy, 492 p.