Télédétection, 2002, vol. 2, n° 4, p. 243-253
Des tirés à part sont disponibles auprès de l'éditeur
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2002 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

Étude structurale du Haut Atlas Oriental (Maroc) à l'aide de l'analyse linéamentaire des images HRV (XS) de SPOT

SALOUA MNISSAR HIMYARI[a*], CHRISTIAN HOEPFFNER[a],
MOHAMMED BENZAKOUR[b] et DRISS EL HADANI[b].

a Université, Mohammed V, Faculté des sciences, Département des sciences de la Terre, avenue Ibn Batouta, B.P. 1014, Rabat, Maroc.
Téléphone : +212 37 77 19 57 ; télécopieur : +212 37 77 42 61.
Courriel (*) : saloua_m98@yahoo.fr

b Centre Royal de Télédétection Spatial (C.R.T.S), Secteur 21, angle avenue Allal El Fassi et avenue Sanawbar, Hay Riad, Rabat, Maroc.
Téléphone : +212 37 71 54 48 ; télécopieur : +212 37 71 14 35.

(soumis le 11 juillet 2001 ; révisé le 25 septembre 2001 ; accepté le 12 décembre 2001)

L'analyse linéamentaire constitue une étape importante dans la cartographie géologique des bassins sédimentaires et dans la prospection des ressources du sous-sol. Dans cette étude, différents types de techniques d'extraction des linéaments ont été appliquées sur une image HRV (XS) de SPOT de la région du Haut Atlas Oriental (Maroc). Ces techniques incluent les différents rehaussements sur l'image d'origine ainsi que l'application de filtres directionnels et non directionnels sur les divers traitements appliqués à l'image (composition colorée, analyse en composantes principales (ACP), rapport des bandes, etc.). Parmi ces approches, l'application des filtres directionnels sur l'ACP1 a permis de cartographier le plus grand nombre de linéaments. Les densités les plus élevées obtenues sont celles des orientations N-S, E-O et ENE-OSO. Ces résultats sont conformes aux orientations cartographiées par Du Dresnay (1963) mais avec un nombre nettement plus important que sur la carte existante. Une analyse approfondie de ces résultats donne une nouvelle vision de l'interprétation de la fracturation dans le Haut Atlas Oriental. En effet, la formation de cette partie de la chaîne serait le résultat d'un jeu de failles normales au Mésozoïque et de leur rejeu au Cénozoïque en failles inverses couplées à des jeux en décrochement dextre. Les formations du Trias, jouant le rôle de couche « savon », seraient entraînées vers la surface lors du jeu inverse. Les résultats de cette étude ont permis de suggérer des hypothèses pour de possibles pièges d'hydrocarbures.

Mots-clefs : linéaments ; télédétection ; tectonique ; hydrocarbures ; Haut Atlas Oriental ; Maroc.

Structural study of the Haut Atlas Oriental (Morocco) using the SPOT's HRV (XS) images lineament analysis

Lineament analysis constitutes an important tool in the geologic mapping of sedimentary basins and in ground resources prospecting. In this study, various types of techniques to extract lineaments were applied to a SPOT's HRV (XS) image covering the Haut Atlas Oriental area (Morocco). The techniques include various image enhancement; application of directional and non directional filters and different image processing (color composite, principal components analysis (ACP), band ratios, etc.). The application of the directional filters on the ACP1 enable us to map the most important number of lineaments. The highest densities are oriented N-S, E-W and ENE-WSW. These results correspond to the orientations mapped by Du Dresnay (1963) but with sharply more identified lineaments. The analytical approach gives a new insight of the interpretation of the fracturing of the Haut Atlas Oriental. Indeed, the structural aspect of this area could be the result of a set of normal faults in the Mesozoic and there second set in the Cenozoic by reverse faults joined by set of right hand strike-slip . The Triassic structures, playing the role of « soap » layer, would be entailed towards the surface during the reverse phase. The results of this study allowed to suggest hypothesis in order to identify targets for oil exploration.

Keywords : lineaments ; remote sensing ; tectonics ; hydrocarbons ; Haut Atlas Oriental ; Morocco.

1. INTRODUCTION

La cartographie des structures linéamentaires (fracturation) constitue une composante essentielle des études en science de la Terre, en particulier pour la compréhension de la tectonique régionale. Les linéaments sont des discontinuités linéaires ou curvilignes en liaison directe avec les failles et les fractures de caractère composite ; ils sont associés à des éléments géomorphologiques et/ou à des structures tectoniques variées (El Hadani, 1997). La cartographie par les méthodes classiques (suivi des failles sur le terrain et par photographies aériennes selon le mode analogique) ne permet pas l'identification de tous les linéaments existants. L'expérience a

[*] Correspondant principal

prouvé l'intérêt des données de télédétection pour la cartographie des linéaments et l'identification des structures géologiques (Scanvic, 1983). Aussi, la vue synoptique offerte par les images satellitaires, avec une haute résolution spatiale, rend l'analyse linéamentaire plus facile.

Cependant, tous les linéaments ne correspondent pas automatiquement à des structures géologiques. En effet, les routes, pistes et chemins de fer, sont aussi enregistrés comme des linéaments. Le rôle du photo-interprète est déterminant pour faire la distinction entre ces objets et leur donner une signification géologique. D'autre part, l'extraction des linéaments sans l'application de filtres directionnels ne fait pas ressortir tout le réseau linéamentaire, mais elle reste une étape importante de pré-analyse dans la cartographie structurale.

L'objectif de cette étude est de cartographier les linéaments dans le Haut Atlas Oriental à l'aide des techniques de filtrage appliquées à différentes images traitées. Le fait que la carte existante (Du Dresnay, 1963) ne représente pas tout le réseaux de fracturation nous a poussé à réaliser cette étude à une échelle beaucoup plus grande. La carte obtenue servira pour l'analyse géodynamique de la région et constituera une aide à la prospection du sous-sol en vue de la détermination de pièges potentiels d'hydrocarbures. Les travaux antérieurs correspondent uniquement à la carte dressée par Du Dresnay (1963).

2. GÉOLOGIE DE LA RÉGION

Le Haut Atlas Oriental s'étend depuis l'est de la ville de Bou Arfa jusqu'à la frontière maroco-algérienne (figure 1). Les formations géologiques correspondent, à l'ouest, à la plaine de Tamlelt et à l'Atlas saharien en Algérie à l'est.

La région est bordée par les formations mésozoïques présentes aussi sous forme de reliefs isolés jurassiques au centre de la dépression de Tamlelt (Du Dresnay, 1963).

Elle a constitué durant le Mésozoïque une fosse allongée, accidentée de paléoreliefs émergés, conséquence de l'héritage de l'orogenèse hercynienne. D'après Du Dresnay (1975), cette fosse est comblée du Trias au Crétacé par des séries carbonatées puis détritiques. La phase finale de remplissage durant le Bathonien donne des sédiments de moins en moins profonds et de plus en plus terrigènes (Du Dresnay, 1979).

L'accumulation des sédiments dans la région de Figuig était importante dans un bassin en subsidence intense enregistrant les mêmes événements que l'Atlas Central au Maroc et l'Atlas saharien en Algérie. Toutefois, leur emplacement est plus proche du bord de la plate-forme atlasique durant le Jurassique inférieur, ce qui a fourni une grande quantité de sédiments remaniés (Elmi *et al.,* 1998). La région a probablement été sujette à des mouvements en compression (El Kochri, 1996) comme il a été constaté sur le terrain dans la région du Mrit (à 38 km de Figuig) où existent des formations dues à des glissements avec sédimentation simultanée ainsi que des failles synsédimentaires.

Du point de vue tectonique, l'évolution des Haut Atlas, Atlas saharien et Atlas tunisien est celle d'un rift qui évoque par sa longueur (depuis Agadir au sud du Maroc jusqu'à Gabès en Tunisie) le fossé de la mer Rouge qui a commencé à fonctionner au Trias supérieur. Ceci est confirmé par la grande activité volcanique à cette période (Aïs et Sattran, 1976) matérialisée par les formations basaltiques et doléritiques. Des études récentes ont montré que la formation du domaine atlasique s'est déroulée en trois périodes (Piqué *et al.*, 1998):

- Trias supérieur – Lias inférieur : ouverture de bassins faillés NE-SO, ce rift avorte au Lias inférieur ;

- Lias supérieur : ouverture des sillons atlasiques, en échelon sur la limite transformante de la plaque Afrique ; les directions N070°E présentent une forte composante transcurrente senestre ;

- Jurassique supérieur – Cénozoïque : c'est l'essentiel de la déformation ; l'ensemble du massif est soulevé et affecté par des plis E–O, des failles décrochantes conjuguées et des chevauchements sur la plate-forme saharienne ; ceci est lié à la convergence Afrique-Europe.

Le Haut Atlas marocain est une chaîne intracontinentale qui change d'orientation du OSO-ENE et E-O au centre à ONO-ESE dans sa partie orientale. D'un autre côté, le Haut Atlas Oriental se caractérise par ses plis anticlinaux étroits (Jbel Grouz) séparés par de larges synclinaux comme « El Haïtama » au nord de la ville de Figuig, ce qui donne une disposition de plis en échelons (El Kochri, 1996). La fracturation qui affecte la région présente plusieurs directions dont trois sont dominantes : E-O, NE-SO et ONO-ESE.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1 Données utilisées

Les images qui nous ont servi de base pour cette étude ont été acquises par le capteur HRV (XS) de SPOT en août 1995.



FIGURE 8 Localisation de la zone d'étude sur la carte du Maroc. *Location of the studied area on the Morroco map.*

Le choix de ces images a été fait pour leurs caractéristiques spectrales qui permettent une analyse structurale et leur bonne résolution spatiale (20 m), permettant une cartographie à grande échelle. La région d'étude a un climat aride d'où l'absence du couvert végétal, sauf au niveau de la ville de Figuig où existe un oasis.

3.2 Traitements spécifiques

Les traitements spécifiques sont utilisés pour obtenir une différenciation des fractures. Ces traitements sont rendus possibles grâce au format numérique des images satellitaires qui offre de multiples possibilités d'analyse.

Les images numériques sont riches en informations de diverses natures sur des objets au sol et ne peuvent de ce fait être directement exploitées. Pour faciliter les opérations d'interprétation et mieux discerner les éléments d'analyse structurale, des traitements spécifiques (ACP, filtres directionnels) à la cartographie structurale ont été utilisés.

3.2.1 Filtres directionnels

Les filtres représentent une méthode de traitement numérique utilisée pour le rehaussement d'une image. Ils sont conçus de façon à faire ressortir ou à masquer des caractéristiques spécifiques d'une image en se basant sur leur fréquence liée à la texture. Cette dernière fait référence à la fréquence de variation des différents tons qui apparaissent dans une image. Ainsi, les régions d'une image où la texture est rugueuse sont les régions où les changements dans les tons sont abrupts; ces régions ont une fréquence spatiale élevée. En revanche, les régions lisses ont une variation des tons qui est plus graduelle sur plusieurs pixels ; ces régions ont une fréquence spatiale faible (site Internet du Centre canadien de télédétection).

Les filtres directionnels sont utilisés pour rehausser les caractéristiques linéaires d'une image comme les routes ou les limites des champs. Ils peuvent aussi être conçus pour rehausser des caractéristiques ayant une certaine orientation

dans l'image. Dans le cas des applications en géologie, ces filtres servent à détecter les fractures ayant de grandes fréquences spatiales et des longueurs d'onde de l'ordre de 10 à 100 m au sol (Bonn et Rochon, 1992).

3.2.2. Analyse par composante principale

L'ACP est une transformation mathématique basée sur l'analyse de la covariance de l'image ou de la matrice de corrélation de plusieurs séries de données (Bonn et Rochon, 1992). Dans le cas de HRV, on calcule pour chacun des N pixels de la scène trois luminances X_{in} ($1 \leq 3$, $1 \leq n \leq N$). On calcule d'abord la matrice des variances et des covariances empiriques (ou matrices d'inertie) « V » : c'est une matrice 3×3 pixels, d'éléments « V_{ij} ». Les expressions des variances empiriques « V_{ii} » et des covariances empiriques « V_{ij} » ($i \neq j$), avec la moyenne arithmétique des N valeurs x_{in} sont les suivantes :

$$V_{ii} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(x_{in} - x_i)^2 = \frac{1}{N}\sum_{n} x_{in}^2 - \left(\frac{\sum_{n} x_{in}}{N}\right)$$

$$V_{ii} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(x_{in} - x_i)(x_{jn} - x_j)$$

$$= \frac{1}{N}\sum_{n=1} x_{in}x_{jn} - \left(\frac{\sum_{n} x_{in}}{N}\right)\left(\frac{\sum_{n} x_{jn}}{N}\right)$$

Chaque composante contient des données non corrélées avec celles des autres composantes, mais chacune présente une combinaison linéaire avec les canaux initiaux. Le pourcentage de la variance que contient chaque néo-canal CPn est fonction du degré de corrélation qui existe entre les séries de données. L'ACP est une technique de compression d'information ; le pourcentage de la variance que contient l'axe CP1 est supérieur à celui de l'axe CP2 qui est, à son tour, supérieur à celui de l'axe CP3. Le facteur CP3 contient principalement le bruit des canaux de départ, mais peut aussi mettre en évidence certaines caractéristiques nouvelles.

3.3. Travaux sur le terrain

Les travaux sur le terrain ont consisté en la vérification des structures nouvellement cartographiées. C'est le cas, par exemple, de la région de Iche où les formations du Crétacé présentent des contacts anormaux matérialisés par des changements dans la direction et l'angle du pendage.

4. EXPLOITATION DES RÉSULTATS DES TRAITEMENTS

L'image de la région du Haut Atlas Oriental est composée de la mosaïque de quatre scènes HRV ayant tout d'abord été corrigées géométriquement. Par la suite, elle a subit différents traitements pour générer des néo-canaux sur lesquels seront appliqués les filtres directionnels. L'extraction des linéaments est faite par interprétation visuelle (figure 2).

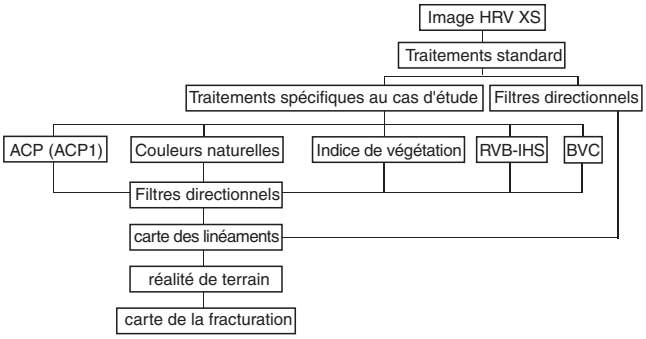


FIGURE 2 Étapes de la réalisation de la carte structurale. *Steps of realization of the structural map.*

4.1. Analyse de l'image HRV

L'analyse primaire correspondait à l'extraction des linéaments sans application d'aucun filtre directionnel ni de rehaussement sur l'image HRV, et par interprétation visuelle de l'image HRV (figure 3).

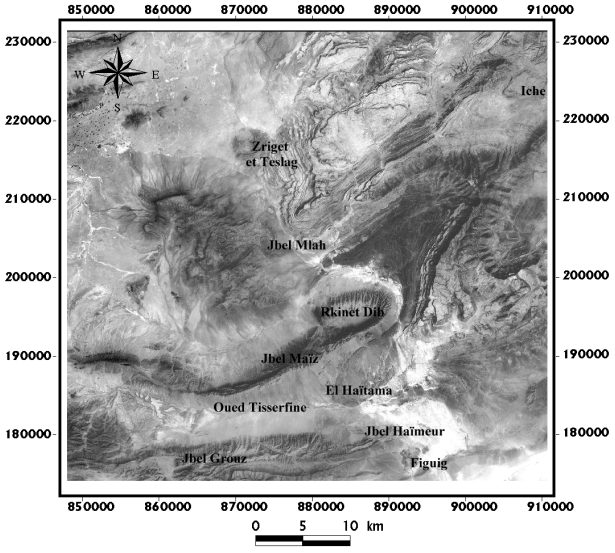


FIGURE 3 HRV (XS) de SPOT du Haut Atlas Oriental. *The SPOT's HRV (XS) image of the Haut Atlas Oriental.* (voir image couleur II à la fin de la revue).

L'étape suivante a consisté en l'application d'un rehaussement à ces images à travers des filtres non-directionnels (passe-haut et passe-bas) (Bonn et Rochon, 1992). Le nombre de linéaments a

augmenté de 241 par rapport au nombre de failles de la carte géologique existante établie par Du Dresnay (1963), avec deux directions dominantes : E-O et ENE-OSO (figure 4a). Aussi, la longueur totale (en pourcentage) qui domine est celle qui correspond aux mêmes directions (figure 4b).

De la même manière nous avons procédé à l'analyse des néo-canaux obtenus par différents traitements de l'image HRV.

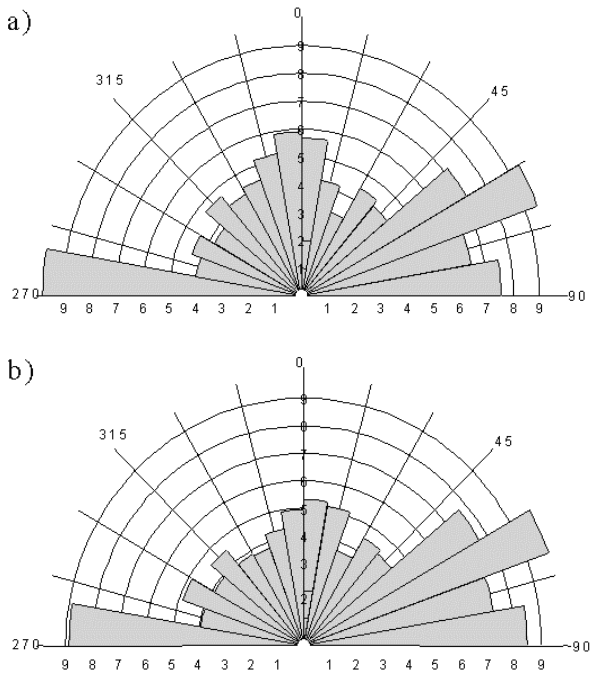


FIGURE 4 Diagrammes en rosaces des linéaments issus de l'application de filtres non directionnels ; a) fréquence ; b) longueur totale (%). *Diagrams of lineament stemming from the application of non directional filters ; a) frequency ; total length (%).*

4.2. Application des filtres directionnels

L'application des filtres directionnels est faite sur l'image issue du traitement par l'ACP. Cette application permet d'éliminer toute redondance contenue dans l'image HRV. La première composante principale (ACP1) regroupe plus de 95 % de l'information spectrale contenue dans l'image HRV (Bonn, 1996). L'application de ces filtres directionnels selon les orientations allant de N000 jusqu'à N180E et vers l'ouest sur l'ACP1 a permis l'extraction du reste des linéaments. Sur le tableau 1, sont donnés des exemples de matrices ayant servi au calcul des filtres selon les directions N-S, NNE-SSO, E-O et NNO-SSE (Haralick, 1984).

TABLEAU 1 Exemples de matrices de quelques filtres directionnels (Haralick,1984). *Examples of matrixes of directional filters (Haralick,1984).*

	E-O	NO-SE
Matrices	$\begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} -14{,}14 & -7{,}07 & 0 \\ -7{,}07 & 0 & 7{,}07 \\ 0 & 7{,}07 & 14{,}14 \end{vmatrix}$
	N-S	**NE-SO**
Matrices	$\begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0 & 7{,}07 & 14{,}14 \\ -7{,}07 & 0 & 7{,}07 \\ -14{,}14 & -7{,}07 & 0 \end{vmatrix}$

Ainsi, on a cartographié 20 % en plus dans la direction N-S (figure 5a). La direction prédominante sur le diagramme est celle de l'orientation E-O dont la longueur totale est supérieure de 10 % (figure 5b) vers l'ouest par rapport aux premiers résultats obtenus sans l'application des filtres directionnels.

Ainsi, en comparaison avec les résultats de la figure 4, la méthode des filtres directionnels est très utile dans la cartographie structurale. C'est le cas pour la région du Haut Atlas Oriental.

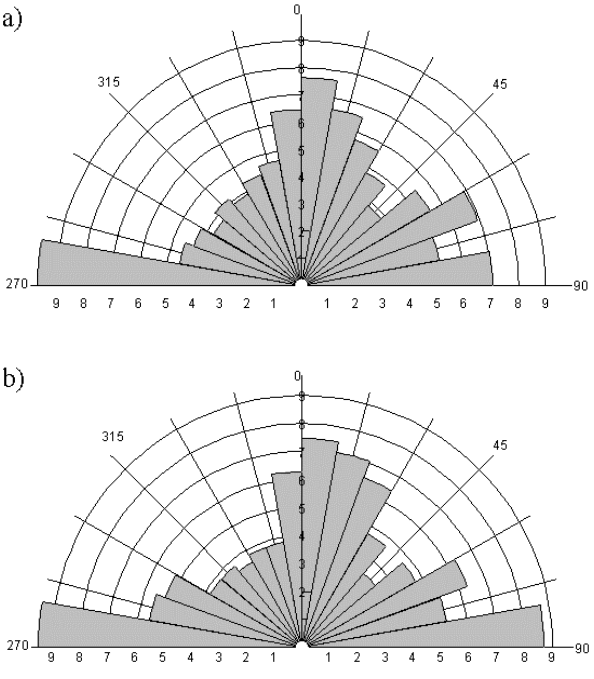


FIGURE 5 Diagrammes en rosaces des filtres directionnels ; a) fréquence ; b) longueur totale (%). *Diagrams of lineament stemming from the application of the directional filters ; a) frequency ; total length (%).*

5. SIGNIFICATION TECTONIQUE

L'interprétation des mouvements de la croûte qui ont formé le terrain actuel est la clé pour la compréhension des structures géologiques. Ces structures peuvent aider à l'identification, comme on le propose dans la présente étude, de sites potentiels des ressources du sous-sol.

La carte issue de la photo-interprétation structurale au 1 : 100 000, obtenue à partir de la superposition des cartes résultantes de l'application des différents filtres à l'image d'origine et/ou aux images obtenues après des traitements spécifiques, donne une vue globale sur les principales orientations des linéaments (figure 6).

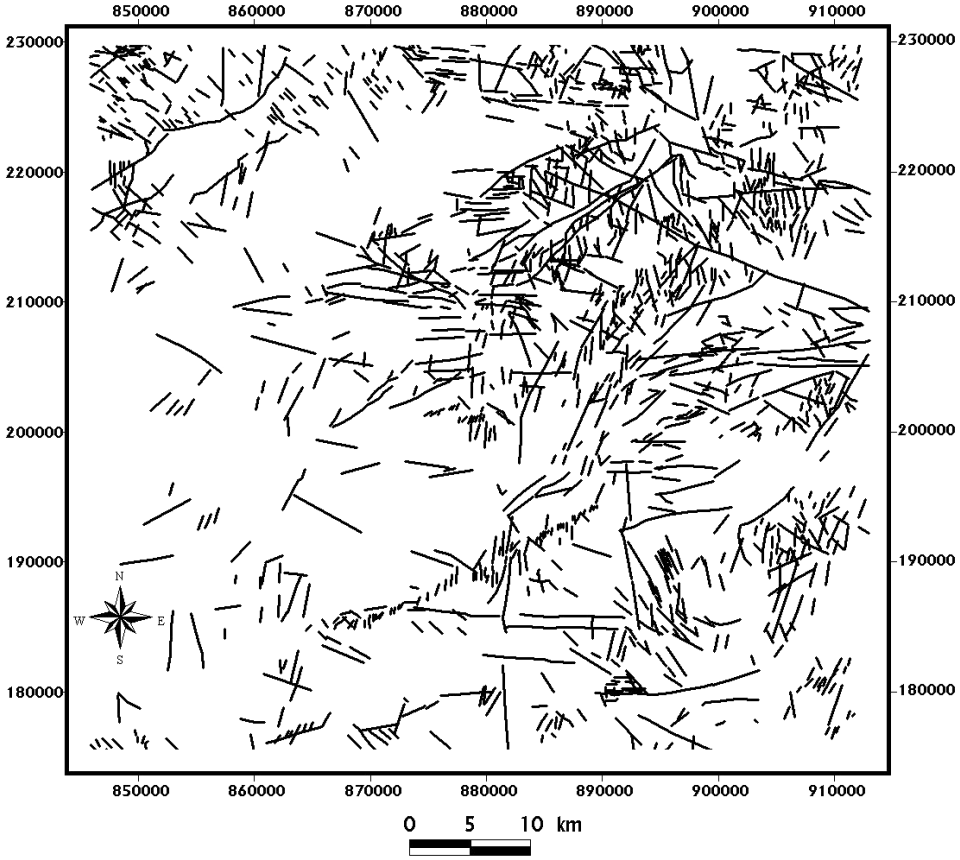


FIGURE 6 Carte des nouvelles fractures obtenues à partir des images des filtres directionnels. *Map of the new fractures obtained from the filtred images.*

5.1. Clés d'interprétation

Les linéaments sont déduits suivant des critères bien précis : il s'agit de discontinuités correspondant soit à des fractures montrant un décalage entre les formations géologiques ou des prolongements des failles représentées sur la carte existante, soit à un contact anormal entre deux formations géologiques différentes sans décalage. Les linéaments qui ne présentent pas de décalage entre les structures ont fait l'objet d'une vérification sur le terrain.

Sur la figure 6, on représente la carte structurale regroupant tout le réseau de fractures nouvelles cartographiées de la région.

Donc, à partir de l'image d'origine, 342 nouveaux linéaments ont été obtenus par rapport à l'analyse primaire où seulement 241 linéaments sont cartographiés. Par application des filtres directionnels sur l'ACP1, 829 linéaments additionnels ont été cartographiés (figure 7). La raison de cette augmentation est due au fait que le traitement par l'ACP permet d'éliminer la redondance de l'information, ce qui favorise son rehaussement par l'application des filtres directionnels et un gain considérable dans le temps de calcule sans perte d'information.

Appliqués aux images, les filtres directionnels ont permis en un temps court de dresser une carte

de fracturation précise de la région du Haut Atlas Oriental. Ces contacts non cartographiés sur la carte existante sont des failles mises en évidence par l'application des filtres directionnels. Elles présentent quatre directions dominantes : N-S, E-O à ENE-OSO, NNO-SSE et NNE-SSO.

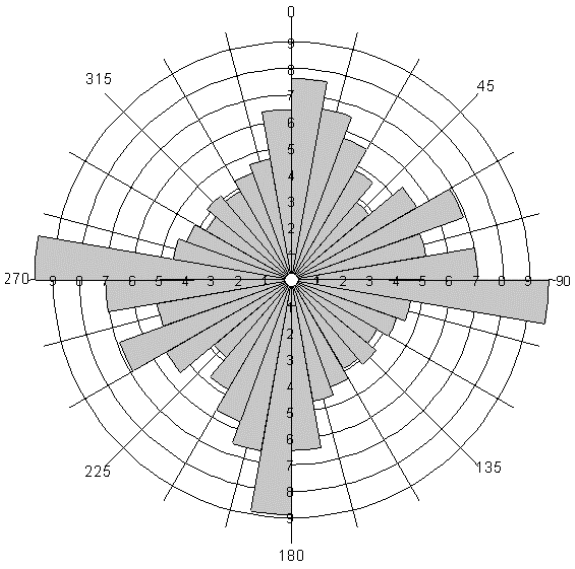


FIGURE 7 Rose diagramme des fréquences des linéaments. *Diagrams of lineaments stemming from lineaments frequency.*

5.2 Interprétation structurale

La carte structurale élaborée à partir de l'image satellitaire HRV montre que la fracturation s'organise selon quatre directions principales : E-O à ENE-OSO, NNE-SSO, NNO-SSE et N-S.

La direction E-O à ENE-OSO correspond à des failles plurikilométriques (figure 8) qui affectent aussi bien les terrains triassiques jurassiques que crétacés. Parmi les plus importantes, citons celles qui affleurent parallèlement à l'oued Tisserfine (F1, F2 et F3 de la figure 8). Sur le terrain, cette direction E-O correspond soit à des failles à jeu normal au cours du Trias et du Lias inférieur (Piqué *et al.*, 1998) soit à des failles réactivées avec un jeu inverse.

La direction NNE-SSO correspond à des failles métriques à kilométriques qui affectent les terrains du Jurassique supérieur et Crétacé. Parmi les plus importantes citons celles de Jbel Maïz (failles F4 et F5 de la figure 8). Sur le terrain, cette direction correspond à un premier jeu normal, auquel succède un second jeu en décrochement senestre attesté par le décalage des failles normales de direction E-O (figure 8).

La direction NNO-SSE correspond à des failles décamétriques qui affectent les terrains du Trias et du Jurassique. Sur la figure 8, la faille F6 partant de Jbel Maïz décale en décrochement dextre les failles de direction E-O.

La direction N-S correspond à des failles kilométriques qui traversent l'ensemble de la région du nord vers le sud (figure 6). Elles recoupent à plusieurs endroits les structures qu'elles traversent (failles E-O, flancs des plis, failles NNE-SSO) attestant ainsi de son caractère récent. Sur la figure 8, elles sont matérialisées par les failles F7, F8 et F9.

À cette fracturation est associée une série de plis anticlinaux (P1 et P3) et synclinaux (P2) dont les axes s'orientent suivant la direction E-O et ENE-OSO (figure 8).

5.3. Structures circulaires

Ces structures sont associées à des phénomènes géologiques qui peuvent présenter un intérêt pétrolier ou minier (Scanvic, 1986). Elles sont dues à différentes manifestations des structures du sous-sol. Dans notre zone d'étude, elles sont liées à des phénomènes de diapirisme. Ceci est justifié sur le terrain par l'aspect plissé des formations affleurantes plus récentes que les terrains environnants qui présentent des pendages dessinant cartographiquement une structure circulaire.

Par application de filtres non directionnels, l'allure des contours de ces formations circulaires est plus nette et la limite entre les formations est plus précise.

Elles se répartissent suivant un couloir, d'abord N-S, puis changeant de direction pour devenir NE-SO. Elles apparaissent à l'intersection de systèmes de failles formant un carré (figure 9) de direction N-S et ENE-OSO. On trouve soit du Trias qui affleure en dôme, soit des terrains plus récents (Jurassique supérieur) disposés aussi sous forme de dôme, comme au niveau de Zriguet et Teslag (figure 10). Dans ce dernier cas, le Trias n'arrive pas à la surface. Cette confusion laisse supposer que le Trias se présente en couche fine mais continue sous la couverture jurassique.

6. DÉLIMITATION DE PIÈGES ÉVENTUELS D'HYDROCARBURES

D'après la cartographie de la fracturation du Haut Atlas Oriental et plus précisément dans la région de Figuig, la formation de cette partie de la chaîne haut atlasique s'est faite selon une direction de raccourcissement NNO-SSE, ce qui a contribué à la formation des anticlinaux de Jbel Maïz et de Jbel Grouz. Le contact Trias-Lias est sans doute un niveau de décollement, sur lequel se greffent des rampes avec développement de plis à cœur triasique (Jbel Maïz).

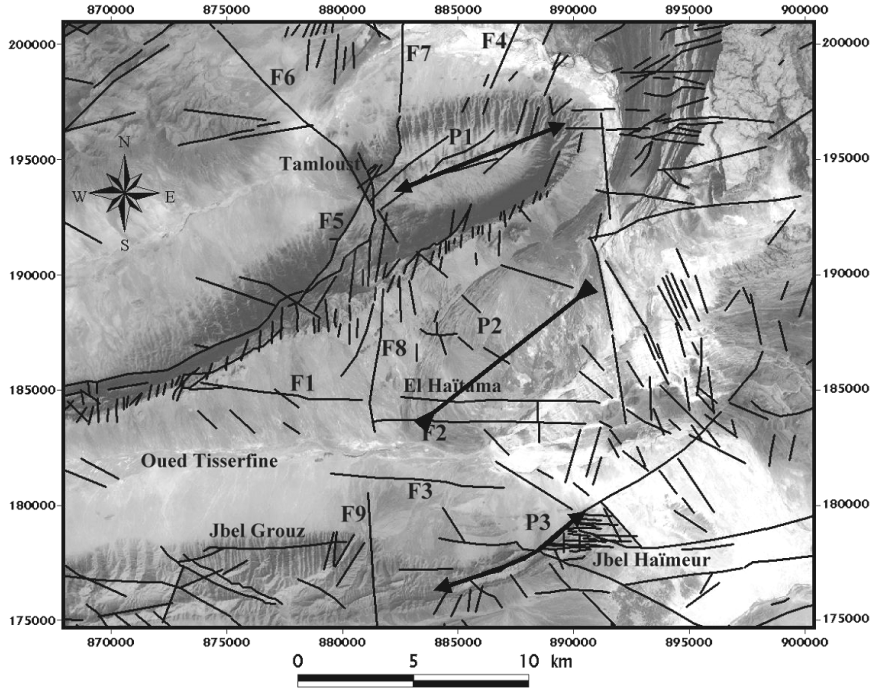


FIGURE 8 Localisation des différents éléments d'interprétation. *Location of the different elements of interpretation.* (voir image couleur III à la fin de la revue).

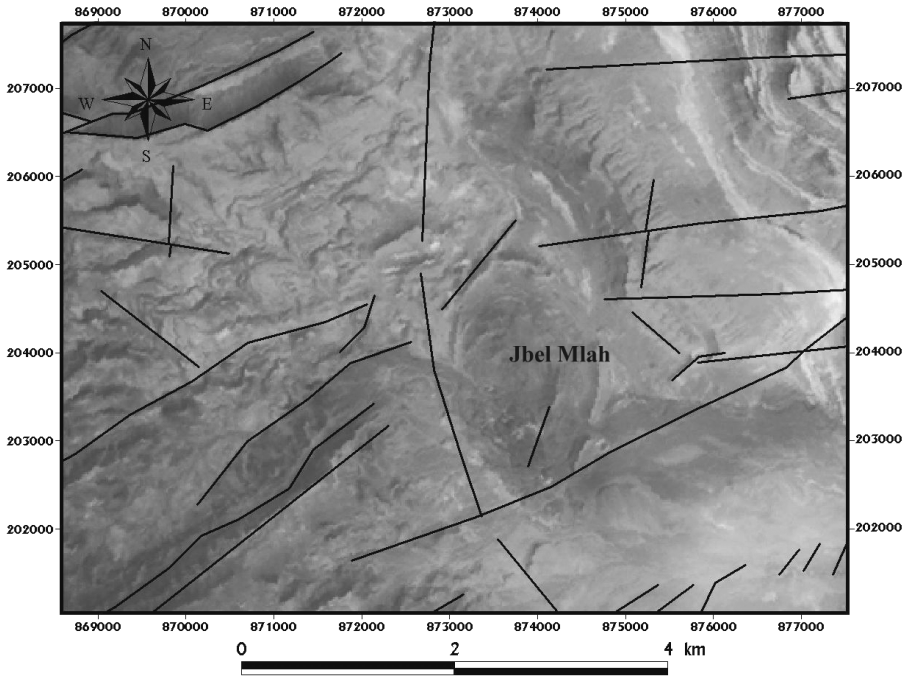


FIGURE 9 Relation fracturation-présence de dômes (Jbel Mlah). *Relationship between fracturation and dome structures (Jbel Malh).* (voir image couleur IV à la fin de la revue).

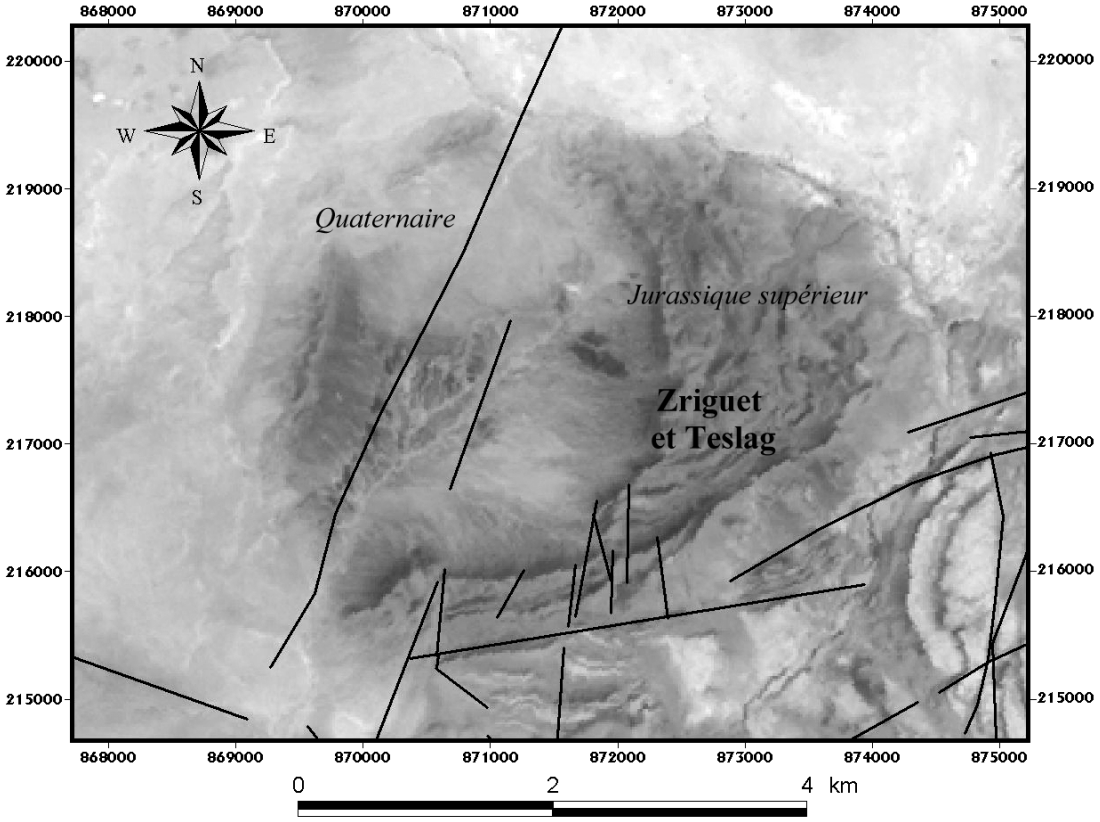


FIGURE 10 Structure circulaire de Zriguet et Teslag. *Circular structure of Zriguet and Teslag.* (voir image couleur V à la fin de la revue)

Ce deuxième mouvement est en relation avec la relaxation des contraintes après le jeu en cisaillement dextre des limites atlasiques (failles nord et sud atlasique, El Kochri, 1996). Il donnera une différence d'altitude entre les deux flancs de Jbel Maïz par un mouvement en extension des failles normales au niveau de Rkinet Dib. Le Trias jouerait toujours, ici également, le rôle d'une couche savon.

Par ailleurs, sur la base de cette interprétation, une tentative de positionnement d'éventuels pièges d'hydrocarbures a été réalisée. Ce schéma pourrait servir pour l'orientation des travaux de géophysique pour la vérification des structures en profondeur. Deux types de structures sont distingués :

1) des anticlinaux à cœur triasique interprétés comme des « plis de rampe » (figure 11) ;

2) des dômes à cœur triasique affleurant ou pas, interprétés comme des diapirs (figure 12).

Une campagne géophysique est indispensable pour la confirmation de ces résultats. Cette étude constitue une partie des travaux de recherche dans la région du Haut Atlas Oriental, elle est complétée par une cartographie lithologique au 1 : 100 000 en se basant sur l'imagerie satellitaire, dans le but d'actualiser les données existantes.

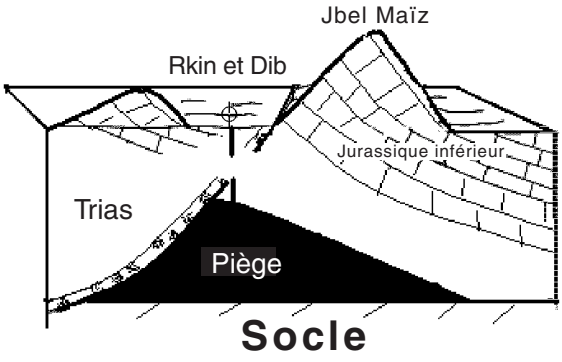


FIGURE 11 Situation schématique d'hydrocarbures au niveau de Jbel Maïz. *Schematic situation of the hydrocarbons trap in Jbel Maïz.*

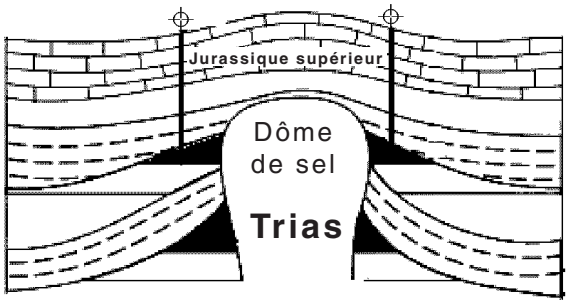


FIGURE 12 Schéma de piège d'hydrocarbures associé à un diapir : cas de Zriguet et Teslag. *Schematic hydrocarbons trap in association with diapir structure : case of Zriguet and Teslag.*

7. CONCLUSION

L'utilisation de l'image HRV de l'extrémité orientale du Haut Atlas marocain apporte, à l'aide de l'application de la méthode des filtres directionnels, une vision nouvelle des réseaux de failles qui ont affecté le Haut Atlas au cours du Mésozoïque et du Cénozoïque. Les principales directions de failles mises en évidence, soit E-O à ENE-OSO, NNE-SSO, NNO-SSE et N-S, ont guidé la structuration de cette région dont l'évolution géodynamique est caractérisée par une phase extensive au Mésozoïque et une phase compressive Cénozoïque. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par plusieurs auteurs (Du Dresnay, 1963 ; Aït Brahim, 1991 ; El Kochri and Chorowicz, 1996).

Le premier jeu en faille normale des directions ENE-OSO, E-O et NNE-SSO enregistré dans les terrains triasiques est en accord avec l'extension NS à NNO-SSE correspondant au stade de rifting des Atlas.

El Kochri et Chorowicz (1996) ainsi que Aït Brahim et Chotin (2001) décrivent le rejeu de ces directions en faille normale au cours du Jurassique lors d'un stade de subsidence guidé par une extension OSO à NO-SE.

Au cours du Cénozoïque, le rejeu en décrochement senestre des failles NNE-SSO et en décrochement dextre des failles NNO-SSE auxquelles est associée la réactivation en faille inverse des directions E-O à ENE-OSO, concorde avec la direction de compression du Cénozoïque décrite par Aït Brahim (1991) ainsi que El Kochri et Chorowicz (1996). Les axes de plis E-O à ENE-OSO sont attribués à cette phase compressive responsable de la structuration actuelle de cette région et qui est liée au rapprochement des plaques Afrique-Europe (Piqué *et al.*, 1998).

Ces résultats nous ont permis de localiser des éventuels piéges d'hydrocarbures, notamment au niveau de Jbel Maïz et de Zriguet et Teslag. La confirmation de ces localisations doit passer par des analyses géochimiques et une étude géophysique.

Remerciement

Nos remerciements s'adressent d'abord à M. Mohammed Rahoui pour son aide durant les campagnes de terrain. Aussi, on tient à remercier M. Rachid EL Marmouk, du Service de télédétection, Direction de la géologie au Ministère de l'Industrie du Commerce de l'Énergie et des Mines, pour avoir mis à notre disposition les moyens logistiques pour nos campagnes de terrain, Benoît Deffontaines, du Laboratoire de géomorphologie et environnement littoral de l'École Pratique des Hautes Études, Dinard en France pour avoir corrigé cet article et à Lahcen Aït Brahim, de la Faculté des sciences de Rabat, pour avoir révisé cet article. Je remercie également Mr. Jean-Marie Dubois pour l'intérêt qu'il a apporté à cette étude.

Références

Aïs, M. et Sattran, V. (1976) *Évolution structuro-metallogénique du Haut Atlas Oriental – Application à la chaîne bordière nord*. Service régional de géologie de Oujda, Maroc, rapport n°41/SRG/OUJ/76, 24 p.

Aït Brahim L. (1991) *Tectonique cassante et états de contraintes récentes au nord du Maroc.* Thèse de doctorat de l'Université Mohamed V, 360 p. 2 cartes.

Aït Brahim, L. and Chotin, P. (2001) *Paleostress evolution of the moroccan African margin from triassic to present.* Per-Tethys, mémoire du Musée national d'histoire naturelle de Paris, n° 6 (à paraître).

Bonn, F. (1996) *Précis de télédétection. Volume 2 : Applications thématiques.* Presses de l'université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy, 633 p.

Bonn, F. et Rochon, G. (1992) *Précis de télédétection. Volume 1 : Principes et Méthodes.* Presses de l'université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy, 485 p.

Du Dresnay, R. (1963) *Carte géologique du Haut Atlas Oriental : feuilles Bou Arfa, Iche, Talzaza et Figuig*. Éditions du Service Géologique du Maroc, Notes et mémoires n°158, 1 : 100 000.

Du Dresnay, R. (1975) *Influence de l'héritage structural tardi-hercynien et de la tectonique contemporaine sur la sédimentation jurassique dans le sillon marin du Haut Atlas Maroc.* IX^{e} Conf. Intern. Sédiment. Nice, France, thème 4, 1, p. 103-108.

Du Dresnay, R. (1979) *Sédiments jurassiques du domaine des chaînes atlasiques du Maroc » Symp (Sédimentation Jurassique W-européen).* Association des sédimentologues français, pub. Sp. 1, p. 345-359.

El Hadani, D. (1997) Télédétection et Systèmes d'Information Géographique pour la gestion et la recherche de l'eau. *Géo-Observateur*. Les Rapport Thématiques, n°1, 28 p.

El Kochri, A. (1996) *Géometrie et mécanismes de la déformation du Haut Atlas centro- oriental (Maroc).* Thèse de doctorat. Université Mohammed V, Rabat Maroc, 201 p.

El Kochri, A. and Chorowicz, J. (1996) Oblique extension in jurassic trough of the central and eastern hight Atlas (Morocco). *Can. J. Earth Sc.,* vol. 33, n°1, p. 84-92.

Elmi, S., Améras, Y., Ameur, M., Bassoulet, J.-P., Boutakiout, M., Benhamou, M., Marok, A., Mekahli, L., Mekkaoui, A. and Mouterde, R. (1998) *Stratigraphic and palaeogeographic survey of the Lower and Middle Jurassic along a north-south transect in Western Algeria.* In : S. Crasquin-Soleau and E. Barrier (eds). Epicratonic basins of Peri-Tethyan platforms Per-Tethys. Mémoire du Musée national d'histoire naturelle de Paris, n°4, p. 145-211.

Haralick, R. M. (1984) *Digital step edges from zero crossing of second directional filters*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, V. PAMI-6, p. 58-68.

Piqué, A., Aït Brahim, L., Aït Ouali, R., Amrhar, M. et Charroud, M. (1998) Évolution structurale des domaines atlasiques du Maghreb au Méso-Cénozoïque ; le rôle des structures héritées dans la déformation du domaine atlasique de l'Afrique du Nord. *Bull. Soc. Géol. France,* t. 169, n°6, p. 797-810.

Scanvic, J. Y. (1983) *Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre.* Manuels et Méthodes, Éditions du BRGM, Orléans, France, 159 p.

Scanvic, J. Y. (1986) *Télédétection aérospatiale et informations géologiques*. Manuels et Méthodes. Éditions du BRGM, 284 p.

Université Cornell (2000)
http://atlas.geo.cornell.edu/people/weldon/morocco.JPG

Centre canadien de télédétection
http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/tutorial/indexf.html