ANALYSE LINÉAMENTAIRE DES IMAGES LANDSAT-TM ET SPOT DE L'ATLAS CENTRO-SEPTENTRIONAL : CARTOGRAPHIE DU PROLONGEMENT SW DE LA CICATRICE DE ZAGHOUAN.

Ines EZZINE, Fouad ZARGOUNI, Mohamed GHANMI

Unité de Géologie structurale et appliquée, Faculté des Sciences de Tunis, Université Tunis-El Manar, Campus Universitaire, 1060, Tunis, Tunisie., Téléphone : +216 71 88 54 08 ; Courriel (*) :ezzine.i@gmail.com.

Soumis le 17 mars 2011; accepté le 19 octobre 2011 - © *Revue Télédétection*, 2012, vol. 10, n° 4, p. 199-211

Résumé:

Différents techniques d'extraction des linéaments ont été appliquées sur des images TM de LANDSAT-7 et SPOT-XS en 03 Mars 2002 de la région centro-septentrionale de l'Atlas Tunisien. Ces techniques incluent les différents réhaussement sur des images brutes, ainsi que l'application des filtres directionnels sur les divers traitements (composition colorée, analyse en composante principale ACP, rapport des bandes, etc.) appliqués à l'image TM de LANDSAT-7. Parmi ces approches, l'application des filtres directionnels de Sobel sur la « bande 4 » a permis de détecter un grand nombre de lineaments. Leur analyse statistique montre une répartition selon quatre familles d'orientations N-S, E-W, NE-SW et NW-SE. Les linéaments les plus long et les plus fréquents sont ceux E-W à ENE-WSW suivis par ceux NE-SW. La confrontation de ces résultats avec l'image SPOT et les données géologiques de surface (cartes géologiques) permet de cartographier une série d'accidents, dont les composantes principales sont représentées par les accidents (F1), (F2) et (F3) et de prouver leurs continuités. Ces derniers sont traduits respectivement par l'accident NE-SW (F1), affectant le secteur Dj. Balouta-Oued Ousafa, l'accident NE-SW (F2); bordant le flanc NW du Dj. Massenerh. Ce dernier est tronqué par la faille NW-SE (F4) de la cuvette de Rohia. L'accident ENE-WSW (F3), borde la partie sud du Dj. Bou El Hanèche. La continuité de ces segments d'accidents (F1, F2 et F3) constitue le prolongement SW du front de chevauchement de Zaghouan.

Ces résultats montrent l'importance de l'analyse linéamentaire dans la cartographie des accidents de l'Atlas centro-septentrional tel la nouvelle mise en évidence de l'émergence de la partie méridionale du front de chevauchement de la chaine alpine dans l'Afrique du Nord.

Mots clés: Atlas tunisien centro-septentrional, images TM LANDSAT et SPOT, linéament, Chevauchement de Zaghouan, front de la chaine alpine.

LANDSAT TM AND SPOT IMAGES LINEAMENT ANALYSIS IN TUNISIAN NORTHERN CENTRAL ATLAS: MAPPING OF THE SW PROLONGATION OF ZAGHOUAN THRUST.

Abstract:

Various extract techniques lineaments were applied to a LANDSAT TM and SPOT images covering the Centro-Septentrional Tunisian Atlas area. The techniques include various image enhancement; application of spatial filters and directional filters and different image processing (color composite, principal components analysis (ACP), band ratios, etc.). The application of directional Sobel filter on the band 4 enables us to map the most important number of lineaments. The statistical analysis of this lineaments show four directions N-S, NW-SE, NE-SW and ENE-WSW to E-W. The important and the longest lineaments are oriented E-W to ENE-WSW and NE-SW.

The confrontation of these results to a geological data (geological map) enable us to map a (F1), (F2) and (F3) accidents and to improve their continuity. Theses faults correspond to the NW-SE accident (F1) affecting a Dj. Balouta-Oued-Ousafa area; The NE-SW accident (F2) limiting the NW limb of Massenerh anticline structure. This accident was trounced by a NW-WE (F4) fault restraining a Rohia graben. The ENE-WSW fault (F3) limiting a south limb of Bou El Haneche anticlinal structure. These faults (F1, F2 and F3) constitute a SW prolongation of a Zaghouan thrust.

Results from this work show the importance of lineaments analysis to mapping of accidents in Centro-Septentrional Tunisian Atlas such as new emergent meridianal part of Alpine front chain in the Northern Africa.

Key-words: Centro-Septentrional Atlas Tunisia, LANDSAT TM and SPOT, lineaments, Zaghouan thrust, Alpine front chain.

1. INTRODUCTION

La télédétection offre une vue synoptique permettant d'étudier de vastes champs géographiques. En effet, la cartographie des structures linéamentaires constitue une composante essentielle pour la compréhension de la tectonique régionale.

L'origine du mot linéament, vient du latin. Linéament = « Linea » = ligne. C'est Hobbs (1904), le premier qui a introduit cette expression dans le langage géologique. Selon cet auteur, un linéament correspond à un trait généralement rectiligne «a general rectilinear feature». Ce linéament peut décrire des alignements de sommet de chaînes, de limites de terrains élevées, de ligne de drainage, de ligne de rivage, de limites linéaires de formations. Ainsi la cartographie par les méthodes classiques ne permet pas l'identification de tous les linéaments existants. Cependant, le rôle des photo-interprètes, des filtres directionnels et l'application des composantes en analyse principales (ACP) sont déterminant pour faire la distinction entre ces objets et leur donner une signification géologique.

L'objectif principal de cette étude est d'extraire et d'interpréter une carte linéamentaire du domaine étudié, par méthode de traitement et d'analyse d'image TM de LANDSAT-7et SPOT-XS. Cette méthode vise a adopté des méthodes d'extractions des structures linéaires et a étudié le comportement spatial des linéaments (longueur, orientation, densité) à partir des images qui nous informent sur leurs origines, significations géologiques et structurales.

2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

2.1. Cadre géologique et structural

Lors de la convergence de la plaque africaine et la plaque eurasiatique, la marge nord africaine a été soumise à des contraintes compressives durant le Tertiaire, aboutissant à la genèse des chaines alpines nord africaine ou des Maghrébides (Durand Delga, 1980). Cette chaine se prolonge du Maroc jusqu'à la Tunisie, où elle montre: *Dans sa partie occidentale (au Maroc) : l'Anti-Atlas, le Haut Atlas, le Moyen Atlas et le Rif. * En Algérie Occidentale, elle est constituée par deux chaînes importantes : l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien séparé par les Haut Plateaux, enfin, vers l'Est de l'Algérie ces deux chaînes fusionnent pour donner une chaîne unique qui constitue en Algérie orientale et en Tunisie l'Atlas Oriental ou l'Atlas Tunisien (figure.1 A et B). Ce dernier est subdivisé en Atlas Septentrional, central et méridional. L'Atlas Central est caractérisé par l'individualisation de plis atlasiques généralement de direction NE-SW, souvent associé à des bassins ou à des cuvettes de direction NW-SE. Situé dans la partie septentrionale de cet atlas, notre domaine d'étude est affecté par des plis de style éjectif de direction NE-SW, des accidents de directions variées (Jauzein, 1967), telles que :

Les failles de direction NW-SE, délimitant les grabens de Rohia, de Kalâat Khasba et de Bou Ghanem.

Les flexures et l'accident majeur (T2) correspondent à la prolongation vers l'Ouest de la cicatrice de Zaghouan (Jauzein, 1967) (figure 1-C).

2.2. Cadre géographique

La région étudiée s'étale sur six cartes géologiques au 1/50.000 de Maktar (feuille n°53) (Jauzein, 1959) , Rohia-Dj.Barbrou (feuille n°61) (Ben Haj Ali et Maamri, 2002), Ebba ksour (feuille n°52) (Lehotsky, 1979), Ain El Kseiba (feuille n°60) (Zaier, 1998), Tadjerouine (feuille n°51) (Burollet et Sainfeld, 1956) et Kalâat Es Senam (feuille n°59) (Lehotsky et Bujonowsky, 1978) ; soit une surface de 3840 km^2 (figure 1-C et figure 2).

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1. Données utilisées

La base de données cartographique utilisée dans le cadre de cette étude comporte les cartes géologiques précédemment citées et les cartes topographiques associées. Deux types d'images satellitaires couvrent la zone d'étude : Le domaine étudié fait partie d'un domaine couvert par les scènes L35-C192 de satellite ETM+ de LANDSAT 7. L'image TM de LANDSAT-7 a été prise le 12-02-2004, elle est acquise par le capteur ETM+.Elle comporte sept bandes spectrales, dont les caractéristiques sont représentées par le tableau 1.

L'utilisation dans cette étude des images LANDSAT, revient à leur basse valeur de l'angle solaire, leurs pouvoirs de supprimer les détails spatiaux gênant et leurs couvertures régionales (Sabins, 1986). A ces données, s'ajoute l'image XS

de SPOT-4 acquise en Mars 2002 couvrant le domaine d'étude, dont sa résolution est de 20 m. L'extraction des linéaments est faite par interprétation visuelle (figure 3).

Tableau 1: Caractéristiques des bandes spectrales.
A spectral characteristic bands.

TM1	0.45-0.5 µ m	30 m	bleu
TM2	0.52-0.6 µ m	30 m	vert
TM3	0.63-0.69 µ m	30 m	rouge
TM4	0.75-0.9 µ m	30 m	IR proche
TM5	1.5-1.7 µ m	30 m	IR moyen
TM6	10.4-12.5 µ m	60 m	IR thermique
TM7	2.08-2.35 µ m	30 m	IR ondes courtes

3.2. Méthodologie pour le traitement des données

Cette étape vise à rendre tous les documents utilisés au sein de cette étude sous forme numérique en appliquant diverses opérations.

3.2.1. Numérisations cartographiques

Afin de produire la carte géologique de synthèse, les différentes cartes géologiques du domaine d'étude ont été numérisées et projetées dans le même référentiel (WGS 84). Les courbes de niveaux ont été numérisées à partir des cartes topographiques au 1:50 000. Ces courbes ont été ensuite utilisées avec les points cotés pour l'élaboration d'un modèle numérique du terrain (MNT).

3.2.2. Prétraitement des images LANDSAT.

C'est une phase préliminaire de traitement des images LANDSAT-TM et Spot. Cette opération permet la normalisation des images acquises. Elle comporte les différentes corrections géométriques et radiométriques. Elle permet aussi d'éliminer les effets perturbateurs atmosphériques.

3.2.3. Traitement numérique des images pour la cartographie des accidents géologiques par l'analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales est une technique efficace qui permet d'accentuer une image multispectrale pour des interprétations géologiques fines (Biémi *et al,* 1991). Cette technique est intéressante pour les images Landsat TM qui sont constituées de 7 canaux. Elle permet de réduire l'information contenue dans plusieurs bandes, parfois hautement corrélées en un nombre plus restreint de composantes. Celles-ci représentent généralement 97% de la variation totale de l'ensemble des données originales (Deslandes, 1989). Parfois l'information comprise dans 5 ou 6 bandes est réduite par l'analyse en composantes principales en trois composantes. Cette analyse permet aussi de créer des compositions colorées des trois premières composantes qui constituent un excellent produit d'interprétation visuelle, augmentant ainsi le contraste entre les divers objets au sol (Coulibaly, 1996).

3.2.4. Traitement numérique des images par réhaussement des linéaments par filtrage

Le filtrage est une technique visant à éliminer le bruit contenu dans les données satellitaires. Cette technique permet d'améliorer la qualité visuelle de l'image afin de faciliter son interprétation. En géologie, on s'intéresse à des discontinuités dans les textures comme les contours des zones relativement homogènes, ce qui peut révéler la présence de failles ou de fractures. Le rehaussement des linéaments revient à mettre en évidence dans l'image les fortes transitions de réflectance (contratse de tonalité et/ou de texture) dans l'image et les hautes fréquences spatiales qui leur sont généralement associées.

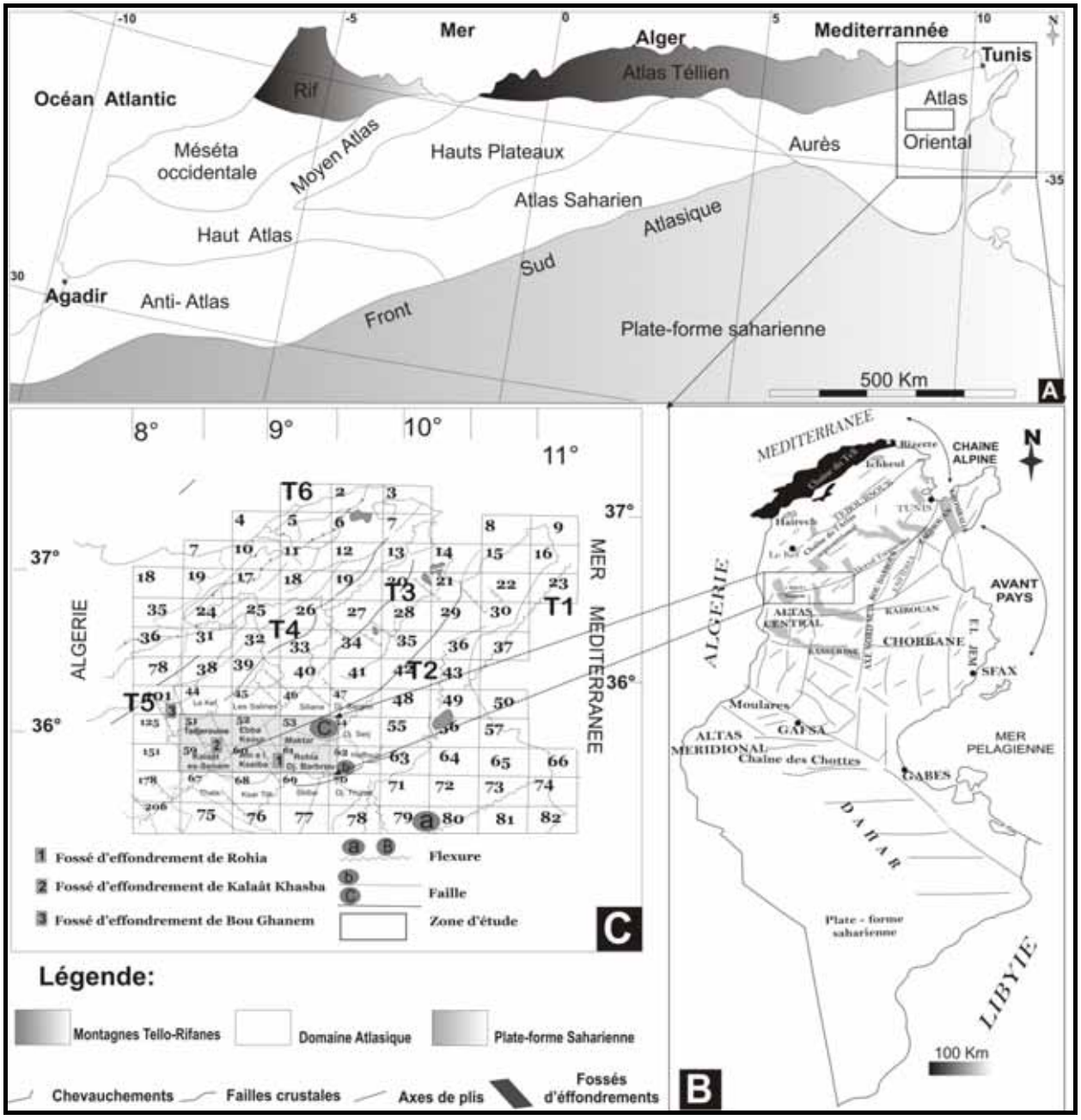


Figure. 1:(A)- Unités structurales majeures de l'Atlas Nord-Africain (Boccaletti & al., 1985); (B)- Schéma structural d la Tunisie (Ghanmi, 2003); (c) – Localisation du domaine d'étude sur le découpage des cartes géologique de la Tunisie.
A schematic map of North Africa showing the main structural domains (Boccaletti & al., 1985); (B)-The structural map of Tunisia (Ghanmi, 2003); (C)- Localization of the studied area on the dissected geological map of Tunisia

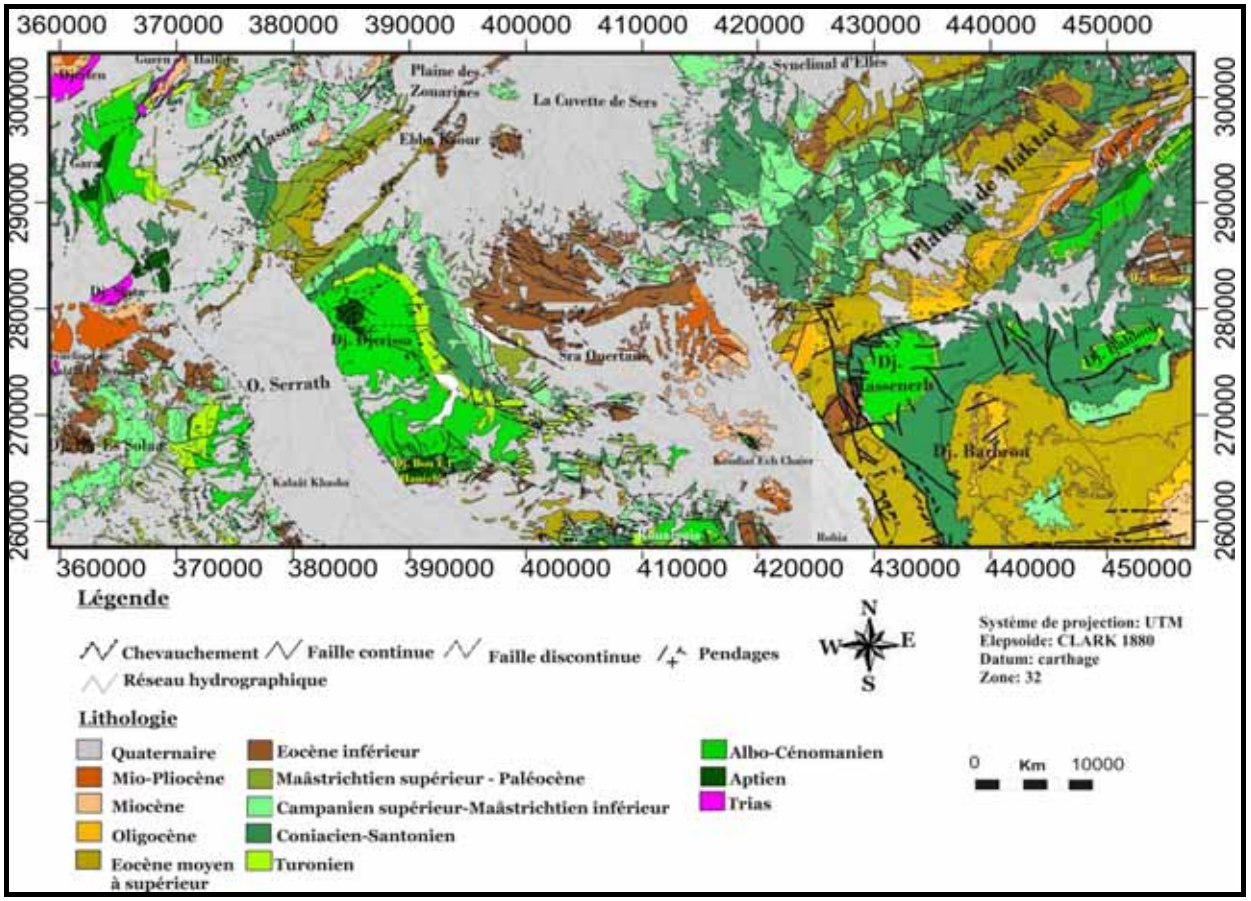


Figure 2 : Carte géologique d'assemblage des six feuilles du domaine d'étude.
Geological map of the study area

Filtrage spatial

Le filtrage spatial par convolution permet la modification de la valeur numérique d'un pixel selon sa relation avec les valeurs des pixels voisins. Le niveau de gris de chaque pixel à l'intérieur de la fenêtre mobile sur l'image est multiplié par la valeur correspondante de la matrice de convolution. La valeur finale attribuée au pixel central représente la somme de ces produits divisée par le nombre d'éléments de la fenêtre.

La dimension de la fenêtre en pixels est directement proportionnelle à l'ordre des grandeurs des changements spatiaux reliés aux linéaments détectés. Certains auteurs tel que Hornsby et Bruce (1985), ont retenu des fenêtres de 5*5 sur les images Landsat dont la résolution au sol est de 30m*30m. Dans ce travail, compte tenu de l'étendue de la zone d'étude et l'ordre de grandeurs des structures, on va adapter une matrice de convolution 5*5 pour détecter les linéaments majeurs.

Filtre directionnels

Les filtres directionnels améliorent la perception des linéaments en provoquant un effet optique d'ombre porté sur l'image comme si elle était éclairée par une lumière rasante (Marion, 1987). De plus ce type de filtre permet de rehausser les linéaments qui ne sont pas favorisés par la source d'éclairement (Drury, 1986). Dans ce travail, le rehaussement des linéaments à été effectué par le filtre directionnel de Sobel sur la bande 4. Cette dernière se trouve dans la zone du proche infrarouge, permettant ainsi de voir les importants détails structuraux (Shupe et Akha, 1989).

Le filtre de Sobel est une variété sélective des filtres directionnels où les valeurs de la matrice de convolution sont déterminées selon la distance par rapport au pixel central (Deslandes, 1986). De plus, Abbou et Pratt (1979), ont montré que la réponse de l'impulsion de ce filtre était relativement indépendante de l'orientation de linéaments, cependant, ce filtre peut détecter aussi bien les linéaments orientés verticalement, horizontalement et de 45° par rapport au gradient du filtre. Dans le cadre de cette étude les dimensions du terrain étant 90 km par 30 km (figure 2), nous avons choisi une fenêtre de convolution de 5 par 5 (tableau 2), ce qui permet de détecter par conséquent les linéaments de largeur supérieure à 75 m.

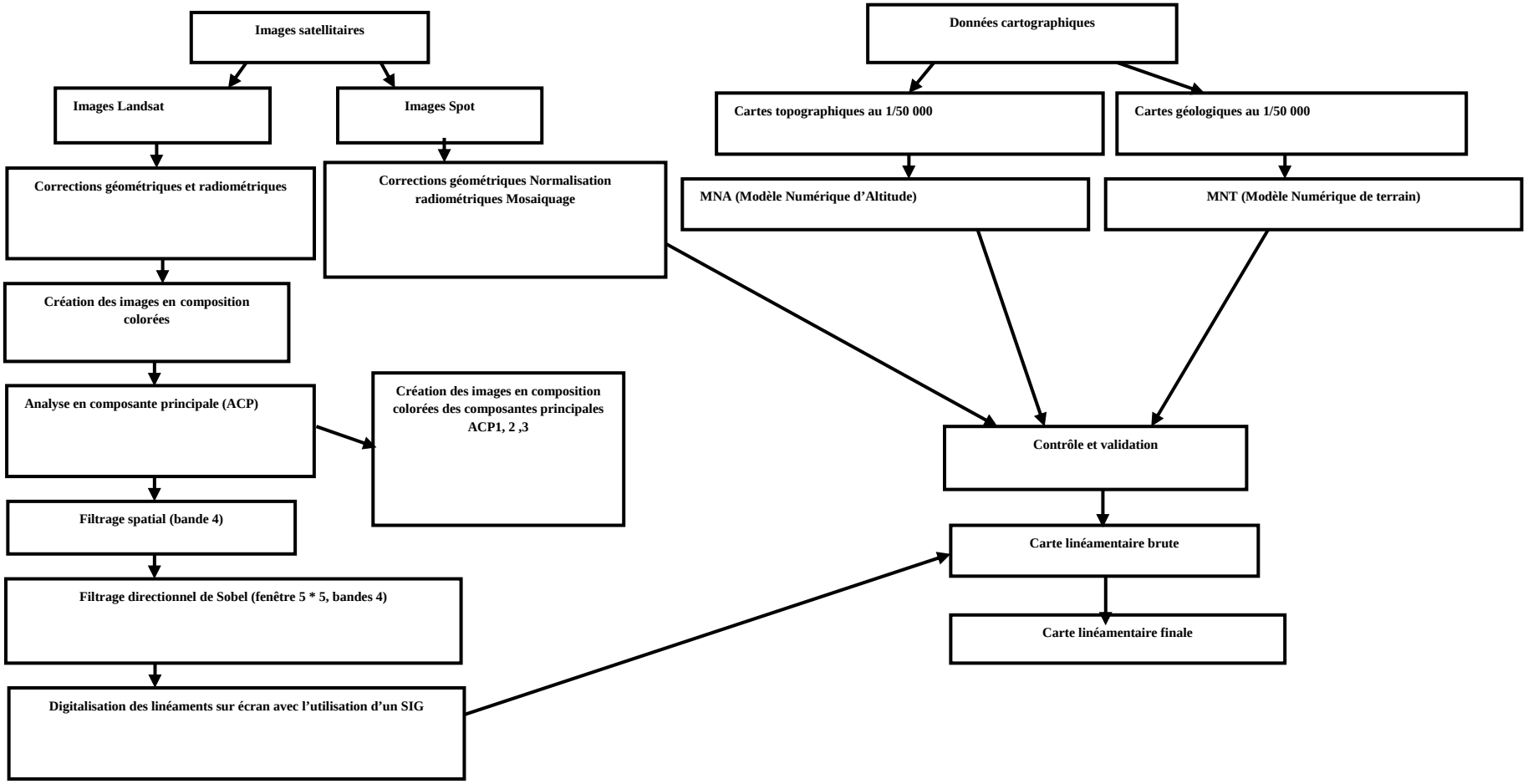


Figure 3 Diagramme de traitement des données.
Data processing flow chart.

Tableau 2 : Matrices de filtres Sobel.
*Matrix of 5*5 Sobel directionnel filters*

Filtre Sobel de direction NW- SE	Filtre Sobel de direction E-W	Filtre Sobel de direction NE-SW	Filtre Sobel de direction N-S
3 2 2 1 0	1 1 0 1 1	0 1 2 2 3	1 2 3 2 1
2 4 3 0 1	2 3 0 3 2	1 0 3 4 2	1 3 4 3 2
2 3 0 3 2	2 3 0 3 2	2 3 0 3 2	0 0 0 0 0
1 0 3 4 2	2 3 0 3 2	2 4 3 0 1	1 3 4 3 2
0 1 2 2 3	1 1 0 1 1	3 2 2 1 0	1 2 3 2 1

Tableau 3: Caractéristiques des cartes de linéaments.
Characteristic of lineament map.

Carte des linéaments	Nombres des linéaments	Longueur des linéaments
Nord_West	597	1144536.621 m
West	1357	1812445.631 m
Sud_West	1530	1708759.596 m
Sud	796	1345637 m
Synthétique	1622	3560869 m

4. RÉSULTATS

4.1. Cartographie des discontinuités morpho structurales

La cartographie des linéaments structuraux est réalisée à partir d'images Landsat filtrées (bandes 4), Spot, MNA (Modèle Numérique d'Altitude), MNT (Modèle Numérique de Terrain).

Sur l'image Landsat « bande 4 » filtrée, les variations brusques d'intensité soulignent les hautes fréquences spatiales et permettent de rehausser les discontinuités dans les images et par conséquent la cartographie des linéaments.

Nous avons procédé à l'extraction des linéaments par interprétation visuelle tant des images filtrées que les compositions colorées des bandes (TM 1, 2, 3 et 4, 5, 6) ou transformées (ACP 1, 2, 3). Le tracé des linéaments se fait d'une manière manuelle dans une couche vectorielle surimposée aux images interprétées. Les objets linéaires d'origine anthropique (réseau routier, hydrographique…) sont éliminés afin de ne garder que les linéaments ayant une signification structurale.

La deuxième source de données utilisée pour la cartographie des linéaments est en rapport avec la physiographie des différents massifs affleurant dans le domaine étudié. Il s'agit du MNA (Modèle Numérique d'Altitude) et ou MNT (Modèle Numérique de Terrain) (figure 4) et l'image Spot. L'utilisation de ces trois types de donné a pour but de faciliter la perception des ensembles morpho-structuraux du domaine étudié et de les cartographier. Ainsi, les variations géomorphologiques sont des témoins majeurs de l'évolution morphogénétique des reliefs qui peuvent servir à l'identification des formes géologiques tel que les fossés d'effondrements, les plateaux…aussi qu'a l'extraction des discontinuités morpho-structurales (Bonnet & Colbeaux, 1999; Deffontaines, 2000).

Les linéaments tracés sur les fonds des images filtrées (bande 4) sont systématiquement vérifiés sur les autres images avant d'être retenu pour éviter de rajouter des éléments susceptibles d'être des linéaments (routes, limites boisées…).

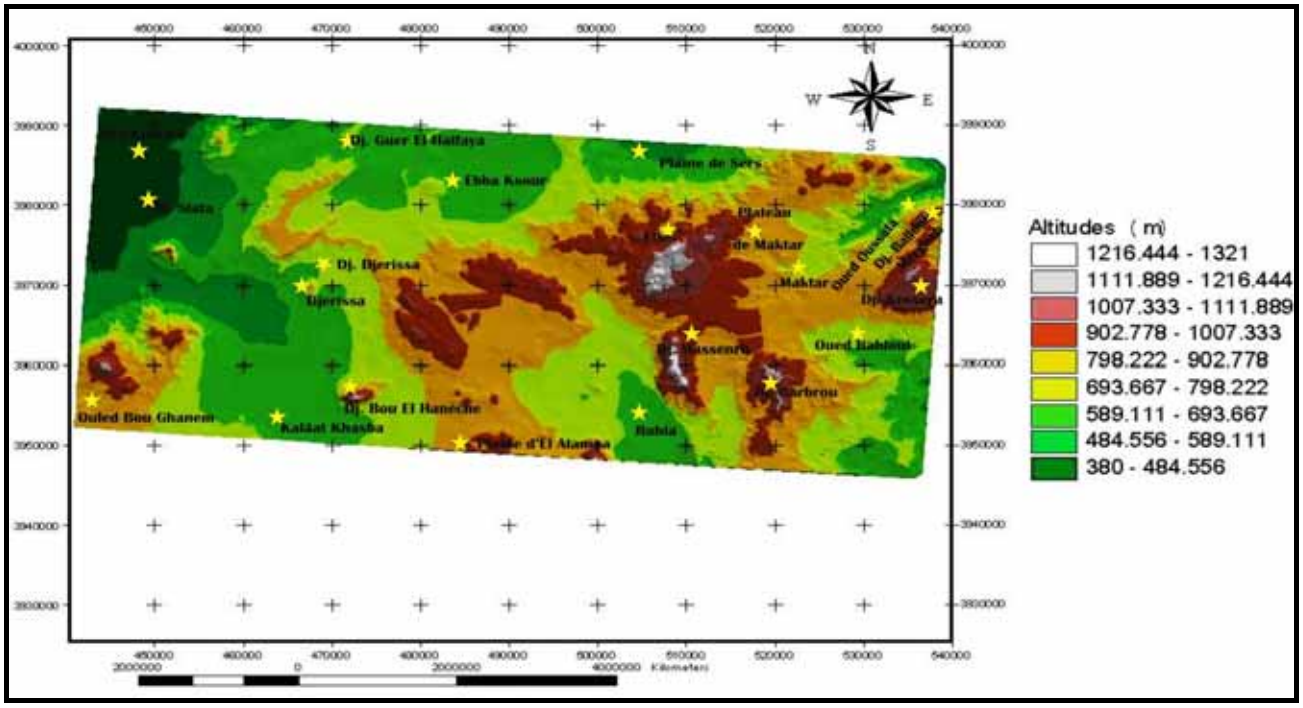


Figure 4: Modèle numérique du terrain (MNT).
Digital land model (DLM).

4.2. Analyse statistique des cartes obtenues

L'analyse statistique des linéaments a été explorée par plusieurs auteurs afin d'étudier la géométrie du réseau de linéaments et d'en dégager les directions dominantes à l'échelle régionale (Pertorius & Partridge, 1974; Deslandes & Gwyn, 1991 ; il y a d'autres références plus récentes).

La carte de synthèse des linéaments (figure 5-A) représente l'ensemble des segments uniques résultant de la superposition de l'information contenue dans les quatre images filtrées. On regroupe au total 1622 linéaments, avec une longueur totale de 3560869m (exprimer en km). Cette carte linéamentaire apparaît polymodale, en effet, elle nous révèle quatre familles importantes de direction des linéaments, soit les N-S, E-W, NE-SW et les NW-SE, avec dominance des longueurs de lineaments à orientation E-W, suivie par les longueurs d'accidents NE-SW, puis les N-S et enfin la longueur des lineaments d'orientation NW-SE

La carte de synthèse (figure 5-A) montre une région à faible densité de linéament dans les régions occupant les 2.8 Km^2 situées au niveau des cuvettes de Rohia et de Kalâat Khasba, alors que dans le centre et surtout l'Est de la carte est fortement peuplé.

L'analyse statistique des fréquences des directions consiste à produire des rosaces directionnelles proportionnelles des linéaments au sein d'une classe équivalente ayant une amplitude de 10° (figure 5-B). Ces rosaces ont été générées grâce au logiciel Roseta. La rosace montre les directions préférentielles NE-SW, NW-SE, N-S et celle ENE-WSW à E-W.

(figures 5 A et B), avec dominance de la direction ENE-WSW à E-W.

5. DISCUSSION

Afin de cerner la cartographie, l'analyse et l'interprétation structurale du domaine d'étude, on a procédé à une confrontation des résultats avec des cartes géologiques et des schémas structuraux existants des différentes feuilles formant le domaine d'étude.

La carte globale de l'assemblage des six cartes géologique au 1:50 000 formant le domaine étudié, montre une grande variété dans sa composition lithologique et structurale (figure 2 et 5). La superposition de cette dernière avec les données des images satellitaires du domaine étudié permet d'identifier un certain nombre de linéaments correspondant à des failles cartographiées. Ces linéaments issus de l'image sont souvent parfaitement superposés ou légèrement décalés par rapport aux éléments structuraux du terrain ou encore dans le prolongement de ces derniers.

Étant donné la précision de l'image satellite, le décalage entre les linéaments satellitaires et géologiques peut s'expliquer d'une part par le géocodage et le re-échantillonnage qui provoque l'imprécision dans l'image. D'autre part

les cartes de compilation résultant de masaïcage analogique induisent de l'imprécision par l'interprétation des contacts, les changements d'échelle, parfois le système de projection.

De ces analyses il ressort des orientations préférentielles E-W, ENE-WSW, N-S et NE-SW remarquées sur l'image satellitaire qui s'avèrent être également celle des linéaments d'origine structurale (faille). Sur la carte de synthèse des linéaments, l'ordre de longueur est variable (d'hectométrique à plurimétrique). Leurs répartitions sur l'image ne sont pas homogènes. Quelques linéaments forment de fines trames rapprochées orientées généralement NE-SW à ENE-WSW, formant ainsi un linéament majeur allant de l'extrémité Est du domaine d'étude (Secteur Dj. Balouta et Oued Ousafa) vers l'Ouest du domaine d'étude (Secteur du Dj. Bou El Hanèche) (figure 5 et 6). Sur l'image SPOT, ce linéament majeur coïncide bien avec un réseau de failles formé par les accidents F1, F2 et F3 (figure 6 -7). Ces accidents étaient mal reconnus, cependant la cartographie actuelle de la faille F1 et F3 est hypothétique (trait discontinu), alors que pour la faille F2 est cartographiée en partie (trait continu).

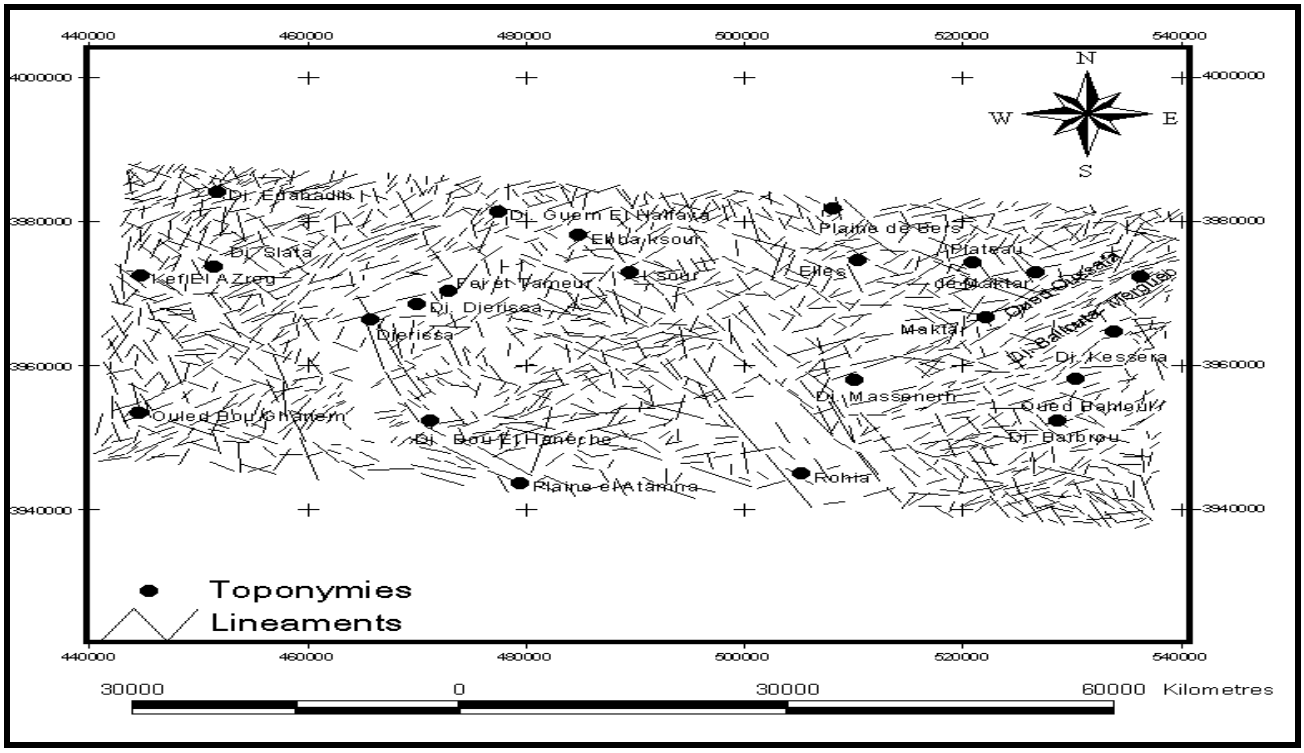


Figure 5-A : Carte linéamentaire synthétique.
Synthetic lineament map.

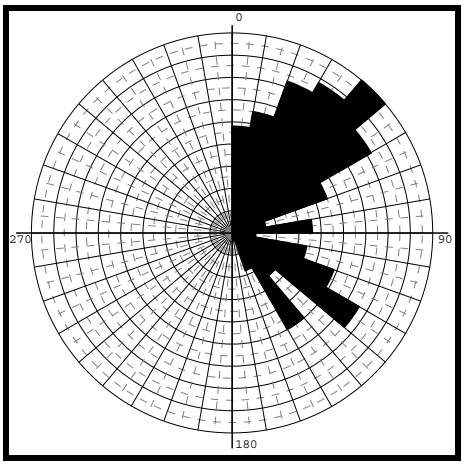


Figure 5-B : Rose diagramme des fréquences des lineaments.
Diagram of lineaments stemming from lineaments frequency.

L'accident F1, correspond à un réseau de faille affectant le secteur du Dj. Balouta-Oued Ousafa. D'après la carte géologique élaborée par Jauzein (1959) à parir des données de surface, cette faille correspond à un accident principal de direction NE-SW qui s'amortit rapidement ; mais cette faille est relayée par une série d'accidents secondaires allant

de la faille à la flexure et qui se poursuivent jusqu'au fossé de Rohia après avoir subi une légère courbure vers l'Ouest (figure 6 et 7).

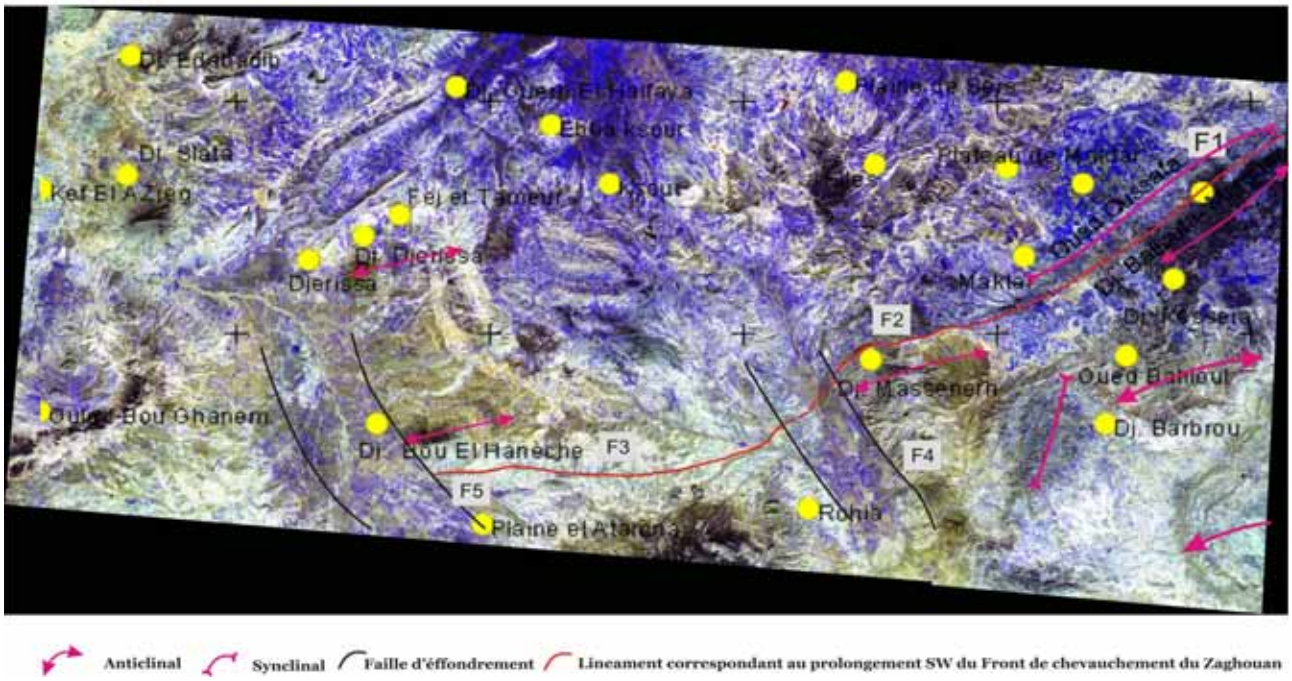


Figure 6 : Interprétation des lineaments sur l'image SPOT.
Lineaments interpretation on Spot image.

L'accident F2, correspond à limite Nord du Dj. Massenerh. C'est un réseau de faille de direction ENE-WSW à NE-SW. D'après la carte géologique de Rohia-Dj. Barbrou (Ben Haj Ali et Maamri, 2002) cet accident (F2) s'amortit vers la limite Est de la cuvette de Rohia (F4).

L'accident F3, correspond à la limite Sud du Dj. Bou El Hanèche et la limite septentrionale du fossé de Kalâat Khasba. Cet accident a été considéré comme étant une bordure d'effondrement à jeu normal, ayant fonctionnée depuis le Crétacé inférieur jusqu'aux Quaternaire (Pervinquière, 1903 ; Richert, 1971 ; Castany, 1948, 1951, 1953; Burollet, 1956; Caire, 1977 ; Ben Ayed, 1986; Chihi, 1995, 2003; Hadj Sassi *et al*. 2006; Belguith, 2010). D'après les études récentes basée sur l'intégration des données géophysiques (profils sismique réflexion) et les données géologiques du terrain, cet accident correspond à la nouvelle émergence du front de chevauchement de la chaine alpine, limitant le massif de Bou El Hanèche (Ezzine, 2007). En effet, cet accident à été réactivé au Miocène supérieur en faille inverse à chevauchante, jouant le rôle d'un front de chevauchement. Cet accident (F3) est tronqué vers l'Ouest par la faille NW-SE limitant le graben de Kalâat Khasba (Figures 6 et 7).

Vers l'Ouest du domaine d'étude, l'examen de la carte synthétique des linéaments, montre des linéaments de fines trames, de forte densité et rapprochées orientées généralement NE-SW à ENE-WSW, jouant le rôle d'une bretelle de transition entre les accidents (F2 et F3).

Les données de terrains montrent la réactivation des failles à différentes époques. Ainsi on distingue la réactivation des failles NS en décrochement senestre et les failles ENE-WSW en dextre avec une composante inverse.

La pulsation tectonique la plus récente qui a affecté toute la Tunisie a une direction qui tend vers une compression NS, cette tectonique est connue sous le nom de la phase post-villafranchienne (Zargouni & Trémolière, 1981; Zargouni, 1985; Ben Ayed, 1986 ; Baccaletti *et al.* 1990; Vially *et al*. 1994; Bracène & Frizon, 2002; Patriat *et al.* 2003) elle est parallèle au linéament NS.

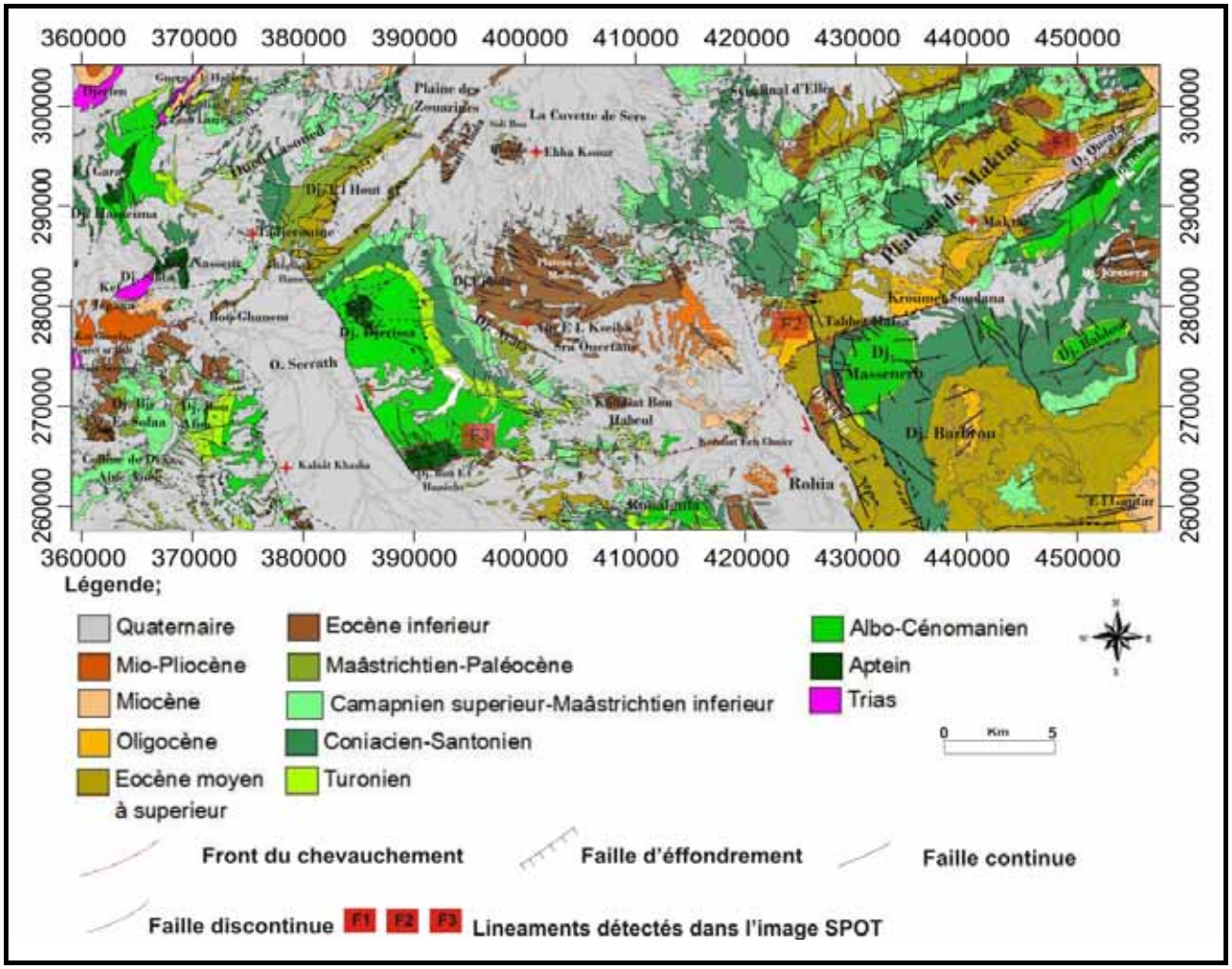


Figure 7 : Cartographie des lineaments sur la carte géologique synthétique.
Lineament mapping on the synthetic geological map.

L'existence de fractures anciennes représente une hétérogénéité à l'échelle de la zone déformée, ce qui incite à proposer un modèle de déformation en cisaillement (figure 8).

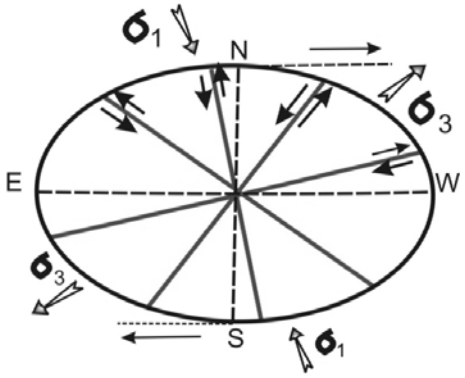


Figure 8 : Ellipsoïde de déformation montrant la répartition des blocs tectoniques.
Deformation ellipsoid showing tectonics bloc deformations.

6. CONCLUSION

L'application des techniques de prétraitement a abouti aux rehaussements radiométriques des images les rendant plus expressives et plus fines pour la cartographie structurale. Plusieurs travaux (Savané, 1997; Kouamé, 1999; Jourda,

2005; Youan, 2008) ont montré l'apport majeur des images LANDSAT pour la reconnaissance des réservoirs discontinus et la cartographie des accidents majeurs d'ordre régional.

De plus l'approche méthodologique simple basée sur l'utilisation des filtres directionnels (filtre de Sobel), la segmentation des histogrammes de fréquences a contribué à l'élaboration d'une carte de linéament précise. L'analyse statistique de ces linéaments à l'aide des rosaces directionnelles de 10° d'intervalle a démontré une répartition particulière de l'orientation de ces derniers selon la direction préférentielle E-W à ENE-WSW suivie par celle NE-SW.

La confrontation de ces résultats avec les données géologiques de surface (cartes géologiques) a montré que : - Les linéaments d'image satellitaire ont pu être identifiés et reconnus sur le terrain comme étant des failles. - Les linéaments majeurs identifiés sont liés à des failles profondes reliées à de grands mouvements tectoniques à l'échelle de la Tunisie.

La continuité de ces segments d'accidents (F1, F2 et F3) constitue le prolongement SW du front de chevauchement de Zaghouan. Ces résultats montre l'importance des analyses linéamentaires dans la cartographie des accidents dans l'Atlas centro-septentrional telle que la nouvelle émergence de la partie méridionale du front de chevauchement de la chaine alpine dans l'Afrique du Nord.

Références bibliographiques

Abbes, Ch. (2004) Structurations et évolutions tectono-sédimentaires Mésozoïques et Cénozoiques associées aux accidents reghmatiques à la junction des marges téthysienne et nord africaine (Chaine Nord-Sud Tunisie centrale). Thèse de doctorat es Sciences Géol., Univ. Tun. El Manar, Fac. sci, Tunis.

Bocaletti, M., Cello, G., and Tortorci, L. (1990) First order kinematic element in Tunisia and Pelagian Block. Tectonophysics, 176, 215-228.

Belguith, Y. (2010) Déformation en extension récente et active de la Tunisie. Thèse de Doctorat. Université de Nantes.

Ben Ayed, N. (1986). Evolution tectonique de l'avant-pays de la chaîne alpine de Tunisie du début du Mésozoïque à l'actuel. Thèse d'Etat, Université de Paris, Sud-centre d'Orsay.

Ben Haj Ali, M. et Maamri, R. (2002) carte géologique de la feuille de Rohia-Dj. Barbrou n°61. Office Nationale des Mines de Tunis, Tunis, 1:50 000.

Biémi, J., Deslandes, S., Gwyn Q.-H. J.et Jourda, J.P. (1991) Influence des lineaments 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 Spaciale. p. 43-49 in Gagnon, P. (éd). Télédétection et gestion des ressources. Vol VII. Comptes rendus du septième congrès de l'Association Québécoise de Télédétection. 714 p.

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

Bracène, R.et Frizon de Lamotte, D. (2002) The origin of intraplate deformation in the system of western and central Algeria: from Jurassic rifting to Cenozoic-Quaternary inversion.

Tectonophysics 357, 207–226.

Burollet, P.F. (1956) Contribution à l'étude stratigraphique de la Tunisie Centrale. Ann .Min. Géol., 18, 352 p.

Burollet, P.F. et Sainfeld, P. (1956) Carte géologique de la feuille de Tadjerouine n° 51. Office Nationale des Mines de Tunis, Tunis, 1 :50 000.

Caire, A. (1977) Interprétation tectonique unitaire de l'atlas tunisien à fossés in Compte Rendus Académie des Sciences, Paris., t.284, 349-352.

Castany, G. (1948) Les fossés d'effondrement de la Tunisie. Géologie et hydrogéologie. 1er fasc. P laine de Grombalia et cuvettes de Tunisie orientale. Ann. Min. Géol. de Tunisie, 3, 126p.

Castany, G. (1951) Sur l'âge récent de la phase ultime de diastrophisme majeur de l'Atlas tunisien original in IXème Congrès A. F. A. S. de Tunis., 1, 103-105.

Chihi, L. (1995) Les fossés néogènes à quaternaires de la Tunisie et de la mer pelagienne: Etude structurale et leur signification dans le cadre géodynamique de la mediterrenée centrale. Thèse de Doctorat d'Université, Tunis. El Mannar II.

Chihi, L. (2003) Place de la Tunisie dans l'évolution géodynamique de la méditerranée occidentale du Néogène à l'actuel in Résumé A. T. E. I. G : La chronologie des événements tectoniques en Tunisie. 43 – 47.

Coulibaly, L. (1996). Interprétation structurale des lineaments par traitement d'image satellitaire: cas des sous provinces d'Abitibi et d'Opatica (Québec).

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, 65p.

Deslandes, S. (1986) Évaluation des images Spot et Seasat pour la cartographie des linéaments du secteur des Monts Stoke, au Québec une comparaison basée sur l'analyse du spectre de Foumer. Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université de Sherbrooke, 62 p.

Deslandes, S. et Gwyn, Q.-H. J. (1991) Évaluation de SPOT et SEASAT pour la cartographie des linéaments : comparaison basée sur l'analyse de spectres de Fourier. Journal canadien de télédétection, vol. 17, no. 2, p. 98-1 10.

Drury, S. A. (1986) Remote Sensing of Geological Stmcture in Temperate Agricultural Terrain. Geological Magazine, vol. 123, n°. 2. pp. 1 1 3- 12 1.

Durand-Delga, M. (1980) La méditerranée occidentale : étape de sa genèse et problèmes structuraux liés à celle – ci in ‘’livre jubilaire de la Société Géologique de France, 1830-1980’’. Mém. H.s. Soc. Géol. Fr., Paris, n° 10, p. 203.

Ezzine, I., Ghanmi, M., Ben Youssef, M., et Zargouni, F. (2007) Mise en évidence d'un front de chevauchement au Djebel Bou El Hanèche : Kalâat Khasba (Tunisie centro-septentrionale) in 11th Tunisian Petrolium Exploration et Production Conference.

Ghanmi, M. (2003) Géodynamique de la plate forme saharienne et sa marge septentrionale au Crétacé. Son évolution vers l'Atlas septentrionale, interférences du rifting et d'halocinèse. Habilitation spécialité géologie Uni Tunis El Manar. Fac des Sci Tunis. 347P.

Hadj Sassi, M., Zouari, H. et Jallouli, C**.** (2006) Contribution de la gravimétrie et de la sismique réflexion pour une nouvelle interprétation géodynamique des fossés d'effondrement en Tunisie : exemple du fossé de Grombalia.- Compte Rendu de Geoscience 338 (2006) 751–756.

Hobbs, W. H. (1904) Lineaments of the Atlantic Border regions. Geological Society of America Bulletin, n°15, p.483-506.

Homsby, J. et Bruce, B. (1985) A preliminary analysis of Landsat MSS and TM data in the Levack area, sudbury, Canada. IGARSS Remote sensing instrumentation: Technology for science and application, oct 7-9, University of Massachusets, Amherst, pp. 1 3 1 - 140.

Jauzein, A. (1967) Contribution à l'étude géologique des confins de la dorsale tunisienne (Tunisie- septentrionale). Ann. Mines. Géol. Tunisie, n° 22. 475p.

Jauzein, A. (1959) carte géologique de la feuille de Maktar n°53. Office Nationale des Mines de Tunis, Tunis, 1 :50 000Jourda, J.P. (2005) Méthodologie d'application des techniques de télédétection et de système d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'ouest. Concept d'hydrotechnique spaciale : cas des zones tests de la côte d'Ivoire. Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 429p.

Kouamé, K.F. (1999) Hydrogéologie des aquifères discontinues de la région semi-montagneuse de Man-Danané Ouest de Côte d'Ivoire. Apport des données des images satellitales. Thèse 3 éme cycle, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 194 p.

Lehotsky, I., et Bujonowsky, A. (1978) Carte géologique de Kalâat Es Senan n°59. Office Nationale des Mines de Tunis, Tunis, 1:50 000.

Lehotsky, I. (1979) Carte géologique d'Ebba Ksour n°52. Office Nationale des Mines de Tunis, Tunis, 1:50 000.

Marion, A. (1987) Introduction aux techniques de traitement d'image. Paris, Éditions Eyrolles, 278p.

Patriat, M., Ellouz, N., Dey, Z., Gaulier, J.-M. et Ben Kilani, H. (2003). The Hammamet, Gabès and Chotts basins (Tunisia): a review of the subsidence history.- Sedimentary Geology 156 (2003) 241-262.

Pervinquiere, L. (1903) Etude géologique de la Tunisie centrale. Thèse de doctorat ès. Sciences. Paris. 360p.

Pretorius, J.-P.G.et Partridge, T.C. (1974) Analysis of angular atypicality of lineaments as aid to mineral exploration. Journal of South African Institute of Mining an Metallurgy, vol. 74, no. 10, may 2974, pp. 367-369.

Richert, J. P. (1971) Mise en évidence de quatre phases tectoniques successives en Tunisie in notes du Service Géologique de Tunisie, n°34 : Travaux de Géologie tunisienne, n°4, (1971), pp. 114 – 121.

Sabins, Jr. F. F. (1986) Remote sensing principles and interpretation. Second edition, Freeman, 441 p.

Savané, I. (1997) Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des discontinus du socle cristallin d'Odienné Nord-Ouest de la Côte-D'ivoire. Apport de la télédétection et d'un système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale. Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan-Côte d'Ivoire, 386 p.

Shupe, S.M. et Akha, V. (1989) Integration of remotely sensed and G.LS Data for mineral exploration : Halifax area, Nova Scotia, Canada. Geocario international. A multi-disciplinary journal of remote sensing, pp. 49-54.

Vially, R., Letouzey, J., Benard, F., Haddadi, N., Desforges, G., Ashri, H.,et Boudjema, A. (1994) Basin inversion along the North African Margin, The Saharan Atlas (Algeria). Peri-Tethys Platforms. F. Roure (Editor) and Edition Technip, Paris, p. 79-118.

Youan Ta M. (2008) Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Cas de la région de Bondoukou Nord Est de la côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat unique, Université de Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire), 236p.

Zaier, A. (1998) Carte géologique de la feuille d'Ain El Kseiba n° 60. Office Nationale des Mines de Tunis, Tunis, 1:50 000.

Zargouni, F. et Trimolière, P. (1981). Déformation tectonique postérieure au dépôt de la série du Ségui (Plio-Villafrachien) dans l'Atlas méridional tunisien. Résumé du premier Congr. Nat. Sc. Terre, Tunis, p. 59.

Zargouni, F. (1985) Tectonique de l'Atlas méridional de Tunisie, évolution géométrique et cinématique des structures en zones de cisaillement. Thèse d'Etat. Univ. L. Pasteur. Strasbourg.