

Faculté des Sciences et Techniques Gueliz

Département de Sciences de la Terre

Rapport de Projet de Fin d'Etudes

Licence Sciences et Techniques

Filière : *Géologie Appliquée Aux Ressources Minières*

Apport de la télédétection à la cartographie géologique et à la prospection minière

*Exemple du bassin d'Essaouira,
Haut Atlas Occidental,
Maroc*

Réalisé par :

- MIRARI Mustapha

Encadré par :

- Pr. IBOUH Hassan
- Pr. HANICH Lahoucine



Remerciement

Ce travail n'aurait pas pu être bien terminé sans l'aide et les encouragements de nombreuses personnes auxquelles nous voudrons exprimer nos sincères remerciements.

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la volonté et le courage d'achever ce travail.

Un grand merci à Mr. IBOUH Hassan notre encadrant et Mr. HANICH Lahoucine notre co-encadrant, professeurs et enseignants au sein de la faculté des Sciences et Techniques Marrakech d'avoir accepté de diriger ce travail, nous les remercions infiniment pour leur gentillesse, leur directive et leurs conseils précieux.

Mes chaleureux remerciements vont également à Mr. SAIDI Abdellatif le responsable de la filière « Géologie Appliquée Aux Ressources Minières » pour son dévouement et sa ténacité pour assurer une formation de qualité.

Nos chaleureux remerciements vont également à nos chers parents pour leur soutien et encouragements. Ainsi qu'à nos collègues et nos amis pour leur solidarité.

Enfin nos profonds remerciements vont à tous les professeurs du Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech.

Le 20/02/2015

Sommaire :

INTRODUCTION GENERALE	7
I. Introduction:	8
II. Les domaines structuraux du Maroc:.....	8
III. Le Hauts Atlas Occidental:	10
1. Contexte géodynamique:	11
2. Contexte Structural:	11
3. La lithostratigraphie:	12
IV. L'objectif de cette étude:.....	14
V. La situation du secteur d'étude:	14
NOTIONS DE TELEDETECTION ET D'IMAGE SATELLITAIRE	15
I. Introduction:	16
1. Définition de la télédétection:	16
2. Principes de base de la télédétection:	16
3. Les principales étapes de la télédétection:.....	17
4. Les bases physiques de la télédétection:	18
5. Définition d'image:.....	20
6. Un pixel.....	20
7. Image mono-spectrale :	20
8. Image multi-spectrale :	21
9. Le Satellite :	22
MATERIEL ET METHODE DE TRAVAIL.....	23
I. Introduction :	24
II. Méthodologie:	28
RESULTATS ET INTERPRETATIONS	30
1. Les Filtre 3x3, 5x5, 7x7:	32
2. Extraction de linéaments:.....	37
3. La cartographie lithologiques affleurements géologiques :	45
PROSPECTION MINIERE	52
I. Indices des minéraux argileux :.....	54
II. Indices des Oxydes de fer :	54
III. Indice de l'altération hydrothermal:.....	55
IV. Indice des minéraux ferreux :.....	56
V. Indices des mineral composite:.....	57

TRAITEMENT DES IMAGES MNT	58
RESULTATS ET INTERPRETATIONS	62
2. Les Filtre 3x3, 5x5, 7x7:	64
3. Extraction de linéaments :	70
RESULTATS ET INTERPRETATION:	76
CONCLUSION.....	80

Liste des Figures :

Fig.1: Principaux domaines structuraux du Maroc	9
Fig.2:Coupe géologique de synclinal d'Essaouira.....	11
Fig.3:Log stratigraphique synthétique du Crétacé du bassin synclinal d'Essaouira	13
Fig.4:carte de situation du bassin d'Essaouira sur la carte du Maroc. (inMichard et al., 2008)	14
Fig.5:Principe de base de la télédétection. . (D'après le site Web du Centre Canadien de Télédétection.....	16
Fig.6: Les sept étapes de la télédétection. (D'après le site Web du Centre Canadien de Télédétection	17
Fig.7 : exemple d'image mono spectrale	21
Fig8 : Schéma montrant un ensemble d'image mono-spectrale c'est un composé coloré.....	21
Fig.9 : Organigramme des différentes étapes de travail sur image satellitaire LandSat.	25
Fig.10 : Organigramme des différentes étapes de travail sur image MNT.	26
Fig.11 : Scène ETM + Landsat 7 (n°L71203038_03820040120).	27
Fig.12 : Carte topographique de la zone d'étude.	29
Fig.13 : Méthode de travail des filtres pour Erdas Imagine, exemple filtre 3x3.	31
Fig.14: Carte de linéaments du filtre 3x3 Projétés sur l'image satellite de la zone d'étude.....	32
Fig.15:Carte de linéaments du filtre 5x5 Projétés sur l'image satellite de la zone d'étude.....	33
Fig.16:Carte de linéaments du filtre 7x7 Projétés sur l'image satellite de la zone d'étude.....	34
Fig.17: Carte de linéaments projetés sur la carte topographique.	35
Fig.18: Exemple de linéaments à corriger à l'aide de carte topographique.	35
Fig.19 : image satellite de la zone d'étude avec les linéaments du filtre 3x3.....	36
Fig.21: Rosace pour les linéaments trouvés avec filtre3x3.....	38
Fig.22: Rosace pour les linéaments trouvés avec filtre 5x5.	39
Fig.23: Rosace pour les linéaments trouvés avec filtre 7x7.....	40
Fig.24: La rosace des linéaments de carte géologique.	42
Fig.26: Comparaison entre carte de linéaments extraits par les filtres (B) et les fractures présents dans la carte géologique (A).....	44
Fig.27 : Rosace Majeur des linéaments extraits par les filtres.....	44
Fig.28: Exemple de réflectance (signature spectrale) pour différentes lithologies.....	46
Fig.30: Carte du bassin Essaouira en utilisant l'analyse avec la composante principale.....	47
Fig.29: carte géologique du basin Essaouira.....	47
Fig.31 : Les sept Composantes Principales extraites de l'image satellite de la zone d'étude.	49
Fig. 32 : Le composé coloré Image, formé des ACP 2, 5,7.	51
Fig. 33 : Le composé coloré ACP 2, 5,7.	51

Fig. 36 : Spatiocarte de l'indice d'Altération hydrothermal du Bassin d'Essaouira.....	55
Fig. 37: Spatiocarte de l'indice des minéraux ferreux du bassin d'Essaouira.....	56
Fig. 38: Spatiocarte de l'indice minéral composite du bassin d'Essaouira.	57
Fig. 39: Image MNT avec correction Géométrique du bassin d'Essaouira	59
Fig.40 : Carte topographique de la zone d'étude.	61
Fig.41:Méthode de travail des filtres pour Erdas Imagine, exemple filtre 3x3.....	63
Fig.42: Carte de linéaments du filtre 3x3 Projétés sur l'image MNT de la zone d'étude.	64
Fig.43: Carte de linéaments du filtre 5x5 Projétés sur l'image MNT de la zone d'étude.	65
Fig.44: Carte de linéaments du filtre 7x7 Projétés sur l'image MNT de la zone d'étude.	66
Fig. 45 : Carte des linéaments projetés sur la carte Topographique.	68
Fig.46: Exemple de linéaments à corriger a l'aide de carte topographique.	68
Fig.47 : Carte des linéaments projetés sur l'Image MNT.....	69
Fig.48 : Exemple de linéament trouvés avec filtre 5x5, et aussi avec Google Image.	69
Fig.49: Rosace pour les linéaments trouvés avec filtre 3x3.....	71
Fig.50: Rosace pour les linéaments trouvés avec filtre 5x5.	73
Fig.53: Comparaison entre carte de linéaments extraits par les filtres (B) et les fractures présents dans la carte géologique (A).....	78
Fig.54 : Rosace Majeur des linéaments extraits par les filtres.....	78
Fig. 55: Carte Géologique avec linéaments et indice extrait sous logiciel ERDAS IMAGINE 9.2.....	81

Liste des tableaux

Tableau 1: Résultats de mesure des linéaments trouver avec filtre 3x3 (azimuth, longueur(m)).	37
Tableau 2 : Résultats de mesure des linéaments trouver avec filtre 5x5 (azimuth, longueur(m)).....	39
Tableau3: Résultats de mesure des linéaments trouver avec filtre 7x7 (azimuth, longueur (m)).	40
Tableau 4: Résultats de mesure des linéaments de la carte géologique (azimuth, longueur(m)).....	41
Tableau 5 : Le pourcentage de l'information dans chaque composante colorée.	48
Tableau 6 : Matrice de corrélation des sept ACP.....	50
Tableau7: Résultats de mesure des linéaments trouver avec filtre 3x3 (azimuth, longueur(m)).	70
Tableau 8 : Résultats de mesure des linéaments trouver avec filtre 5x5 (azimuth, longueur(m)).	72
Tableau9: Résultats de mesure des linéaments trouver avec filtre 7x7 (azimuth, longueur(m)).	74

INTRODUCTION GENERALE

I. Introduction:

Le Maroc est le pays le plus occidental de l'Afrique du nord. Il est limité au nord par la Méditerranée, au Sud par la Mauritanie, à l'Est par l'Algérie et à l'ouest par l'Océan Atlantique. Le Maroc est nommé paradis des géologique pour sa richesse et diversité des domaines géologiques avec des affleurements bien dégagé et allant du Précambrien jusqu'à l'actuel.

L'absence d'un couvert végétal très dense favorise une contribution importante de l'utilisation des images satellites dans de nombreuses études géologiques.

II. Les domaines structuraux du Maroc:

Le Maroc a été subdivisé en cinq principaux domaines structuraux. (Fig.1)(Michard, 1976;Piqué1983;Piqué et Michard, 1989).

Domaine Rifain:

Le domaine Rifain est le domaine le plus septentrional du Maroc. Il constitue la partie sud-orientale de la chaîne alpine péréméditerranéenne. Il est formé de terrains allochtones chevauchants la Méséta. On y connaît aussi des terrains paléozoïques qui affleurent surtout dans la partie interne de la chaîne.

Domaine Atlasique:

Le domaine atlasique est constitué de deux chaînes de montagnes, le Haut Atlas et le Moyen Atlas (Michard, 1976). Le Moyen Atlas, de direction NE-SW, sépare la Méséta en deux. Le Haut Atlas, situé entre le Domaine Mésétien au nord et l'Anti Atlas au sud, se prolonge en Algérie et en Tunisie par l'Atlas Saharien. Ce domaine est formé d'une épaisse Série permo-mésozoïque et cénozoïque, plissée au cours de l'orogenèse atlasique. Les phases de plissement sont d'âge jurassique-supérieur et tertiaire. En outre, il renferme des terrains Paléozoïques tels que le bloc Paléozoïque du Haut Atlas occidental et les boutonnières du Haut Atlas central, oriental et celles du Moyen Atlas.

Domaine Mésétien:

Le Domaine Mésétien a été défini par Gentil(1918) comme étant le domaine de la Chaîne hercynienne du Maroc. Il est constitué d'un socle paléozoïque couvert en discordance par des séries méso-cénozoïques non déformées. Ce domaine est séparé en deux parties par Le Moyen Atlas, (Termier, 1936; Michard, 1976):

La Méséta Occidentale, dite marocaine. Elle est constituée de trois grands massifs Paléozoïques, le Massif central ou Maroc central, les Rehamna et les Jebilet, qui affleurent au sein de la couverture méso-cénozoïque.

La Méséta Orientale ou oranaise. Elle est composée de plusieurs boutonnières (Jerada, Debdou, Mekam et Midelt) dont les affleurements des terrains paléozoïques sont relativement plus restreints.

Domaine Anti-Atlasique ou Présaharien:

Dans l'Anti Atlas, le socle ancien et sa couverture du Protérozoïque supérieur ont été affectés par l'orogenèse panafricaine (680-570Ma) (Leblancetal.,1980).

Plus tard, la couverture fini-Protérozoïque et Paléozoïque de la chaîne Panafricaine a été affectée par une déformation hercynienne, varisque, relativement modérée.

La couverture Méso-cénozoïque est peu épaisse et non déformée.

Domaine Saharien :

Il fait partie du Bouclier Ouest Africain (Michard, 1976; Piqué et Michard, 1989). Il est formé de séries du Protérozoïque inférieur, extrêmement déformées et Métamorphisées au cours de l'orogenèse éburnéenne (vers 2000 Ma). Ces séries sont Surmontées, au nord, par des roches Paléozoïques non déformées du Bassin de Tindouf, qui sont à leur tour cachées en partie par une couverture mésozoïque et cénozoïque.

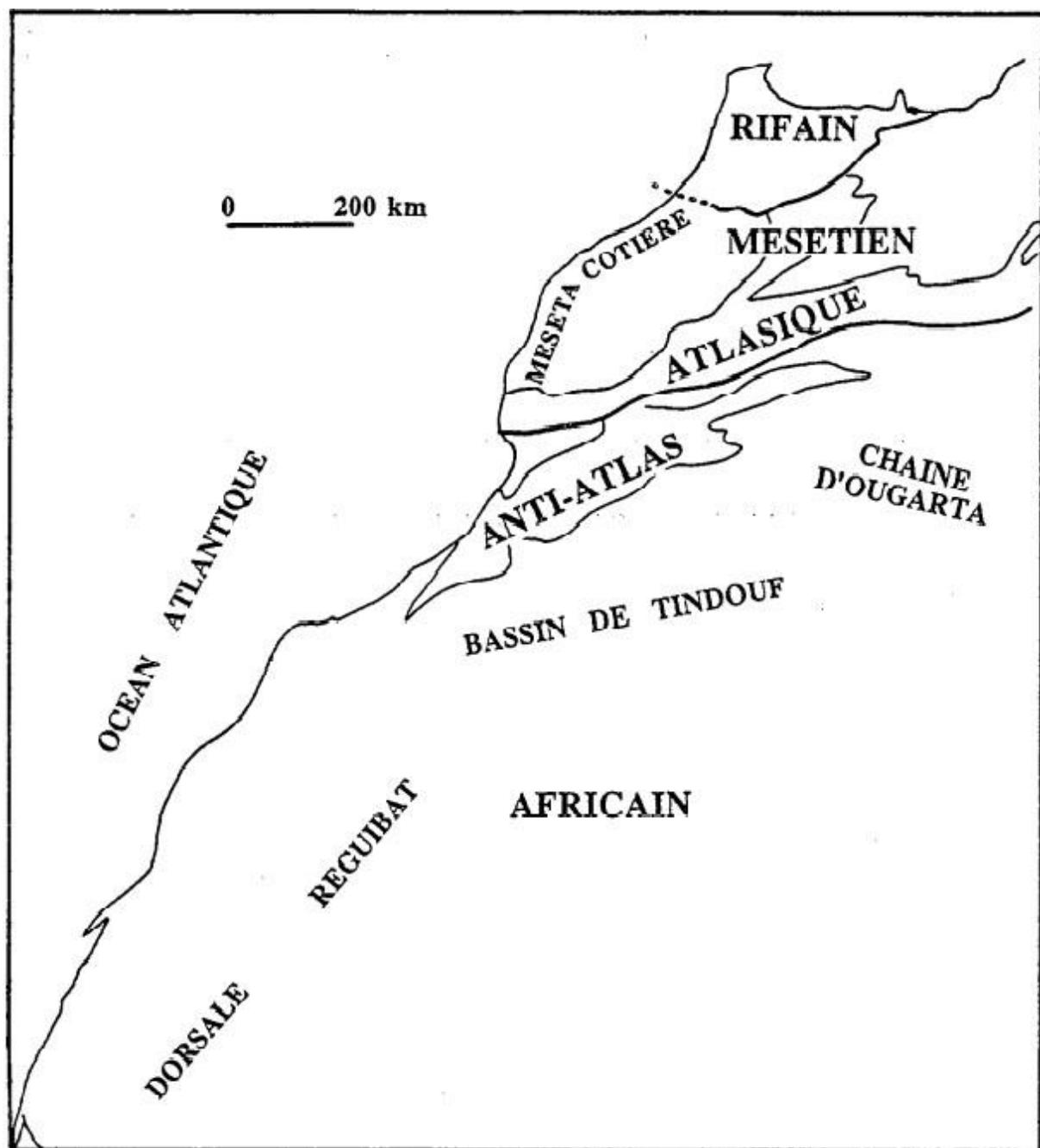


Fig.1: Principaux domaines structuraux du Maroc. (D. Khattach. 1989)

III. Le Haut Atlas Occidental:

Le Haut Atlas occidental s'élève depuis l'océan atlantique à l'Ouest jusqu'au segment le plus culminant de toute la chaîne du haut Atlas Central (jbel Toubkal, 4167 m) à l'Est (Roch, 1930). Il est limité au Nord par la plaine du Haouz et au sud par celle du Souss.

Il montre d'Est en Ouest, deux régions d'inégale morphologie séparées par le couloir triasique d'Argana. A l'Est s'étend une zone montagneuse, qui constitue le massif ancien du Haut Atlas. Celui-ci est formé de roches précambriennes et paléozoïques constituant l'axe de la chaîne atlasique. Il montre sur ses flancs une série mésozoïque, assez réduite, sous forme de plateaux surélevés et profondément creusés par les oueds. A l'Ouest de la combe triasique d'Argana, s'étend une région beaucoup moins montagneuse, appelée d'une façon générale : Bassin du Sud-Ouest Marocain (Duffaud, 1960), Haut Atlas atlantique (Despois et Reynal, 1967), Atlas Atlantique (Weidrock, 1980) et bassin Occidental Marocain (Jaffrezo et al, 1985).

La partie la plus subsidente de l'Atlas Atlantique correspondrait aux bassins d'Essaouira et d'Agadir. La région la plus septentrionale, comprise entre le cap Tafelney et le jbel Amsitténe au sud, l'oued Tensift au Nord et l'axe Chichaoua-Imi'Ntanout à l'Est constitue le bassin d'Essaouira.

Paléogéographie:

Pendant le Trias la sédimentation est essentiellement détritique, dominée par des argiles salifères rouge (provenant de l'érosion des reliefs de la chaîne hercynienne), où s'intercalent des coulées basaltiques. Cette sédimentation est en relation avec l'ouverture progressive de l'océan Atlantique (Choubert et Faure-Muret, 1962 et Ambroggi, 1963).

Au cours du Lias et du Dogger, un régime épicontinentale (des apports terrigènes), l'Atlantique qui est plus largement ouvert, transgresse périodiquement ; avec une première transgression au Lias, qui envahit une plate-forme déformée et une deuxième plus importante au Dogger.

Au Jurassique supérieur s'instaure un régime plus franchement marin et moins terrigène que le précédent.

Durant le Crétacé inférieur le régime est essentiellement marin avec des calcaires néritiques et des marnes vertes. Au Barrémien le retour de la mer sur le continent permet le dépôt de calcaires marneux lumachelliens. La régression du Bédoulien (Aptien) permet le dépôt de grès dolomitiques, une nouvelle invasion a eu lieu à l'Aptien supérieur.

La régression à la fin de l'Albien, est suivie d'une nouvelle transgression au début du Cénomanien.

Une nouvelle transgression, au Maestrichien, permet l'installation d'une sédimentation phosphatée, qui se poursuit jusqu'à l'Eocène.

1. Contexte géodynamique:

Du point de vue géologique, la zone synclinale d'Essaouira est moins accidentée avec un relief moins élevé, caractérisé par des collines basses, façonnées par un réseau hydrographique peu dense. Le bassin d'Essaouira compte deux séries tectonostratigraphiques :

- **Une série synrift** d'âge Trias-Lias inférieur, mise en place au-dessus d'un substratum paléozoïque structuré par l'orogenèse hercynienne. Cette série triasico-liasique est formée principalement par des dépôts détritiques lacustres, fluvio-deltaïques à marins, des dépôts évaporitiques et des coulées basaltiques .

- **Une série post-rift** d'âge lias supérieur-éocène, formée en générale par des dépôts de plateforme proximale.

2. Contexte Structural:

Du point de vue structural, le bassin fait partie du sillon nord-atlasique défini par Ambroggi (1963) comme étant une zone de plissements modérés (Fig. 2). La structure du bassin est représentée par une succession d'anticlinaux et de synclinaux qui ont résulté de la combinaison des effets de la tectonique atlascique et du diapirisme .L'ensemble du bassin est fragmenté par d'importants accidents qui se prolongent sous la couverture et qui sont hérités de la phase tectonique hercynienne (Souid, 1983; Medina, 1994)

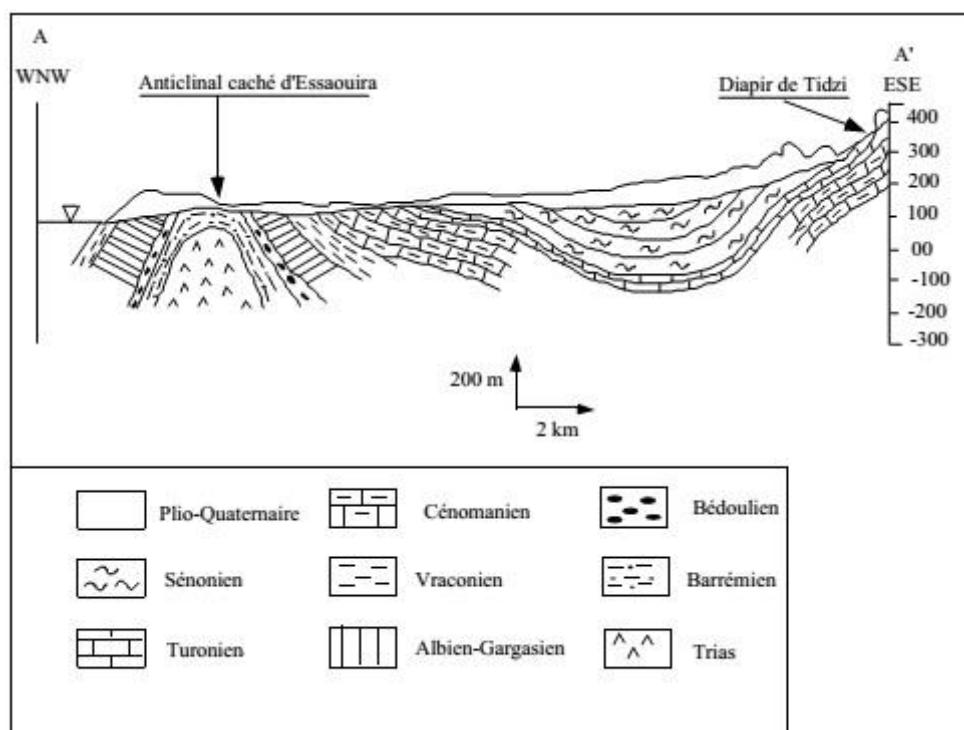


Fig.2:Coupe géologique de synclinal d'Essaouira. (M.BAHIR, M.O.SILVA, J.MENDONÇA, P.CARREIRA, GALEGO FERNANDES, M. BENBIBA & M. ELMERAJI. 2005)

3. La lithostratigraphie:

D'un point de vue stratigraphique, les affleurements sont constitués de terrains dont l'âge s'échelonne entre le Crétacé gréseux à la base et à dominance carbonatée alternant avec des passées de marnes, le Tertiaire formé de marnes phosphatées et de grès et le Quaternaire constitué de grès et conglomérats. Cette région est caractérisée par des structures diapiriques dont le cœur est constitué du trias évaporitique et argileux. Dans notre région d'étude le diapir le plus visible et celui de Tidzi dont le cœur est formé d'argiles rouges salifères et de dolérites d'âge triasique. Afin de comprendre de quoi s'agit il quand on parle de diapir ou de structure diapirique, une définition est présentée ci-dessous.

***Un diapir:**(du grec *diapeirein*,qui veut percer au travers)

Est un type d'intrusion impliquant une structure plus ou moins globuleuse, résultant de la remontée de roches plus légères à travers des roches plus denses. Le cœur du diapir est constitué de roches connues pour être facilement déformables telles que l'argile, ou encore le gypse, les magmas, les boues, etc. Ces roches remontent vers la surface sous l'effet de la poussée d'Archimède car elles sont moins denses et ont une plus grande ductilité que les roches qui les surmontent. La mobilisation est attribuée à la pression lithostatique des roches sus-jacentes. (Wikipedia)

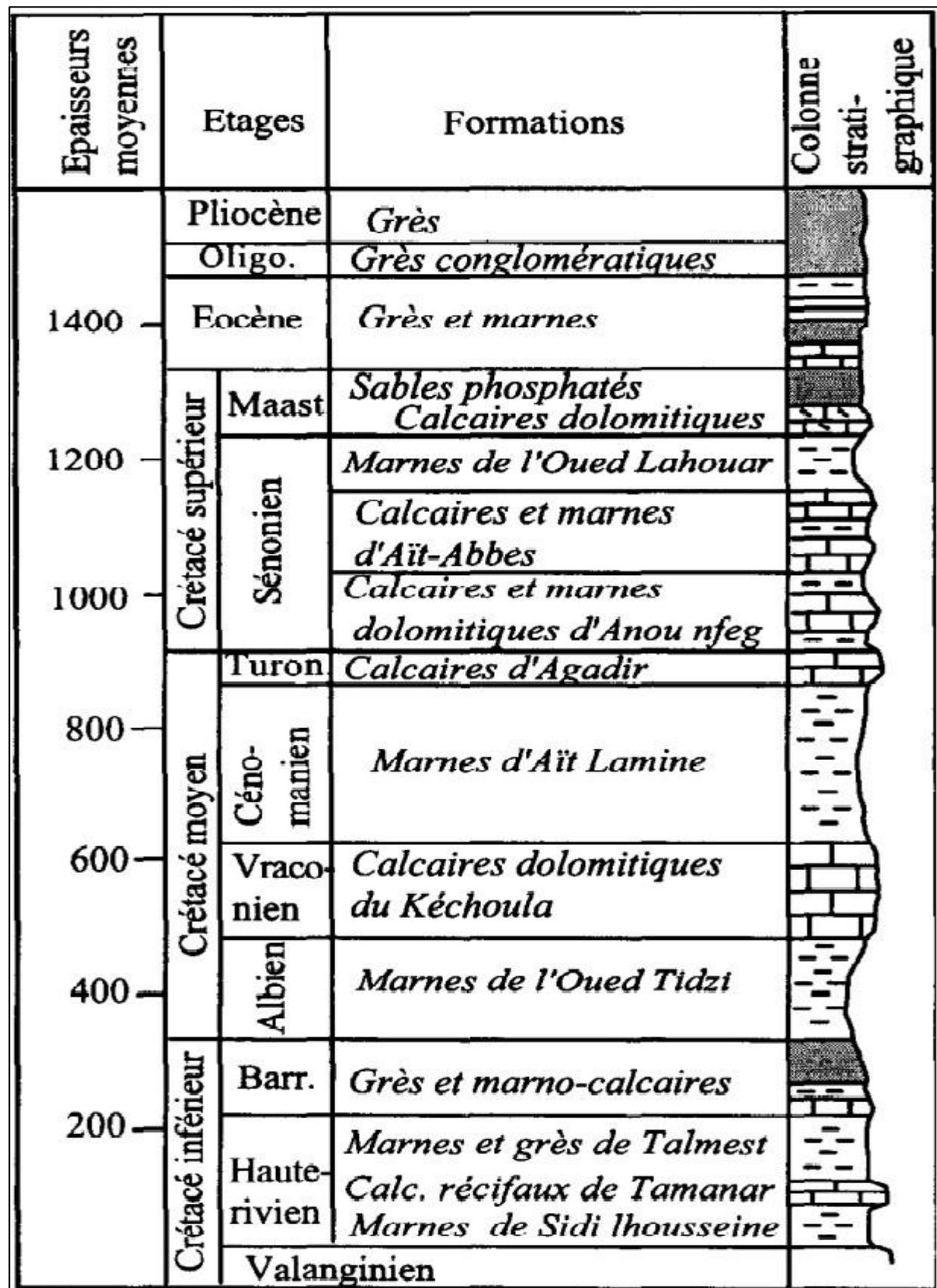


Fig.3:Log stratigraphique synthétique du Crétacé du bassin synclinal d'Essaouira (Duffaudet al.,1966)

IV. L'objectif de cette étude:

La zone d'étude est caractérisée par la présence d'une fracturation intense, engendrée au cours de l'histoire géologique liée à l'évolution de la chaîne atlasique ; Cette étude a pour but :

- Extraire le maximum d'informations à partir des images satellites et des images MNT du bassin Essaouira.
- Corriger les linéaments ressortis de l'image satellite et l'image MNT à l'aide de la carte topographique du bassin Essaouira.
- Comparer les linéaments avec ceux cartographiés de façon conventionnelle sur la carte géologique.
- Et enfin fournir une carte de synthèse de la fracturation dans la zone d'étude.
- Extraire les indices des minéralisations dans la zone d'étude.

V. La situation du secteur d'étude:

Le secteur d'étude se situe sur la côte atlantique marocaine entre la ville d'Agadir au Sud et la ville de Safi Marocaine au Nord et limité par la ville Chichaouia à l'Est (Fig. 4).Les coordonnées GPS du Bassin sont : Longitude entre -9° et -10° et Latitude entre 31° et 32° , d'une surface de 7482 Km2.

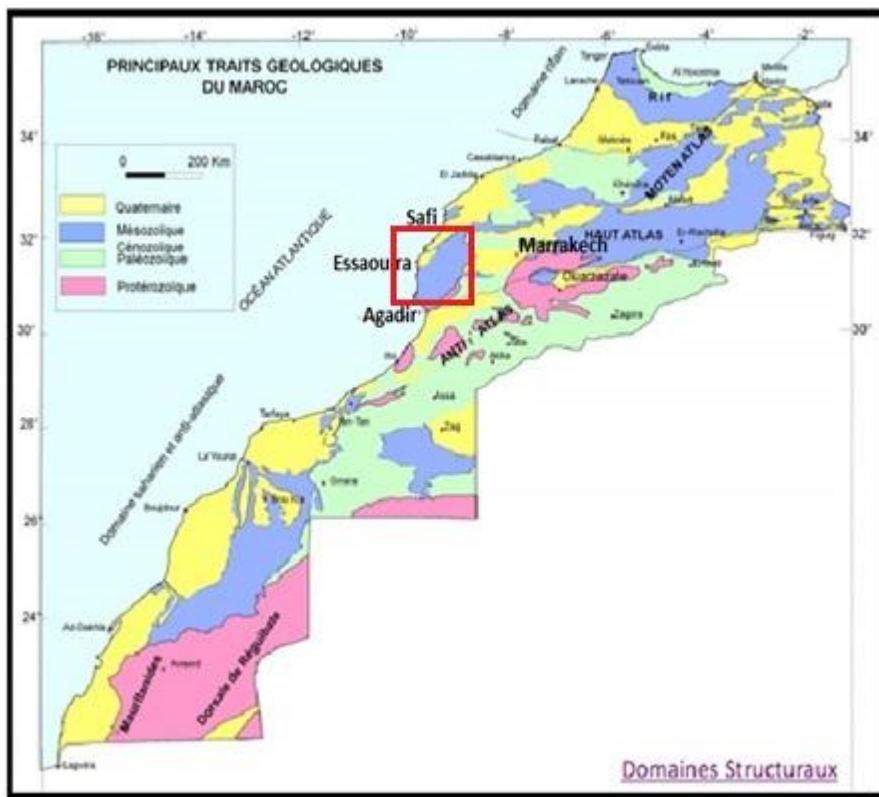


Fig.4:carte de situation du bassin d'Essaouira sur la carte du Maroc. (in Michard et al., 2008)

NOTIONS DE TELEDETECTION ET D'IMAGE SATELLITAIRE.

I. Introduction:

La télédétection est une technique permettant d'obtenir de l'information sur des objets en analysant des données collectées par des instruments qui ne sont pas en contact direct avec ces objets.

Le choix de la télédétection se base sur les raisons suivantes:

-Il peut être long et coûteux de recueillir de l'information sur une grande région en la parcourant à pied, en auto, en bateau ou en la sur volant en avion.

-Il est parfois difficile de détecter des changements légers et il est pénible de noter ou de cartographier des petits changements, en particulier s'ils se trouvent sur des grandes surfaces. Un satellite peut acquérir plusieurs images d'une même région et les ordinateurs peuvent détecter avec précision les changements entre les différentes images acquises pour le suivi des changements.

-L'information de télédétection est numérique et peut être analysée et comparée par ordinateur. Les décisions peuvent donc être prises rapidement et avec précision.

1. Définition de la télédétection:

La télédétection est une technique qui permet, à l'aide d'un capteur, "d'observer" et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi, par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci. Le traitement et l'analyse des informations véhiculées par le rayonnement enregistré permettent d'accéder à certaines propriétés de cette cible: géométriques (position, forme et dimensions), optiques (réflexion, transmission, absorption et etc.) et physico-chimiques (température, teneur en eau, chlorophylle foliaire, phyto-masse, matière organique du sol ...), etc. (Soudani K., 2005)

2. Principes de base de la télédétection:

Le principe de base de la télédétection est similaire à celui de la vision de l'homme. La télédétection est le fruit de l'interaction entre quatre éléments fondamentaux : une source d'énergie, une cible, un vecteur et un capteur. (Fig.5)

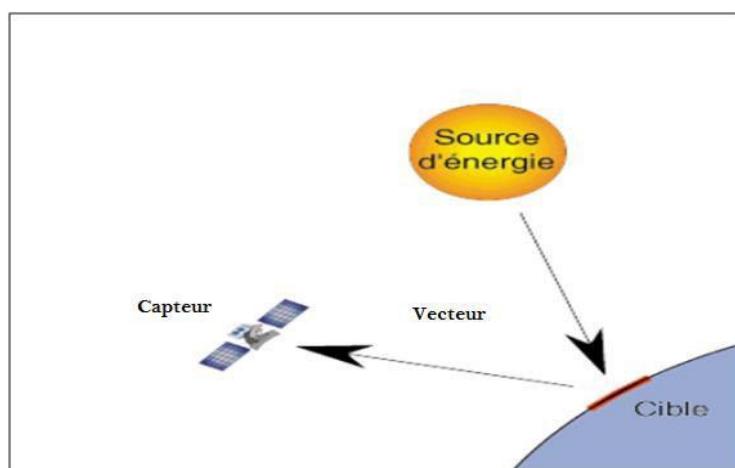


Fig.5:Principe de base de la télédétection. . (D'après le site Web du Centre Canadien de Télédétection : <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>)

La cible: est la portion de la surface terrestre observée par le satellite. Sa taille peut varier de quelques dizaines à plusieurs milliers de kilomètres carrés.

La source: d'énergie est l'élément qui "éclaire" la cible en émettant une onde électromagnétique (flux de photons). Dans l'immense majorité des cas, la source d'énergie est le soleil. Néanmoins, la technologie RADAR nécessite qu'un émetteur soit embarqué sur le satellite, dans ce cas le satellite lui-même est source d'énergie. Il est également possible de mesurer la chaleur qui se dégage à la surface de la cible (infrarouge thermique), auquel cas c'est la cible qui est source d'énergie (bien qu'ils 'agissent' énergie solaire stockée et réémise).

Le vecteur: c'est le rayonnement électromagnétique envoyée par la source et réfléchie par la cible. Les capteurs embarqués sur le satellite mesurent le rayonnement électromagnétique réfléchi, puis un émetteur renvoie l'image sur Terre vers des stations de réception.

Le Capteur: Les capteurs embarqués sur le satellite qui enregistre le rayonnement électromagnétique réfléchi, puis un émetteur renvoie l'image sur Terre vers des stations de réception.

Lorsque le satellite ne fait que capter le rayonnement réfléchi, on parle de **télédétection passive** et lorsque le satellite émet une onde vers la cible et en mesure l'écho, on parle de **télédétection active**.

3. Les principales étapes de la télédétection:

De manière plus détaillée, on peut schématiser la télédétection comme un ensemble de 7 étapes clés (fig. 6):

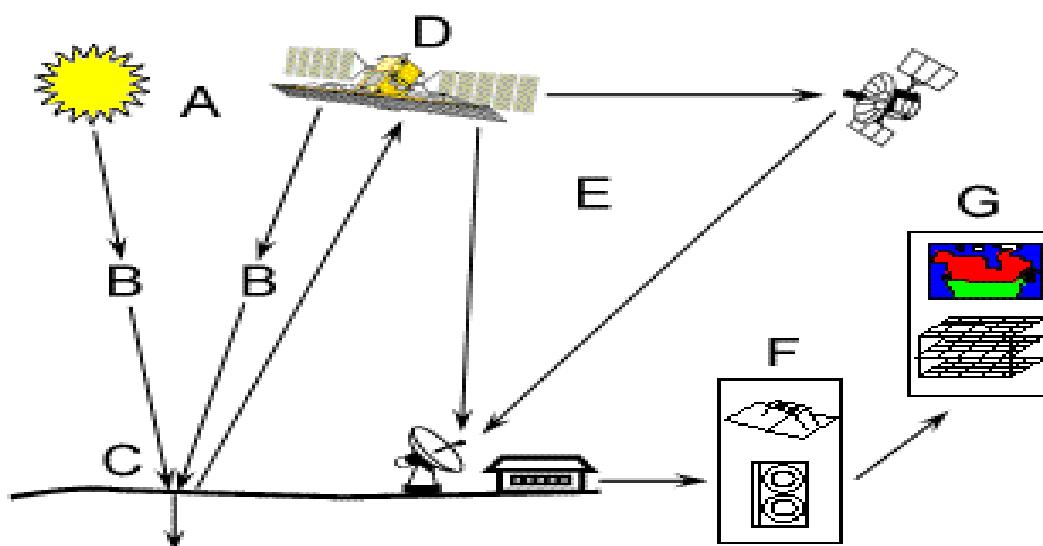


Fig.6: Les sept étapes de la télédétection. (D'après le site Web du Centre Canadien de Télédétection :<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>)

- **Source d'énergie ou d'illumination (A)** - À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible. Le plus souvent, voire dans la presque totalité des cas, cette source d'énergie est le soleil. Mais le satellite lui-même peut être source d'énergie : c'est le cas pour le domaine de la télédétection radar.
- **Rayonnement et atmosphère (B)** - Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur.
- **Interaction avec la cible (C)** - Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface. Chaque objet géographique émet ou réfléchi un rayonnement dans les diverses fréquences du spectre électromagnétique. Cette caractéristique s'appelle le comportement spectral. En télédétection, on suppose que tout objet ou classe d'objet sur la surface terrestre possède sa propre « empreinte digitale » dans le spectre électromagnétique (la signature spectrale), en fonction de la longueur d'onde du rayonnement qui est réfléchi ou émis par lui-même.
- **Enregistrement de l'énergie par le capteur (D)** - Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible mais embarqué à bord d'un satellite ou d'un avion par exemple, pour être enfin enregistrée sous format numérique.
- **Transmission, réception et traitement (E)** - L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception (généralement située au sol) où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).
- **Interprétation et analyse (F)** - Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.
- **Application (G)** - La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, c'est-à-dire la portion d'espace étudiée, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

Ces sept étapes couvrent le processus de la télédétection, du début à la fin.

4. Les bases physiques de la télédétection:

a) Le rayonnement électromagnétique (SoudaniK.,2005):

Selon la théorie corpusculaire de la lumière, le rayonnement électromagnétique peut être considéré comme étant un flux de particules élémentaires appelés photons. Selon la théorie ondulatoire, le rayonnement électromagnétique est composé de deux vecteurs champ électrique et magnétique perpendiculaires et se déplaçant à la vitesse de la lumière (300000 km /s dans le vide). Deux propriétés principales caractérisent une onde électromagnétique: sa longueur et sa fréquence.

b) Le spectre électromagnétique:

C'est le résultat de la décomposition du rayonnement électromagnétique en ses fréquences constituantes. Il s'étend des courtes longueurs d'onde (dont font partie les rayons gamma et les rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio).

L'ensemble des fenêtres de toutes les longueurs d'ondes est appelé « spectre électromagnétique ».

c) Les interactions rayonnement /matière:

Lorsqu'un rayonnement électromagnétique atteint un objet, certaines longueurs d'onde sont absorbées tandis que d'autres sont réfléchies par l'objet. Une partie du rayonnement peut éventuellement être transmise à travers l'objet si celui-ci est plus ou moins transparent, avec un changement de direction de la propagation du à la réfraction. La partie du rayonnement qui est absorbée modifie l'énergie interne de l'objet et produit de la chaleur qui sera réémise sous forme d'un rayonnement à une plus grande longueur d'onde (les rayonnements Infrarouge) (Bonn et Rochon, 1992).

Emission :

Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu (0° Kelvin équivaut à – 273°C) émet un rayonnement électromagnétique issu de l'agitation thermique des molécules, dont la longueur d'onde est fonction de la température. Emission et absorption étant liées (loi du rayonnement de Kirchhoff). (Lillesand et Kieffer, 1987).

Réflexion :

La réflexion se définit comme un changement de direction du rayonnement électromagnétique quand celui-ci atteint une surface. En télédétection, le phénomène de réflexion est primordial, car l'identification de la nature des objets par les capteurs satellitaires repose en grande partie sur la manière dont ils renvoient le rayonnement. La direction du rayonnement réfléchi peut varier, elle dépend de la rugosité des surfaces naturelles. On distingue ainsi trois types de réflexion: réflexion spéculaire, réflexion diffuse et réflexion de volume.

Absorption :

Tous les corps naturels absorbent une partie du rayonnement qui leur parvient. La partie du rayonnement absorbé modifie l'énergie interne du corps. Il y a production de chaleur et réémission de l'énergie à une plus grande longueur d'onde.

En télédétection spatiale, la notion d'absorption est fondamentale car le signal parvenant au capteur satellitaire est modifié au cours de la traversée atmosphérique où le rayonnement est fortement absorbé par les constituants gazeux et les particules en suspension.

Il est intéressant de noter que contrairement à ce qui se passe dans l'atmosphère, transparente aux rayonnements visible et proche infrarouge, les surfaces naturelles elles, absorbent une partie de ces rayonnements.

Transmission :

Lorsqu'une partie du rayonnement incident passe à travers un milieu, on dit que le rayonnement est transmis. Le phénomène de transmission concerne les milieux plus ou moins transparents comme l'eau, les nuages ou l'atmosphère, mais pas uniquement. Le feuillage des arbres par exemple se comporte comme un milieu transparent vis-à-vis du rayonnement proche infrarouge.

Cette notion de transmission est très importante en télédétection, puisque les capteurs dédiés à l'observation des surfaces terrestres et océaniques utilisent les bandes spectrales pour lesquelles l'absorption du rayonnement solaire par l'atmosphère est négligeable. Ces bandes spectrales correspondent aux fenêtres atmosphériques.

d) Signatures spectrales des principales surfaces naturelles:

En fonction de la nature et des caractéristiques intrinsèques des objets et des surfaces, le rayonnement incident interagira avec la cible selon l'une ou l'autre de ces propriétés ou de manière générale selon une combinaison de ces propriétés.

Chaque surface possède ainsi une signature spectrale-quantité d'énergie émise ou réfléchie en fonction de la longueur d'onde - qui lui est propre et qui permettra son identification sur les images satellitaires. (Gower et al., 1988).

5. Définition d'image:

Une image est la projection plane d'une scène tridimensionnelle sur un support physique capable de restituer les valeurs de luminances en chacun de ses points (Pun, 1982). Une image numérique correspond à un tableau ou une matrice bidimensionnelle $T(i, j)$ où i et j sont les coordonnées spatiales des pixels. La taille de l'image est définie par le nombre de lignes et de colonnes du tableau. On définit pour pixel (i, j) , la luminance $L(i, j)$, traduite par codage de 8 bit informatique dont les bornes généralement fixées entre 0 et 255.

6. Un pixel

Une image au format numérique (image Raster) est un ensemble de points de couleur, nommés pixels. Chaque pixel est localisable par ses coordonnées dans l'image (la ligne et colonne). C'est la représentation graphique de la valeur de luminance d'un objet.

7. Image mono-spectrale :

C'est une image prise dans un intervalle radiométrique, elle représente la réflectance des objets de la surface de la terre dans cet intervalle, elle est représenté en générale dans la gamme du gris. (Ibouh, 2012), (fig. 7)



Fig.7 : exemple d'image mono spectrale.

8. Image multi-spectrale :

C'est une image qui est formée de plusieurs image Mono-spectrale La visualisation se fait par la superposition de trois image avec une coloration chacun des trois images respectivement en bleu, vert et rouge. L'image qui en résulte est en couleur elle est dite « composé coloré ». (Ibouh, 2012). (Fig. 8).

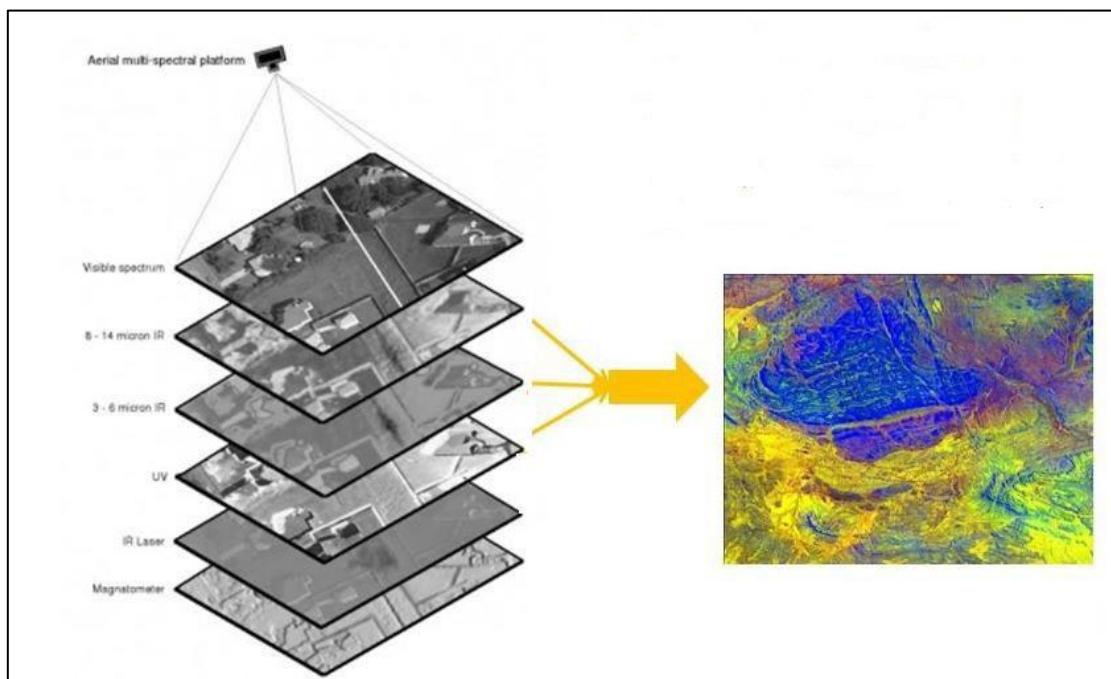


Fig8 : Schéma montrant un ensemble d'image mono-spectrale c'est un composé coloré.

9. Le Satellite :

Dans ce travail nous avons utilisé des images satellitaires TM LandSat. Avant de présenter les traitements appliqués et les résultats de notre étude, on présentera tout d'abord un bref aperçu sur le programme LandSat.

Programme Landsat :

Ce programme américain de télédétection spatiale NASA (agence spatiale américaine) et USGS (Institut des études géologiques américain) a été le premier programme civil d'observation de la Terre par satellite. Il a commencé avec le lancement du premier LANDSAT en 1972 et se poursuit encore. Ce programme a donc permis d'engranger des millions de données formant une librairie exceptionnelle des conditions sur Terre depuis presque 40 ans. Depuis janvier 2009, l'entièreté des images d'archive Landsat est accessible gratuitement via Internet.

Les Capteur de Landsat:

Capteurs RBV: Sur les deux premiers satellites, la série de 3 caméras vidéo prenait des images dans le visible et dans l'infrarouge. La résolution était de 80 m pour des images de 185 km sur 185km. Sur LANDSAT3, la résolution a été portée à 40 m, mais les caméras ne prenaient plus des images que dans une seule bande spectrale panchromatique (0,5- 0,75μm).

Capteurs MSS : Ces scanners mécaniques enregistraient des informations dans quatre bandes spectrales et sur une zone de 185 km sur 185 km. Comme ces instruments ont été développés après les trois caméras RBV, ces bandes ont été numérotées de 4 à 7. Le capteur MSS de LANDSAT3 comportait une bande spectrale supplémentaire dans l'infrarouge thermique.

Capteurs TM: Ces scanners à haute résolution possèdent 7 bandes spectrales et couvrent toujours une zone de 185 km sur 185 km, il s'agit de landSat 4 et 5.

Capteur ETM+ : Ce scanner est une évolution des TM précédents (landsat 7). Il comporte maintenant une large bande panchromatique à haute résolution.

Capteur infrarouge thermique (TIRS) (Landsat 8) : Le capteur infrarouge thermique (TIRS) permettra de mesurer la température de surface de la terre dans deux bandes thermiques avec une nouvelle technologie qui s'applique la physique quantique pour détecter la chaleur.

Capteur OLI (Landsat 8) : Permettra de mesurer dans les parties visibles, proche infrarouge et ondes courtes infrarouges du spectre. Ses images auront de 15 mètres de résolution pour le panchromatique et de 30 mètres de résolution pour les multi-spectrales.

MATERIEL ET METHODE DE TRAVAIL

I. Introduction :

On va essayer de décrire les différents matériels utilisés pour extraire l'information géologique (spécialement les linéaments) de l'image satellitaire LandSat ETM+, de l'image MNT, de la carte géologique et de la carte topographique de la zone d'étude. Dans ce travail on va suivre une succession des étapes, présentée dans l'organigramme des fig. 9 et fig.10.

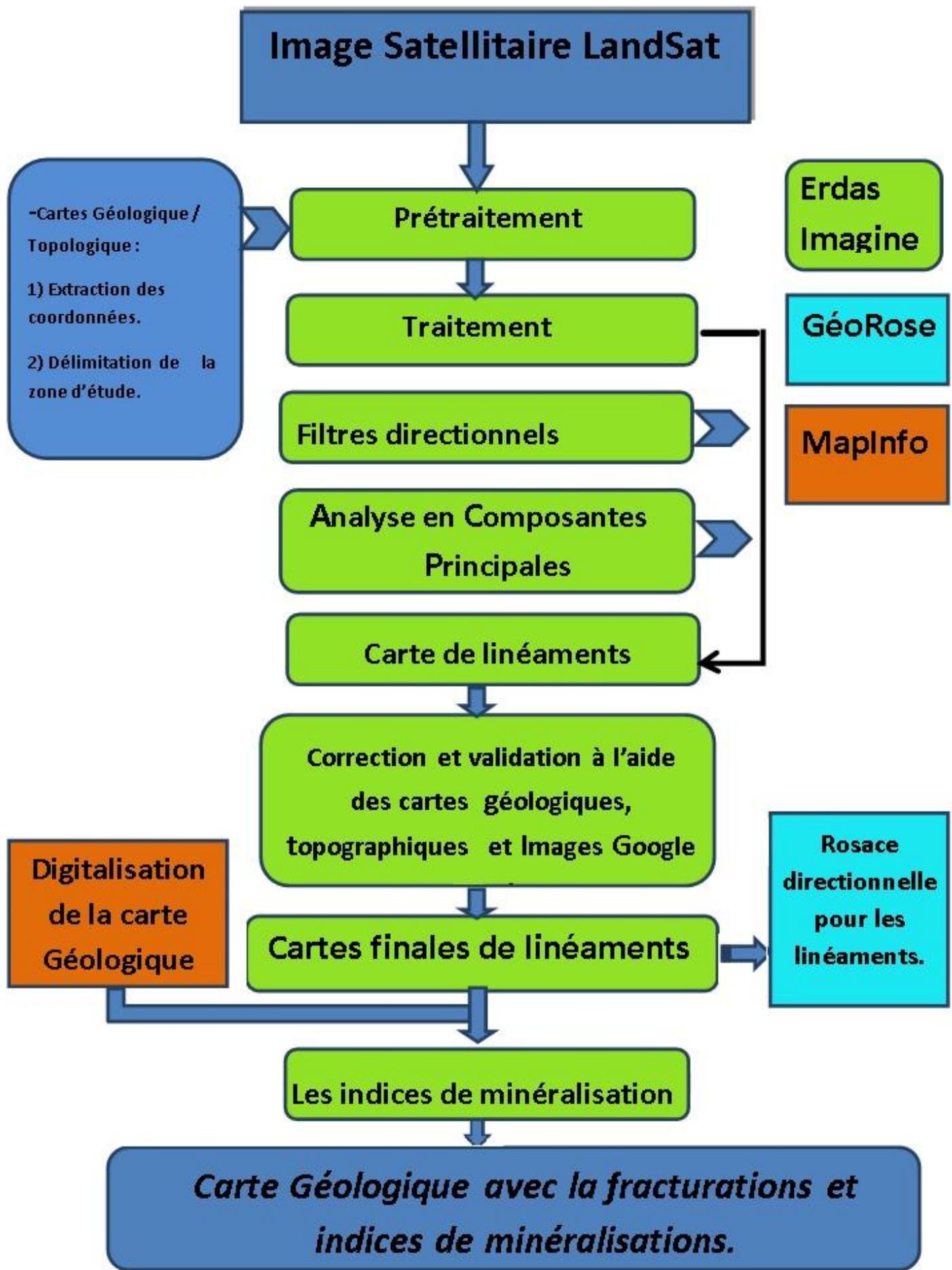


Fig.9 : Organigramme des différentes étapes de travail sur image satellitaire LandSat.

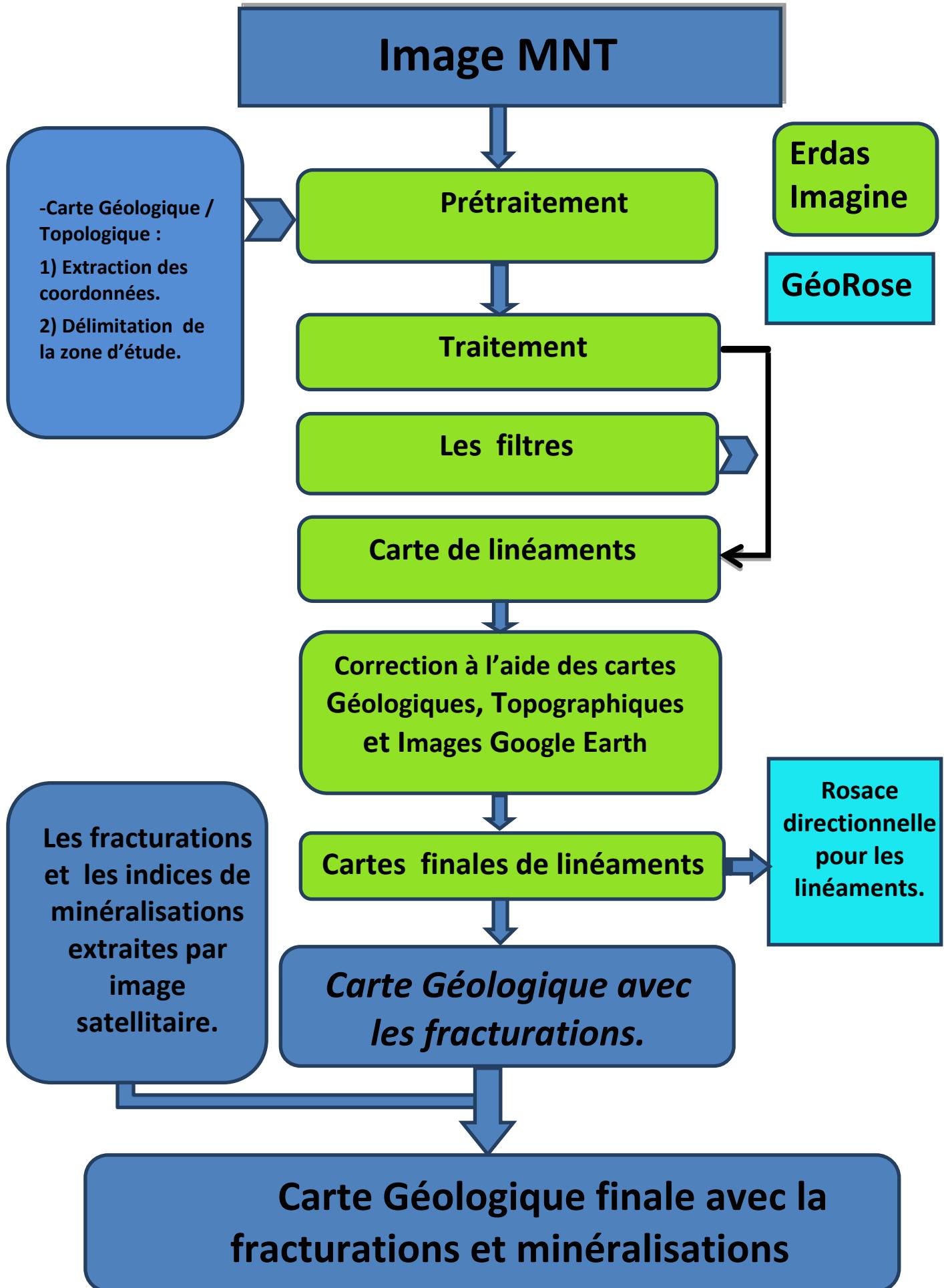


Fig.10 : Organigramme des différentes étapes de travail sur image MNT.

II. Matériel:

Données image:

L'image utilisée dans ce travail et celle capture ETM+, Pour Landsat 7. Cette image (scène L71203038_03820040120) a été téléchargée du site officiel de **Institut des études géologiques américain** (USGS), cette image a été prise le 20 février 2004- à 12:52:58 avec une résolution de 30 mètres. Il couvre une superficie de 185x170 Km. (Fig. 11)

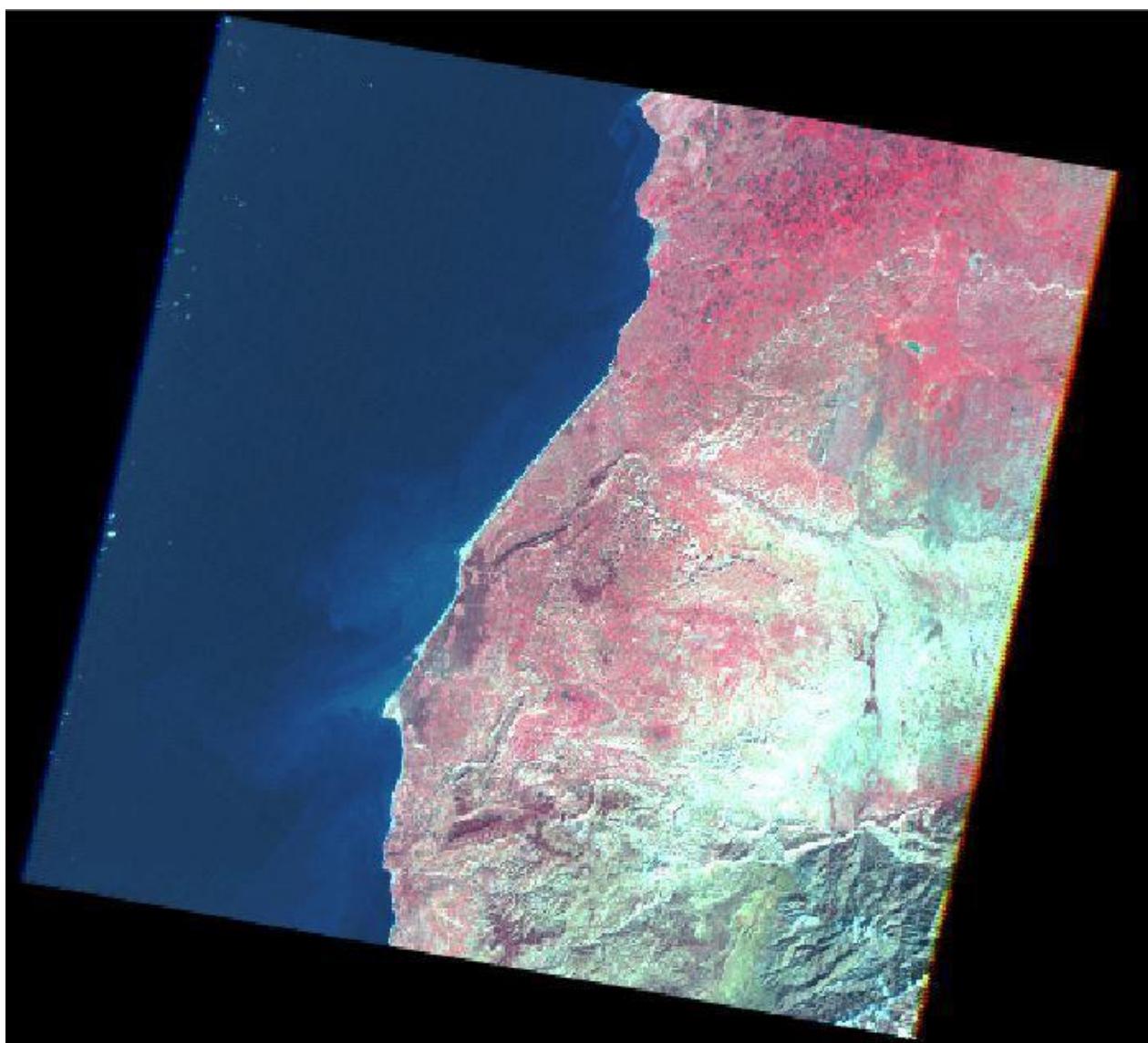


Fig.11 : Scène ETM + Landsat 7 (n°L71203038_03820040120).

III. Méthodologie:

Prétraitement de l'image satellitaire:

Avant de commencer à traiter une Image satellitaire il faut faire une certaine étape pour que l'image soit localisée et délimitée, car l'utilisation d'une image numérique ne devient possible qu'après sa conversion aux normes cartographiques, On commence par :

- Une correction Géométrique (Coordonnées et Projection, à l'aide d'une carte topographie ou géologique).
- Délimitation de la zone d'étude.

1. Correction Géométrique:

La méthode polynomiale est la plus utilisée pour la correction géométrique des images. Elle permet de corriger simultanément toutes les distorsions et fournit ainsi de bons résultats pour la cartographie thématique. Cependant elle est moins fiable pour la cartographie topographique qui exige une correction géométrique bien soigneuse (Bennari et al., 1997).

Dans notre cas on va utiliser la transformation polynomiale de 1^{er} degré, les coordonnées des points de contrôles ont été localisées à l'aide de la carte topographique de la zone d'étude. (Fig. 12)

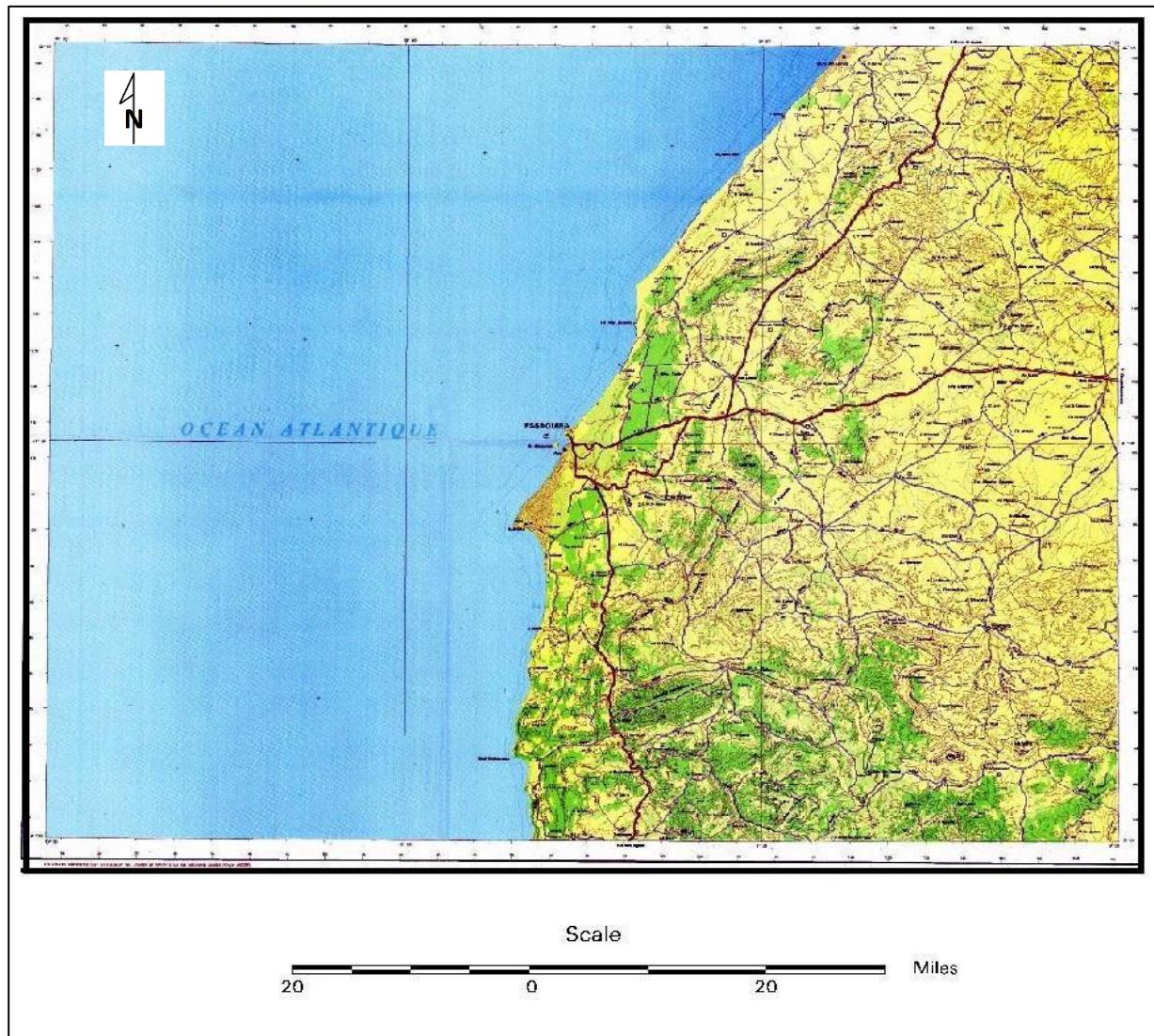


Fig.12 : Carte topographique de la zone d'étude.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

I. Introduction:

Le traitement des images satellitaires se fait grâce au logiciel «Erdas Imagine », qui permet d'extraire l'information Géologique avec des différents filtres. Ces filtres fonctionnent suivant des équations logarithmiques (chaque filtre calcule ces équations et mis la valeur du résultat dans le centre de filtre (le pixel au centre) (fig. 13)) pour mettre en évidence les linéaments enregistrés lors de la prise de l'image satellitaire avec des différents capteurs. Dans notre étude on a travaillé avec des filtres de types:

- 3x3 Horizontal Edge Detection.
- 3x3 Vertical Edge Detection.
- 3x3 Left Diagonal Edge Detection.
- 3x3 Right Diagonal Edge Detection.
- 5x5 Edge Detection.
- 5x5 Horizontal.
- 5x5 Vertical.
- 7x7 Horizontal.
- 7x7 Vertical.

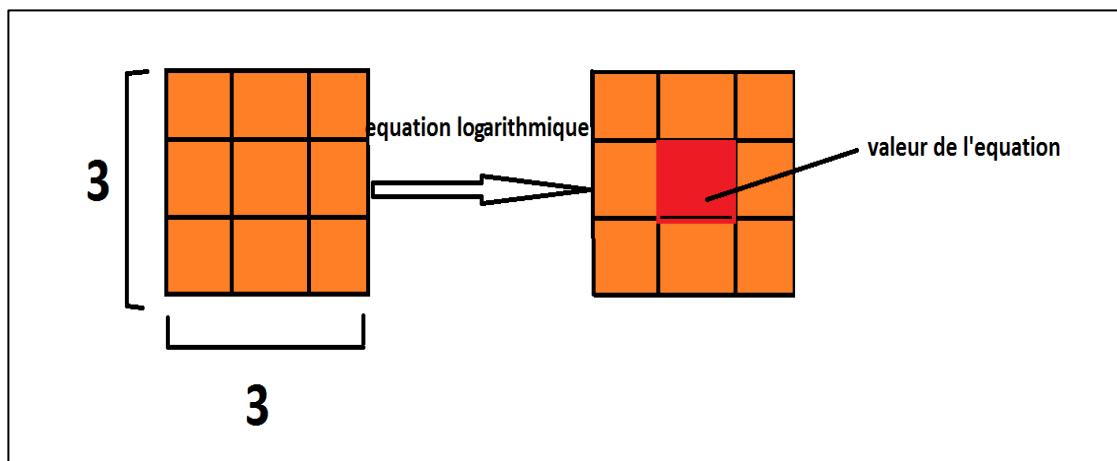


Fig.13 : Méthode de travail des filtres pour Erdas Imagine, exemple filtre 3x3.

1. Résultats :

L'application des filtres et des traitements cités ci-dessus, sur l'image satellitaire correspondante au bassin d'Essaouira a permis de mettre en évidence un réseau de fracture enregistré dans les affleurements géologique de la zone. Les différentes fractures ressortis à partir des filtres de taille (3X3, 5X5 et 7X7) sont présentés par les figures 14, 15 et 16.

2. Les Filtre 3x3, 5x5, 7x7:

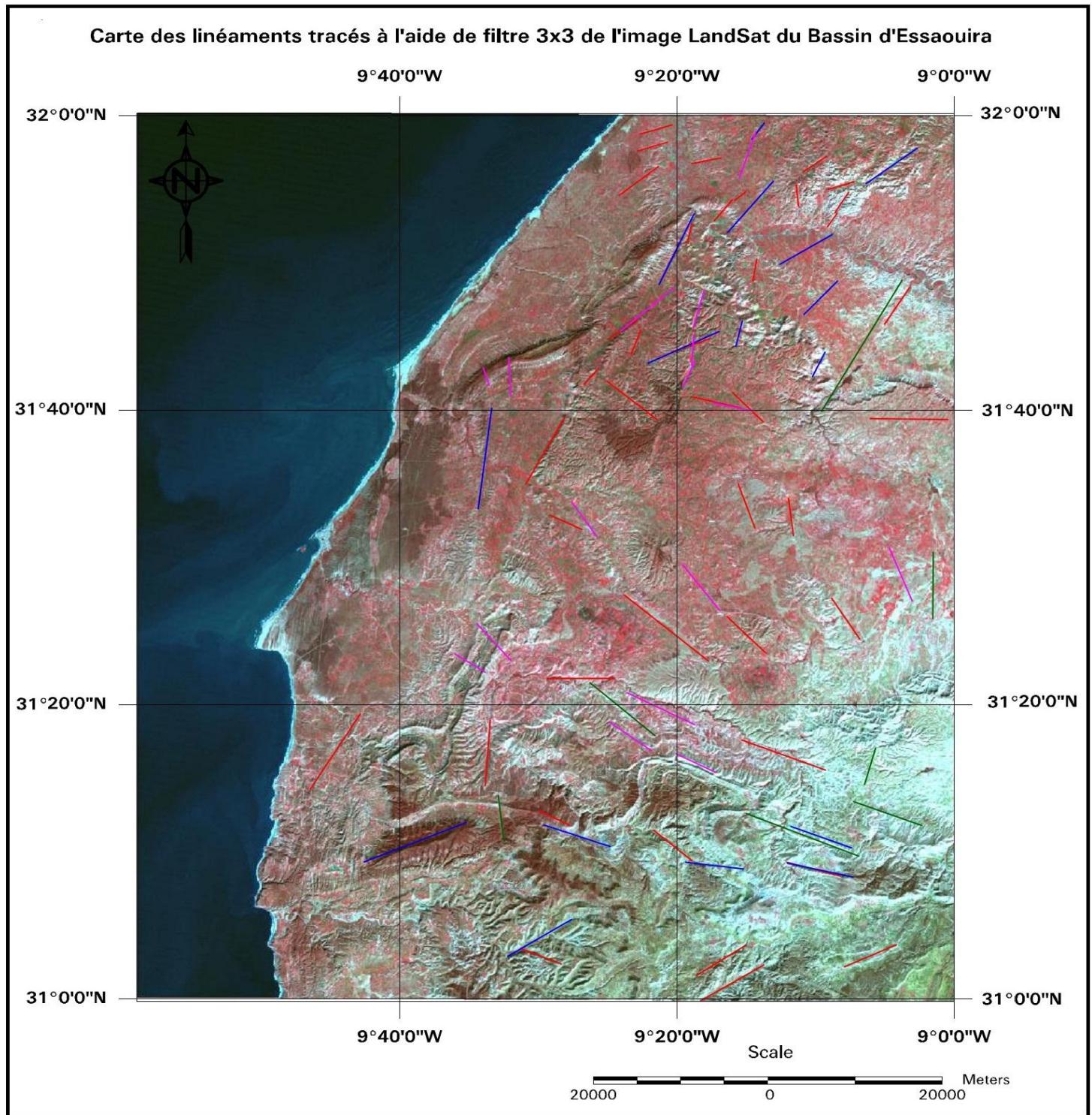


Fig.14: Carte de linéaments du filtre 3x3 Projétés sur l'image satellite de la zone d'étude.

(Trait rouge: 3x3 Horizontal Edge Detection/Trait vert sombre: 3x3 Left Diagonal Edge Détection/Trait bleu: 3x3 Right Diagonal Edge Detection/Trait rose: 3x3 Vertical Edge Detection).

Carte des linéaments tracés à l'aide de filtre 5x5 de l'image LandSat du Bassin d'Essaouira

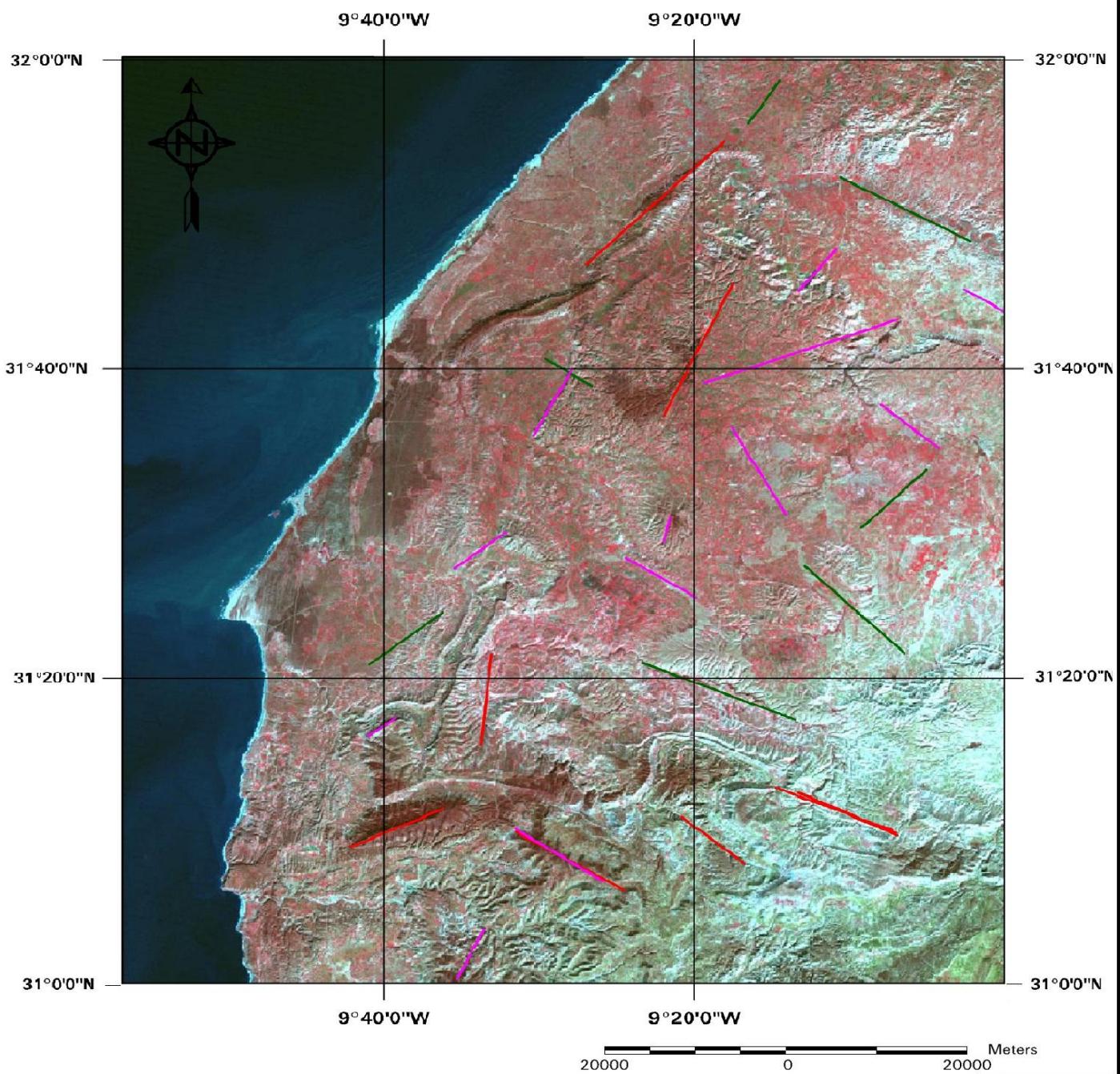


Fig.15:Carte de linéaments du filtre 5x5 Projétés sur l'image satellite de la zone d'étude. (Trait rouge: 5x5 Edge Detection/ Trait vert sombre: 5x5 Horizontal/ Trait rose: 5x5 Vertical.).

Carte des linéaments tracés à l'aide de filtre 7x7 de l'image LandSat du bassin d'Essaouira

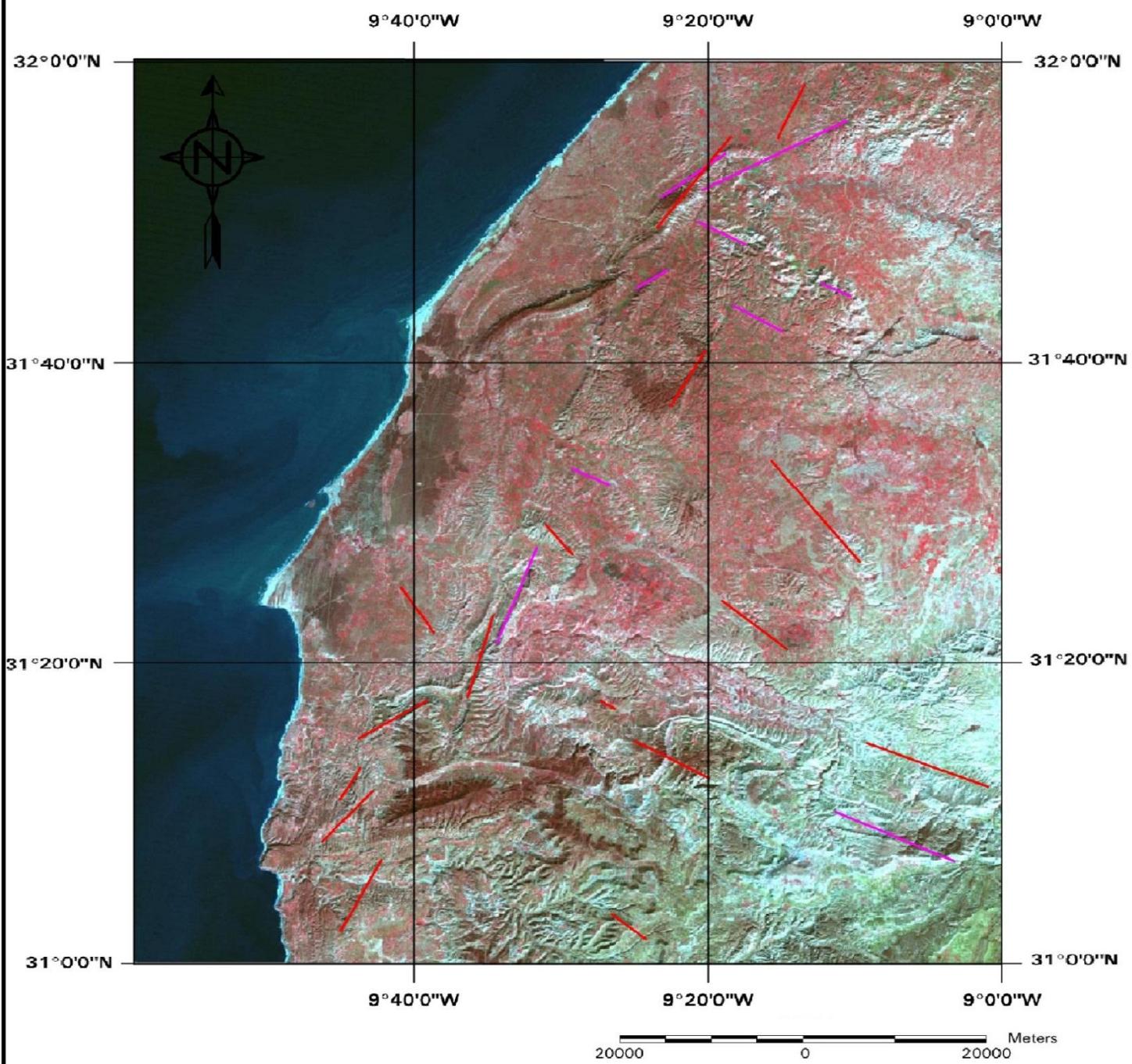


Fig.16:Carte de linéaments du filtre 7x7 Projétés sur l'image satellite de la zone d'étude.(Trait rouge: 7x7 Vertical / Trait rose: 5x5 Horizontal).

*Correction avec Carte topographique:

La correction des linéaments à l'aide d'une carte topographique est obligatoire. Dans notre étude cette correction est faite par la superposition de la carte des linéaments et la carte topographique. Cette opération a permis de bien valider notre carte de linéaments, est donc s'assuré que ces linéaments ne correspondent pas à des lignes de route ou autres structures linéaires loin de la fracturation géologique. (Fig. 17 ,18) La superposition a permis aussi d'éliminer tous linéaments ne correspondant pas à la fracturation des formations géologique.

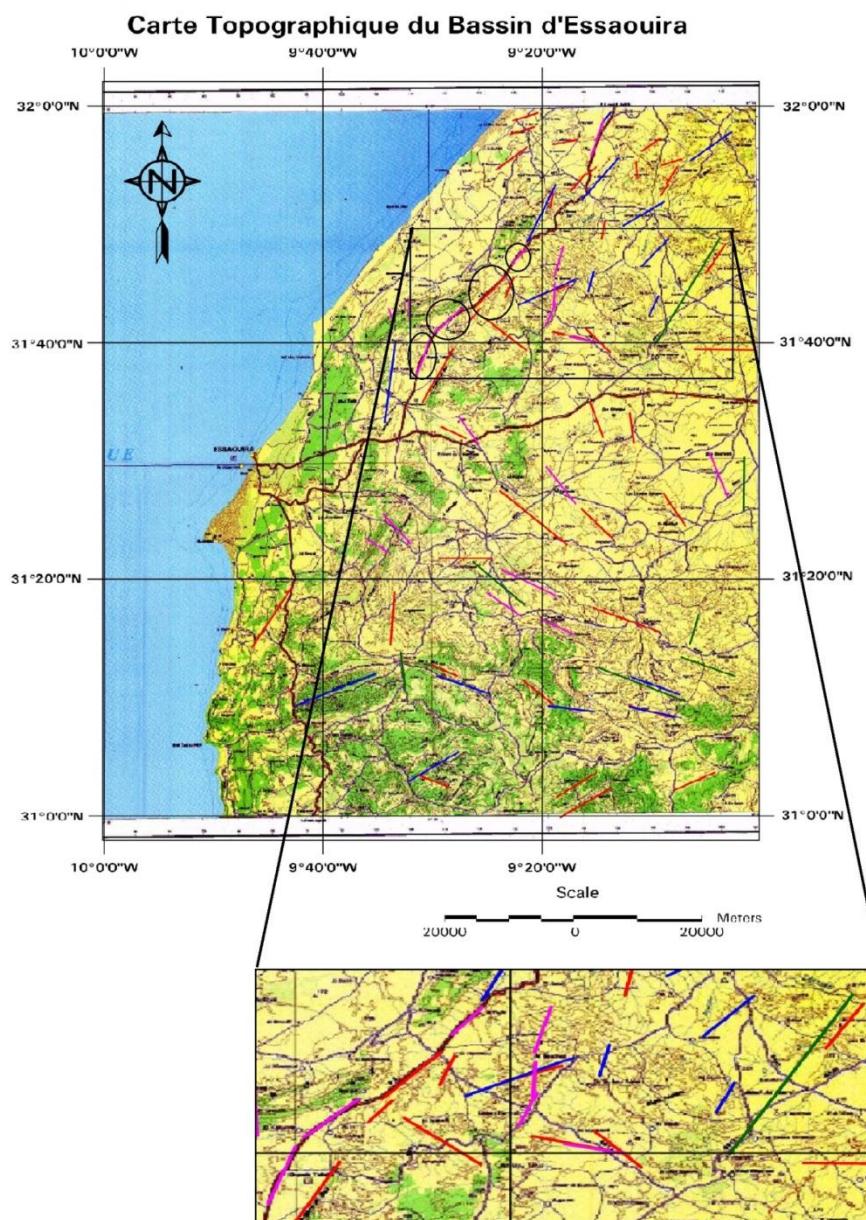


Fig.18: Exemple de linéaments à corriger à l'aide de carte topographique.

*Correction avec image Google Earth :

Après élimination des linéaments qui ne correspondent pas à la fracturation géologique, il est indispensable de prouver que les linéaments conservés sur la carte finale correspondent à des fractures réelles sur le terrain. Dans ce cas on doit faire une mission de terrain, mais à défaut de moyen et de temps on peut aussi utiliser les images de Google Earth qui ont une résolution importante.

Ces images permettent de mettre en évidence un ou deux des fractures cartographiées par télédétection. (Fig.19, 20).

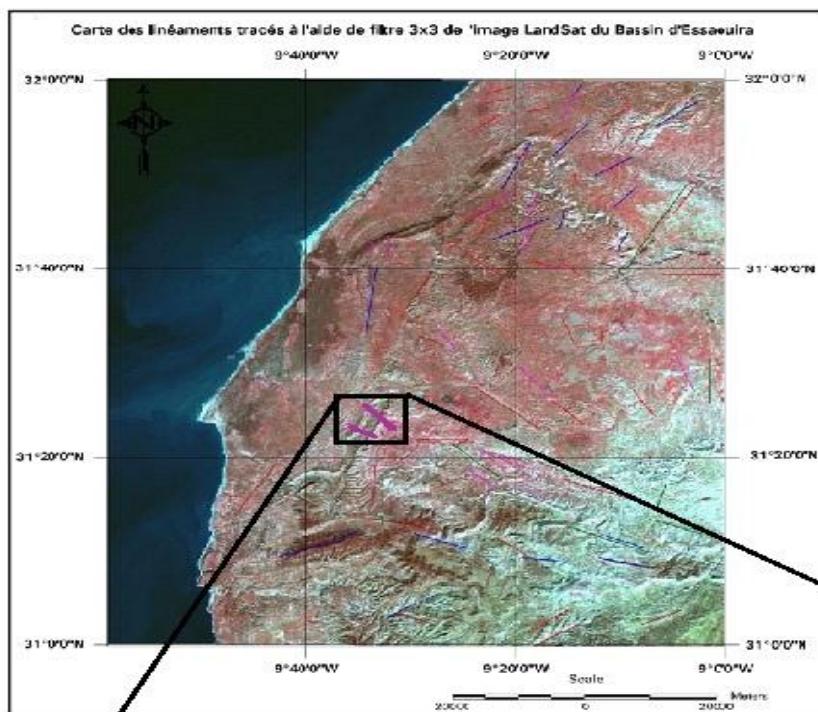


Fig.19 : image satellite de la zone d'étude avec les linéaments du filtre 3x3.



Fig.20: Exemple de linéament trouvé avec filtre 3x3, et aussi avec Google Image.

3. Extraction de linéaments:

a) Filtre directionnelle 3x3 (Right, Left, Horizontal, Vertical):

Après correction et validation des cartes de linéament extraite par images satellite, des mesures de direction et de longueur des fractures montrent sont présentés dans le tableau suivant:

Horizontal			Left		Right		Horizontal	
LINE	longueur(m)	azimuth	longueur(m)	azimuth	longueur(m)	azimuth	longueur(m)	azimuth
1.	3881.27	75.4622	19225.83	32.8818	2598.54	90.0000	6342.55	25.2961
2.	4199.06	73.3419	8380.48	0.6649	10066.71	26.7692	3590.11	157.6854
3.	5834.99	55.5702	10595.75	127.4292	8379.39	42.2647	5896.61	176.1375
4.	3975.13	79.1873	5723.17	171.2313	7227.65	56.4365	6739.70	25.5215
5.	2408.42	13.9046	13763.88	109.3931	7173.22	62.4531	5645.33	50.5509
6.	3745.82	44.3916	8339.79	110.3432	9043.70	68.2502	6519.84	47.0104
7.	2890.64	17.3967	4791.57	17.4995	3553.81	12.5606	4176.45	48.0872
8.	1799.45	51.8523			5827.42	48.6738	4110.05	27.9453
9.	2885.38	176.1375			3522.68	27.1055	5050.81	20.3720
10.	2212.36	38.5102			12744.87	7.8736	3119.93	123.9852
11.	2781.76	74.3303			12666.25	69.9241	5147.97	137.6518
12.	3087.23	32.8968			8475.83	42.2029	5225.42	101.8297
13.	3567.94	58.3864			8997.55	60.3812	5214.21	121.400
14.	5605.38	35.3336			6879.86	96.2473	6284.38	133.0319
15.	4812.28	73.6284			7853.44	101.0420	7885.98	140.128
16.	3486.98	20.8624					6620.99	157.5213
17.	2886.45	48.0872					9808.81	98.8166
18.	9730.67	32.4801					6566.21	122.4989
19.	4194.97	113.6943					5755.88	90.0000
20.	7652.10	124.4386						
21.	6424.65	102.8115						
22.	4868.93	131.2105						
23.	9024.29	89.0564						
24.	6286.98	157.7277						
25.	4872.08	168.5497						
26.	12825.58	126.3729						
27.	6561.64	131.3907						
28.	6363.90	142.5107						
29.	7556.74	90.5652						
30.	10333.59	109.3547						
31.	10885.88	35.9482						
32.	8319.39	185.3594						
33.	4317.70	111.8546						
34.	6146.01	127.4912						
35.	6849.59	104.0351						
36.	6618.07	66.7390						
37.	6913.88	60.2125						
38.	8391.15	60.4739						
39.	5354.97	108.2184						

Tableau 1: Résultats de mesure des linéaments trouvés avec filtre 3x3 (azimuth, longueur(m)).

Le traitement statistique des directions des fractures mesurées sur la carte synthétiques issues des filtres détaillent 3x3 montrent une direction majeure de WNW-ESE. Deux autres directions mineures se voient sur la rosace directionnelles, il s'agit de la direction NW-SE et NNE-SSW .Fig. 21.

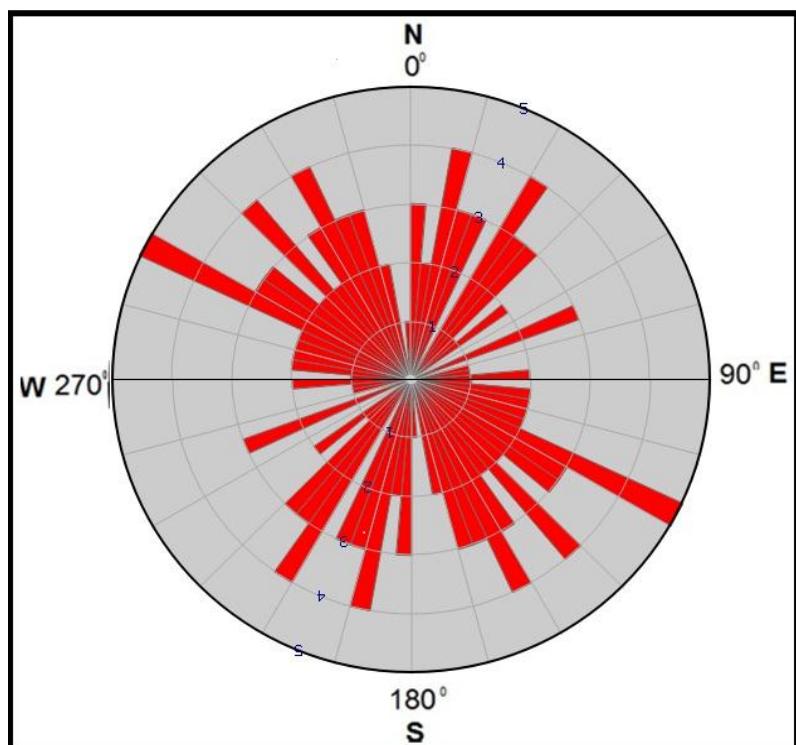


Fig.21: Rosace pour les linéaments trouvés avec filtre 3x3.

b) Filtre directionnelle 5x5 (Edge detection, Horizontal, Vertical):

Après correction et validation des cartes de linéament extraite par images satellite des mesures de direction et de longueur des fractures montrent les résultats présentés dans le tableau suivant :

	5x5 Horizontal		5x5 Edge detection		5x5 Vertical	
Ligne	Longueur(m)	Azimuth	Longueur(m)	Azimuth	Longueur(m)	Azimuth
1	17098.57	110.8331	18046.67	26.7072	6763.79	53.2020
2	15621.60	116.2759	10439.47	67.0064	3922.91	63.7241
3	5824.10	90.0000	10914.92	5.2174	8498.45	119.0604
4	5934.07	37.0871	13781.95	119.0054	11553.06	121.8070
5	10238.95	55.4891	9232.16	90.0000	7434.86	34.2466
6	14266.70	130.9325			3982.71	11.4503
7	10101.87	46.6945			12942.80	147.9273
8					22049.02	73.3419
9					8354.54	90.0000
10					6433.55	43.6776
11					5099.02	119.8772

Tableau 2 : Résultats de mesure des linéaments trouvés avec filtre 5x5 (azimuth, longueur(m)).

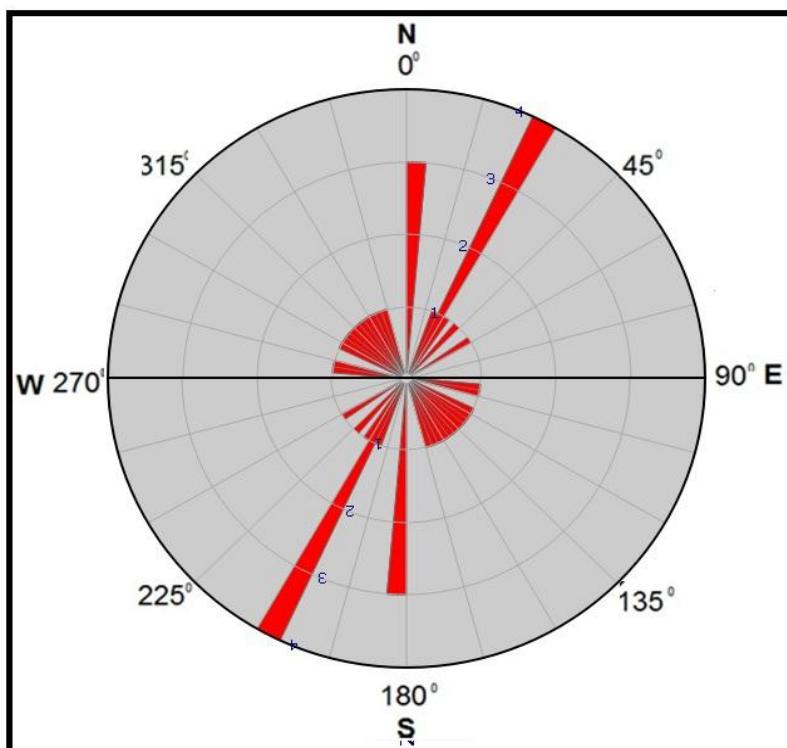


Fig.22: Rosace pour les linéaments trouvés avec filtre 5x5.

Le traitement statique des linéaments montre une direction majeure d'orientation NNE-SSW et une direction mineure N-S.

c) Filtre directionnelle 7x7 (Horizontal, Vertical) :

Après correction et validation des cartes de linéament extraite par images satellite des mesures de direction et de longueur des fractures montrent les résultats présentés dans le tableau suivant:

Ligne	7x7Vertical		7x7Horizontal	
	Longueur(m)	Azimuth	Longueur(m)	Azimuth
1	7264.99	28.4557	13917.98	21.3760
2	15645.74	137.3774	14586.88	112.7669
3	9507.29	123.9499	4560.49	124.3692
4	13893.98	110.3563	6241.17	118.8184
5	8746.96	113.2344	4658.38	111.5524
6	2868.95	119.9876	4762.78	62.3621
7	4346.17	145.4087	9962.35	55.6671
8	10869.80	16.8099	6667.48	116.6396
9	7157.75	140.9858	17756.53	63.7468
10	8996.74	63.9944		
11	5309.39	125.3991		
12	5213.06	30.9577		
13	8641.22	46.4551		
14	11378.47	30.3842		

Tableau3: Résultats de mesure des linéaments trouvés avec filtre 7x7 (azimuth, longueur (m)).

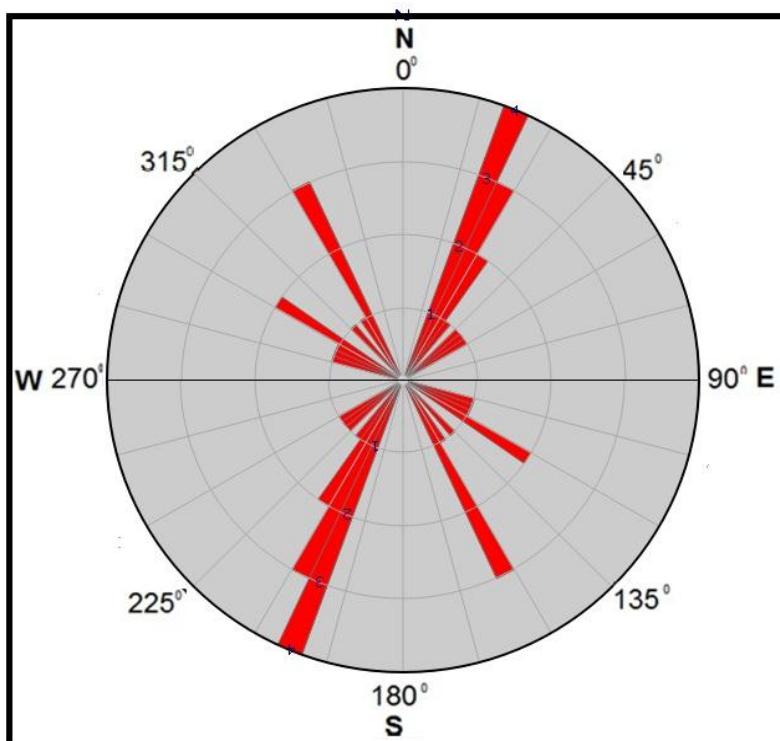


Fig.23: Rosace pour les linéaments trouvés avec filtre 7x7.

Le traitement statistique montre une direction majeure NNE-SSW et une direction mineure NNW-SSE.

d) Mesure de linéaments (failles) dans la carte géologique et la rosace directionnelle:

Une fois la carte de synthèse de la fracturation est établie par image satellite, une comparaison avec la carte géologique s'impose afin de voir l'apport de la télédétection dans ce domaine de cartographie des linéaments. Les directions et la longueur du réseau de La fracturation extraite de la carte géologique de la région d'Essaouira (1/50 000, feuille de Marrakech) se montre dans le tableau (tableau 4) Le traitement statistique sur une rosace directionnelle montre une direction majeure NNW-SSE et une direction mineure NNE-SSW.

Ligne	Longeur(m)	Azimuth
1	9430.87	128.1654
2	6851.42	28.3250
3	4724.06	32.9340
4	4049.34	12.0835
5	9689.38	173.7852
6	10561.91	167.6882
7	17680.82	169.2798
8	5175.52	68.4888
9	5059.85	35.1854
10	3846.93	26.4373
11	5553.45	73.7750
12	2723.49	153.6712
13	4247.75	157.5681
14	5223.94	161.0593
15	5321.82	150.7648
16	6321.33	17.2161
17	7139.56	98.0319
18	5209.06	90.0000
19	5737.89	41.0540
20	6859.63	115.1926
21	7994.81	47.0423
22	6787.85	113.9646

Tableau 4: Résultats de mesure des linéaments de la carte géologique (azimuth, longueur(m)).

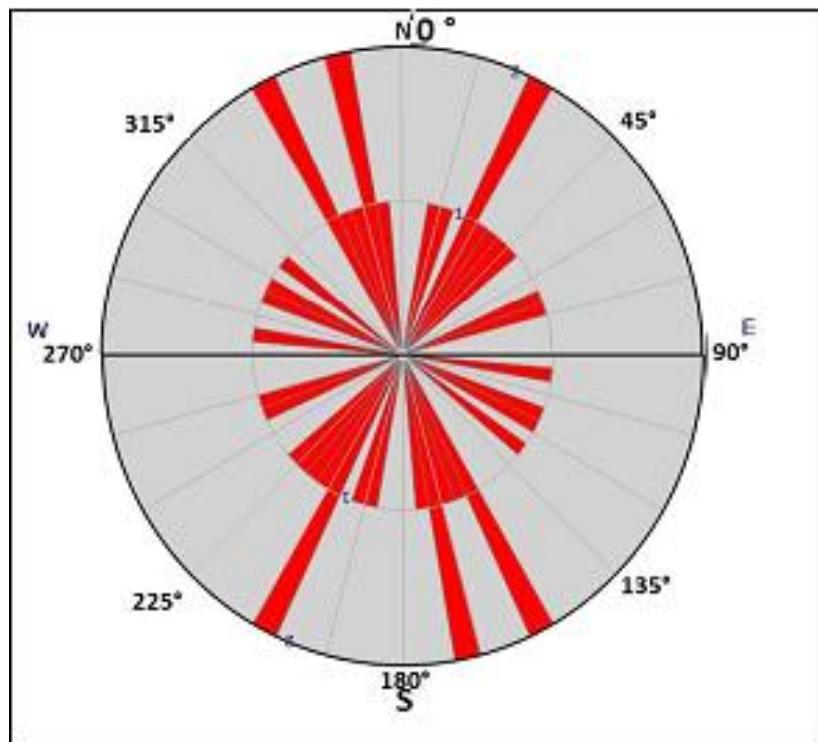


Fig.24: La rosace des linéaments de carte géologique.

e) Résultats et Interprétation :

Le traitement de l'image satellite avec les différents filtres de programme « Erdas Imagine » a permis de ressortir 126 linéaments, regroupés dans la carte du fig. 25.

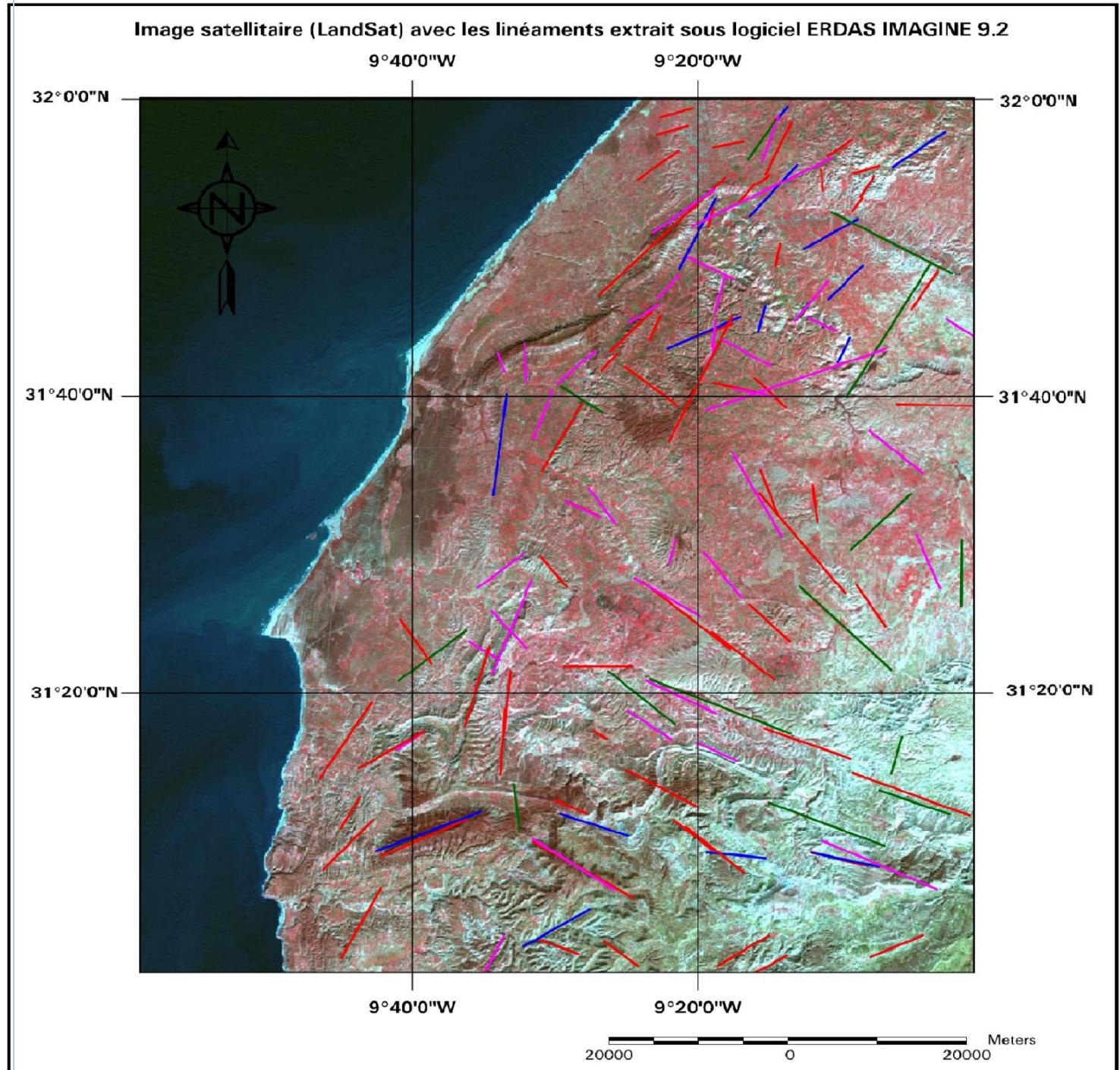
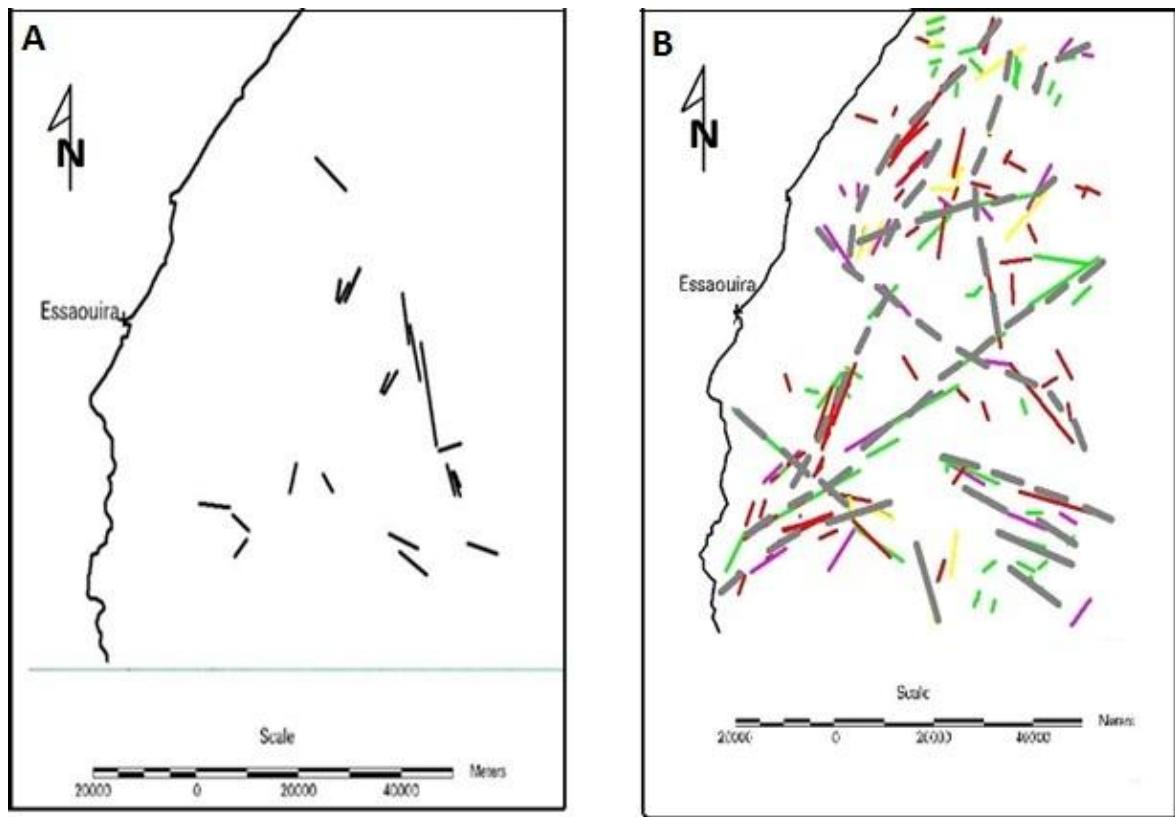


Fig.25: Les linéaments extraits projetés sur l'image satellite.



— linéaments interprétés.

Fig.26: Comparaison entre carte de linéaments extraits par les filtres (B) et les fractures présents dans la carte géologique (A).

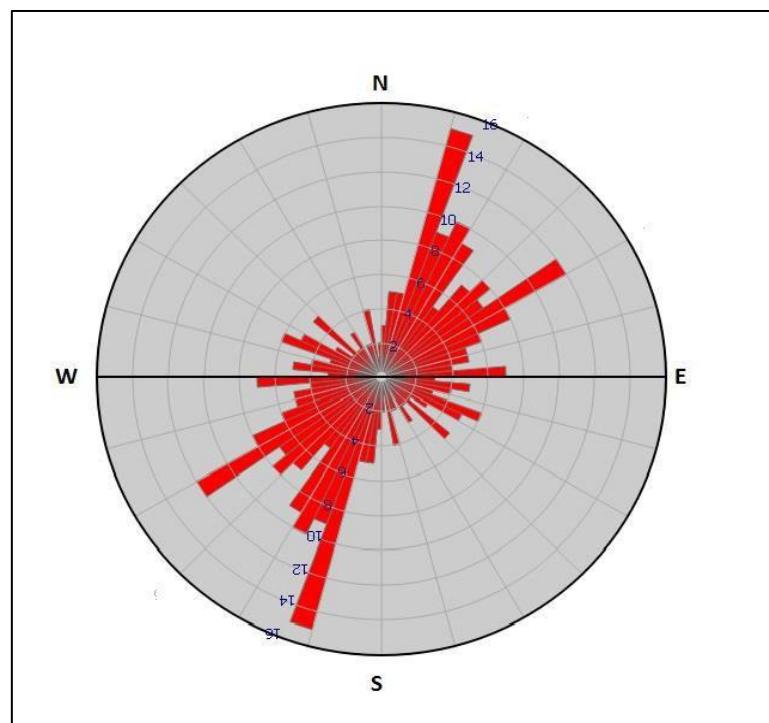


Fig.27 : Rosace Majeur des linéaments extraits par les filtres.

Conclusion :

L'analyse de la rosace directionnelle de tous les linéaments extraits par les méthodes de la télédétection (filtre directionnels), montre trois familles Principales de linéaments ;

- La 1^{ère} d'orientation N15 à N20.
- La 2^{ème} d'orientation N55 à N60.

Cette étude permet de mettre en évidence les grandes lignes structurales du bassin d'Essaouira telles que les rides diapiriques, et les grandes lignes de faille mise en évidence par Souid (1983) :

- La 1^{ère} d'orientation N25 à N30.
- La 2^{ème} d'orientation N150 à N155.
- La 3^{ème} d'orientation N165 à N170.

La comparaison de la carte de fractures extrait par image satellitaire et celles de la carte géologique, montre une grande différence entre les deux, on note une abondance des fractures extraites de l'image satellite par rapport à celles de la carte géologique.

4. La cartographie lithologiques affleurements géologiques :

Pour avoir une idée sur les différents faciès et leur distribution spatiale dans le bassin d'Essaouira, nous avons utilisé le traitement statistique de l'ACP « Analyse en Composante Principale », sur l'image satellite afin de réduire l'information et la concentrée dans un seul composé coloré. L'ACP qui permet de distinguer les différents affleurements géologique. Avec l'aide de plusieurs images mono-spectral dans différent bandes, chaque lithologie géologique à une signature spectrale qui permet de la distinguer d'une autre. (Fig. 28).

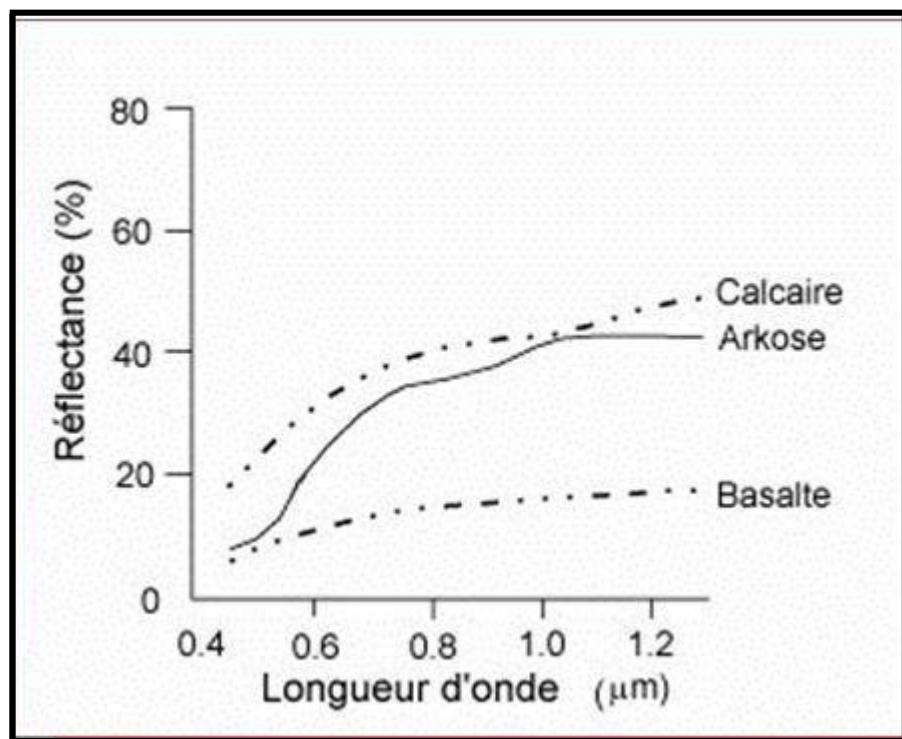


Fig.28: Exemple de réflectance (signature spectrale) pour différentes lithologies (in Ibouh, 2012).

Pour identifier les affleurements géologiques on a fait intervenir la carte géologique du bassin Essaouira.(Fig.29)

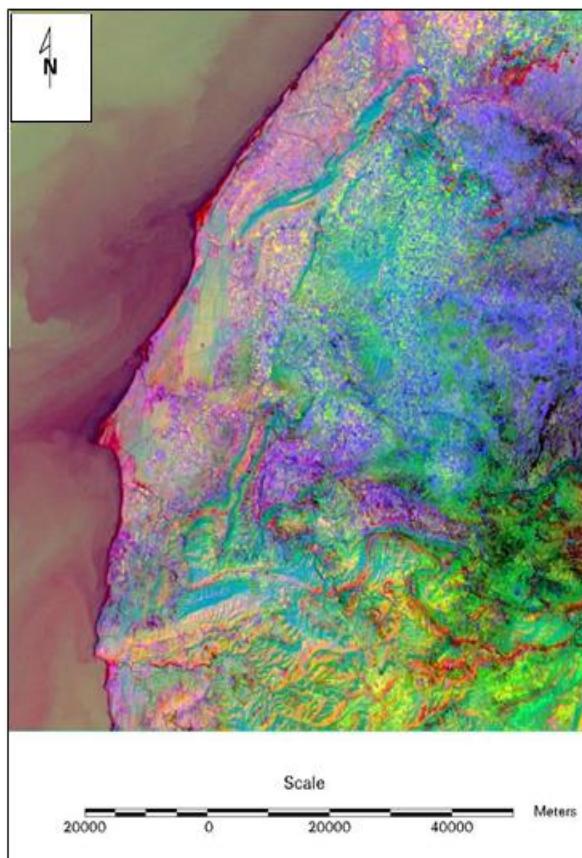


Fig.30: Carte du bassin Essaouira en utilisant l'analyse avec la composante principale.

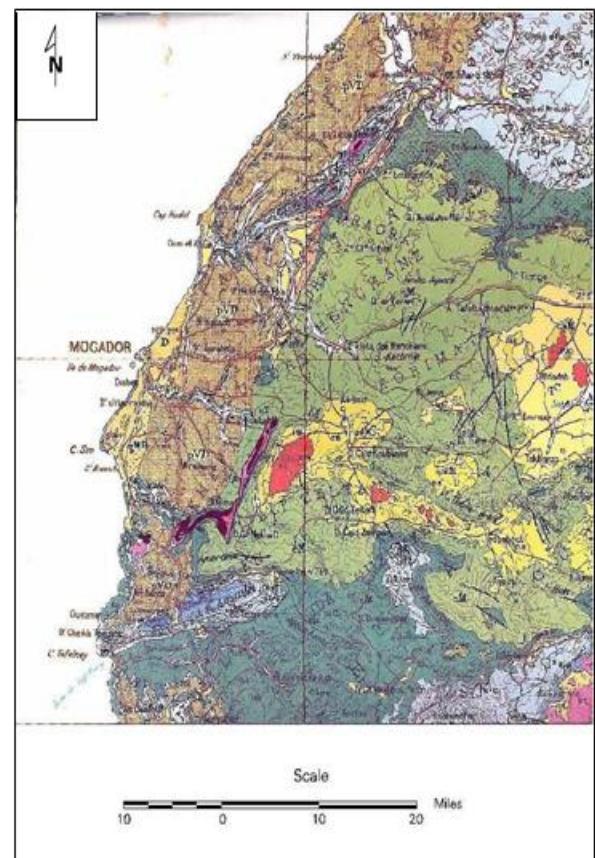
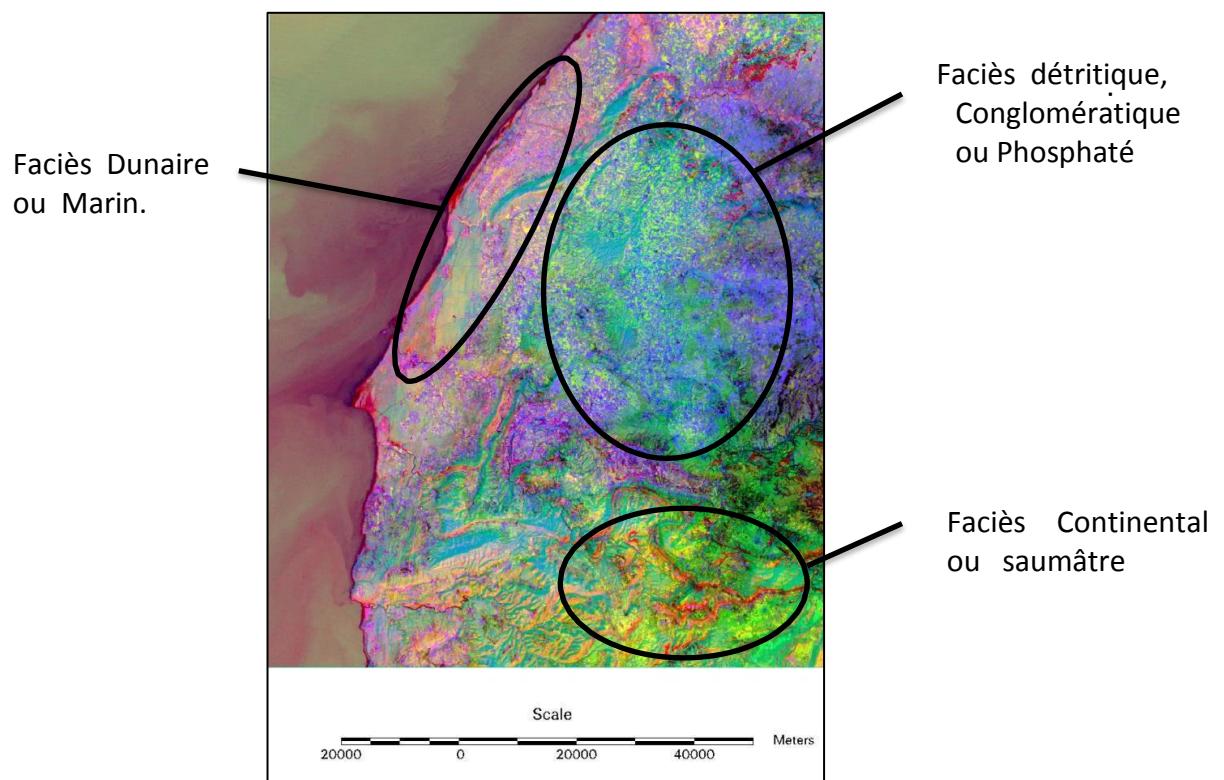


Fig.29: carte géologique du bassin Essaouira.

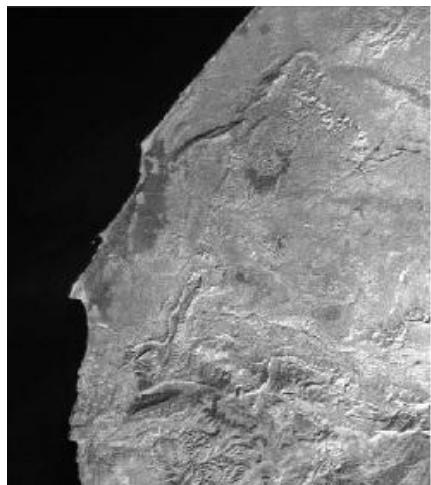


Ce traitement consiste à obtenir une image en fausse couleurs à partir de trois première ACP, qui vont donner un composé coloré ACP avec le maximum d'Information. Les trois ACP qui vont fournir le composé coloré sont ACP1, ACP2 et ACP3, car c'est elles qui contiennent le maximum d'information.

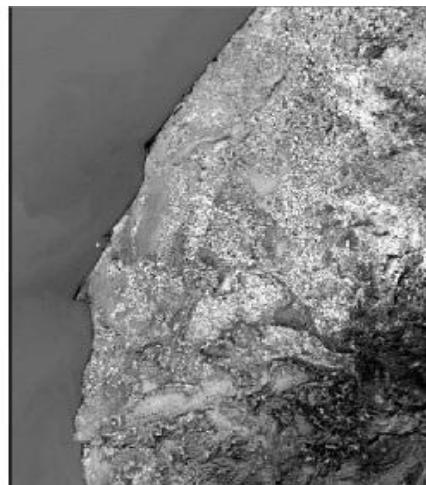
Le tableau 5 montre qu'en passant de ACP1 vers ACP7, l'image monospectrale devient de plus en plus floue, c'est l'information qui devient de plus en plus faible (Fig. 31).

N° de l'ACP	Taux de L'information	Pourcentage %
ACP1	3130.25	90.50
ACP2	255.030	7.37
ACP3	53.54	1.53
ACP4	16.81	0.42
ACP5	4.31	0.1
ACP6	1.88	0.05
ACP7	1.06	0.03

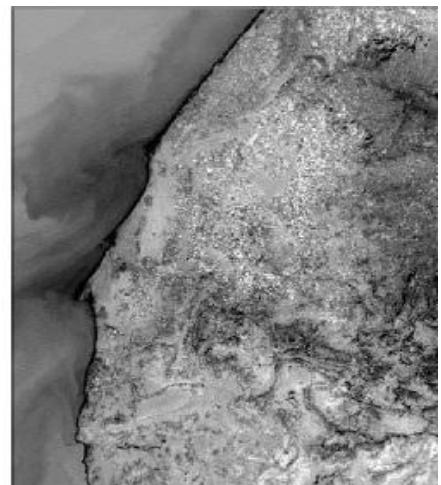
Tableau 5 : Le pourcentage de l'information dans chaque composante colorée.



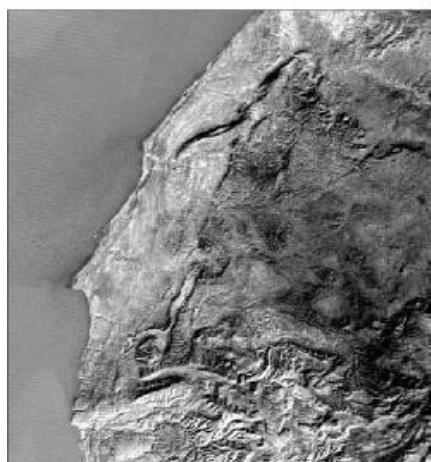
ACP1



ACP2



ACP3



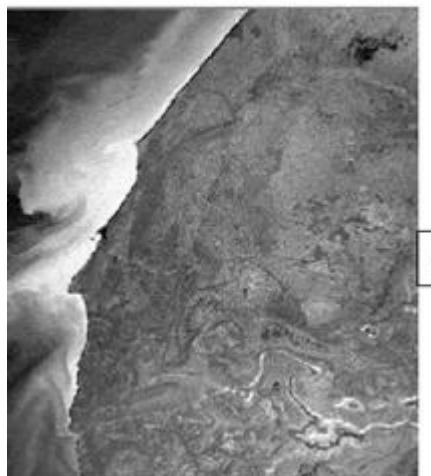
ACP4



ACP5



ACP6



ACP7

Fig.31 : Les sept Composantes Principales extraites de l'image satellite de la zone d'étude.

Pour La carte géologique, les composés colorés permettent aussi de donner une information complémentaire. Une image de multispectrale de 7 bandes peut nous fournir un grand nombre de composé coloré, c'est un arrangement de 3 bandes parmi les sept.

Le nombre de composé coloré possible est $7! / (7-3)! = 210$.

Pour gagner du temps, le degré de corrélation entre les sept bandes permettra de résoudre ce problème et nous donner directement quelles sont les bandes qui donneront un composé coloré avec le maximum d'information (tableau 6). Ainsi plus la corrélation est faible, l'image donne plus d'information, on cas de l'inverse l'image ne donne pas beaucoup d'information, car les bandes utilisées ont la même information à fournir.

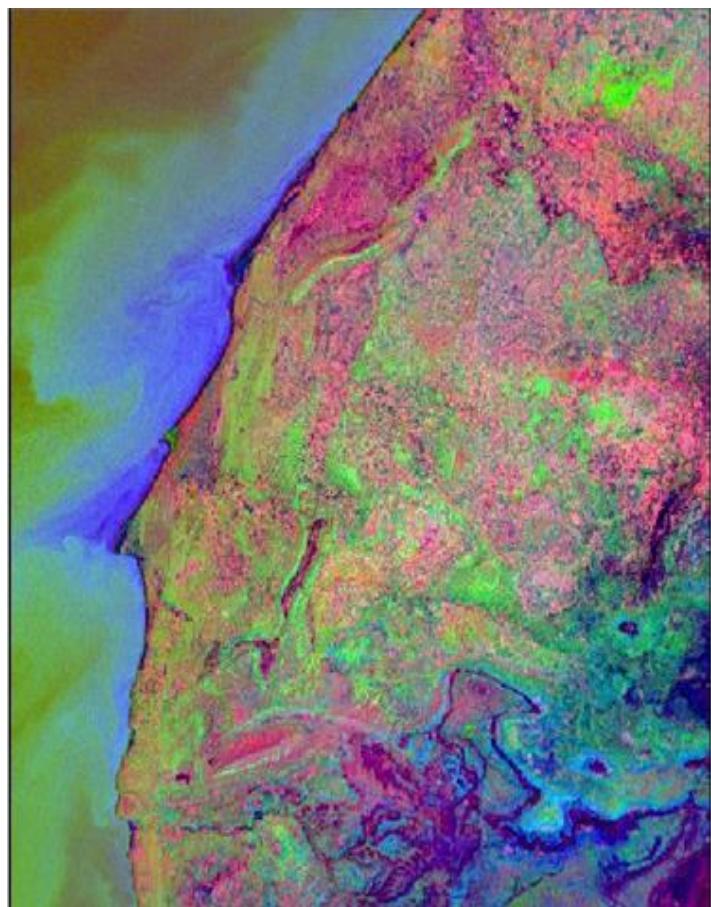
N° d'ACP	1	2	3	4	5	6	7
ACP1	1	0.89	0.79	0.42	0.58	0.23	0.61
ACP2	0.89	0.99	0.96	0.72	0.85	0.15	0.86
ACP3	0.79	0.96	1	0.77	0.92	0.14	0.94
ACP4	0.42	0.72	0.77	1	0.90	0.02	0.82
ACP5	0.58	0.85	0.92	0.90	0.99	0.12	0.98
ACP6	0.23	0.15	0.14	0.02	0.12	1	0.15
ACP7	0.61	0.86	0.94	0.82	0.98	0.15	1

Tableau 6 : Matrice de corrélation des sept ACP.

Selon le tableau 6, un composé coloré formé des ACP 4, 5 et 6 sera efficace pour la cartographie des faciès.



*Fig. 32 : Le composé coloré
Image, formé des ACP 4, 5,6.*



*Fig. 33 : Le composé coloré ACP
4, 5,6.*

PROSPECTION MINIERE

L'utilisation des images satellite Landsat ETM+ pour la prospection minière via le calcul des indices de minéraux d'altération de bassin d'Essaouira est une étape qui peut intervenir dans la phase de recherche ressource minières. Cependant cette technique est restrictive du fait de la résolution spatiale et spectrale du capteur qui ne permet pas d'obtenir une interprétation des superficies d'une manière homogène ou à l'échelle du minérale.

I. Indice des minéraux argileux :

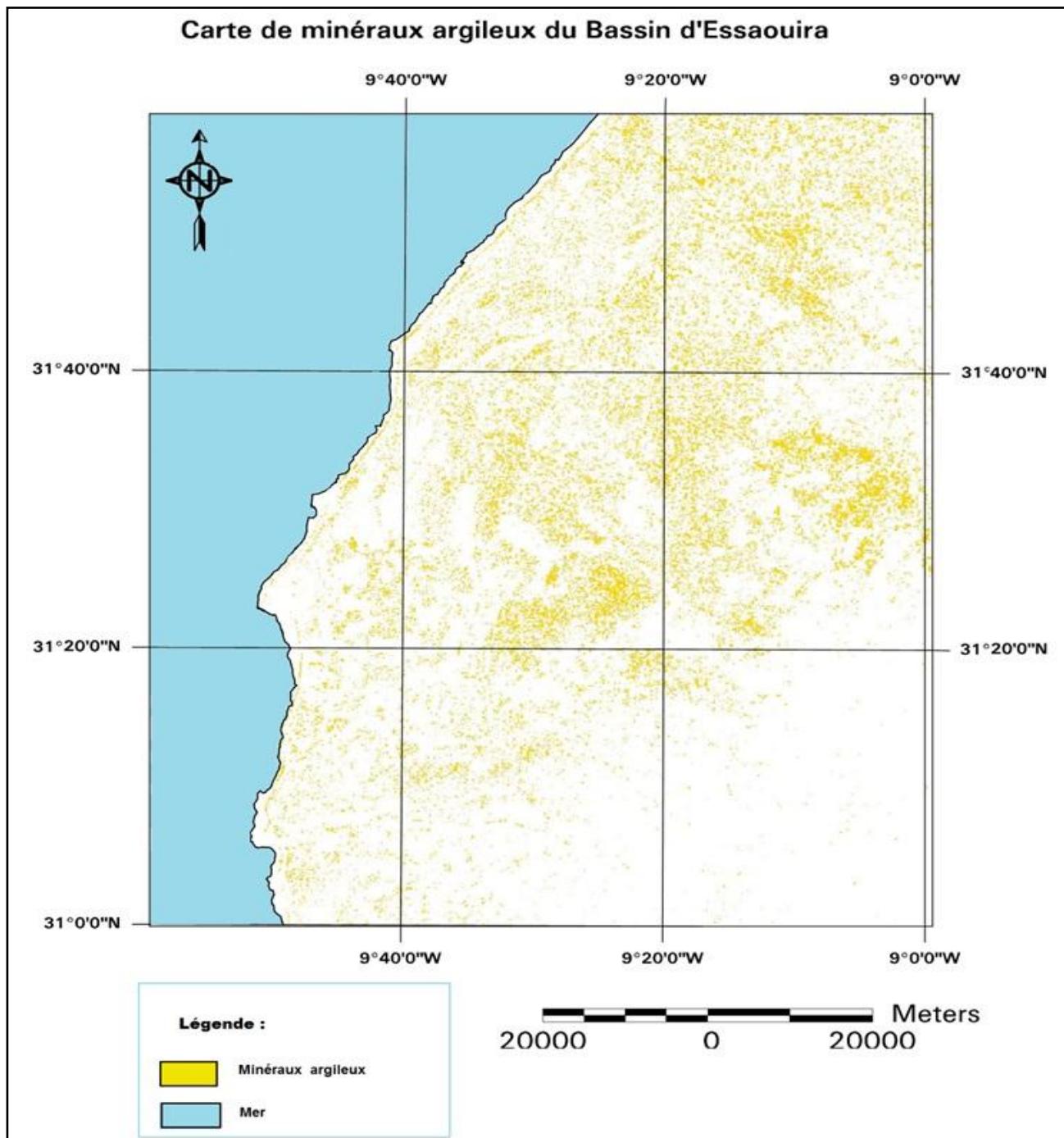


Fig. 34 : Spatiocarte d'indice de minéraux argileux du Bassin d'Essaouira.

L'analyse montre que les minéraux argileux se localisent le plus souvent dans : le Quaternaire et Crétacé au centre de la carte, Quaternaire au Est de la carte et au Nord dans la formation Jurassique.

II. Indice d'Oxyde de fer :

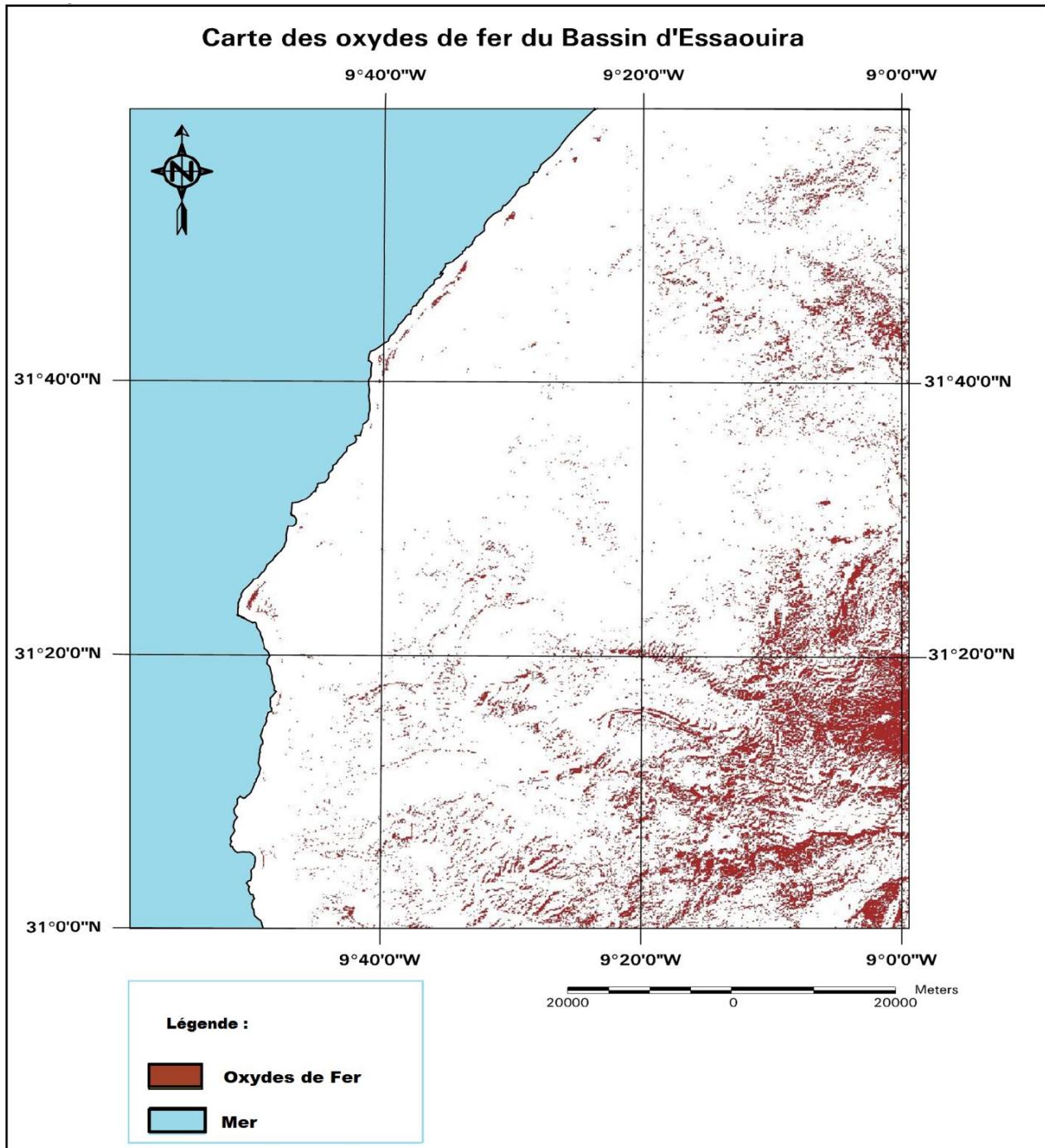


Fig. 35 : Spatiocarte d'indice des oxydes de fer du Bassin d'Essaouira.

L'indice des oxydes de fer, montre la présence des roches riches en oxyde de fer. Une grande partie de cette oxydation se localise dans la formation Quaternaire au Sud-Est.

III. Indice de l'altération hydrothermal:

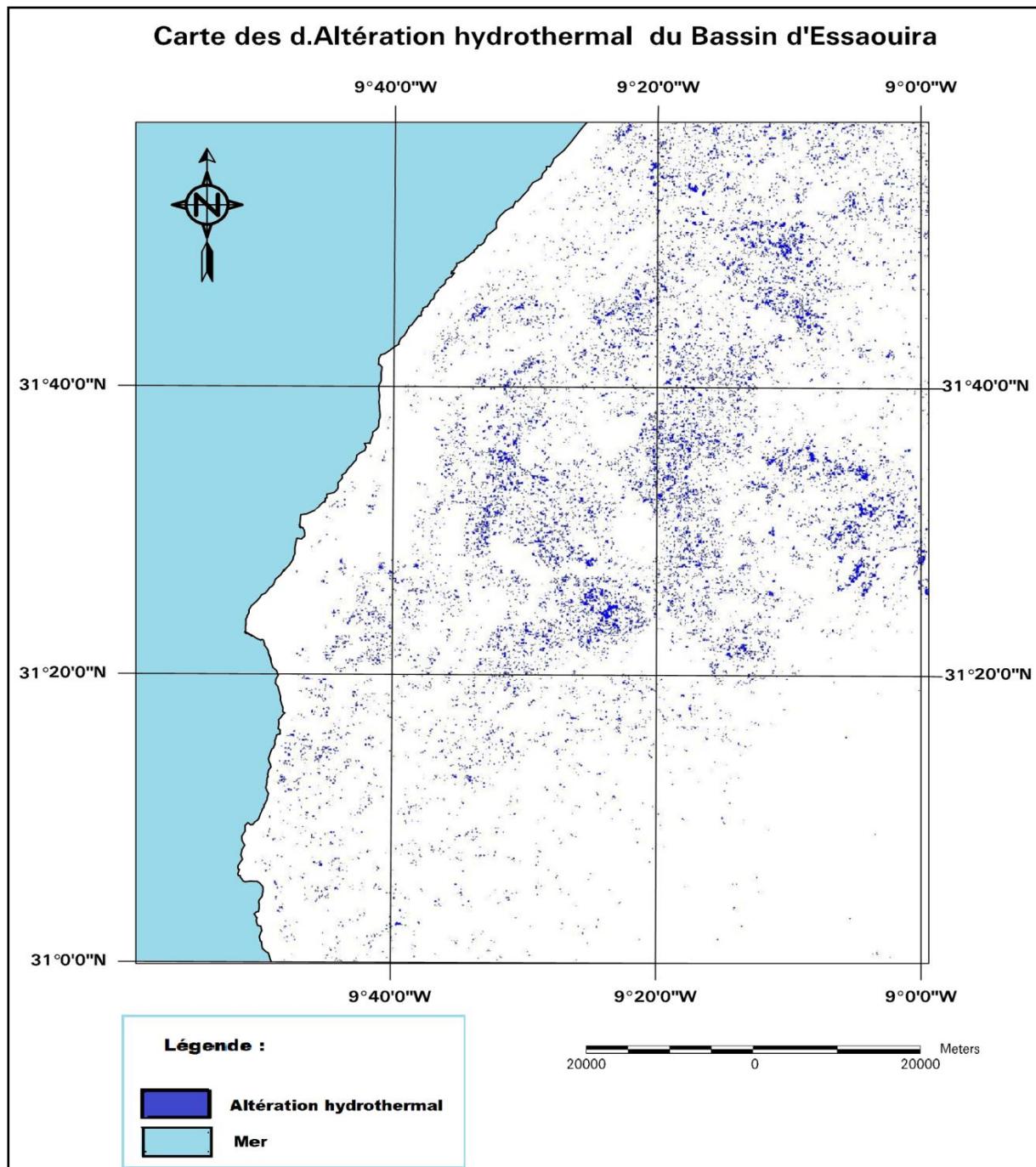


Fig. 36 : Spatiocarte de l'indice d'Altération hydrothermal du Bassin d'Essaouira.

En comparaison avec la carte géologique, il paraît que ces altérations se montrent au niveau de la formation Quaternaire et Rhyolites et dacites.

IV. Indice de minéraux ferreux :

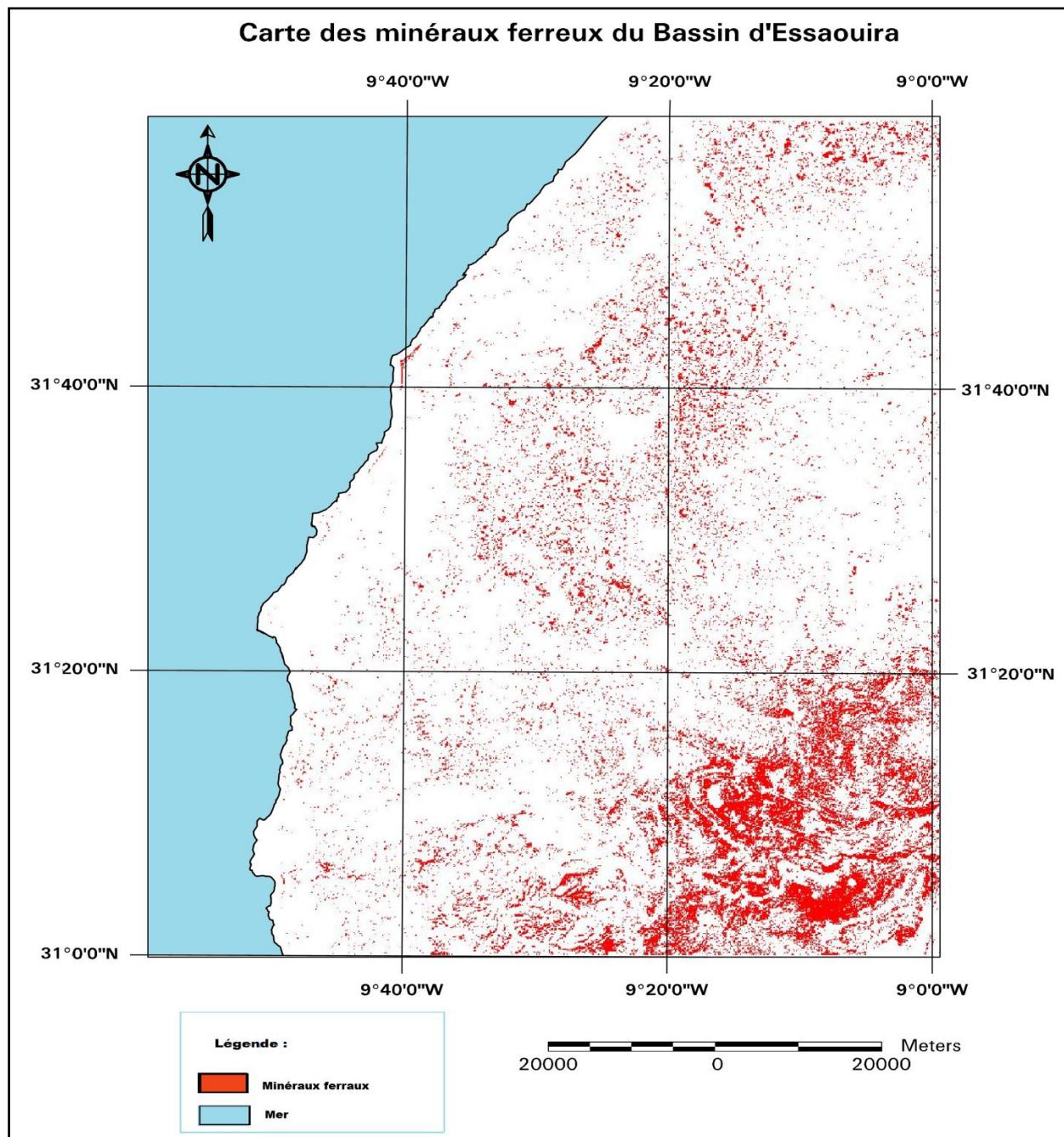


Fig. 37: Spatiocarte de l'indice des minéraux ferreux du bassin d'Essaouira.

L'indice des minéraux ferreux est obtenu suite à l'application du rapport TM3/TM1. L'analyse des résultats montre une zone importante (Fig. 37) localisée au niveau de Jurassique et Crétacé.

V. Indice de minéral composite:

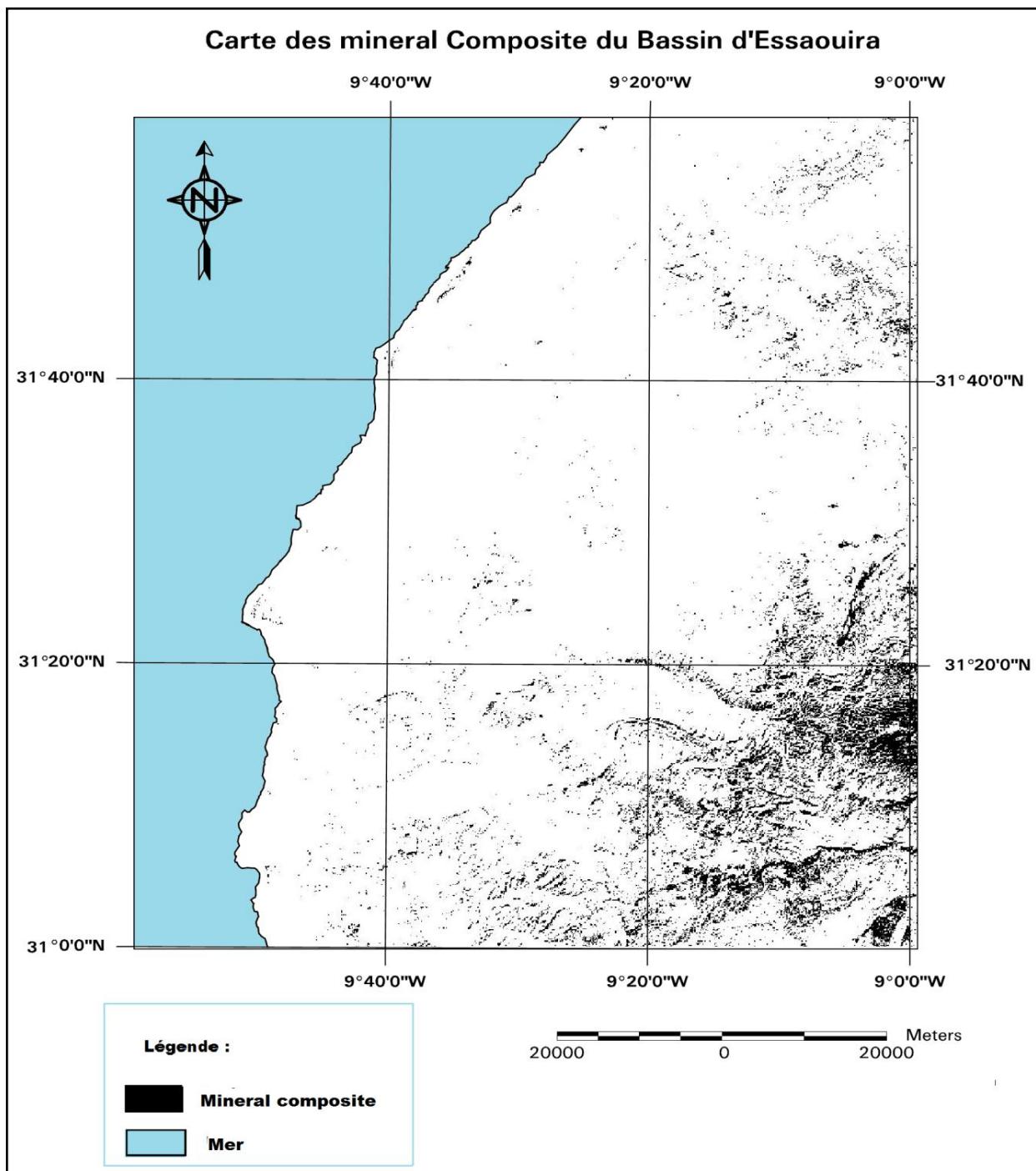


Fig. 38: Spatiocarte de l'indice minéral composite du bassin d'Essaouira.

En comparaison avec la carte géologique, il paraît que ces indices des compositions minérales se montrent au niveau de la formation Quaternaire et crétacé à l'Est de carte du Bassin d'Essaouira.

TRAITEMENT DES IMAGES MNT

I. Matériel :

L'image utilisée dans ce travail est de type MNT (Module Numérique du Terrain) .

Carte MNT du Bassin d'Essaouira

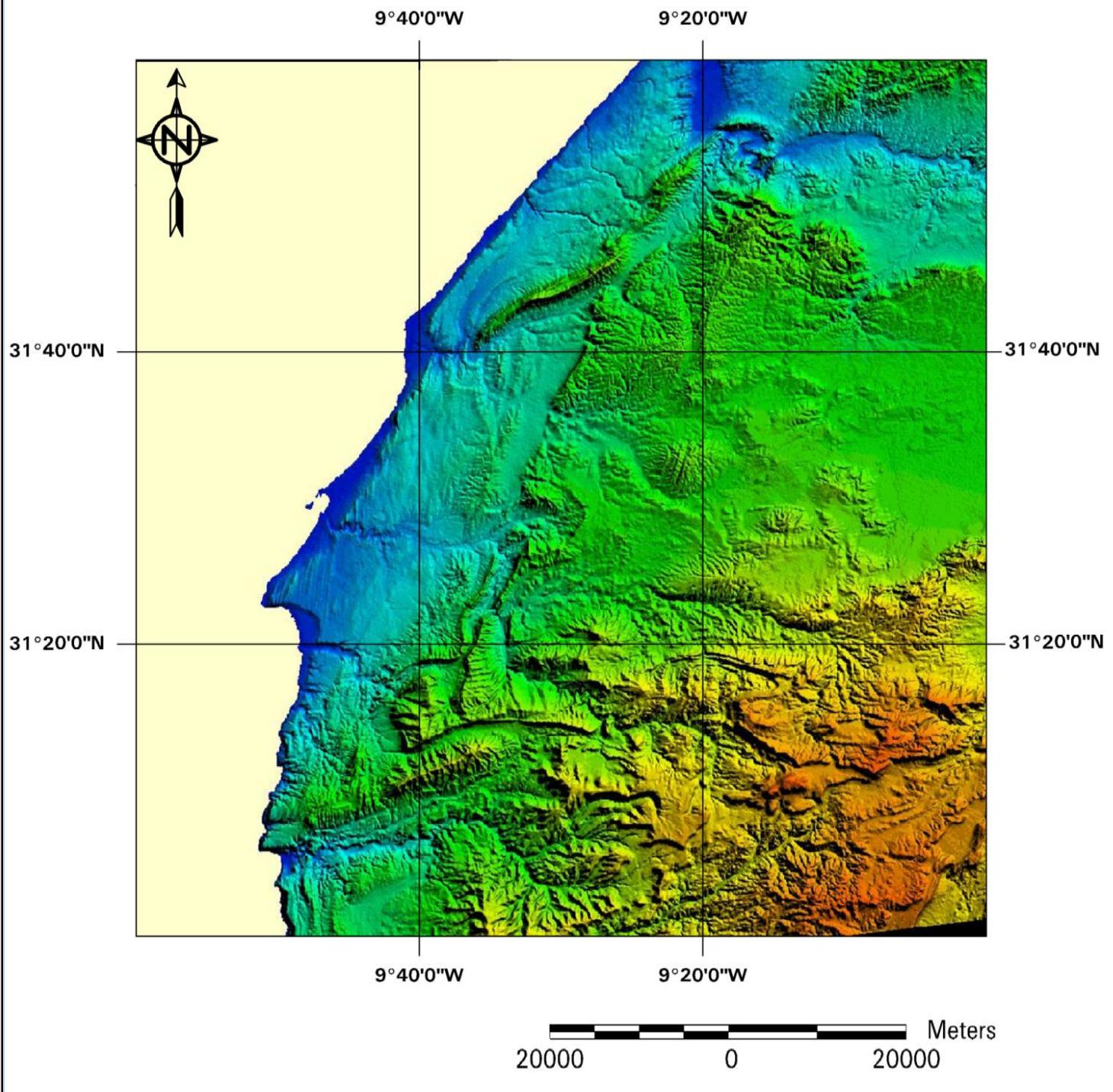


Fig. 39: Image MNT avec correction Géométrique du bassin d'Essaouira.

II. Méthodologie :

Prétraitement de l'image MNT :

Avant de commencer à traiter une Image MNT, il faut faire une certaine étape pour que l'image soit localisée et délimitée, car l'utilisation d'une image numérique ne devient possible qu'après sa conversion aux normes cartographiques régionales. On commence par une correction Géométrique (Coordonnées et Projection, à l'aide d'une carte topographie ou géologique) en suite délimitation de la zone d'étude.

1. Correction Géométrique:

La méthode polynomiale est la plus utilisée pour la correction géométrique des images. Elle permet simultanée de toutes les distorsions et fournit ainsi de bons résultats pour la cartographie thématique. Cependant elle est moins fiable pour la cartographie topographique qui exige une correction géométrique bien soigneuse (Bannari et al., 1997).

Dans notre cas on va utiliser transformation polynomiale de 1er degré, les coordonnées des points contrôles ont été trouvées à l'aide de la carte topographique de la zone d'étude. (Fig.39)



Fig.40 : Carte topographique de la zone d'étude.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

I. Introduction:

Le traitement des images MNT se fait grâce au logiciel «Erdas Imagine », qui permet d'extraire l'information Géologique avec des différents filtres. Ces filtres fonctionnent suivant des équations logarithmiques (chaque filtre calcule ces équations et mis la valeur du résultat dans le centre de filtre (le pixel au centre) (fig. 38)) pour mettre en évidence les linéaments enregistrés lors de la prise de l'image satellitaire avec des différents capteurs. Dans notre étude on a travaillé avec des filtres de types:

- 3x3 Horizontal Edge Detection. (= E-W)
- 3x3 Vertical Edge Detection. (N-S)
- 3x3 Left Diagonal Edge Detection. (W-E)
- 3x3 Right Diagonal Edge Detection. (E-W)
- 5x5 Edge Detection. (ride et falaise)
- 5x5 Horizontal.
- 5x5 Vertical.
- 7x7 Horizontal.
- 7x7 Vertical.

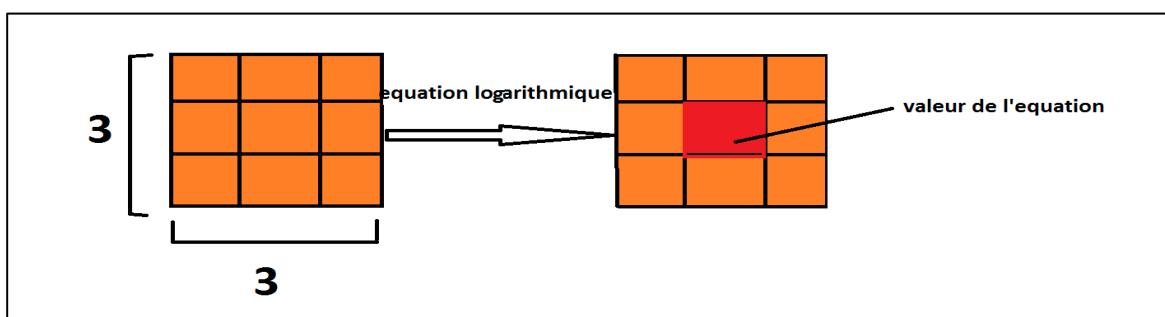


Fig.41: Méthode de travail des filtres pour Erdas Imagine, exemple filtre 3x3.

1. Résultats:

L'application des filtres et des traitements cités ci-dessus, sur l'image MNT correspondante au bassin d'Essaouira a permis de mettre en évidence un réseau de fracture enregistré dans les affleurements géologique de la zone. Les différentes fractures ressortis à partir des filtres de taille (3X3, 5X5 et 7X7) sont présentés par les figures 39, 40 et 41.

2. Les Filtre 3x3, 5x5, 7x7:

Carte des linéaments tracés à l'aide de filtre 3x3 de la carte MNT du Bassin d'Essaouira

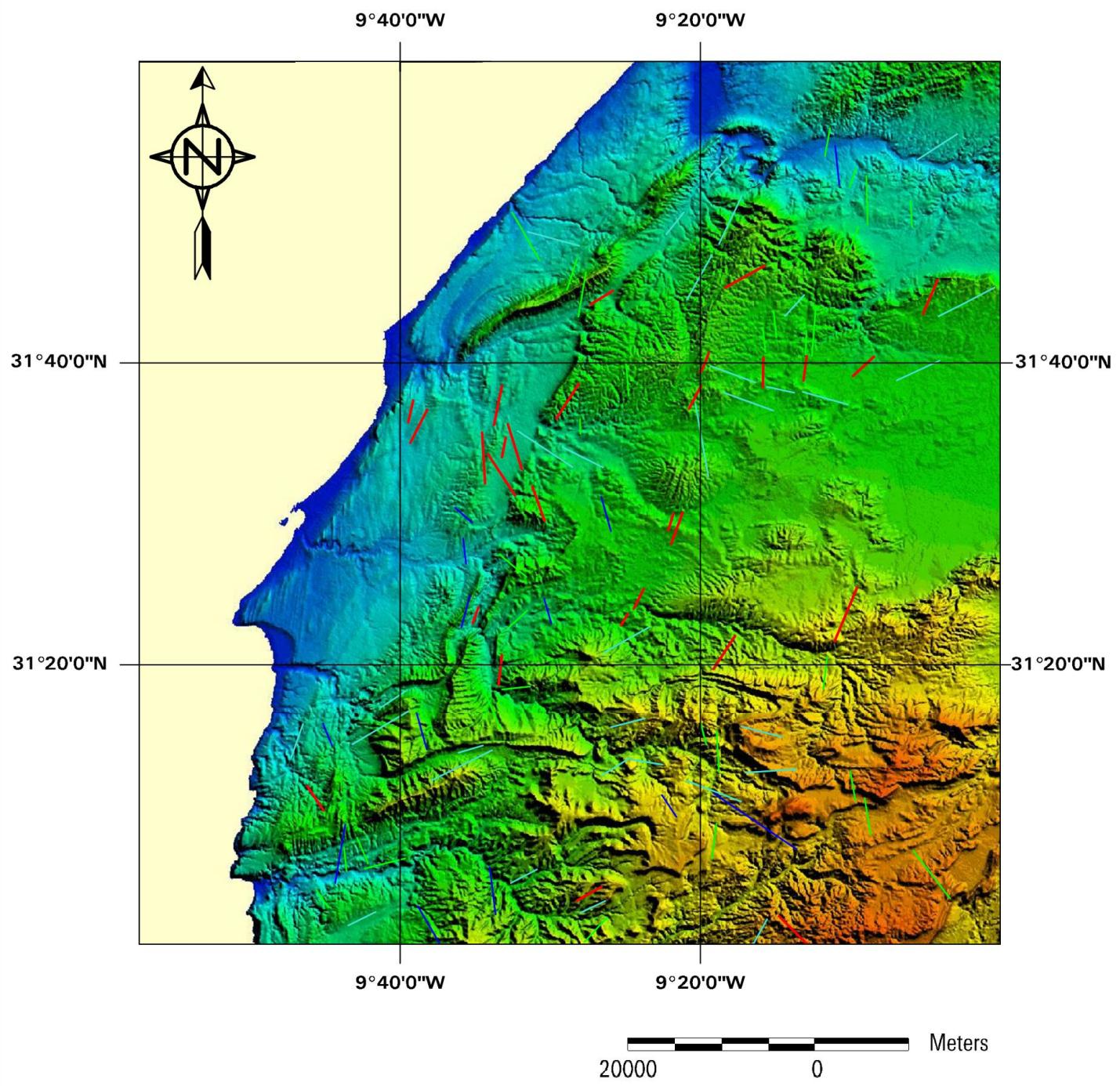


Fig.42: Carte de linéaments du filtre 3x3 Projétés sur l'image MNT de la zone d'étude.

(-Trait rouge: 3x3 Horizontal Edge Detection/-Trait vert: 3x3 Left Diagonal Edge Detection/-Trait bleu foncé : 3x3 Right Diagonal Edge Detection /-Trait bleu Claire: 3x3 Vertical Edge Detection).

Carte des linéaments tracés à l'aide de filtres 5x5 de la carte MNT du Bassin d'Essaouira

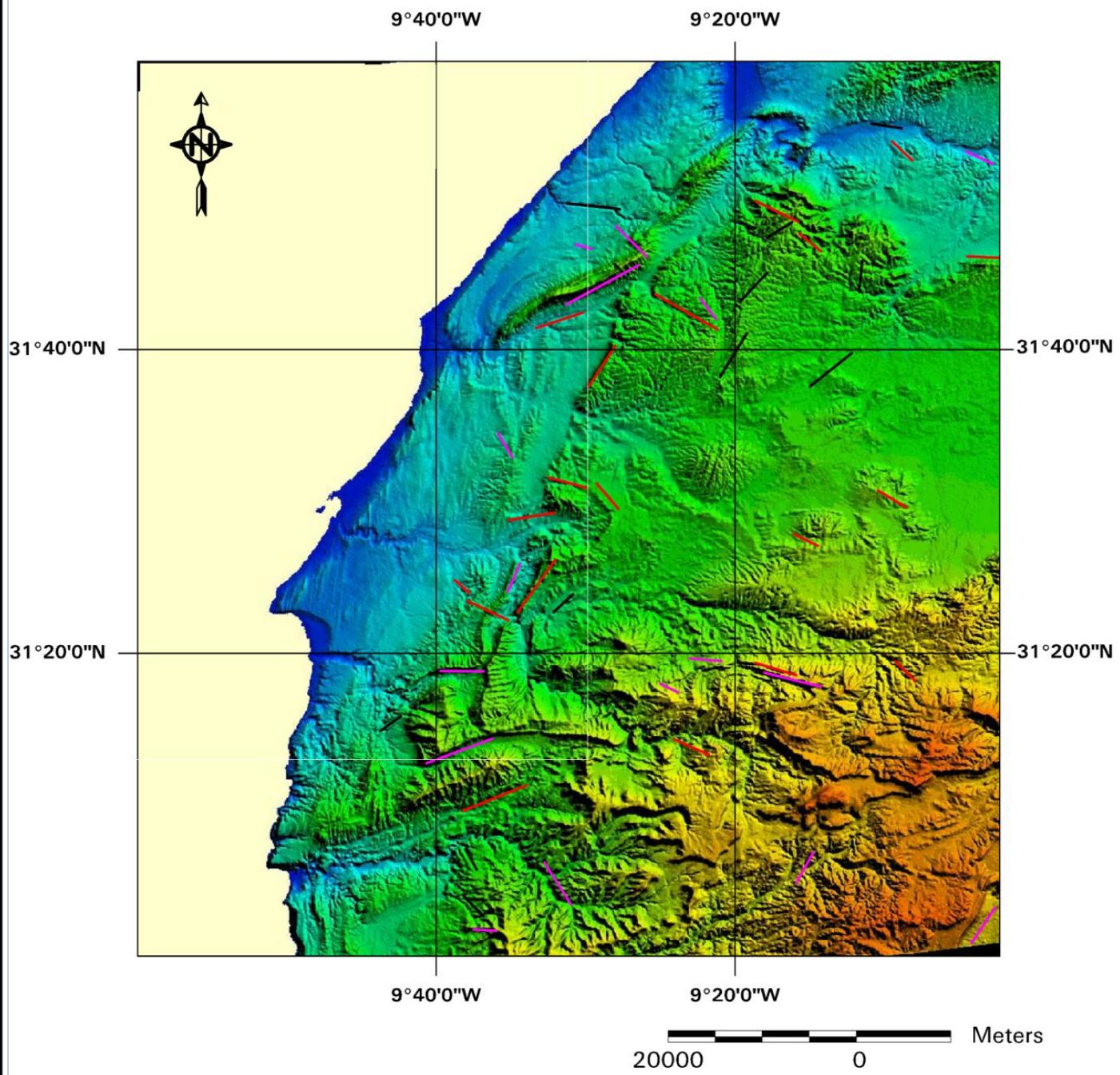


Fig.43: Carte de linéaments du filtre 5x5 Projétés sur l'image MNT de la zone d'étude.
(trait noir: 5x5 Edge Detection/ trait rouge : 5x5 Horizontal / trait rose : 5x5 Vertical.)

Carte des linéaments tracés à l'aide de filtres 7x7 de la carte MNT du Bassin d'Essaouira

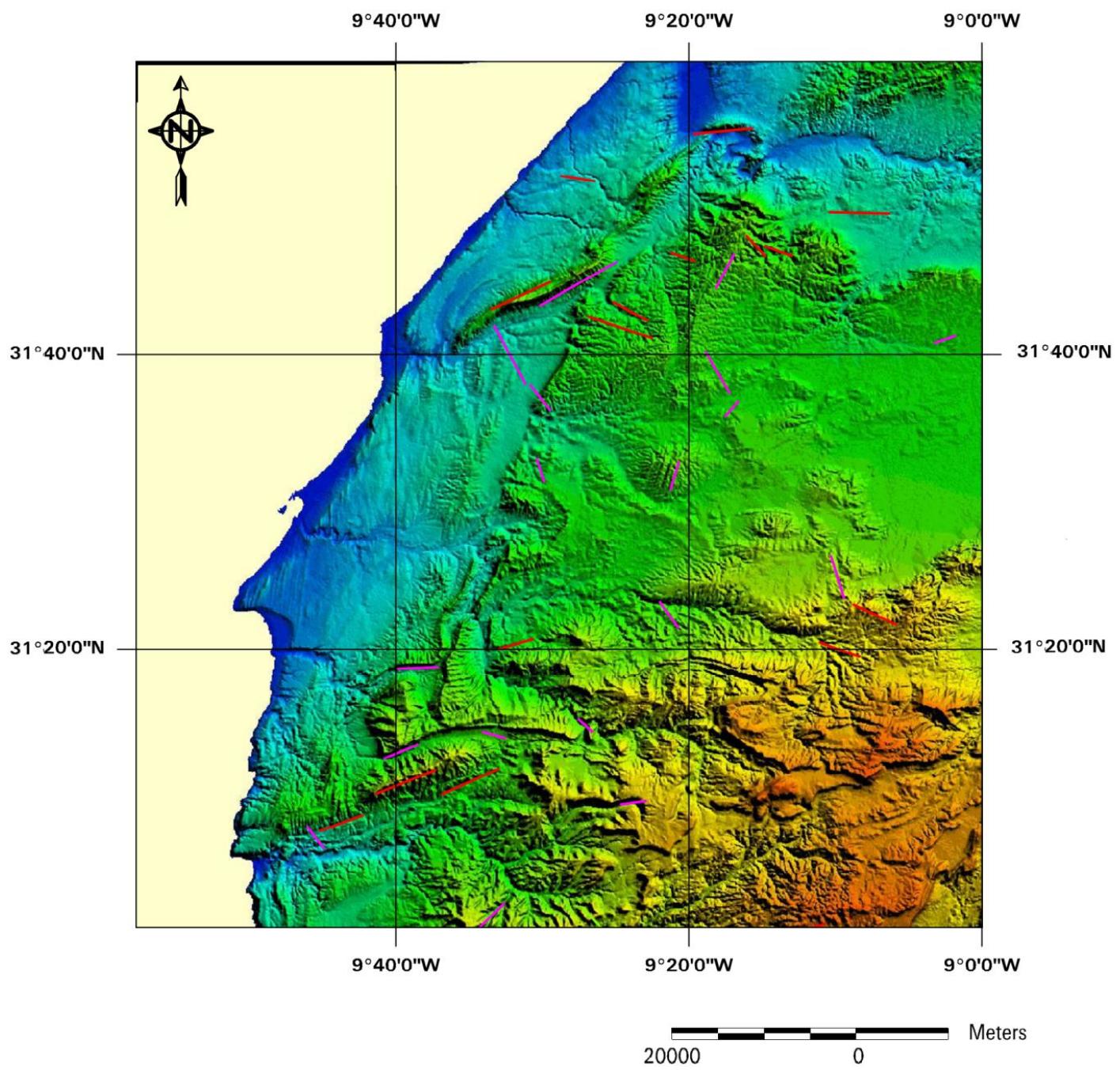


Fig.44: Carte de linéaments du filtre 7x7 Projétés sur l'image MNT de la zone d'étude. (Trait rouge : 7x7 Horizontal / trait rose : 7x7 Vertical.)

*Correction avec Carte topographique:

La correction des linéaments à l'aide d'une carte topographique est obligatoire.

Dans notre étude cette correction est faite par la superposition de la carte des linéaments et la carte topographique. Cette opération a permis de bien valider notre carte de linéaments, est donc assuré que ces linéaments ne correspondent pas à des lignes de route ou autres structures linéaires loin de la fracturation géologique. (Fig. 42, 43) La superposition a permis d'éliminer tous linéaments ne correspondant pas à la fracturation des formations géologiques.

*correction avec image Google earth:

Après élimination des linéaments qui ne correspondent pas à la fracturation géologique, il est indispensable de prouver que les linéaments conservés sur la carte finale correspondent à des fractures réelles sur le terrain. Dans ce cas on doit faire une mission de terrain, mais à défaut de moyen et de temps on peut aussi utiliser les images de Google earth qui ont une résolution importante. Ces images permettent de mettre en évidence un exemple ou deux des fractures cartographiées par télédétection. (Fig. 44, 45).

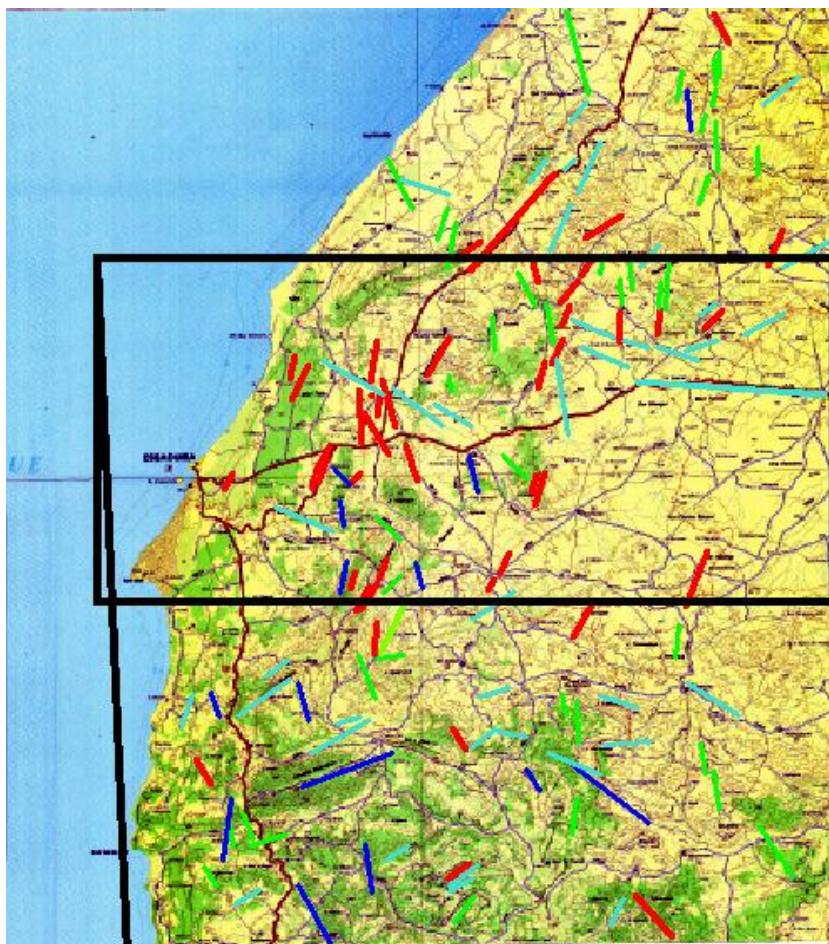


Fig. 45 : Carte des linéaments projetés sur la carte Topographique.

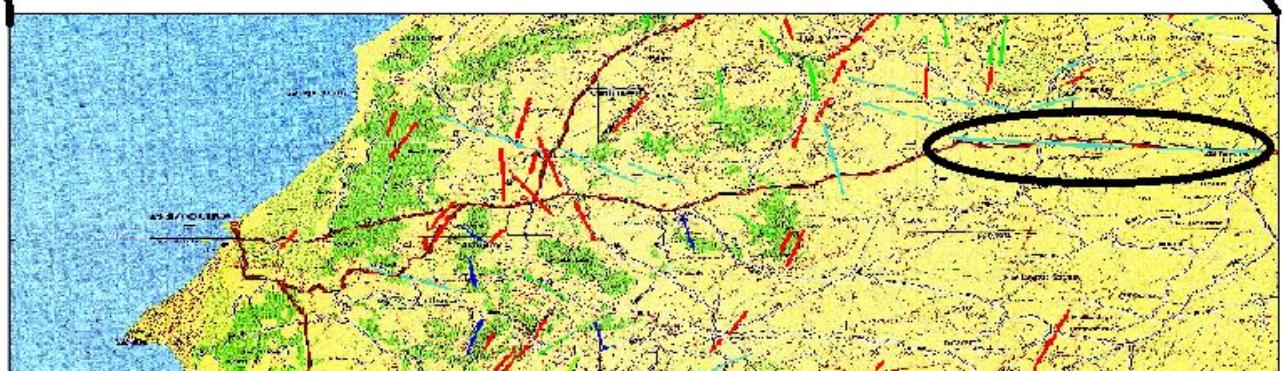


Fig.46: Exemple de linéaments à corriger a l'aide de carte topographique.

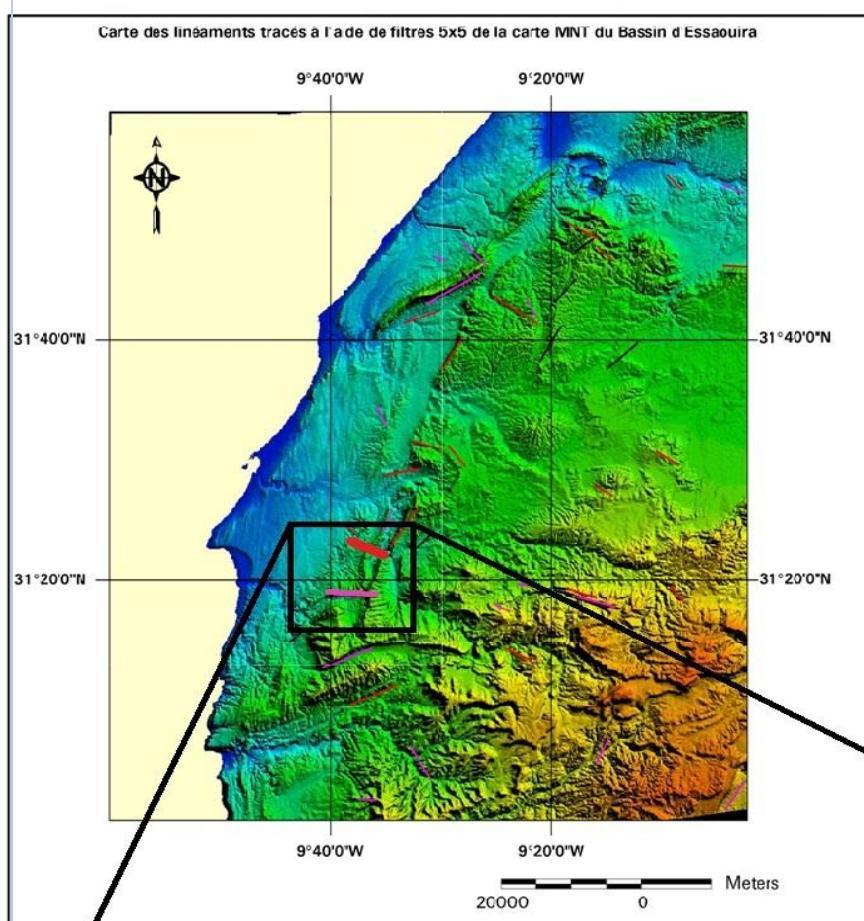


Fig.47 : Carte des linéaments projetés sur l'Image MNT.



Fig.48 : Exemple de linéament trouvés avec filtre 5x5, et aussi avec Google Image.

3. Extraction de linéaments :

a) Filtre directionnelle 3x3 (Right, Left, Horizontal, Vertical):

Après correction et validation des cartes de linéament extraite par images MNT des mesures de direction et de longueur des fractures montrent les résultats présentés dans le tableau suivant:

	Filtre 3x3 Horizntal		Filtre 3x3 Left		Filtre 3x3 Right		Filtre 3x3 Vertical	
Ligne	Longuere(m)	Azimuth	Longuere(m)	Azimuth	Longuere(m)	Azimuth	Longuere(m)	Azimuth
1	4743.52	63.4349	10424.46	162.4744	5070.23	172.0107	5705.73	103.8514
2	3138.29	60.6422	6873.32	150.2551	2705.69	131.3478	3197.29	43.9584
3	4845.77	20.5560	3337.02	13.6713	3457.89	174.1440	3276.79	37.7468
4	2078.66	15.9454	4331.73	23.4986	4540.43	164.3578	5297.84	60.7808
6	3477.96	6.3402	5868.61	7.7652	3684.41	12.3808	6425.97	28.6105
7	3266.08	47.2026	4455.76	146.6115	3699.04	166.2930	6282.71	27.6130
8	3499.58	28.6105	3804.73	176.0091	4559.23	163.3008	5431.39	110.7461
9	5353.20	32.3196	1994.78	15.2551	2692.76	159.2277	2919.19	105.1240
10	4499.49	12.2648	2930.23	173.0888	4834.66	163.2016	4713.46	106.9661
11	4688.42	26.0535	3026.51	171.6341	7309.16	9.0085	3230.11	47.0454
12	2865.19	15.4222	2654.05	183.8141	3091.18	148.4957	5439.33	112.5572
13	6446.21	178.2902	6036.21	186.7098	4252.87	7.3190	9134.12	168.9063
14	5350.79	145.4915	3564.84	22.8337	3112.20	138.2397	5253.01	64.5731
15	2512.76	6.5819 d	3817.26	15.9454	11091.22	124.1475	6824.58	61.9661
16	6091.64	161.8473	2544.90	15.9454			7518.96	122.5175
17	4344.85	164.7449	5480.86	177.2298			5061.17	116.5651
18	2124.65	28.8108	2826.44	180.0000			5335.49	61.9275
19	2160.76	30.9638	4157.46	176.3478			3514.70	58.8150
20	2215.38	19.9831	1327.03	356.1859			7195.32	58.0616
21	4064.91	21.8014	4148.18	131.8202			4610.77	26.5651
22	1762.07	25.2011	3726.55	125.3948			2986.65	68.7495
23	3611.15	35.7067	3155.96	42.8789			7137.19	61.7420
24	2543.11	28.4429	6067.39	158.1986			4358.58	77.9052
25	4080.34	9.4623 d	2948.38	87.0643			3559.22	54.1623
26	3339.50	139.3987	3485.16	169.8245			3409.22	93.8141
27	3553.69	62.8189	3521.02	150.9454			4358.95	105.2551
28	3206.37	150.4612	3978.12	74.3578			5363.99	89.1931
29	1668.54	40.6013	2564.80	162.1811			6113.64	110.7256
30	2896.80	24.9048	4867.33	175.8404			3302.63	69.4440
31	4877.70	28.5231	3872.26	13.0919			3614.64	62.8787
32	7382.92	133.5312	4535.63	7.8153 d			4207.80	58.1092
33	7078.83	23.4986	3629.48	164.6237			3219.35	64.0577
34			4623.34	172.3332			3739.33	35.8377
35			7179.20	142.5946				

Tableau7: Résultats de mesure des linéaments trouvés avec filtre 3x3 (azimuth, longueur(m)).

Le traitement statistique des directions des fractures mesurées sur la carte synthétiques issues des filtres de taille 3x3 montre une direction majeure de NNW-SSE. Deux autres directions mineures se voient sur la rosace directionnelle, il s'agit de la direction ESE-WNW et ENE-WSW. Fig.46

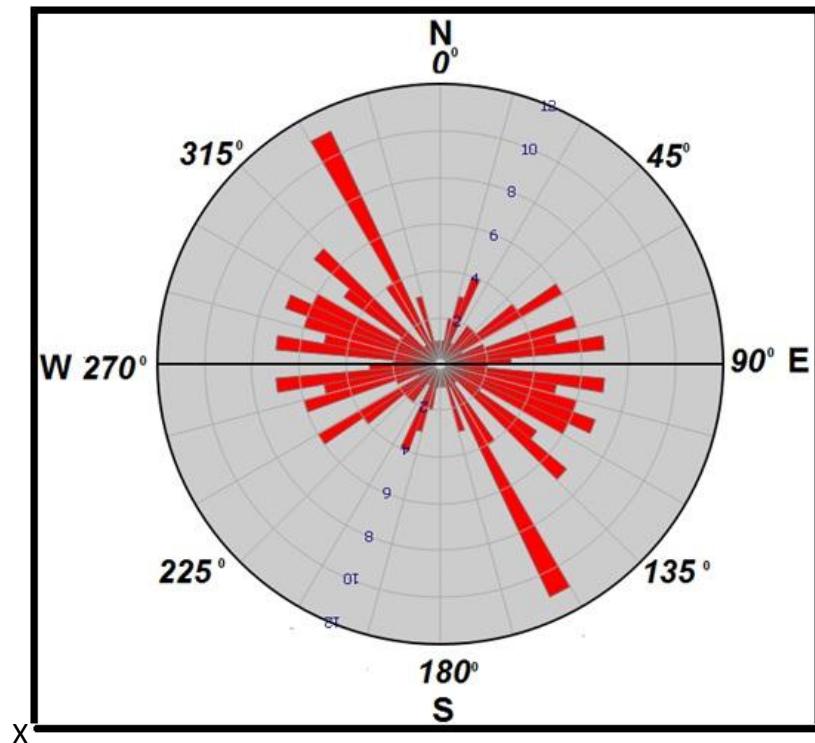


Fig.49: Rosace pour les linéaments trouvés avec filtre 3x3.

b) Filtre directionnelle 5x5 (Edge detection,Horizontal, Vertical):

Après correction et validation des cartes de linéament extraite par images MNT des mesures de direction et de longueur des fractures montrent les résultats présentés dans le tableau suivant:

	Filtre 5x5 Horiznotal	Filtre 5x5	Edge detection	Filtre 3x3 Vertical		
Ligne	Longuere(m)	Azimuth	Longuere(m)	Azimuth	Longuere(m)	Azimuth
1	2902.94	133.7270	3303.90	97.3058	1660.46	111.2505
2	6729.92	93.5763	2919.22	63.4349	5177.84	138.6215
3	4937.01	116.1139	4793.16	45.0000	3266.07	57.1715
4	3108.37	135.0000	6220.44	31.2637	9076.40	60.4612
5	8057.48	116.2883	6340.34	51.3402	3350.84	132.7974
6	4947.72	71.8781	4158.17	5.4403	3489.30	143.7462
7	5405.36	32.8557	3592.49	51.1155	4064.10	118.2174
8	4425.66	122.7352	3403.21	56.7251	3341.88	152.7004
9	2854.83	117.3499	3453.99	136.0809	3811.80	19.3590
10	4120.05	137.7263	2861.65	150.0184	4890.80	89.0122
11	4990.00	103.7995			7837.79	70.7693
12	5000.32	79.2611			6088.02	98.8068
13	7621.55	35.4555			2344.70	116.5651
14	2335.25	135.0000			3478.58	95.5722
15	4589.79	114.6236			6379.57	103.1092
16	4706.95	105.8025			5967.44	147.3194
17	3170.37	133.8309			2302.19	96.3402
18	4848.03	119.3578			4079.12	26.5651
19	7066.75	68.4590			5028.65	34.2869

Tableau 8 : Résultats de mesure des linéaments trouvés avec filtre 5x5 (azimuth, longueur(m)).

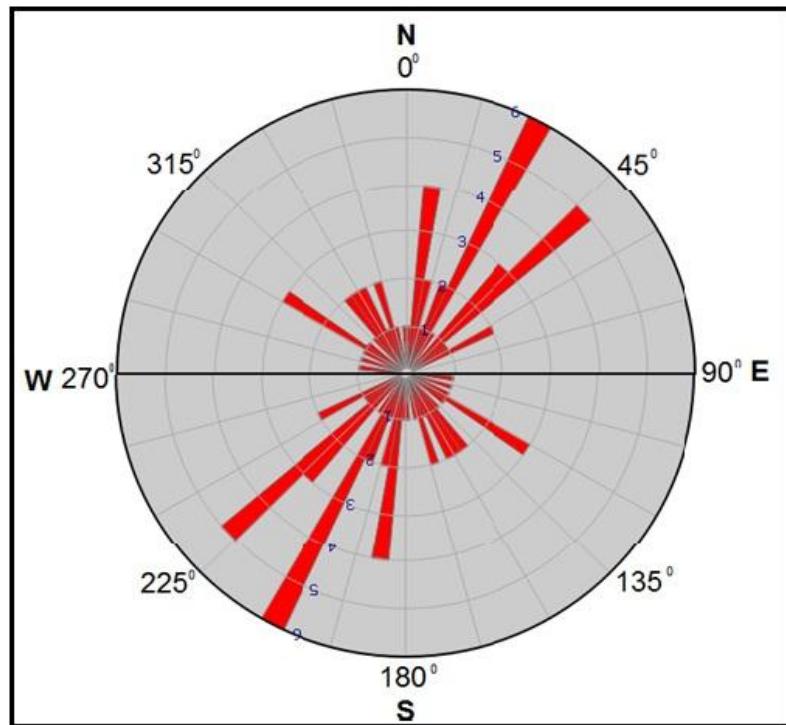


Fig.50: Rosace pour les linéaments trouvés avec filtre 5x5.

Le traitement statistique des linéaments montre une direction majeure d'orientation NNE-SSW et une direction mineure NE-SW.

c) **Filtre directionnelle 7x7 (Horizontal, Vertical) :**

Après correction et validation des cartes de linéament extraite par images MNT des mesures de direction et de longueur des fractures montrent les résultats présentés dans le tableau suivant:

	Filtre 7x7 Horizotal		Filtre 7x7 Vertical	
Ligne	Longuere(m)	Azimuth	Longuere(m)	Azimuth
1	6331.36	83.9115	10227.10	60.1331
2	3422.75	99.9262	7378.52	149.7968
3	6708.22	89.2838	3808.68	138.9452
4	3139.22	114.4440	3746.82	164.8760
5	3519.99	137.1211	3930.43	20.2249
6	3558.20	106.6992	2616.16	42.1376
7	7087.19	66.2505	5842.58	149.6764
8	7147.94	108.8690	4198.48	27.1497
9	4529.82	117.5528	2830.13	74.2914
10	3914.93	70.7693	5825.50	162.4744
11	5079.00	108.7413	4101.55	140.5275
12	5785.79	116.9522	4556.87	92.1211
13	7337.56	68.5747	3339.57	72.0309
14	6478.20	64.4703	2380.57	104.5345
15	4659.67	70.5600	4409.57	104.5742
16	2780.77	140.4403	2449.93	131.9872
17	5719.75	76.1713	3945.49	138.8141
18			3429.22	81.4692
19			4198.08	47.6425

Tableau9: Résultats de mesure des linéaments trouvés avec filtre 7x7 (azimuth, longueur(m)).

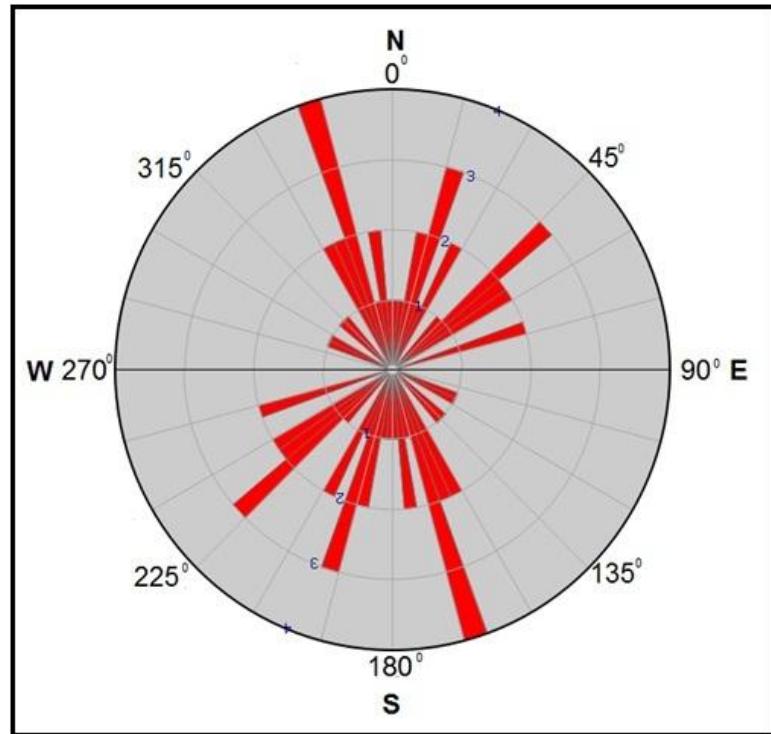


Fig.51: Rosace pour les linéaments trouvés avec filtre 7x7.

Le traitement statistique montre une direction majeure NNW-SSE et deux directions mineures NE-SW et NNE-SSW.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Le traitement de l'image MNT avec les différents filtres de programme « Erdas Imagine » a permis de ressortir 201 linéaments, regroupés dans la carte du fig. 49.

Carte MNT avec les linéaments extraits sous logiciel ERDAS IMAGINE 9.2

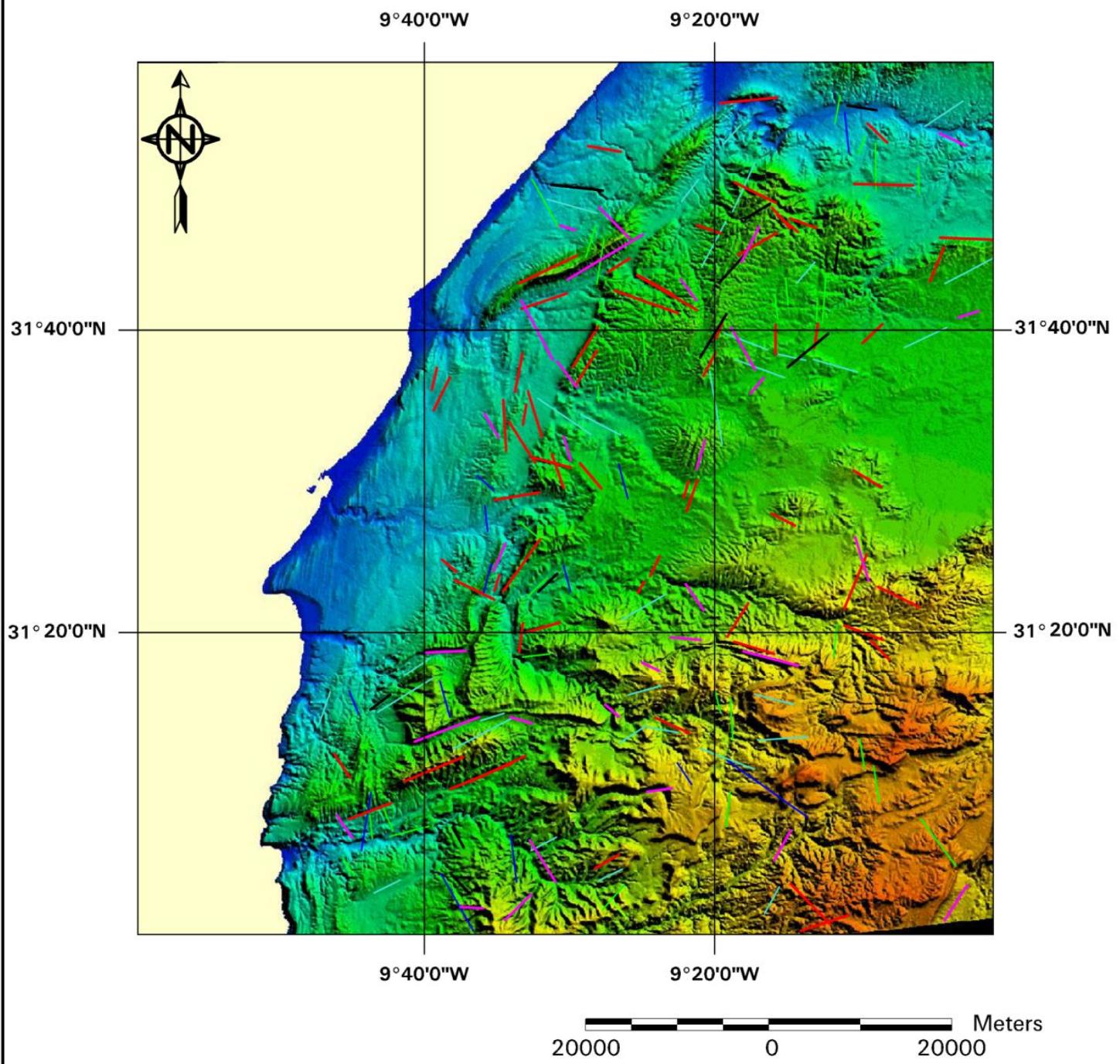


Fig.52: Les linéaments extraits projetés sur l'image MNT.

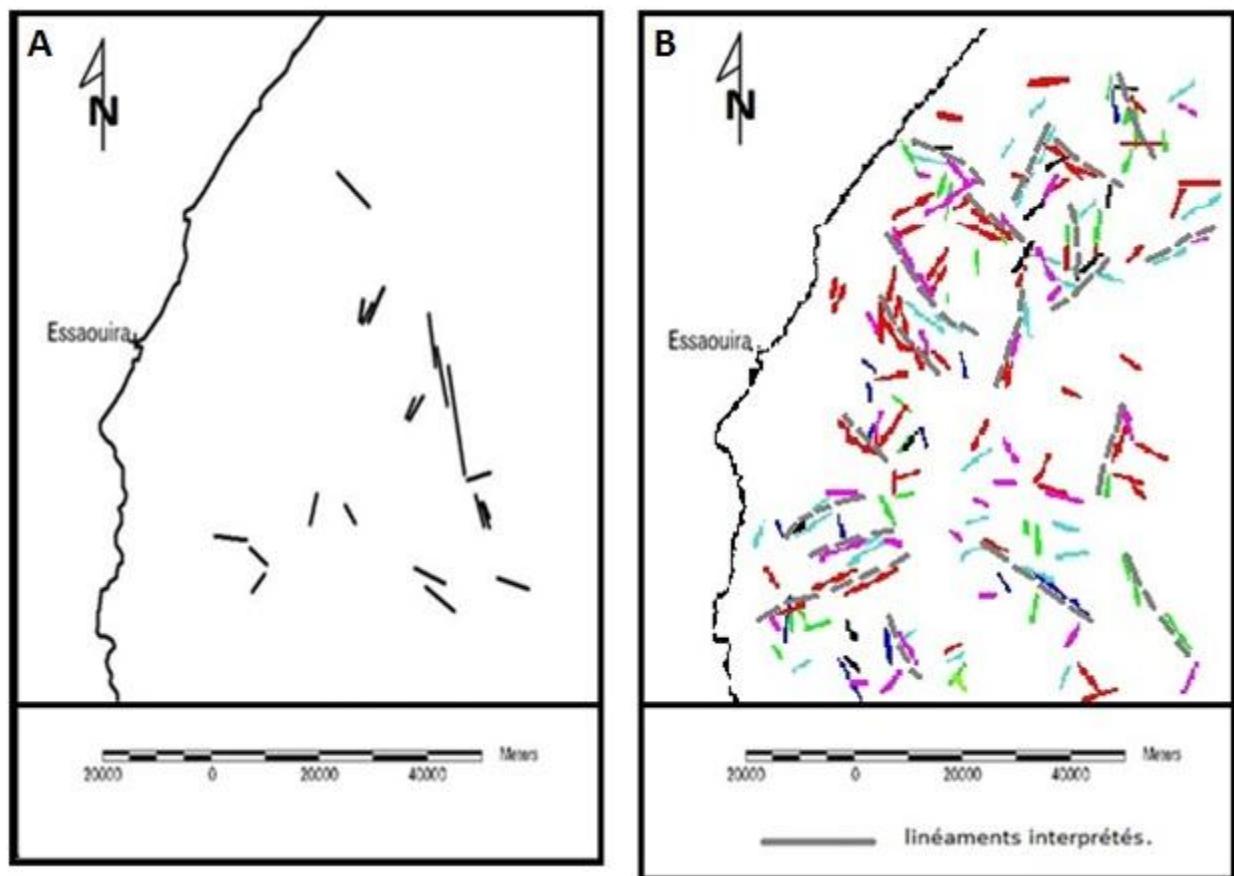


Fig.53: Comparaison entre carte de linéaments extraits par les filtres (B) et les fractures présents dans la carte géologique (A).

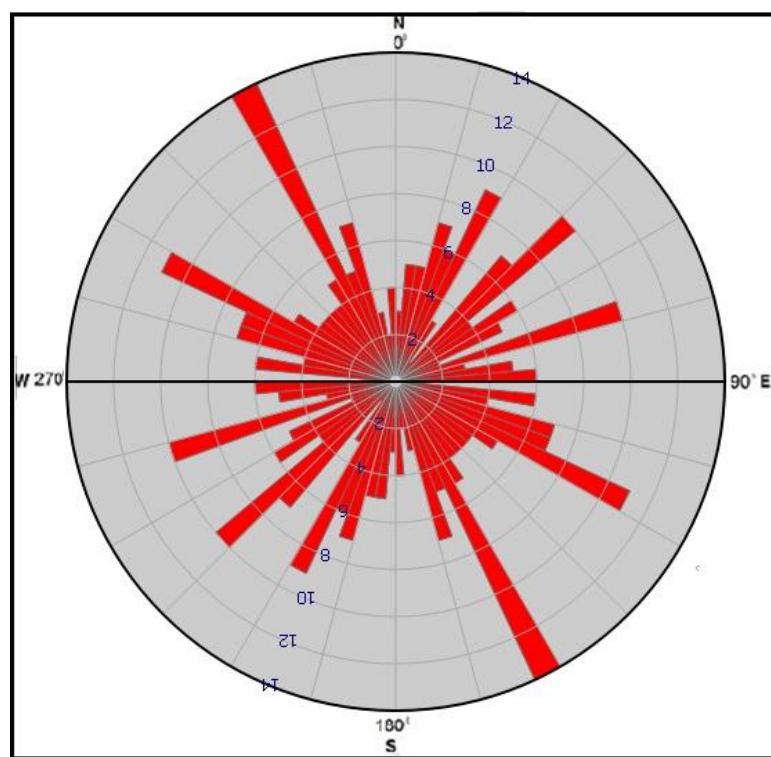


Fig.54 : Rosace Majeur des linéaments extraits par les filtres.

Conclusion :

L'analyse de la rosace directionnelle de tous les linéaments extraits par les méthodes de la télédétection (filtre directionnels) sur l'image MNT, montre trois familles Principales de linéaments ;

- La 1^{ère} d'orientation N115 à N120.
- La 2^{ème} d'orientation N150 à N155.

Cette étude permis de mettre en évidence les grandes lignes structurales du bassin d'Essaouira telles que les rides diapiriques, et les grandes lignes de faille mise en évidence par Soid (1983) :

- La 1^{ère} d'orientation N25 à N30.
- La 2^{ème} d'orientation N150 à N155.
- La 3^{ème} d'orientation N165 à N170.

La comparaison de la carte de fracture extrait par image et celle de la carte géologique, montre que presque les mêmes directions entre les deux, on note une abondance des fractures extraites de l'image MNT par rapport à celles de la carte géologique.

CONCLUSION

La cartographie des linéaments par télédétection sur image satellite LandSat ETM+ et image MNT, dans le bassin d'Essaouira ont permis de mettre en évidence un réseau de fractures très diversifié de point direction et longueur. Après correction et validation, Le traitement statistique sur une rosace directionnelle a montré plusieurs directions.

Sur les filtres directionnels on note une proportionnalité entre la taille de la matrice des filtres et la dimension des fractures relevée. Ainsi que plus la taille de la matrice d'un filtre importante la taille des linéaments extrait est importante et lorsqu'une matrice de filtre est petite, il permet de mettre en évidence des petites fractures.

L'analyse de la rosace directionnelle de tous les linéaments extraits par les méthodes de la télédétection (filtre directionnels) sur l'image satellitaire et l'image MNT, montre quatre familles Principales de linéaments :

Sur l'image satellitaire LandSat:

- La 1^{ère} d'orientation N15 à N20.
- La 2^{ème} d'orientation N55 à N60.

Sur l'image MNT :

- La 1^{ère} d'orientation N150 à N155.
- La 2^{ème} d'orientation N115 à N120.

Cette étude permis de mettre en évidence les grandes lignes structurales du bassin d'Essaouira telles que les rides diapiriques, et les grandes lignes de faille mise en évidence par Soid (1983) :

- La 1^{ère} d'orientation N25 à N30.
- La 2^{ème} d'orientation N150 à N155.
- La 3^{ème} d'orientation N165 à N170.

La comparaison de la carte de fracture extract par images Satellitaire, carte de fracture extract par images MNT et celle de la carte géologique, montre que presque les mêmes directions. on note une abondance des fractures extraites de l'image satellite et l'image MNT par rapport à celles de la carte géologique.

On peut aussi extraire les indices des minéralisations par télédétection, et comme résultats, on a plusieurs indices : Minéraux argileux, Oxydes de fer, Altération hydrothermal, Minéraux ferreux, Minéral composite.

Les minéraux argileux se localisent dans les zones de couverture végétale importante car les végétaux dégradent le sol et librent les minéraux argileux. L'indice des minéraux ferreux se localise sur le haut atlas occidental, s'oxyde et se transporte par l'eau pour donner des indices au niveau des chenaux, les indices d'Altération hydrothermal se montrent au niveau de la formation Quaternaire, Rhyolites et dacites c'est-à-dire au niveau des roches éruptives.

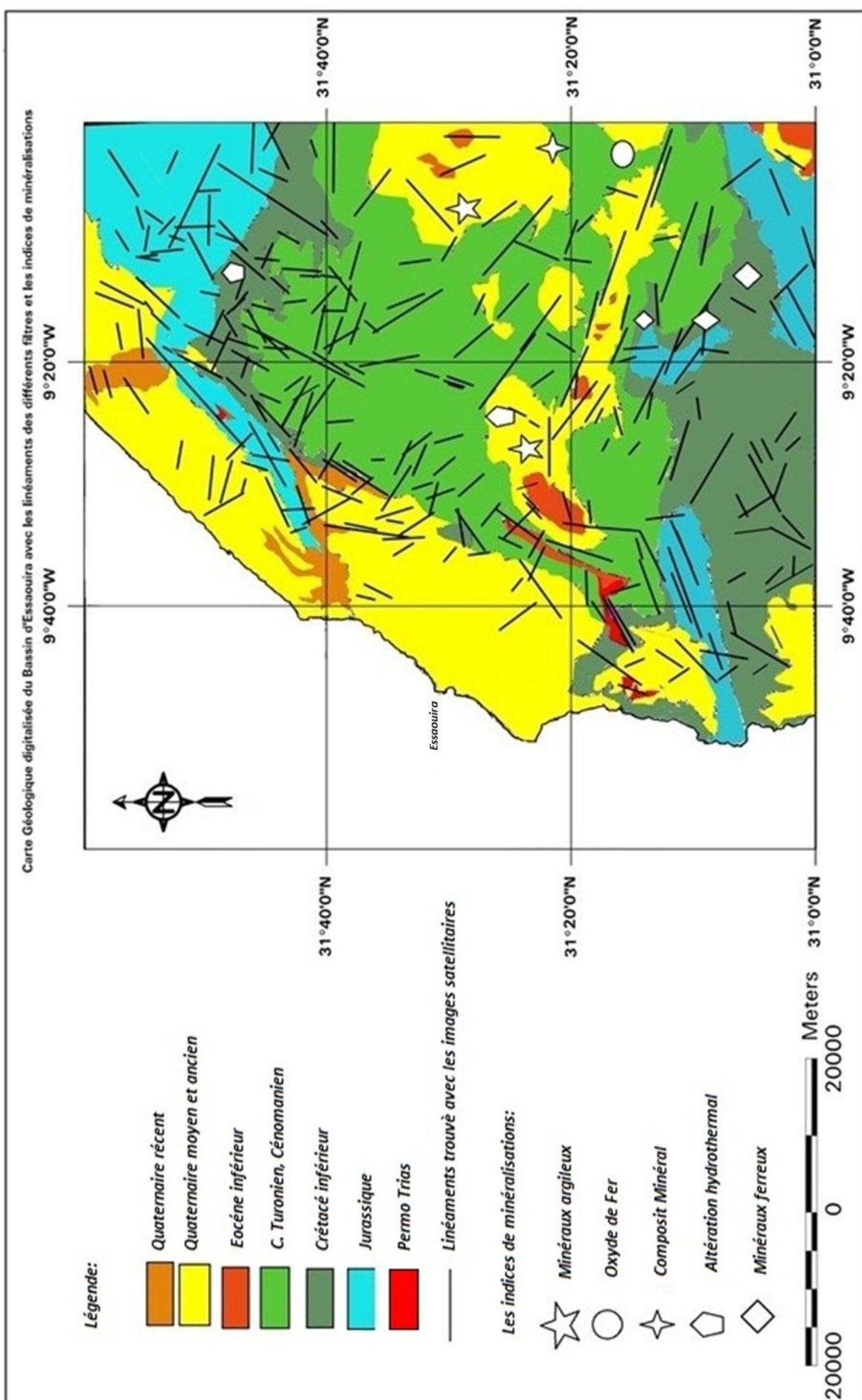


Fig. 55: Carte Géologique avec linéaments et indice extrait sous logiciel ERDAS IMAGINE 9.2.

Références bibliographiques

- **Roch, 1930** : étude géologique dans la région méridionale du Maroc occidental. Note et mémoire service mines et carte geol.Maroc.rabat, 9,542 p
- **Duffaud, F.C 1960** : contribution à l'étude stratigraphique du bassin secondaire du Haut Atlas occidental (sud-ouest marocain) bull.Soc.Géol.france, 7ème série, II, 6, 728-734 pp.
- **Choubert.G et Faure-Muret. A, 1962** : évolution du domaine atlasique marocain depuis les temps paléozoïques .Mém . Hors-série .Soc. Géol. France, 1,447-527 pp.
- **Ambroggi R. 1963**.Etude géologique du versant méridional du Haut Atlas occidental et de la plaine du Souss. Not. Mém. Serv. éol. Maroc ,15 ,321 p.
- **Duffaud,F.,Brun,L.et Fontbote,J.M.(1966)** : Le bassin du sud-ouest marocain .In Reyre,D.Bassins sédimentaires du littoral africain. Symp.NewDelhi,Publ. Assoc.ServoGéol.Afric., Paris, 1:5-26
- **Despois et Reynal, 1967** géologie d'Afrique du nord-ouest .Payat, Paris, 570p.
- **Michard, A.1976** : Eléments de Géologie Marocaine. Notes et mémoires du service géologique du Maroc, Rabat, 252.
- **Leblanc G.et al., 1980** :Interprétation géodynamique du domaine pan-africain (Précambrien Terminal) de l'Anti Atlas(Maroc)à partir de données géologiques et géochronologiques. Canadian Journal of Earth Sciences, 17:142-155.
- **Weisdruck, 1980** : géomorphologie et paléoenvironnement de l'atlas atlantique. Thèse ès lettres, paris I, 931 p.
- **Souid, 1983**;Souid,.1\.(1.983). Etude tectonique et microtectonique des injections du Trias dans le bassin d'Essaouira pendant les compressions alpines dans l'avant-pays atlasique (Maroc). These 3eme cycle, Montpellier 101págs.
- **Piqué, A.1983**: Structural domains of the Hercynian belt in Morocco. In : Regional trends in the geology of the Appalachian - Caledonian - Hercynian - Mauritanide orogen (Edited by Schenk, P). Dordrecht, Reidel. 339-345.
- **Jaffrezo et al, 1985** : Données microbiostratigraphiques sur le Jurassique supérieur du bassin de l'ouest Marocain.Comparaison avec les résultats du log 79 D.C.P et la compagnie Cyamaz 1982. Bull. Soc.Géol. France.8, 1, 6,875-88' pp.
- **Lillesand et Kieffer, 1987** : Remote Sensing and Image Interpretation. 2nd edition. John Wiley & Sons, 1987.
- **Gower et al., 1988**:The Fluorescence Line Imager: High-Resolution Imaging Spectroscopy Over Water and Land. Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, 1988, 273-278.
- **Khattach. D.1989**: paléomagmatisme de formations paléozoïque du Maroc. Thèse de l'Université de Rennes 1, France, soutenue le 23 Juin 1989.
- **Bonn.F et Rochon,G 1992** : Précis de télédétection. Volume 1 : Principes et méthodes. AUPELF-UREF, 1992. Coll. Presses Universitaires du Québec, Montréal.
- **Medina, F. (1994)**: Evolution structurale du Haut Atlas Occidental et des régions voisines du Trias à l'actuel, dans le cadre de l'ouverture de l'Atlas Atlantique Central et de la collision Afrique Europe.These d'état, Rabat,272págs

- **Bannari et al., 1997:** the Necessity of Exterior Orientation Parameters for the geometric correction of MEIS-II Airbone Digital Images. *Remote Sensing Reviews*, vol. 16, pp 135-136.

- **Hanich. L (2001)** : Structure et fonctionnement d'un aquifère multicouche carbonaté exemple du bassin Essaouira-Guide méthodologique. Thèse d'état, Département de Sciences de la Terre, Faculté des Sciences et Techniques Gueliz, Université Cadi Ayyad, Maroc, 145p..

- **Ibouh.H, (2012):** Cours de Télédétection et initiation au traitement des images satellitaires, Département de Sciences de la Terre, Faculté des Sciences et Techniques Gueliz, Université Cadi Ayyad, Maroc.

- **Soudani K., 2005** : Introduction général à la télédétection. Cours en ligne Faculté des Sciences d'Orsay – Université Paris Sud XI.

-M.BAHIR, M.O.SILVA, J.MENDONÇA, P.CARREIRA, GALEGO FERNANDES, M. BENBIBA & M. ELMERAJI. (2005) : Isotopes et ressources en eau, exemple du bassin Synclinal d'essaouira (Maroc Occidental), *The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of water Resources Guimaraes,Portugal,July 11-14,2005*, 4.