



*Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech*

*Département des Sciences de la Terre*

*Labo. Géo-Sciences et Environnement*

## *Stage de Fin d'Etude*

**Licence Sciences et Techniques**

**(Géologie Appliquée au Ressources Minières)**

**Essai de Cartographie numérique par télédétection sur la  
bordure nord du Haut Atlas central,  
Exemple du synclinal d'Ait Attab, Azilal, Maroc**

Par

**Karima ET-TAOUSSI**

Encadré par : **Pr. H. IBOUH**

*Soutenu le 28 Juin 2012 devant le jury composé de:*

**Mr. IBOUH H.** Professeur, Faculté des Sciences et Techniques  
**Mr. SAIDI A.** Professeur, Faculté des Sciences et Techniques  
**Mr. HAFID A.** Professeur, Faculté des Sciences et Techniques

*Année Universitaire 2011-2012*

## ***Résumé***

Le synclinal d'Aït Attab (région de Tadla Azilal), est situé sur la bordure nord du Haut Atlas Central, à environ 20 Km au Sud Ouest de la ville de Beni Mellal. Il présente une forme sigmoïde, fortement dissymétrique, avec un flanc Nord dilaté et un flanc Sud réduit.

Le traitement et l'interprétation de l'image satellite (LandSat TM), mettant en jeu des techniques de combinaison des bandes et de classification d'image, ont été couplés pour produire l'information nécessaire à l'établissement de la carte géologique.

Les techniques de rehaussement d'image à savoir l'analyse en composante principales et les filtres directionnels ont permis l'identification de la majorité des failles dans le synclinal d'Aït Attab, l'analyse des linéaments par télédétection (Shaded relief) a fait ressortir deux directions majeures, NE-SW et ENE-WSW, qui correspondent au réseau principal de faille observé dans cette région et parallèle aux deux directions principales du chevauchement frontale sur cet bordure nord.

La similitude quasi-totale entre les résultats obtenus pour les contours géologiques et les structures des traitements d'images d'une part et la carte géologique préexistante d'autre part, est un résultat donnant un aspect favorable pour l'utilisation de la télédétection en cartographie géologique.

**Mots Clés :** Télédétection ; Image satellite TM Landsat; Cartographie. Synclinal d'Ait Attab; Haut Atlas Central, Maroc.

## Remerciements

J'aimerais dans ces quelques lignes remercier toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué au bon déroulement de ce stage, tant au niveau humain qu'au niveau scientifique.

Je tiens tout d'abord à remercier le professeur **Hassan IBOUH**, mon encadrant de stage, pour m'avoir accueilli au sein du Laboratoire Géo-Sciences et Environnement de la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech. Je le remercie aussi pour l'intérêt qu'il a porté à mon stage, les conditions de travail qu'il m'a offertes et la confiance qu'il m'a accordée au cours de toute la période du stage.

Que **Les professeurs A. SAIDI et A. HAFID** trouvent dans ces lignes l'expression de mes sincères remerciements pour avoir accepté d'examiner mon travail et de faire partie des membres du jury.

Un grand merci à **Monsieur My El Hassan EL ALAOUI EL MOUJAHID** doctorant, au Laboratoire Géo-Sciences et Environnement de la Faculté des Sciences et Techniques Marrakech pour son aide et sa contribution effective dans l'élaboration de ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur **Ibrahim IGMOLAN** le chef du département de géologie, merci à tous les membres du département de géologie, à savoir professeurs, fonctionnaires, doctorants et stagiaires, pour leur gentillesse, leur amitié et leur serviabilité. Je leur souhaite tous de réussir et de continuer de travailler dans cette excellente ambiance.

Enfin, je ne saurais terminer ces lignes sans exprimer mes vifs remerciements à tous les membres de ma famille qui m'ont soutenu tout au long de mes études.

*K. Ettaoussi*  
*Le 25 / 06 / 2012*

# Sommaire

Résumé .....	2
Remerciements .....	3
Liste des figures .....	6
Liste des tableaux.....	7
Liste des abréviations.....	7
Introduction .....	8
Chapitre I : Généralités .....	9
I. Contexte géologique régional.....	10
I.1. Les domaines structuraux du Maroc.....	10
I.1.1. Domaine saharien et anti- atlasique.....	11
I.1.2. Domaines atlasique et mésetien .....	11
I.1.3. Domaine rifain .....	11
I.2. Le cadre géologique régional du Haut d' Atlas Central.....	12
I.3. Le contexte géographique du secteur .....	13
I.4. Le contexte géologique du synclinal d' Ait Attab .....	13
I.5. La succession verticale des dépôts .....	14
I.6. Aspect structural du synclinal d' Ait Attab .....	15
Chapitre II : Traitement d' Image Satellite Landsat TM et Cartographie Numérique .....	17
I. La Télédétection Spatiale .....	18
I.1. Définition .....	18
I.2. Principe et base physique de la télédétection.....	18
I.3. Le rayonnement électromagnétique .....	20
I.4. Le spectre électromagnétique .....	21
I.5. La signature spectrale .....	21
I.6. L' image satellite .....	22
Chapitre III : Traitements, Résultats & Cartographie du secteur d' Ait Attab.....	25
I. Matériel et données du travail.....	26
I.1. Données images .....	26
I. 2. Données cartographiques .....	27
II.2.1 Carte topographique .....	27
II.2.2 Carte géologique.....	28
II. Traitement de l' image .....	30
II.1. Les compositions colorées .....	30

II.1.1. Rôle de la couleur en traitement de l'imagerie spatiale.....	30
II.1.2. Les spaciocartes résultats de composés colorés des bandes corrélées et non corrélées. ....	32
II.2. Le Rehaussement spectrale de l'image d'Ait Attab (indices) .....	34
II.2.1 NDVI (Normalised differentiated vegetation index).....	35
II.2.2 Indice des minéraux argileux.....	35
II.3. Analyse en Composantes Principales (ACP) .....	36
II.4. Quelques traitements spécifique de rehaussement spectral .....	39
II.4.1. Decorrelation stretch (DCS) .....	39
II.4.2. Transformation de RGB en IHS .....	39
II.4.3. Tasseled-Cap (T-Cap).....	40
II.5. La classification et l'analyse de l'image du synclinal d'Ait Attab .....	41
II.5.1 Classification non supervisée (ou non dirigée) .....	42
II.5.2 Classification supervisée.....	43
II.6. Etude de la fracturation du synclinal d'Ait Attab .....	47
II.6.1 Extractions des linéaments.....	47
II.6.2 Les filtres directionnels de Sobel .....	47
II.6.3 Le relief ombré .....	47
II.6.4. Conclusion .....	49
Conclusions et Perspectives .....	53
Références bibliographiques .....	54

## Liste des figures

- Figure 1 :** Domaines structuraux du Maroc (ONHYM).
- Figure 2 :** Situation géographique du Haut Atlas marocain.
- Figure 3:** Contexte géologique du synclinal d'Ait Attab (Zounie 1996).
- Figure 4 :** Succession verticale des dépôts du synclinal d'Ait Attab (Rolley, 1977–1978).
- Figure 5:** A: Schéma structural de la bordure de l'Atlas de Beni Mellal et celui d'Afourer. B: Coupe du Synclinal d'Ait Attab (legend Figx) (Zouine1996).
- Figure 6 :** Principe de base de la télédétection.
- Figure 7 :** Principaux éléments de la télédétection (CTT).
- Figure 8 :** onde électromagnétique monochromatique (CTT).
- Figure 9 :** spectre électromagnétique (Bonn et Rochon, 1993).
- Figure 10 :** Signature spectrale de végétation arborée (CCRS).
- Figure 11 :** Caractéristiques d'une image satellite (CCRS/CCT).
- Figure 12:** Image multispectrale de quatre bandes.
- Figure 13:** Valeur radiométrique d'un pixel.
- Figure 14:** Scène entier de l'image Landsat couvrant le secteur d'étude.
- Figure 15 :** Modèle numérique de terrain.
- Figure 16 :** Carte topographique du Synclinal d'Ait Attab.
- Figure 17:** Carte géologique du Synclinal d'Ait Attab.
- Figure 18 :** Principe de combinaison des caractéristiques du milieu pour le zonage de l'espace en unités fonctionnelles.
- Figure 19 :** La spaciocarte du composé coloré des bandes corrélées 1, 2, 3.
- Figure 20:** La spaciocarte du composé coloré des bandes corrélées 1, 3, 7.
- Figure 21:** La spaciocarte du composé coloré des bandes non corrélées 6, 4, 7.
- Figure 22:** La spaciocarte du composé coloré des bandes non corrélées 1, 7,6.
- Figure 23:** La spaciocarte du composé coloré des bandes non corrélées 2, 4, 6.
- Figure 24:** Spaciocarte de NDVI (représentant la végétation : zones calires).
- Figure 25:** Spaciocarte de l'Indice d'Argile (concentration max dans les zones claire).
- Figure 26:** Résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) de 1 jusqu'à 7.
- Figure 27 :** Spaciocarte du traitement (DCS).
- Figure 28 :** La spaciocarte résultant de la transformation de RGB en IHS.
- Figure 29:** Spaciocarte correspondante au traitement T-Cap.
- Figure 30:** Spaciocarte de La classification non supervisée du Synclinal d'Ait Attab.
- Figure 31 :** Spaciocarte de la classification supervisée sur une image DCS.

**Figure 32 :** Spaciocarte de la classification supervisée sur le CC 176.

**Figure 33 :** Spaciocarte de la classification supervisée sur le CC 642.

**Figure 34:** Spaciocarte du relief ombré (Shaded relief) de l'image TM du Synclinal d'Ait Attab.

**Figure 35 :** Carte d'interprétation des linéaments extraite par le relief ombré dans le secteur d'étude.

**Figure 36 :** rosace directionnelle des linéaments extraits par la méthode du relief ombré.

**Figure 37 :** Mise en relief des failles de la carte géologique existante.

## Liste des tableaux

**Tableau 1:** Caractéristique des bandes Landsat TM.

**Tableau 2:** Caractéristiques de la carte géologique utilisée.

**Tableau 3:** Matrice de corrélation des valeurs spectrales des bandes Landsat TM.

**Tableau 4 :** Résultats des calculs statistiques des composantes principales.

**Tableau 5 :** Coefficients de la transformation Tasseled Cap appliqués pour la réflectance de l'image de TM (Crist, 1985).

**Tableau 6 :** Matrice de confusion de la classification.

## Liste des abréviations

B1, B2 : Basaltes.

BIG : Bulletin de l'information géographique.

CCT : Centre Canadien de Télédétection.

CCRS: Canada Centre for Remote Sensing.

IR: Infra-Rouge.

MNT : Model Numérique de Terrain.

GDEM: Global Digital Elevation Map.

ACP: Analyse en Composantes Principales.

DCS: Decorrelation Stretch.

RGB: Red, Green, Bleu.

RVB : Rouge, Vert, Bleu.

IHS : Intensity, Hue, Saturation.

T-Cap : Tasseled Cap.

CC : Composante Colorée.

TM : Thematic Mapper.

# Introduction

La cartographie désigne la réalisation et l'étude des cartes. Elle mobilise un ensemble de techniques servant à la production des cartes. La cartographie constitue un des moyens privilégiés pour l'analyse et la communication en géographie. Elle sert à mieux comprendre l'espace, les territoires et les paysages. Elle est aussi utilisée dans des sciences connexes, démographie, économie dans le but de proposer une lecture spatialisée des phénomènes.

Une carte est la projection d'une surface courbe telle qu'un ellipsoïde ou une sphère, ou une partie de cette surface, sur un plan. C'est ce qu'on appelle une projection cartographique. La carte géologique est la représentation sur un fond topographique, des terrains qui affleurent à la surface du sol. Pour obtenir une carte géologique d'une région, les géologues se sont basés sur l'observation et l'extrapolation raisonnée à partir d'informations incomplètes, et sur les méthodes conventionnelles. Ainsi les géologues effectuent un travail long, pénible et avec une marge d'erreurs remarquable.

Aujourd'hui, l'aviation moderne et les satellites ont apportés les possibilités d'utiliser les images satellites susceptibles d'améliorer la précision des cartes géologiques, surtout dans les zones d'accès difficile. Le traitement de l'image satellite permet de trouver ou de mettre en évidence certaines structures majeures, et des accidents à peine visible sur le terrain. Elle contribue aussi, et d'une manière efficace, à la réalisation et à l'amélioration des cartes géologiques.

Le travail présenté dans ce rapport est basé sur les apports de l'imagerie satellitaire, comme outil d'aide pour la cartographie géologique du synclinal d'Ait Attab situé dans le Haut Atlas central.

## Objectif du stage

L'objectif principal de ce travail est l'utilisation des images stellite Landsat TM dans un essai de cartographie géologique dans la région d'Ait Attab. Le choix de la cartographie numérique rentre dans les perspectives d'exploiter toute l'information numérique disponible pour la compilation des données cartographiques dans le Haut Atlas en général et dans la bordure nord en particulier.



# **Chapitre I : Généralités**

# I. Contexte géologique régional

## I.1. Les domaines structuraux du Maroc

Le Maroc, envahi à plusieurs reprises par les mers et dominé par les chaînes de montagnes, se présente comme une citadelle protectrice pour le continent africain en matière de paléontologie et porte une mémoire de plusieurs milliards d'années d'histoire géologique. Il est l'un des rares pays au monde où l'on peut trouver autant de témoins matérialisés par des terrains successifs qui se sont déposés à la surface de la terre depuis les temps les plus anciens jusqu'à l'actuelle (Extrait d'article Le Matin du 23-04-2012).

Le Maroc, par sa position géographique au Nord de l'Afrique et par le grand travail éventuel des formations géologiques qu'il présente, et qui s'échelonnent sur deux milliards d'années, offre un intérêt particulier pour les corrélations géologiques. Il est situé au Nord de l'Afrique qui constitue la bordure mesogéenne de la plate forme saharienne sous l'influence de la Tethys par l'ouest et l'Atlantique par l'est. Sur le plan structural, le Maroc montre trois domaines géographiques principaux qui englobent les cinq domaines structuraux connus au (fig. 1). Chaque domaine géographique est défini par sa morphologie, sa lithologie, ses structures, son âge et sa déformation.

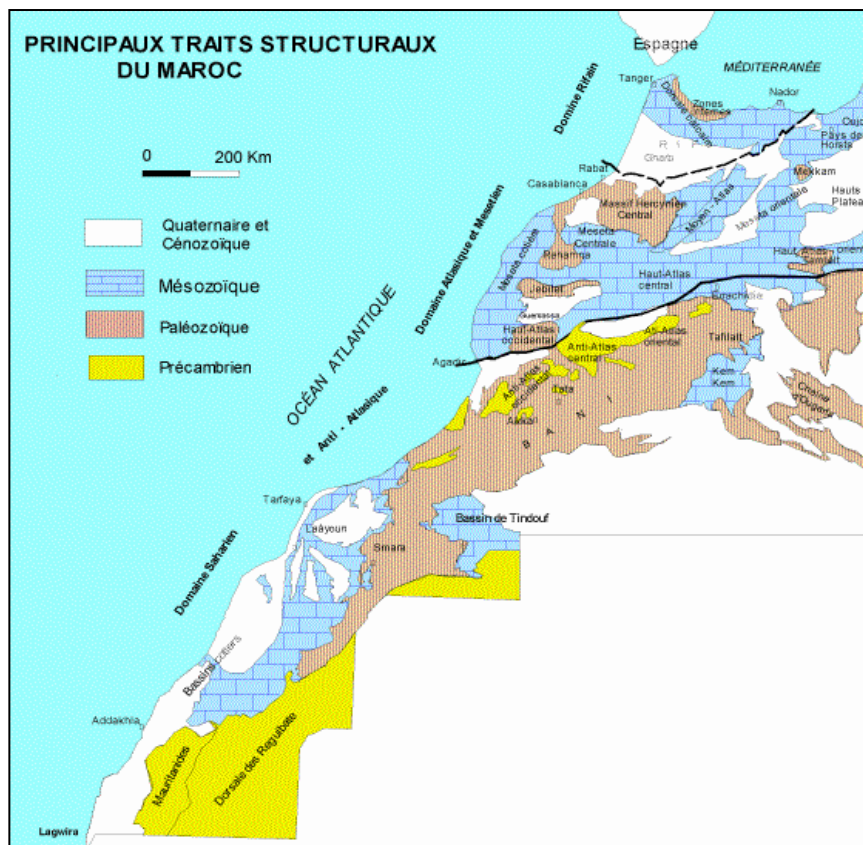


Figure 1 : Les principaux domaines structuraux du Maroc (ONHYM).

### **I.1.1. Domaine saharien et anti-atlasique**

Ce domaine est lié au bouclier ouest africain au Sud et limité par l'accident sud-atlasique au Nord qui passe au niveau d'Agadir et qui représente une petite déviation au niveau de Siroua. Il se rattache au domaine précambrien qui est structuré par les orogènes précambriennes. Autour de la méditerranée, deux régions ont été distinguées :

1) la plate forme saharienne qui est constituée de trois unités lithologiques et structurales, un socle précambrien, une série primaire et une couverture des terrains secondaires et tertiaires.

2) l'Europe du Nord où le précambrien affleure avec de grands boucliers : boucliers baltique et les boucliers ukrainiens. Ces régions sont stables depuis le précambrien.

### **I.1.2. Domaines atlasique et mésetien**

Il est compris entre la faille Sud atlasique et le Rif (Fig.1). Du point de vue morphologique, c'est un ensemble de chaînes de montagnes, de plateaux et aussi de plaines. Ce domaine a pour substratum le matériel de la chaîne hercynienne qui a été érodée à la fin du Primaire. Ce matériel hercynien affleure dans un certain nombre de massifs anciens et dans beaucoup de régions où il est caché sous la couverture secondaire et tertiaire et représenté par les mésétas occidentale et orientale.

Le domaine atlasique proprement dite est constitué de Moyen Atlas et du Haut Atlas. Les deux dernières montagnes font partie de la chaîne atlasique, formée au Tertiaire. C'est une chaîne intracontinentale (Mattauer, 1977), Elle s'étend du Maroc à la Tunisie et constitue l'avant-pays déformé de la chaîne rifo-tellienne. Les sédiments méso-cénozoïques, autochtones, sont faillés et plissés.

Les Meseta quant à elles, elles sont formées de plaines, de plateaux et de collines. Les terrains sont constitués d'une couverture méso-cénozoïque tabulaire et d'un socle paléozoïque plissé, métamorphisé, granité pendant la formation de la chaîne hercynienne. Elles sont représentées dans la Meseta occidentale et la Meseta orientale séparées par le Moyen Atlas.

### **I.1.3. Domaine rifain**

Situé en extrême nord du Maroc, le Rif montre trois zones distinctes du Nord au Sud : les zones internes, la zone des flyshs et les zones externes. Les zones internes sont représentés dans deux régions sur la côte méditerranéenne : entre Sebta et Jabha et dans les Bokkoya, individualisées au Mésozoïque entre l'Afrique et l'Europe et se composent de plusieurs unités

cristallines et sédimentaires. Le domaine des nappes des flyshs est constitué de séries sédimentaires détritiques déposées dans un bassin profond. Les zones externes correspondent à l'ancien sillon externe, établi sur la marge nord-africaine, comblé par d'épaisses séries mésozoïques et cénozoïques. Le domaine Rifain est affecté par une tectonique alpine majeure engendrant des nappes de glissement et de charriage chevauchante vers le sud.

## I.2. Le cadre géologique régional du Haut d'Atlas Central

Le Haut Atlas Central est l'une des grandes montagnes du globe. Long d'environ 800 km, épais de 35 à 110 km, il comprend quelques 10 sommets de plus de 4 000 m d'altitude, près de 100 de plus de 3 500 m et plus de 400 dépassants 3 000 m. L'Atlas d'Azilal est constitué d'un grand plateau calcaire du jurassique inférieur et moyen avec des synclinaux à cœur de remplis de couches rouges. Parmi ces synclinaux ceux de la région Aït Attab qui constituent le secteur de notre études.

Dans ces synclinaux, les couches rouges débutent généralement par la Formation des Guettioua du Jurassique moyen (Bathonien). Celle-ci est constituée de sédiments fluviaux de plaine alluviale essentiellement terrigènes (grès, silts et marnes) avec des lentilles conglomératiques à dinosauriens et à plantes (Monbaron, 1983 ; Monbaron *et al.*, 1999 ; Haddoumi *et al.*, 2002), et des coulées basaltiques B1 à son sommet.

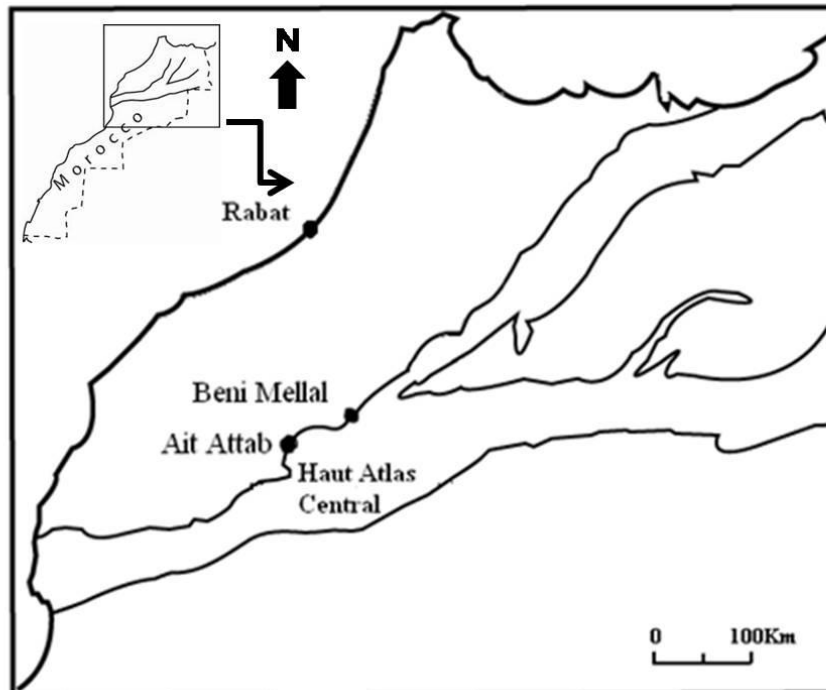


Figure 2 : Situation géographique du Haut Atlas marocain.

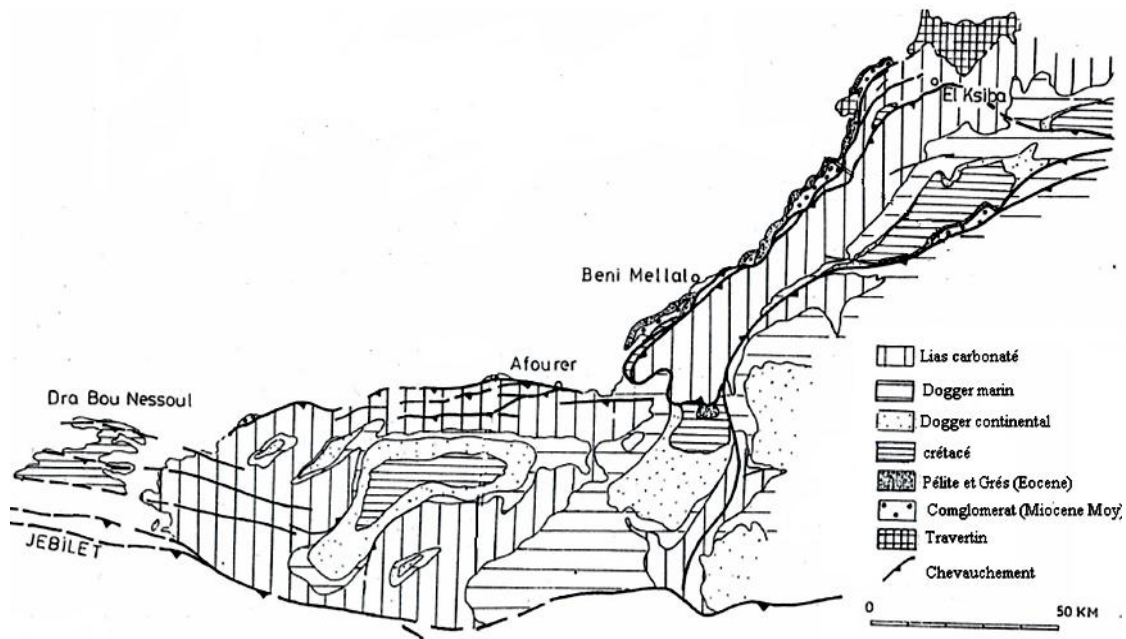
### I.3. Le contexte géographique du secteur

Le synclinal d'Ait Attab (région de Tadla Azilal), le secteur étudié dans ce travail, est situé sur la bordure nord du Haut Atlas Central, à environ 20 Km au Sud Ouest de la ville de Beni Mellal (Fig. 2).

### I.4. Le contexte géologique du synclinal d'Ait Attab

Le Haut Atlas Central est caractérisé par une épaisse série calcaro-dolomitique (Lias et Bajocien) qui affleure presque en continu sur l'ensemble du chaînon. Cette série est surmontée, au cœur des principales cuvettes synclinales, de « couches rouges » du Bathonien au Crétacé parfois coiffées de formations marines du Crétacé supérieur et paléocènes dont l'extension est toutefois limitée aux bordures nord et sud.

Le tronçon atlasique compris entre Demnat, Beni Mellal et Aghzifene, appelé ici Atlas Beni Mellal est constitué de l'Atlas d'Afourer (Rolley, 1973), de l'Atlas de Beni Mellal (Monbaron, 1982) et de celui d'EI-Ksiba (Benzaquen, 1963). Du point de vue paléogéographique il correspond, au Trias, à la zone de relais entre les sillons moyen-atlasique et haut fond de la Moulouya. A l'Ouest de ces sillons atlasiques, les Jebilet sont émergés du Lias jusqu'au Kimméridgien inférieur, cette paléogéographie semble avoir été contrôlée par des directions structurales E-W (Jebilet, sud-Moulouya), SW-NE (Atlas d'Afourer, de Beni Mellal, d'EI-Ksiba, et Moyen-Atlas), mais aussi NW-SE (accident de Demnat, le Marrec et Jenny, 1980).



**Figure 3:** Contexte Structural du synclinal d'Ait Attab (Zouine 1996).

## **I.5. La succession verticale des dépôts**

La succession verticale des dépôts du synclinal d'Ait Attab montre du bas en haut (Fig. 4): Les dolomies et les calcaires dolomités du Lias moyen qui clôturent le premier cycle sédimentaire marin du Haut Atlas central. Ils sont surmontés par des « Marnes chocolat » (= Formation d'Azilal ; Jenny, 1988) qui représentent un faciès de bordure du sillon atlasique (du Dresnay, 1971), d'âge Toarcien-Aalénien.

Les marnes sont à leur tour surmontées par une double corniche calcaire avec une dépression médiane. Il s'agit des « Calcaires-corniches », dépôts de la plateforme marine de la formation de Bin El Ouidane. Sur cette dernière on a la formation de Tillouguite qui est représentée aussi par des calcaires. Sur ces calcaires repose le grès de Guettioua. La base de la Formation des Iouaridène est marquée par les basaltes B1, coiffant la Formation des Guettioua, et qui sont recouverts d'un niveau dolomitique remaniant localement des éléments basaltiques. À une dizaine de mètres au-dessus, cette formation présente une succession de séquences silts/marnes lie-de-vin, dont la dernière se termine par un horizon calcaro-dolomitique en plaquettes. Les niveaux marneux situés de part et d'autre de ce calcaire ont fourni des fragments osseux. La Formation du Jbel Sidal sus-jacente forme le toit de la formation des Iouaridène et se développe essentiellement, voire exclusivement, durant le Barrémien supérieur. Les coulées basaltiques B2 sont datées corrélativement dans ce synclinal de la limite Barrémien inférieur/Barrémien supérieur. Cette dernière est surmontée à son tour par les calcaires d'Ait Tafelt, ensuite on a la formation d'Ouaouizarht, enfin le log se termine par la formation des calcaires d'Ait Attab d'âge Cénomano-turonien (fig.4).

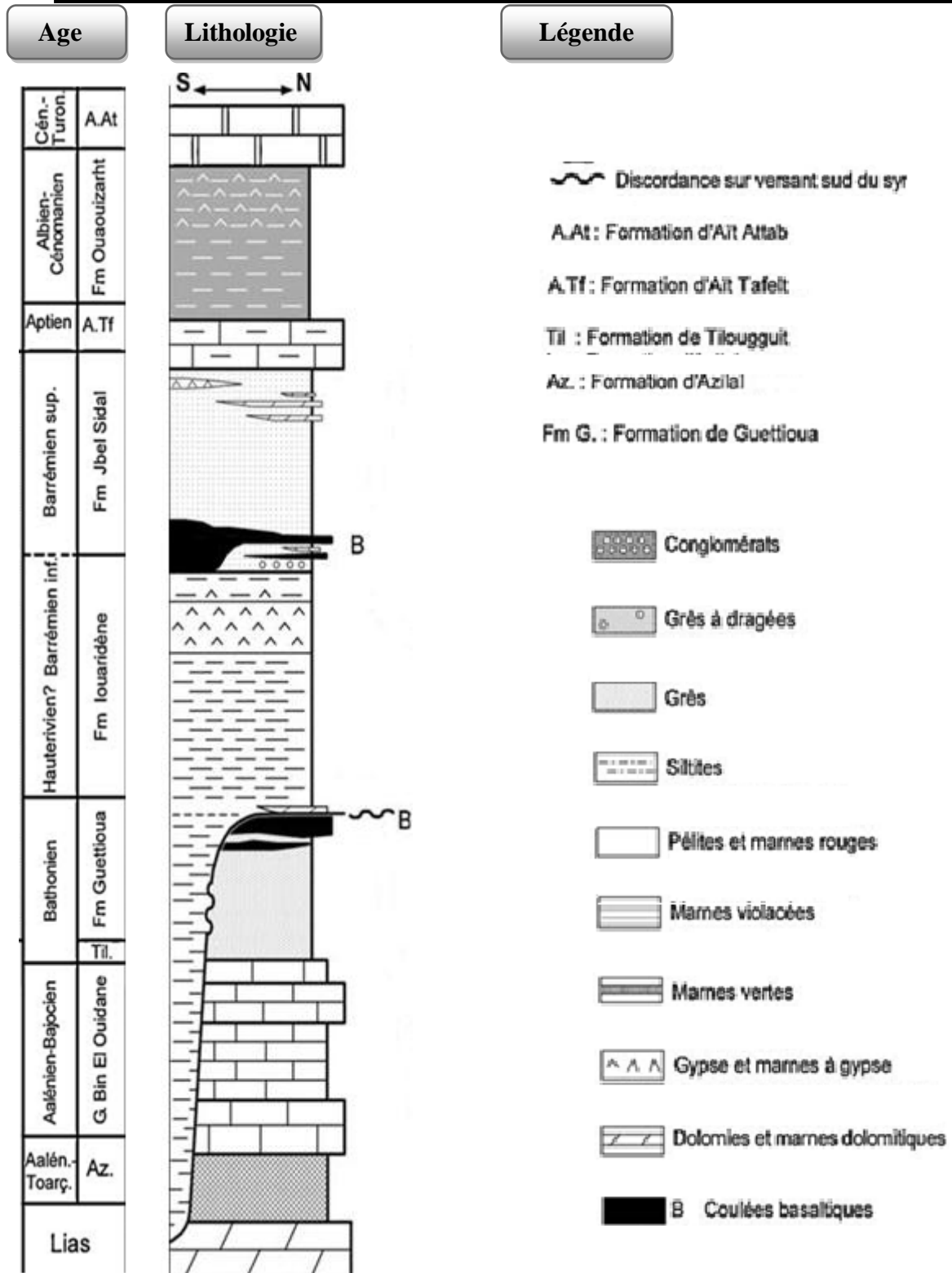
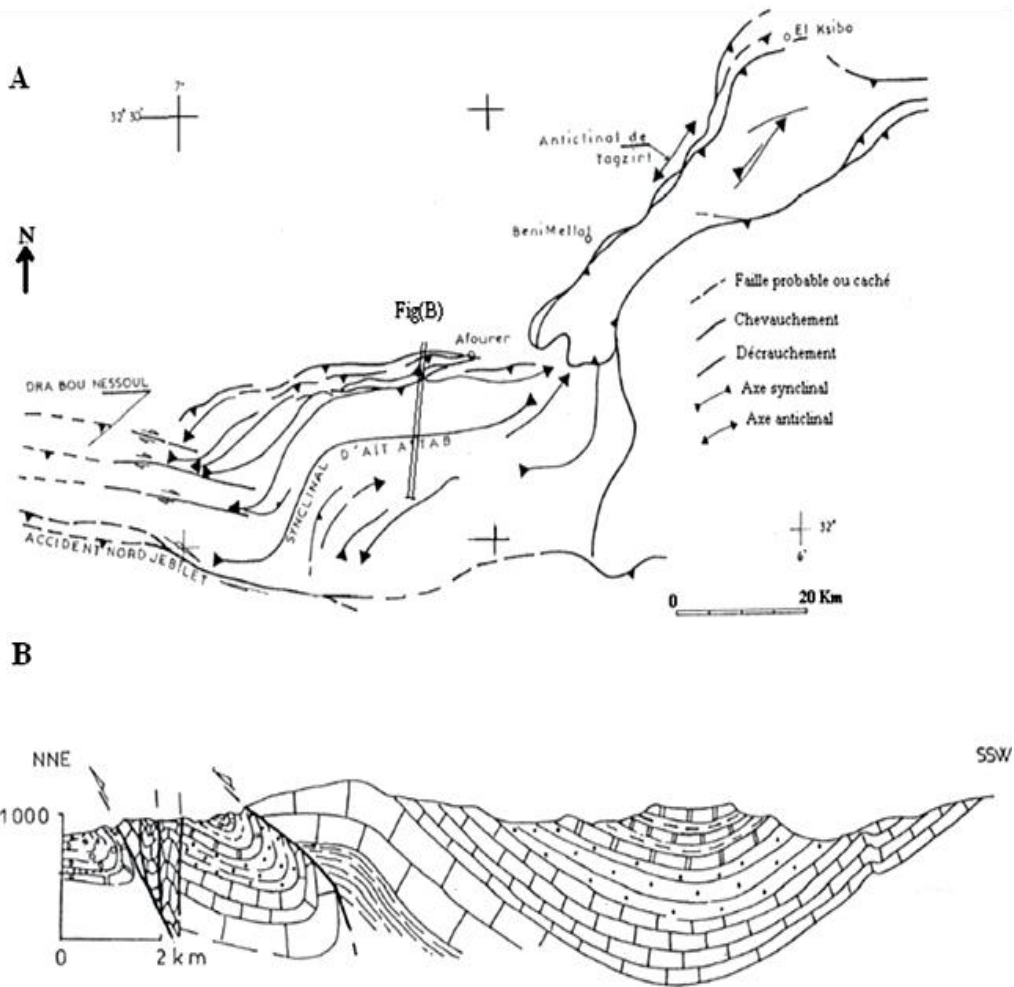


Figure 4 : Succession verticale des dépôts du synclinal d'Ait Attab (Haddoumi 2010).

### I.6. Aspect structural du synclinal d'Ait Attab

La bordure Nord du Haut Atlas central est marquée par le développement de chevauchement à vergence Nord, de direction E-W dans l'Atlas d'Afourer et NW-SE dans celui de Beni Mellal. L'Atlas d'Afourer montre un système de failles N100 à N120, obliques

par rapport au contact frontal à vergence Nord ou Sud. En ce qui concerne les plis, ce sont des larges cuvettes à fond plat que séparent d'étroits anticlinaux à cœur faillé. La direction des plis est E-W au voisinage du contact frontal et devient NE-SW au Sud de celui-ci. Ceci confère aux plis une allure en 'S' caractéristique du secteur (Rolley, 1973), dont la plus importante est celle d'Ait Attab. L'extrémité Sud du Synclinal d'Ait Attab dessine un méga crochon dextre au voisinage d'un accident de même direction (N110) et qui se localise dans la continuité de l'accident de socle Nord-Jbilet. La disposition des plis est également compatible avec une composante décrochant dextre d'un accident de direction moyenne N100 à N120.



**Figure 5:** A: Schéma structural de la bordure de l'Atlas de Beni Mellal et celui d'Afouer. B: coupe du Synclinal d'Ait Attab (même légende que Fig. 3) (Zouine, 1996).



## **Chapitre II : Traitement d'Image Satellite**

### **Landsat TM et Cartographie Numérique**

# I. La Télédétection Spatiale

## I.1. Définition

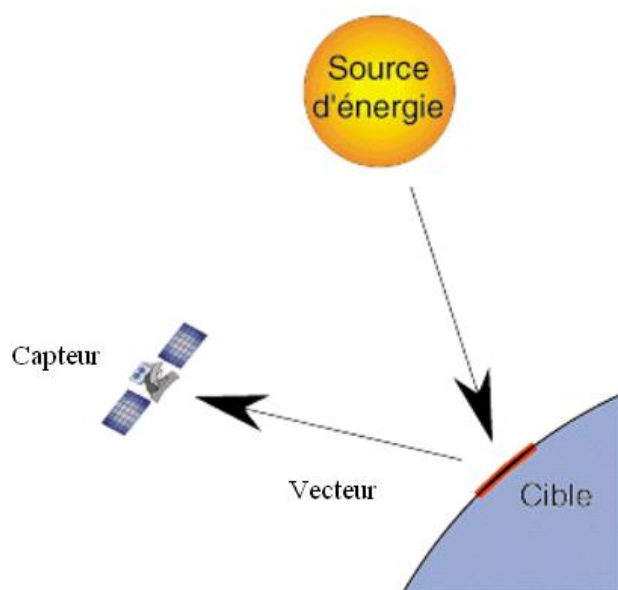
La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la terre sans contact direct avec celle-ci.

La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par la surface de la terre, à traiter et à analyser pour extraire l'information.

C'est une science qui permet de photographier la terre à distance. Dans ce cas, elle mesure et permet d'étudier la réponse spectrale de l'état de surface du sol en fonction de la longueur d'onde électromagnétique utilisée.

## I.2. Principe et base physique de la télédétection

La télédétection est le résultat de trois éléments fondamentaux : une source d'énergie, une cible et un vecteur (fig. 6).



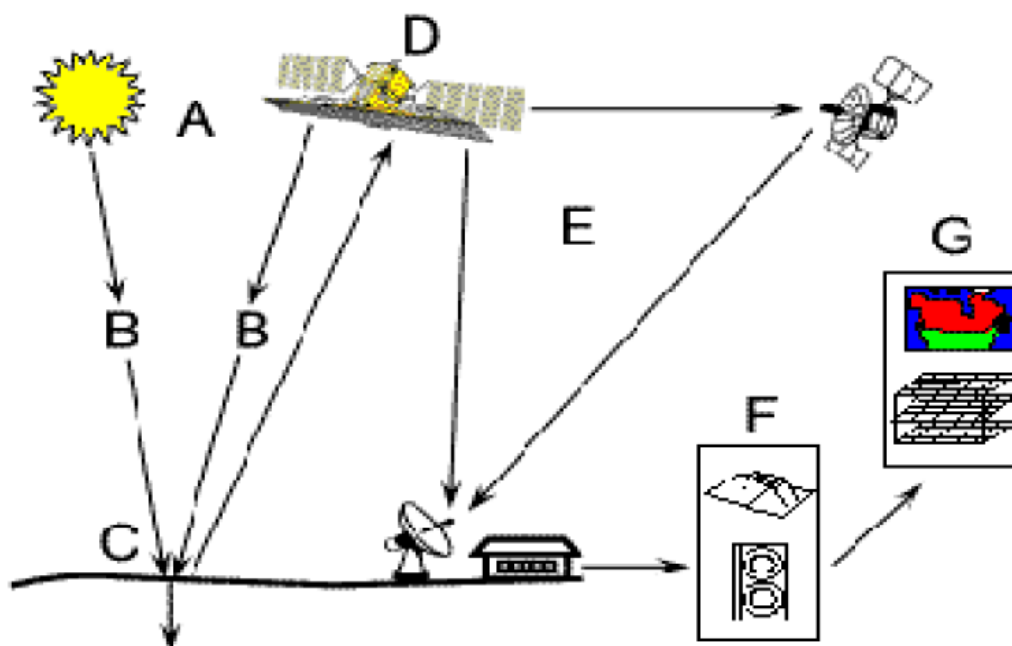
**Figure 6** : Principe de base de la télédétection (BIG3, Université d'Antananarivo).

- **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 la majorité des cas, la source d'énergie est le soleil (La télédétection passive). Néanmoins, la technologie RADAR nécessite qu'un

émetteur soit embarqué sur le satellite, dans ce cas le satellite lui-même est source d'énergie (La télédétection active). 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.

- **Le vecteur** : ou plate-forme de télédétection mesure l'énergie solaire (rayonnement électromagnétique) réfléchi par la cible. Le vecteur peut-être un satellite ou un avion, dominant la cible de quelques centaines de mètres à 36 000 kilomètres. Les capteurs embarqués sur le satellite mesurent le rayonnement électromagnétique réfléchi, puis un émetteur renvoie l'image sur terre vers des stations de réception (BIG3 : Université d'Antananarivo).

De manière plus détaillée la télédétection est schématisée comme un ensemble de sept étapes clés (fig. 6)



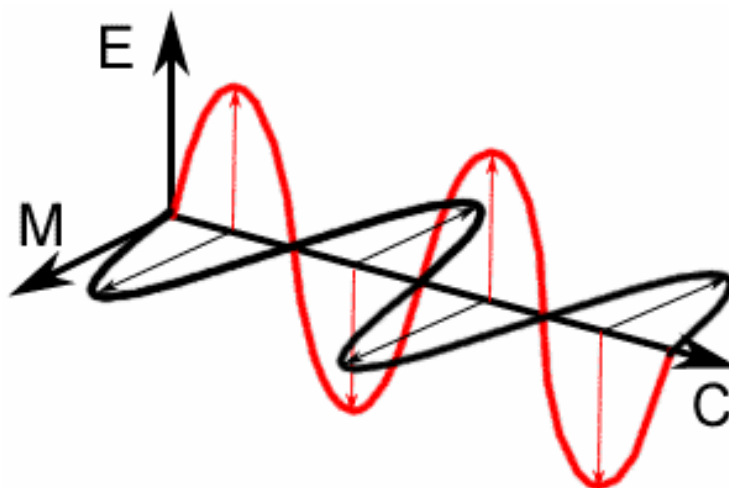
**Figure 7 : Principaux éléments de la télédétection. (CCT)**

- **(A) source d'énergie** : tout processus de télédétection à nécessairement besoin d'une source pour illuminer la cible. Le plus souvent, voire dans la presque totalité des cas, cette source d'énergie est le soleil.
- **(B) rayonnement et atmosphère** : Durant son trajet entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère.
- **(C) interaction avec la cible** : 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.

- **(D) enregistrement de l'énergie par le capteur** : pour être enregistrée sous format numérique, l'énergie diffusée ou émise par la cible, doit être captée à distance par un capteur embarqué au bord d'un satellite.
- **(E) transmission, réception et traitement** : cette information 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.
- **(F) interprétation et analyse** : pour extraire l'information recherchée, il faut une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée.
- **(G) application** : cette 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 découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

### I.3. Le rayonnement électromagnétique

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 (fig.8). (Dans le vide  $C = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ). Deux propriétés principales caractérisent une onde électromagnétique : sa longueur d'onde et sa fréquence. La longueur d'onde est la distance entre deux points homologues (deux crêtes ou deux creux) noté  $\lambda$  (m). La fréquence est le nombre d'oscillations par unité de temps qu'on note  $\nu$  (nombre oscillations/s ou Hertz (Hz)).



**Figure 8** : Onde électromagnétique monochromatique. (CCT, <http://www.es.e.u-psud.fr/>)

## I.4. Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique est le résultat de la décomposition du rayonnement électromagnétique en ses fréquences constituantes. Il s'étend des courtes longueurs d'onde (rayon gamma et rayon X) aux grandes longueurs d'ondes (micro-onde et onde radio) (fig. 9).

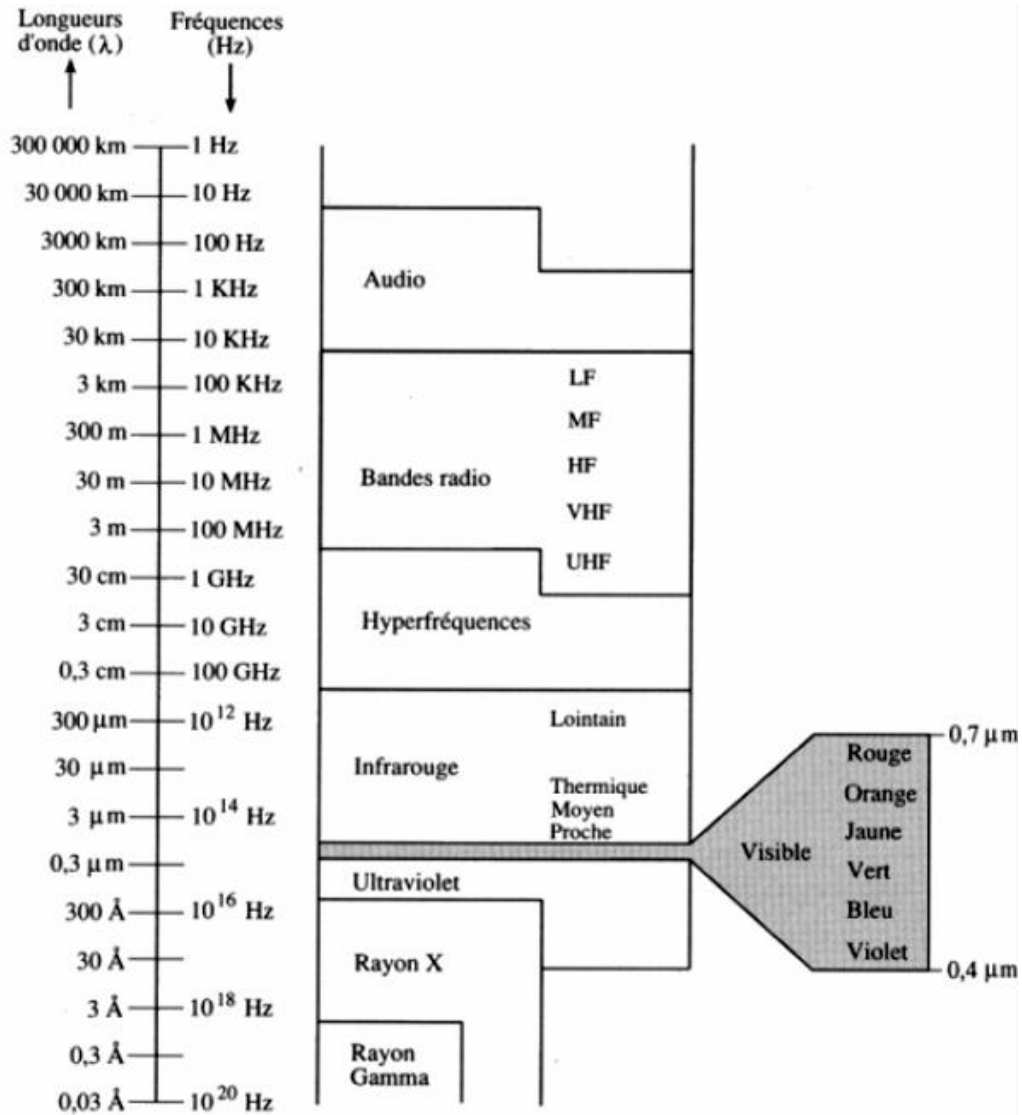
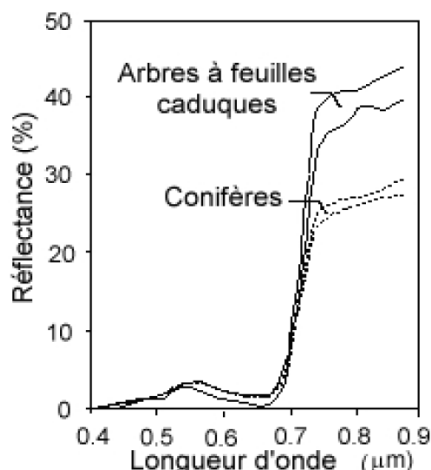


Figure 9 : Le spectre électromagnétique (Bonn et Rochon, 1993).

## I.5. La signature spectrale

La signature spectrale d'un objet au sol correspond aux courbes des réponses des objets irradiés par une source lumineuse donnée. Elle représente les mesures quantitatives des propriétés spectrales des objets dans une ou plusieurs bandes spectrales.



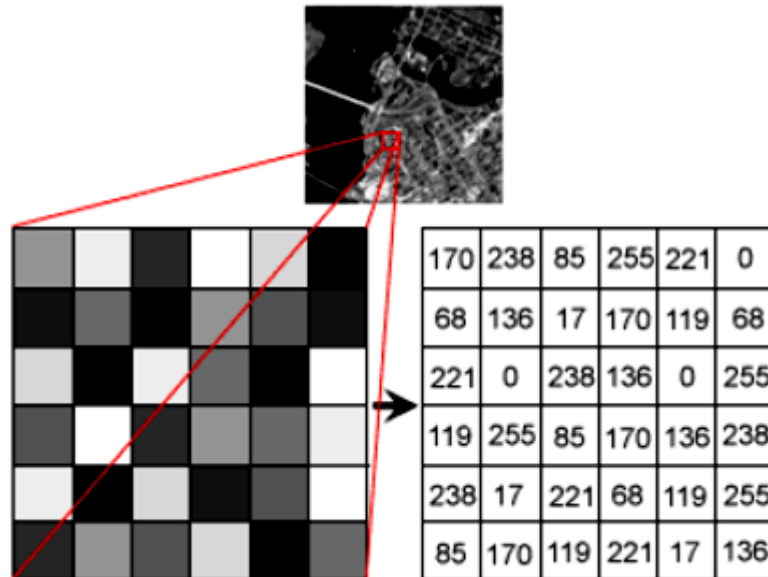
**Figure 10** : Exemple de signature spectrale de végétation arborée (CCRS).

## I.6. L'image satellite

Une image satellite est une représentation graphique, en vue de dessus, d'une zone assez vaste de la Terre. La particularité de cette image est qu'elle est prise par un capteur, en plusieurs bandes; sur un satellite placé en orbite autour de la planète. C'est une image numérique, traitée par outil informatique, élaborée à partir des signaux transmis par un satellite. On distingue une image mono-spectrale et une image multispectrale.

L'image numérique mono-spectrale est sous forme d'une matrice ou tableau avec L ligne et C colonne divisé en éléments de taille fixe appelés pixels (représentés par une série de bits), ayant chacun comme caractéristique un niveau de gris ou de couleur prélevé à l'emplacement correspondant dans l'image réelle (fig.11).

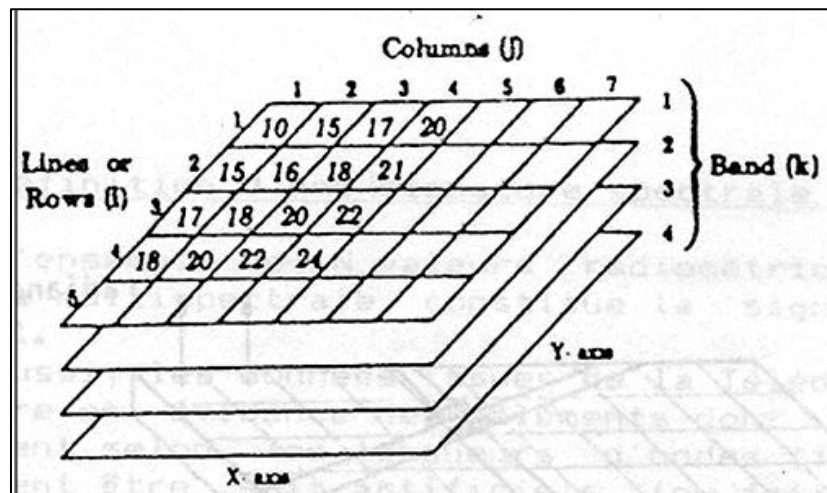
En effet, une image satellite représente en moyenne une scène de dimension variable selon les satellites (60km de côté pour le Capteur de Spot et 185 Km de côté pour les capteurs du satellite Landsat). La résolution des images joue un rôle important, la précision d'un pixel peut aller de 20 à 30 mètres en couleur jusqu'à 1 ou 2 mètres en noir et blanc. Ceci dépend de l'altitude du satellite mais aussi des performances des capteurs.



**Figure 11 :** Caractéristiques d'une image satellite (CCRS/CCT).

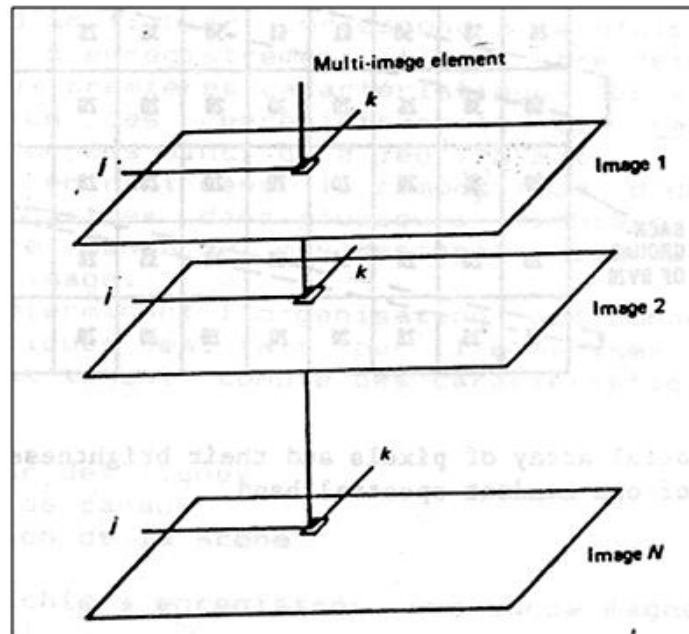
L'image multispectrale est l'ensemble de  $N$  images numériques mono-spectrales issue de  $N$  canaux correspondants à une acquisition des  $N$  bandes spectrales dont chaque bande correspond à un interval radiométrique différents.

Dans une image multi-spectrale la valeur radiométrique d'un pixel  $x$  est toujours de coordonnée  $x$  ( $l, c, k$ ) ou  $k$  est le numéro du canal.



**Figure 12:** Schéma montrant une image multispectrale de quatre bandes.

A ce stade les données sont enregistrées, numérisées et stockées sur bandes magnétiques sous formes d'un quadrillage de pixels, une valeur 0 à 255 niveaux de gris (codage informatique à base de  $8 \text{ bit} = 2^8$ ) étant attribuée à chacun de ces derniers. Si les données ont été saisies avec un système imageur, on peut les restituer sous forme d'image sur un moniteur.



**Figure 13:** Schéma montrant la valeur radiométrique d'un pixel sur image multi-spectrale.

La bande magnétique est lue par un ordinateur capable de déchiffrer la structure des données afin de situer les valeurs des pixels dans leur position géographique respective.



## **Chapitre III : Traitements, Résultats & Cartographie du secteur d'Ait Attab**

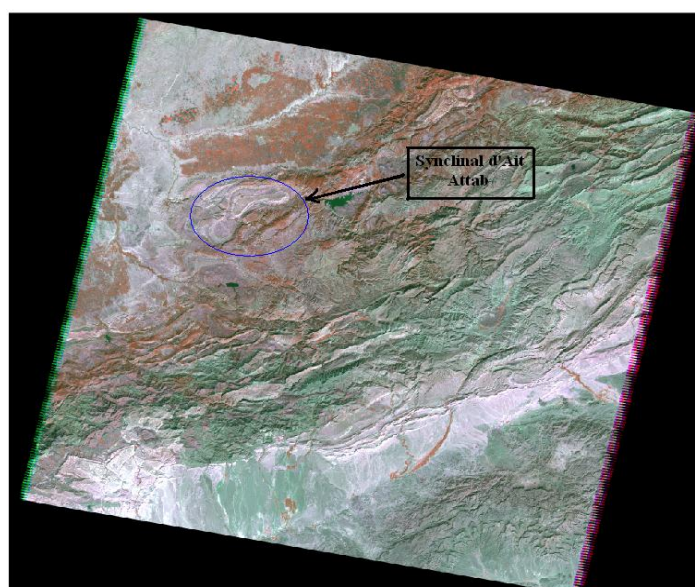
## I. Matériel et données du travail

### I.1. Données images

Les données de Télédétection utilisées est une image satellite de type Landsat 4 TM basse résolution de référence (L5201038\_3820091111) Télécharger du site de la Nasa (<http://glovis.com>) c'est une scène de 185/185 km, dont la diversité des canaux fournit à l'interprète une multitude d'informations à manipuler, l'image utilisée (fig.14) est constituée de 7 bandes où leur description est représentée dans le tableau (tab.1), Cette image a été prise le 11 Novembre 2009, elle couvre le Haut Atlas central avec une superficie considérable.

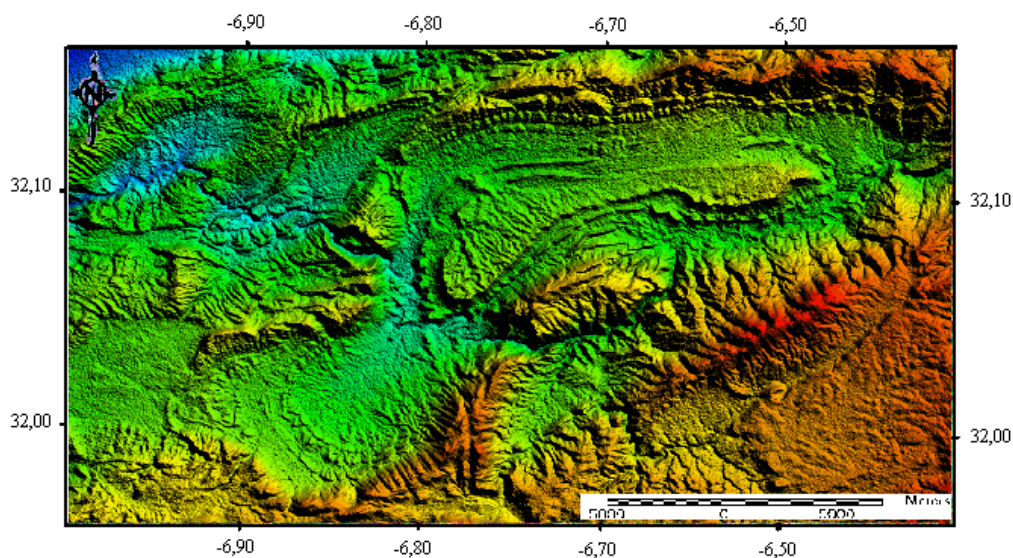
Bandes	Longueur d'ondes	Résolution Spatial	Bandes Spectrale
TM1	0,45-0,5 $\mu$ m	30m	Bleu
TM2	0,52-0,6 $\mu$ m	30m	Vert
TM3	0,63-0,69 $\mu$ m	30m	Rouge
TM4	0,75-0,9 $\mu$ m	30m	IR proche
TM5	1,5-1,7 $\mu$ m	30m	IR moyen
TM6	10.4-12.5 $\mu$ m	60m	IR thermique/lointain
TM7	2.08-2.35 $\mu$ m	30m	panchromatique (vert-rouge-IR)

**Tableau 1:** Caractéristique des bandes spectrales.



**Figure 14:** Situation du secteur d'études sur la Scène entière de l'image Landsat couvrant le secteur le Haut Atlas central.

Parmi les données utilisées, le modèle numérique de terrain MNT ou GDEM téléchargé aussi gratuitement sur internet à partir du site internet ASTER. Il à une résolution de 30m et géoréfrencie dans le Datum WGS84 et que nous avons reprojété en projection Lambert conique conforme et Datum Merchich (Fig.15).



**Figure 15 :** Modèle numérique de terrain du secteur d'étude

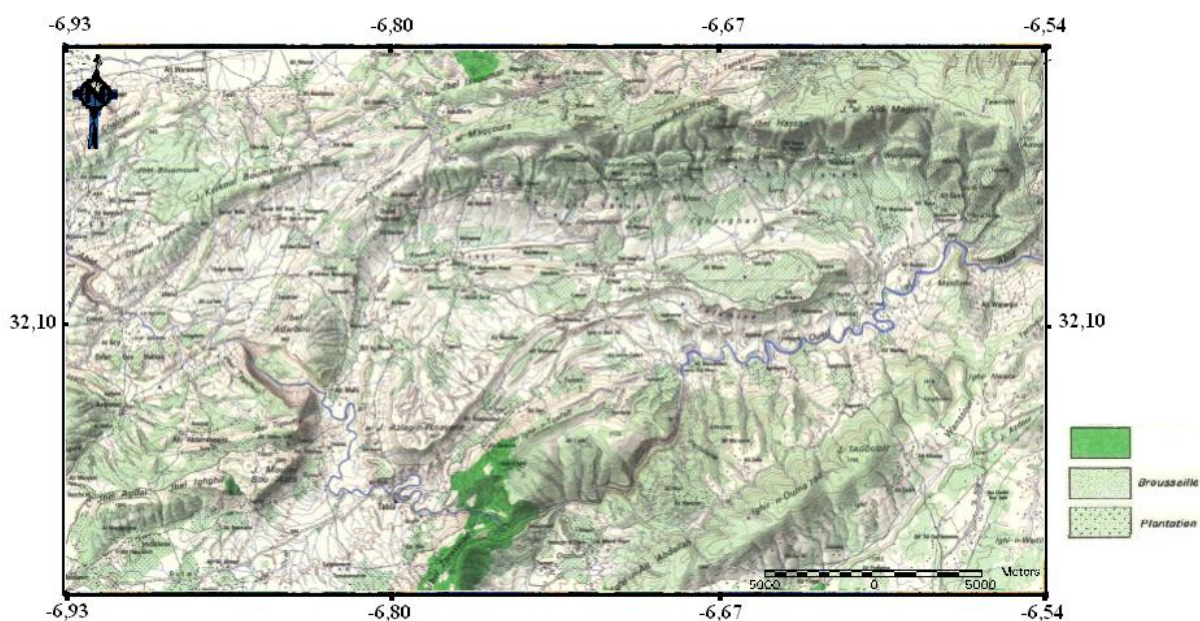
### ➤ **Logiciel**

Le traitement de l'image a été réalisé à l'aide du logiciel « **ERDAS Imagine 9.2** », c'est un logiciel de référence utilisé pour le traitement de l'image satellite, sa série complète d'outils, sa simplicité d'utilisation et son apprentissage rapide servent à créer rapidement l'imagerie rectifiée nécessaire à l'amélioration des informations cartographique. Le traitement de L'MNT pour extraire les courbes de niveau du secteur d'étude a été effectué sur deux autres logiciels de cartographie : Global Mapper et Surfer.

## **I. 2. Données cartographiques**

### **II.2.1 Carte topographique**

La carte topographique utilisée pour ce travail et qui est représentée sur la figure 16, est une carte dressée, dessinée et publiée par la division de la carte en 1974, elle est extraite de la carte topographique d'Afourer au 1/100000.



**Figure 16 :** Extrait de la carte topographique d’Afourer au 1/100 000 montrant le secteur d’étude (Synclinal d’Ait Attab).

### II.2.2 Carte géologique

Le seul document cartographique montrant les détails géologiques du secteur d’étude de la carte géologique d’Afourer au 1/00 000, (Tabelau 2 et Fig.17).

<b>Titre</b>	<b>La carte géologique d’Afourer</b>
<b>Echelle</b>	<b>1/100000</b>
<b>Edition</b>	<b>Service Géologique Du Maroc</b>
<b>Notes et mémoires</b>	<b>N° 247</b>
<b>Date de Publication</b>	<b>1977</b>

**Tableau 2:** Caractéristiques de la carte géologique utilisée.

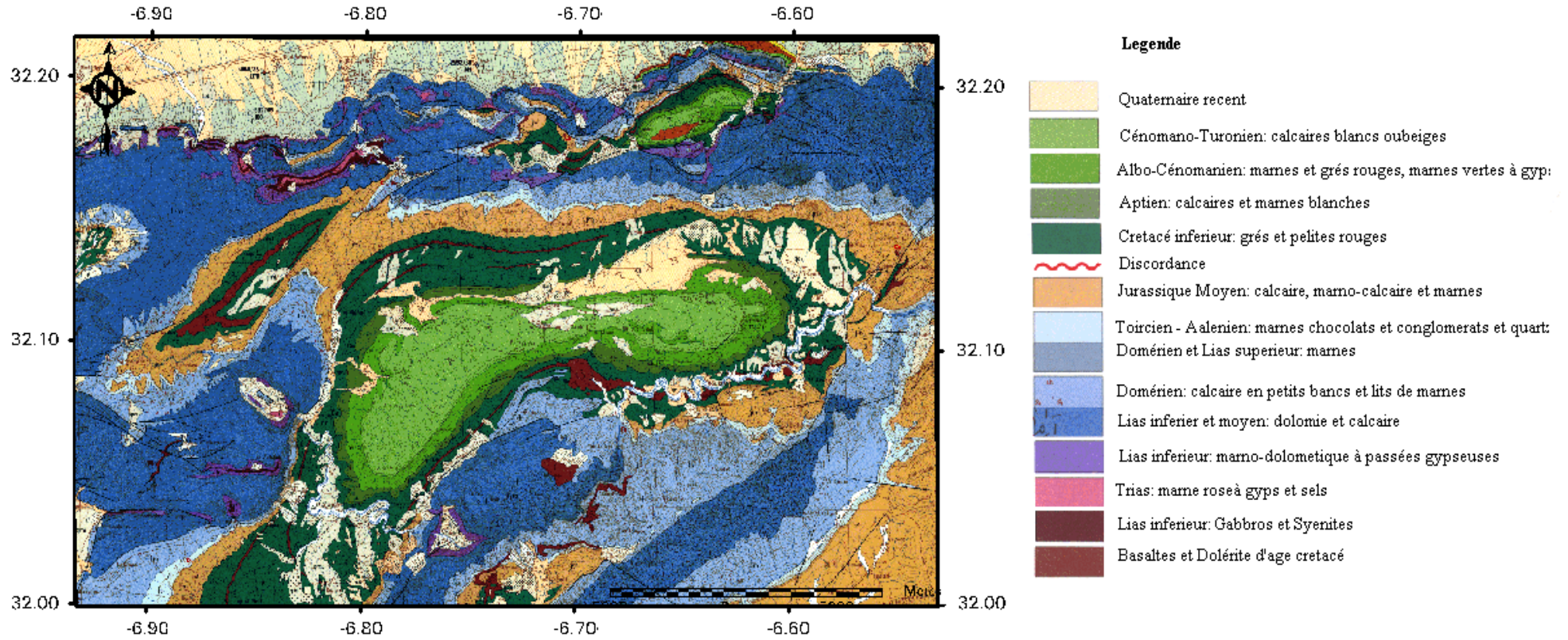


Figure 17: Extrait de la carte géologique au 1/1000 000 montrant le secteur d'étude (Rollley, 1977).

Avant les traitements, toutes les cartes ont été géoreférencées et reprojetées à l'aide du logiciel Erdas, en projection Lambert Conique Conforme et Datum Merchich, pour permettre de trouver et de localiser les points et les parcours communs à la fois sur la carte topographique, géologique et éventuellement l'image satellite.

## II. Traitement de l'image

Le traitement d'images est l'ensemble des techniques ayant pour but la modification des caractéristiques chromatiques des pixels de l'image, le traitement d'images est souvent synonyme d'amélioration de la qualité visuelle des images qui a pour but l'obtention d'une plus grande lisibilité et interprétation visuelle. Il n'y a pas de création d'informations, mais c'est une mise en évidence de l'information pertinente déjà présente.

### II.1. Les compositions colorées

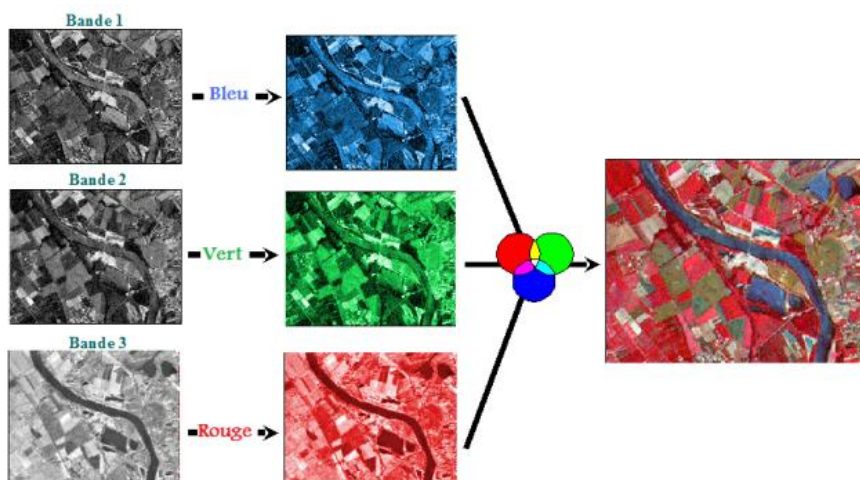
Les compositions colorées permettent de produire des images en couleurs en tenant compte de la signature spectrale des objets. Elles sont fréquemment utilisées pour faire ressortir les différents types de surface sur les images multispectrales ou mettre en évidence certains phénomènes environnementaux, comme les feux de forêts, les vents de sable, les glaces de mer, et particulièrement les thèmes d'occupation du sol pour la carte géologique.

#### II.1.1. Rôle de la couleur en traitement de l'imagerie spatiale

En traitement de l'imagerie numérique, la couleur sert avant tout à distinguer les différents objets présents dans les images et ainsi faciliter l'interprétation de ces dernières. Il est possible d'utiliser un nombre restreint de couleurs si l'objectif est de mettre seulement en avant quelques objets dans une image. Mais la plupart du temps, et notamment lorsqu'on travaille avec des compositions colorées, on manipule un très grand nombre de couleurs. Selon les applications, différentes compositions colorées ont été effectuées :

- Soit des compositions appelées « **Vraies couleurs** » elles sont utilisées pour rendre les images réalistes. C'est ce que les yeux peuvent observer s'ils étaient à la place du capteur satellitaire.
- Soit des compositions « **Fausses couleurs** », qui ne représente pas les couleurs réelles, mais qui ont pour but de mettre en avant certains objets dans une image, à l'instar des images infrarouges fausses couleurs très utilisées pour l'étude de la végétation. Dans tous les cas, les compositions colorées vont générer un très grand nombre de couleurs.

Afin de pouvoir manipuler correctement les couleurs, il est indispensable de disposer de moyens standards pour spécifier ou bien pour choisir une couleur parmi toutes celles disponible.



**Figure 18 :** Principe de combinaison des bandes (Fotsing, Maison de la télédétection).

Lorsqu'on réalise une composition colorée en combinant au minimum trois bandes spectrales, l'objectif est bien de tirer le maximum d'information de l'image et de rendre l'analyse et l'interprétation visuelle plus aisées. La combinaison des bandes est faite en se basant sur le principe de corrélation des valeurs spectrales des bandes (Tab.3).

Bandes TM+	1	2	3	4	5	6	7
1	1						
2	0,93	1					
3	0,97	0,97	1				
4	0,83	0,86	0,88	1			
5	0,84	0,93	0,91	0,88	1		
6	0,63	0,67	0,64	0,63	0,66	1	
7	0,83	0,94	0,91	0,84	0,98	0,68	1

**Tableau 3:** Matrice de corrélation des valeurs spectrales des 7 bandes Landsat TM utilisées dans ce travail.

### II.1.2. Les spaciocartes résultats de composés colorés des bandes corrélées et non corrélées.

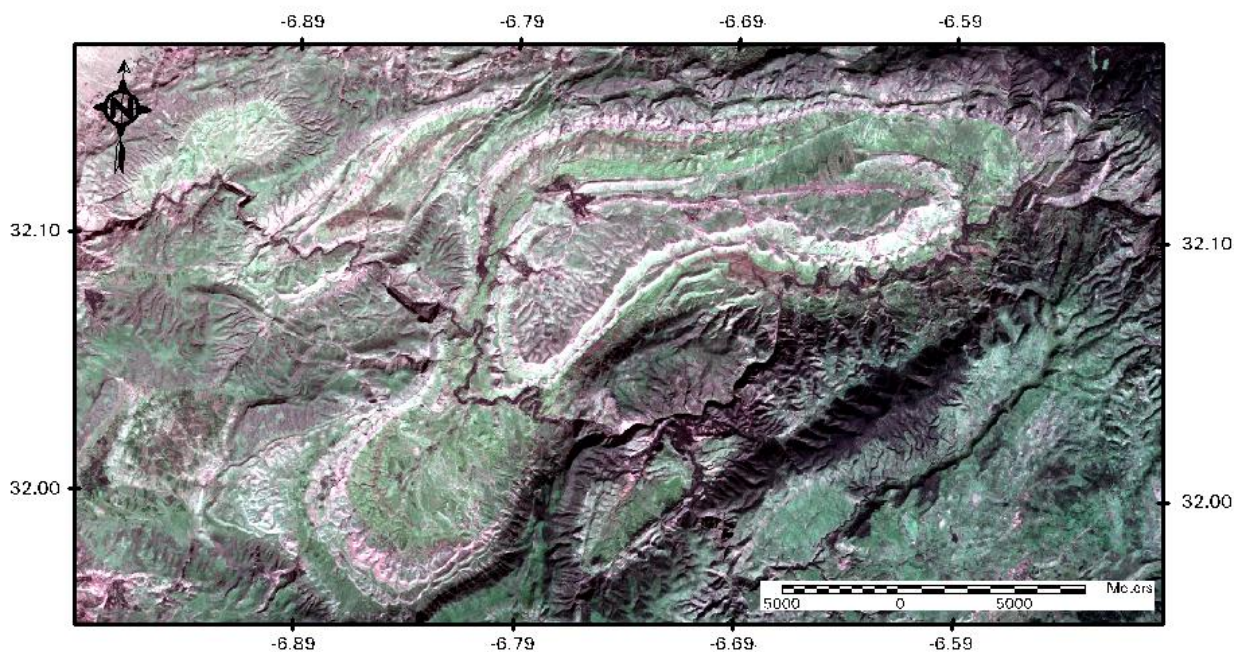


Figure 19 : La spaciocarte du composé coloré des bandes corrélées 1, 2, 3.

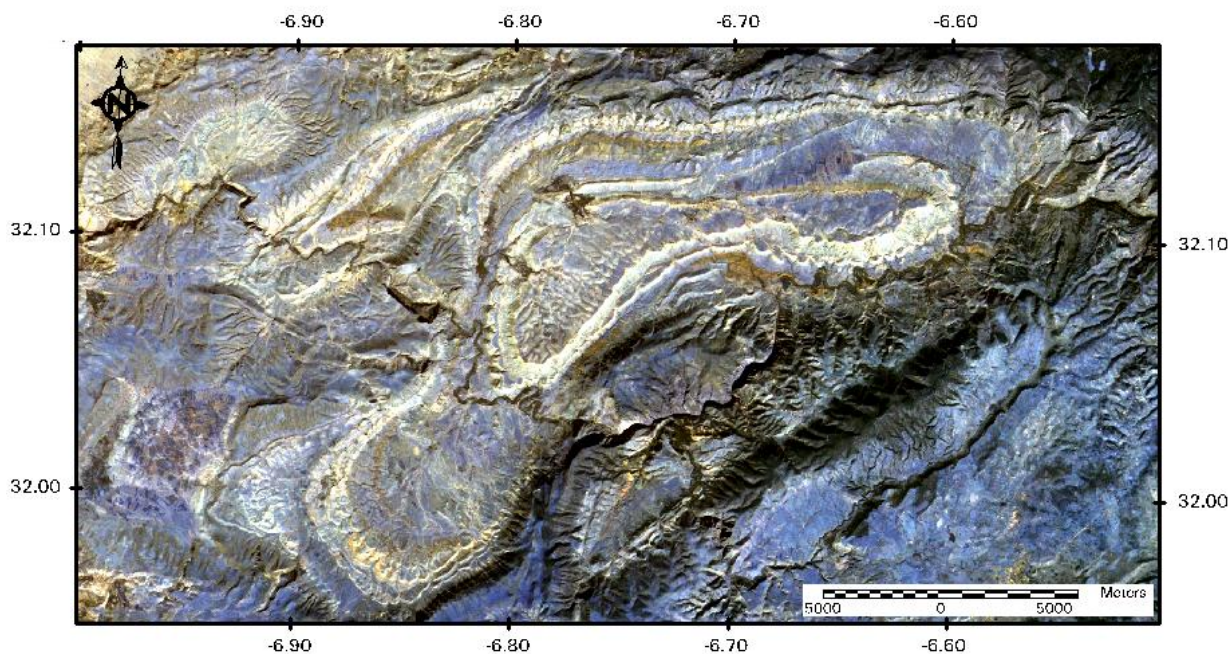


Figure 20: La spaciocarte du composé coloré des bandes corrélées 1, 3, 7.



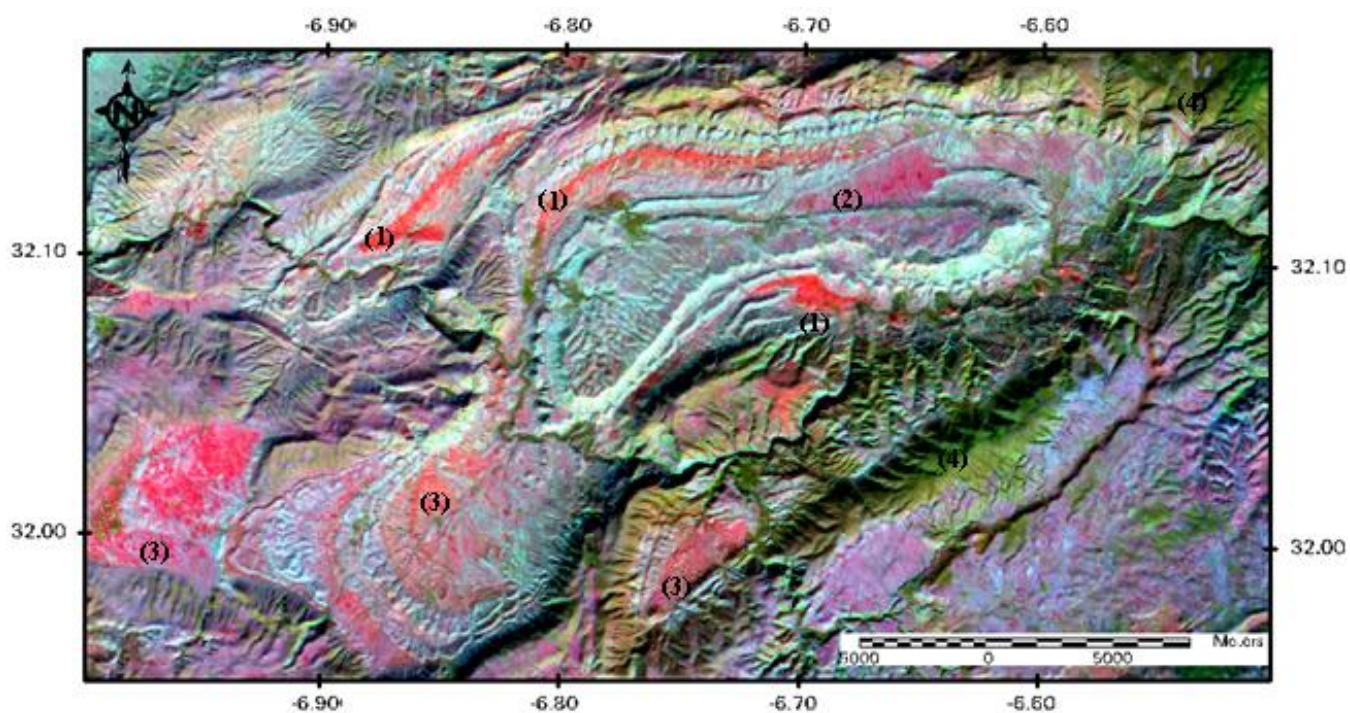


Figure 21: La spaciocarte du composé coloré des bandes non corrélées 6, 4, 7.

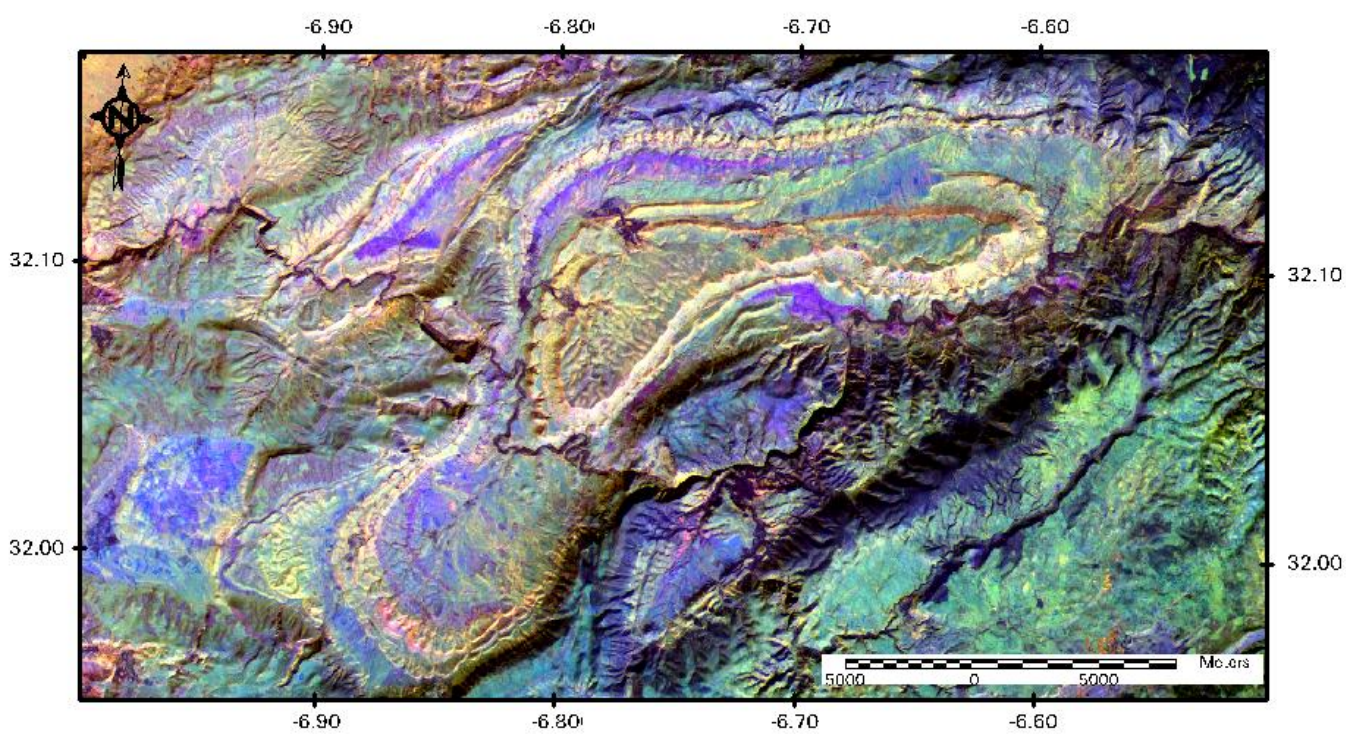
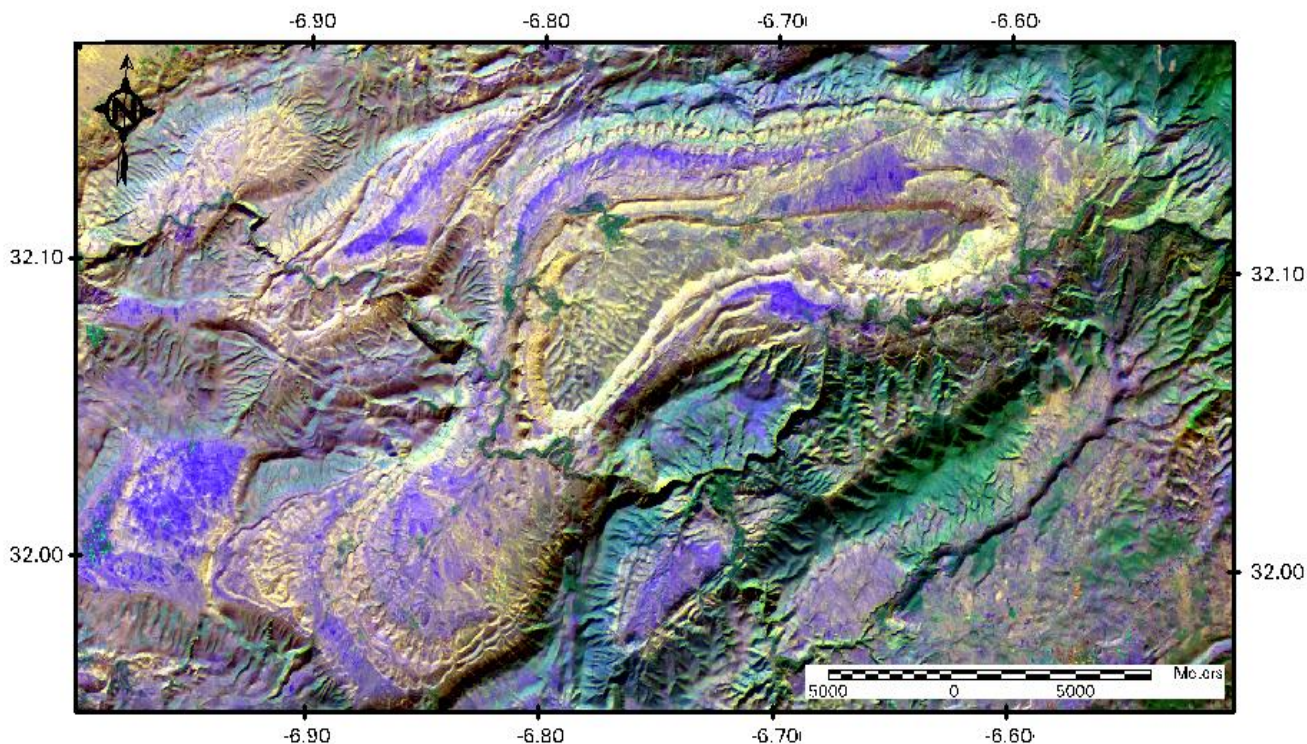


Figure 22: La spaciocarte du composé coloré des bandes non corrélées 1, 7, 6.



**Figure 23:** La spaciocarte du composé coloré des bandes non corrélées 2, 4, 6.

Les bandes qui ont un coefficient de corrélation très élevé (= ou proche de 1) présentent presque les mêmes indications, donc lorsqu'on réalise une combinaison entre elles, le résultat obtenu sera incomplet pour l'interprétation. Alors que les combinaisons possibles entre les bandes non corrélées donnent des résultats fiables parce que chaque bande présente une information totalement différente aux informations qui renferment les autres bandes, donc la combinaison dans ce cas sera comme un mélange présentant le maximum d'information.

La composition colorée de la figure 21 constituée de 3 bandes (6.4.7) délimite bien les contours des faciès, les basaltes (1) sont bien visibles que les autres formations, le quaternaire (2 et 3) se présente presque par la même couleur dans quatre secteurs, aussi la végétation (4) est très nette dans cette spaciocarte.

Les autres spaciocartes ont montré de manières complémentaires les différents contours des différentes formations dans le secteur d'Aït Attab. Ces contours seront représentés dans une carte finale du secteur d'étude.

## II.2. Le Rehaussement spectrale de l'image d'Ait Attab (indices)

La nature numérique des données de télédétection se prête particulièrement bien à des opérations entre canaux. Le principe de ces opérations est d'effectuer, pour chaque pixel, des opérations mathématiques plus ou moins complexes faisant intervenir les valeurs numériques

observées pour ce pixel dans les différentes bandes spectrales. Les spaciocartes résultantes peuvent être aussi utilisées comme de nouvelles bandes (Neocanaux) pour la réalisation de nouveaux composés colorés qui peuvent apporter des informations de plus.

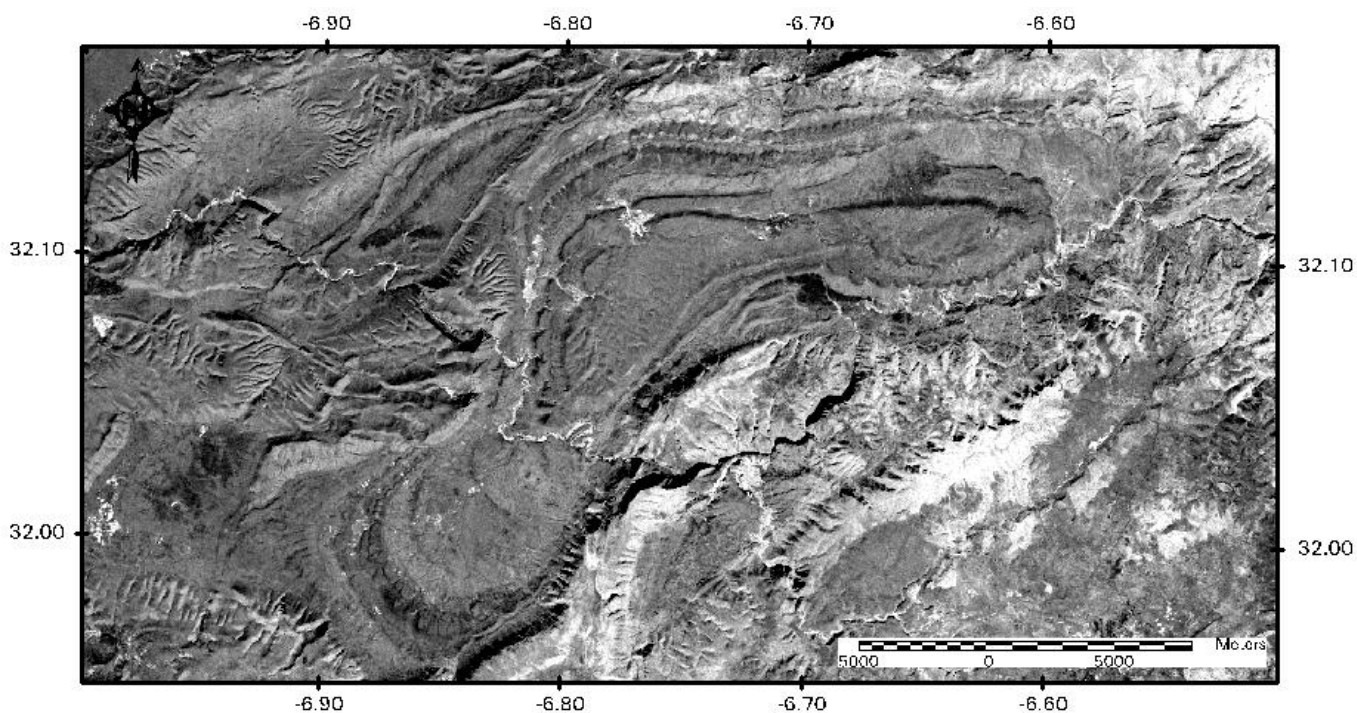
### **II.2.1 NDVI (Normalised differentiated vegetation index)**

Les indices de végétation font parties des méthodes de traitement appelées les transformations multispectrales. Ils consistent à convertir les luminances mesurées au niveau du capteur satellitaire en grandeurs ayant une signification dans le domaine de l'environnement. Basés sur le caractère multispectral des données satellitaires, ils permettent de décrire l'état d'un phénomène. Un indice de végétation par exemple, peut rendre compte du stade de croissance végétale à un moment donné.

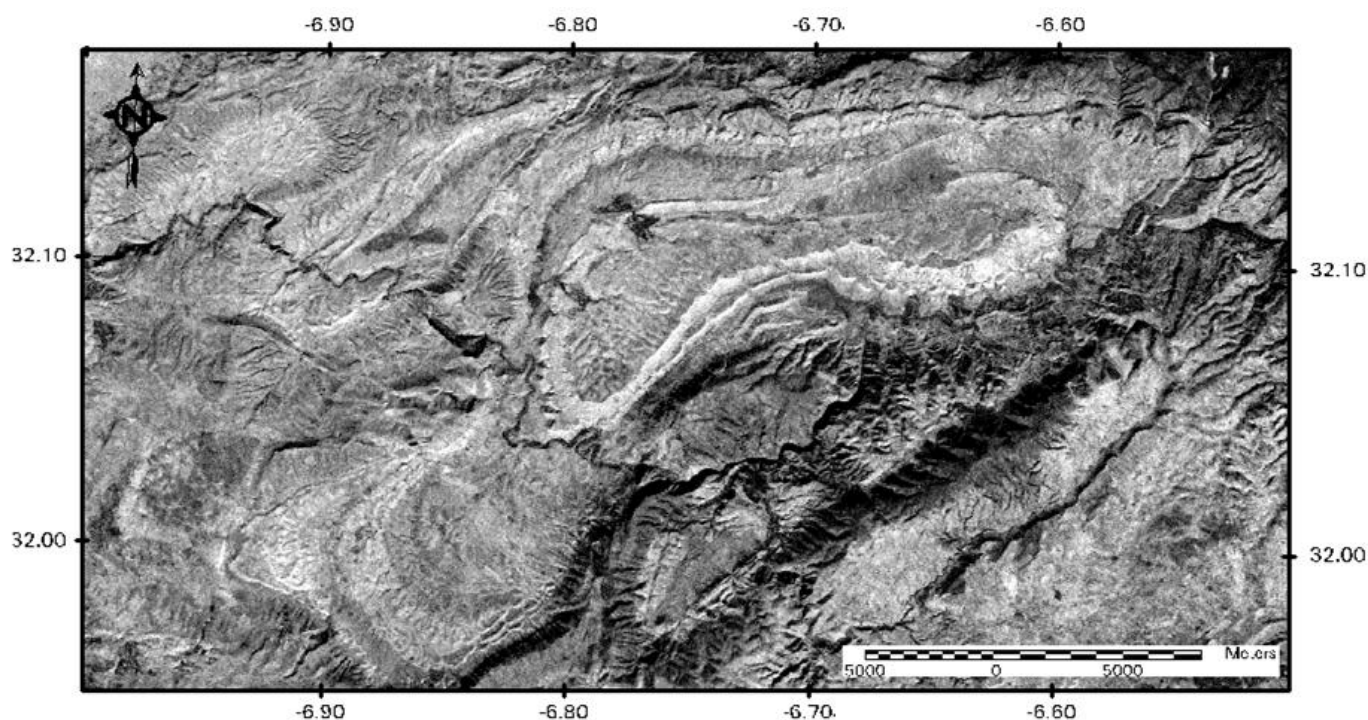
Tous les indices, que ce soient les indices de végétations, les indices des sols, les indices relatifs à la colonne d'eau, etc., reposent sur une approche empirique basée sur des données expérimentales. Les indices de végétation sont très utilisés d'une part pour identifier et suivre la dynamique de la végétation, mais aussi pour estimer certains paramètres biophysiques caractéristiques des couverts végétaux, comme la biomasse, l'indice de surface foliaire, la fracturation de rayonnement photosynthétique actif. La spaciocarte résultante de ce traitement montre la répartition de la végétation dans le secteur d'études elle est représentée sur la figure 24 avec la végétation qui se montre avec des pixels plus claires au fur et à mesure que la végétation est dense.

### **II.2.2 Indice des minéraux argileux**

Cet indice est obtenu on calculant le rapport Bande5/Bande7 de l'image Landsat TM, il permet de rehausser les zones caractérisées par une forte altération de type argileuse. Dans notre image et comme la figure 25 montre les zones affectées par cette altération sont celles représentées en blanc.



**Figure 24:** Spaciocarte de NDVI (représentant la végétation : zones claires).



**Figure 25:** Spaciocarte de l'Indice d'Argile (concentration max dans les zones claires).

### II.3. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'analyse des données consiste essentiellement à établir quelles sont les relations existant entre les observations, entre les variables, et entre les observations et les variables. Il s'agit donc de mettre un peu d'ordre dans le fichier de données, souvent de taille considérable (quelques centaines ou milliers d'analyses et quelques dizaines de variables). Ceci peut être

fait à l'aide de diagrammes binaires, à l'aide des corrélations et corrélations partielles, à l'aide de diagrammes spécifiques propres au domaine étudié. L'analyse en composantes principales est un autre outil permettant une meilleure visualisation des caractéristiques des données.

### ✓ Utilisation de l'ACP en télédétection

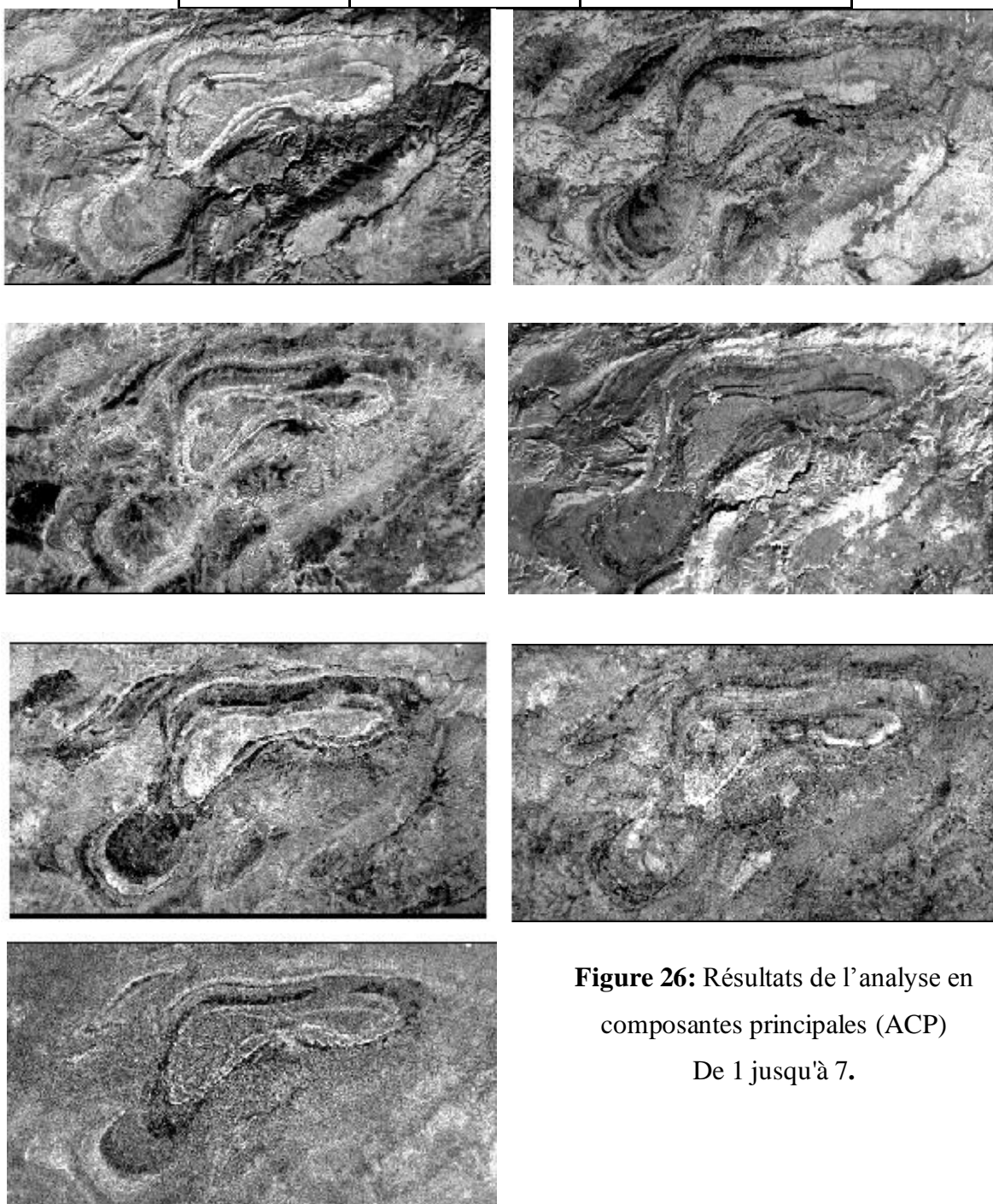
Une application très courante de l'ACP consiste à produire une carte de synthèse à partir d'une information multi variable. Ce genre de situation se présente en télédétection et en analyse d'images où l'on dispose de l'intensité d'un signal mesurée pour différentes plages de longueurs d'ondes. Les systèmes sophistiqués de SIG (système d'information géographique) permettent habituellement d'effectuer l'ACP du signal mesuré et de produire des images composites correspondant aux diverses composantes principales. Ceci permet, entre autres, de filtrer du bruit et de rehausser l'information contenue dans l'image originale.

L'analyse en composantes principales est une technique efficace pour accentuer une image multi spectrale pour des fins d'interprétation géologique (Biémi et al, 1991). Elle permet de réduire l'information contenue dans plusieurs bandes, parfois hautement corrélées (d'où redondance de l'information) en un nombre plus restreint de composantes. Celles-ci représentent généralement jusqu'à 97% de la variance 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 seulement 3 composantes. Cette analyse permet, entre autres, de créer des composés colorés des trois premières composantes qui constituent un excellent produit d'interprétation visuelle, augmentant ainsi le contraste entre les divers objets au sol.

Les résultats obtenus sont illustrés par le tableau 4, montrent que la première composante principale (ACP1°) renferme à peu près 84% de l'information alors que les autres composantes (ACP2 jusqu'à ACP3) ne renferment que le bruit et l'information redondante (fig. 26).

**Tableau 4:** Statistiques des composantes principales de l'image d'Ait Attab.

ACP	VALEURS PROPRES	% D'INFORMATION
PC1	1855,55	83,971
PC2	77,77	3,519
PC3	77,75	3,518
PC4	66,6	3,016
PC5	55	2,488
PC6	44	1,991
PC7	33	1,493
TOTAL	2209,73	99,996



**Figure 26:** Résultats de l'analyse en composantes principales (ACP)  
De 1 jusqu'à 7.

## II.4. Quelques traitements spécifiques de rehaussement spectral

### II.4.1. Decorrelation stretch (DCS)

Tout d'abord le rehaussement de *decorrelation stretch* (DCS) est une méthode qui permet de maximiser la différence entre les bandes de données différentes. En utilisant les vecteurs propres et la matrice de covariance, les données subissent une rotation dans un nouvel espace spectral où les valeurs sont ensuite maximisées et retournées à l'espace d'origine. La propriété de DCS, c'est qu'il maximise les différences entre les bandes. Ceci est particulièrement utile pour les données IR où l'information de composition apparaît comme de légères variations du rayonnement entre les bandes. Ainsi la variation de la composition se maximise et il sera affiché dans une couleur différente dans le traitement DCS.

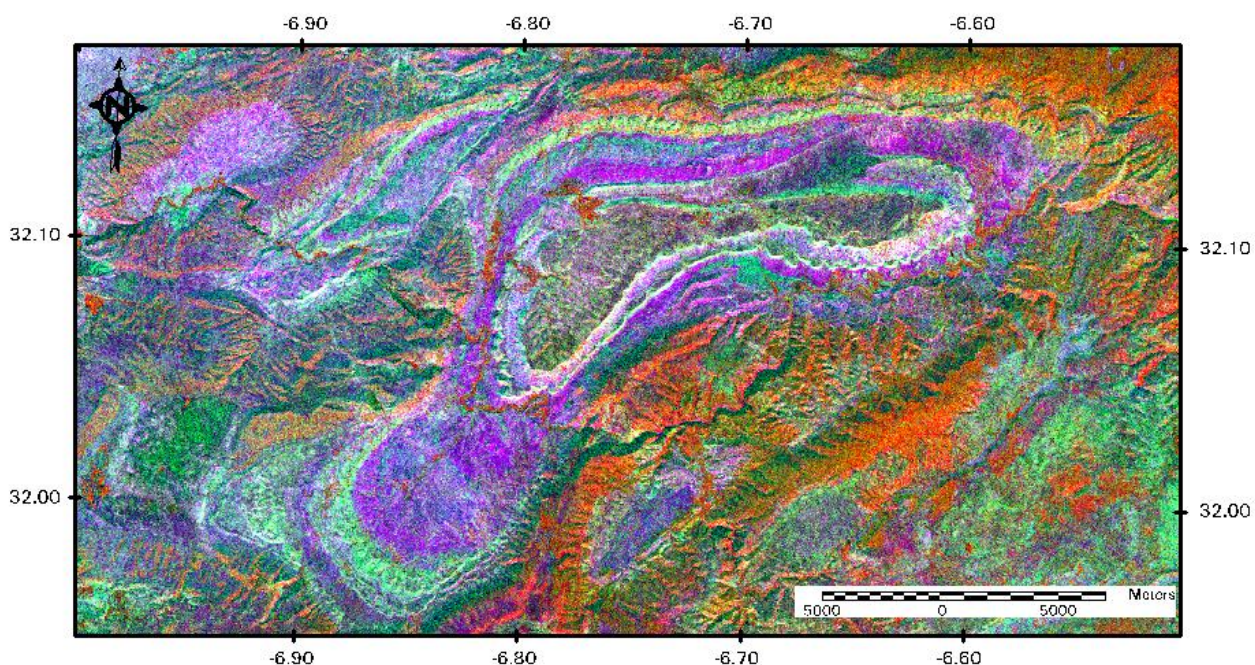
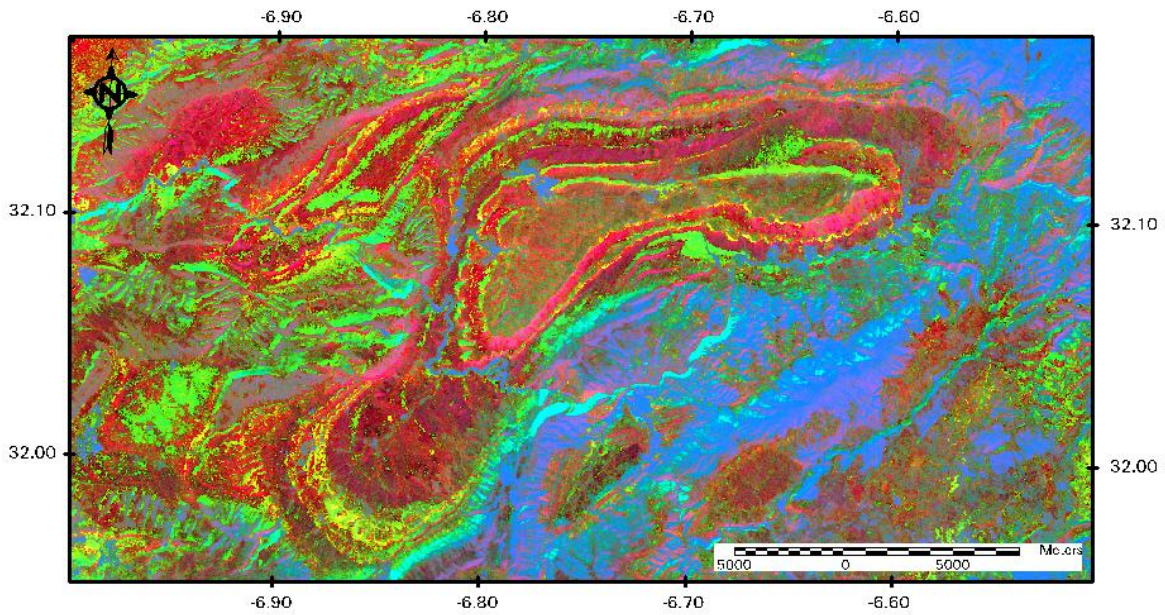


Figure 27 : Spaciocarte du traitement (DCS)

### II.4.2. Transformation de RGB en IHS

C'est un traitement qui permet une transformation de l'image multispectrale en système de couleur RGB ou RVB (Rouge, Vert et Bleu) en un autre système de couleur dite IHS (Intensity, Hue, Saturation) (Intensité Teinte Saturation). Cette transformation permet de rehausser les contours et de différencier les thèmes de l'image pour une meilleure interprétation visuelle.



**Figure 28 :** La spaciocarte résultant de la transformation de RGB en IHS

Le traitement RGB en IHS permet de rehausser les contours et différencier les thèmes de l'image, en jouant sur la transformation du système de couleur. Sur la figure 28 ce traitement a permis de cartographier l'Albo-Cénomaniien à l'intérieur du synclinal.

#### **II.4.3. Tasseled-Cap (T-Cap)**

La Transformation Tasseled Cap est l'une des méthodes pour l'amélioration du contenu en informations spectrale des données Landsat TM. Elle optimise en particulier les données spectrales des bandes pour la visualisation et l'étude de la végétation. L'indice Tasseled Cap se calcule à partir des données des six bandes TM (1, 2, 3, 4, 5 et 7). Le résultat est une image multi spectrale de trois bandes de transformation qui sont souvent les indices suivants:

(Bande 1) - brillance =  $\sum b_i \cdot TM_i$  ;

(Bande 2) - verdure =  $\sum v_i \cdot TM_i$  ;

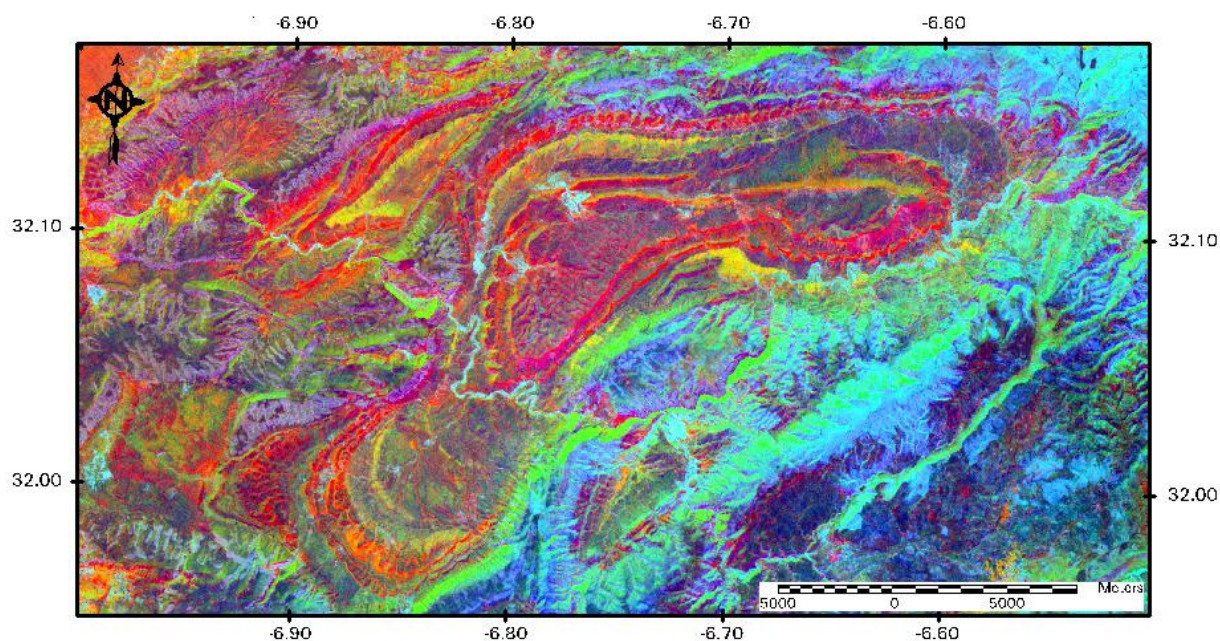
(Bande 3) - humidité =  $\sum h_i \cdot TM_i$  ;

Où,  $b_i$ ,  $v_i$  et  $h_i$  sont les coefficients de la transformation Tasseled Cap utilisés pour le calcul de brillance, de verdure et d'humidité (tableau 5).



Indice	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
Brillance	0,2043	0,4158	0,5524	0,5741	0,3124	0,2303
Verdure	0,1603	-0,2819	-0,4934	0,7940	-0,0002	-0,1446
Humidité	0,0315	0,2021	0,3102	0,1594	-0,6806	-0,6109

**Tableau 5** : Coefficients de la transformation Tasseled Cap appliqués pour la réflectance de l'image de TM (Crist, 1985)



**Figure 29**: Spaciocarte correspondante au traitement T-Cap.

### Interprétation ;

Le traitement par T-cap qui consiste en générale à améliorer les données spectrales, permet de donner plus d'information utile pour l'affinement des contours géologiques. Par comparaison avec les autres traitements, le T-cap rehausse plus les limites entre les faciès. Sur la figure 29 ce traitement donne la possibilité de cartographier en détails les affleurements de la partie Sud Ouest du synclinal d'Ait Attab. De même pour la partie Nord Ouest le détail des contours géologiques est bien visible sur la T-cap relativement aux autres traitements.

## II.5. La classification et l'analyse de l'image du synclinal d'Ait Attab

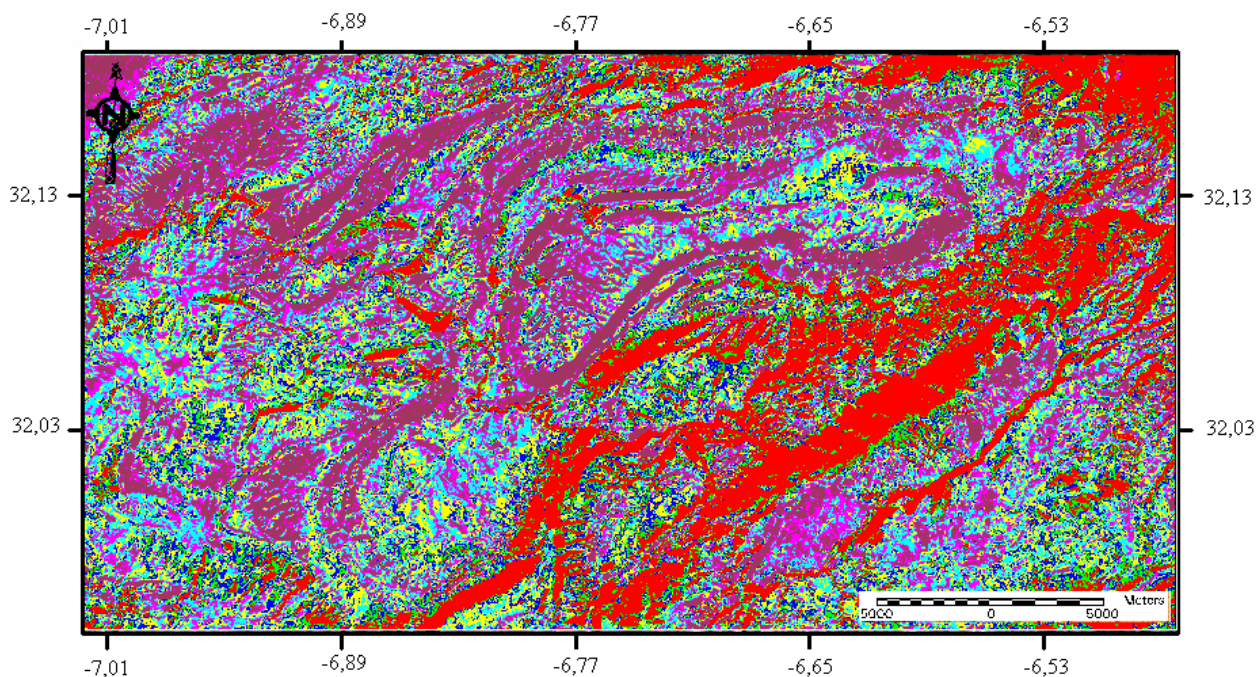
La classification numérique des images utilise l'information spectrale contenue dans les valeurs d'une ou de plusieurs bandes spectrales pour classifier chaque pixel individuellement. Ce type de traitement est appelé reconnaissance de **regroupements spectraux**. Les deux façons de procéder (manuelle ou automatique) ont pour but d'assigner

une classe particulière ou **thème** à chacun des pixels d'une image. La "nouvelle" image qui représente la classification est composée d'une mosaïque de pixels qui appartiennent chacun à un thème particulier. Cette image est essentiellement une représentation thématique de l'image originale.

Les méthodes de classification les plus communes peuvent être séparées en deux grandes catégories : les méthodes de **classification non supervisée** et les méthodes de **classification supervisée**.

### II.5.1 Classification non supervisée (ou non dirigée)

Dans cette classification, on laisse le logiciel analyser les signatures spectrales de tous les pixels de l'image afin de déterminer les groupements naturels. Les classes spectrales sont formées en premier, elles sont basées sur l'information numérique des données seulement. Ces classes sont ensuite associées, par un analyste, à des classes d'information utile. Des programmes appelés **algorithmes de classification** sont utilisés pour déterminer les groupes statistiques naturels ou les structures des données. Le résultat final (Fig.30) de ce processus de classification itératif peut créer des classes qui devraient être séparées de nouveau (information incomplète). Cette méthode ne commence pas avec un ensemble prédéterminé (zones d'intérêts sur le terrain ou sur une carte géologique) de classes comme pour la classification supervisée.



**Figure 30:** Spaciocarte de la classification non supervisée du Synclinal d'Ait Attab.

## **Interprétation des résultats :**

Dans cette classification, on ne connaît ni le nombre ni la nature des faciès, et par conséquent le logiciel réalise dans l'espace spectral des groupements de pixels, associés par la proximité de leurs comptes numériques.

La carte résultante (fig.30) signale l'existence d'une grande différenciation de couleur, ce que signifie la présence des faciès (ou thèmes) différents et non d'un seul faciès, aussi il y a quelques contours bien déterminés, mais ces résultats restent insuffisants, d'une part par ce qu'ils ne représentent pas une délimitation nette des différents faciès, et d'autre part ils montrent la végétation sur une grande partie de la carte (en rouge) alors qu'elle cache les faciès au dessous. Donc on peut dire que cette classification est utilisée juste pour estimer à l'avance et en gros le nombre possible des faciès ainsi que les sites de végétation dans le secteur d'étude.

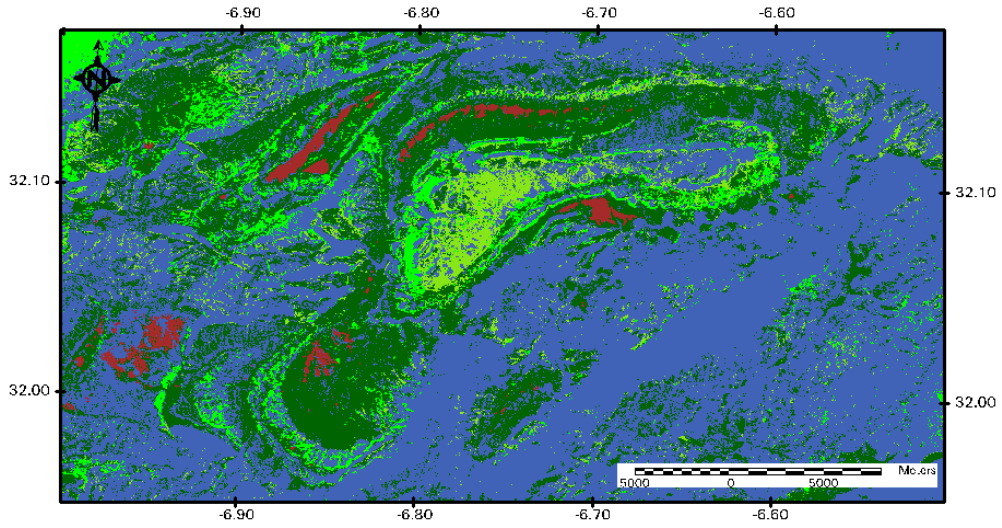
### **II.5.2 Classification supervisée**

Les classes sont définies à partir des besoins de l'utilisateur et correspondent à des unités sémantiques de l'image, ce qui nécessite une étape d'apprentissage préalable à la classification qui consiste à déterminer des zones d'apprentissage connues par l'opérateur. La classification supervisée consiste à déterminer les classes par un apprentissage qui peut être effectué soit sur chaque scène traitée, soit pour chaque type d'application (agriculture, forêt, littoral, géologie, ...) ou encore à chaque type de capteur utilisé (optique : Landsat, Spot, ou radar : ERS, JERS1, RADARSAT...). Cette étape influence fortement les résultats de la classification.

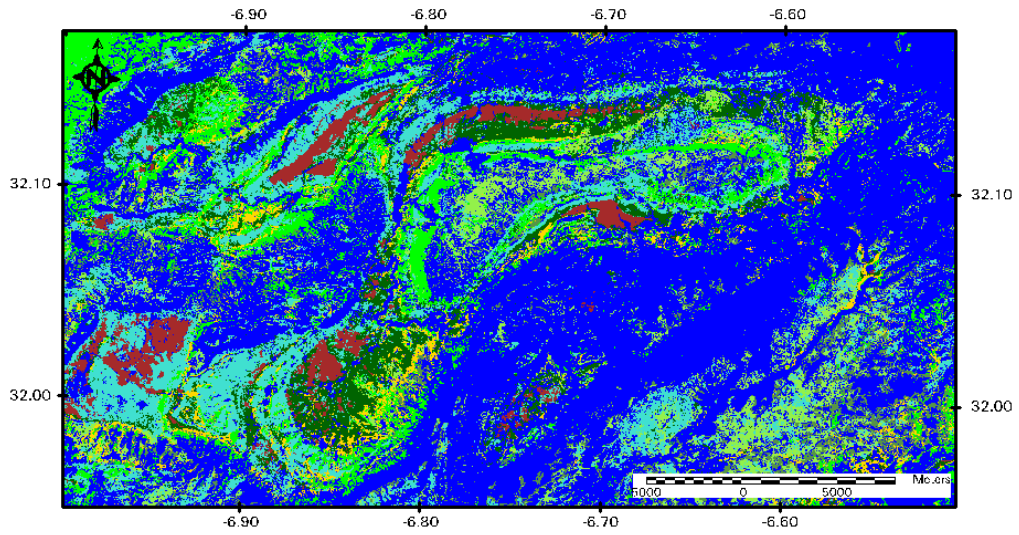
Le choix des thèmes ou classes doit obéir à certaines conditions : notamment la représentativité et la confusion. Il faut que les faciès choisis comme classe thématique soient bien représentés sur la zone d'étude, de même les grands groupes de faciès présentent moins de ressemblances minéralogiques et géochimiques.

Les classifications supervisées sont nécessaires lorsque les besoins thématiques sont pointus. En effet les techniques non supervisées se limitent souvent à la reconnaissance de grandes classes thématiques (forêt, urbain, sol nue, végétation haute et basse et surface d'eau).

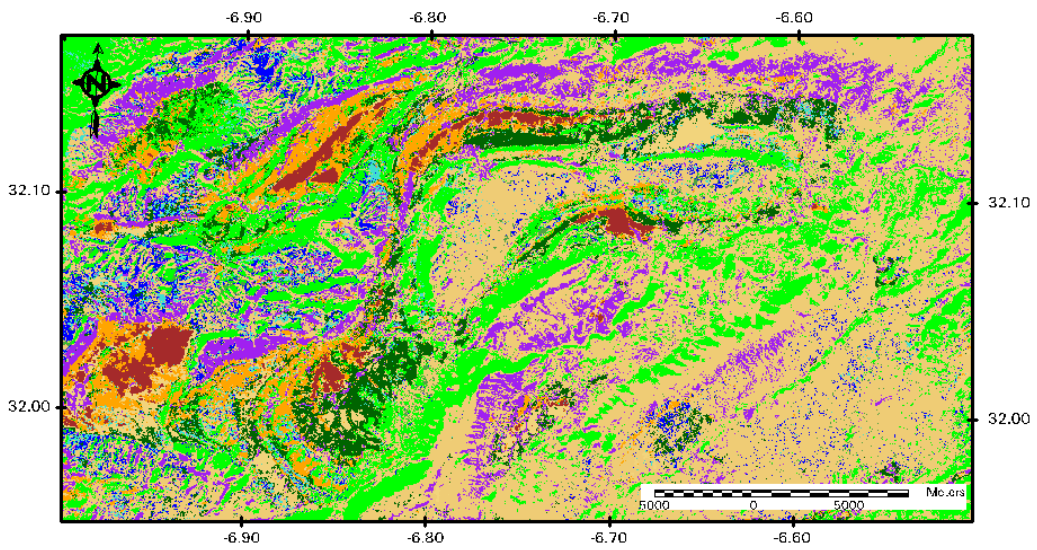
Les résultats des classifications peuvent juger et évalués de façons différentes. Une évaluation quantitative qui se fait par le logiciel lui même pourrait évaluer le traitement, il s'agit de l'analyse de la matrice de contingence ou de confusion et la matrice d'erreurs de séparabilité (tableau 6 et 7).



**Figure 31 :** Spaciocarte de la classification supervisée sur une image DCS.



**Figure 32 :** Spaciocarte de la classification supervisée sur le CC 176.



**Figure 33 :** Spaciocarte de la classification supervisée sur le CC 642.

## Interprétations des résultats :

Les résultats de la classification supervisée représentés sur les figures 31, 32 et 33 sont différents d'une figure à l'autre selon l'image traitée :

- ✓ Figure 31 : La classification supervisée dans ce cas est faite sur une image traitée par l'étirement de corrélation (Decorrelation stretch)

Comme résultats du traitement de classification supervisée sur le DCS, on note que les limites des formations constituant le synclinal sont très nettes pour certains facies, et par conséquent les contours des facies du cœur synclinal sont bien visibles, alors que dans les deux autres classifications, ils sont difficiles à cartographier.

La spaciocarte de la classification effectuée sur le composé coloré 176, de l'image Landsat TM a permis de distinguer avec une grande netteté les contours des Basaltes du Crétacé inférieur jurassique supérieur, qui apparaissent sur l'image en rouge bordeaux. Par contre au cœur du synclinal il est difficile de cartographier les contours des autres facies (Fig. 32).

La spaciocarte de la classification effectuée sur le composé coloré 642 (Fig. 33), nous a permis de cartographier les basaltes (rouge). Elle permet aussi de voir les formations des Lais en violet (voir la carte géologique).

De manière générale on peut dire que la classification supervisée est basée sur la nature de signature spectrale, c'est la raison pour laquelle il y a une différence entre les trois figures 31, 32 et 33, qui ne sont que trois exemples de l'ensemble des classifications utilisées dans ce travail pour le rehaussement des contours géologiques qui seront représentés dans la carte géologique finale. Les résultats de la classification supervisée en comparaison avec la carte géologique de la région, a permis de distinguer avec précision certains contours d'affleurement dans le secteur d'étude. Cependant, des confusions de limite et de classe se présentent dans le cœur du synclinal, ce qui est peut être explicable par l'accumulation de mélange des produits d'érosion des facies des flancs et des bordures au centre de la cuvette. Par contre ces confusions de classes sont moins importantes par rapport à la classification non dirigée.

La validation des spaciocartes doit se faire obligatoirement sur le terrain avant la publication définitive. Cependant deux types d'évaluation quantitative sont disponibles sur le logiciel de traitement. Il s'agit de la matrice de confusion et la matrice de séparabilité.

Sur la matrice de confusion (Tab. 6), bien que le nombre de pixel représentant chacune des classes reste relativement faible, on remarque qu'il y a moins de pixel appartenant à une classe et que se retrouve dans une classe différente.

	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5	Class 6	Class 7	Class 8
Class 1	260	0	0	1	5	0	0	0
Class 2	0	107	0	0	0	0	0	0
Class 3	0	0	51	0	1	0	0	0
Class 4	0	0	0	242	2	7	1	0
Class 5	3	0	0	2	226	3	0	0
Class 6	0	0	0	3	1	466	0	0
Class 7	0	0	0	0	0	0	58	0
Class 8	0	0	0	0	0	0	0	116
Total	263	107	51	248	235	476	59	116

**Tableau 6 :** Matrice de confusion de la classification de la figure 32.

Classe1 :	Cénomano-Turonien	Classe5 :	Lias inferieur
Classe2 :	Albo-Cénomaniien	Classe6 :	Toarcien
Classe3 :	Aptien	Classe7 :	Jurassique moyen
Classe4 :	Crétacé	Classe8 :	Basaltes Jurassico-Crétacés

De même la matrice de séparabilité (Tabl. 7), les classes sont séparées de façon homogène comme le montre les valeurs de distances entre les pairs de classes. Seules les paires 3:5 et 2:4 montre une séparabilité faible de 15, qui signifie que les classes correspondes sont difficilement séparables.

		Class Pairs:						
AVE	MIN	1: 2	1: 3	1: 4	1: 5	1: 6	1: 7	1: 8
37	10	19	30	12	17	28	26	64
		46	15	35	20	41	79	41
		15	58	10	40	28	19	36
		72	44	14	48	54	89	40

**Tableau 7 :** Matrice de séparabilité la classification de la figure 32.

## **II.6. Etude de la fracturation du synclinal d'Ait Attab**

### **II.6.1 Extractions des linéaments**

La cartographie des linéaments à pour but de dégager et d'accentuer les structures linéaires correspondantes à des discontinuités lithologiques ou structurales, elle est réalisée en traçant directement les structures linéaires sur les images traitées par ces divers méthodes : les filtres directionnel- le relief ombré- à partir de MNT et en fin les linéaments de la carte géologique existante. Les linéaments détectés visuellement et tracés sur les fonds d'images traitées sont systématiquement vérifiés sur la carte topographique géoréférenciée avant d'être retenus. Ceci à pour but d'éviter de confondre des éléments susceptibles d'être des linéaments non structuraux (route, chemin de fer, limites boisées, falaises, ...). La dernière étape sera la superposition des cartes de linéaments obtenues afin de créer une carte de synthèse de la fracturation. Pour éviter la répétition de segments sur cette carte de synthèse, on procède à une élimination de tous les linéaments qui se répètent plus d'une fois.

### **II.6.2 Les filtres directionnels de Sobel**

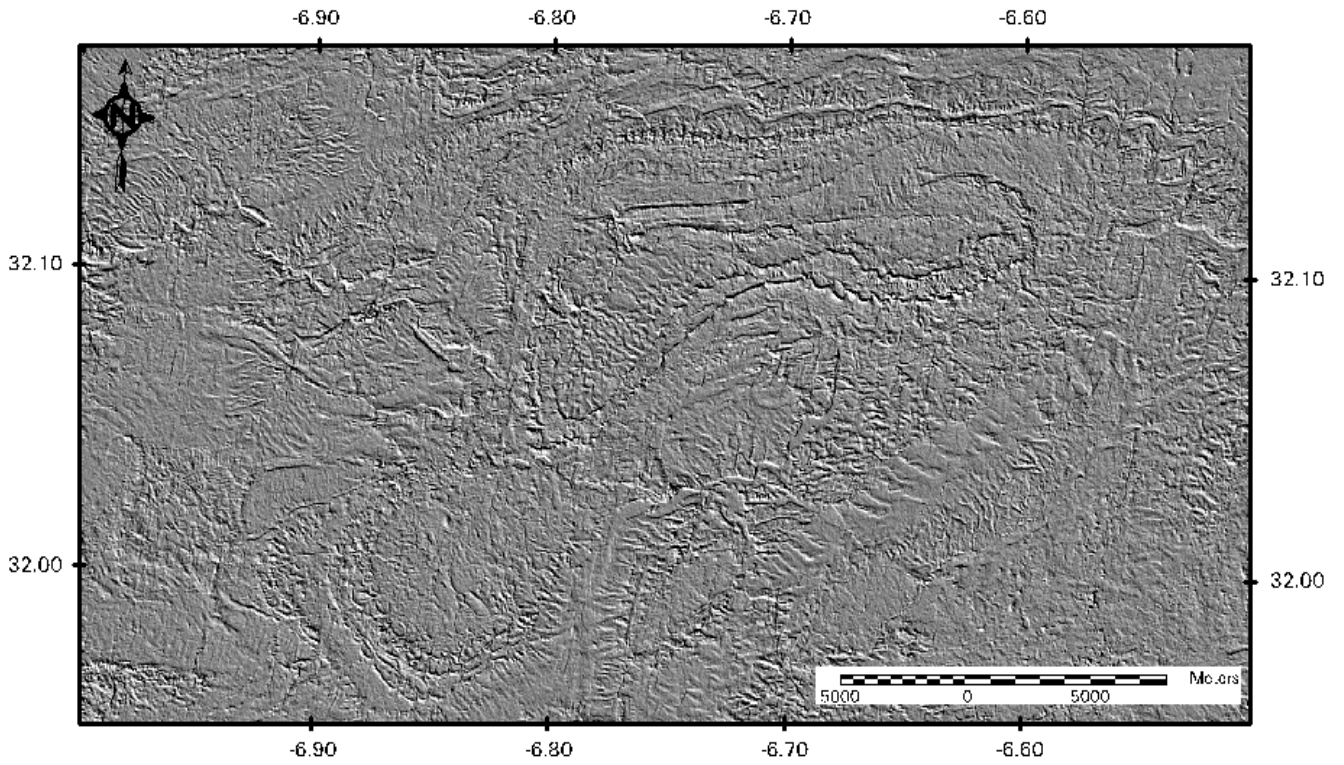
Les filtres directionnels améliorent la perception des linéaments en provoquant un effet optique d'ombre portée sur l'image comme si elle était éclairée par une lumière rasante. De plus, ce type de filtre permet de rehausser les linéaments qui ne sont pas favorisés par la source d'éclairage (Drury, 1986).

Le rehaussement des linéaments à donc été effectué à partir de filtres directionnels utilisant l'opérateur de Sobel. L'image utilisée pour les filtrages est celle de la bande 4 qui se trouve dans la zone du proche infrarouge permettant ainsi de voir les détails structuraux importants (Shupe and Akha, 1989). Le filtre de Sobel est une variété plus sélective de filtres directionnels où les valeurs de la matrice de convolution sont déterminées selon la distance par rapport au pixel central. En d'autres termes, les points les plus près du centre dans la matrice (en ligne ou en colonne) interviennent avec un poids supérieur à ceux des extrémités dans la mesure du gradient directionnel (Deslandes, 1986).

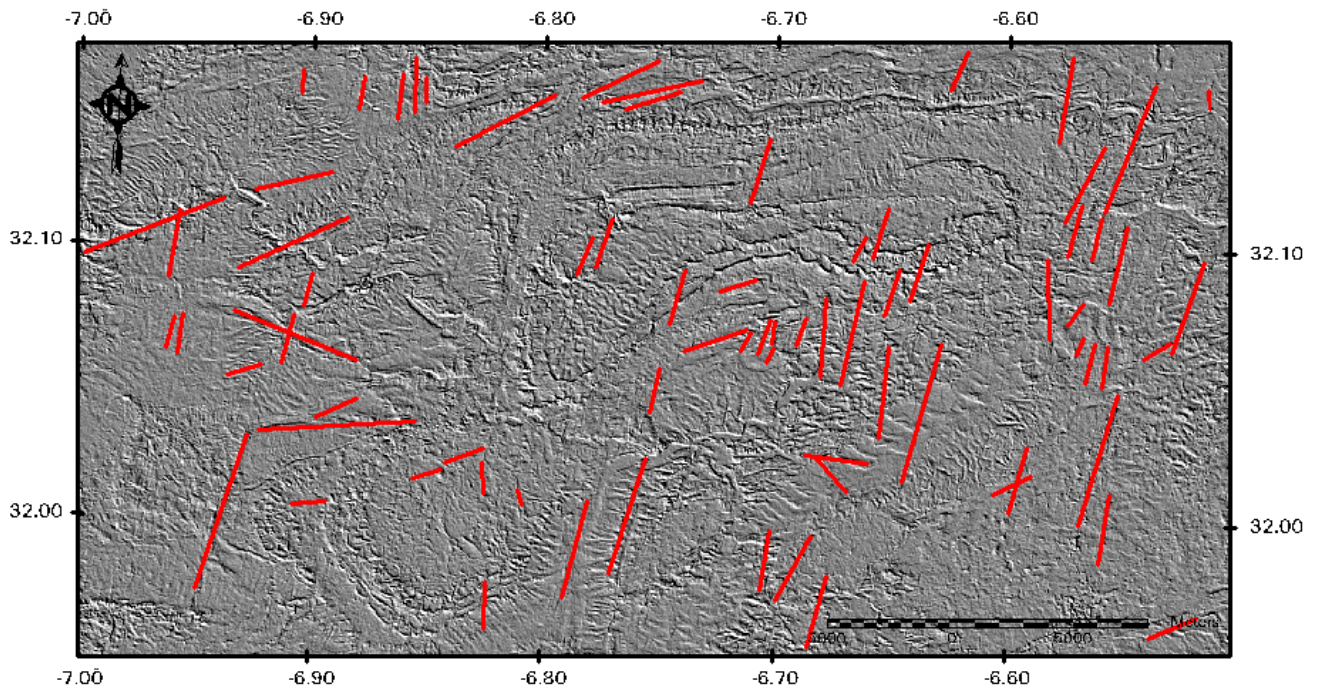
### **II.6.3 Le relief ombré**

Les images du relief ombré ont été produites à partir des données d'élévation numérique (Image TM) qui utilisent le Lambertien réflexion modèle. Ce model suppose que la surface de la terre est parfaitement diffusée et éclairée par une source légère directe. Le

résultat de ce traitement de l'image du Synclinal d'Ait Attab a permis d'extraire une carte de 54 linéaments de différentes directions (Fig.35).

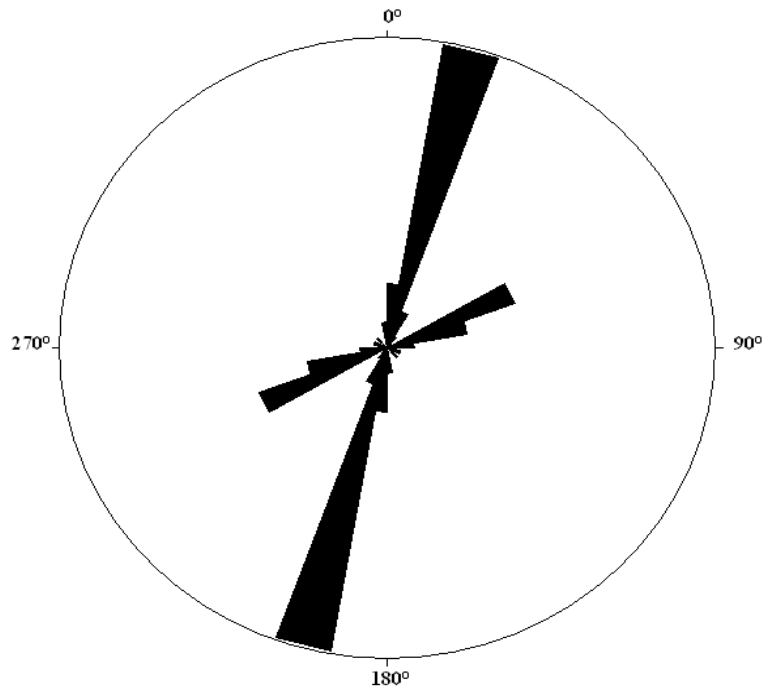


**Figure 34:** Spaciocarte du relief ombré (Shaded relief) de l'image TM du Synclinal d'Ait Attab.

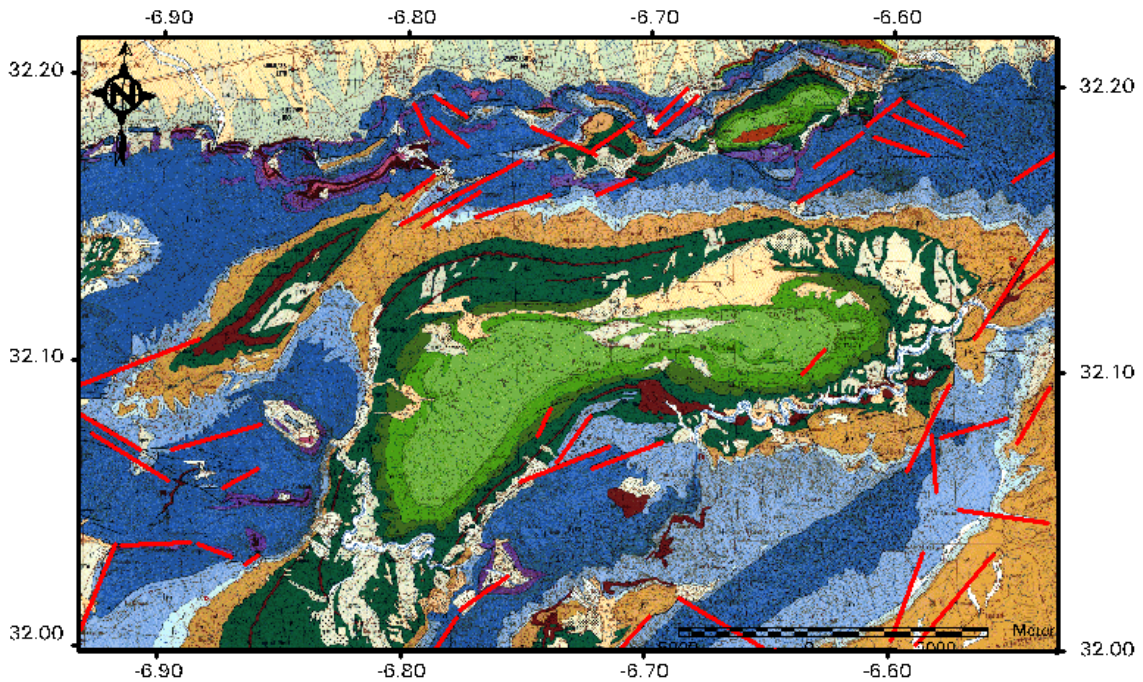


**Figure 35 :** Carte d'interprétation des linéaments extraite par le relief ombré dans le secteur d'étude.





**Figure 36 :** Rosace directionnelle des linéaments extraits par la méthode Du relief ombré.



**Figure 37 :** Mise en relief des failles de la carte géologique existante.

#### II.6.4. Conclusion

Après l'extraction des linéaments (fig. 35) et la présentation de leurs directions sous forme d'une rosace directionnelle (fig.36), on a comparé les résultat avec les directions des failles de la carte géologique (fig.37), on a conclu qu'il ya deux principales familles de directions linéaires (NNE-SSW) et (NE-SW) interprétées à partir des images LANDSAT,

montrent une correspondance d'une part avec les directions des failles de la carte géologique, et d'autre part avec la déformation et le développement de chevauchement à vergence Nord de direction E-W dans la littérature sur l'aspect structural de la région.

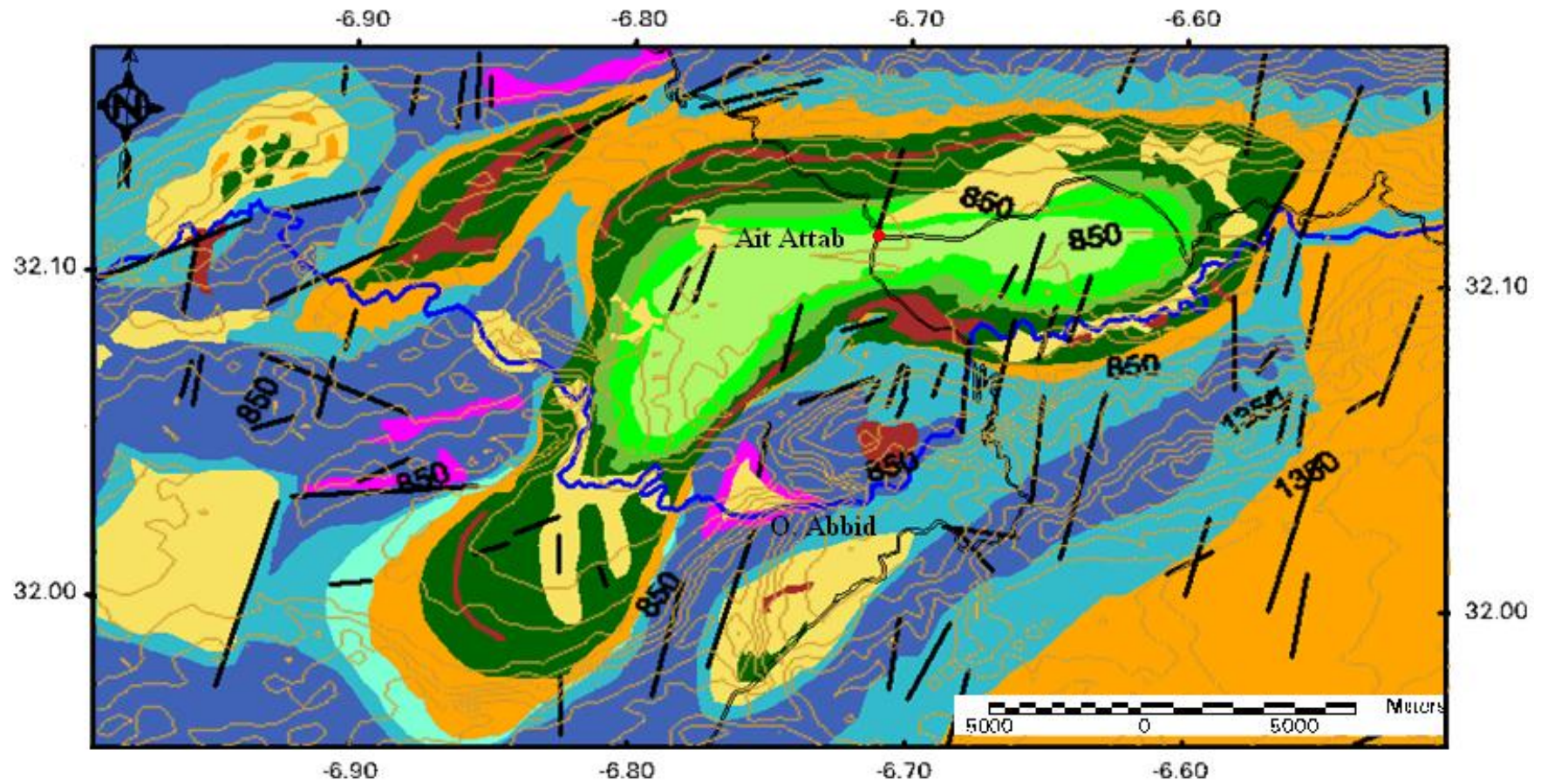
## **II.7. Traitements de l'MNT**

Le modèle numérique du terrain (MNT) a été traité par Global mapper et Sufer afin de ressortir les courbes de niveau qui vont être superposées sur la carte finale, cela pour définir les différentes altitudes de la zone d'étude.

## **II.8. La carte géologique du synclinal d'Aït Attab, résultante de la cartographie numérique**

L'ensemble des traitements de l'image satellite Landsat TM, à savoir les composées colorées, l'ACP ou les indices ont contribué chacun d'une façon ou d'une autre à cartographier les contours, les failles et les différents faciès du secteur d'Aït Attab. Les courbes de niveau ont été restituées du l'MNT de secteur traiter sur le logiciel de globale mapper.

Enfin la superposition de toute les couches d'information restituée sur les différents traitements a abouti à une carte géologique complète du synclinal d'Aït Attab (Figure 38).



**Figure 38** : Carte géologique du Synclinal d'Ait Attab (Extraite de l'image satellite et le MNT).

### Légende

	Quaternaire récent: terrains basses limoneuses
	Cénomano-Turonien: calcaires blancs oubeiges
	Albo-Cénomaniien: marnes et grés rouges, marnes vertes à gyps
	Aptien: calcaires et marnes blanches
	Cretacé inferieur: grés et pelites rouges
	Discordance
	Jurassique Moyen: calcaire, marno-calcaire et marnes
	Toircien - Aalenien: marnes chocolats et conglomerats et quartz
	Domériien: calcaire en petits bancs et lits de marnes
	Lias inferier et moyen: dolomie et calcaire
	Lias inferieur: marno-dolometique à passées gypseuses
	Basaltes et Dolérite d'age cretacé
	Rivière
	Route
	Faille

## Conclusions et Perspectives

En guise de conclusion pour ce travail, on peut dire que la télédétection est un outil puissant pour les études géologiques et cartographiques. Grâce à l'utilisation des différents traitements des images LANDSAT et le model numérique de terrain (MNT) associés aux données cartographiques et bibliographiques disponibles sur le secteur d'étude, on a pu identifier et cartographier les formations géologiques et la fracturation qu'elles ont enregistré.

Sur la bordure Nord du Haut Atlas Central, en particuliers le synclinal d'Aït Attab, les compositions colorées et les traitements du rehaussement spectral, s'avèrent plus efficaces que les classifications supervisées et non supervisées pour l'identification des différents facies et facilité la digitalisation des contours géologiques dans un domaine où les affleurements sédimentaire sont différenciés et variables, c'est une alternance de facies carbonatés et de facies détritiques.

Les basaltes et les dolérites d'âge jurassico-crétacé, les argiles et grés du Crétacé inferieur, les carbonates du Lias inferieur et moyen sont bien représentés dans la totalité des traitements et ont la même allure qu'ils ont dans la carte géologique de Rolley (1977).

Pour la fracturation dans le secteur du synclinal d'Aït Attab, l'apport des traitements de l'image satellite Landsat TM vient confirmer les directions des failles cartographiées sur la carte de Rolley (1977) et aussi représenter dans le secteur par les directions principales des chevauchements frontaux de la bordure du Haut Atlas central au niveau de la région d'Afourer-Beni Mellal. Donc l'extraction des linéaments a permis d'identifier deux directions majeures NNE-SSW et NE-SW comparables aux données préexistantes dans la littérature et dans la carte géologique.

En perspective, une validation de terrain s'impose afin de confirmer et compléter les résultats obtenus par cette étude, dans le but d'éviter les ambiguïtés sur la localisation et la dimension des différents affleurements, et pour dégager et identifier la nature des structures linéaires.

## Références bibliographiques

- Benzaquen, M. (1963) : Bordure septentrionale de l'Atlas de Béni Mellal. Contribution à l'étude géologique de la région d'Elksiba. Notes et Mém. Sér. Géol. Maroc 22(170), 20-45.
- Biémi, J., Gwyn, Q. H. J., Deslandes, S. et Jourda, J. P. (1991) Géologie et réseaux de linéaments régionaux du bassin versant de la Marahoué (Côte d'Ivoire) : cartographie à l'aide des données Landsat TM et du champ magnétique total.
- Bonn F et Rochon 1993. Précis de Télédétection\_ vol.1, Principes et Méthodes, Presses de l'université du Québec/ AUPELF,485.
- Charriere A., Ibouh H. & Haddoumi H. (2011) : Le Haut Atlas central de Beni Mellal à Imilchil. In Michard et al. (Eds.), Nouveaux guides géologiques et miniers du Maroc, vol. 4, Notes Mém. Sér. Géol. Maroc, n° 559, 109-162.
- Crist, E.P. (1985) A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data. Remote Sensing of Environment, vol. 17, p. 301-306.
- 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 Forrier. Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université de Sherbrooke, 62 p.
- Deslandes, S. (1990) Initiation aux méthodes de traitement numérique des images satellites, sur le système PCI Inc., EASUPACE. CARTEL, 32 p.
- Dresnay, 1971 Sur la structure tectonique du Jbel Houanit et les accidents BRPM 431.33.N3. Rabat.
- Haddoumi H., Charrière A. & Mojon P.O. (2010) : Stratigraphie et sédimentologie des «Couches rouges» continentales du Jurassique-Crétacé du Haut Atlas central (Maroc) : implications paléogéographiques et géodynamiques. Geobios, 43, 433-451.
- Jenny, J, 1988 : Mémoire explicatif de la carte géologique du Maroc, feuille d'Azilal au 1/100.000. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, Rabat, 339 bis.
- Jenny, J., Le Marrec, A., Monbaron, M., 1981 : Les Couches rouges du Jurassique moyen du Haut Atlas central (Maroc) : corrélations lithostratigraphiques, éléments de datations et cadre tectono-sédimentaire. Bulletin de la Société géologique de France 23 (6), 627–639.
- Mattauer, M., Tapponnier, P. & Proust, F. (1977) : Sur les mécanismes de formation des chaînes intracontinentales. L'exemple des chaînes atlasiques du Maroc. Bull. Soc. Géol. France. 1977, (7), T. XIX, n3, pp. 521-526

- Monbaron, M, (1982) : Précision sur la chronologie de la tectonogenèse atlasique : exemple du domaine atlasique mesogéen du Maroc .C. R. Acad. Sci .Paris, Série 11, 294, 883-886
- Rolley J.P. (1977) : Carte géologique du Maroc au 1/100 000, feuille Afourer, *Notes Mém. Serv. géol. Maroc*, 247.
- Rolley, J.-P., 1973 : Étude géologique de l'Atlas d'Afourer, Haut Atlas central, Maroc. Doctorat 3 cycle, Université de Grenoble (inédit).
- Zouine, M, 1993: Géodynamique récente du haut Atlas. Evolution de sa bordure septentrionale et du moyen Atlas sud – occidental du cours du cénozoïque. Thèse de doctorat d'état es-sciences naturelles. Université Mohamed V faculté des sciences de Rabat. N, 262.