

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

par

Ahmed Laamrani El Idrissi

**RECHERCHE PAR TÉLÉDÉTECTION GÉOLOGIQUE DE SITES POTENTIELS  
D'HYDROCARBURES DANS L'ANTI-ATLAS MAROCAIN**

MARS 1999



### *Mise en garde/Advice*

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

## RÉSUMÉ

Les bassins de Ouarzazate et de Tindouf, respectivement au nord et au sud de l'Anti-Atlas, présentent des indices d'hydrocarbures dans les formations paléozoïques. Il s'agit de réservoirs carbonatés géorgiens (Cambrien inférieur) et gréseux géorgiens, acadiens (Cambrien moyen) et ordovicien. Les mêmes formations paléozoïques constituent une couverture partielle du socle dans l'Anti-Atlas et dessinent un grand pli complexe à l'ouest de Zagora et au sud de Ouarzazate. L'image Landsat-TM du 08 avril 1994 de cette région de l'Anti-Atlas central a été utilisée pour préciser et raffiner, par télédétection géologique, la carte géologique existante tant au point de vue lithologique que structural.

Après une correction radiométrique pour la lumière diffuse, la division des bandes TM1, TM3, TM4, TM5 et TM7 par la bande TM2 minimise les effets topographiques sur la réflectance et permet d'obtenir une discrimination lithologique maximale; la bande TM2 était celle qui présente le moins de variation de réflectance d'une lithologie à l'autre. Une image en fausses couleurs constituée à partir des deux premières composantes principales des 5 néo-canaux obtenus et du néo-canal 3/2 a permis la distinction de 27 unités stratiformes dans la couvertures infra-cambrienne et paléozoïque. Certaines recettes de bandes, déjà utilisées sur des terrains arides à lithologies semblables, sont applicables dans la zone d'étude.

Le plissement principal forme un grand pli en S à axe généralement est-ouest dans la demie nord de la région. D'autres plis secondaires transverses sont visibles dans la demie sud et des enlèvements des charnières des plis principaux dessinent des dômes et des

bassins. Les principales failles sont identifiées par inspection de la CP1 des canaux originaux.

C'est dans la partie sud de la région étudiée, montrant une stratigraphie complète, que se concentrent les diverses structures d'intérêt pétrolier identifiées, essentiellement des structures anticlinales en association avec les roches réservoirs potentielles encore coiffées de leur couverture imperméable respective de la zone d'étude

## REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont à mon directeur de recherche, monsieur Denis W. Roy pour ses précieux conseils et commentaires, ses encouragements, son soutien et sa patience qui m'ont permis d'accomplir ce travail dans les meilleures conditions.

Je tiens aussi à remercier tout particulièrement le professeur Gilles-H Lemieux, directeur du laboratoire de Télédétection à l'Université du Québec à Chicoutimi et membre du comité de mémoire, pour son intérêt soutenu et ses encouragements au fil de ce travail, et pour le matériel et les connaissances nécessaires mis à notre disposition pour la réalisation de ce travail.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers le professeur Réal Daigneault, membre du comité de mémoire, pour son soutien, ses conseils constants, sa disponibilité et ses commentaires judicieux durant la réalisation de ce travail.

Ma reconnaissance s'adresse également à monsieur Mohamed Kabaj, directeur du Centre Royal de Télédétection Spatiale du Maroc (CRTS) et à Driss El Hadani, chef de Division Gestion de Projets au CRTS, qui ont bien voulu nous fournir l'image Landsat-TM de l'Anti-Atlas ainsi que pour leur précieuse collaboration.

Merci également à monsieur Al Moundir Morabet, directeur de l'exploration à l'Office National de Recherche et d'Explorations Pétrolières (ONAREP), qui a bien voulu nous aider en nous communiquant des documents parfois difficiles à trouver et merci aussi au personnel de l'ONAREP.

J'aimerais remercier également monsieur Benoit Rivard, professeur au département des sciences de la Terre et de l'atmosphère à l'Université d'Alberta, de bien avoir lu et examiné ce mémoire. Tes commentaires et suggestions sont grandement appréciés.

Merci au bureau du registraire et à la fondation de l'Université du Québec à Chicoutimi (FUQAC) pour m'avoir accordé des bourses durant mes études de maîtrise et aux frères Daniel et Raymond Bégin du laboratoire de Télédétection de l'Université du Québec à Chicoutimi pour leurs conseils et aides. Merci également aux géologues marocains que nous avons consultés durant ce travail et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

En terminant je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma conjointe, Line Blackburn, pour ses encouragements constants et sa patience, à mes parents pour leur affection et leur soutien moral et financier, à mes frères et mes sœurs pour avoir cru en moi et à mes amis.

*Je dédie ce travail à la mémoire de la femme qui m'a*

*donné la vie, qui m'a aimé et qui m'a tant appris.*

*Son amour qu'elle m'a donné et son souvenir*

*resteront toujours présents en moi.*

*Je dédie ce travail à la mémoire de ma mère qui nous a quittés le 2 janvier 1998.*

## Table des matières

Résumé .....	ii
Remerciements .....	iv
Table des matières .....	vi
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux .....	xiv
<b>CHAPITRE 1:INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1- PROBLÉMATIQUE .....	1
1.1.1- Problématique générale .....	1
1.1.2- Problématique spécifique .....	10
1.2- OBJECTIFS .....	14
1.3- PRÉSENTATION DE L'ORGANISATION DU MÉMOIRE .....	14
<b>CHAPITRE 2: CADRE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL .....</b>	<b>17</b>
2.1- PRÉSENTATION GÉOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	17
2.2- GÉOLOGIE RÉGIONALE.....	17
2.3- LA SÉRIE INFRA-CAMBRIENNE ET PALÉOZOÏQUE .....	23
2.3.1- La série infra-cambrienne.....	23
2.3.2- La série paléozoïque .....	24
<b>CHAPITRE 3: TRAITEMENTS DE L'IMAGE.....</b>	<b>33</b>
3.1- PRÉ-TRAITEMENT ET CORRECTIONS DE L'IMAGE.....	34
3.1.1- Correction radiométrique.....	34
3.1.2- Correction de l'ombre diffuse.....	37
3.2- DISTINCTION ET IDENTIFICATION DES LITHOLOGIES .....	44
3.2.1- Analyse géomorphologique et spectrale.....	44
A- Caractéristiques morphologique.....	46

B- Caractéristiques spectrales des roches .....	46
3.2.2- Analyse en composantes principales .....	47
3.2.3- Choix des couleurs d’affichage .....	51
3.3- AUTRES MÉTHODES DE TRAITEMENT EXISTANT .....	58
3.4- REHAUSSEMENT DES LINÉAMENTS .....	60
<b>CHAPITRE 4: ANALYSE ET INTERPRETATION DE L’IMAGE .....</b>	<b>63</b>
4.1- DISCRIMINATION ET IDENTIFICATION DES DIFFÉRENTES UNITÉS .....	64
4.1.1- Discrimination et identification des unités infra-cambriennes.....	66
4.1.2- Discrimination et identification des unités du Cambrien inférieur .....	88
4.1.3- Discrimination et identification des unités du Cambrien moyen.....	97
4.1.4- Discrimination et identification des unités de l’Ordovicien.....	112
4.1.5- Discrimination et identification des unités du Silurien .....	127
4.1.6- Discrimination et identification des unités du Dévonien inférieur .....	132
4.1.7- Discrimination et identification des unités du Dévonien moyen-supérieur.....	136
4.2- LA CARTE LITHOSTRATIGRAPHIQUE .....	139
4.2.1- Carte lithostratigraphique à partir de l’interprétation de l’image.....	139
4.2.2- Signatures spectrales analogues.....	146
<b>CHAPITRE 5: STRUCTURES ET SITES FAVORABLES AUX HYDROCARBURES .</b>	<b>150</b>
5.1- LES STRUCTURES PLISSÉES.....	151
5.2- LES LINÉAMENTS ET FAILLES .....	156
5.2.1- Extraction des linéaments sur l’image de la zone d’étude .....	156
5.3- LES SITES FAVORABLES AUX HYDROCARBURES .....	162
<b>CHAPITRE 6: DISCUSSION.....</b>	<b>170</b>
6.1- CHOIX DE LA MÉTHODE .....	171
6.2- UTILITÉ DE L’ANALYSE GÉOMORPHOLOGIQUE.....	172
6.3- L’INFORMATION GÉOLOGIQUE.....	174
6.3.1- Informations lithologiques.....	174

6.3.2- Processus de dolomitisation.....	175
6.3.3- L'apport de la télédétection pour les hydrocarbures. ....	176
<b>CHAPITRE 7: CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS</b> .....	<b>178</b>
7.1- CONCLUSIONS .....	178
7.2- RECOMMANDATIONS.....	181
<b>RÉFÉRENCES</b> .....	<b>183</b>

## Liste des figures

<b>Figure 1:</b> Les principales provinces pétrolières du Maroc.....	4
<b>Figure 2:</b> Les réservoirs possibles dans le paléozoïque inférieur de l'Anti-Atlas .....	6
<b>Figure 3:</b> Schémas théoriques illustrant les différents pièges possibles dans l'Anti-Atlas .....	7
<b>Figure 4:</b> L'image Landsat-TM de la zone d'étude (Bande 5).....	12
<b>Figure 5:</b> Localisation de la zone d'étude et de sites de vérité-terrain.....	18
<b>Figure 6:</b> Répartition des terrains précambriens, infra-cambriens et paléozoïques au centre de l'Anti-Atlas. ....	21
<b>Figure 7:</b> Carte géologique existante de l'Anti-Atlas tirée de Saadi et al. (1985).....	22
<b>Figure 8:</b> Coupes schématiques des faciès volcaniques et sédimentaires cambriens à travers l'Anti-Atlas. ....	27
<b>Figure 9:</b> Évolution verticale et horizontale du cycle cambrien de Saghro à Ifni. ....	27
<b>Figure 10:</b> Coupe schématique des terrains précambriens, infra-cambriens et cambriens au niveau du volcan du Jbel Boho (modifiée d'après Ducrot et Lancelot 1977). ...	28
<b>Figure 11:</b> Accentuation des zones d'ombre qui apparaissent en noir dans la bande 5 .....	35
<b>Figure 12:</b> Localisation des points de mesure sur l'image Landsat-TM de la zone d'étude (bande 5). ....	40
<b>Figure 13:</b> Distribution de la variation des valeurs spectrales de toutes les unités.....	43
<b>Figure 14:</b> Première composante principale (CP1) d'une portion de l'image originale.....	49

<b>Figure 15:</b> Les trois premières composantes principales des canaux originaux.....	50
<b>Figure 16:</b> Les trois composantes principales des néo-canaux. ....	53
<b>Figure 17:</b> Composition en fausses couleurs (5/2, 7/2, 4/2 en RVB). ....	54
<b>Figure 18:</b> Composition retenue pour la discrimination lithologique.....	57
<b>Figure 19:</b> Carte de localisation des différentes coupes schématiques et des sous-images utilisées dans la présente étude. ....	65
<b>Figure 20:</b> Sous-scènes montrant la première unité gréseuse IK0-e infra-cambrienne (A) qui devient conglomératique IK0-w vers l'ouest (B).....	67
<b>Figure 21:</b> Coupes topographiques schématiques à travers (A) les différentes unités infra-cambriennes et paléozoïques et (B) les conglomérats infra-cambriens.....	68
<b>Figure 22:</b> Spectre de réflectance des conglomérats (A) et des grès. ....	69
<b>Figure 23:</b> Application de traitements existants sur les grès infra-cambrienne IK0-e. ....	73
<b>Figure 24:</b> Les sous-images A et B montrent les dolomites dans la CRDL. ....	76
<b>Figure 25:</b> Spectre de réflectance des dolomites infra-cambriennes IK1.....	77
<b>Figure 26:</b> Sous-image montrant les trachytes typiques des dolomites infra-cambriennes IK1.....	77
<b>Figure 27:</b> Validité des traitements existants pour la discrimination des dolomites infra-cambriennes IK1.....	78
<b>Figure 28:</b> Sous-images CRDL montrant l'aspect des grès IK2 et des schistes IK3 de la série lie-de-vin à l'est (A) et à l'ouest. (B). ....	83

<b>Figure 29:</b> Sous-images CRDL montrant un changement de couleur de IK2 au centre nord (A) et au sud ouest (B) de la région étudiée. ....	84
<b>Figure 30:</b> Les spectres de réflectance des grès (A) et des schistes (B) infra-cambriens.....	85
<b>Figure 31:</b> Application de traitement existants sur les grès IK2 et les schistes IK3 infra-cambriens de la zone d'étude. ....	86
<b>Figure 32:</b> Unités IK2 et IK3 en position localement différente sur l'image Landsat-TM (A) et la carte géologique existante (B). ....	87
<b>Figure 33:</b> Sous-images CRDL montrant les calcaires dolomitiques Ki1 et les grès Ki2 géorgiens. L'unité Ki2 à peine visible sur A, indistinguable sur B. ....	89
<b>Figure 34:</b> Spectre de réflectance des calcaires dolomitiques Ki1 et des grès Ki2. ....	90
<b>Figure 35:</b> Application de traitements existants sur les calcaires dolomitiques Ki1 et les grès Ki2 géorgiens de la zone d'étude.....	93
<b>Figure 36:</b> Changements dans l'intensité du violet des calcaires Ki1: claire au sud-ouest (A) et foncée au nord-est (B) de la région étudiée.....	94
<b>Figure 37:</b> Couleur verte des schistes acadiens Km1 et Km3 . ....	100
<b>Figure 38:</b> Spectre de réflectance des schistes acadiens. ....	101
<b>Figure 39:</b> Application de traitements existants sur les schistes acadiens Km1 et Km3.....	102
<b>Figure 40:</b> Organisation en crêtes de l'unité gréseuse Km2 de l'Acadien .....	108
<b>Figure 41:</b> Spectres de réflectance des grès et des quartzites: Km2 (A) et Km4 (B).....	109
<b>Figure 42:</b> Application de traitements existants sur les grès Km2, les schistes Km1 et Km3 et les quartzites Km4 du Cambrien moyen .....	110

<b>Figure 43:</b> Quartzites Km4 du Cambrien moyen de la zone d'étude.....	111
<b>Figure 44:</b> Unités schisteuses O1 et O2 de l'Ordovicien inférieur du Jbel Bani.....	113
<b>Figure 45:</b> Spectres de réflectance des schistes ordoviciens: O1 (A) et O2 (B).....	114
<b>Figure 46:</b> Application de traitements existants sur les unités de l'Ordovicien inférieur O1, O2 et O3 et supérieur O4, O5 et O6.....	117
<b>Figure 47:</b> Appartenance probable d'un lambeau de roche sédimentaire à l'unité ordovicienne O3 (A). (B): Spectre de réflectance de O3.....	119
<b>Figure 48:</b> Grès O4 et quartzites O5 et O6 de l'Ordovicien supérieur du Jbel Bani (A) et du Jbel Hamsaïlikh (B).....	121
<b>Figure 49:</b> Aspect fracturé des unités de l'Ordovicien supérieur dans la partie SE de la région étudiée.....	122
<b>Figure 50:</b> Spectre de réflectance des grès O4 de l'Ordovicien supérieur. ....	122
<b>Figure 51:</b> Coupes topographiques schématiques des unités de l'Ordovicien supérieur du Jbel Kissane (A) et du Jbel Hamsaïlikh (B).....	123
<b>Figure 52:</b> Spectres de réflectance des quartzites ordoviciennes: O5 (A) et O6 (B).....	126
<b>Figure 53:</b> Unités siluriennes S1 et S2 au sud du Jbel Bani (A) et S1, S2, S3, S4 et S5 dans l'anticlinal du Jbel Hamsaïlikh au sud de la région étudiée (B) .....	129
<b>Figure 54:</b> Application de traitements existants sur les unités siluriennes .....	131
<b>Figure 55:</b> Dyke jurassique plissé (A) et boudiné (B) au sud de la région d'étude .....	133
<b>Figure 56:</b> Les différentes unités du Dévonien inférieur au sud de la région étudiée .....	134

<b>Figure 57:</b> Application de traitements existants sur les unités du Dévonien.....	137
<b>Figure 58:</b> Unités du Dévonien moyen-supérieur (en jaune) largement cachées par les alluvions .....	138
<b>Figure 59:</b> Carte lithostratigraphique réalisée à partir de l'image Landsat- TM.....	141
<b>Figure 60:</b> Comparaison entre la carte lithostratigraphique réalisée à partir de l'image Landsat-TM et la carte géologique existante.....	143
<b>Figure 61:</b> Transition latérale progressive entre les grès IK0-e et les conglomérat IK0-w .....	145
<b>Figure 62:</b> Moyenne des valeurs spectrales dans les six canaux pour chaque type de roche de la zone d'étude.....	149
<b>Figure 63:</b> Carte des plis de la région réalisée à partir de l'image Landsat-TM. ....	154
<b>Figure 64:</b> Rehaussement des linéaments sur l'image Landsat-TM.....	159
<b>Figure 65:</b> Carte des linéaments de la région, réalisée à partir de l'interprétation de l'image Landsat-TM.....	160
<b>Figure 66:</b> Colonnes stratigraphiques locales et possibilités de roches réservoirs. ....	163
<b>Figure 67:</b> Carte de localisation des sites favorables aux hydrocarbures. ....	167
<b>Figure 68:</b> Localisation des sites favorables aux hydrocarbures sur l'image CRDL .....	168
<b>Figure 69:</b> Fracturation autour des sites favorables aux hydrocarbures .....	169
<b>Carte en pochette:</b> Carte lithostratigraphique de l'Anti-Atlas central réalisée à partir de l'image Landsat-TM (Scène 201-39).....	191

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1:</b> Possibilités pétrolières dans le Paléozoïque inférieur du Maroc .....	5
<b>Tableau 2:</b> Description des caractéristiques spectrales de l'image Landsat-TM (201-39). .....	13
<b>Tableau 3:</b> Stratigraphie des formations d'âge paléozoïque inférieur de Agdaz à Akka. ....	32
<b>Tableau 4:</b> Détermination des valeurs spectrales dans les zones d'ombre totale. ....	36
<b>Tableau 5:</b> Utilisation de statistiques pour l'identification de la bande qui présente le moins de variations spectrales d'une lithologie à une autre. ....	41
<b>Tableau 6:</b> Différents traitements numériques de l'image originale et des néo-images. ....	45
<b>Tableau 7:</b> Méthodes de traitement utilisées dans des terrains semblables à l'Anti-Atlas .....	59
<b>Tableau 8:</b> Filtres directionnels utilisés .....	62
<b>Tableau 9:</b> Description des 27 unités de la carte lithostratigraphique de la figure 59 .....	142
<b>Tableau 10:</b> Valeurs spectrales des différentes unités de la zone d'étude.....	148
<b>Tableau 11:</b> Compilation des fréquences et des longueurs cumulées de l'ensemble des linéaments paléozoïques de la zone d'étude .....	161

## CHAPITRE 1

### INTRODUCTION

#### 1.1- PROBLÉMATIQUE

##### 1.1.1- Problématique générale

Comment identifier des pièges de pétrole dans une région désertique comme l'Anti-Atlas marocain? Il y a seulement un siècle et demi, les prospecteurs pétroliers se contentaient de rechercher les indices superficiels et de placer les forages à proximité plus au moins immédiate de ceux-ci. C'est à partir de ces indices que l'exploration pétrolière s'est tout d'abord développée (Guillemont 1964).

Peu à peu les règles de la géologie du pétrole ont permis de dégager des connaissances acquises par l'observation des gisements découverts et la prospection a pu s'orienter vers des régions dépourvues de manifestations superficielles. L'exploration pétrolière a connu un essor considérable grâce aux méthodes géologiques, notamment l'utilisation géologique des photographies aériennes, et géophysiques, alors qu'avant, c'était surtout la géologie de surface qui était la seule méthode connue depuis 1925 pour la recherche des pièges structuraux (Guillemont 1964).

Les recherches du pétrole sur le territoire marocain ont commencé au début des années 1900. La période de 1900-1928 correspond aux prémices de l'exploration qui se sont effectuées dans le bassin du Gharb (Rif), autour d'indices de surface et qui aboutirent à la découverte du petit gisement d'huile d'Ain Hamra en 1923 (Morabet 1992). La période de 1928-1981 est marquée par la création du Bureau de Recherche et de Participation Minière (BRPM) et la Société Chérifienne du Pétrole (SCP) et par l'introduction des méthodes sismiques en 1935. L'exploration sous la direction de la SPC s'est concentré sur le Gharb (domaine rifain) jusqu'au 1959 puis s'est étendue aux bassins d'Essaouira (Meseta), du Souss (NO de l'Anti-Atlas) et de Guercif (Meseta orientale). Les découvertes d'hydrocarbures furent localisées, dans les rides pré-rifaines et la zone de Fili. La production atteignit un million b/An en 1957 et à la fin de 1981 la production était de 1 821 500 tonnes pour l'huile et 1000 MMNm<sup>3</sup> pour le gaz. (Morabet 1992). L'année 1981 a été marquée par la création de l'Office National de Recherches et d'Explorations pétrolières (ONAREP). Ce dernier sera chargé de l'ensemble de l'exploration pétrolière dans les différents domaines structuraux du Maroc: le domaine rifain au Nord, le domaine mesetien et atlasique au centre et le domaine anti-atlasique et saharien au sud. Les recherches résultèrent en la réalisation de 76 forages dont 36 en partenariat (dans le cadre de 26 conventions) et aboutirent à la découverte du champ de gaz/condensât de Meskala (Bassin d'Essaouira), d'un panneau producteur complémentaire au gisement du Rhalem (SCP, 1982) et à divers accumulations de gaz biogéniques dans le bassin du Gharb. Sur la période de 1981-1990, la production cumulée a été de 181 240 Tonnes pour l'huile et 784,59 MMNm<sup>3</sup> pour le gaz (Morabet 1992).

Les études réalisées par l'ONAREP depuis 1981, par le biais des données sismiques, ont montré que l'Anti-Atlas possède plusieurs possibilités favorables au pétrole qui peuvent être classées parmi les réserves pétrolières possibles du Maroc (Figure 1 et Tableau 1). Ces travaux ont permis de préciser les notions sur les réservoirs et les couvertures possibles dans l'Anti-Atlas (Figure 2). Il s'agit de réservoirs carbonatés exclusivement dans le Géorgien et gréseux dans le Cambrien inférieur (Géorgien), le Cambrien moyen (Acadien) et l'Ordovicien. Les couvertures possibles correspondent aux: schistes du Géorgien, de l'Acadien et de l'Ordovicien. Les pièges potentiels de l'Anti-Atlas sont généralement de nature structurale: pièges contre failles, les dômes structuraux et les pièges anticlinaux associés à des failles (Figure 3). En plus, les bassins de Tindouf et Ouarzazate qui bordent la zone d'étude respectivement au sud et au nord, présentent d'éventuels indices d'hydrocarbures (Costagliola 1992).

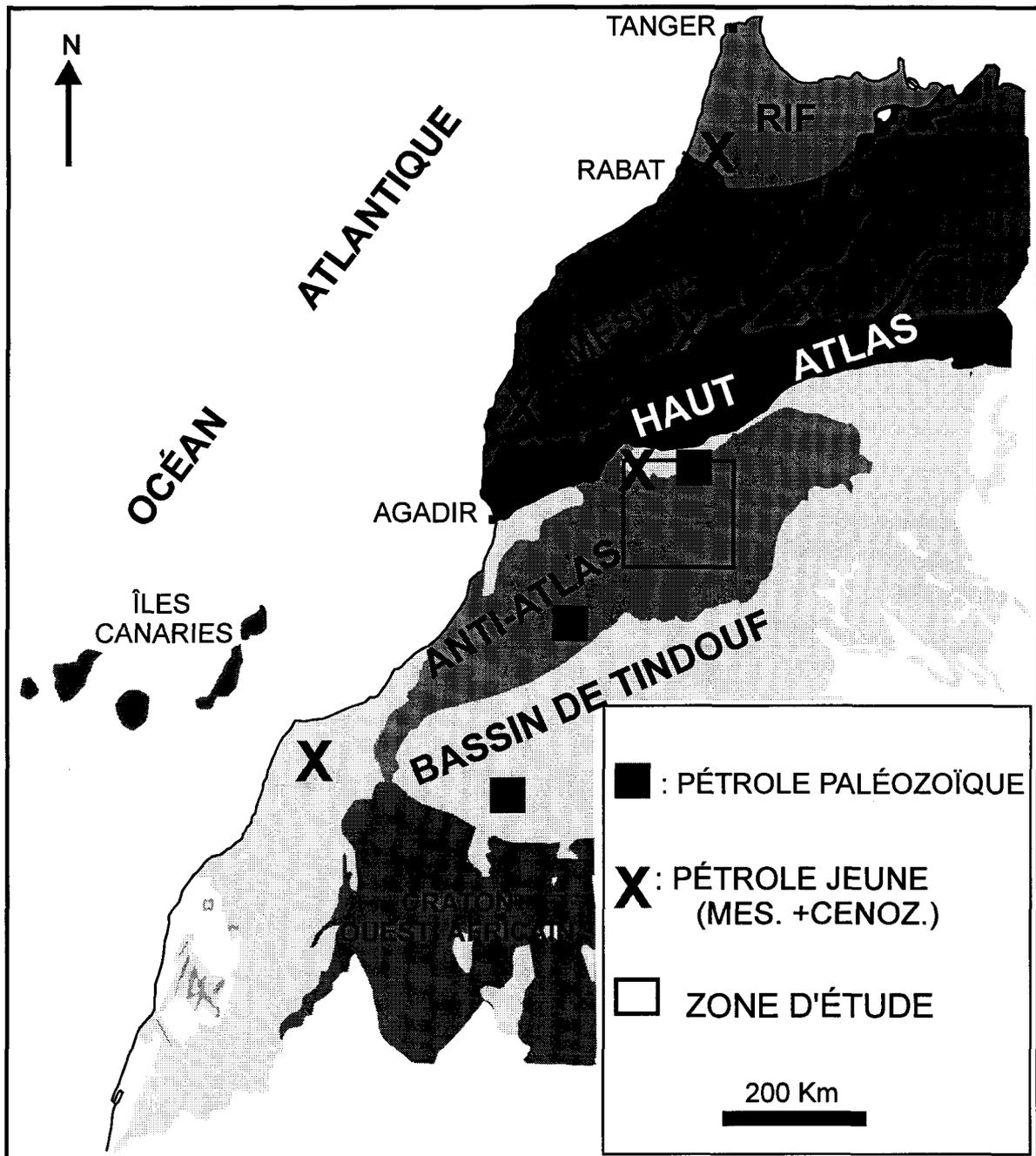


Figure 1: Les principales provinces pétrolières du Maroc

Tableau 1: Possibilités pétrolières dans le Paléozoïque marocain

RÉGIONS ET BASSINS	RÉSERVOIRS	PIÉGES	COUVERTURES
Bassin de <sup>(1)</sup> Doukkala (Meseta côtière)	Carbonates Dévoniens Schistes du Silurien et Du Dévonien	Structuraux: plis et failles	
Bassin du <sup>(2)</sup> Grand Tadla (Meseta central)	Grès de l'Ashgil, du Trias et du Bathonien	Structures hercyniennes, stratigraphiques et combinées	
Bassin <sup>(3)</sup> d'Ouarzazte (Nord de l'Anti-Atlas)	Grès de l'Ashgil, du Trias et du Dogger et Carbonates du Dévonien	Structuraux et stratigraphiques	
Monoclinal <sup>(4)</sup> du Jbel Bani (Anti-Atlas)	Calcaires du Géorgien Grès du Géorgien, de l'Acadien et de l'Ordovicien	Structures hercyniennes: plis et failles; Stratigraphiques et combinées	Schistes gréseux du Géorgien, Schistes acadiens et ordoviciens
Bassin <sup>(5)</sup> de Tindouf (Sud de l'Anti-Atlas)	Récifs dévoniens		

(1): Jabour 1992

(2): Hopkins 1992

(3): Costagliola 1992

(4): BRPM (1961a, 1961b et 1962) et ONAREP (1991 et 1992)

(5): Hopkins 1992

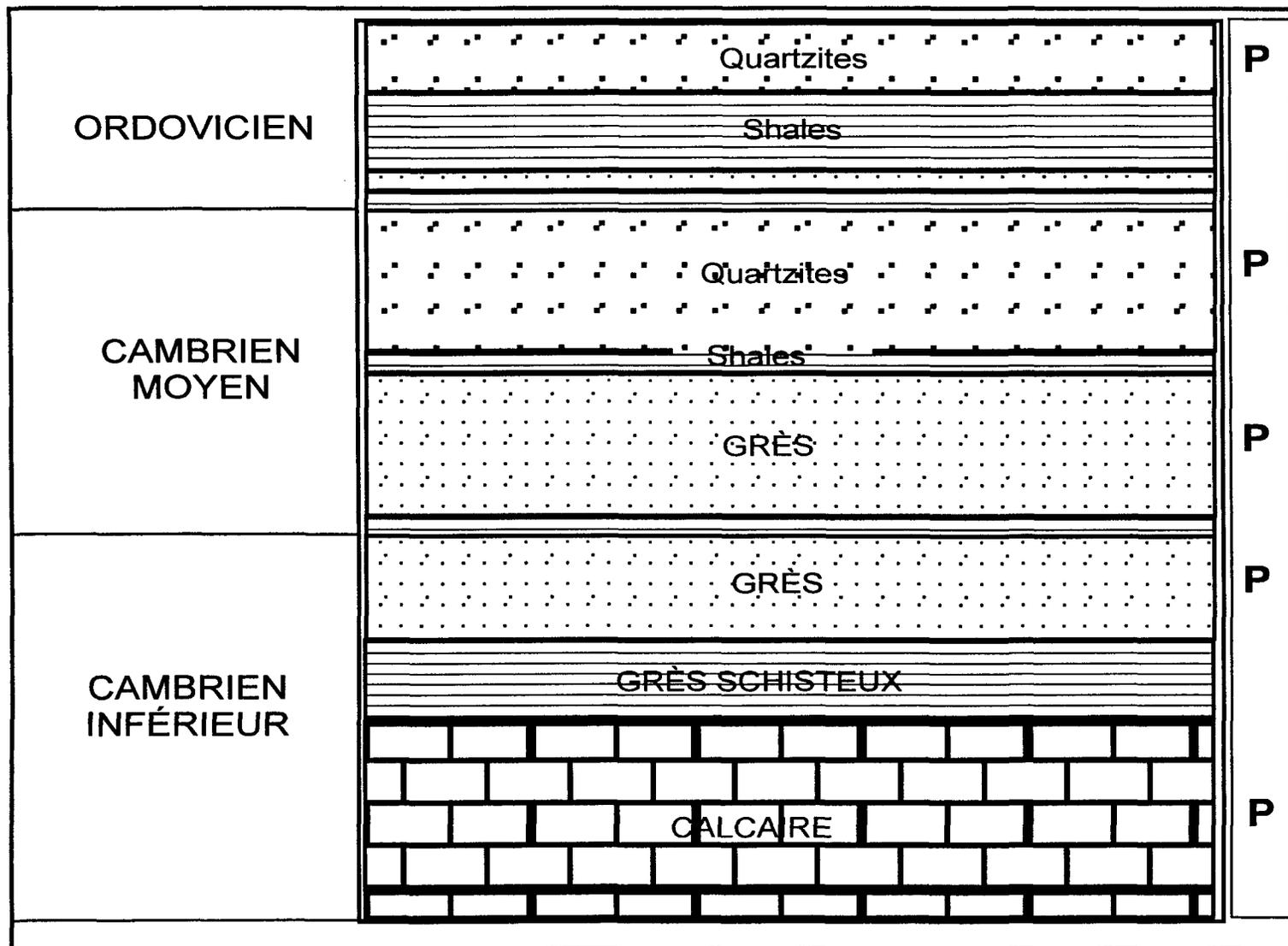


Figure 2: Les réservoirs de pétrole possibles (P) dans le paléozoïque inférieur de l'Anti-Atlas.

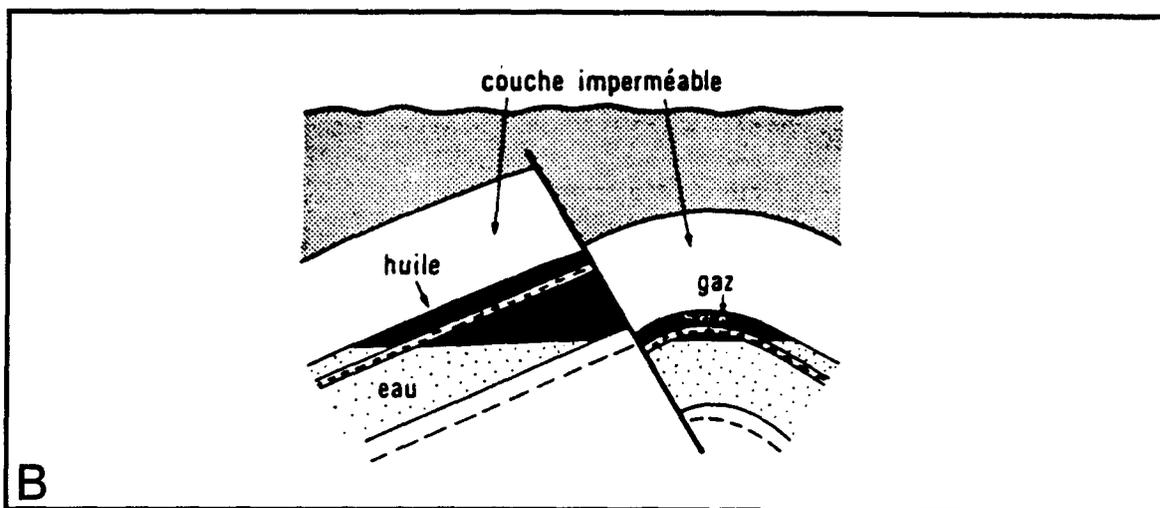
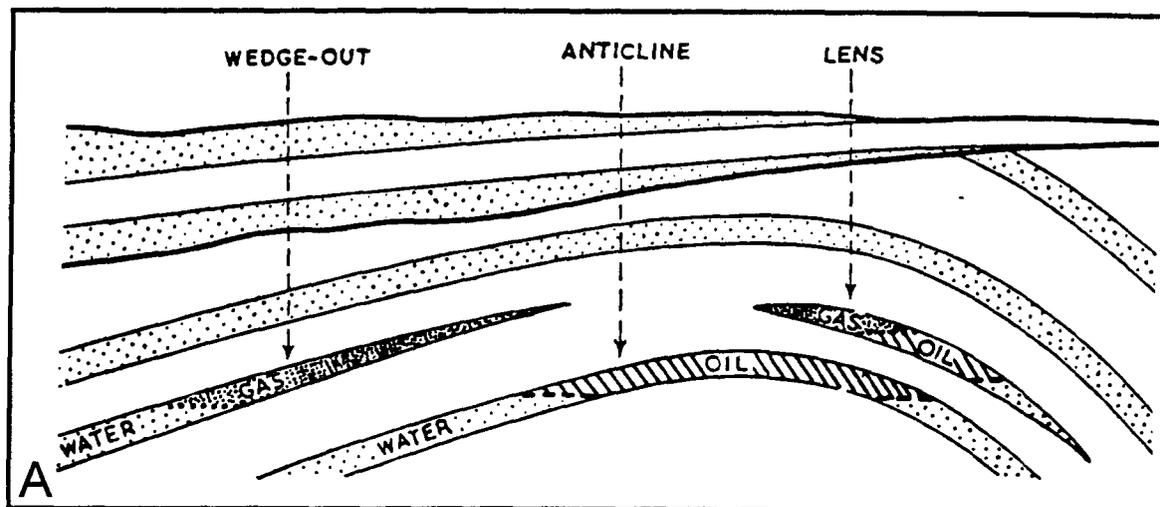


Figure 3: Schémas théoriques illustrant les différents pièges d'hydrocarbures possibles dans l'Anti-Atlas. La figure (A) tirée de Hobson et Tiratsoo (1981), montre entre autre un exemple de piégeage dans une structure anticlinale. La figure (B) tirée de Foucault et Raoult (1988), montre deux types de pièges, à gauche une faille et à droite une structure anticlinale.

Les succès concernant la connaissance géologique des bassins et parfois les découvertes d'hydrocarbures sont incontestablement à mettre, pour une large part, à l'actif de la prospection sismique (sismique réflexion). Les techniques sismiques ont élargi le champ de leur application grâce aux progrès de l'électronique, surtout par l'introduction de l'enregistrement numérique (Rouwane et al. 1992).

Une nouvelle méthode à base d'informatique a été introduite dans le domaine des hydrocarbures, il s'agit de la télédétection numérique. Elle est en développement très rapide depuis environ vingt ans. Cette technique permet de mieux différencier les objectifs les uns par rapport aux autres.

Cette technique de photo-satellite offre une vue spatiale remarquable de la surface terrestre actuelle, de ses structures et de sa morphologie. Les caractéristiques de l'image satellite se révèlent surtout lors de leur confrontation avec l'analyse des cartes géologiques. L'imagerie satellite permet de comparer d'un seul coup de grandes structures ou de prolonger certains accidents de cartes géologiques. Elles attirent souvent l'attention sur des alignements nouveaux ignorés ou sous estimés par les géologues de terrain et qui peuvent avoir un intérêt économique (Hobson et Tiratsoo 1981).

Selon Ding et al. (1993), les premières applications de la télédétection numérique dans le domaine de la recherche des hydrocarbures, relativement jeunes, datent de 1980. Ces applications peuvent être classées en trois volets:

(1) Des études ont utilisé des caractéristiques spectrales des roches et d'autres traitements plus spécialisés (les rapports des bandes, analyses en composantes, etc.) pour discriminer les roches réservoirs à potentiel ainsi pour l'exploration des zones d'altération en hydrocarbures (Ding et al. 1993, dans le bassin de Jiangnan en Chine; Sabins 1987, au Kenya, au Soudan et au nord-ouest de Colorado; Mitra et al. 1992, dans les terrains désertiques de Rajasthan en Inde; Marrs 1989, dans le bassin de Denver, Colorado et McCoy et al. 1989).

(2) d'autres études ont été réalisées pour analyser et interpréter des structures (linéaments, anticlinaux et failles) à intérêt pétrolier (Rolet et al. 1993, dans le massif armoricain; Thiessen et al. 1993, dans la région Hobs, Nouveau Mexique; Duncan et al. 1988, en Arabie Saoudite, Gess et al. 1988, en France; Dekker et al. 1989, dans la région Papouasie- Nouvelle-Guinée; Koger et Carter 1988; Merin 1988, dans la partie centrale de Pennsylvanie, Bassin appalachien; Sabins 1987, au Kenya et au Soudan). Al Fasatwi et Van Dijk (1989) ont montré une forte relation entre la répartition des linéaments sur l'image satellitaire et les localisations des sites d'hydrocarbures dans le bassin de Sirt, Libye.

(3) Carter et Koger (1988) et Sabins (1987) ont combiné les deux premiers volets pour cartographier les sites d'hydrocarbures.

### **1.1.2- Problématique spécifique**

Plus récemment cette technique de cartographie géologique à partir d'images satellitaires a été appliquée à l'Anti-Atlas, qui est une zone étendue et difficile d'accès. Les premières applications géologiques de la télédétection, à base d'informatique, furent réalisées au moyen de données MSS de faible résolution spatiale et ont porté principalement sur l'aspect spectral ou radiométrique des formations géologiques et la fracturation (Emran et al. 1988). L'avènement des satellites de seconde génération, SPOT et Landsat-TM, a entraîné la remise en chantier de nombreuses études. Les plus importantes ont porté sur des applications minières. Il s'agit d'aide à la prospection cobaltifère dans les terrains précambriens (Trefois et al. 1993). Mais, à notre connaissance, les images numériques multispectrales n'ont jamais été utilisées pour des fins de la géologie pétrolière dans l'Anti-Atlas.

Actuellement et grâce à la technique de photographie aérienne, les différents domaines structuraux du Maroc et notamment le domaine de l'Anti-Atlas sont dotés d'une cartographie géologique plus au moins détaillée à des échelles de 1/1 000 000. Alors que selon le rapport du ministère de l'Énergie et des Mines du Maroc de 1997 sur le Plan National de Cartographie Géologique, le taux de couverture actuel du territoire marocain en cartes géologiques à des échelles utilisées par des opérateurs économiques et

notamment pour la recherche pétrolière (cartes à 1/50 000 et 1/100 000) s'avère insuffisant et ne dépasse pas 20%. La carte géologique existante (Saadi et al. 1985) de la zone d'étude est une carte chronostratigraphique. Seulement quelques travaux ponctuels de type lithostratigraphique du secteur d'étude sont disponibles.

Est-il possible d'utiliser la télédétection numérique, plus perfectionnée que la photographie aérienne, pour cibler des indices pétroliers dans l'Anti-Atlas? Est-ce que la télédétection peut rendre plus efficaces les méthodes classiques, dispendieuses et lentes, qui utilisent la sismique réflexion et la stratigraphie?

Une image satellitaire Landsat-TM (Figure 4) de l'Anti-Atlas (Scène 201-39) datant du 08 avril 1994 a été fournie par le Centre Royal de Télédétection Spatiale (CRTS) du Maroc pour étudier les possibilités pétrolières paléozoïques de la zone d'étude. La scène considérée, centrée sur 30° 19' N et 06° 11' O, correspond à une zone aride à fort relief et englobe une surface d'environ 34 000 km<sup>2</sup> (185 km x 185 km), comprenant les régions de Ouarzazate, de Bou-Azzer, de Zagora, de Jbel Bani, et l'accident majeur de l'Anti-Atlas. L'aridité de cette région où le roc est souvent à nu, la rareté de sa végétation, sauf le long des cours d'eau, et les caractéristiques spectrales et spatiales de l'image Landsat-TM (Tableau 2) constituent des facteurs favorables à la cartographie géologique par télédétection.

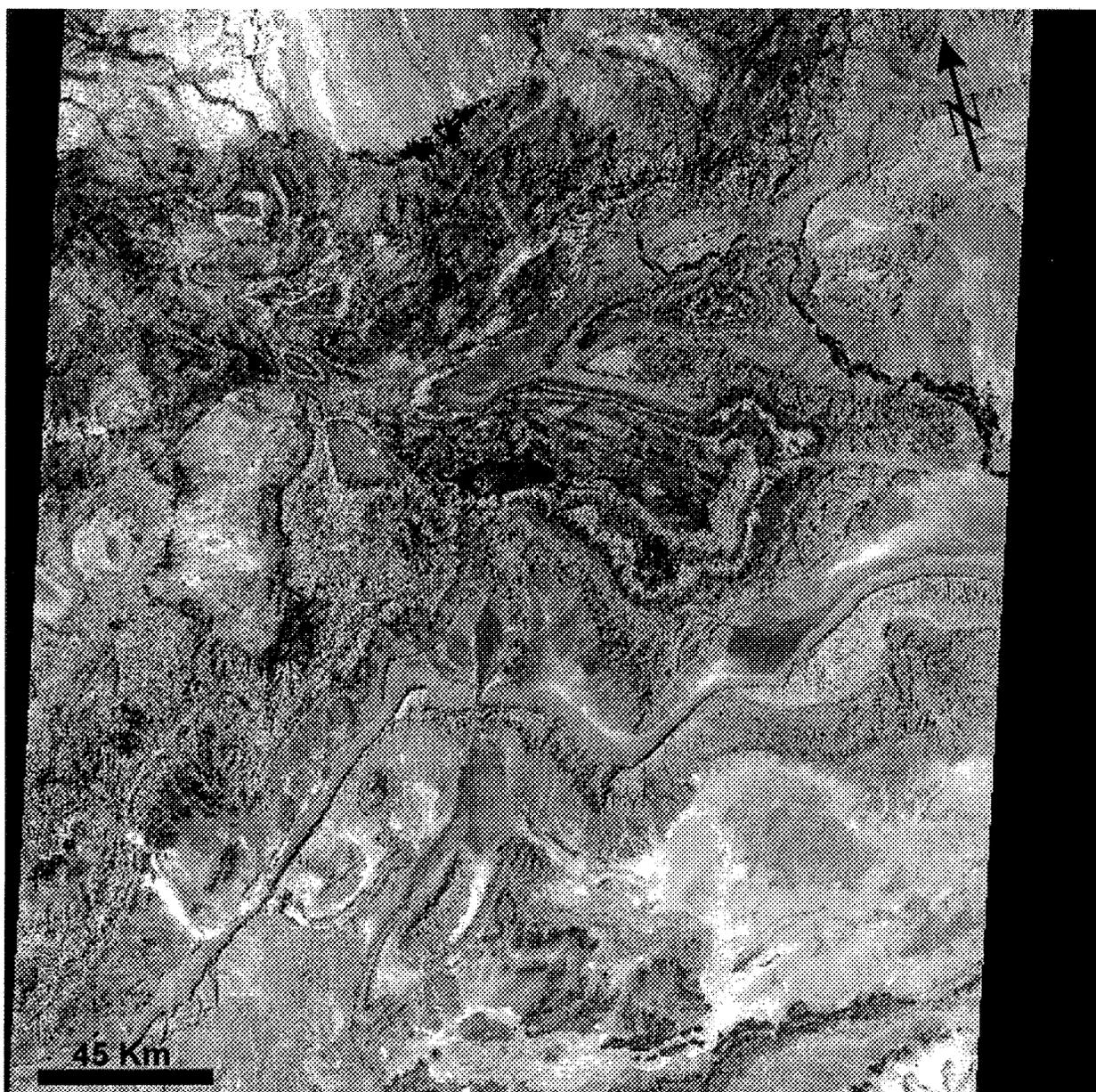


Figure 4: Image Landsat-TM de la zone d'étude (bande 5).

Tableau 2: Description des caractéristiques spectrales  
de l'image Landsat-TM de la zone d'étude

	LANDSAT-TM
Scène	201-39
Dimensions de la Scène	185 x 185 Km <sup>2</sup>
Date Heure	08 Avril 1994 ~ 10h 30 AM
Résolution	30 m sauf TM6=120 m
Bandes spectrales (en $\mu\text{m}$ )	<b>TM1:</b> 0,45 à 0,52 bleu <b>TM2:</b> 0,52 à 0,60 rouge <b>TM3:</b> 0,63 à 0,69 vert <b>TM4:</b> 0,76 à 0,90 proche IR <b>TM5:</b> 1,55 à 1,75 IR moyen <b>TM6:</b> 2,10 à 2,35 IR thermique <b>TM7:</b> 10,40 à 12,5 IR moyen

## 1.2- OBJECTIFS

Les objectifs spécifiques de cette étude sont d'établir une carte lithostratigraphique et structurale à l'aide de la télédétection, de distinguer et identifier les unités lithologiques, de valider et préciser les contacts stratigraphiques indiqués sur la carte géologique existante et de proposer une interprétation structurale de la carte résultante. L'objectif ultime de cette étude est d'utiliser la carte résultante pour analyser et évaluer les structures qui pourraient présenter un intérêt particulier pour l'exploration pétrolière.

## 1.3- PRÉSENTATION DE L'ORGANISATION DU MÉMOIRE

Le chapitre 2 situe le cadre géologique de la région étudiée. Nous y résumons la physiographie de l'Anti-Atlas et de la région d'étude et y décrivons les caractéristiques générales du socle protérozoïque, la stratigraphie et les caractéristiques lithologiques de la série infra-cambrienne et paléozoïque. Les travaux ponctuels que nous utilisons comme vérité-terrain pour l'identification des roches réservoirs potentielles et des autres lithologies y sont synthétisés.

Le chapitre 3 décrit les divers traitements qui ont été appliqués à l'image Landsat-TM de la zone d'étude. Nous y expliquons d'abord les diverses corrections de l'ombre sur l'image et leur utilité, ensuite les techniques classiques (rapport de bandes, analyses en composantes principales et filtrage) de rehaussement des informations lithologiques et

structurales. Nous y expliquons aussi le choix de la composition, en fausses couleurs, retenue pour la discrimination lithologique et qui va être à la base de la carte lithostratigraphique.

Le chapitre 4 aborde la discrimination et l'identification des 27 unités stratiformes dans la couverture infra-cambrienne et paléozoïque. Nous y décrivons les critères distinctifs (réponse spectrale et morphologie sur l'image de départ et la carte topographique) des 27 unités stratiformes. Nous y utilisons plusieurs sections locales comme vérité-terrain pour l'identification des roches réservoirs potentielles et des autres lithologies. Dans ce chapitre nous vérifions la validité, sur la région d'étude, de certains traitements déjà utilisés dans des terrains semblables. Enfin nous utilisons ces résultats pour établir une carte lithostratigraphique de la zone d'étude.

Le chapitre 5 utilise l'analyse structurale pour identifier les sites à potentiel pétrolier. Nous y analysons et interprétons les structures plissées et les fractures de la carte structurale résultante afin de localiser les pièges structuraux (anticlinaux, failles) et de déterminer l'attitude favorable des pièges structuraux éventuels. Nous y justifions le choix des différents sites favorables aux hydrocarbures de la zone d'étude.

Le chapitre 6 discute du choix de la méthode et de ses limites ainsi que l'information géologique obtenue et de sa validité. Nous y discutons aussi des améliorations possibles de différents aspects de la présente étude et notamment de la composition retenue pour la discrimination lithologique.

Le chapitre 7 fait ressortir les principales conclusions et recommandations qui se dégagent de la présente étude. Nous y soulignons les aspects originaux de la méthode de traitement suivie et les objectifs qui ont été atteints. Nous y abordons aussi la contribution de la présente étude à l'identification des sites favorables aux hydrocarbures à partir de la carte lithostratigraphique et structurale obtenue à l'aide de télédétection.

## CHAPITRE 2

### **CADRE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL**

#### 2.1- PRÉSENTATION GÉOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

L'Anti-Atlas, géographiquement parlant, est une zone montagneuse, dans le sud marocain qui appartient à la marge nord-ouest de l'Afrique (Figure 5). L'Anti-Atlas s'étend approximativement de la ville d'Ifni jusqu'au Jbel Saghro (distance approximative de 500 Km) suivant une direction SO-NE. Il est limité au nord par la plaine du Sous, puis, au-delà du Siroua, par la vallée de l'Oued Dades, à l'est par le Tafilalet et au sud-est par la bordure nord de la Hammada du Dra (Figure 5).

#### 2.2- GÉOLOGIE RÉGIONALE

Du point de vue géologique, l'Anti-Atlas fait partie du domaine structural Anti-Atlasique et saharien du Maroc (Figure 5). C'est une grande dalle bombée et légèrement basculée vers le sud avec le Précambrien, l'Infra-cambrien et le Cambrien inférieur surtout localisés au nord, et le reste du Paléozoïque essentiellement au sud.

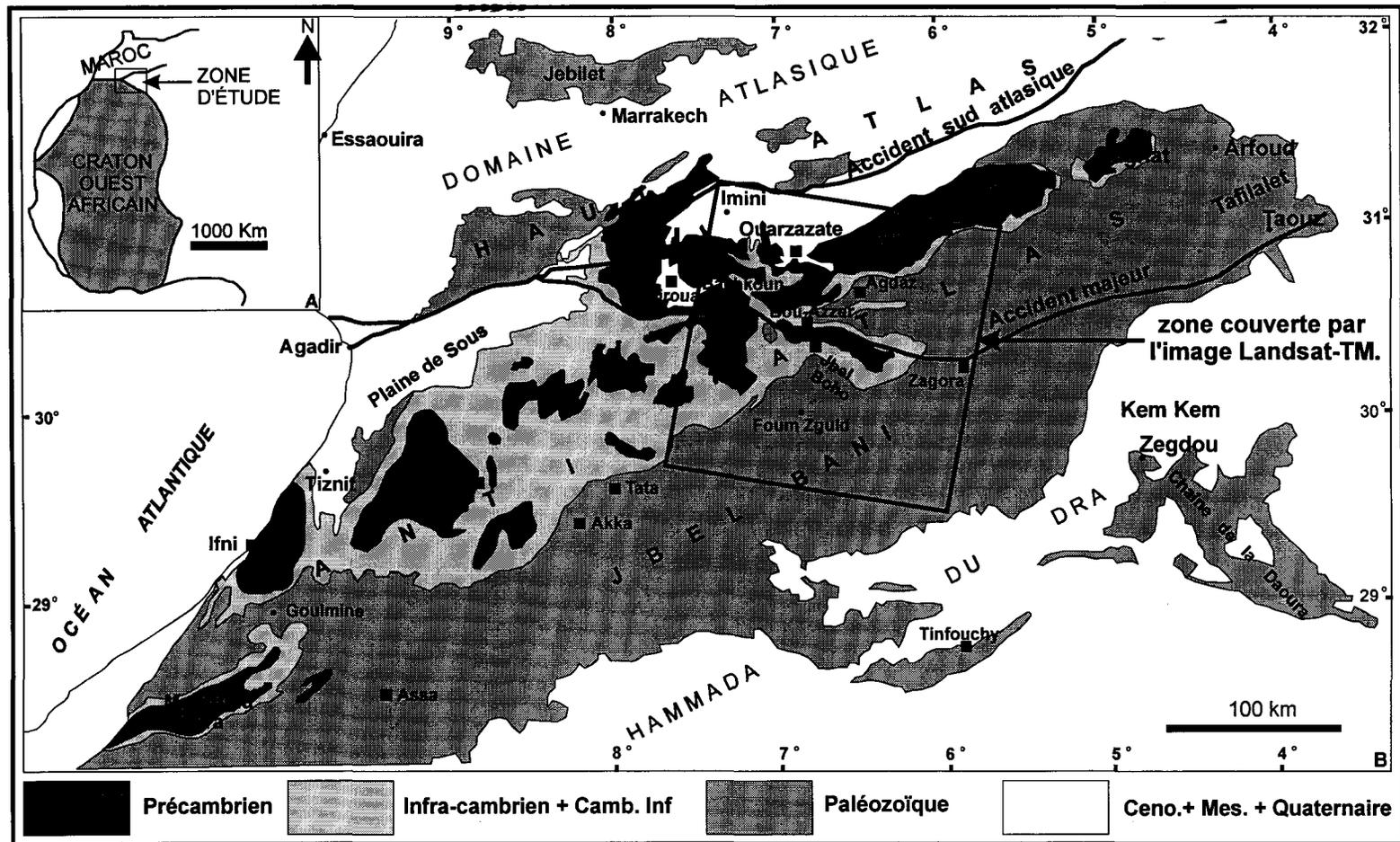


Figure 5: Localisation de la zone d'étude. Les carrés noirs (■) indiquent la localisation des différents sites de vérité terrain.  
 (Figure modifiée d'après (B) Choubert 1968 et (A) Leblanc et Moussine-Pouchkine 1994)

Le socle protérozoïque, affleure en fenêtres ou "boutonniers" et en massifs (Choubert 1967). Le terme boutonnière indique que le fond d'une dépression topographique dans la couverture paléozoïque est occupé par des terrains précambriens. L'Anti-Atlas est aussi marqué par des dykes jurassiques de composition doléritique qui est le résultat de l'ouverture de l'Atlantique central au Jurassique (Emran et al. 1988).

L'Anti-Atlas précambrien est divisé en deux grands ensembles: (1) un ensemble sud-occidental, où affleurent les formations les plus anciennes, datant du Protérozoïque inférieur (2000 Ma) et appartenant à la partie nord du craton Ouest-africain; et (2) un ensemble nord-oriental, où affleurent des formations plus récentes du Protérozoïque supérieur. Ces deux ensembles sont séparés par l'accident majeur de l'Anti-Atlas de direction moyenne ONO-ESE (Emran et al. 1988). L'accident majeur de l'Anti-Atlas correspond à une veille cassure reliée à l'orogénèse panafricaine et qui a joué par la suite (Figure 6).

Dans la région d'étude, la couverture de terrains infra-cambriens et paléozoïques forme un grand pli en "S" (Figures 6 et 7). La charnière anticlinale de ce dernier, qui coïncide localement avec l'accident majeur de l'Anti-Atlas, porte la principale boutonnière de la région, celle de Bou-Azzer, au centre des figures 6 et 7. Dans cette boutonnière, le socle protérozoïque présente plusieurs variétés de lithologies telles que des serpentinites,

des ophiolites, des roches volcaniques rhyolitiques, andésitiques et basaltiques, des roches plutoniques granitiques et gabbroïques, ainsi que des pegmatites.

Les formations infra-cambriennes et paléozoïques susceptibles de renfermer des hydrocarbures faisant l'objet de ce mémoire, il convient donc de les présenter plus en détail.

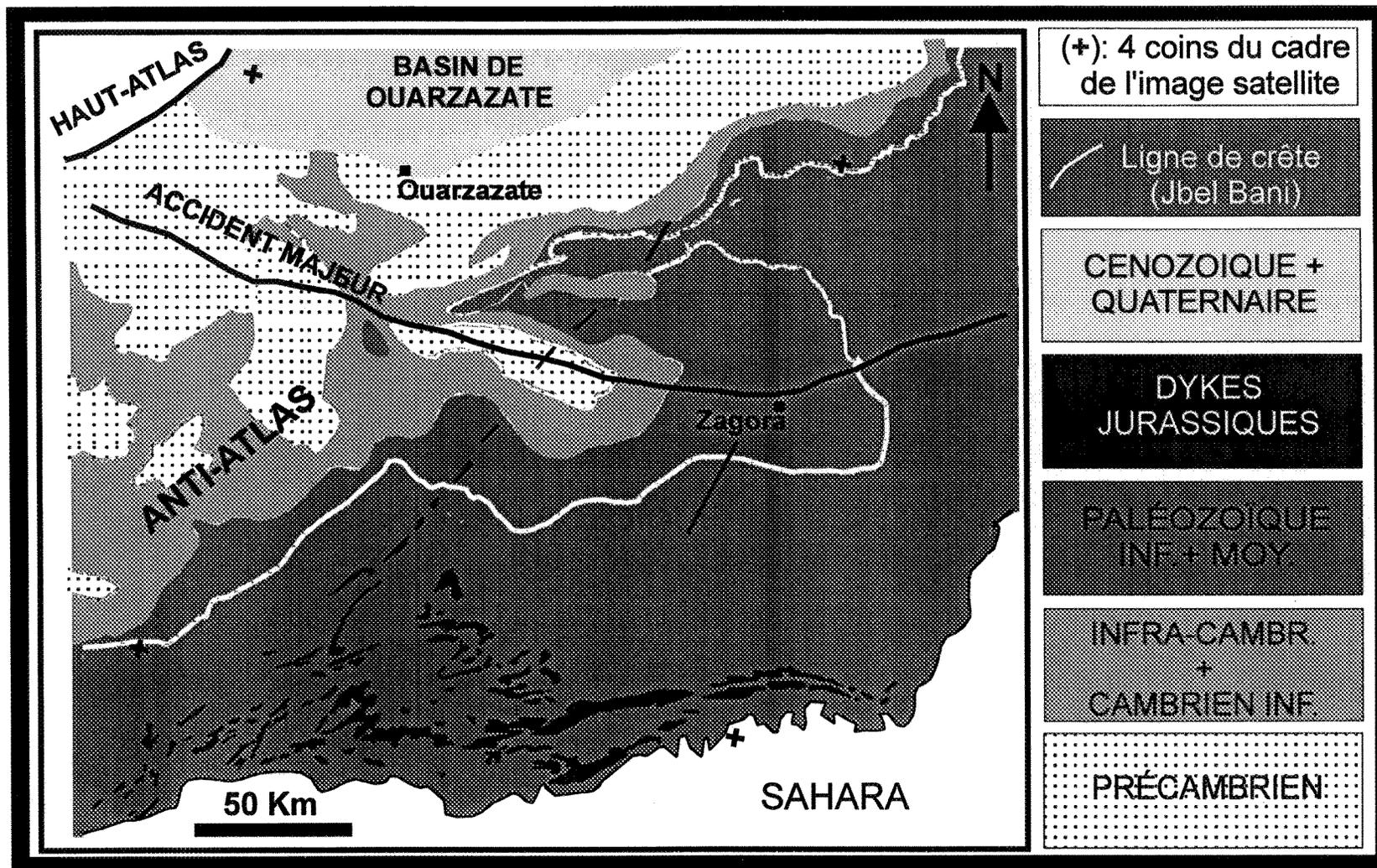


Figure 6: Schéma de répartition des terrains précambriens, infra-cambriens et paléozoïques au centre de l'Anti-Atlas. Modifiée d'après Saadi (1982).

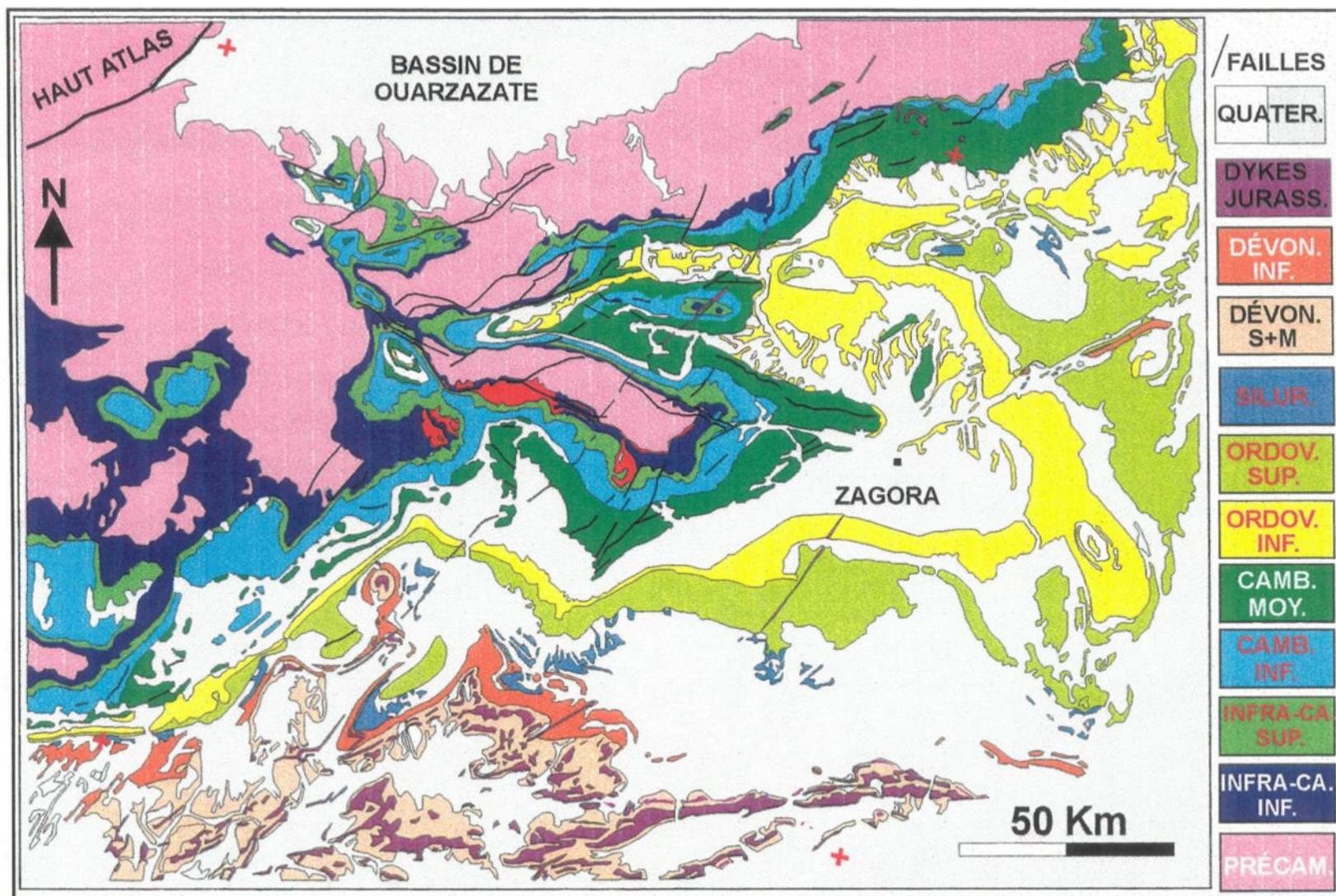


Figure 7: Carte géologique existante de l'Anti-Atlas, tirée de Saadi et al. (1985).  
 Les (+) correspondent aux quatre coins du cadre de l'image satellite.

### 2.3- LA SÉRIE INFRA-CAMBRIENNE ET PALÉOZOÏQUE

Le socle précambrien est recouvert en discordance angulaire par une séquence stratiforme débutant par une série volcanique composée essentiellement de trachyte et d'andésite, et se poursuivant par des séries sédimentaires infra-cambriennes et paléozoïques. La discordance entre les séries volcaniques et sédimentaires de l'Infra-cambrien est relativement faible mais très générale. Les séries infra-cambriennes, constituées d'un ensemble détritique et calcaire, sont pratiquement concordantes avec les séries paléozoïques. Ces dernières présentent une variété de lithologies comme des grès, des quartzites, des schistes, des pélites rouges, des argilites, des calcaires, des dolomies et des conglomérats.

#### **2.3.1- La série infra-cambrienne**

La couverture sédimentaire infra-cambrienne plissée est largement présente dans le nord et le centre de la région étudiée. Avec cette série, appelée "Adoudounien", commence un nouveau chapitre de l'histoire de l'Anti-Atlas qui alors largement envahi par une transgression marine. Benziane et al. (1983) décrivent la succession suivante:

- (1) l'Infra-cambrien inférieur : cycle sédimentaire complet caractérisé par des dolomies et
- (2) l'Infra-cambrien supérieur: phase de régression durant laquelle se dépose la "Série Lie-De-Vin".

- L'Infra-cambrien inférieur ou série de dolomies de base (de 100 à 400 m d'épaisseur) comportent un niveau calcaire et une assise schisteuse. Un niveau de conglomérat et d'arkose s'observe à l'ouest de Kerdous et à Ifni. La mer atteint Taliouine à l'est et Bou-Izakarn au sud. L'Infra-cambrien se poursuit par une série dolomitique monotone et subsidente. La mer atteint alors le sud d'Ouarzazate au nord, El-Aïoun du Dra et Bou-Azzer à l'est. Ces formations sont horizontales ou peu plissées.

- L'Infra-cambrien supérieur ou série lie-de-vin: c'est l'époque d'une régression de vaste envergure. La mer se retire dans la région de Tiznit (nord d'Ifni), et le reste de la chaîne se recouvre de dépôts continentaux rouges et violacés. Au sommet de la série à l'ouest, quelques niveaux calcaires et dolomitiques s'intercalent dans les schistes car une nouvelle transgression démarre à l'ouest, précédant de multiples allées et venues, et atteignant des zones de plus en plus orientales. La puissance de la série lie-de-vin est de l'ordre de 600 m, mais elle diminue en allant vers l'est (Benziane 1974).

### **2.3.2- La série paléozoïque**

Selon Choubert et Nelther (1948), 6 cycles sédimentaires se sont succédés dans l'Anti-Atlas à partir du Géorgien jusqu'à la phase majeure westphalienne des mouvements hercyniens:

### **Premier cycle sédimentaire**

a)- transgression: la première mer géorgienne venue du nord-ouest, avance dans le domaine actuel de l'Anti-Atlas et finit par déposer les calcaires de la série inférieure. Toute la région sud de l'Anti-Atlas est ainsi recouverte.

b)- régression: la mer géorgienne se retire après avoir déposé les calcaires de la série inférieure et ceux-ci sont alors remplacés par des formations continentales représentées par les schistes violets. La mer ne s'est toutefois pas retirée de la région ouest (Akhsas, Tiznit) où la série calcaire du Géorgien est restée continue du Géorgien inférieur au Géorgien supérieur.

### **Deuxième cycle sédimentaire**

a)- transgression: c'est celle des calcaires de la série supérieure d'âge Géorgien, celle aussi qui voit l'établissement des récifs à Archaeocyathides; la mer atteint cette fois à l'est le Jbel Saghro et au sud la chaîne des Dhlou dans le Rio de Oro.

b)- régression: il s'agit d'une petite régression marquée par le dépôt des grès sans fossiles du sommet du Géorgien.

### **Troisième cycle sédimentaire**

a)- transgression: elle commence avec le dépôt des niveaux à Protolenus et marque le maximum d'extension de la mer géorgienne atteint jusqu'alors: tout l'Anti-Atlas est recouvert. La chaîne de l'Ougrata (l'est du Jbel Saghro) est émergée. La transgression se termine avec des dépôts acadiens.

b)- régression: elle correspond à la lacune de l'Acadien supérieur, du Postdamien et du Tremadoc.

La série stratigraphique du Géorgien comprend 200 à 300 m de calcaires (calcaires supérieurs) et 200 à 300 m de formations schisto-calcaires. Cette sédimentation s'est faite dans un bassin qui correspondait au domaine le plus subsident à cette époque. L'évolution verticale et horizontale du cycle cambrien de Saghro à Ifni (distance approximative de 500 km) est illustrée par les figures 8 et 9, d'après Benziane et al. (1983), et la figure 10, tirée de Ducrot et Lancelot (1977). Cette dernière figure correspond à une coupe schématique des terrains précambriens, infra-cambriens et cambriens au niveau du volcan du Jbel Boho, localisée au centre de la région étudiée (Figure 5).

Du point de vue possibilités d'hydrocarbures, la nature carbonatée du Géorgien en fait un réservoir attrayant alors que les schistes gréseux forment une importante couverture aussi bien pour les carbonates que pour les grès géorgiens. Ces deux formations ont des épaisseurs assez importantes pour abriter des hydrocarbures (BRPM 1962).

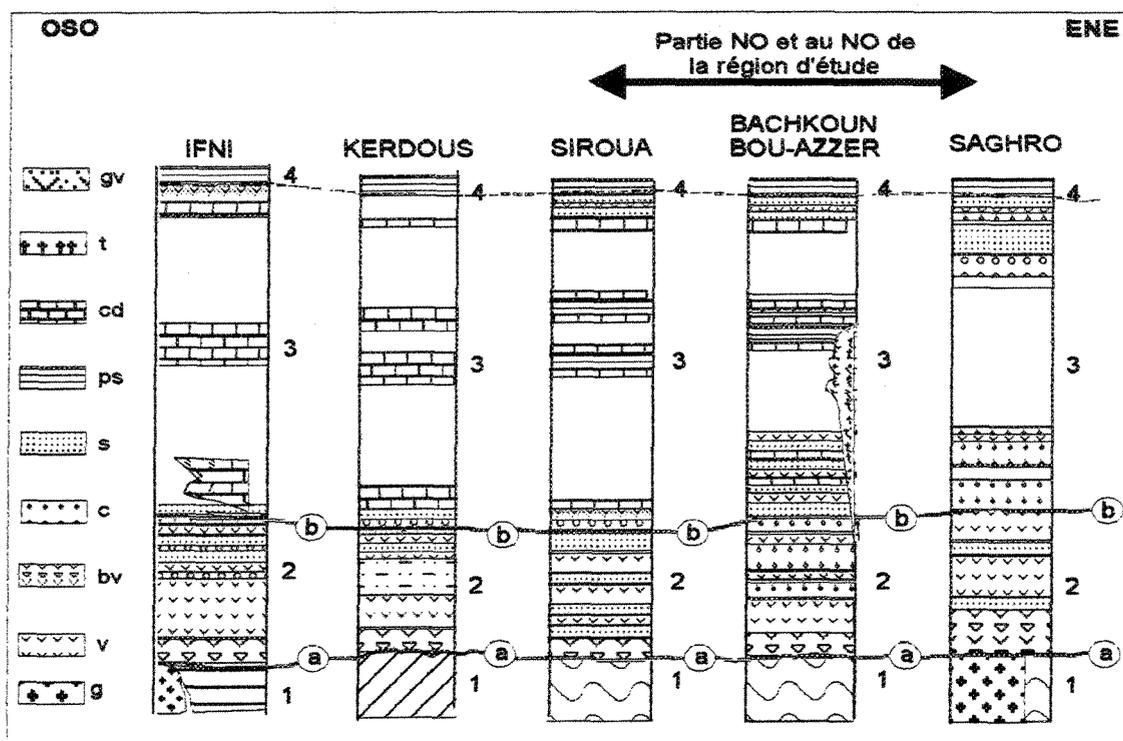


Figure 8: Coupes schématiques montrant les récurrences de faciès volcaniques et sédimentaires à travers l'Anti-Atlas durant le cycle cambrien (l'échelle n'est pas respectée). Modifiée d'après Benziane et al. (1983).

- 1: Protérozoïque; 2: série à dominante volcanique; 3: série à dominante sédimentaire  
 4: série acadienne; a: discordance angulaire; b: discordance de ravinement  
 g: grantoïde; v: vulcanites; bv: brèches volcaniques; c: conglomérat; s: grès;  
 ps: pélites et sills; cd: carbonates; t: trachytes; gv: grès à éléments volcaniques.

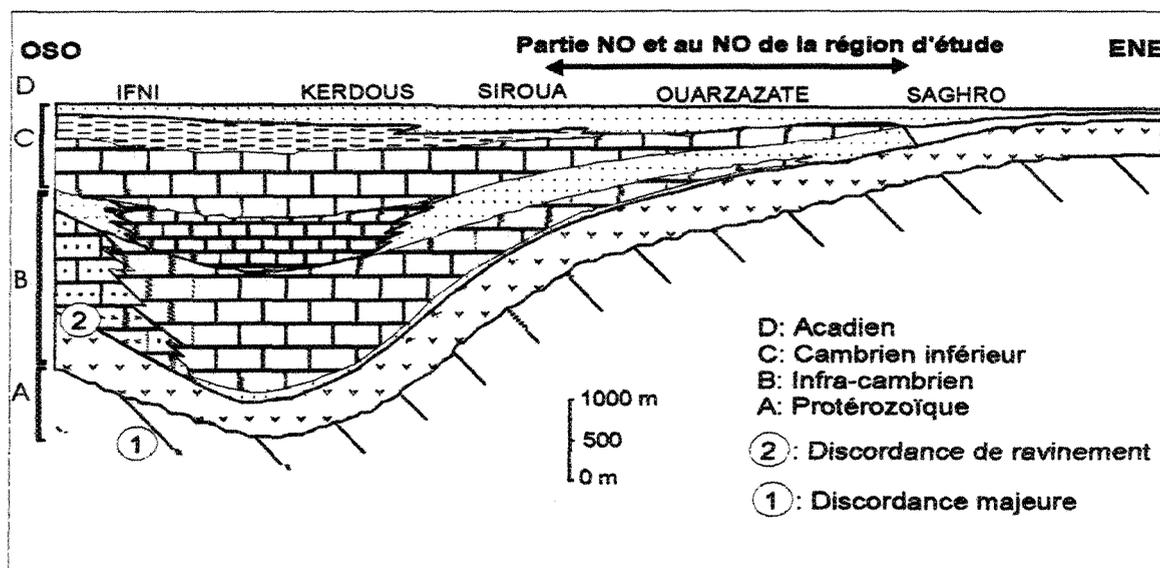


Figure 9: Évolution verticale et horizontale du cycle cambrien du Saghro à Ifni (distance approximative 500 Km)  
 Modifiée d'après Benziane et al. (1983)

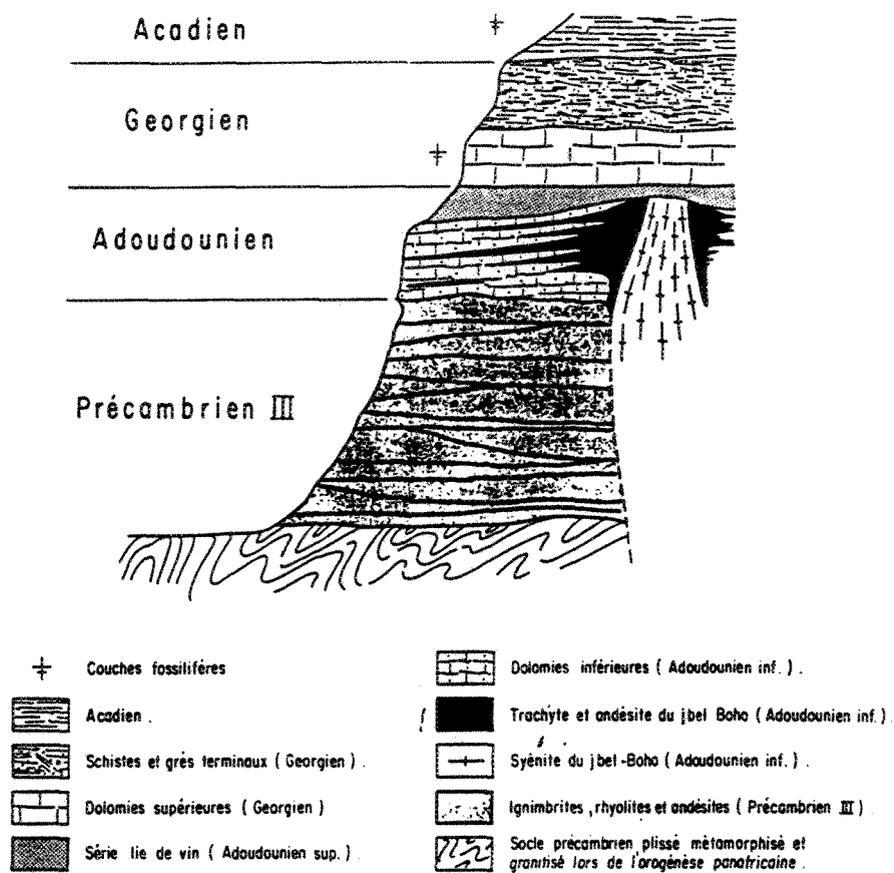


Figure 10: Coupe schématique des terrains précambriens, infra-cambriens et cambriens au niveau du volcan du Jbel Boho, tirée de Ducrot et Lancelot (1977).

#### **quatrième cycle sédimentaire**

a)- transgression: de l'Arenig au Caradoc, la mer ordovicienne recouvre non seulement le domaine précédemment recouvert par la mer acadienne mais aussi la chaîne de l'Ougrata et même la bordure nord de la zone Yetti-Karett-el Glab, dans le Sahara occidental.

b)- régression: elle correspond à la lacune de l'Ashgill et, localement à celle du Gothlandien inférieur.

#### **Cinquième cycle sédimentaire**

a)- transgression: la mer gothlandienne, à sédimentation bathyale (schistes à graptolithes) recouvre à nouveau toute la région et même le Hoggar. Cependant, à l'est, les grès tendent à remplacer les schistes ce qui, avec une diminution générale de l'épaisseur des sédiments, indique une tendance à des conditions néritiques.

b)- régression: des régressions locales dans cette mer sont concrétisées par l'absence de Geddinien; selon Choubert 1974, elles correspondaient aux mouvements calédoniens.

Les grès et les schistes ordoviciens constituent respectivement des possibilités de réservoirs et de couvertures très prometteuses dans le paléozoïque inférieur de l'Anti-Atlas. Ils ont des caractéristiques lithologiques (porosité et perméabilité) très encourageantes pour la prospection pétrolière.

### Sixième cycle sédimentaire

a)- transgression: la mer dévonienne est caractérisée par un faciès néritique, voire même littoral, à la base de l'étage, passant à des faciès plus profonds au Dévonien moyen et au Dévonien supérieur (dépôt des schistes à goniatites). Mais alors, à cette époque et dans tout le Maroc, la première phase de l'orogénèse hercynienne provoque une régression qui correspond probablement à une mer résiduelle que nous connaissons dans la région jusqu'au Namurien.

b)- régression: elle est générale et correspond à la phase hercynienne majeure. Plus à l'est, dans la région de Colomb Béchar, les sédiments de flysch houiller se déposent en bordure des rivages, dans une plaine maritime subsidente. Ici se placent les diverses phases des mouvements hercyniens dont les résultats sont évoqués plus haut. Désormais intégré au bord du continent africain, l'Anti-Atlas ne sera plus submergé par la mer du Mésozoïque au Cénozoïque, son évolution restera purement continentale.

En résumé, les séries stratigraphiques infra-cambriennes et cambriennes ont une puissance de l'ordre de 2250 m à l'ouest et quelques dizaines de mètres à l'est (Saghro). Ensuite, l'Anti-Atlas a été recouvert par des formations paléozoïques très puissantes de l'ordre de 10 000 m (Benziane 1974). Les différentes formations de la série infra-cambrienne et paléozoïque inférieur susceptibles de constituer des réservoirs potentiels d'hydrocarbures sont présentées au tableau 3.

Il faut noter que l'Anti-Atlas est un gigantesque bombement de fond, soulevé déjà à la fin de l'orogénèse hercynienne puis exhumé par les phases successives des mouvements alpins. L'érosion profonde qui suivra le soulèvement général post-Pliocène de tout le pays, contribueront à donner à l'Anti-Atlas son aspect actuel.

Tableau 3: la stratigraphie paléozoïque dans l'Anti-Atlas de Agdaz à Caidat d'Akka (NE à SW)  
des diverses formations à potentiel d'hydrocarbures

ÂGE	Localité: Agdaz	Anti-Atlas central	Ouest de Kerdous	Caidat d'Akka
	Lithologies d'après ONAREP (1991)	Lithologies d'après EMRAN et al. (1988)	Hassenforder (1987)	BRPM (1961a et 1961b)
Silurien	Grès en plaquettes	Argiles, grès et calcaires		
Ashgill sup.	Quartzites grossiers Grès lités Pelites Pelites, et niveau de grès	séries gréseuses: le Banis		Au sommet: alternance Silito-Quartzique Les Grès du Bani
Llandeilo	Alternance de  Grès et Grèsopelites	séries argileuses tendres: les "Feijas externes"		À la base: les schistes de Feijas externes avec des Grès du Zini
Lianvien	Pelites gris bleu			
Arenig inf. et moy.	Pelites vert jaunes			
Tremadoc	Pelites vertes		Schistes (+1000m)	
Acadien (Camb. Moy.)	Grès, Quartzit., pelites  Argillites, Siltstones et graywackes	Grès et quartzites au sommet et Schiste à la base	Grès Tabanit (grès quartzique) Schistes de Feijas	Quartzites Schistes verts Grès blanc congl. Schistes verts
Géorgien (Camb.inf.)	Schistes Grès roses Calcaires dolomitiques	Grès terminaux  Fm. schisto-calcaire	Serie schisto-calcaire  Calcaire sup.	Grès terminaux Calcaires + schist. Calcaires termin.
Infracamb.	Grès roses et pelites Dolomies Congl., Grès, Andesites	Pelite rouges Trachytes Calcaire et schiste	Grès rose et pelite Calcaires inf. Congl.+Grès+Andes.	Schist. + intercat. Quartz.ou dolomit. Calcair. Infracamb. Congl. de base

## CHAPITRE 3

### TRAITEMENTS DE L'IMAGE

Ce chapitre décrit les divers traitements qui ont été appliqués à l'image Landsat-TM de la région étudiée pour en tirer une carte lithostratigraphique et structurale. L'image de départ montre des zones d'ombre totale, principalement d'escarpements, des zones d'éclairage plus au moins rasant selon l'orientation des versants par rapport au soleil du milieu de l'avant-midi (~10h30), et enfin des zones d'éclairage plutôt direct. Ces variations d'éclairage mettent en valeur le relief et favorisent l'analyse géomorphologique. Mais ces variations rendent difficile la mesure des valeurs spectrales de chaque lithologie. C'est pourquoi diverses corrections et traitements sont apportés à l'image de départ pour, dans un premier temps, distinguer les lithologies les unes des autres et, dans un deuxième temps, les identifier. En absence des échantillons des différentes lithologies, les identifications ont été basées sur plusieurs sections différentes du terrain, servant de vérité terrain.

### 3.1- PRÉ-TRAITEMENT ET CORRECTIONS DE L'IMAGE

#### **3.1.1- Correction radiométrique**

L'analyse de la scène globale aboutit à dégager des zones d'ombre totale associées à des reliefs (Figure 11). Cependant ces zones d'ombre reçoivent un éclairage indirect de lumière réfléchié et diffuse variable selon les longueurs d'ondes. Cet éclairage, qui s'ajoute ailleurs à l'éclairage direct, vient fausser les valeurs spectrales des diverses lithologies.

Dans un premier temps nous proposons de corriger l'apport de la lumière réfléchié et diffuse en soustrayant de tous les pixels de chaque bande la valeur du pixel le plus sombre dans ces zones d'ombre totale. Cette opération permet d'obtenir une image radiométriquement corrigée et prête pour les analyses géomorphologiques et spectrales.

En effet les valeurs, en niveau de gris, des pixels les plus sombres correspondent à la lumière réfléchié et diffuse (Tableau 4). Les longueurs d'ondes les plus courtes présentent des valeurs de niveau de gris généralement plus fortes que les longueurs d'ondes plus longues correspondant vraisemblablement à la composante diffusion atmosphérique. Alors les valeurs des bandes 3 (rouge) et 5 (proche infrarouge), légèrement plus élevées que les bandes voisines pourraient correspondre à la composante réfléchié en cet environnement aride à peu près dépourvu de végétation.

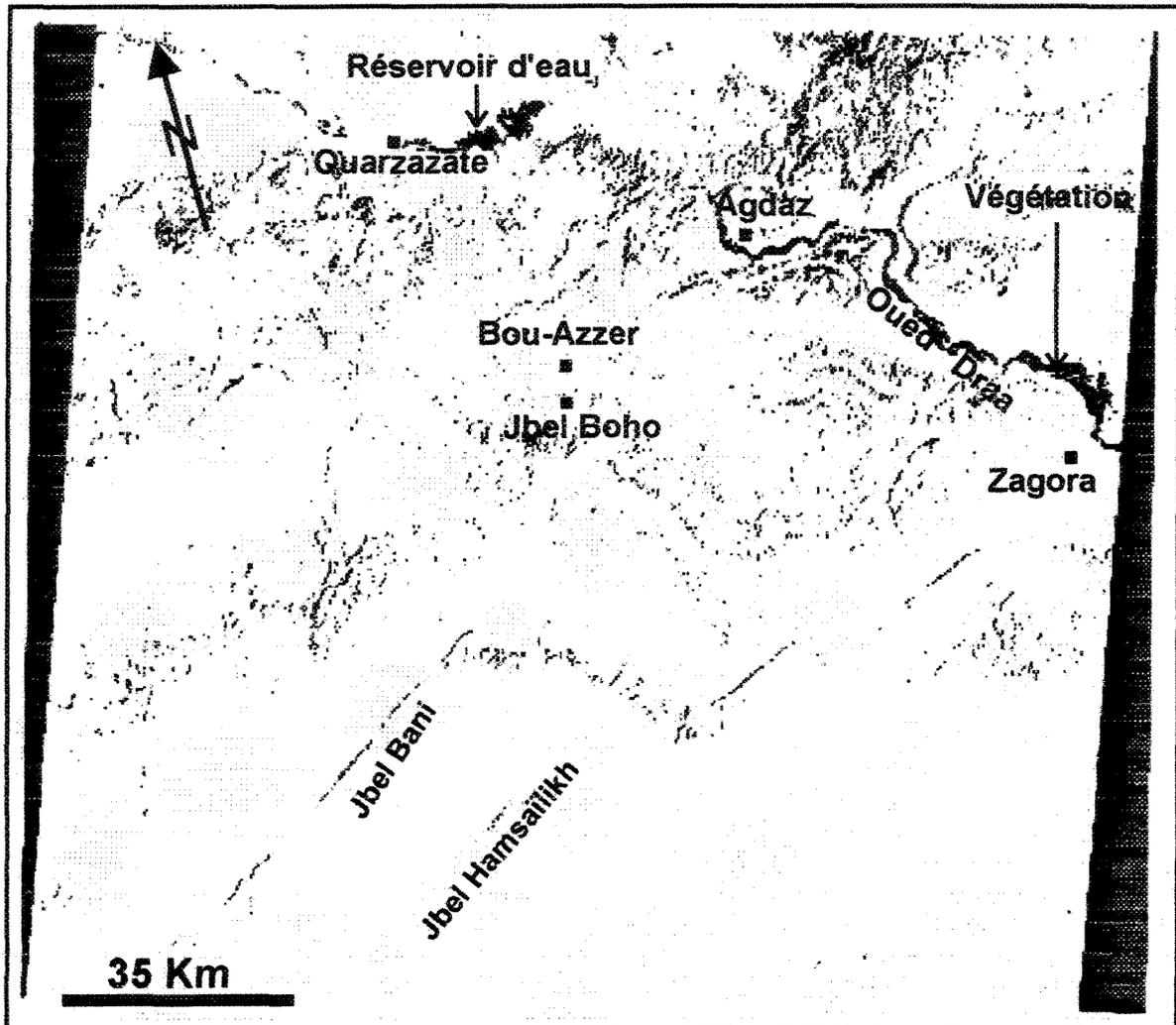


Figure 11: Accentuation des zones d'ombres qui apparaissent en noir dans la bande 5 (niveau du seuil = 11).

Tableau 4: Valeur spectrale des pixels des zones d'ombre totale.

Coordonnées des pixels	TM1 (%)	TM2 (%)	TM3 (%)	TM4 (%)	TM5 (%)	TM7 (%)
2535P, 3636L	19,61	15,29	7,45	4,31	5,09	4,70
1892P, 4409L	20,78	6,66	7,45	4,70	4,70	3,92
1349P, 4958L	20	7,84	7,06	3,92	4,70	4,3
1915P, 4387L	20,78	7,06	8,23	3,92	4,31	3,92
5135P, 1377L	19,21	7,84	7,45	4,70	4,31	3,9
2517P, 3653L	21,71	7,06	7,45	5,09	5,09	3,14
VALEUR MINIMALE	19,21	6,66	7,06	3,92	4,31	3,14

### 3.1.2- Correction de l'ombre diffuse

Après les corrections radiométriques, les données de réflectance que l'on obtient sont celles qui correspondent à une surface ondulante où les variations d'éclairement solaire entre les différents versants des reliefs tendent à faire varier les valeurs spectrales de l'image, puisque l'énergie réfléchie par le sol et mesurée par le satellite dépend de l'orientation du terrain. Sur cette scène où le soleil était ESE lors de la prise de vue, l'énergie réfléchie est plus faible pour les versants orientés ONO et emboîtés dans des ravins.

La méthode des rapports de bandes ( $i/j$ ) permet d'une part de résoudre cet effet d'ombrage en supprimant très largement l'ombrage et d'autre part d'accentuer l'information qui fera ressortir des indices caractérisant tel ou tel type de roches.

Nous proposons d'utiliser la bande qui présente le moins de variation spectrale d'une lithologie à l'autre comme diviseur de chacune des bandes. En somme, l'image est "normalisée" à l'aide de la bande la plus commune. En effet, en utilisant la bande qui présente le moins de variations d'une lithologie à l'autre comme diviseur commun des autres bandes, cela revient à normaliser les autres bandes par une information qui présente le minimum de différences et le plus de constance sur l'image.

La méthode consiste d'abord à déterminer les valeurs spectrales de chaque lithologie dans les six bandes TM dont le pixel est de 30 m (1 à 5, et 7). Pour ce faire, plusieurs valeurs spectrales de chaque lithologie ont été mesurées sur les versants les mieux éclairés et chacune des 27 unités stratiformes infra-cambriennes et paléozoïques distinguées dans la région d'étude a été échantillonnée à plusieurs endroits sur l'image (Figure 12). En effet, 112 sites-tests de 7 par 7 pixels, repérés très précisément sur le terrain constituent un échantillon représentatif des différentes unités lithologiques de la zone d'étude. Nous avons noté à chaque site la valeur maximum et la valeur minimum dans la zone bien éclairée et calculé la moyenne ainsi que l'écart-type de ces valeurs (Tableau 5).

L'analyse statistique de ces données indique que la bande 2 présente à la fois la moins grande différence entre le pixel le plus clair et le pixel le moins clair des versants les plus éclairés, et le plus petit écart-type des valeurs moyennes des diverses lithologies. Cette bande 2 sera donc utilisée comme diviseur commun des autres bandes afin de créer des néo-images corrigées. La figure 13 illustre la distribution de la variation des valeurs spectrales des 27 unités dans les six bandes.

Ces rapports de bandes minimisent les effets topographiques sur la réflectance et favorisent une discrimination lithologique maximale sur ces néo-images. Cependant on n'a pas pu éliminer une partie de l'ombre dans les zones où l'ombre est totale car ces zones sont totalement noires après la correction radiométrique.

Dans cette étude nous n'avons pas appliqué la méthode des ``gains and offsets`` pour chacune des bandes TM (valeurs incluses dans le ``header`` des fichiers de données TM de l'image). Cette méthode déjà utilisée par Sultan et al. (1988), permet de convertir des valeurs numériques en valeurs de radiance mais il est toujours possible d'effectuer une analyse sans ces corrections. Dans ce travail ne nous avons pas utilisé le terme réflectance dans son sens strict mais dans un sens général; c'est à dire dans le sens de valeurs numériques ou d'intensité de longueurs d'ondes reçue au satellite.

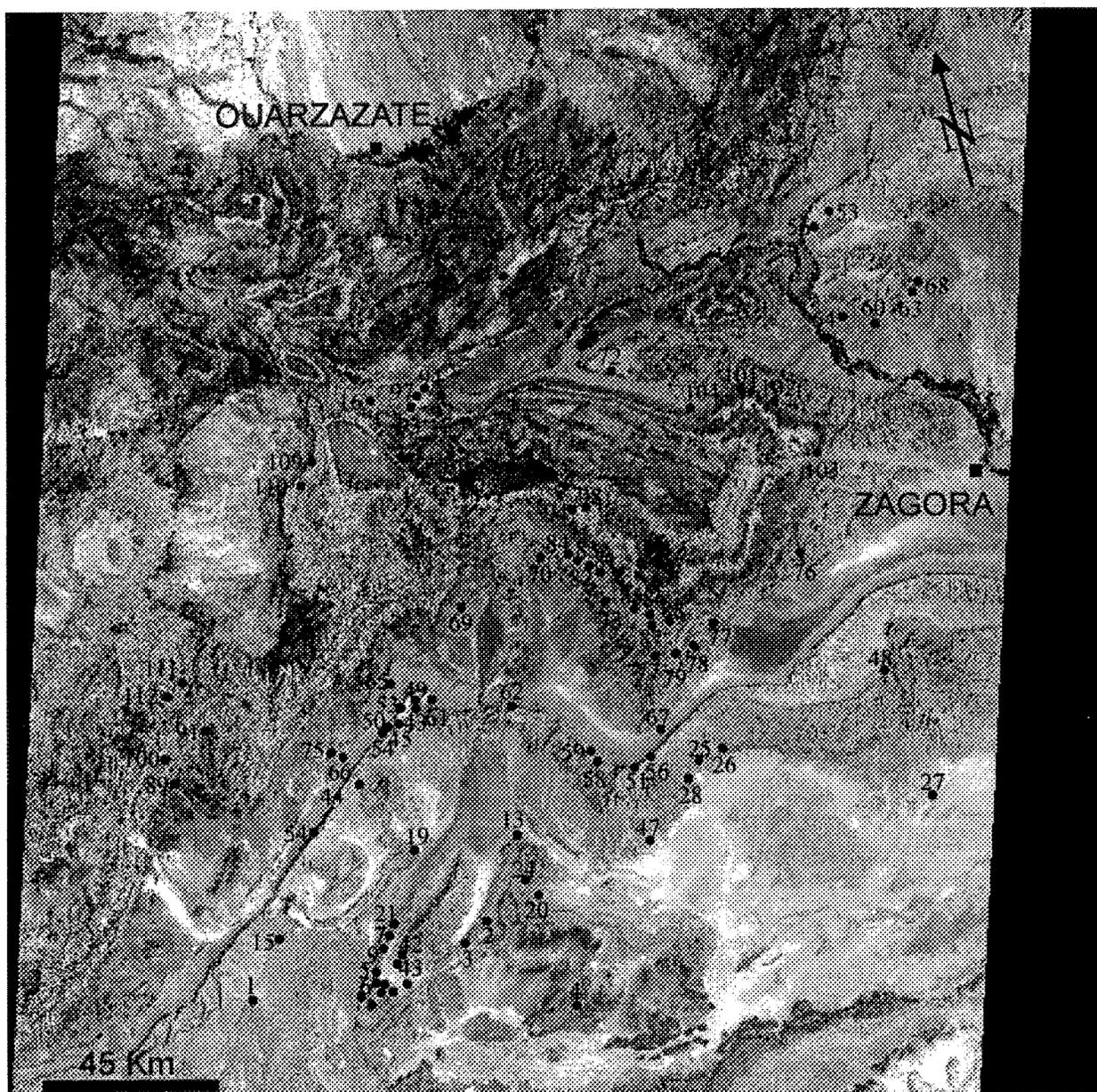


Figure 12: Localisation des points de mesure sur l'image Landsat-TM de la zone d'étude (bande 5).

Tableau 5: Utilisation des statistiques pour l'identification de la bande qui présente le moins de variations spectrales d'une lithologie à une autre .

LOCALITÉS	AGES	UNIT.	Bande 1				Bande 2				Bande3			
			MAX	MIN	X	Δ	MAX	MIN	X	Δ	MAX	MIN	X	Δ
L1, L2, L3, L4	DEVO.	Dm-s	58	53	55.5	5	44	41	42.5	3	70	64	67	6
L5, L6, L7, L8		D5	59	52	55.5	7	41	38	39.5	3	91	84	87.5	7
L9, L10, L11, L12		D4	54	49	51.5	5	44	40	42	4	73	68	70.5	5
L13, L14, L15, L16		D3	44	41	42.5	3	36	33	34.5	3	60	54	57	6
L17, L18, L19, L20		D2	56	49	52.5	7	42	39	40.5	3	70	65	67.5	5
L21, L22, L23, L24		D1	51	47	49.0	4	41	38	39.5	3	63	57	60	6
L25, L26, L27, L28		SILUR.	S5	47	37	42	10	33	29	31	4	58	48	53
L29, L30, L31, L32	S4		68	62	65.0	6	49	45	47	4	76	73	74.5	3
L33, L34, L35, L36	S3		62	55	58.5	7	45	42	43.5	3	70	66	68	4
L37, L38, L39, L40	S2		45	35	40.0	10	35	30	32.5	5	63	52	57.5	11
L41, L42, L43, L44	S1		59	54	56.5	5	45	39	42	6	70	63	66.5	7
L45, L46, L47, L48	ORD.		O6	56	31	43.5	25	45	26	35.5	19	74	43	58.5
L49, L50, L51, L52		O5	54	31	42.5	23	48	26	37	19	78	39	58.5	39
L53, L54, L55, L56		O4	58	36	47.0	22	49	30	39.5	19	85	52	68.5	33
L57, L58, L59, L60		O3	58	35	46.5	23	45	29	37	16	74	45	59.5	29
L61, L62, L63, L64		O2	57	34	45.5	23	44	31	37.5	13	71	45	58	26
L65, L66, L67, L68		O1	50	34	42.0	16	43	31	37	12	77	45	61	32
L69, L70, L71, L72		CAMB.	Km4	45	41	43.0	4	36	32	34	4	60	54	57
L73, L74, L75, L76	Km3		46	40	43.0	6	40	33	36.5	7	62	53	57.5	9
L77, L78, L79, L80	Km2		48	38	43.0	10	42	31	36.5	11	63	58	60.5	5
L81, L82, L83, L84	Km1		43	40	41.5	3	37	34	35.5	3	61	56	58.5	5
L85, L86, L87, L88	Ki2		45	41	43.0	4	39	30	34.5	9	64	51	57.5	13
L89, L90, L91, L92	Ki1		47	38	42.5	9	38	33	35.5	5	60	52	56	8
L93, L94, L95, L96	INFR.		IK3	59	49	54.0	10	52	44	48	8	77	68	72.5
L97, L98, L99, L100		IK2	51	46	48.5	5	45	38	41.5	7	79	70	74.5	9
L101, L102, L103, L104		IK1	43	38	40.5	5	36	30	33	6	64	54	59	10
L105, L106, L107, L108		IK0-e	44.5	37.5	41	7	38.5	33	35.8	5.5	67	61	64	6
L109, L110, L111, L112		IK0-w	57	50	53.5	7	47	40	43.5	7	80.5	68.5	74.5	12
STAT.		NB*			28.0				28.0				28.0	
	X			47.5				38.3				63.7		
	É.T.			6.5				4.2				7.7		
	MAX			65.0				48.0				87.5		
	MIN			40.0				31.0				53.0		
	DELTA			25.0				17.0				34.5		

\*: IK0-e et IK0-w: la même unité qui présente un changement de composition latéral. D'où 28 unités au lieu de 27.



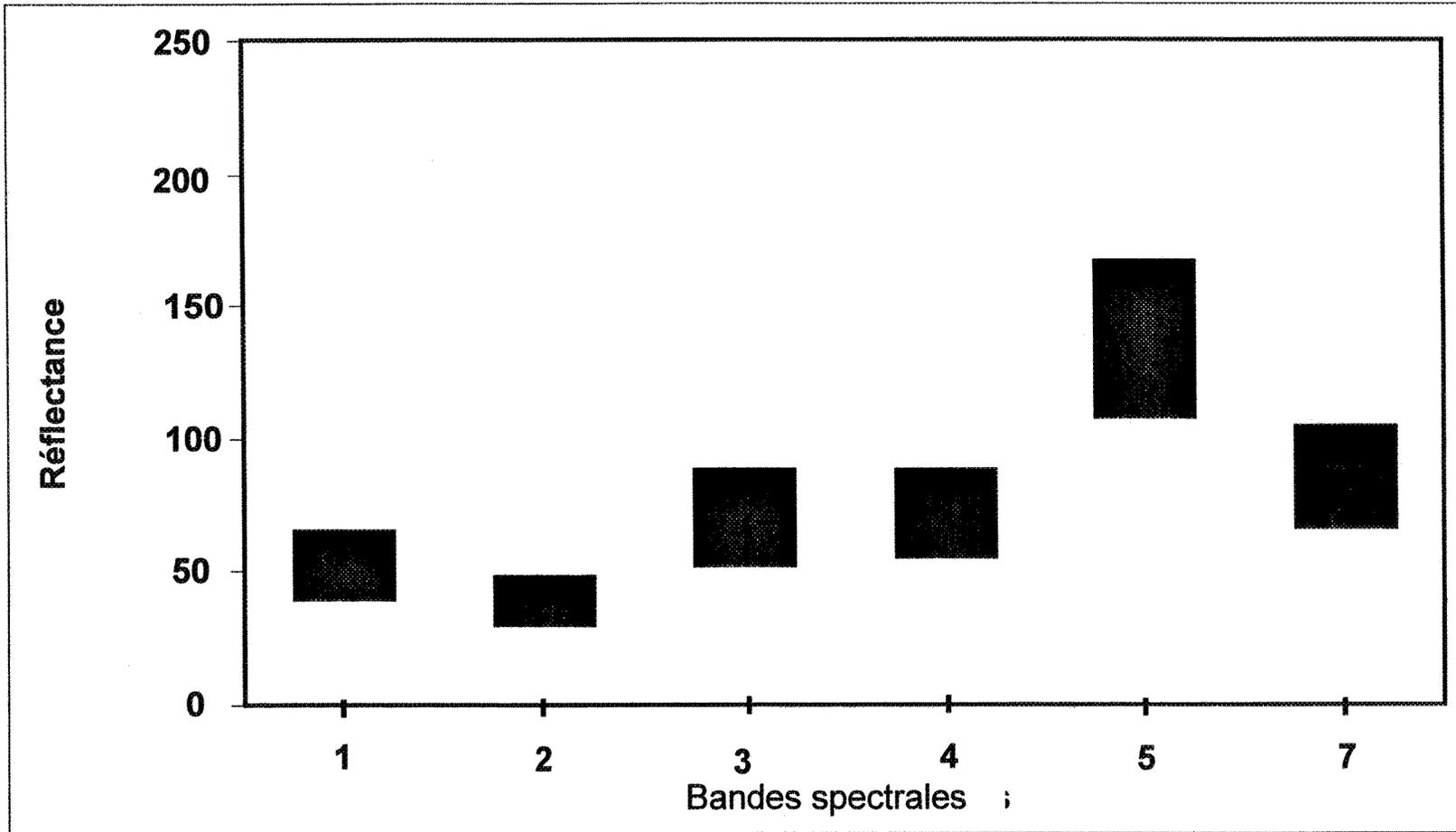


Figure 13: Distribution de la variation des valeurs spectrales des 27 unités dans les six bandes.

### 3.2- DISTINCTION ET IDENTIFICATION DES LITHOLOGIES

Pour avoir une meilleure discrimination des lithologies, il a fallu utiliser des traitements plus spécialisés tels que l'analyse spectro-géomorphologique, l'analyse en composantes principales, les rapports de bandes et le rehaussement des structures. Ces traitements ont déjà permis une meilleure discrimination des lithologies et des structures dans des terrains semblables. Les traitements numériques de l'image satellitaire ont été réalisés sur une station informatique SPARC-20, installée au laboratoire de télédétection de l'Université du Québec à Chicoutimi. Le logiciel utilisé pour le traitement de l'image est le système EASI/PACE de la compagnie canadienne PCI. Les divers traitements de l'image sont présentés dans le tableau 6.

#### **3.2.1- Analyse géomorphologique et spectrale**

L'analyse conjointe de la carte géologique existante et de la scène complète a permis d'identifier des zones où la stratigraphie infra-cambrienne et paléozoïque est complète. Ces zones ont été utilisées comme sites d'étude sur l'image Landsat-TM pour identifier les caractéristiques spectrales et géomorphologiques des diverses unités lithologiques de la série infra-cambrienne et du paléozoïque

Tableau 6: Différents traitements numériques de l'image originale et  
des néo-images

	IMAGE ORIGINALE	NEO-IMAGES (Rapports de bandes) (1/2, 3/2, 4/2, 5/2, 7/2)
Versants éclairés	Spectres lithologiques	Différentiation des lithologies
Ombres	Reliefs, géomorphologie	
Analyse en composantes principales (ACP)	CP1+CP2 Géomorphologie	Image CRDL RVB= CP1, CP2, 3/2 Lithologies
Filtres	Directionnels: cassures Sur PC1 et PC2 et sur l'image originale	Passe-haut: contacts

### A- Analyse morphologique

L'image de départ montre des zones d'ombre totale le long des escarpements, des falaises et des ravins. Elle permet de distinguer des styles de reliefs différents. Ces caractéristiques géomorphologiques ont été utilisées pour la discrimination des diverses unités de la zone d'étude. Ces unités sont définies par des critères de photo-interprétation (teinte, texture, relief et drainage) directe sur l'image originale.

### B- Caractéristiques spectrales des roches

L'analyse spectrale de l'image Landsat-TM repose sur les différentes caractéristiques de réflexion des différents types des sédiments et de roches de la région d'étude. Comme dans les zones désertiques, la surface des roches de la zone d'étude montre une patine d'altération. Celle-ci peut modifier la signature spectrale, mais en général, la lithologie demeure identifiable. Les valeurs spectrales des roches affleurantes dans la zone d'étude ont été mesurées par le capteur du satellite en vue de réaliser les spectres de réflectance des diverses lithologies.

La bande thermique TM6 n'a pas été utilisée dans ce travail pour les raisons suivantes: (1)- la dimension de pixel (120 m x 120 m) et (2): au milieu de l'avant-midi le TM6 donne plus d'information sur la quantité d'énergie solaire absorbée par les versants mieux éclairés relativement aux moins bien éclairés que sur les caractéristiques thermiques propres des roches. Il faudrait des images de fin de nuit pour exploiter les caractéristiques thermiques des roches.

### 3.2.2- Analyse en composantes principales

Le calcul des composantes principales (ACP) revient à déterminer un nouveau système de canaux qui sont totalement décorrélés entre eux. L'objectif de cette opération est d'une part de concentrer le plus d'information possible en trois canaux et d'autre part, la projection de l'image selon ces composantes permet d'améliorer le contraste de l'image, de mettre en évidence les structures géologiques, les contours des grandes unités, d'individualiser des classes de roches (Bonn et Rochon 1992).

Une analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée aussi bien sur l'image originale que sur la néo-image. Les première et deuxième composantes principales (CP1 et CP2) des canaux originaux seront utilisées pour accentuer les morphologies caractéristiques des lithologies et les cassures, et sur les néo-canaux pour rehausser les contrastes spectraux des lithologies (Figure 14).

Dans le cas de l'image originale, les trois premières composantes principales représentent environ 98% de la variation totale: la CP1 compte pour 91% de la variation, la CP2 explique 6% et la CP3 ne compte que pour 1% de la variation mais contient des informations utiles permettant de différencier les lithologies et les fractures. Les deux premières composantes permettent d'accentuer le contraste géologique entre les lithologies. Elles sont généralement complémentaires c'est-à-dire les objets sombres sur la CP1, sont souvent clairs sur la CP2 et vice versa. Elles contiennent aussi une certaine

information sur les structures géologiques et notamment les fractures (Figure 15). Les zones dominées par les alluvions plus récentes se distinguent facilement par leur relief plutôt monotone des zones accidentées où se trouvent les affleurements rocheux (Figure 15).

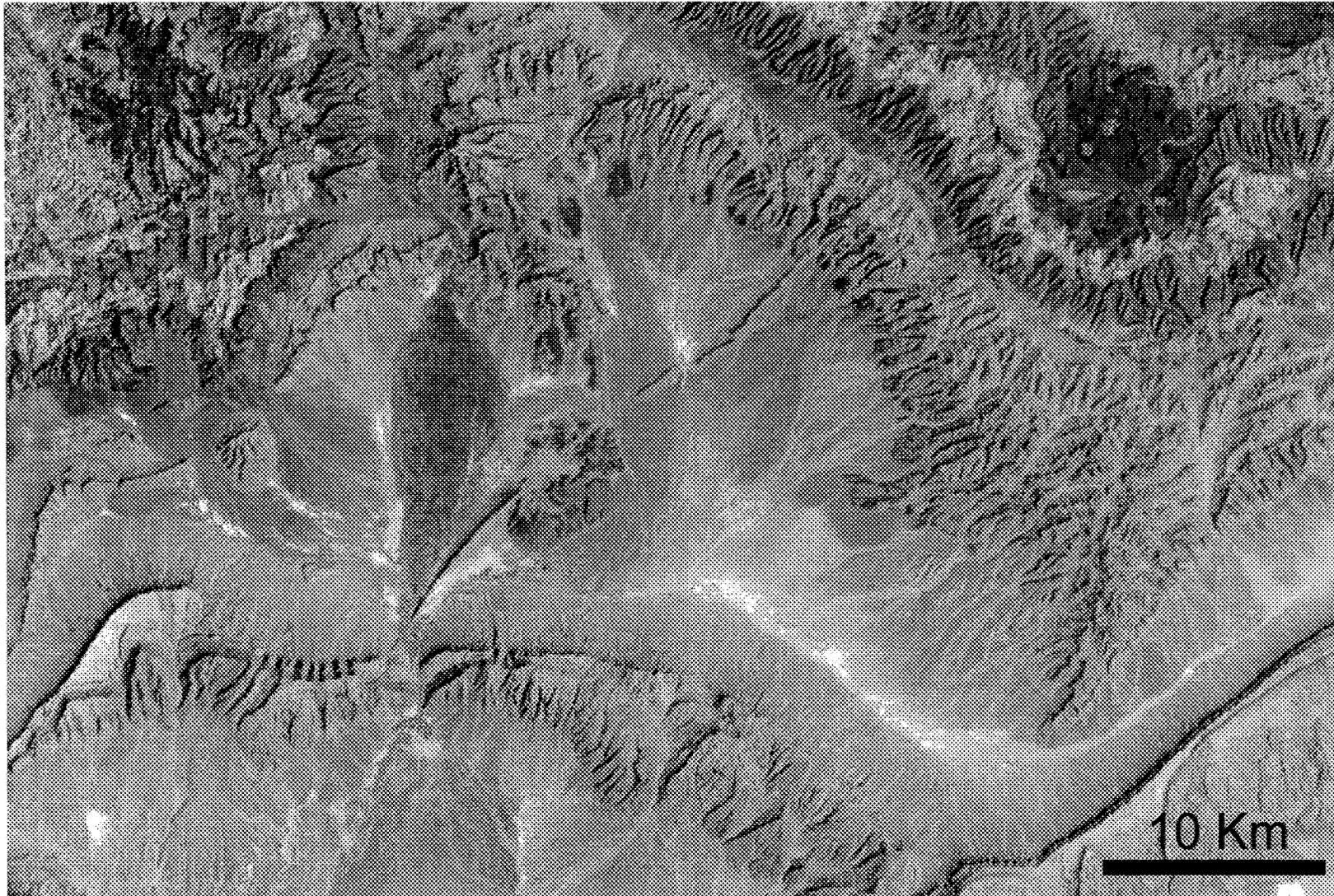


Figure 14: Première composante principale (CP1) d'une portion de l'image originale.



Figure 15: Les trois premières composantes principales des canaux originaux.

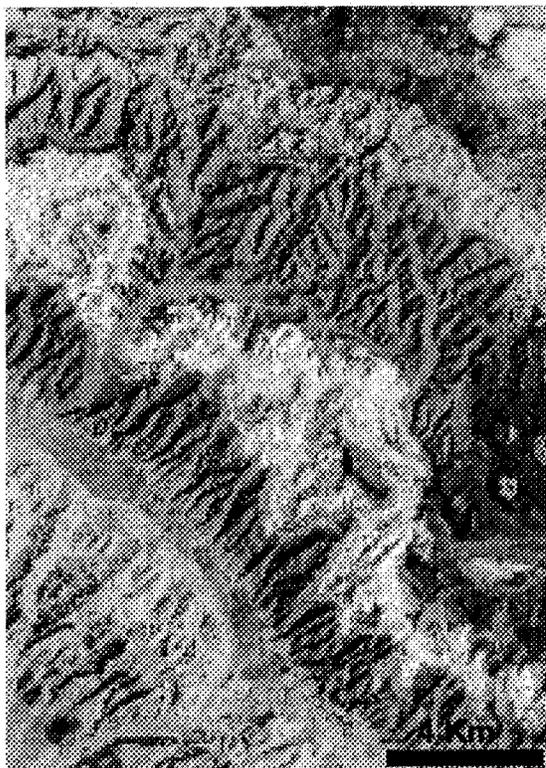
Dans le cas de la néo-image, une ACP sur les 5 canaux (1/2, 3/2, 4/2, 5/2 et 7/2) fait apparaître une première composante expliquant 89 % de la variation, une deuxième, 6,75% de la variation et une troisième, 1,75 % de l'information. Les deux premières néo-composantes donnant environ 96 % de l'information géologique représentent des variations d'intensités très marquées et montrent que le contraste géologique entre les roches infra-cambriennes et cambriennes est facilement mis en évidence (Figure 16).

La troisième composante principale (CP3) des néo-canaux est représentée par un gris plus uniforme (Figure 16). Elle contient davantage des variations reliées au relief et ne fournit aucune information sur les lithologies. C'est pourquoi elle a été remplacée par le néo-canal (3/2) qui contribuait le moins aux deux premières composantes.

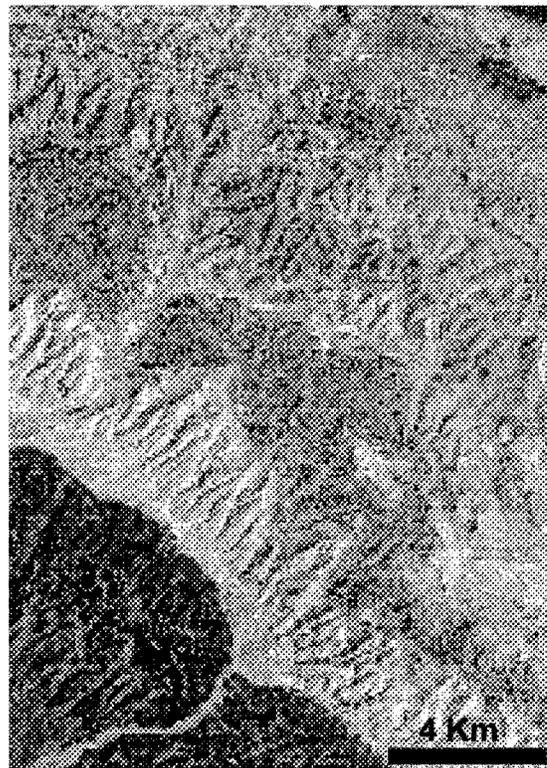
### **3.2.3- Choix des couleurs d'affichage**

Une composition en fausses couleurs a été faite en utilisant uniquement les trois bandes de l'infrarouge (5/2, 7/2, 4/2 en RVB) qui représentent les plus grosses variations spectrales (Figure 17). Il s'agit d'une image en deux domaines de teintes: alternance de bleu et de blanc et plages jaunâtres. Cette composition permet de bien distinguer les calcaires (IK1 et Ki1 ) qui apparaissent en bleu des autres unités blanches et jaunes. Le changement au Jaune se situe au niveau des grès du Cambrien inférieur (Ki2) alors qu'au-dessus, la teinte Jaunâtre seule ne permet pas de distinguer les unités postérieures à Ki2.

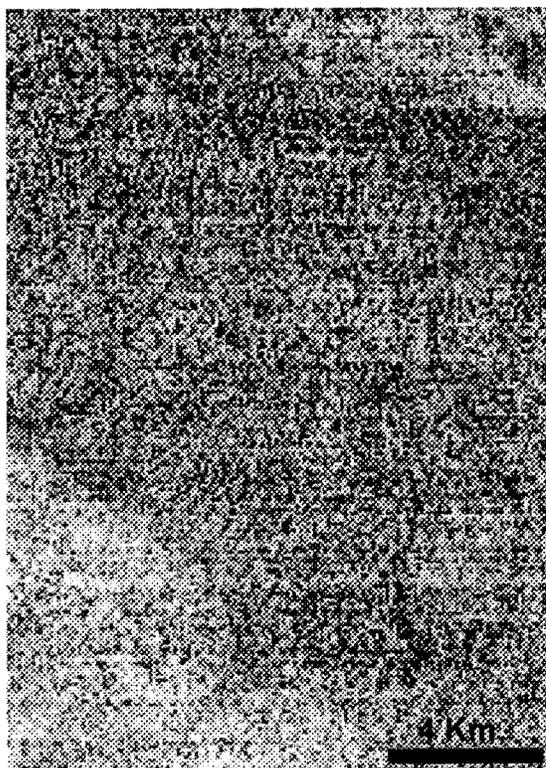
Cette composition donne aussi de l'information sur la provenance des sédiments récents et non sur la discrimination des unités infra-cambriennes et paléozoïques. C'est pourquoi l'intégration des ACP s'est avérée importante dans le choix des couleurs d'affichage.



**NCP1 (89%)**



**NCP2 (6,75%)**



**NCP3 (1,75%)**

Figure 16: Les trois premières composantes principales des néo-canaux.

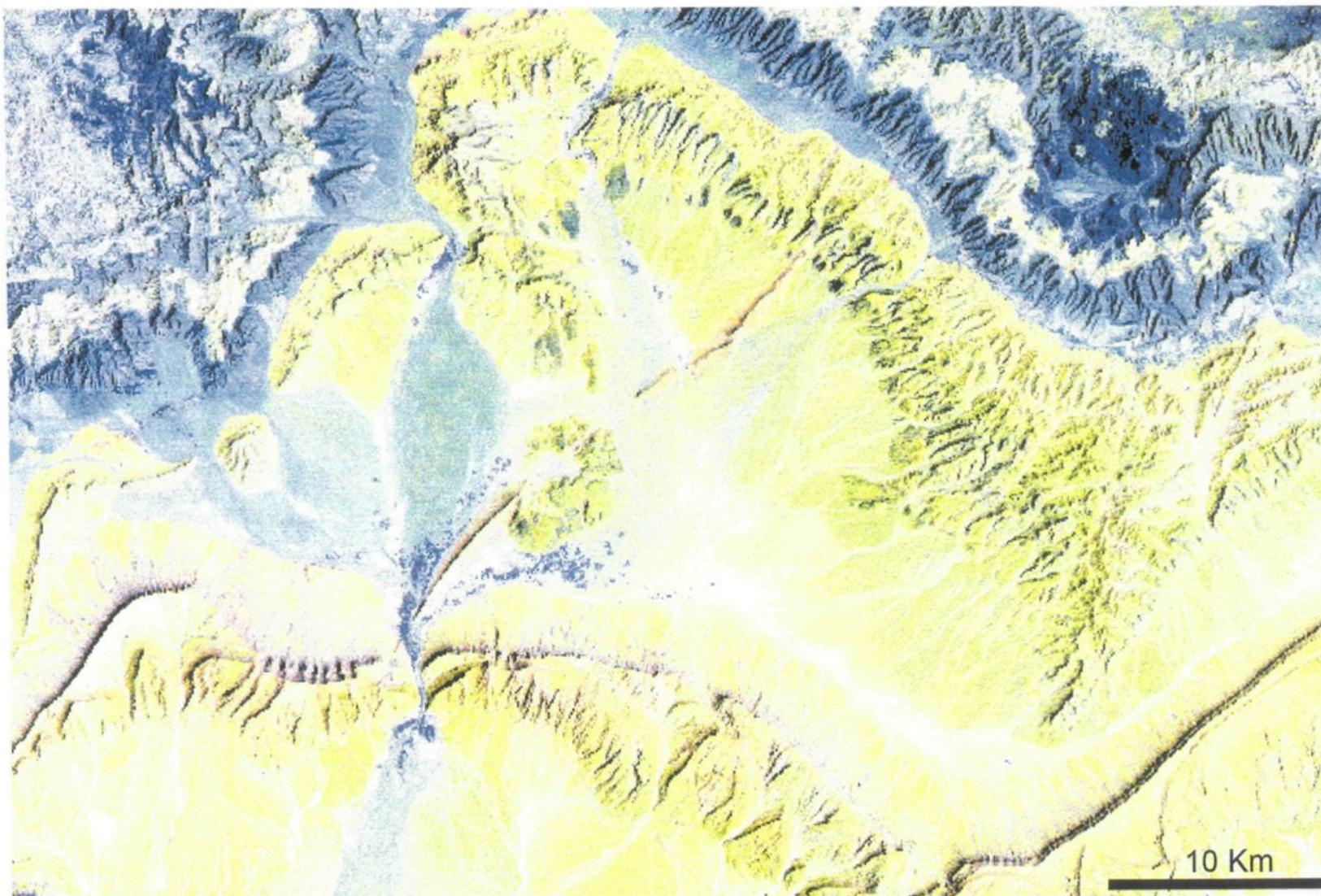


Figure 17: composition en fausses couleurs, 5/2, 7/2, 4/2 en RVB

Nous proposons d'afficher les informations de la CP1 en rouge, celles de la CP2 en vert et celle du néo-canal 3/2 en bleu. Le choix de cette composition colorée a été fait pour les raisons suivantes: (1) les première et deuxième composantes principales contiennent environ 96 % de l'information géologique; (2) le néo-canal 3/2 correspond à la bande qui est le moins représentée dans les deux premières composantes principales et (3) cette composition donne une meilleure discrimination des différentes unités de la zone d'étude et constitue un document de base pour ce travail. Cette composition sera appelée dans le reste du travail: Composition Retenue pour la Discrimination Lithologique ou CRDL. L'image issue de cette composition sera appelée: l'image CRDL (Figure 18). Il convient de noter qu'après avoir choisi la CRDL nous avons fixé l'étalement pour minimiser la dynamique des couleurs. Ceci a permis d'avoir la même couleur dans les différentes fenêtres utilisées.

Grâce en grande partie à l'image CRDL, une meilleure discrimination des unités infra-cambriennes et paléozoïques a été réalisée. La néo-image a été générée à partir des rapports de bandes 1/2, 3/2, 4/2, 5/2, et 7/2. Le calcul d'un rapport de bandes (le rapport de canaux TM correspond à un nouveau canal, dont les valeurs des pixels sont égales au rapport entre les valeurs radiométriques des deux canaux), permet de s'affranchir des variations d'éclairement des pixels, mais aussi de mieux séparer les unités, car les informations complémentaires contenues dans les deux bandes sont prises en compte.

Le vocabulaire standard des couleurs de la Geological Society of America (GSA) a été utilisé pour décrire la teinte de chaque unité sur l'image CRDL. Ce code subdivise les couleurs en 14 teintes: Beige, Blanc (châtre), Bleu (té), Brun (âtre), Gris (âtre), Jaune (âtre), Noir (âtre), Olive, Orange (é), Rose (é), Rouge (âtre), Rouille, Vert (dâtre) et Violet (acé). Il y a aussi 9 tons: Très clair, Clair, Moyen clair, Moyen, Moyen foncé, Foncé, Très foncé, Brillant, et Terme.

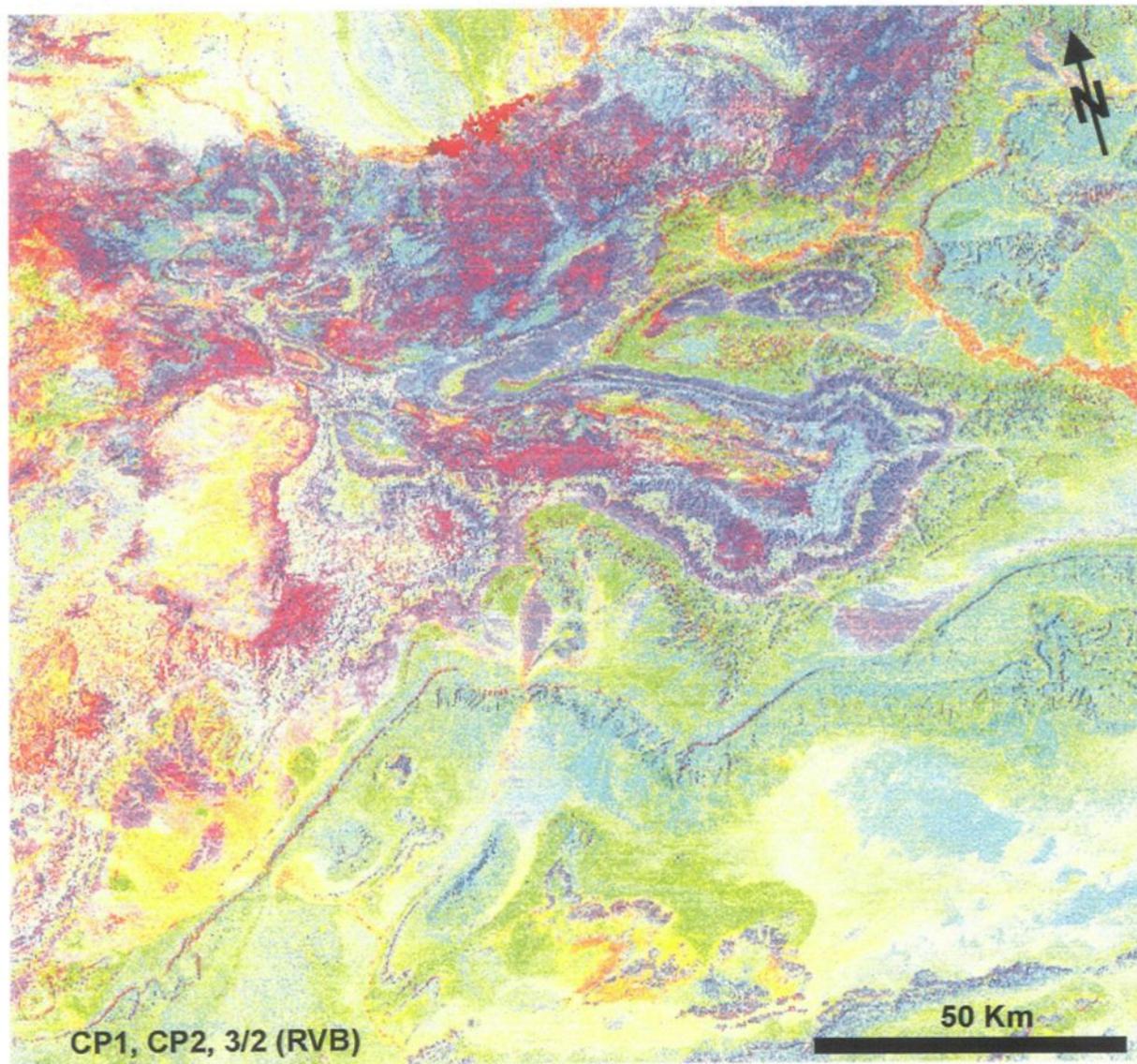


Figure 18: Composition retenue pour la discrimination lithologique (CRDL).

IMAGE LANDSAT-TM (201-39) TRAITÉE AU LABORATOIRE DE  
TÉLÉDÉTECTION DE L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

### 3.3- AUTRES MÉTHODES DE TRAITEMENT EXISTANTES

Dans une première étape, des rapports de bandes utilisés dans des terrains semblables à l'Anti-Atlas ont été appliqués à l'image originale (Tableau 7). Ces traitements ont déjà contribué à la discrimination des roches de lithologies sédimentaires et autres en terrains arides et semi-arides. Dans une deuxième étape, ces rapports de bandes ont été utilisés conjointement avec d'autres traitements pour tester la validité de la discrimination des différentes unités de la zone d'étude. Le tableau 7 illustre les principaux traitements qu'on trouve dans la littérature et qui ont été appliqués sur des terrains semblables que l'Anti-Atlas:

- Les rapports de bandes 5/1 et 5/7 ont été utilisés par Sultan et al. (1986, 1987 et 1988), dans le désert égyptien pour discriminer respectivement les aluminosilicates et les carbonates.

**Tableau 7: Méthodes de traitements utilisées dans des terrains semblables à l'Anti-Atlas**

Auteurs et région	Recettes des bandes	Discrimination Lithologique	Identification sur l'image
Sultan et al. (1988) Désert de l'Egypte			
	5/4 x 3/4	Silicates mafiques	Brillant
	5/1	minéraux opaques	sombre
	5/7	Carbonates et aluminosilicates	Brillant
Frei et Jutz (1989) Désert de l'Egypte	5/7, 4/3, 7/4 (RVB) 7/5, 4/2, 5/4 (RVB) 5/2, 7/2, 4/7 (RVB)	Argiles-Silstones	Brillant
		Graywackes	
	TM4, TM5, TM7 (RVB)	et Silstones	Bleu
Moore et Liu (1990) sud-est de l'Espagne	TM5-TM7	Altération argilique	Brillant
	3-1, 4-3, 5-7 (RVB)	Argiles	Bleu
Sabins (1987) Wyoming ouest-USA		Grès	bleu vert
	3/1, 5/7, 3/5 (RVB)	Schiste	Bleu moyen à foncé
		Carbonates	Vert bleu clair
		Grès	Violet foncé à terne
	PC2, PC3, PC4 (RVB)	Schiste	Violet bleu clair
		Carbonates	Violet et jaune
Escadafal et Pouget (1987) Zones arides de la Tunisie	Luminance dans TM7 et le visible	Quartzites	forte  moyenne à forte
	Luminance dans TM7 et le visible	Calcaire	moyenne  faible à moyenne
	Luminance dans TM7 et le visible	Gypses	faible  moyenne à forte
Madeira Netto (1996) Environnements arides et semi-arides	(TM5-TM7)/(TM5+TM7)	Argiles et	Brillant
	TM3/TM1	Oxydes de fer	Brillant

- Sabins (1987), a utilisé les compositions 3/1, 5/7, 3/5 et PC2, PC3, PC4 (RVB) pour discriminer les grès, les schistes et les carbonates dans la région montagneuse du Wyoming.
- Escadafal et Pouget (1987) ont utilisé la luminance dans le visible et la bande 7 pour faire contraster les quartzites, les gypses et les calcaires dans le désert de la Tunisie.
- Selon Madeira et Netto (1996), les rapports  $(5-7)/(5+7)$  et 3/1 sont utilisés dans les environnements arides et semi-arides pour discriminer respectivement les argiles et les oxydes de fer.

### 3.4- REHAUSSEMENT DES LINÉAMENTS

Des filtres directionnels ont été utilisés sur les deux premières composantes principales de l'image originale pour faire ressortir et rehausser les différentes structures géologiques (failles, linéaments, fractures et contacts géologiques). C'est ainsi que quatre directions de filtres ont été superposées pour une extraction maximale des linéaments de la région d'étude (Tableau 8). Les quatre filtres directionnels de type gradient sont les suivants:

1- Le filtre de 5 par 5 a pour rôle d'accentuer l'orientation privilégiée par l'éclairement c'est-à-dire les fractures NE-SO; (2)- Le filtre 5 par 5 a pour but d'accentuer les structures parallèles à l'éclairement solaire c'est-à-dire les fractures NO-SE et qui sont négligées par le premier filtre; (3)- Le troisième filtre 5 par 3 a permis de faire ressortir les fractures E-O qui n'ont pas été accentués par les deux premiers filtres. Il est de qualité supérieure à celui d'un filtre de 5 par 5; (4)- Le quatrième filtre de 3 par 3 a pour rôle d'accentuer les fractures N-S. Il a montré un meilleur rehaussement de linéament que celui d'un filtre 5 par 5. Les résultats avec un gradient inverse sont moins représentatifs et de qualité inférieure.

Cette extraction des linéaments a été réalisée à partir d'une analyse visuelle de l'image filtrée. Pour ce faire, des critères ont été établis pour l'identification des linéaments. Ces critères sont détaillés dans le chapitre d'analyse et interprétation structurale de l'image.

Tableau 8: Filtres directionnels utilisés.

Directions	Filtres
Filtre directionnel <b>NE-SO</b>	-1 -1 -1 -1 0
	-1 -1 -1 0 1
	-1 -1 0 1 1
	-1 0 1 1 1
	0 1 1 1 1
Filtre directionnel <b>NO-SE</b>	0 -1 -1 -1 -1
	1 0 -1 -1 -1
	1 1 0 -1 -1
	1 1 1 0 -1
	1 1 1 1 0
Filtre directionnel <b>E-O</b>	-1 -1 -1 -1 -1
	0 0 0 0 0
	1 1 1 1 1
Filtre directionnel <b>N-S</b>	1 0 -1
	1 0 -1
	1 0 -1

## CHAPITRE 4

### ANALYSE ET INTERPRETATION DE L'IMAGE

La réalisation d'une carte lithostratigraphique nécessite la distinction et l'identification des diverses unités de la zone d'étude. Les unités lithostratigraphiques doivent présenter des caractéristiques spectrales et géomorphologiques différentes pour être cartographiables. Ces caractéristiques ont permis de distinguer 27 unités dans la couverture infra-cambrienne et paléozoïque. La description de chacune des 27 unités tient compte de: (1)- la morphologie de l'unité à partir de la CP1 de l'image initiale et de la carte topographique, essentiellement en terme de relief et de ravinement, (2)- la valeur spectrale moyenne (après correction radiométrique) des pixels bien éclairés si un versant exposé au ESE (direction de l'éclairage direct) est disponible et (3)- la discrimination de chaque unité présente sur l'image CRDL d'après la teinte liée à la réponse spectrale et la texture reflétant le ravinement.

L'interprétation et l'identification lithologique des 27 unités stratiformes dans la couverture infra-cambrienne et paléozoïque suivront. Elles seront basées sur: (1)- la littérature et, lorsque possible, sur des traitements numériques déjà utilisés sur des terrains

arides à lithologies semblables. Cela revient à compiler et à confronter les résultats de cette interprétation avec d'autres travaux de terrains et (2)- les différents styles du relief du terrain résultant de l'érosion. En effet, le cadre géologique présenté au chapitre 2 implique que l'Anti-Atlas aurait émergé définitivement de l'océan à la fin de l'orogénie hercynienne, c'est à dire, il y a plus de 200-300 millions d'années. La morphologie actuelle du terrain suggère que le climat sec actuel (latitudes tropicales) a existé pendant une partie importante de l'intervalle de temps depuis l'émergence. Dans le climat aride à semi-aride les calcaires et les grès ont tendance à former des crêtes, des falaises et des escarpements, alors que les argiles et les schistes ont souvent une faible cohésion et auront tendance à former des talus et des vallées.

Enfin la signature de chaque groupe de roche de la zone d'étude est établie. L'ensemble des données de la description et de l'identification des unités sera utilisée pour établir la carte lithostratigraphique.

#### 4.1- DISCRIMINATION ET IDENTIFICATION DES DIFFÉRENTES UNITÉS

Les 27 unités stratiformes de la couverture infra-cambrienne et paléozoïque ont été regroupées en 5 ensembles correspondant aux âges de l'Infra-cambrien, du Cambrien, de l'Ordovicien, du Silurien et du Dévonien. Des sous-images de différentes dimensions ont été découpées pour les fins de cette étude (Figure 19).

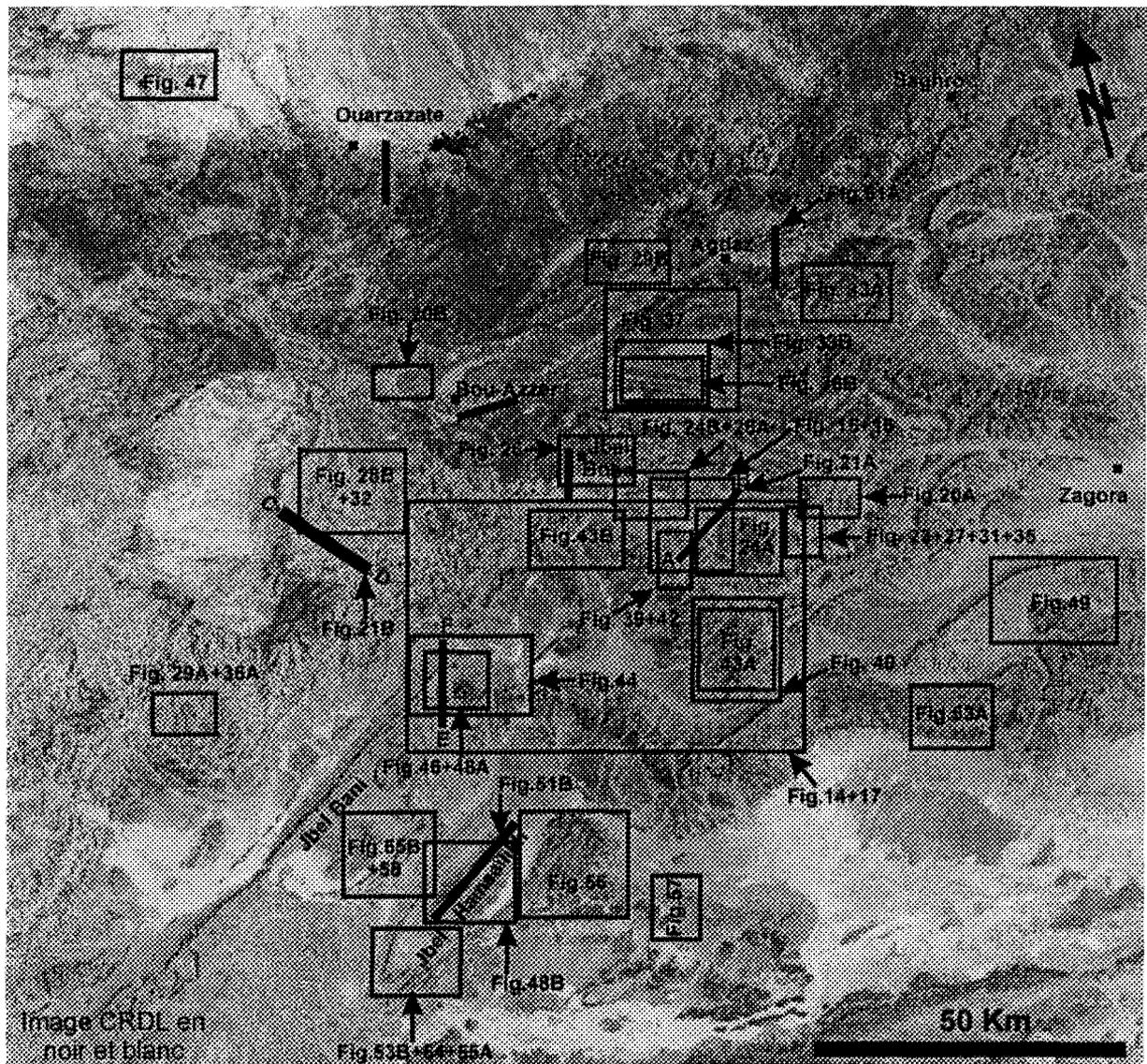


Figure 19: Localisation des différentes coupes topographiques schématiques (traits) et des sous-images (cadres) utilisées dans la présente étude.

#### **4.1.1- Discrimination et identification des unités infra-cambriennes**

La séquence infra-cambrienne débute avec une unité volcanique qui apparaît en rouge sur l'image CRDL. Cette première unité stratiforme est particulièrement abondante dans la bande précambrienne d'une quarantaine de km de largeur qui forme la bordure nord de l'Anti-Atlas dans de la région d'étude. Sa teinte dans la CRDL contraste fortement avec les couleurs, dont les jaunes vifs, que montre le socle protérozoïque dans les boutonnières de Bou-Azzer et de Zenaga. Cette séquence de base n'est pas l'objet de la présente étude mais elle constitue néanmoins la base de la séquence lithostratigraphique étudiée. Au-dessus de cette unité volcanique, il est possible de distinguer quatre unités sédimentaires aux caractéristiques spectromorphologiques différentes.

**La première unité infra-cambrienne (IK0)** est la plus ancienne unité sédimentaire de la succession plissée infra-cambrienne et paléozoïque. Cette unité se présente sur l'image CRDL par une teinte bleu moyen et une présence des marbrures irrégulières plus foncées et allongées plus ou moins parallèlement aux contacts (Figure 20A). Elle se caractérise par un relief moyen à fort formant des crêtes d'environ 1 500 m d'altitude et des ravins moyennement profonds, longs et parallèles entre eux (Figure 21). Elle possède la caractéristique spectrale suivante: les valeurs radiométriques sont faibles à moyennes dans le visible et plus élevées dans l'infrarouge (Figure 22).

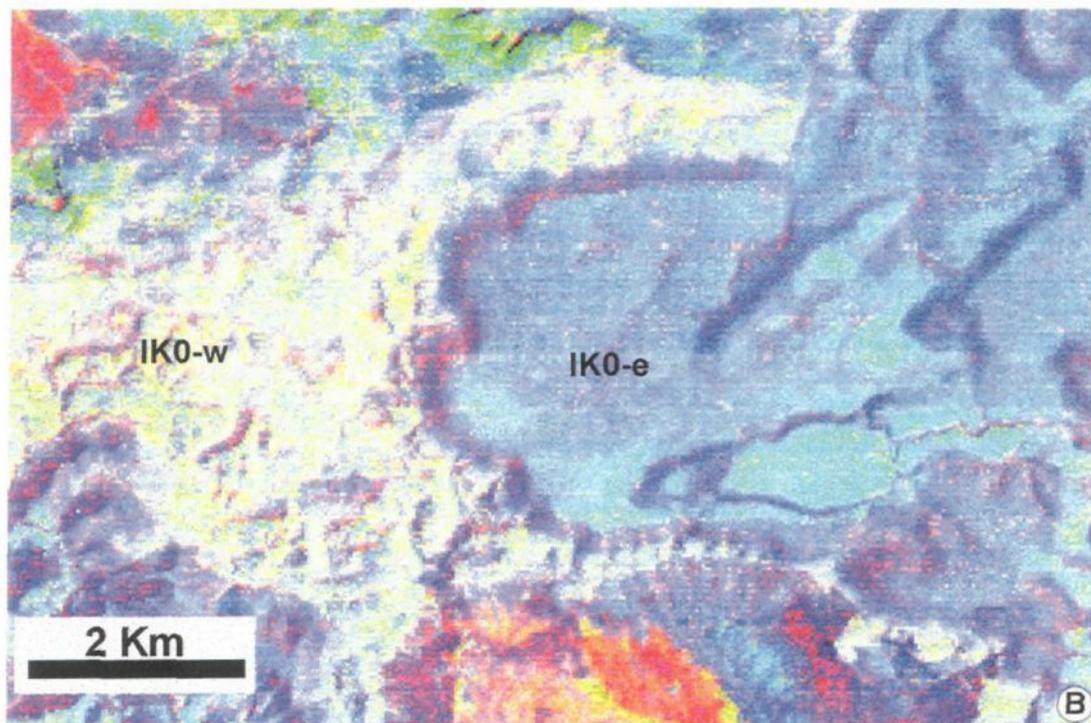
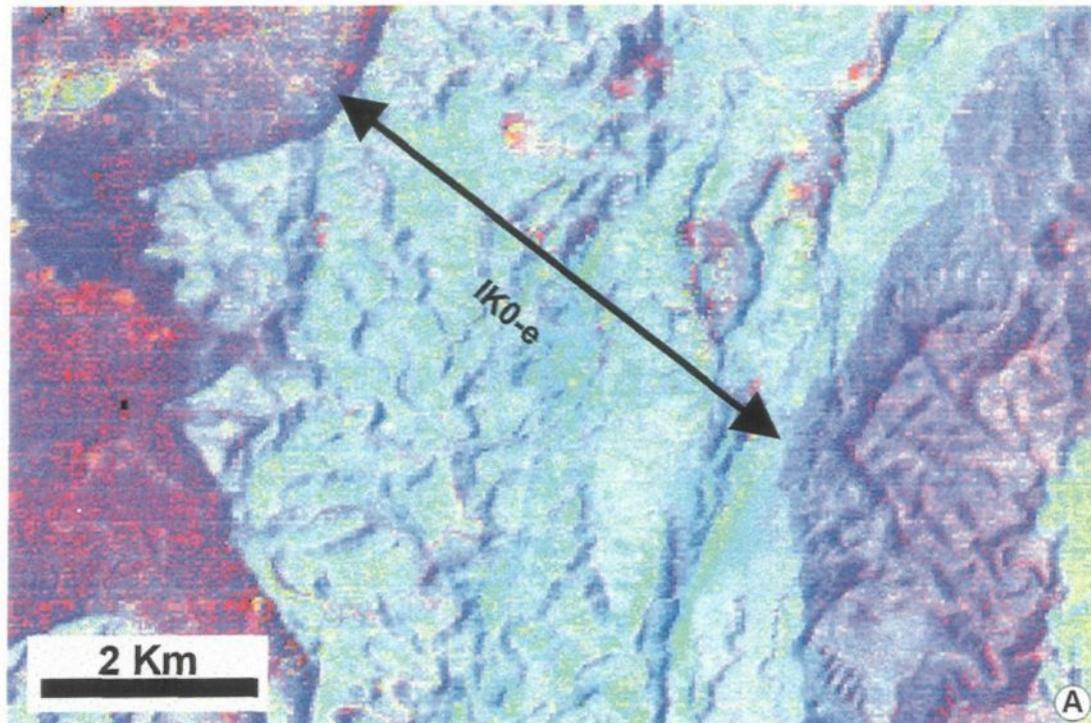


Figure 20: Sous-scènes montrant la première unité gréseuse IK0-e de l'Infra-cambrien (A) qui devient conglomératique IK0-w vers l'ouest (B).

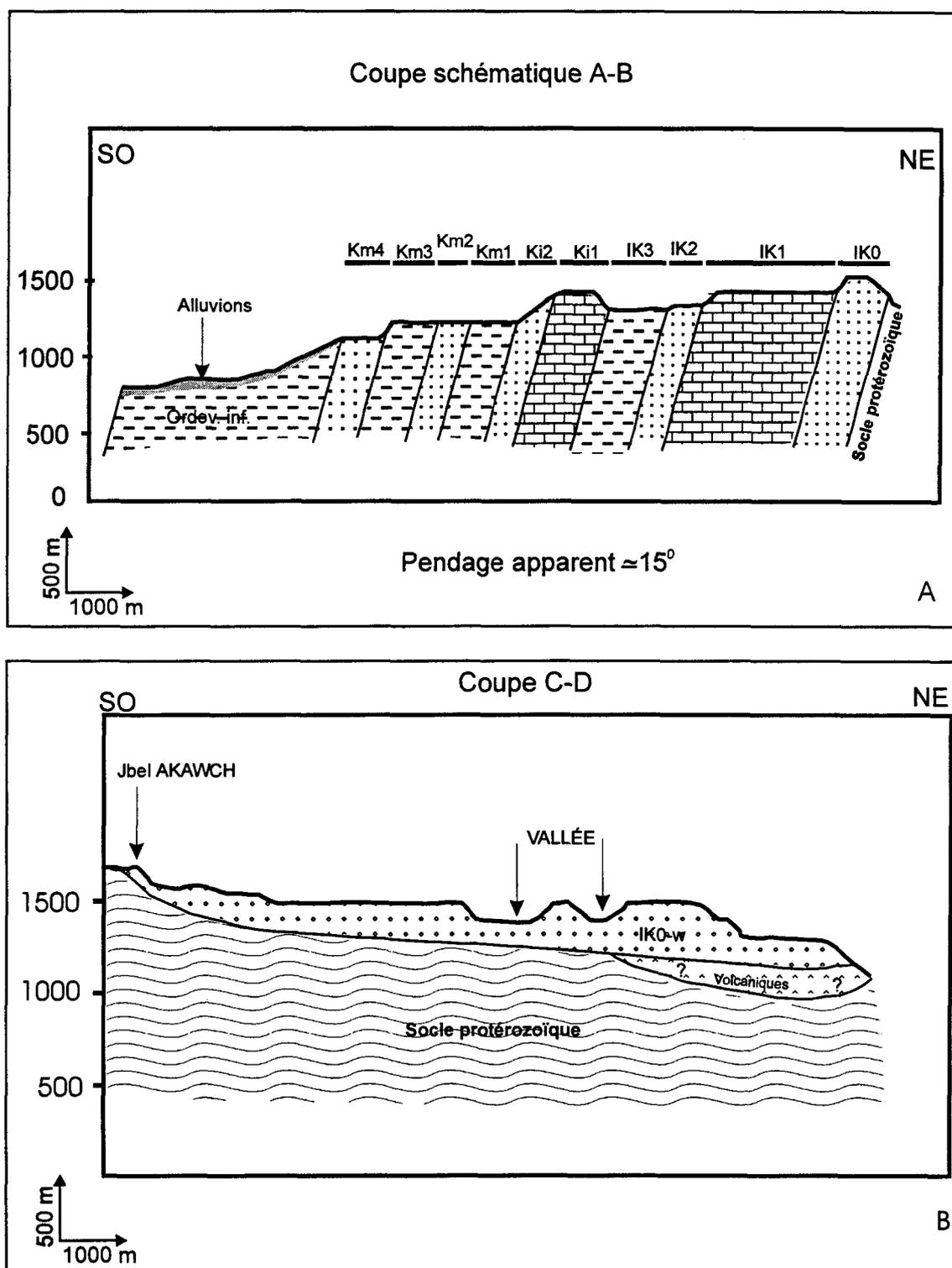


Figure 21: Coupes topographiques schématiques à travers  
 ( A ) les différentes unités infra-cambriennes et paléozoïques et  
 ( B ) les conglomérats infra-cambriens (IK0-w).

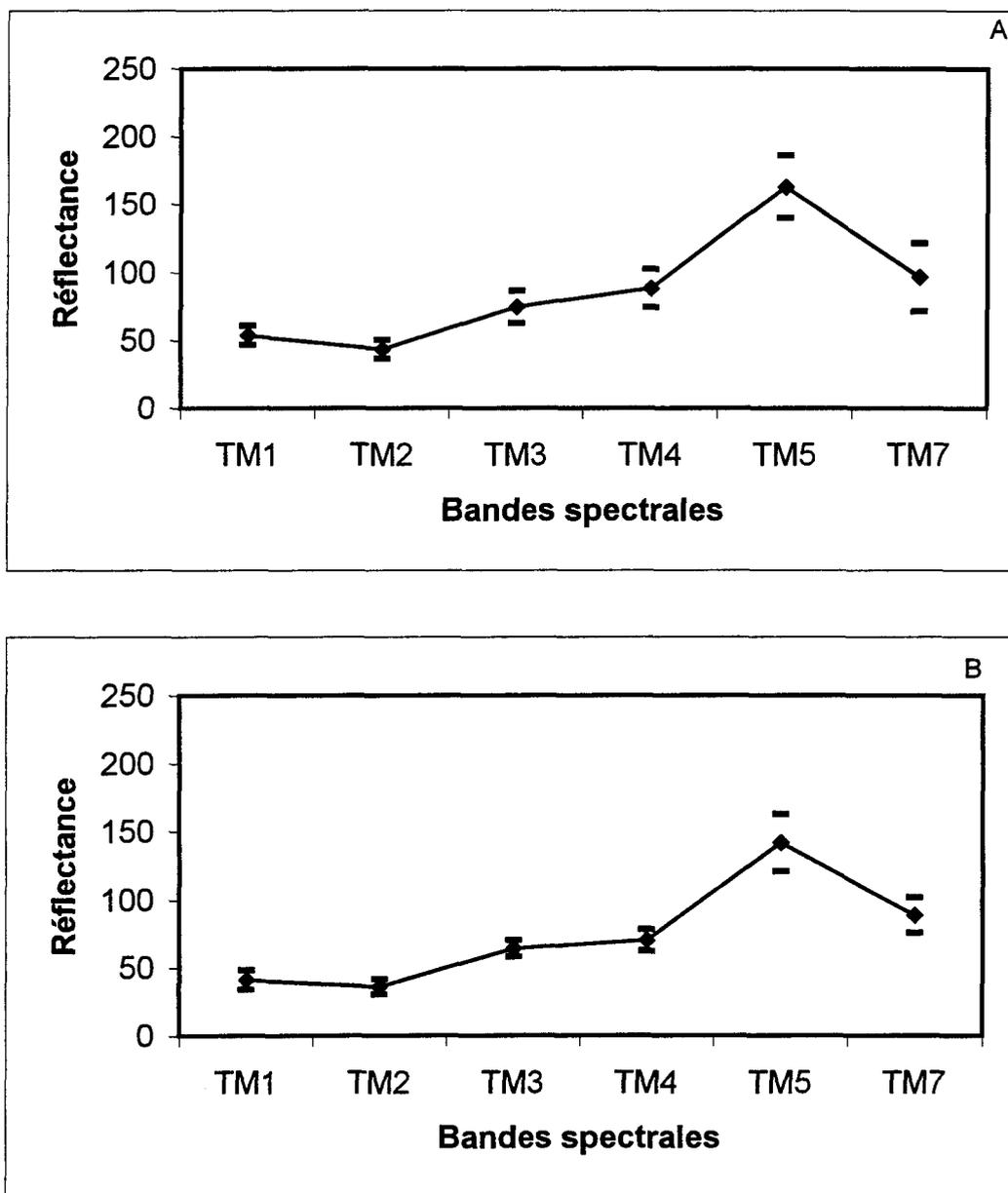


Figure 22: Spectre de réflectance (A) des conglomérats IK0-w et celui des grès IK0-e (B). Les deux traits de part et d'autre du spectre indiquent l'étalement moyen des mesures

Selon l'ONAREP (1991) et Benziane et al. (1983), des variations latérales au sein de IK0 ont été déjà observées à l'ouest de Bou-Azzer. Effectivement, les caractéristiques spectro-morphologiques de cette unité changent à partir de Bou-Azzer. Cela se manifeste par des valeurs spectrales relativement moins élevées que celles mesurées à l'est (Figure 22), une couleur qui passe du bleu moyen à un vert blanc sur l'image CRDL indiquant un changement de composition lithologique de cette unité (Figure 20). Le même genre de marbrures que IK0-e se reconnaît pour l'unité IK0-w à la figure 20B. Le relief devient modéré formant des crêtes discontinues qui atteignent parfois des altitudes de 1700 m et des ravins relativement peu profonds, courts et espacés (Figure 21).

L'image originale et les coupes schématiques à travers la carte topographique de la région d'étude indiquent que la première unité infra-cambrienne (IK0) a tendance à former des crêtes difficiles à éroder. D'après les travaux de terrains de l'ONAREP (1991) et Benziane et al. (1983), il s'agit d'une unité gréseuse qui devient conglomératique vers l'ouest. La zone de transition latérale progressive entre les grès et les conglomérats, de couleur respectivement vert blanc et bleu moyen sur l'image CRDL, se situe à l'ouest de la localité de Bou-Azzer (Figure 20).

La figure 20B montre la demie E de la selle structurale dont le cœur est formé de l'unité IK0-w de teinte blanchâtre marbrée de violacé. Une bande violet-mauve sombre la sépare de la plage bleu violet moyen plutôt uniforme identifiée comme l'unité IK0-w. La partie synclinale de la selle structurale plonge à peu près vers l'est. Il est possible de distinguer ici trois unités superposées dans la fermeture synclinale à l'est de la selle: l'unité blanchâtre à la base, l'unité violet-mauve au milieu et enfin l'unité bleu violet au-dessus. La carte en pochette supporte l'identification de l'unité bleu violet comme étant l'unité IK0-e en descendant la stratigraphie à partir du contact Cambrien moyen–Cambrien inférieur. Alors le grès (unité bleu violet) est superposé au conglomérat (unité blanchâtre) dans le synclinal au nord de Bou Azzer. Cependant, le relief et le texture de l'unité IK0-e à cet endroit diffèrent de ce qui est observé à 20A suggérant une réponse différente à l'érosion. Par ailleurs, à la figure 20B, le conglomérat (IK0-w) semble en contact direct avec l'unité IK1, sans unité intermédiaire (violet-mauve) ni supérieure (bleu-violet). Cela suggère que le conglomérat et le grès de l'unité IK0 sont des corps géologiques discontinus latéralement et partiellement superposés l'un à l'autre, avec le conglomérat localement antérieur au grès et localement séparé de ce dernier par une unité de transition (violet-mauve).

Sabins (1987) a étudié des terrains aux lithologies semblables à celles de la zone d'étude. Il trouve qu'une composition RVB avec les rapports de bandes 3/1, 5/7, 3/5 fait apparaître les grès en bleu moyen à foncé alors que celle avec PC2, PC3, PC4 (RVB) fait ressortir ces unités en violet bleu clair. Les grès infra-cambriens (IK0-e) de la zone d'étude

(Figure 23) apparaissent en rouge violet dans la composition 3/1, 5/7, 3/5 (RVB) et en jaune verdâtre dans la composition PC2, PC3, PC4 (RVB). Donc ces traitements ne permettent pas de confirmer la distinction des grès IK0-e de l'Anti-Atlas probablement parce que la composition des grès y est différente. Cependant, la composition TM3, TM2, TM1 (RVB) permet une discrimination de IK0-e à ne pas sous-estimer (Figure 23). Cependant, il ne semble pas exister de traitement pour la discrimination des conglomérats.



A  
3/1. 5/7.3/5 (RVB)



B  
PC2, PC3, PC4 (RVB)



C  
TM3, TM2, TM1 (RVB)

Figure 23: Application de traitements existants sur les grès infra-cambriens IK0-e.

**La deuxième unité (IK1)** est en contact direct avec la première. Elle s'en distingue par sa couleur généralement dans les teintes violet moyen à violet foncé sur l'image CRDL et par sa texture zébrée. Cette unité forme des crêtes généralement perpendiculaires aux contacts de l'unité (Figure 24). L'ensemble de ces crêtes forme un plateau rectiligne d'une altitude moyenne de 1 400m, coupé par un ravinement parallèle, espacé et profond, et par une fracturation intense (Figure 21). Les caractéristiques spectrales de IK1 (Figure 25) sont les suivantes: des valeurs, en niveau de gris, faibles dans le TM2 (33) et le TM1 (1), moyennes dans le TM3 (59) et le TM4 (62,5) et plus élevées dans le TM5 (112) et dans le TM7 (68,5). Cette unité est caractérisée aussi par l'existence des masses trachytiques et andésitiques, infra-cambriennes de couleur rouge foncé à terne sur l'image CRDL (Figure 26).

La morphologie, l'aspect du relief de IK1 et la coupe schématique de la figure 21 indiquent qu'il s'agit d'une unité difficile à éroder. En effet, d'après la colonne stratigraphique de Ducrot et Lancelot (1977) au niveau du Jbel Boho, de Benziane et al. (1983) et de l'ONAREP (1991), IK1 correspond à une unité carbonatée de composition dolomitique.

Les traitements décrits par Sultan et al. (1988) et Escadafal et Pouget (1987), visant à discriminer les carbonates dans un milieu aride ont été utilisés pour tester la correspondance entre ces travaux et la présente étude. Selon Sultan et al. (1988), le rapport 5/7 rehausse les carbonates dans le désert égyptien, et selon Escadafal et Pouget (1987), qui ont travaillé sur les terrains arides de la Tunisie, les surfaces à dominance calcaire montrent une luminance faible à moyenne dans le visible et moyenne dans le canal 7. L'application de ces méthodes à l'unité IK1 donne des résultats similaires à ceux obtenus par Sultan et al. (1988) et Escadafal et Pouget (1987). Donc ces traitements confirment la discrimination des calcaires dolomitiques des l'Anti-Atlas central (Figure 27).

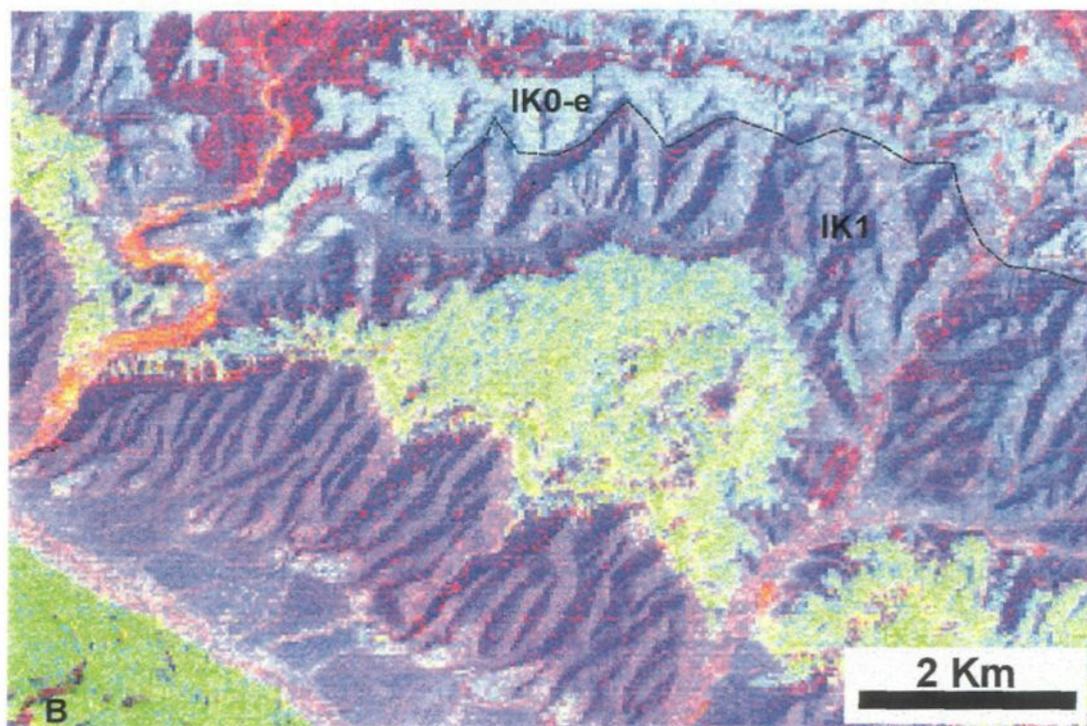
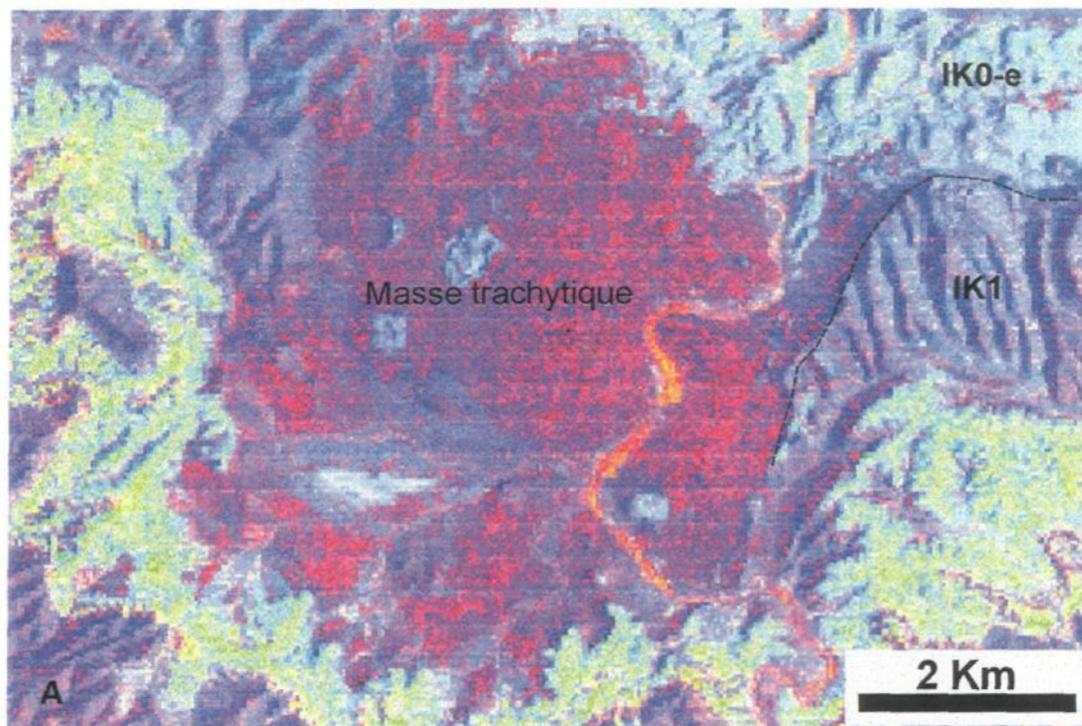


Figure 24: Les sous-images A et B montrent les dolomites IK1 dans CRDL.

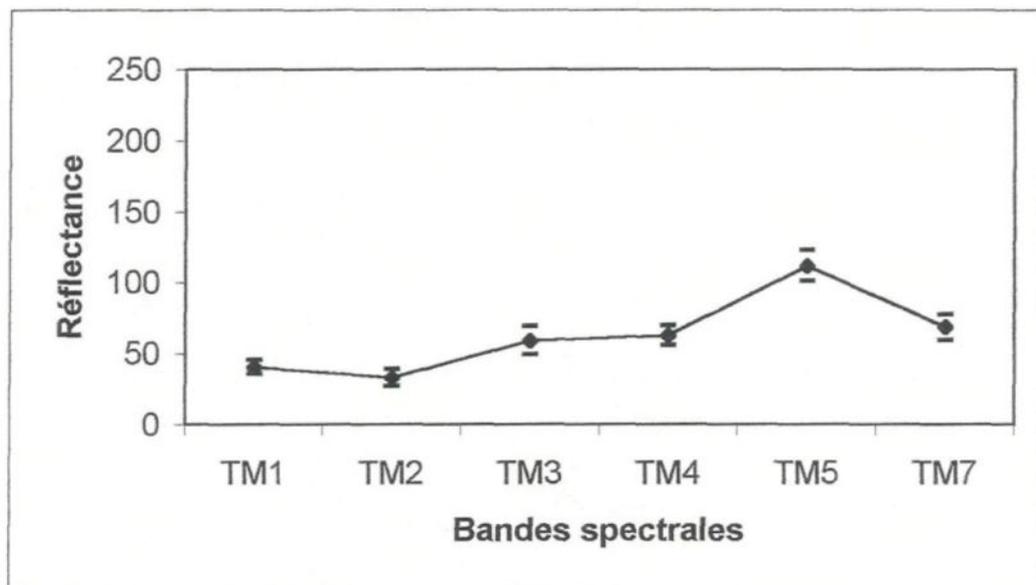


Figure 25: Spectre de réflectance des dolomies IK1 infra-cambriennes.

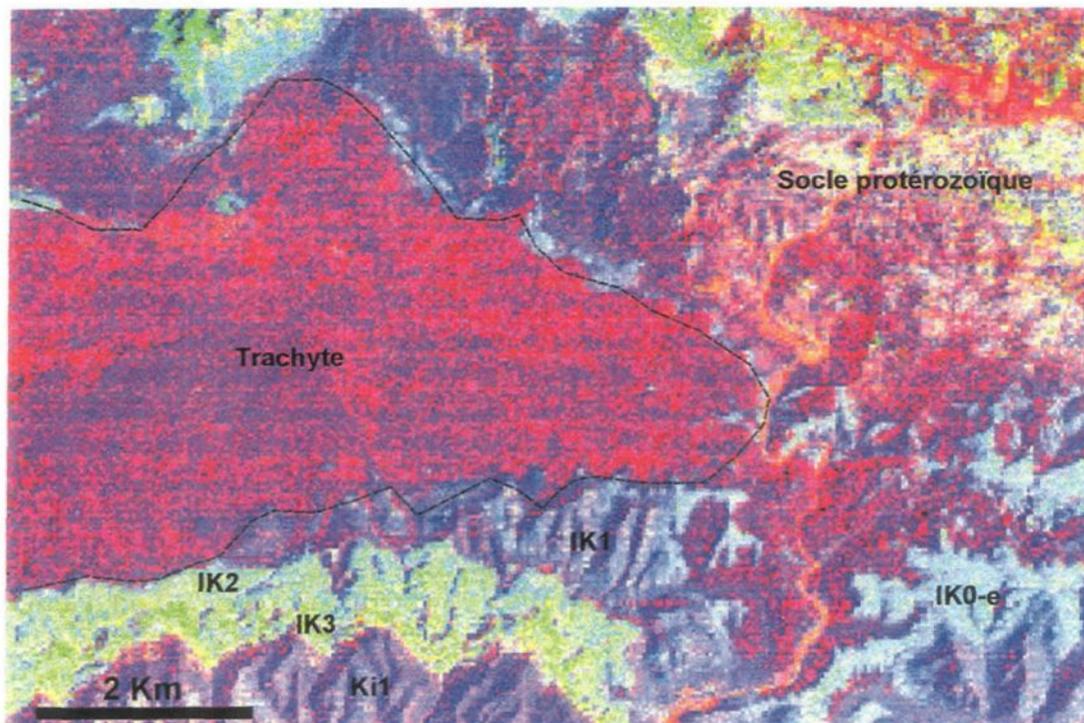


Figure 26: Sous-image CRDL montrant les trachytes typiques des dolomies infra-cambriennes.

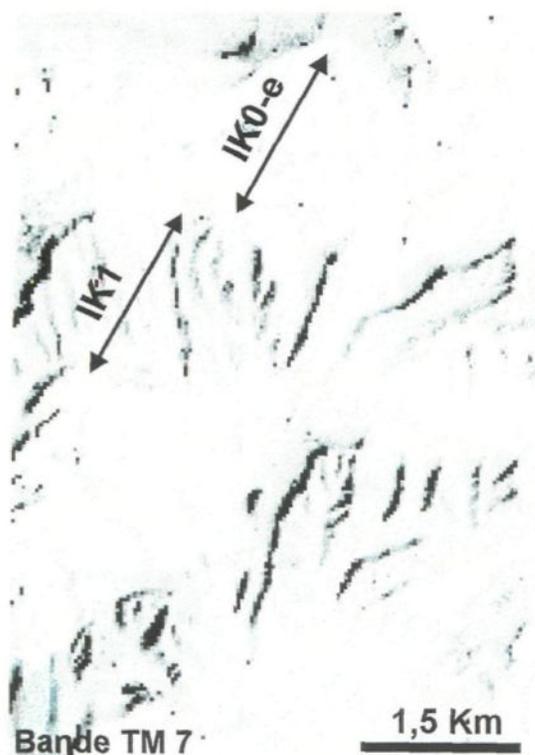


Figure 27: Validité des traitements existants pour la discrimination des dolomites infra-cambriens IK1.

**La troisième unité infra-cambrienne (IK2)** est caractérisée sur l'image CRDL par une teinte vert bleuté clair et une texture uniforme (Figure 28). Cette unité et la suivante forment une vallée. IK2 s'y exprime par des collines basses allongées perpendiculairement au contact avec IK1 en bordure de la vallée (Figure 23). La couleur de cette unité contraste avec celle de l'unité sous-jacente formant un bon repère aussi bien sur l'image originale que sur l'image CRDL. Un changement de couleur de IK2 a été constaté au nord et au sud de l'image CRDL (figure 29). Le spectre de réflectance de cette unité est illustré par la figure 30.

La signature morphologique de IK2, et son aspect du relief indiquent qu'il s'agit une unité relativement facile à éroder. En effet, selon les colonnes stratigraphiques de l'ONAREP (1991), Benziane et al. (1983) et Ducrot et Lancelot (1977), IK2 correspond à une unité gréseuse. La variation de couleur de IK2 au nord et au sud de l'image CRDL suggère un changement dans sa composition.

Pour distinguer les grès, Sabins (1987) a utilisé les compositions suivantes: 3/1, 5/7, 3/5 (RVB) et PC2, PC3, PC4 (RVB). Ces deux compositions font ressortir les grès respectivement en bleu moyen à foncé et en violet bleu clair. Des résultats similaires à ceux de Sabins (1987) ont été obtenus pour la troisième unité de l'Infra-cambrien (Figure31). Ceci indique que les grès de l'unité IK2 ont probablement une composition minéralogique semblable aux grès étudiés par cet auteur.

**La quatrième unité infra-cambrienne (IK3)** est difficile à distinguer de IK2. Ce qui semble distinguer IK3 de IK2, c'est la présence de points et de petites taches jaunes dans IK3. L'unité IK3 est caractérisée par une teinte vert clair sur l'image CRDL et une texture tachetée de bleu violacé (Figure 28). Elle forme un relief généralement monotone (Figure 23) et montre un ravinement très superficiel à quasi-absent. Les caractéristiques spectrales de cette unité sont illustrées par la figure 30.

La coupe schématique de la figure 21, sa morphologie et son aspect du relief indiquent que IK3 possède des caractéristiques d'une unité facile à éroder. En effet, les travaux de l'ONAREP (1991), Benziane et al. (1983) et Ducrot et Lancelot (1977), indiquent qu'il s'agit d'une unité schisteuse.

La grande similitude de couleur entre IK2 et IK3 suggère une similitude de composition et la variation d'expression topographique suggère une légère variation de résistance à l'érosion. La variation granulométrique d'un grès à un shale indiquée par les descriptions de terrain explique bien les observations faites sur l'image satellite pourvu que la composition minéralogique demeure semblable.

Le rapport 5/7 (Sultan et al. 1988), les compositions 3/1, 5/7, 3/5 et PC2, PC3, PC4 (Sabins 1987) ont été utilisées pour discriminer les schistes. La composition PC2, PC3, PC4 (RVB) a donné des résultats semblables à ceux obtenus par Sabins (1987); c'est-à-

dire que les schistes infra-cambriens IK3 y apparaissent de teintes violet bleu clair. La composition PC2, PC3, PC4 (RVB) permet de bien distinguer IK2 et IK3, et beaucoup mieux que la CRDL car la couleur passe de vert et jaune à vert et violet. Par contre, la composition 3/1, 5/7, 3/5 et le rapport 5/7 (Sultan et al. 1988) font apparaître les schistes respectivement en rouge et en noir, et ne permettent pas de confirmer la discrimination des schistes IK3 de la zone d'étude (Figure 31).

La figure 32A montre une succession stratigraphique incluant les unités IK2 et IK3 dans une zone à l'ouest de Bou-Azzer. La figure 32B correspond à la même section mais cette fois chronostratigraphique, provenant de la carte existante de Saadi et al. 1985. Sur la figure 32B, on ne retrouve pas la même succession que la figure 32A. Il y aura donc lieu de vérifier si des corrections à la carte existante sont nécessaires. L'extrémité sud-ouest du Jbel Bou El Baroud constitue un endroit où une correction à la carte existante (Saadi et al. 1985) apparaît nécessaire. En effet, les troisième et la quatrième unités infra-cambriennes (IK2 et IK3) sont visibles sur l'image CRDL alors qu'elles ne sont pas individualisées sur la carte (Figure 37)

En résumé les unités infra-cambriennes sont bien individualisées sur l'image CRDL. Ces unités se distinguent facilement les unes des autres grâce à leur contraste de couleur sauf IK2 et IK3. Les grès constituent la base de l'Infra-cambrien et sont représentés par une teinte bleu foncé qui passent vert l'ouest à des conglomérats vers

l'ouest de teinte vert blanc. La deuxième unité, de teinte violet foncé, correspond à des dolomites. Les troisième et quatrième unités IK2 et IK3, de teintes respectivement vert bleu clair et vert très clair, correspondent à la série lie-de-vin à prédominance gréseuse à la base (IK2) et schisteuse au sommet (IK3). Quelques corrections à la carte existante apparaissent nécessaires pour ces deux unités.

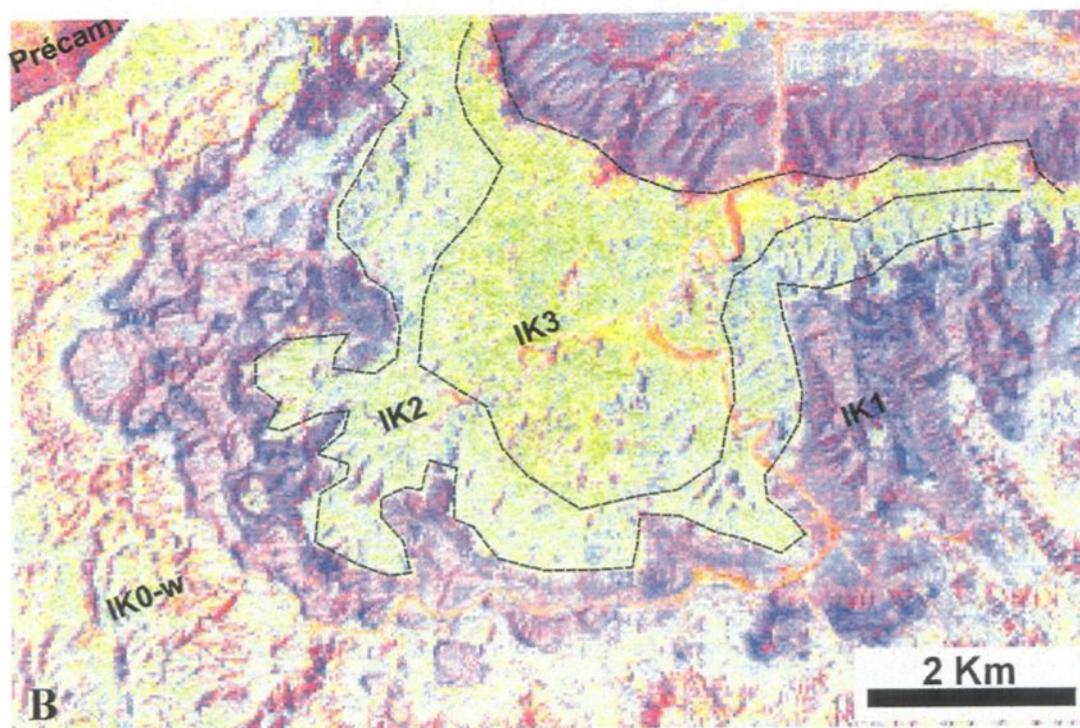
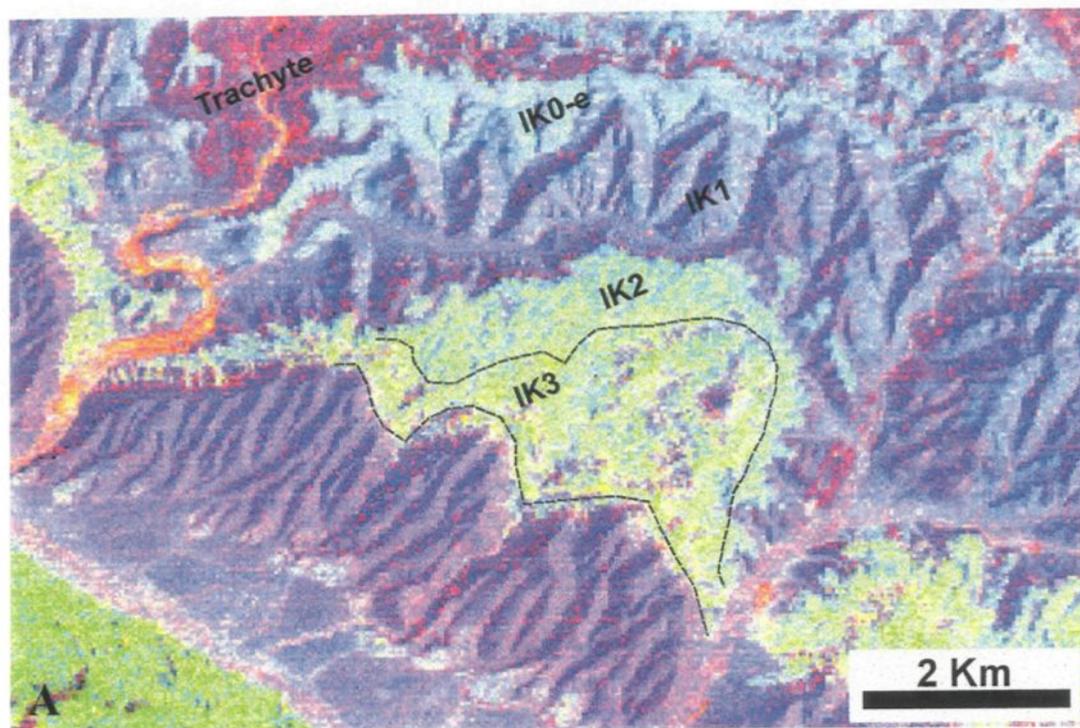


Figure 28: Sous-images CRDL montrant l'aspect des grès IK2 et des schistes IK3 de la série lie-de-vin à l'est (A) et à l'ouest (B).

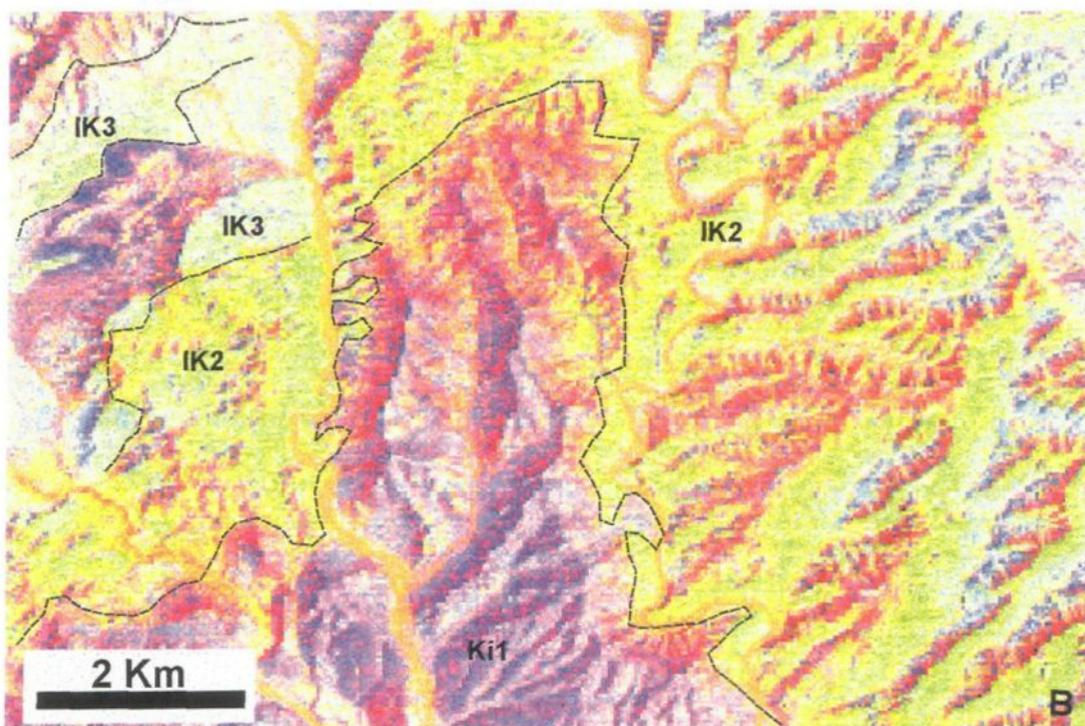
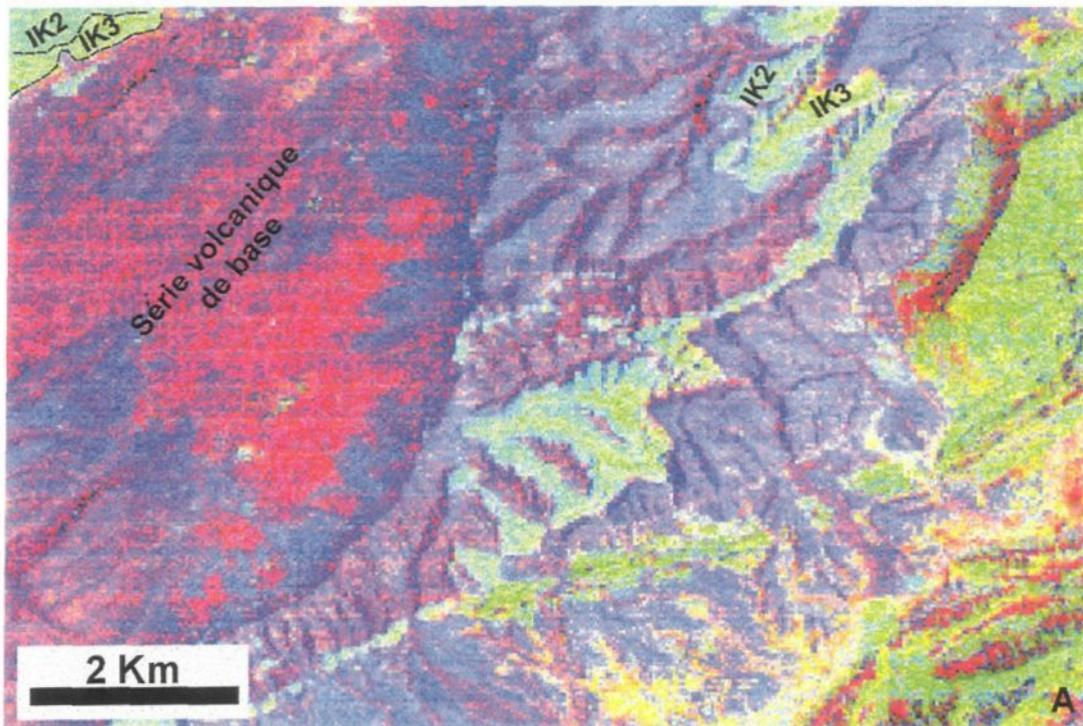


Figure 29: Sous-images CRDL montrant un changement de couleur au centre nord (A) et au sud-ouest (B) de la région étudiée.

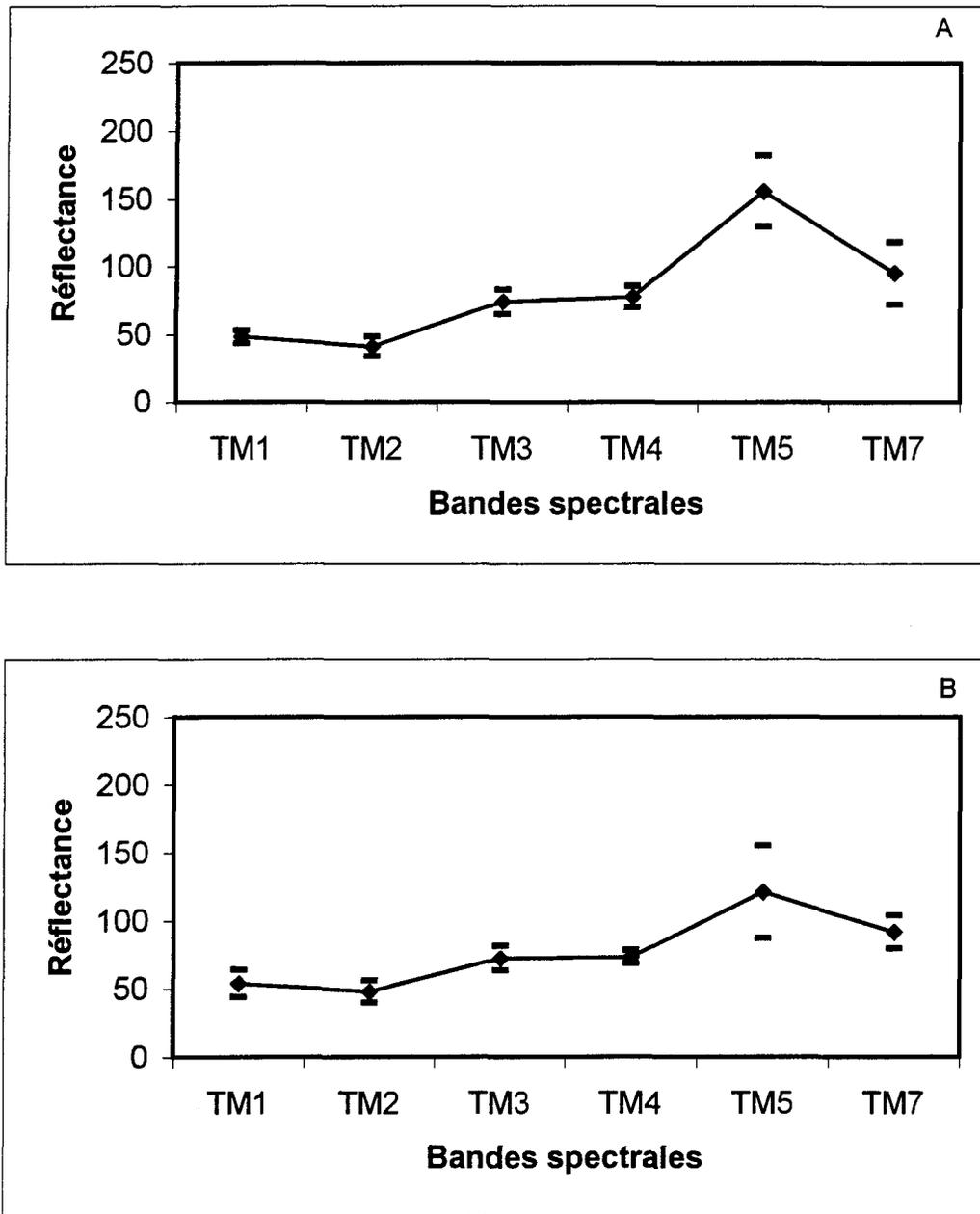
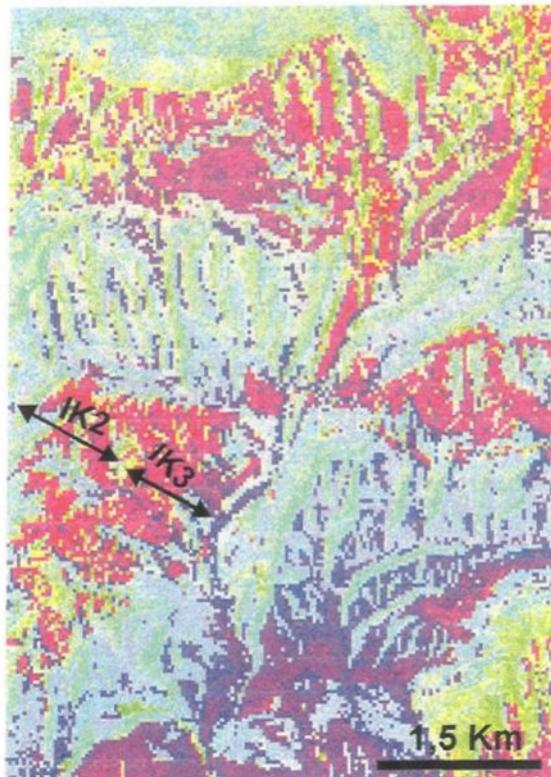


Figure 30: Spectre de réflectance des grès: IK2 (A) et des schistes: IK3 (B) infra-cambriens



3/1. 5/7.3/5 (RVB)



PC2, PC3, PC4 (RVB)



Rapport 5/7

Figure 31: Application de traitements existants sur les grès IK2 et les schistes IK3 infra-cambriens de la zone d'étude.

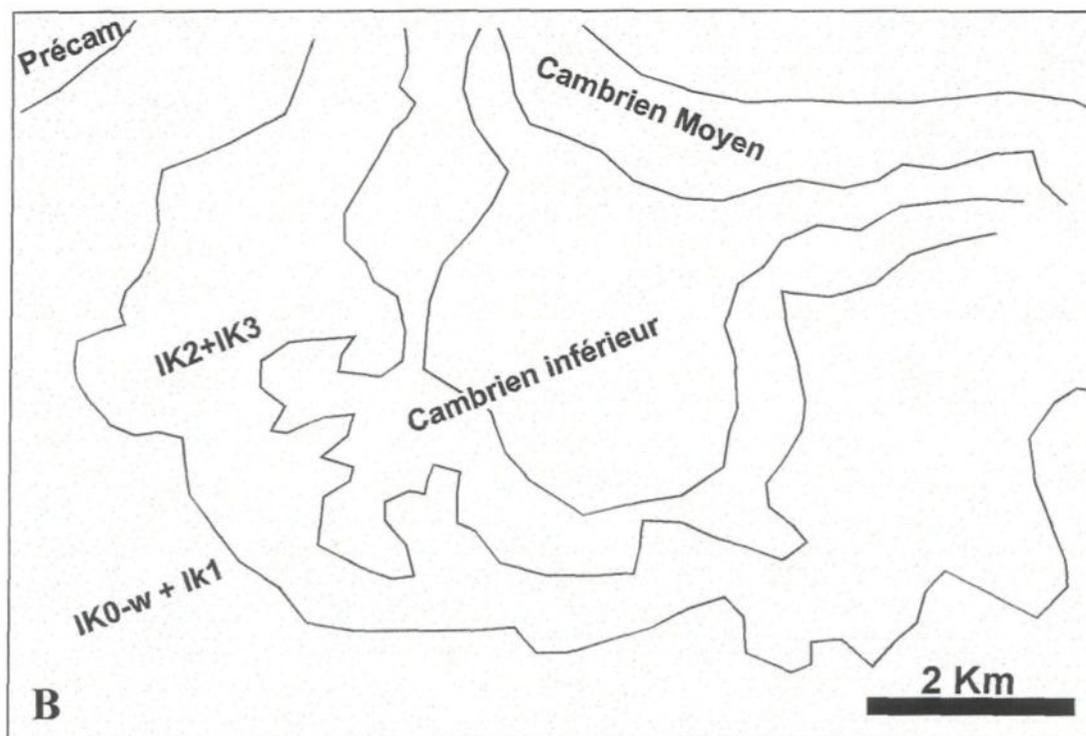
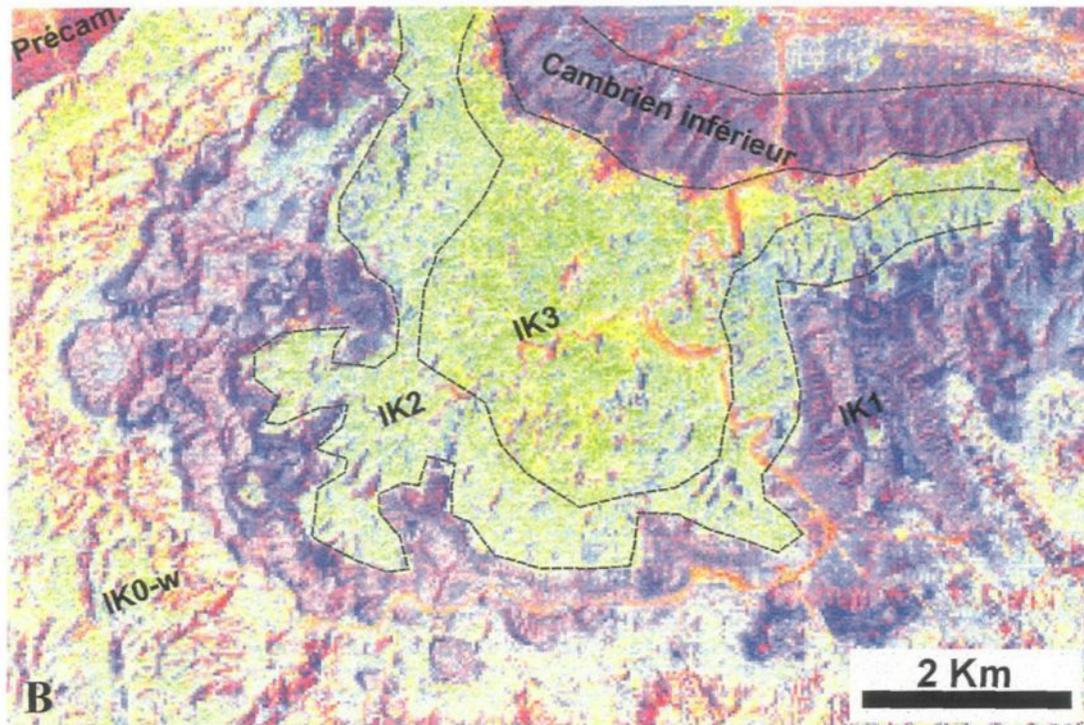


Figure 32: Unité IK2 et IK3 en position localement différente sur l'image Landsat-TM (A) et sur la carte géologique existante (B).

#### 4.1.2- Discrimination et identification des unités du Cambrien inférieur

La base du Cambrien inférieur (Géorgien) correspond à une série qui tranche sur la dernière unité infra-cambrienne sur laquelle elle repose en continuité stratigraphique par sa teinte violet clair dans l'image CRDL (Figure 33). On trouve le Géorgien partout sur l'image et surtout plissé autour du grand anticlinal de l'Anti-Atlas où il est bien développé. Le Géorgien a été subdivisé en deux unités.

**La première unité (Ki1)** est caractérisée sur l'image CRDL par un rubanement local parallèle aux couches, une texture zébrée et des teintes généralement dans le violet clair à moyen. Elle est formée par un alignement de crêtes perpendiculaires aux contacts reflétant un ravinement parallèle, espacé et profond (Figure 33). Sur la coupe de la figure 21, Ki1 correspond à un plateau étroit d'une altitude moyenne de 1 400 m. Les caractéristiques spectrales de Ki1 sont illustrées par la figure 34. L'épaisseur de cette série diminue vers l'est et le nord-est et se termine en biseau au sud d'Ouarzazate.

La morphologie et l'aspect du relief de Ki1, montrent qu'il s'agit d'une unité apparemment difficile à éroder. La première unité géorgienne présente une teinte violet sur l'image CRDL et des caractéristiques morphologiques très proches de la deuxième unité infra-cambrienne IK1 c'est-à-dire celles d'une série carbonatée. En effet, d'après les travaux de l'ONAREP (1991), Benziane (1983) et Ducrot et Lancelot (1977), l'unité Ki1 correspond à des calcaires dolomitiques.

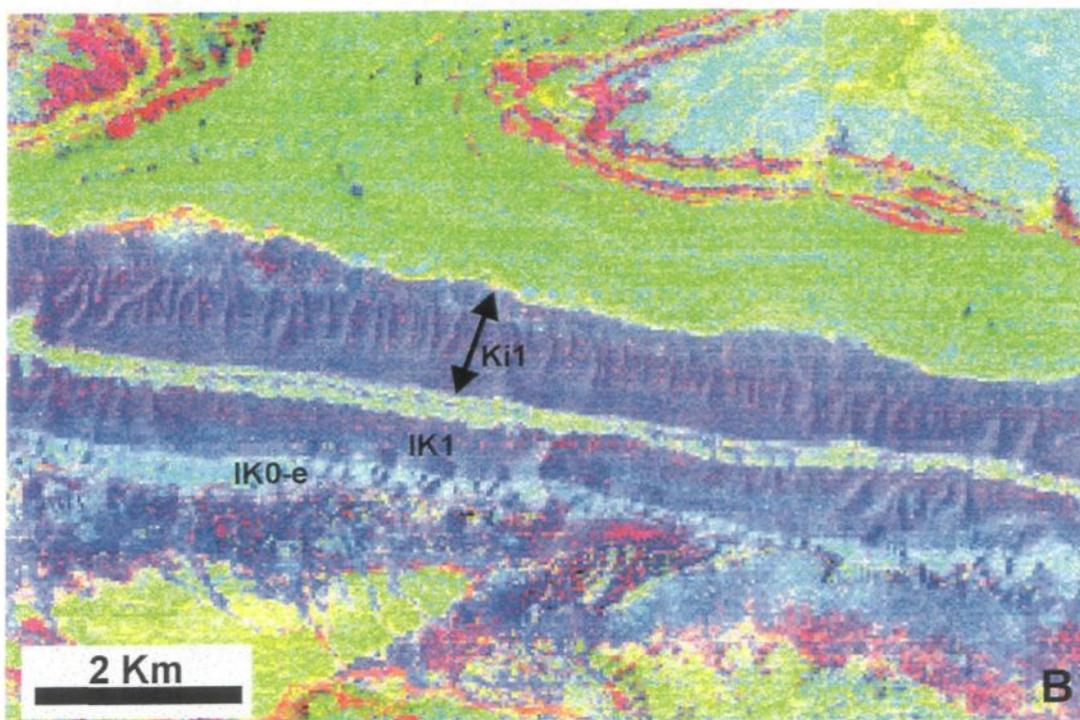
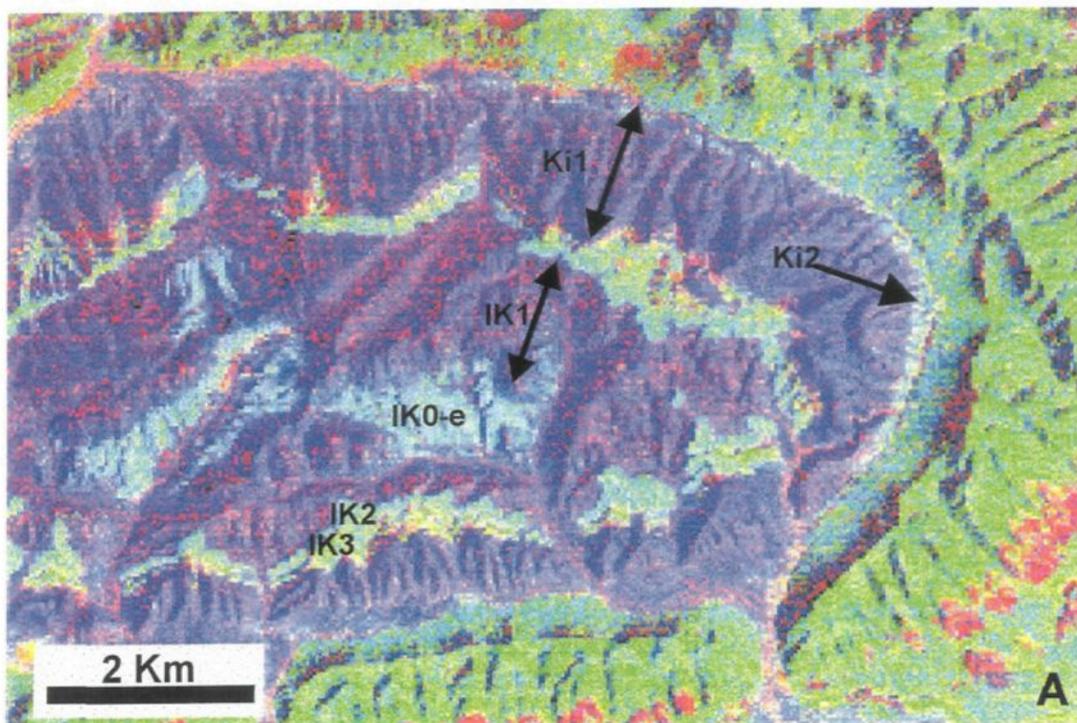


Figure 33: Sous-images CRDL montrant les calcaires dolomitiques Ki1 et les grès Ki2. L'unité Ki2 est à peine visible sur (A), indistinguable sur (B).

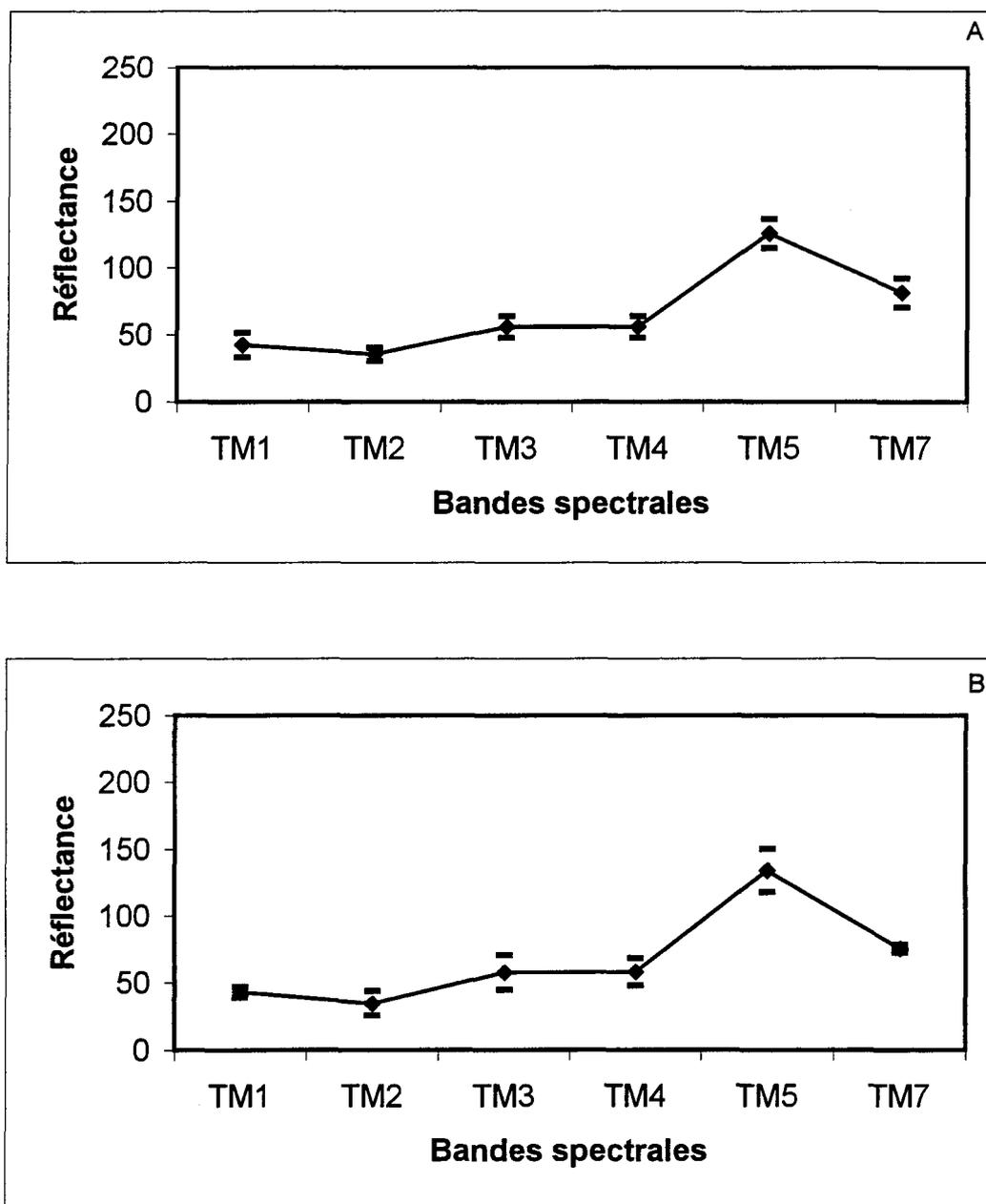


Figure 34: Spectres de réflectance des calcaires: Ki1 (A) et des grès: Ki2 (B) géorgiens.

Le rapport 5/7 a été utilisé pour faire ressortir les carbonates dans des tons brillants dans le désert égyptien par Sultan et al. (1988), alors que selon Escadafal et Pouget (1987), qui ont travaillé sur les terrains arides de la Tunisie, les surfaces à dominantes calcaires devraient avoir une luminance faible à moyenne dans le visible et moyenne dans le canal 7. Effectivement, ces traitements ont été testés sur les calcaires dolomitiques géorgiens (Ki1). Les résultats obtenus sont conformes à ceux de Sultan et al. (1988) et de Escadafal et Pouget (1987). De plus, la composition CP2, CP3, CP4 de Sabins (1987) différencie les carbonates IK1 et Ki1 (Figure 35). Donc, ces méthodes permettent la distinction des calcaires dolomitiques géorgiens de la zone d'étude (Figure 35).

Des variations de couleurs de Ki1 ont été constatées sur l'image CRDL. En effet, ces changements se manifestent surtout par l'intensité de couleur variant de mauve au sud-ouest à violet intense au nord de la boutonnière de Bou-Azzer, suggérant un changement de composition (Figure 36). Cependant, il n'existe pas de travaux dans la littérature qui documentent ces changements de composition au sein de cette unité. En outre, les dolomies infra-cambriennes (IK1) se caractérisent sur l'image CRDL par une couleur violet plus foncé que celle des calcaires dolomitiques du Cambrien inférieur (Ki1). La différence dans l'intensité du violet de cette unité par rapport aux dolomites infra-cambriennes pourrait être due à la quantité de dolomite. Donc plus la couleur violet de l'unité Ki1 est marquée, plus le pourcentage de dolomite est élevé et vice versa. Ceci

pourrait s'expliquer par le remplacement de la calcite par la dolomite (dolomitisation). Le degré de cette dolomitisation augmente du sud-ouest au nord de la zone d'étude.

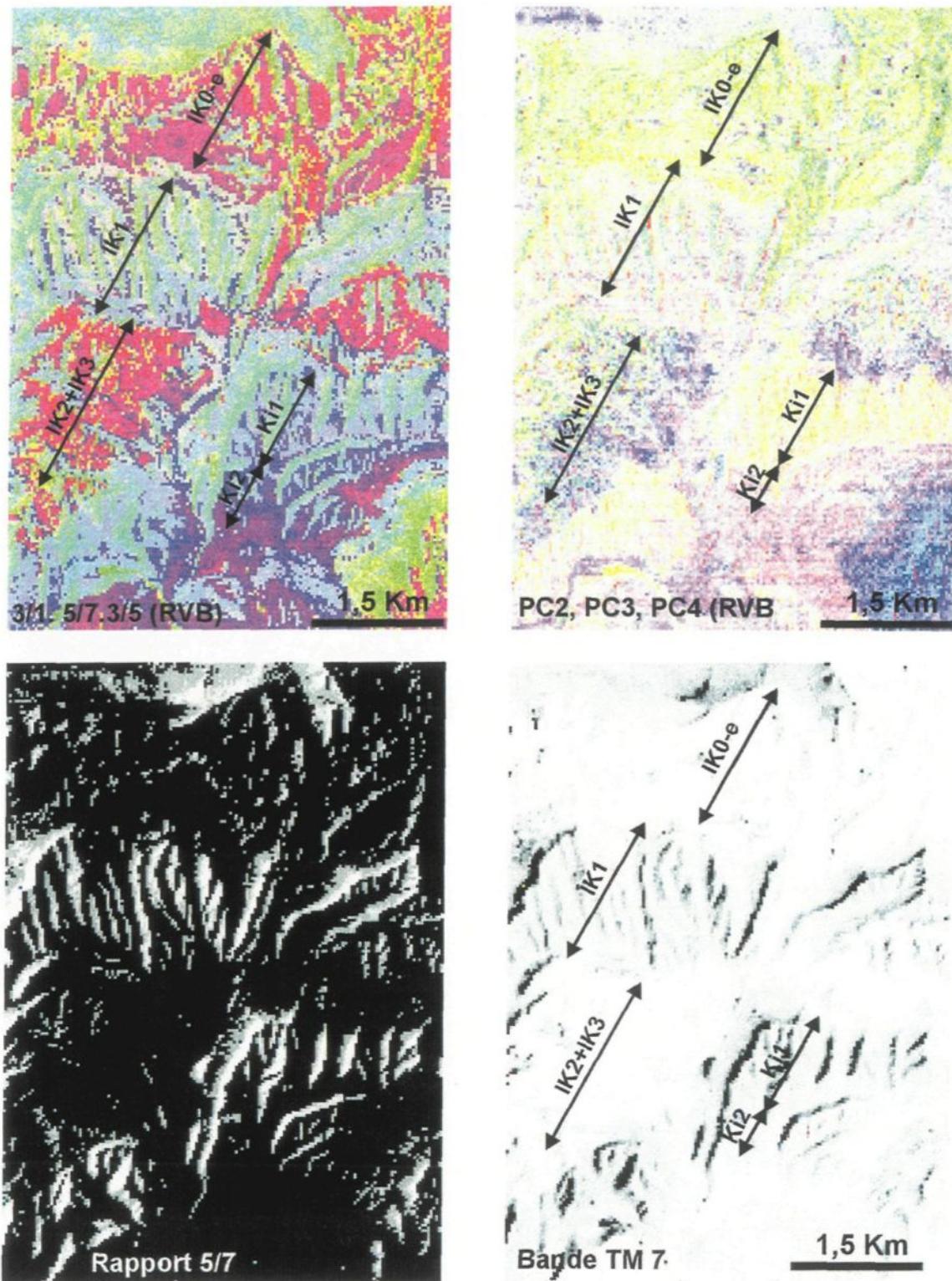


Figure 35: Application de traitements existants sur les calcaires dolomitiques Ki1 et les grès Ki2 géorgiens de la zone d'étude.

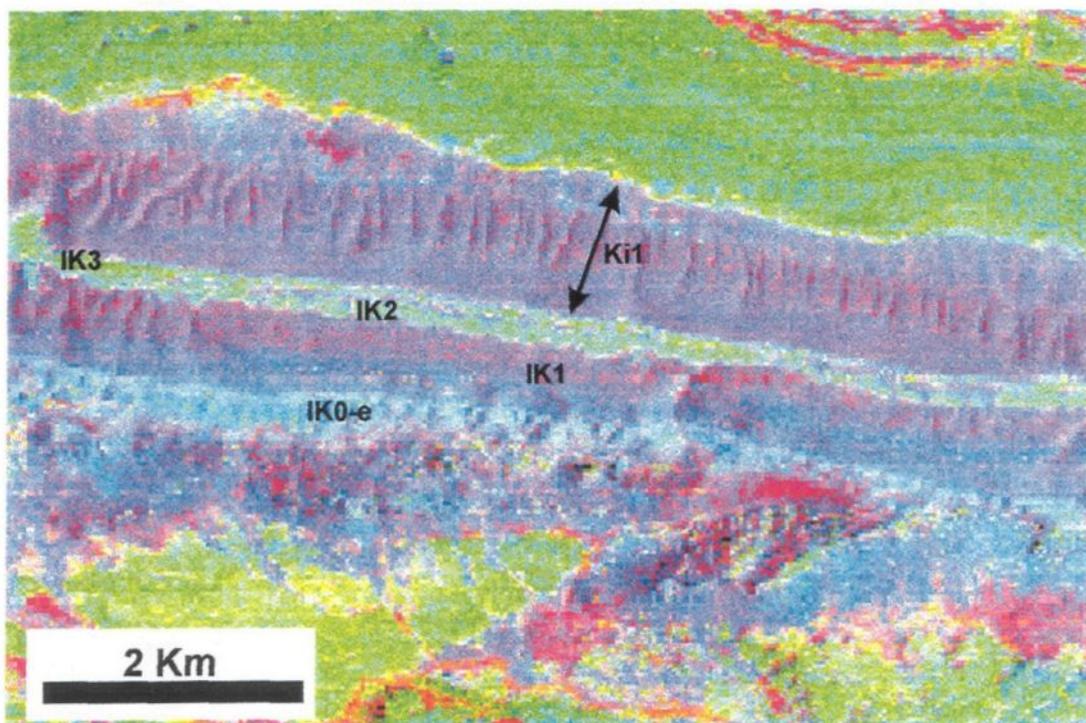
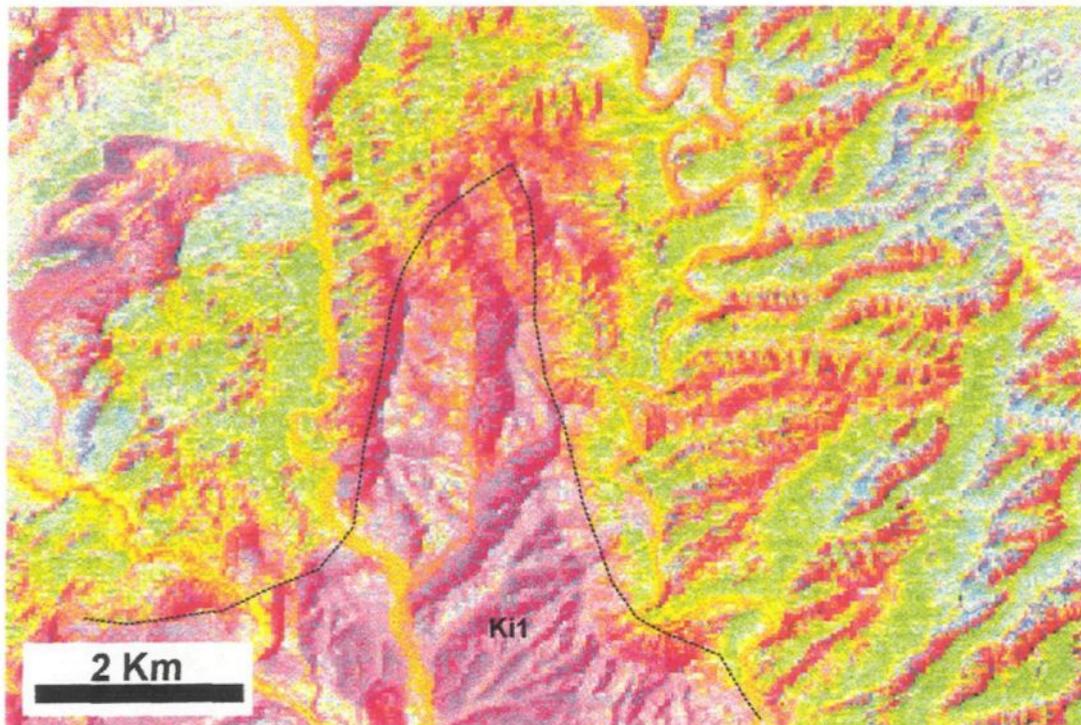


Figure 36: Changements dans l'intensité du violet des calcaires IKi1: claire au sud-ouest (A) et foncée au nord-est (B) de la région étudiée.

**La deuxième unité (Ki2)** correspond généralement à une dépression, à une vallée plus ou moins marquée entre Ki1 et Km1. Ce n'est que du côté Ki1 de la vallée que Ki2 est visible, Ki2 en affleurement, ailleurs il est couvert par des sédiments plus récents. Là où il est visible, Ki2 se présente comme un mince banc en bordure du relief formé par Ki1 et découpé en facettes triangulaires par le ravinement établi dans ce dernier. Sa couleur dans la CRDL est alors vert bleuté pâle (Figure 33). L'unité n'est pas visible partout, elle est soit masquée, soit discontinue. Le bas relief, la minceur et la discontinuité de l'unité Ki2 n'en font pas une source abondante de sédiments, alors, la couleur des sédiments qui la couvre reflète beaucoup plus l'unité Ki1 qui forme la crête en bordure de la vallée. La figure 34 illustre les caractéristiques spectrales de cette unité.

La compilation des observations, des données de l'image originale, de l'image CRDL et des coupes schématiques à travers la carte topographique de la région d'étude, indiquent que Ki2 correspond à une unité qui se caractérise par une certaine dureté à la base et une facilité de l'érosion au sommet. En effet, ces observations coïncident bien avec les vérités terrain de l'ONAREP (1991), Ducrot et Lancelot (1977) et Benziane et al. (1988) qui indiquent qu'il s'agit d'une unité gréseuse à la base qui devient schisteuse au sommet. Le rapport 5/7 de Sultan (1988) et les compositions 3/1, 5/1, 3/5 (RVB) et PC1, PC2, PC4 (RVB) de Sabins (1987) donnent des résultats non conformes avec ce qui était

trouvé par ces auteurs (Figure 35). Ceci indique que ces traitements ne permettent pas la confirmation de la discrimination des grès et des schistes géorgiens de la zone d'étude.

En résumé, le Géorgien, carbonaté à la base, passe au sommet à une série gréseuse et schisteuse de couleur générale vert blanc sur l'image CRDL. Le niveau inférieur du Géorgien de teinte mauve à violet correspond à des calcaires dolomitiques. Il se distingue des dolomies infra-cambriennes par l'intensité de la teinte violet. Cette dernière est en fonction du degré de la dolomitisation. La CRDL permet de reconnaître le degré de dolomitisation d'un carbonate; c'est à dire une contribution de ce mémoire qui ajoute une nouvelle méthode à celles déjà existantes. Les unités géorgiennes ont un intérêt pour le pétrole d'où l'importance de leur discrimination.

#### **4.1.3- Discrimination et identification des unités du Cambrien moyen**

Le Cambrien moyen (Acadien) surmonte le Géorgien par l'intermédiaire de formations alluvionnaires, il s'en distingue cependant sur l'image CRDL par sa couleur généralement à prédominance verte dans la partie inférieure, bleu clair vers le haut, son aspect plus fracturé et les reliefs qu'il forme. Le Cambrien moyen a été subdivisé en 4 unités de caractéristiques spectro-géomorphologiques mais l'aspect de la séquence change latéralement d'un endroit à un autre.

**La première unité (Km1)** de couleur verte sur l'image CRDL est juxtaposée à Ki2 et est largement masquée par des sédiments plus récents au fond de la vallée qui sépare les dolomies de couleur mauve à violet de Ki1 de l'unité verdâtre Km2 (Figure 37). Cette unité semble être discontinue par endroits. Elle présente la caractéristique spectrale suivante: les valeurs radiométriques sont faibles dans le visible et la bande 4 et élevées dans l'infrarouge moyen (Figure 38).

**La troisième unité (Km3)** présente généralement les mêmes caractéristiques spectro-morphologiques que Km1. Elle n'apparaît pas facilement partout sur l'image CRDL et surtout au sud de la boutonnière de Bou-Azzer (Figure 40). Elle forme avec Km1 une bande continue de teinte vert intense qui caractérise la séquence du Cambrien moyen du côté nord de la boutonnière de Bou-Azzer au contact avec le liseré plus pâle des unités en violet du Cambrien inférieur. Cette bande se poursuit vers Bou-Azzer à l'ouest

sud-ouest le long de la trace axiale synclinale et lance deux bras vers le nord-est des côtés de l'extrémité sud-ouest du Jbel Bou El Baroud où elle apparaît légèrement rubanée. Un rubanement rouge parallèle aux contacts apparaît dans la partie supérieure de la bande, et une masse de couleur semblable forme l'extrémité sud-ouest du Jbel Bou El Baroud entre le Cambrien moyen et le Cambrien inférieur (Figure 37). Les caractéristiques spectrales de Km3 sont illustrées dans la figure 38.

Les données de terrain de l'ONAREP (1991) et Ducrot et Lancelot (1977) et les travaux de terrains du BRPM (1961a, 1961b et 1962), identifient Km1 et Km3 comme des schistes. L'unité Km1 constitue ce qu'on appelle la formation des schistes verts à paroxides alors que l'unité Km3 forme ce qu'on appelle la formation des schistes verts supérieurs et dont la limite supérieure est assez floue avec un passage graduel à Km4 (BRPM 1961a, 1961b). Ce passage graduel peut expliquer la difficulté d'identifier cette unité au sud de la boutonnière de Bou-Azzer. Les discontinuités latérales de ces unités suggèrent des variations latérales probablement de composition et/ou de texture

Les caractères particuliers de ces unités, du côté nord de la boutonnière de Bou-Azzer, reflètent peut-être une épaisseur plus grande des unités schisteuses Km1 et Km3 et la disparition en biseau du Km2 au nord de Bou-Azzer où les reliefs sont complètement différents aussi bien pour Km1 et Km3, que pour l'unité Km2. En même temps, le sommet de l'unité Km3 développe un rubanement avec une autre composition de sédiment qui

apparaît en rouge assez continu dans la CRDL. Cette unité particulière, formée par un doublet rouge, n'est pas décrite dans la littérature. Donc c'est une unité que la télédétection a mise en évidence et qui reste à identifier sur le terrain. De plus, la masse rouge dans la fermeture du dôme structural au sud-ouest du Jbel Bou El Baroud, ne figure pas sur la carte géologique existante. Elle présente une couleur et une texture semblables à celles des trachytes du sud de la boutonnière de Bou-Azzer. Cependant, elles ont des positions stratigraphiques différentes. Cette unité nécessite des vérifications sur le terrain.

Des traitements pour la discrimination des schistes dans des régions semblables ont été testés sur la première et la troisième unité du Cambrien moyen. Il s'agit des compositions 3/1, 5/7, 3/5 (RVB) et PC2, PC3, PC4 (RVB) qui devraient faire ressortir les schistes respectivement dans les teintes bleu moyen à foncé et violet bleu clair (Sabins 1987) et le rapport 5/7 dans lequel les schistes devraient être brillants (Sultan et al. 1988). La figure 39 montre que les unités Km1 et Km3 apparaissent respectivement en vert picoté de jaune et en vert avec des plages de jaune sur la composition PC2, PC3, PC4. Ces deux unités sont noires dans le rapport 5/7 et ne sont pas faciles à identifier sur la composition 3/1, 5/7, 3/5. Les couleurs des unités Km1 et Km3 ne correspondent pas dans chacune des compositions de la figure 39 avec celles trouvées par Sabins (1987) et Sultan et al. (1988).

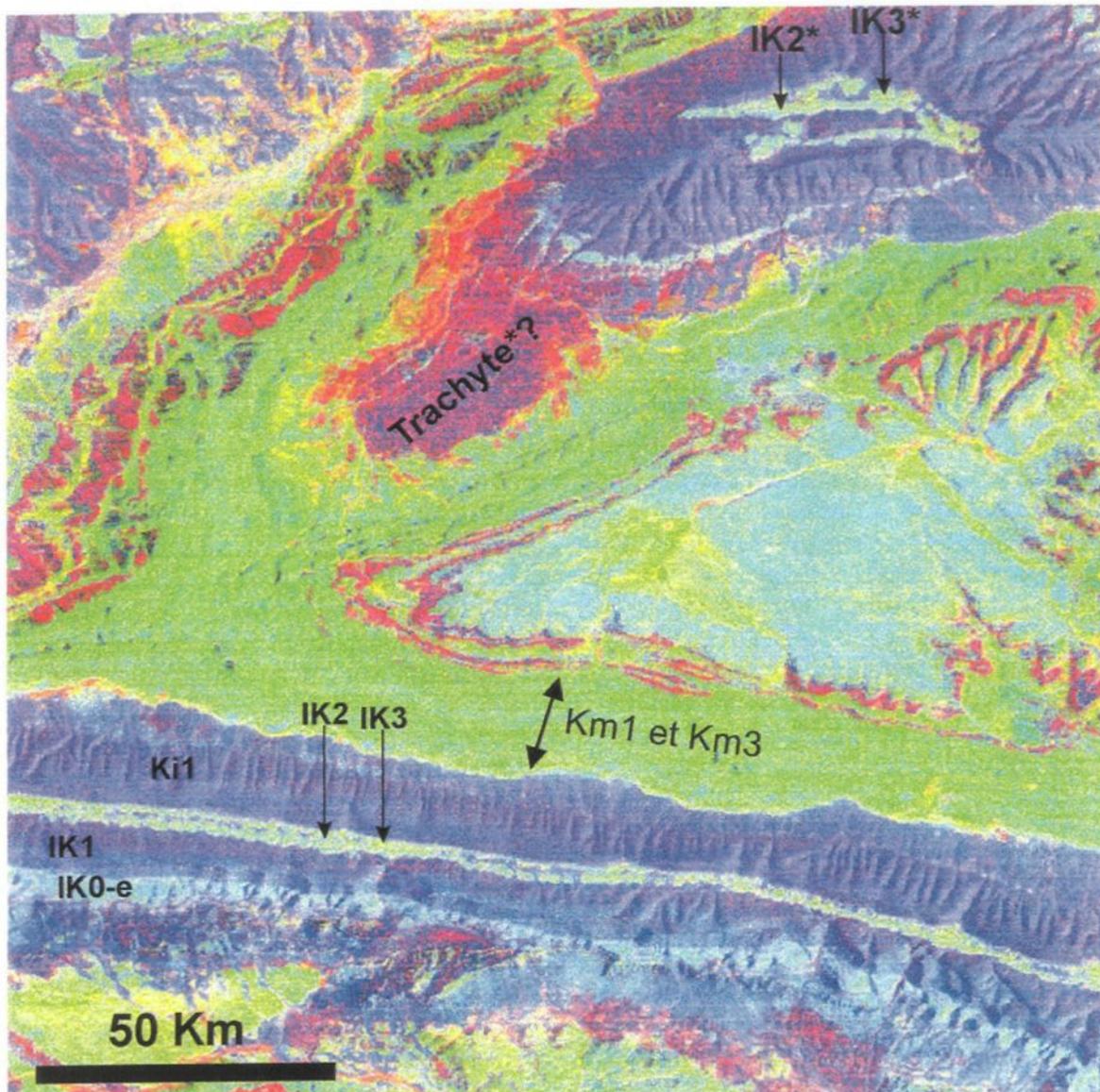


Figure 37: Couleur verte des schistes acadiens Km1 et Km3.  
L'étoile (\*): indique que les unités (IK2, IK3 et Trachyte?) ne figurent pas sur la carte géologique existante.

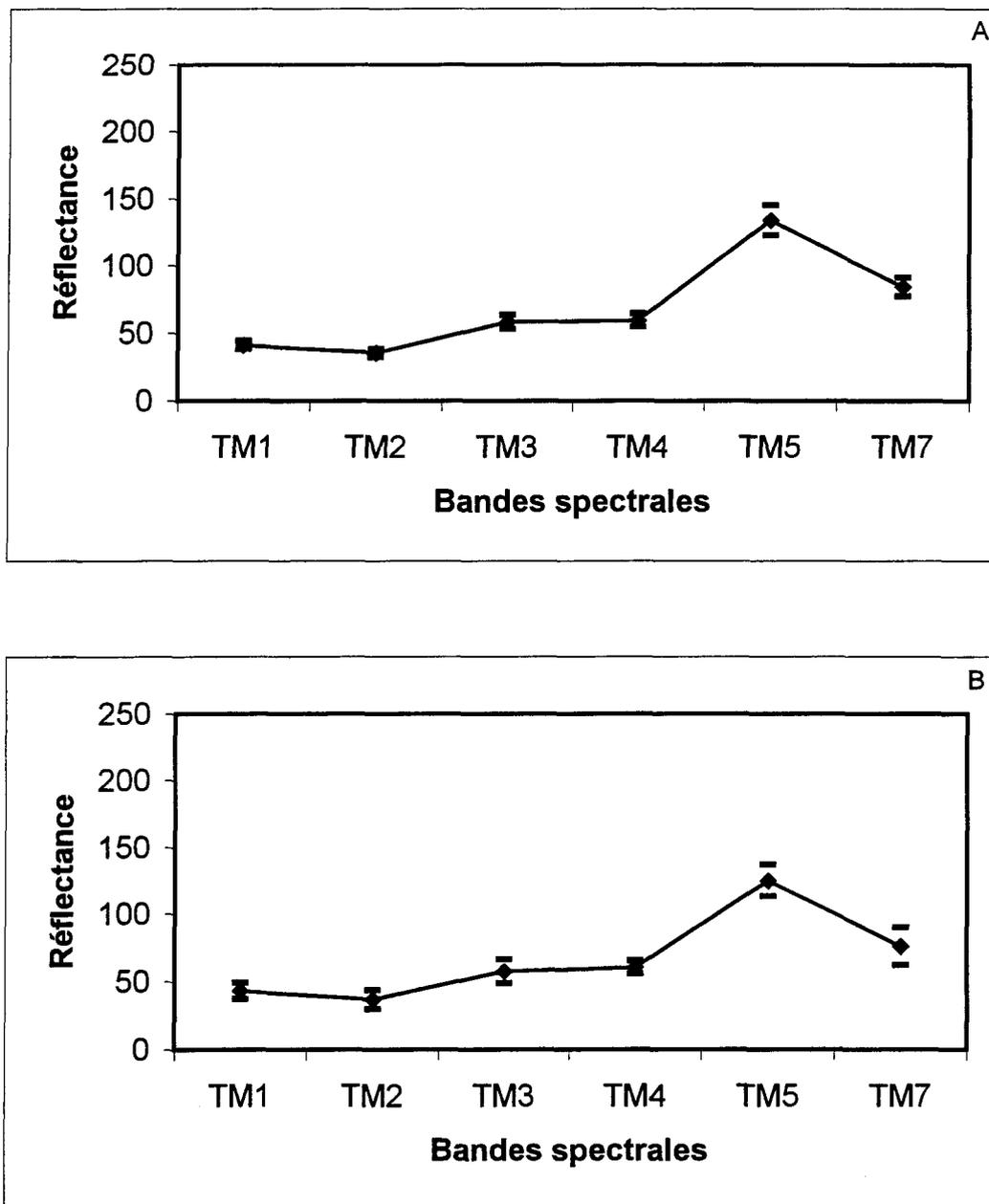
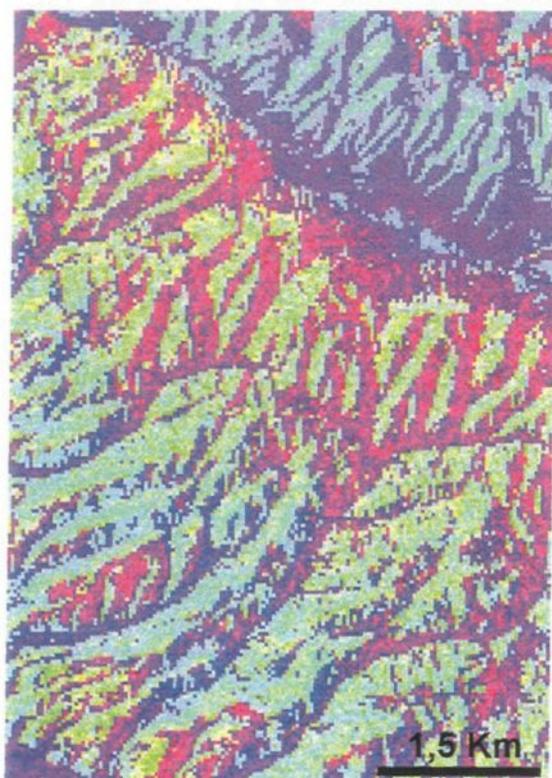
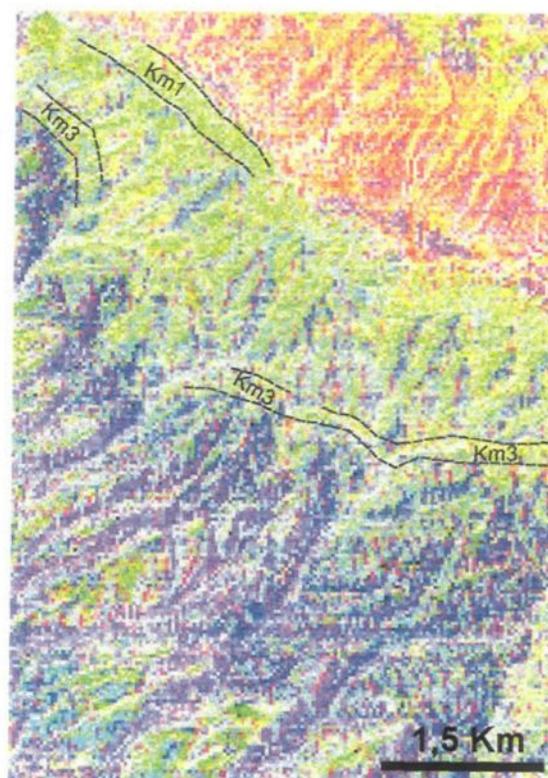


Figure 38: Spectres de réflectance des schistes acadiens: Km1 (A) et Km3 (B).



3/1,5/7,3/5 (RVB)



PC2,PC3,PC4 (RVB)



Rapport 5/7

Figure 39: Application de traitements existants sur les schistes acadiens Km1 et Km3.

**La deuxième unité (Km2)** caractérisée sur l'image CRDL par une teinte bleu vert et rouge, une texture zébrée, un relief fort qui forme des falaises et des escarpements alignés en crêtes d'orientation N-S à NNE-SSO (Figure 40). Au sud de la boutonnière de Bou-Azzer, la zone d'affleurement de cette unité s'élargit considérablement et un ravinement serré, légèrement sinueux et généralement perpendiculaire aux contacts apparaît. La présence de rouge dans les teintes associées aux lignes du drainage y permet de diviser la séquence en deux parties: inférieure (sans rouge) en vert pâle avec des fuseaux transverses violet foncé plutôt continu (Km2) et supérieure (avec rouge) en vert moyen avec des fuseaux transverses pourpre (Km2'). Le rouge, correspondant à des zones d'ombre totale sur l'image de départ, suggère des versants de ravin plus abrupts (Figure 40). Ces unités forment un plateau continu d'une altitude moyenne de 1 200 m ou une série de plateaux discontinus au sud de la boutonnière de Bou-Azzer (Figure 21). La figure 41 illustre son spectre de réflectance

L'unité Km2 se trouve à plusieurs endroits: au nord de Zagora et de la trace de l'accident de l'Anti-Atlas, au nord-est de la boutonnière de Bou-Azzer, autour du Jbel Bou El Baroud (sauf son extrémité sud-ouest), et sur le flanc nord du grand synclinal au nord d'Agdaz. Cependant, ces unités n'apparaissent pas facilement au sein de la séquence du côté sud-ouest **(a)** et sud-est de la boutonnière de Bou-Azzer **(b)** et dans le coin nord est de la carte en pochette **(c)**.

En effet, (a) au sud-ouest de la carte, l'unité est largement couverte par des sédiments plus récents, et une crête discontinue semble marquer le sommet, (b) un aspect différent caractérise la séquence du côté sud-est de la boutonnière de Bou-Azzer où des zones sombres, minces discontinues et allongées parallèlement aux contacts apparaissent et (c) dans le coin nord-est de la carte en pochette (secteur Saghro), le Cambrien moyen se présente comme une bande unique assez semblable aux bandes au sud-est de la boutonnière de Bou-Azzer (b). Cela suggère un amincissement de l'unité. Il est possible 1- de grouper ensemble les zones a), b) et c) où les couches pendent au sud-est vers la position du soleil au moment de la prise de l'image et où les stratifications internes sont plus facilement visibles avec les zones de Km2 où les couches ont une autre orientation qui met en évidence le ravinement, et 2- de distinguer la zone de bande continue verte intense (Km1 et Km3), qui présente plusieurs caractères particuliers au nord de la boutonnière de Bou-Azzer.

Les caractéristiques morphologiques et les coupes schématiques à travers ces unités (Km2 et Km2'), indiquent qu'il s'agit d'une formation difficile à éroder. En fait, il s'agit d'une même unité gréseuse (ONAREP 1991) bordée vers le bas et le haut par des unités schisteuses (Km1 et Km3). Les compositions 3/1, 5/7, 3/5 (RVB) et PC2, PC3, PC4 (RVB) donnent des résultats (Figure 42) qui sont différents de ceux obtenus par Sabins (1987). Ceci indique que les grès des unités Km2 et Km2' ont probablement une composition minéralogique différente aux grès étudiée par cet auteur.

**La quatrième unité (Km4)** se présente en bancs peu épais qui passent graduellement à une texture zébrée. C'est l'unité la plus facile à identifier par sa façade bleutée lorsque tournée vers le soleil et par ses ravins décorés de rouge (Figure 43). Son relief forme un plateau d'une altitude moyenne de 1 100 m et coupé par un ravinement escarpé et espacé au sud de la boutonnière de Bou-Azzer (Figure 21). Du côté nord de la boutonnière de Bou-Azzer, l'unité Km4 forme une masse bleu clair uniforme qui occupe un espace triangulaire entre la bande verte continue et le premier bras (Km1 et Km3) vers le nord-est (Figure 37). Le sommet de cette unité est marqué par des taches rondes de teinte violet foncé (Figure 43).

La partie supérieure du Cambrien moyen présente un faciès nettement différent. Cette différence semble être due à l'existence d'une unité (Km4). Cette unité est moins élevée que l'unité gréseuse Km2, donc plus facile à éroder. D'après la figure 42, cette unité présente une luminance moyenne dans le canal 7 et faible dans le visible (bande 3) caractérisant les surfaces à dominance quartzique (Escadafal et Pouget 1987). Effectivement, les colonnes stratigraphiques à travers la région d'étude (ONAREP 1991, Emran et al. 1988 et BRPM 1961a, 1961b et 1962) indiquent qu'il s'agit d'une unité de composition quartzique. Il faut noter aussi que cette unité présente une grande similitude de couleur avec les unités de l'Ordovicien inférieur et supérieur.

La composition PC2, PC3, PC4 de la figure 42 montre 5 zones: 1- zone mince et verte picotée de jaune, 2- verte picotée de jaune avec bandes bleues transverses, 3- zone verte avec de petites plages jaunes et plus mince que la première, 4-violet foncé en bandes transverses avec inter-bandes vertes picotées de jaune et mauve, et 5- plages de vert vif picotées de jaune et mauve séparées par des bandes violet. Les 4 premières zones pourraient correspondre respectivement à Km1, Km2, Km3 et Km4. Ce traitement semble donner des teintes différentes pour Km1, Km2 et Km3. Donc il pourrait permettre de bien distinguer les trois premières unités acadiennes et mieux que la CRDL et la carte en pochette car la couleur passe d'un vert relativement uniforme à une variété de couleur. La cinquième zone pourrait correspondre aux taches rondes qui marquent le sommet du Km4. Ces taches violet foncé semblent être locales (Figure 43). Elles pourraient correspondre à des lambeaux non érodés d'une couverture sédimentaire tardive postérieure aux plissements alpins. En absence de données dans la littérature sur ces taches de teinte violet foncé, cette hypothèse reste à vérifier.

L'absence de contacts nets visibles en télédétection suggère que ces unités acadiennes ont des compositions minéralogiques semblables et qu'elles passent graduellement de l'une à l'autre avec une abondance variable de lits schisteux et gréseux d'épaisseur inférieure à la dimension des pixels. Nous ne possédons pas des travaux de terrains ponctuels dans la zone d'étude pour vérifier cette hypothèse. Cependant, il existe d'autres travaux de terrains (BRPM 1961a, 1961b et 1962) à

l'extérieur de la zone d'étude qui font mention de ces passages graduels entre les différentes unités de l'Acadien.

En effet, dans le rapport du BRPM (1962), les caractères généraux de la série acadienne, dans la partie sud-ouest de l'Anti-Atlas central (à l'extérieur de la région étudiée), sont les suivants (citation plus au moins intégrale): «L'Acadien correspond à une série schisto-gréseuse comprenant deux alternances répétées de schiste et de grès». Ce même rapport décrit les schistes verts à paradoxides (Km1) comme suit: «Cette série débute par un niveau de grès fin, elle se poursuit par une série d'argilite et silstone lité et de grès très fin». À partir de cet aperçu, nous pouvons conclure que l'hypothèse, sur le passage graduelle entre les unités acadiennes, est plus au moins vérifiée.

En résumé, l'aspect de la séquence acadienne change latéralement d'un endroit à un autre. Les unités du Cambrien moyen sont généralement dans les teintes vert et demeurent difficiles à distinguer l'une de l'autre, sauf le Km4. Elles correspondent à des schistes (Km1 et Km3) et des grès (Km2). Le niveau supérieur de l'Acadien (Km4) est bien discriminé sur l'image CRDL grâce à sa couleur spécifique bleue. Il s'agit d'une masse homogène de quartzite. Les quatre unités acadiennes ont un intérêt pétrolier particulier comme éventuels réservoirs (Km2 et Km4) et couvertures possibles (Km1 et Km3). L'analyse des unités acadiennes soulève le problème de la continuité latérale de ces unités, continuité qui va être discutée dans un contexte de roches réservoirs et de roches couvertures plus loin dans le mémoire.

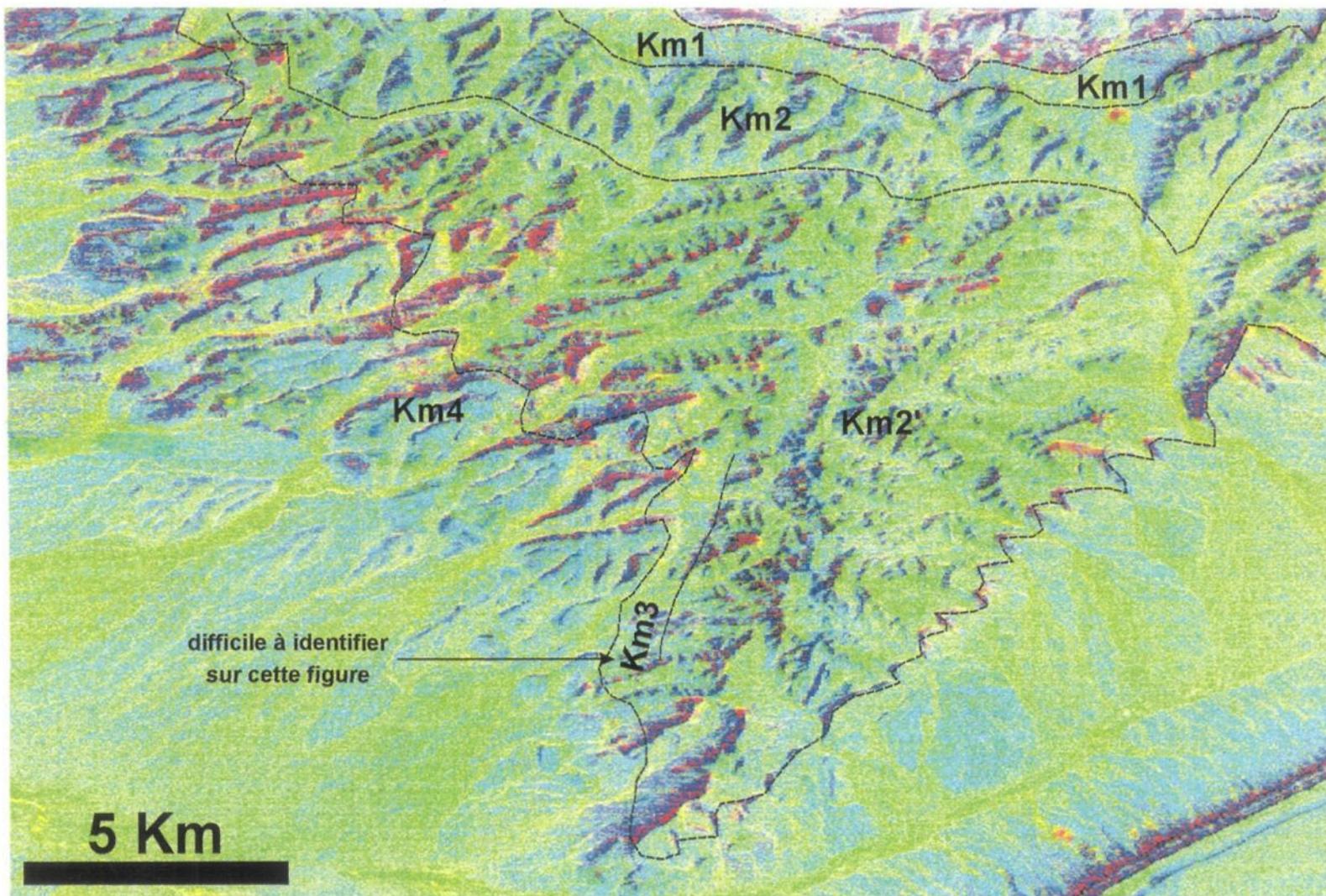


Figure 40: Organisation en crête de l'unité Km2 de l'Acadien.

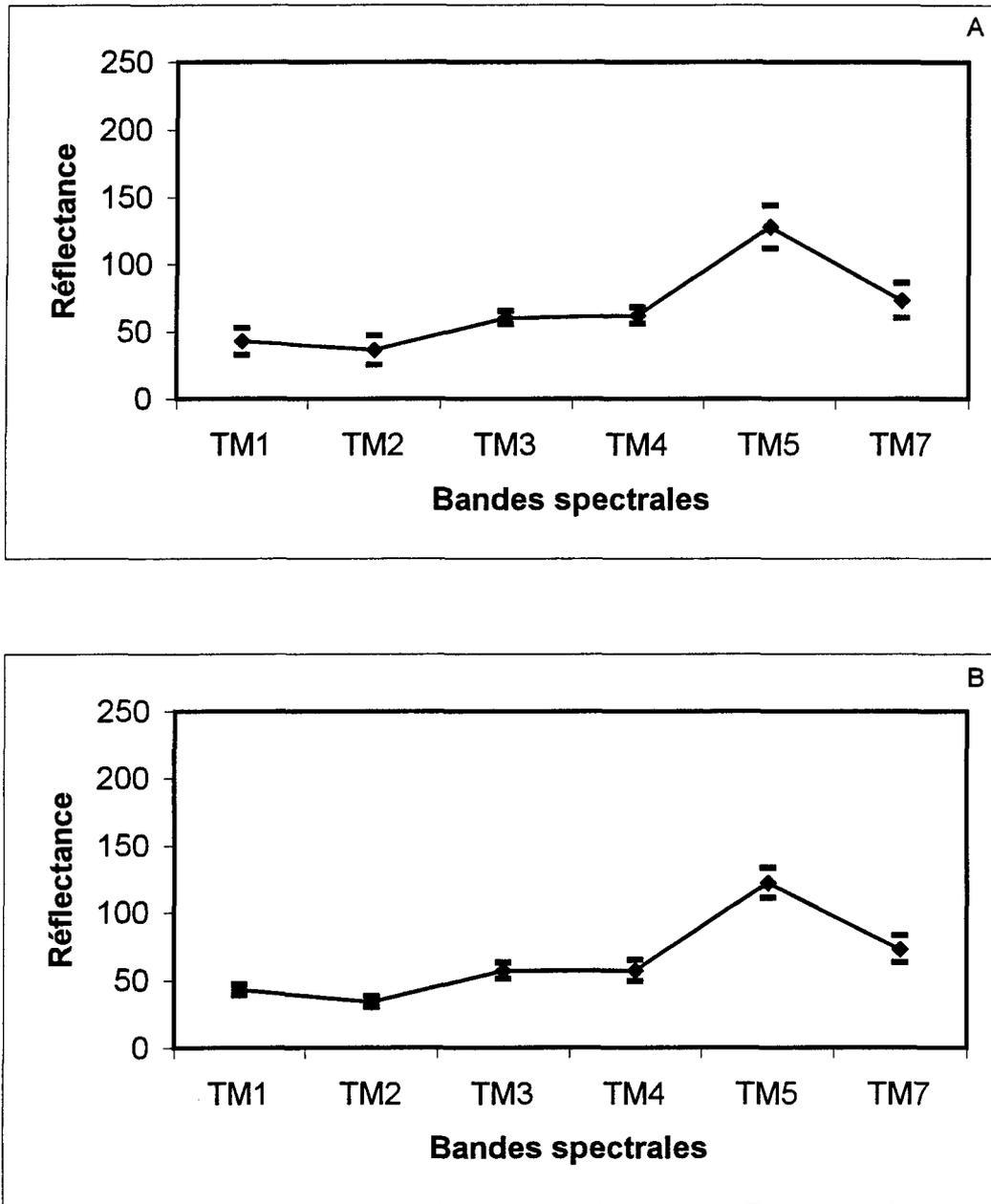


Figure 41: Spectres de réflectance des grès et des quartzites: Km2 (A) et Km4 (B).

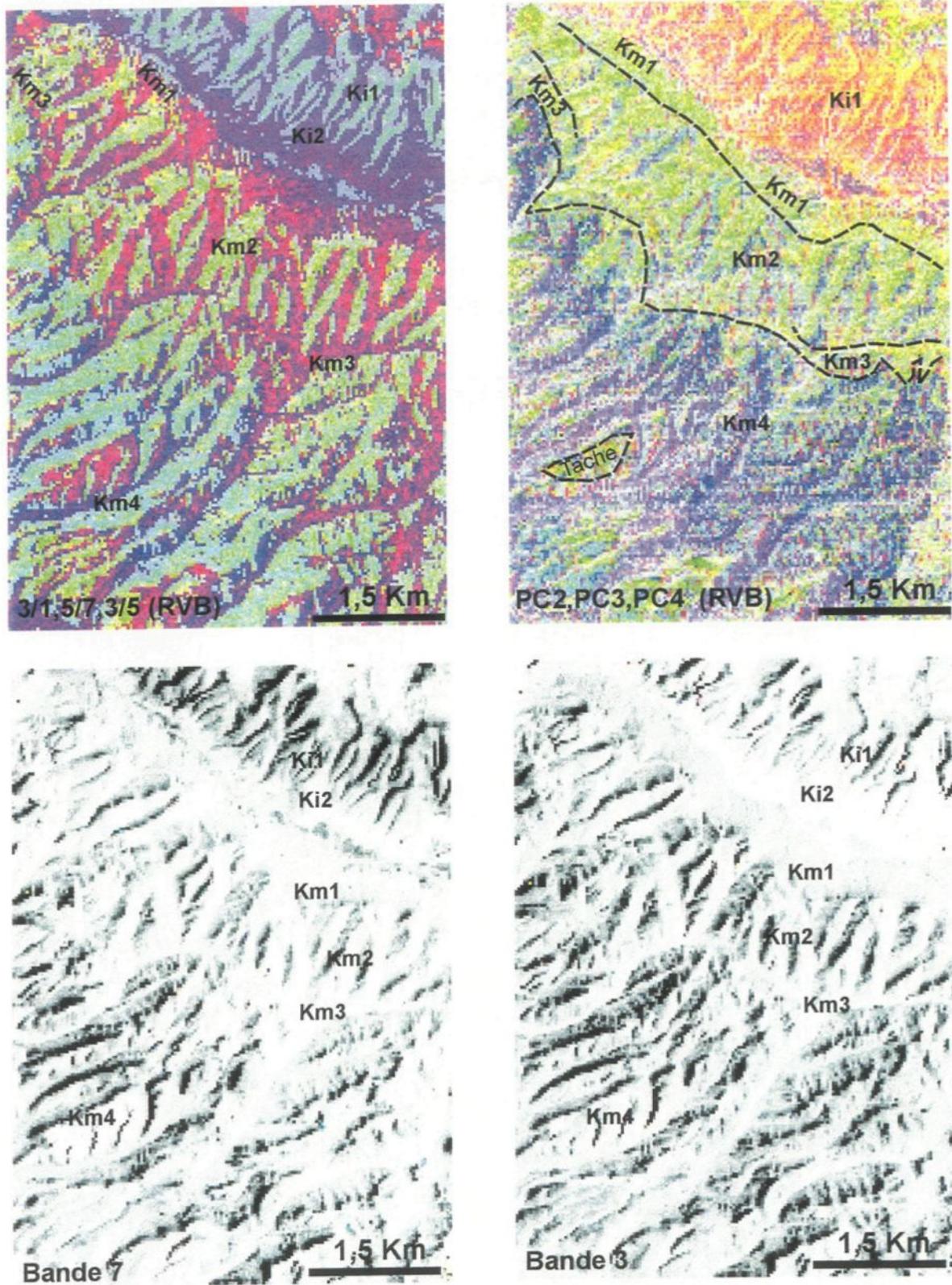


Figure 42: Application de traitements existants sur les grès Km2, les schistes Km1 et Km3 et les quartzites Km4 du Cambrien moyen.

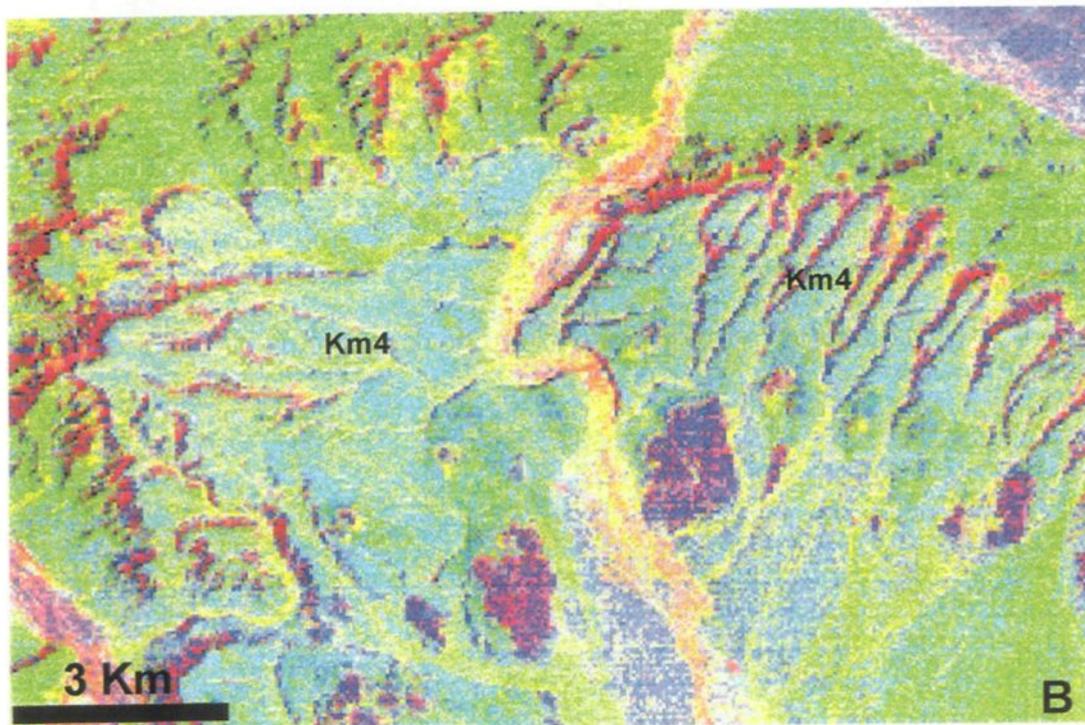
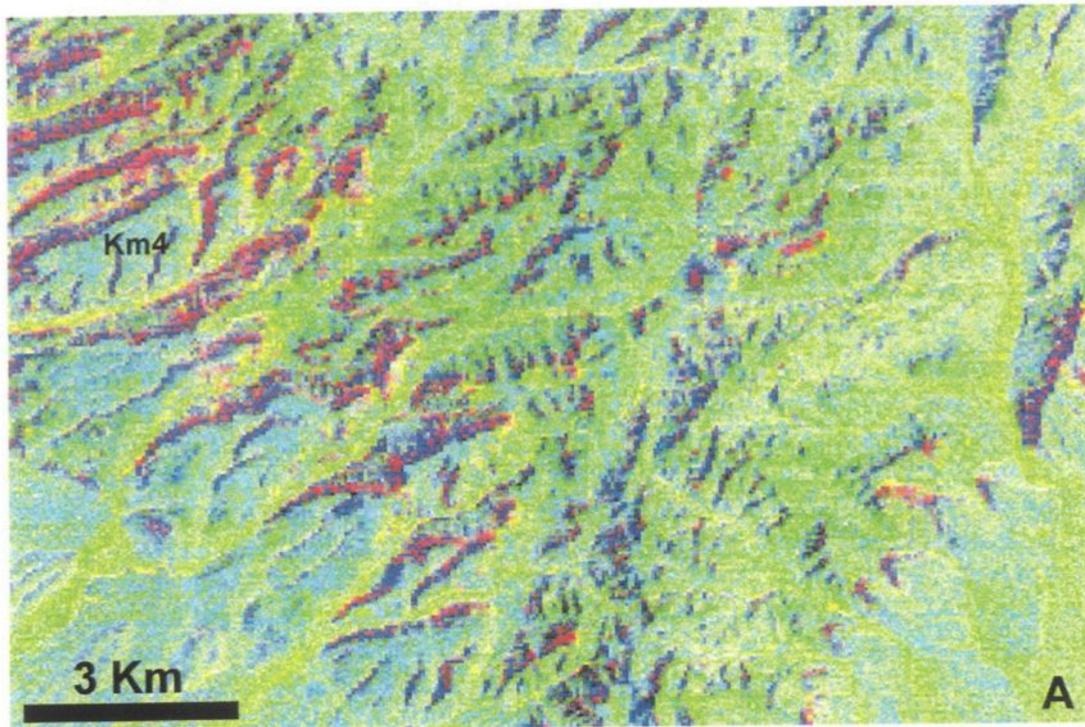


Figure 43: Quartzites Km4 du Cambrien moyen de la zone d'étude.

#### **4.1.4- Discrimination et identification des unités de l'Ordovicien**

L'Ordovicien forme le relief majeur du Jbel Bani. Il correspond au "monoclinal Bani" de la littérature à pendage au sud sud-est. En réalité, il est affecté par des plissements de second ordre. Il est caractérisé sur l'image CRDL par une teinte bleu moyen à foncé. Il est largement présent dans la partie sud de l'image. Sa limite inférieure est masquée par un recouvrement sableux localement abondant. Sa limite supérieure correspond à un contact avec le Silurien. L'Ordovicien a été subdivisé en six unités. Ces six unités sont regroupées dans deux grands ensembles soit l'Ordovicien inférieur (O1, O2 et O3) et l'Ordovicien supérieur (O4, O5 et O6).

##### **A- L'Ordovicien inférieur**

**La première unité (O1)** est représentée par une teinte bleu clair sur l'image CRDL, par un réseau de drainage tressé, un ravinement serré, une texture noduleuse (Figure 44). L'unité O1 est caractérisée aussi par la présence de filets jaunes sur le glacis (Figure 44). Elle présente la caractéristique spectrale suivante: des valeurs faibles dans le visible et le proche infrarouge et moyennes à élevées dans l'infrarouge moyen (Figure 45).

**La deuxième unité (O2)** présente la même tendance spectrale que O1 (Figure 45). Elle est en contact avec la première par l'intermédiaire d'une ligne discontinue de collines. Elle est caractérisée sur l'image CRDL par une couleur bleu clair, un ravinement serré, un faible rubanement interne et par la présence d'un filet jaune sur les glacis. L'épaisseur de cette unité diminue et devient indistinguable de la première vers l'est (Figure 44).

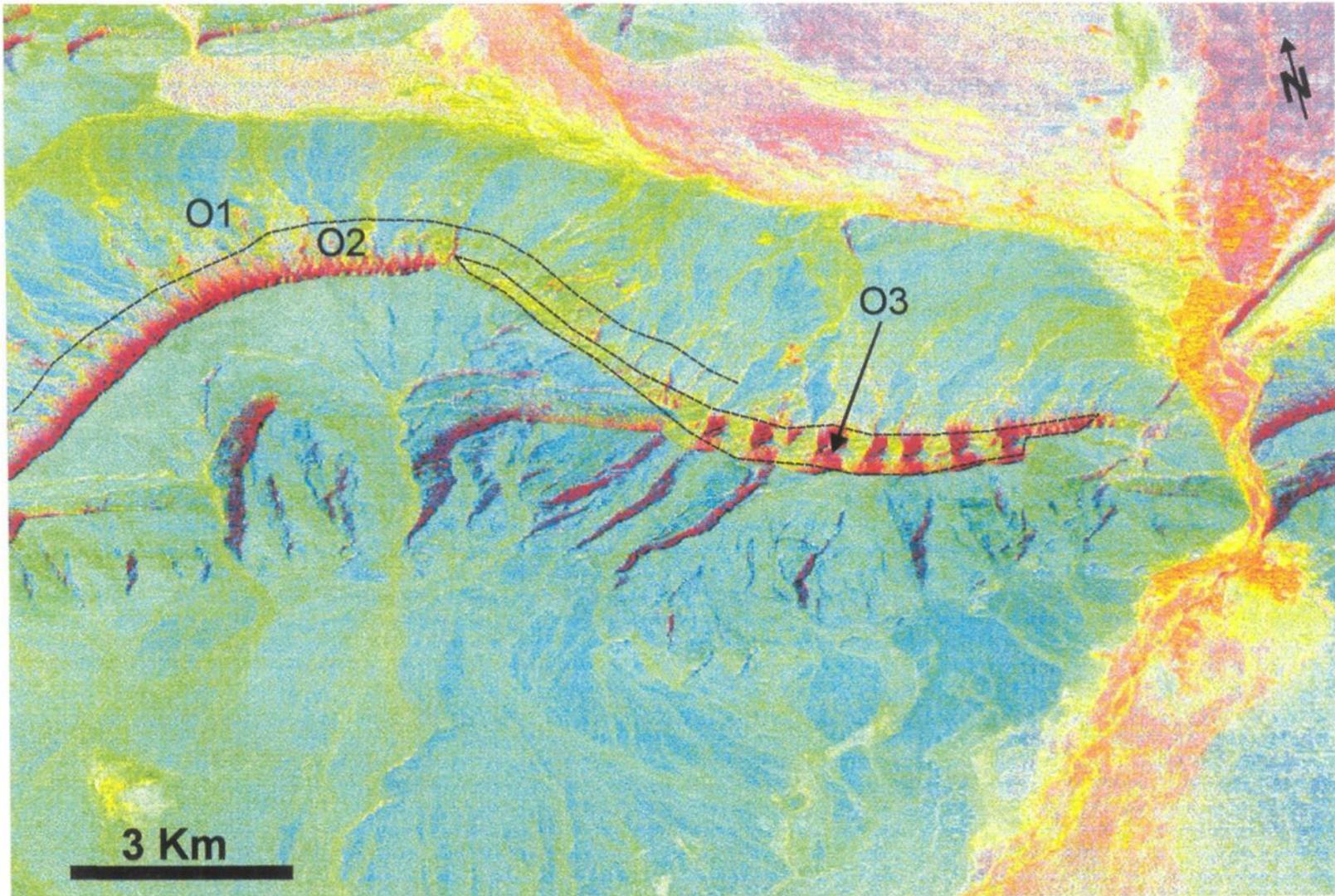


Figure 44: Unités schisteuses O1 et O2 de l'Ordovicien inférieur du Jbel Bani.

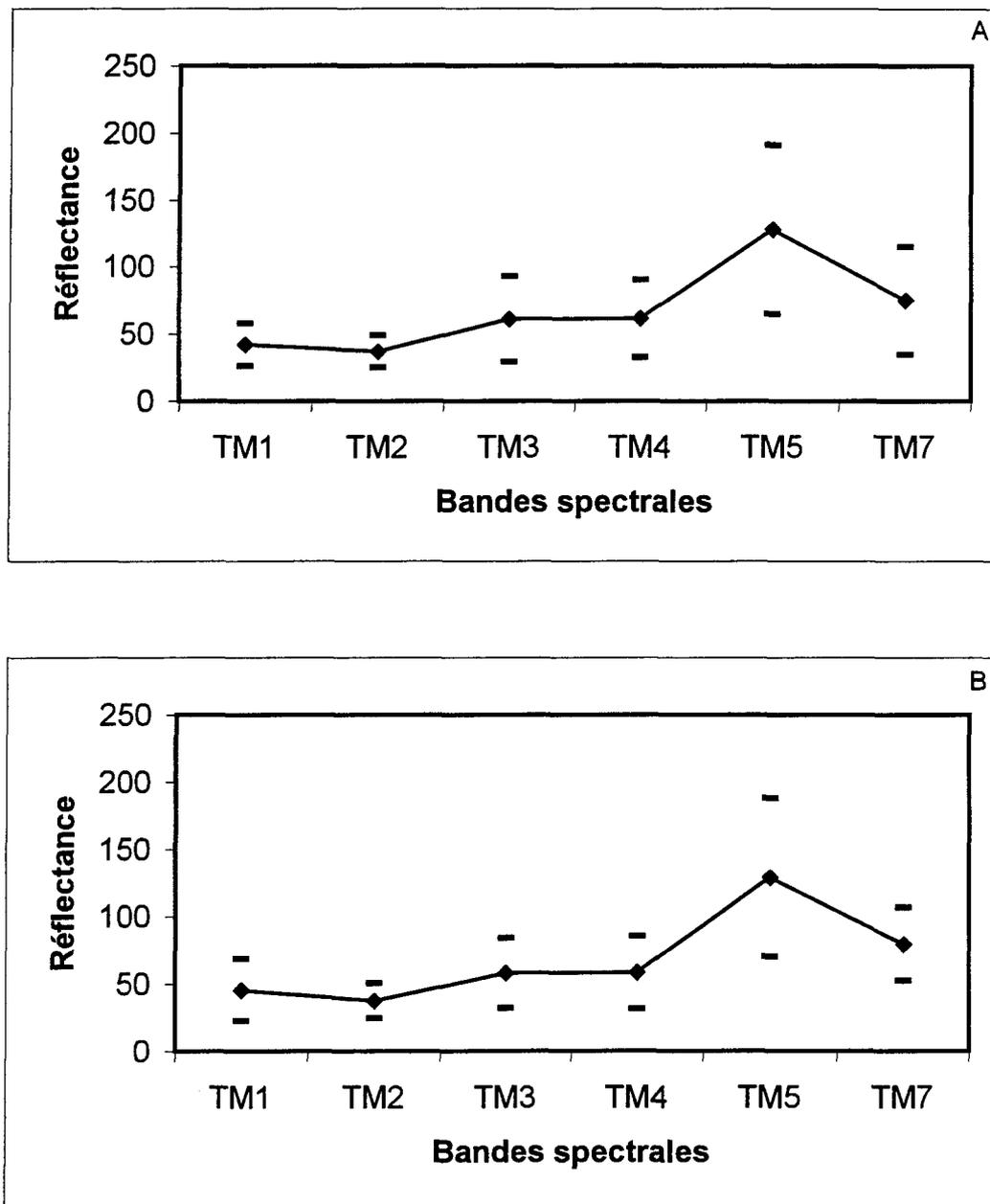


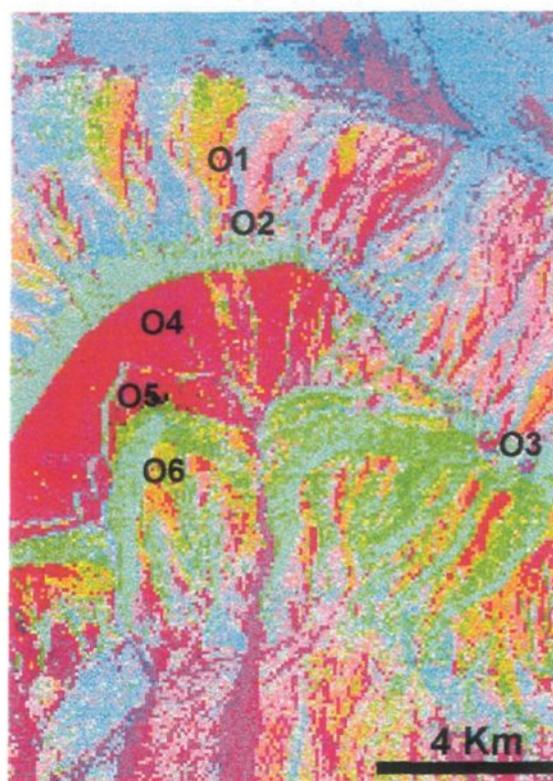
Figure 45: Spectres de réflectance des schistes de l'Ordovicien inférieur: O1 (A) et O2 (B).

La première et la deuxième unité (O1 et O2) se caractérisent par une quasi-absence de niveaux repères et par un relief bas formant un talus peu incliné plus ou moins couvert par des cônes d'alluvions. Elles constituent une vaste vallée régionale (Oued El Faija) recouverte par des formations alluvionnaires. Ses caractéristiques morphologiques et son aspect du relief, indiquent que O1 et O2 se caractérisent par une facilité de l'érosion. Effectivement, d'après les travaux de l'ONAREP (1991), et Emran et al. (1988), les deux premières unités de l'Ordovicien correspondent à des schistes qui forment la série des Feïjas externes de la littérature constituant l'Ordovicien inférieur.

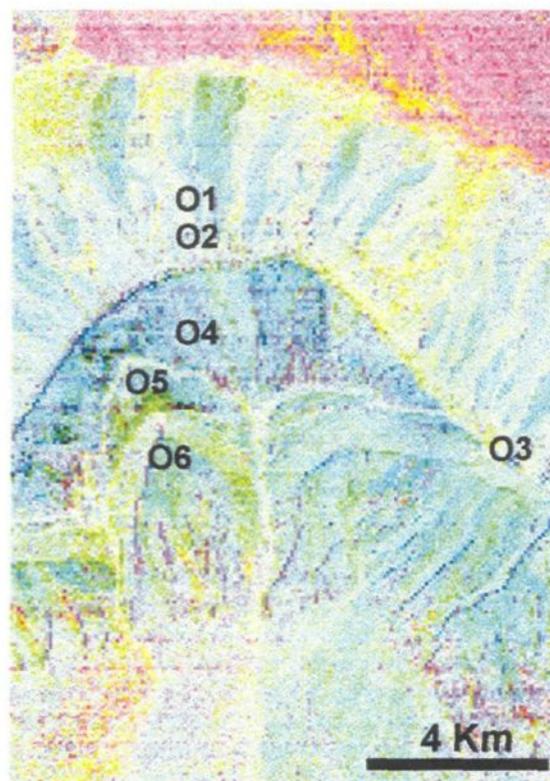
Les traitements de Sabins (1987) et le rapport 5/7 de Sultan et al. (1988) visant à discriminer les schistes ont été appliqués à O1 et O2. En effet, les compositions 3/1, 5/7, 3/5 (RVB), PC2, PC3, PC4 (RVB) de Sabins (1987) et le rapport 5/7 de Sultan et al. (1988) font ressortir les schistes de l'Ordovicien inférieur respectivement en bleu moyen à foncé, violet bleu clair et dans des tons brillants (Figure 46). Ces résultats sont similaires à ceux trouvés dans le désert de l'Égypte et dans le Wyoming respectivement par Sultan et al. (1988) et Sabins (1987). Donc les schistes des unités O1 et O2 ont probablement une composition semblable aux grès étudiés par ces auteurs. De plus la composition 3/1, 5/7, 3/5 permet de mettre en évidence plusieurs cônes d'alluvions de composition différente sur la pente (Figure 46). La distribution de ces cônes permet un estimé de la couverture de sédiments sur les unités sous-jacentes.

La composition PC2, PC3, PC4 montre un fort contraste de couleur entre le talus et les sables du fond de la vallée, ici encore suggérant une couverture assez mince pour ne pas masquer les caractéristiques spectrales des unités sous-jacentes (Figure 46). Si le relief du Jbel Bani a survécu à des millions d'érosion, c'est que l'érosion n'y est pas très active et que les blocs qui en proviennent ne sont probablement pas très nombreux, pas assez pour masquer la signature spectrale des roches sous le talus. Ces dernières peuvent aussi contribuer à la formation de la couverture de sédiments. À long terme, la pente d'équilibre du talus correspond à l'angle de repos du matériel qui la couvre dans le climat ambiant.

Donc ces traitements confirment la discrimination des schistes de l'Ordovicien inférieur de la zone d'étude et apportent des détails complémentaires sur les caractéristiques morphologiques de ces unités.



3/1,5/7,3/5 (RVB)



PC2,PC3,PC4 (RVB)



Rapport 5/7

Figure 46: Application de traitements existants sur les unités de l'Ordovicien inférieur O1, O2 et O3 et supérieur O4, O5 et O6.

**La troisième unité (O3)** forme le pied de l'escarpement, elle est représentée sur l'image CRDL par une couleur jaune et rouge, un petit relief au sein de la crête régionale de Jbel Bani, un ravinement profond et espacé, et une texture filamenteuse. Elle est marquée par un contraste lumineux très net. Cette unité finit par disparaître en formant un biseau (Figure 44). Elle montre des valeurs spectrales faibles à moyennes dans le visible et le canal TM4 et élevées dans le TM5 et 7 (Figure 47).

L'image a permis d'identifier cette unité de couleur jaune et rouge pour la première fois alors qu'elle n'est pas individualisée sur la carte géologique existante de Saadi et al. (1985), mais sa signature spectrale différente permet de la distinguer clairement. Dans la partie nord-est de l'image CRDL, zone dominée par les roches volcaniques tardi-précambriennes à la base de la séquence de couverture étudiée, nous avons constaté la présence d'un lambeau d'orientation est-ouest d'âge Ordovicien inférieur selon la carte existante et de couleur jaune verte claire sur l'image CRDL qui rappelle O3 et probablement de composition lithologique semblable (Figure 47). L'absence de vérité terrain, ses caractéristiques spectrales et géomorphologiques totalement différentes de celles des premières unités, son relief intermédiaire entre l'Ordovicien inférieur et supérieur et son extension radiométrique limitée rendent l'interprétation difficile de cette unité. Toutefois, d'après sa signature morphologique, il serait probable qu'il s'agisse d'une composition intermédiaire entre les grès et les schistes. Toutefois une vérification sur le terrain s'impose pour déterminer la nature exacte de O3.

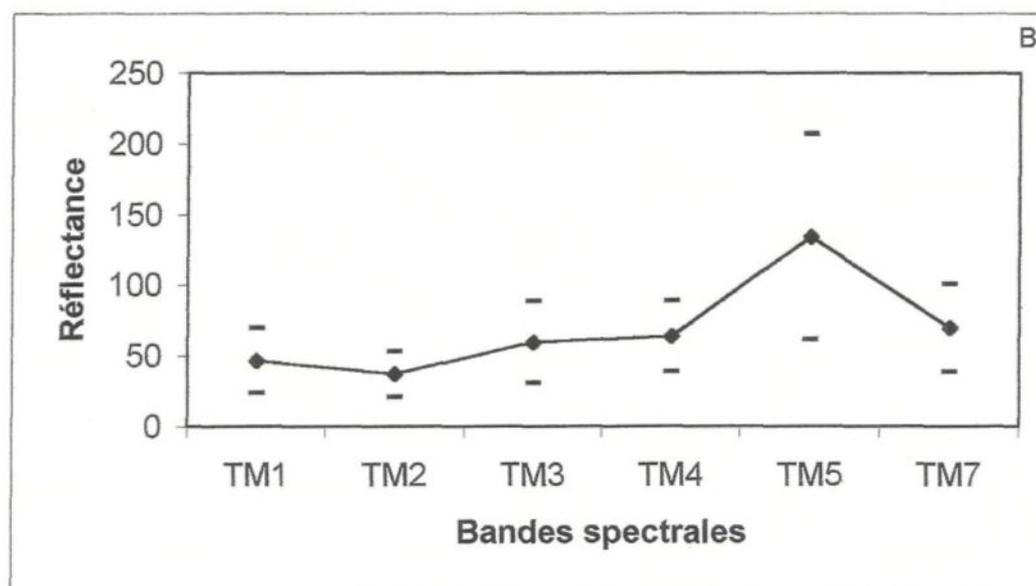
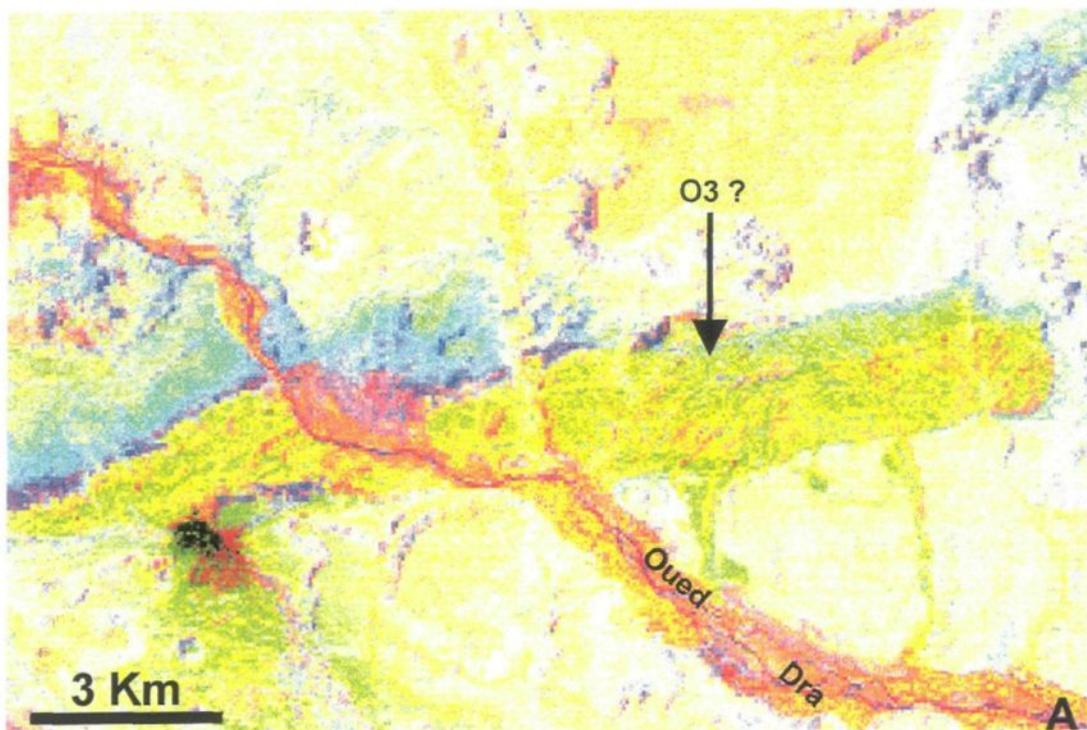


Figure 47: Appartenance probable d'un lambeau de roche sédimentaire à l'unité ordovicienne O3 (A). B: spectre de réflectance de O3.

**B- L'Ordovicien supérieur** Les unités de l'Ordovicien supérieur surmontent les schistes de l'Ordovicien inférieur par l'intermédiaire d'un grand escarpement. Il est légèrement plissé avec des pendages vers le sud. Il tranche sur l'image CRDL par sa teinte bleu moyen à foncé et par son relief. Il forme de très hautes falaises, une ligne de crête régionale formant le Jbel Bani et des dômes topographiques comme la structure fermée Jbel Hmasaïlikh au sud de la région étudiée (Figure 48).

**La quatrième unité ordovicienne (O4)** est représentée sur l'image CRDL par une teinte bleu moyen à foncé, une texture uniforme. O4 correspond à l'unité la plus claire de l'Ordovicien supérieur; elle réapparaît dans le haut de la partie SE de l'image CRDL avec une teinte bleu clair et un aspect très fracturé (Figure 49). La quatrième unité ordovicienne forme le sommet de la crête régionale du Jbel Bani coupée par des ravins profonds et espacés et une crête (Jbel Kissane) au cœur du bassin structural au nord d'Agdaz, et les lèvres relevées d'un plateau incliné vers l'est au cœur du synclinal de premier ordre au nord de Zagora. Elle présente une grande variation des valeurs spectrales (Figure 50).

Les caractéristiques morphologiques, l'aspect du relief et la coupe géologique à travers le Jbel Hmasaïlikh (Figure 51), indiquent que cette unité présente une grande résistance à l'érosion. En outre, elle présente une similitude de couleur avec la dernière unité quartzique de l'Acadien. Par contre elle s'en distingue par son relief plus accentué. En effet, d'après les colonnes stratigraphiques de Emran et al. (1988) et l'ONAREP (1991) dans l'Anti-Atlas central, il s'agit bien d'une unité de grès.

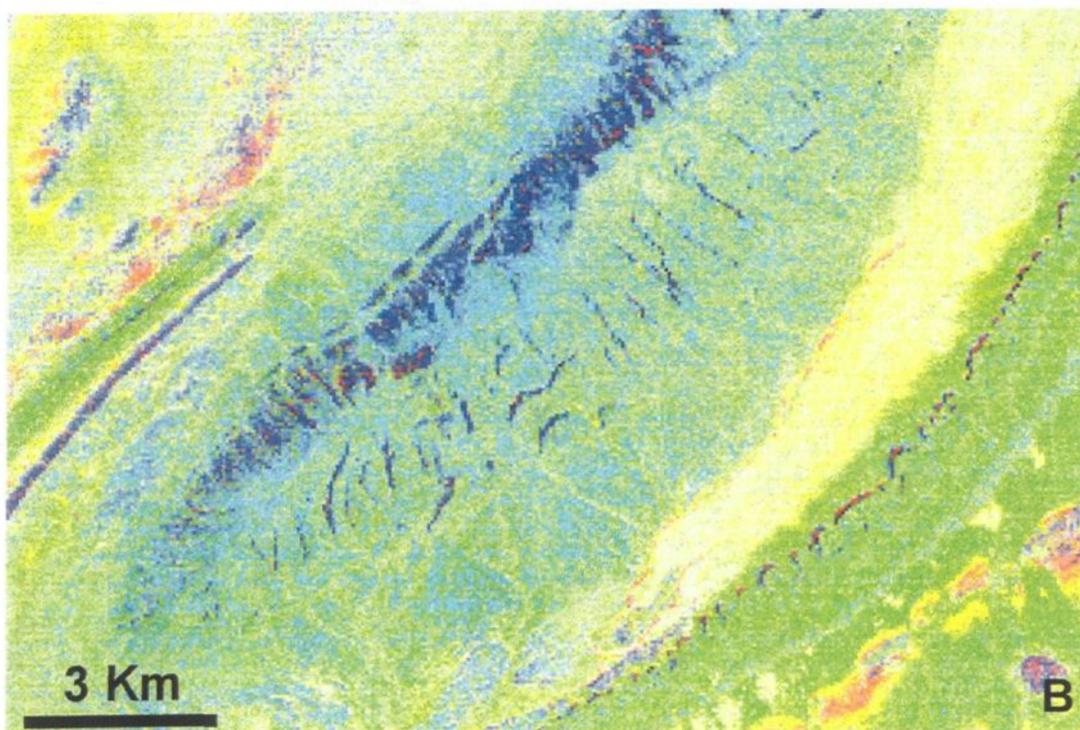
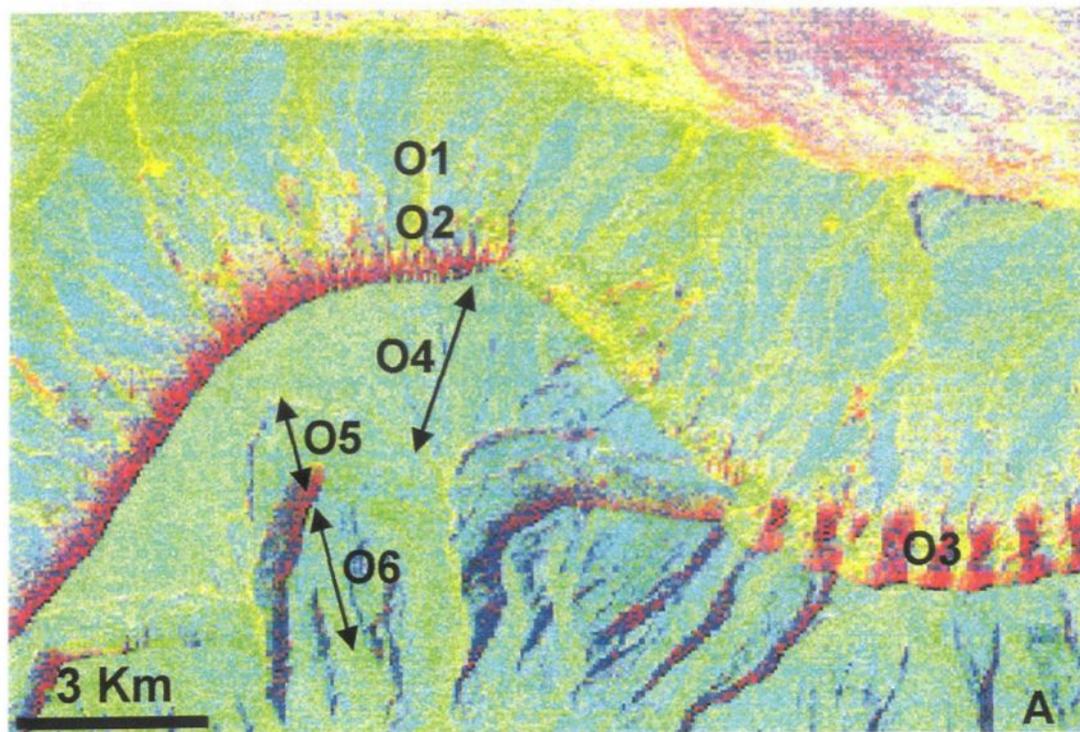


Figure 48: Grès O4 et quartzites O5 et O6 de l'Ordovicien supérieur du Jbel Bani (A) et du Jbel Hamsaïlikh (B).

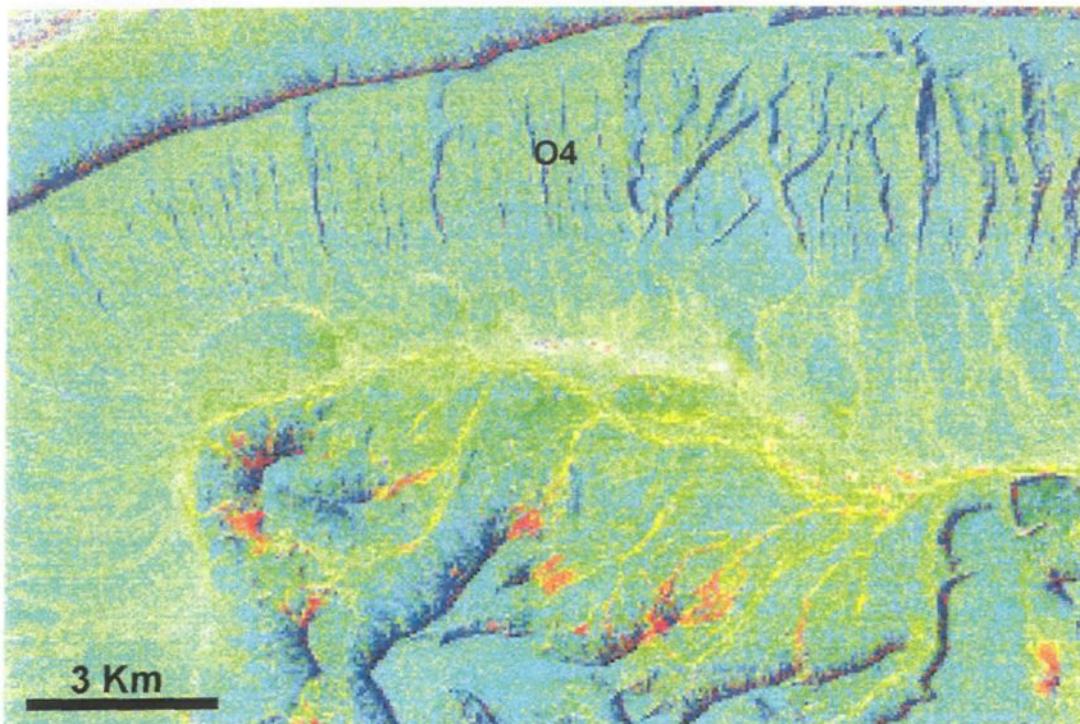


Figure 49: Aspect fracturé des unités de l'Ordovicien supérieur dans la partie SE de la région étudiée.

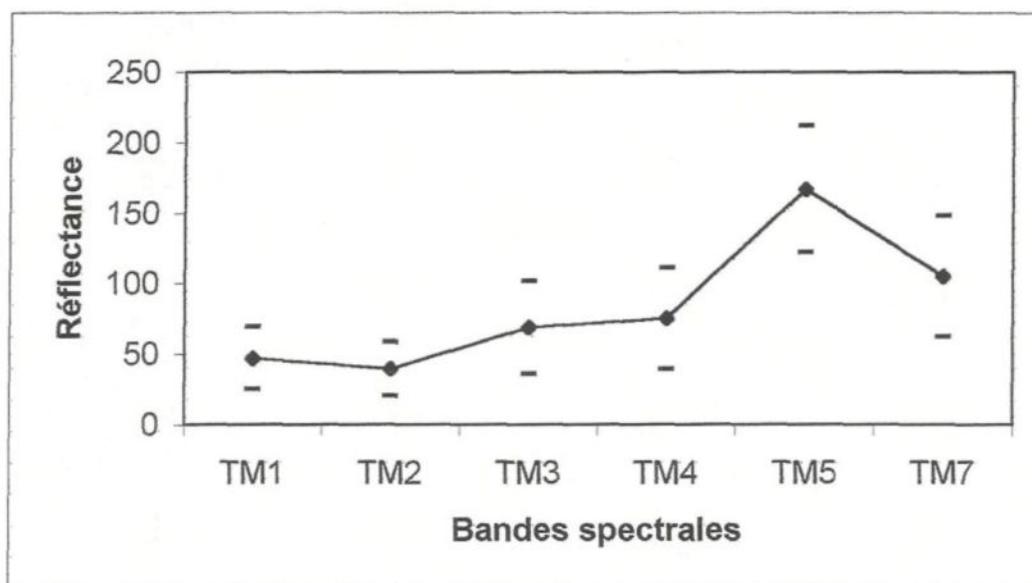


Figure 50: Spectre de réflectance de l'unité gréseuse O4 de l'Ordovicien supérieur.

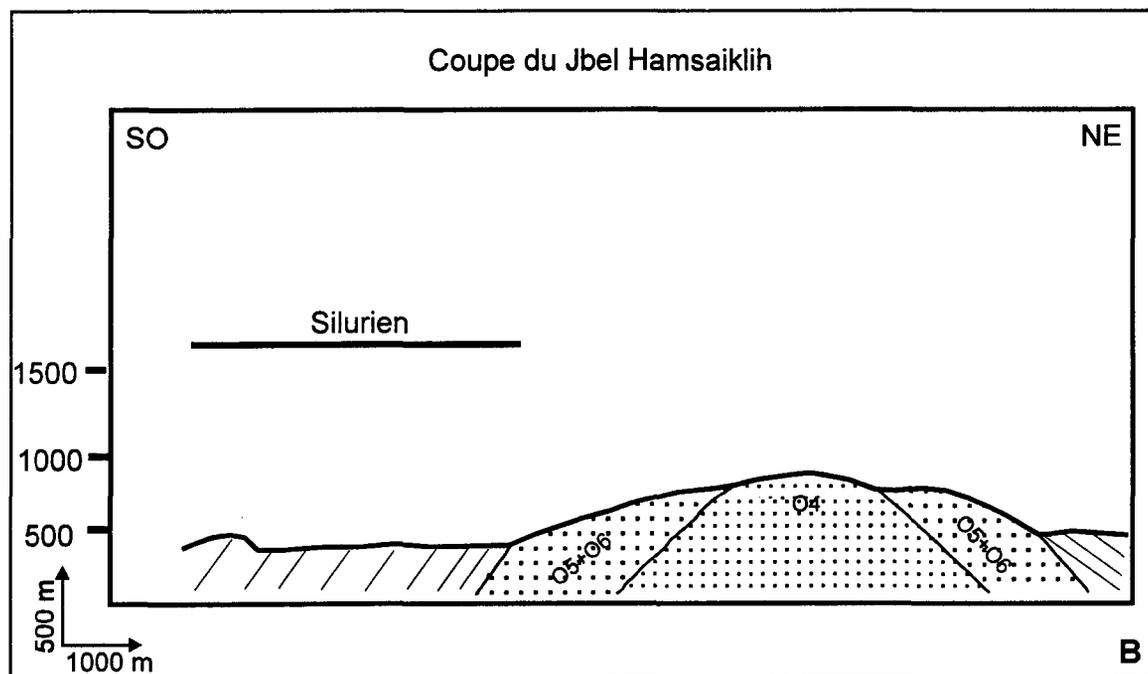
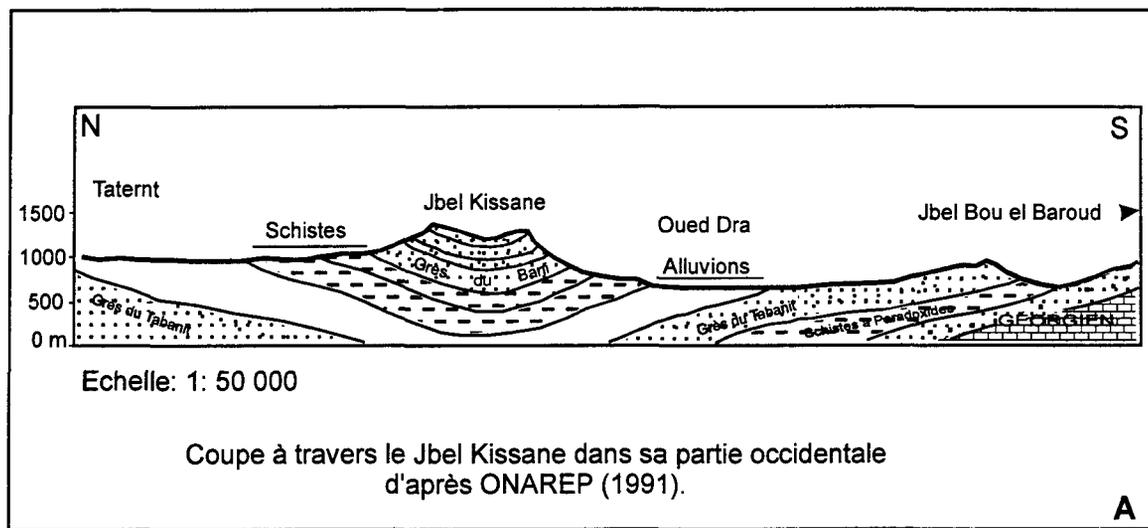


Figure 51: Coupes topographiques schématiques des unités de l'Ordovicien supérieur du Jbel Kissane (A) et du Jbel Hamsaïklich (B).

Selon Sabins (1987), il y a deux façons de discriminer les grès par télédétection. La première qui correspond à une composition RVB avec les rapports de bandes 3/1, 5/1 et 3/5, devrait faire ressortir les grès en bleu moyen à foncé. La deuxième composition de trois composantes principales PC2, PC3, PC4 (RVB) devrait faire apparaître les grès en violet foncé à terne. La composition RVB 3/1, 5/7, 3/5 montre les grès (O4) en rouge contrairement aux résultats de Sabins (1987). Donc ceux de l'Anti-Atlas présentent des différences de composition. Par contre la composition PC2, PC3, PC4 donne des résultats comparables à ceux qui ont été obtenus Sabins (1987). Donc ces traitements confirment la discrimination des grès (O4) ordoviciennes de l'Anti-Atlas (Figure 46).

**La cinquième unité (O5)** correspond à un petit escarpement sur le revers de celui formé par O4. Elle est relativement sombre et discontinue vers l'est. Cette unité est représentée sur l'image CRDL par des teintes bleu foncé, une texture zébrée, un ravinement espacé et peu profond (Figure 48).

**La sixième unité (O6)** constitue la base de la ligne de crête de Jbel Bani qui forme un bon repère dans le paysage et sur l'image CRDL. Cette unité est représentée sur l'image CRDL par une couleur bleu foncé et rouge, une texture zébrée, des escarpements qui forment des reliefs forts coupés par un ravinement espacé et très profond et un aspect très fracturé (Figure 44).

La cinquième et la sixième unité (O5 et O6) de l'Ordovicien supérieur présentent les mêmes caractéristiques spectrales (Figure 52) et forment un plateau d'une altitude moyenne de 1100 m (Figure 51). Leurs caractéristiques morphologiques et l'aspect de leur relief indiquent que O5 et O6 se caractérisent par une certaine résistance à l'érosion. En plus, ces caractéristiques spectro-morphologiques sont très proches de celles de la dernière unité acadienne (Km4), c'est-à-dire une série quartzique.

En outre ces deux unités présentent une luminance moyenne dans le canal 7 et faible dans le visible (Figure 52) ce qui devrait caractériser les surfaces à dominance quartzique (Escadafal et Pouget 1987). Effectivement, les colonnes stratigraphiques de l'ONAREP (1991) et de Emran et al. (1988) à travers la région d'étude révèlent qu'il s'agit bien de deux unités quartziques.

En résumé, les deux premières unités de l'Ordovicien inférieur (O1 et O2) de teinte bleu moyen sur l'image CRDL correspondent à des schistes. La troisième unité de l'Ordovicien inférieur de couleur jaune a été identifiée sur l'image pour la première fois. L'Ordovicien supérieur à prédominance gréseuse dans la partie inférieure, quartzique vers le sommet, se présente sur l'image par une teinte bleu moyen à foncé et forme une grande crête régionale bien marquée sur la région d'étude. Les roches ordoviciennes (O4, O5 et O6), sont des réservoirs possibles de pétrole dans l'Anti-Atlas, d'où l'importance de leur meilleure discrimination sur l'image CRDL.

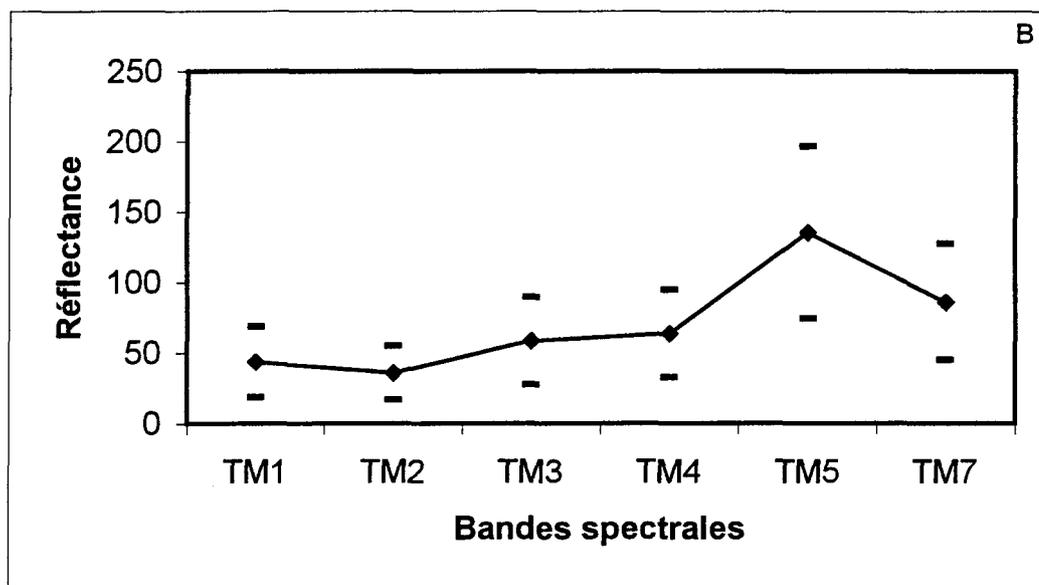
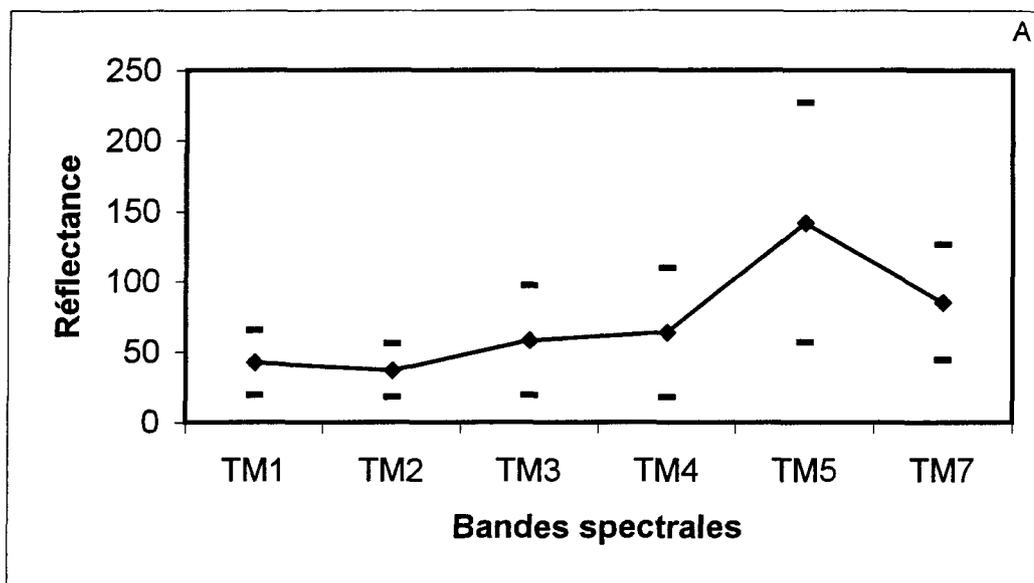


Figure 52: Spectres de réflectance des quartzites de l'Ordovicien supérieur: O5 (A) et O6 (B).

#### **4.2.5- Discrimination et identification des unités du Silurien**

Les descriptions de ces unités sont nettement plus sommaires que celles des unités précédentes en raison de l'absence d'intérêt pétrolier pour le Silurien. La région d'étude est marquée par la rareté d'affleurements des unités siluriennes qui sont largement couvertes de dépôts de sables. Il est difficile de dire si le Silurien présente des variations latérales à cause de la rareté des affleurements et du couvert alluvionnaire éolien. Ce dernier est caractérisé sur l'image CRDL par des teintes bleu clair moyen, une texture ondulée ou au contraire très finement ciselée. Il s'agit de champs de dunes relativement hautes, à extension kilométrique et hectométrique, souvent disposées en alignement. Ces formations qu'on trouve seulement dans la partie SE de l'image annoncent le domaine proprement saharien du Maroc. Les unités siluriennes sont visibles seulement à deux endroits: au-dessus des unités ordoviciennes au bas du revers de Jbel Bani et dans la partie sud du Jbel Hamsaïlikh, en dépression entre le dôme d'unité ordoviciennes et la crête périphérique formée des unités dévoniennes et du dyke Jurassique. Dans la partie sud du Jbel Hamsaïlikh, les unités siluriennes se caractérisent généralement par un relief faible et assez monotone, par des ravins assez superficiels, rectilignes et perpendiculaires à la vallée principale et une teinte vert avec un rubanement jaune et blanc (Figure 53B). Le Silurien a été subdivisé en 5 unités de caractéristiques différentes. Les cinq unités (S1, S2, S3, S4 et S5) apparaissent en dans la partie sud du Jbel Hamsaïlikh (Figure 53B), alors qu'au sud du Jbel Bani seulement S1 et S2 sont visibles. S3 à S5 sont masqués par les dépôts plus récents au sud du Jbel Bani (Figure 53A).

**La première unité (S1)** apparaît en vert bleuté au bas du Jbel Bani avec un contact très découpé (ongulé) et des ravins colorés violet foncé (Figure 53A). Dans la partie sud du Jbel Hamsaïlikh, S1 se caractérise par une couleur vert moyen sur l'image CRDL, un ravinement superficiel à peu profond, un drainage dendritique, un relief moyen formant des petites crêtes (Figure 53B).

**La deuxième unité (S2)** apparaît en bleu tacheté de vert au sud du Jbel Bani (Figure 53A). Il est découpé par des ravins assez larges et espacés. Dans la partie sud du Jbel Hamsaïlikh, S2 est caractérisée sur l'image CRDL par un rubanement (doublet) vert clair, un rubanement interne et une texture plutôt rubanée. Cette unité présente tantôt des petites crêtes, tantôt des petites dépressions (Figure 53B).

**La troisième unité (S3)** est représentée sur l'image CRDL par une couleur verte claire rubanée et de texture filamentée. Elle forme une vallée locale et ne présente aucun ravinement (Figure 53).

**La quatrième unité (S4)** correspond à une bande externe plutôt massive, de couleur verte sur l'image CRDL et de texture uniforme. Elle forme de petits escarpements coupés par un ravinement peu profond (Figure 53).

**La cinquième unité (S5)** est caractérisée sur l'image CRDL par une bande de couleur verte claire et de texture uniforme. Elle forme le fond d'une petite dépression dépourvue de ravinement (Figure 53).

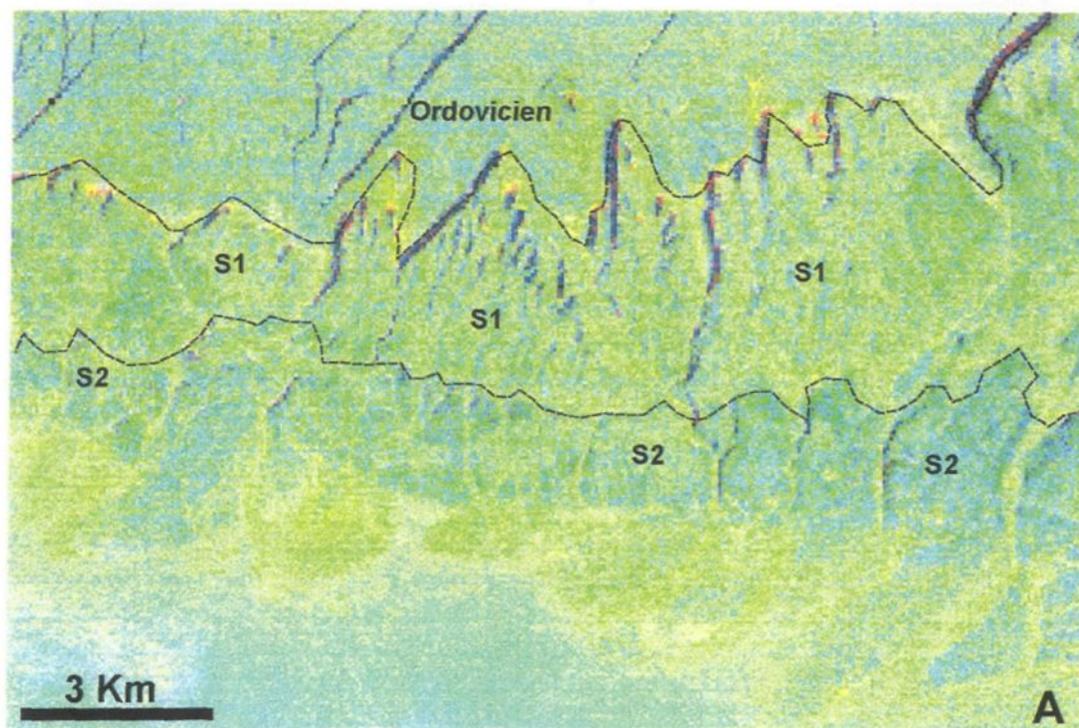


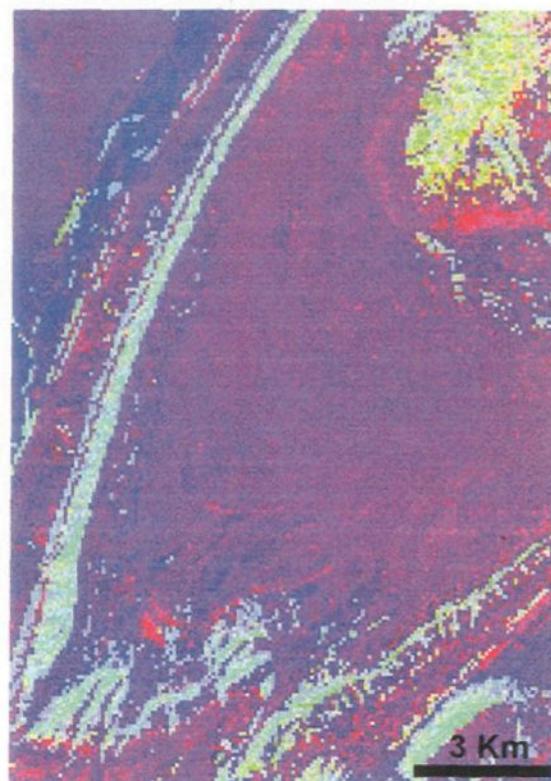
Figure 53: Unités siluriennes S1 et S2 au sud de Jbel Bani (A) et S1, S2, S3, S4 et S5 dans l'anticlinal du Jbel Hamsaïlikh au sud de la région étudiée (B).

Les morphologies des différentes unités du Silurien et leur relief montrent qu'il s'agit de certaines unités qui ont tendance à former des crêtes et des escarpements (S1 et S4), alors que d'autres ont une faible cohésion et ont tendance à former des dépressions et des vallées (S3 et S5). Les travaux de l'ONAREP (1991) et de Emran et al. (1988) ont été utilisés pour vérifier la nature des différentes unités du Silurien. En effet, la première unité qui repose directement sur l'Ordovicien supérieur ainsi que la quatrième unité (S4) correspondent à des grès tandis que les unités S3 et S5 correspondent à des schistes. L'unité S2 a des caractéristiques intermédiaires entre les grès et les schistes.

Pour les roches siluriennes, le rapport 5/7 est noir, la composition RVB de 3/1, 5/7, 3/5 est violet mauve et la composition RVB de PC2, PC3, PC4 montre des variations du violet pâle, à blanchâtre, à jaune tacheté de violet, à vert pale, à violet foncé tacheté de rougeâtre (Figure 54). Sultan et al. (1988) trouvent que les schistes sont brillants dans le rapport 5/7 alors que selon Sabins (1987) les schistes et les grès sont respectivement bleu moyen à foncé et bleu vert dans la composition RVB de 3/1, 5/7, 3/5 et violet bleu clair et violet foncé dans la composition RVB de PC2, PC3. Donc en général, ces traitements ne permettent pas de confirmer la discrimination ou de distinguer davantage les différentes unités siluriennes de l'Anti-Atlas. De plus les couleurs des unités siluriennes ne sont pas faciles à voir sur l'image CRDL et n'aident pas à discuter de ces traitements.



Bande 5/7



3/1,5/7,3/5 (RVB)



PC2,PC3,PC4 (RVB)

Figure 54: Application de traitements existants sur les unités siluriennes de la région d'étude.

#### **4.1.6- Discrimination et identification des unités du Dévonien inférieur**

Il s'agit d'une puissante série plissée au sud de l'image. Elle est caractérisée par une stratification interne qui laisse apparaître assez bien sur l'image des strates claires et d'autres foncées, par un rubanement intense, des ravins assez rectilignes et un relief modéré à fort. Cette série est traversée par des dykes et des sills d'âge Jurassique qui tranchent par leur couleur violet foncé sur les autres unités du Dévonien (Figure 55). Comme pour le Silurien, le Dévonien de la zone d'étude ne correspond pas à un âge favorable pour les hydrocarbures. C'est pourquoi les descriptions des unités dévoniennes sont nettement plus sommaires que les celles des unités précédentes. Le Dévonien inférieur a été subdivisé en 5 unités:

**La première unité (Di1)** est très mince, de couleur violet et rouge sur l'image CRDL. Elle est localement faillée, à relief modéré et correspond généralement à un talus (Figure 56).

**La deuxième unité (Di2)** correspond à un talus. Elle est caractérisée sur l'image CRDL par une couleur vert bleu, très ravinée ce qui lui donne une apparence ondulante et un relief modéré à fort. Cette unité se caractérise aussi par une forte variation latérale de la réflectance. Nous avons choisi un endroit qui semble éclairé directement pour faire les mesures (Figure 56).

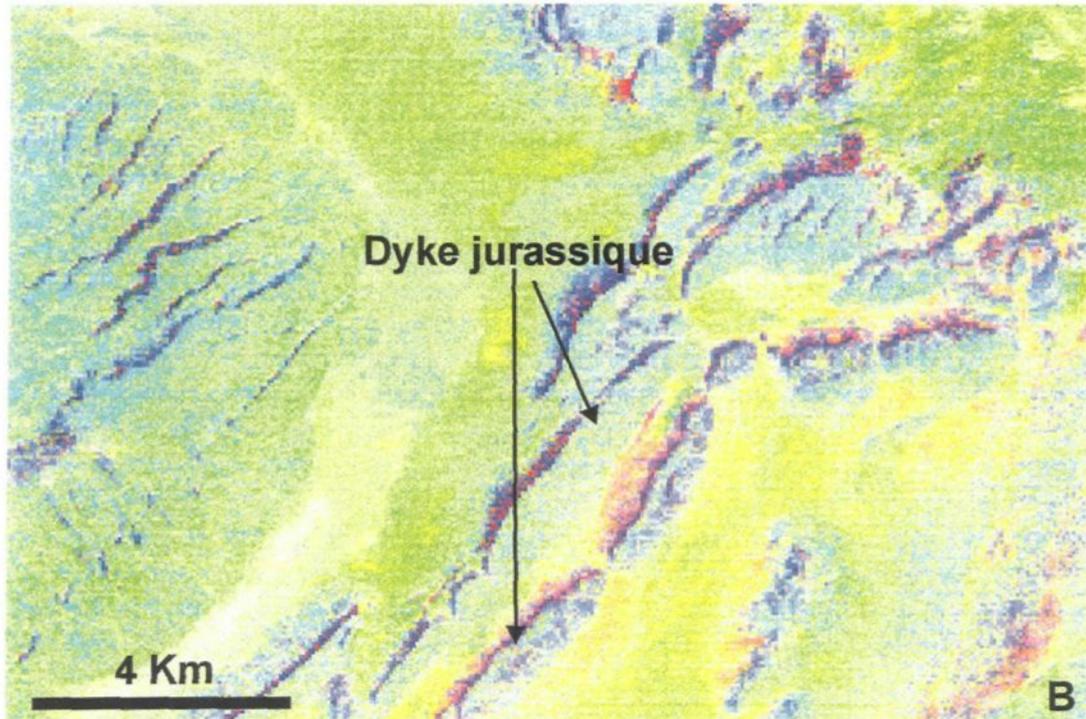
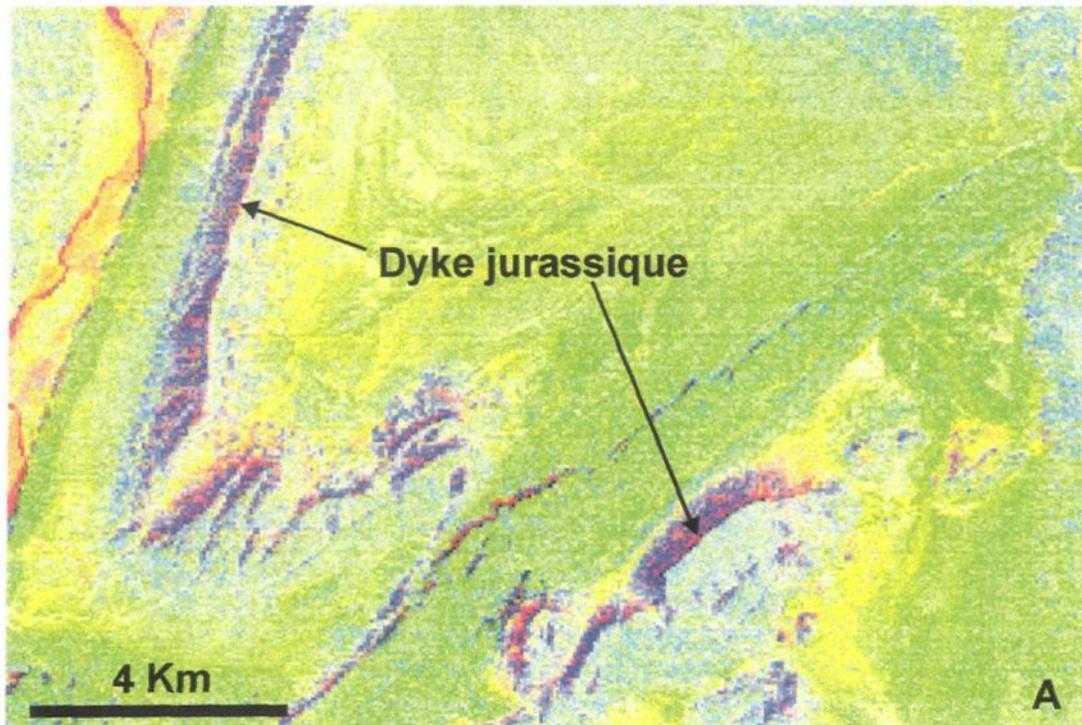


Figure 55: Dyke Jurassique plissé (A) et boudiné (B) au sud de la région d'étude.

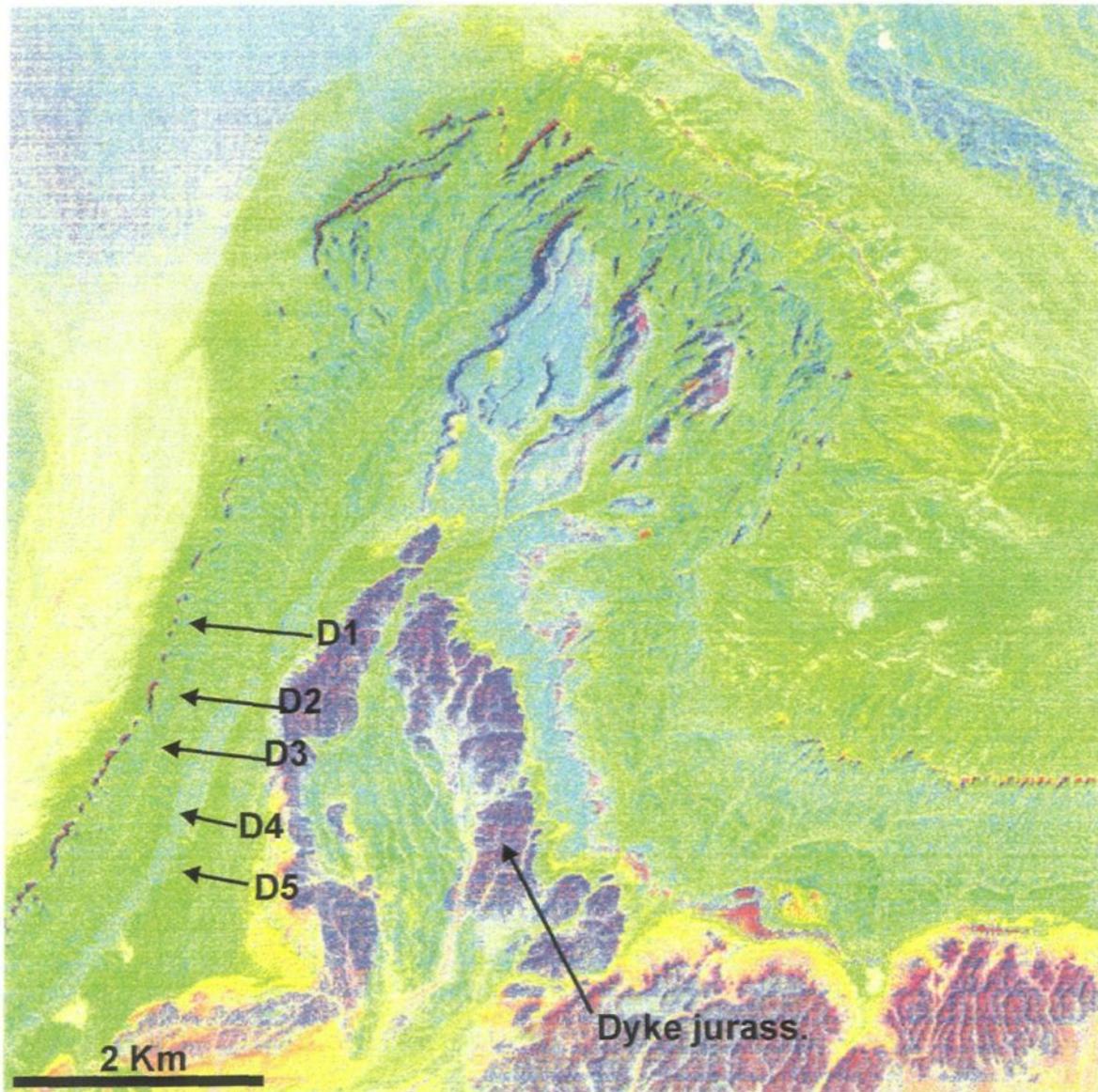


Figure 56: Les différentes unités du Dévonien inférieur au sud de la région étudiée.

**La troisième unité (Di3)** mince, faillée localement, pas toujours clairement visible. Elle est représentée sur l'image CRDL par une teinte vert plus jaunâtre que celle des unités adjacentes et une texture rubanée. Le relief est modéré et le ravinement est quasi absent (figure 56).

**La quatrième unité (Di4)** est caractérisée sur l'image CRDL par une teinte bleu pâle. Elle correspond à un petit escarpement. Cette unité présente un revers et une façade légèrement ondulée avec quelques discontinuités (figure 56).

**La cinquième unité (Di5)** forme un talus qui se caractérise par un relief faible, une texture filamentée, et une couleur bleue sur l'image CRDL. On retrouve cette unité de l'autre côté du feuillet intrusif (figure 56).

Le Dévonien inférieur se caractérise par de nombreux bancs repères, de teinte bleu clair et vert qui donnent un aspect très rubané au Dévonien inférieur. Les unités D2 et D4 forment deux niveaux repères de couleur bleue sur l'image CRDL. D'après l'ONAREP (1991), et ces deux unités correspondent à des niveaux de carbonates. La différence de couleur par rapport aux carbonates infra-cambriens et géorgiens peut s'expliquer par la composition des carbonates dévoniens. En effet, la composition de ces carbonates est marquée par une composante marneuse très importante et qui pourrait être la raison pour ce changement de couleur. Les unités D1, D3 et D5 de couleur verte qui rappelle le Cambrien

moyen mais avec un relief moins prononcé. En effet il s'agit d'intercalations gréseuse (D1) et schisteuse (D3 et D5).

#### **4.1.7- Discrimination et identification des unités du Dévonien moyen-supérieur**

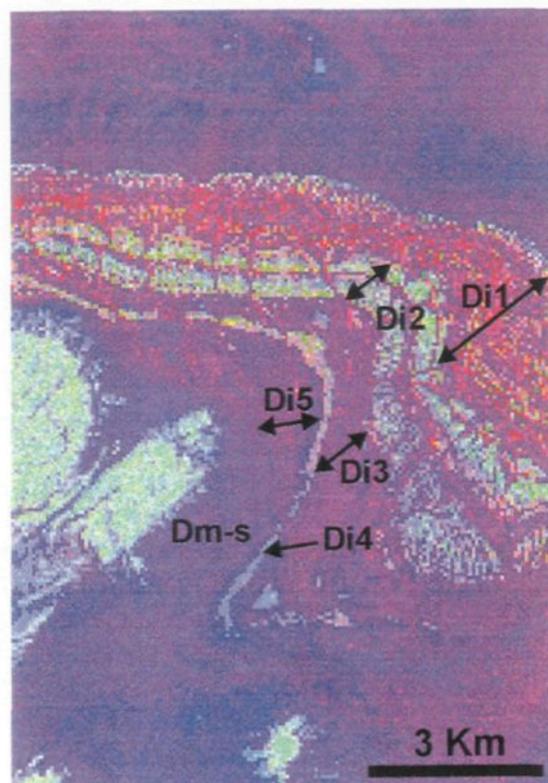
Les unités du Dévonien moyen-supérieur sont représentées sur l'image CRDL par des teintes généralement bleu foncé et jaune et une texture filamentée. Le Dévonien moyen-supérieur est difficilement observable à cause de fréquents recouvrements sableux récents dans les zones aplanies que constituent leurs affleurements (Figure 58).

Le Dévonien moyen-supérieur est en partie masqué par des formations éoliennes dont il émerge par transparence. Ceci rend la description et l'interprétation de ces unités difficiles. En plus, il présente des caractéristiques morphologiques et spectrales proches de celles de la partie sommitale du Silurien et donc probablement des compositions minéralogiques semblables. D'après l'ONAREP (1991), il s'agit d'une série à dominance schisteuse.

Les compositions 3/1, 5/7, 3/5 (RVB) et PC2, PC3, PC4 de Sabins (1987) et le rapport 5/7 de Sultan et al. (1988) ont été testés sur les unités du Dévonien inférieur de l'Anti-Atlas central. Les résultats obtenus à la figure 57 montrent que ces traitements permettent de distinguer davantage ces unités et peuvent servir de méthodes complémentaires pour la discrimination des unités dévoniennes et du dyke jurassique.



Bande 5/7



3/1, 5/7, 3/5 (RVB)



PC1,PC2,PC3 (RVB)

Figure 57: Application de traitements existants sur les unités du Dévonien.

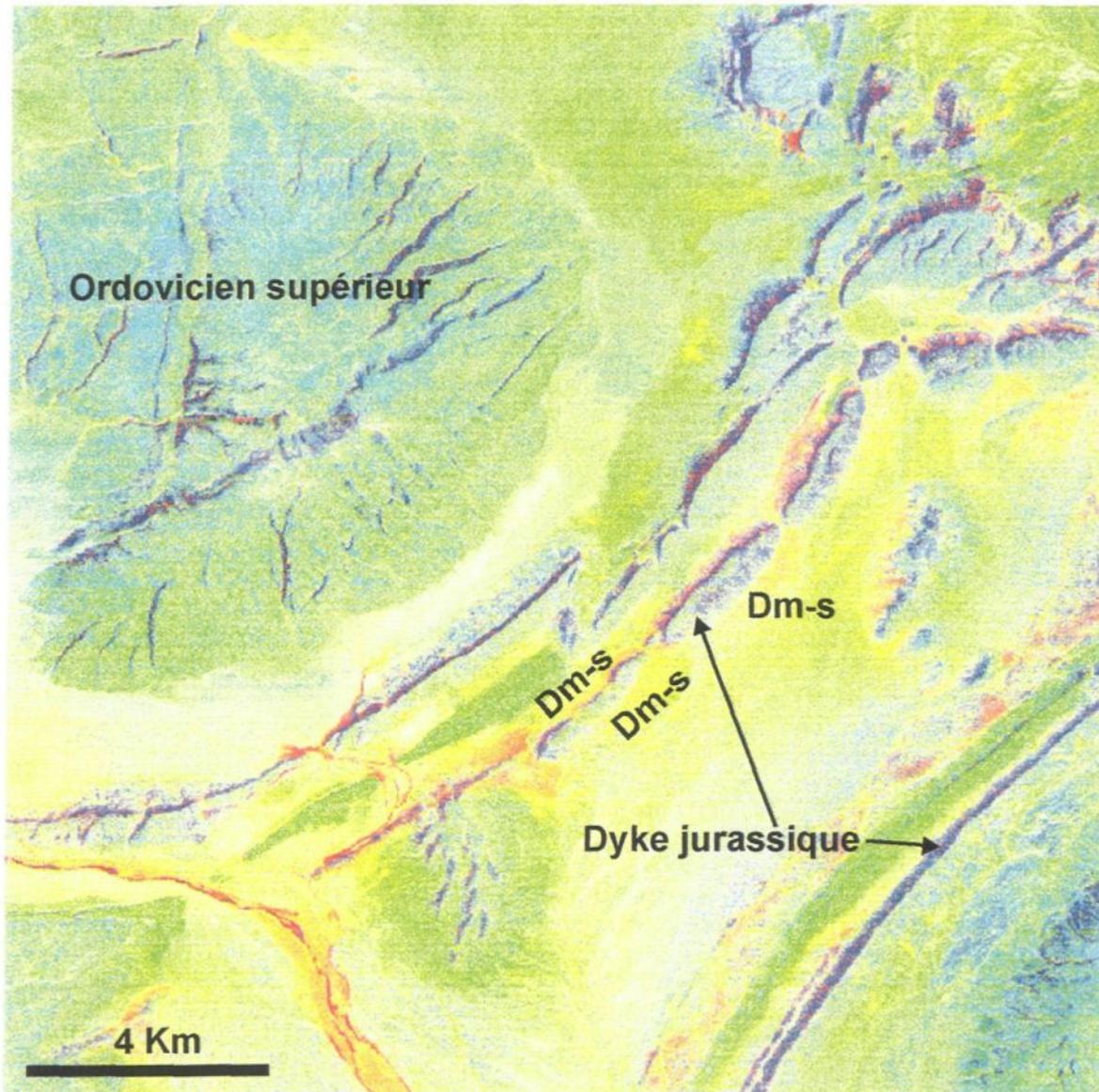


Figure 58: Unités du Dévonien moyen-supérieur (en jaune) largement cachées par les alluvions.

## 4.2- LA CARTE LITHOSTRATIGRAPHIQUE

### **4.2.1- Carte lithostratigraphique à partir de l'interprétation de l'image**

27 unités stratiformes ont été distinguées et identifiées sur l'image CRDL dans la couverture infra-cambrienne et paléozoïque de la région d'étude. Une signature spectrale et un aspect géomorphologique ont été attribuées à chacune des 27 unités stratiformes. L'image CRDL a été utilisée en combinaison avec les résultats de l'identification des unités pour établir une nouvelle carte lithostratigraphique au 1: 500 000 (en pochette). Cette carte lithostratigraphique (Figure 59 réduite ici à 1: 1 000 000) est plus détaillée que la carte existante de type chronostratigraphique.

La carte issue de ce travail s'est révélée bien adaptée à l'individualisation des unités infra-cambriennes et paléozoïques, caractérisées par leur couleur spécifique sur l'image CRDL, et notamment les calcaires géorgiens et les grès du Cambrien et de l'Ordovicien qui pourraient constituer des réservoirs d'hydrocarbures sous réserve d'une position structurale favorable. En effet, grâce à cette carte lithostratigraphique, des corrections locales ont été apportées à la carte géologique existante de Saadi et al. (1985), surtout dans le contenu de l'Infra-cambrien et du Cambrien (Figure 60).

D'autres précisions au niveau de la transition latérale entre les grès et les conglomérats infra-cambriens ont été mises en évidence. Cette carte lithostratigraphique a permis d'identifier des variations latérales dans la dolomitisation des unités IK2 et Ki1 (Figure 61 et carte en pochette). De plus, les unités du Cambrien moyen montrent des transitions verticales graduelles entre elles, une transition latérale nette au nord de la boutonnière de Bou-Azzer, et un changement d'épaisseur entre le centre de la région étudiée et son coin nord-est (carte en pochette). Nous avons trouvé aussi une unité rubanée du Cambrien moyen et qui ne figure pas sur la carte géologique existante et qui nécessite d'être identifiée sur le terrain.

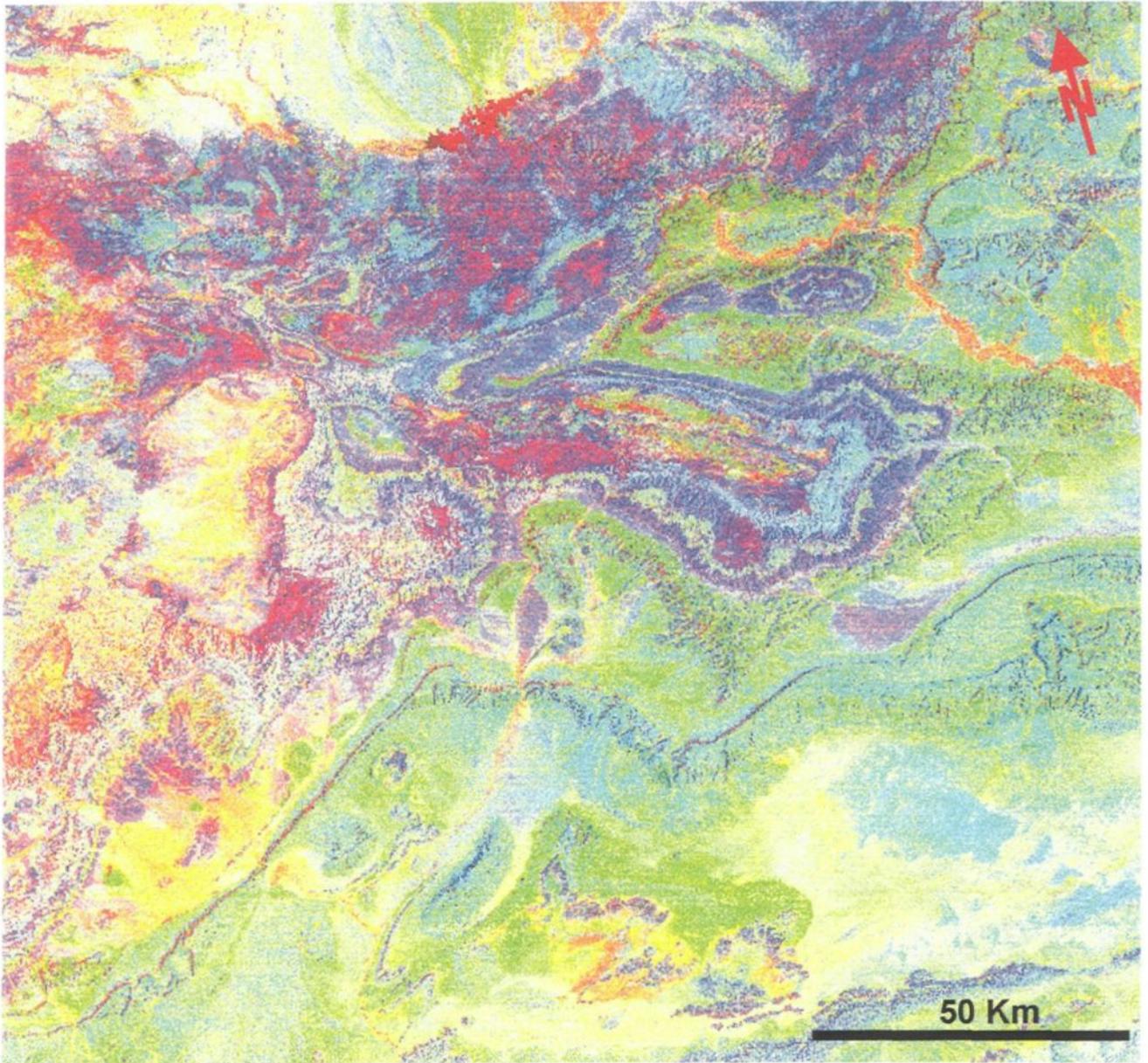


Figure 59: Carte lithostratigraphique réalisée à partir de l'image Landsat-TM (réduite ici au 1:1000 000). La description des différentes unités de cette carte est indiquée dans le tableau 9. Pour plus de détails voir carte en pochette au 1:500 000.

Tableau 9: Description des 27 unités de la carte lithostratigraphique de la figure 59.

Âges	Unités	Lithologies	Identification sur l'image CRDL (Fig. 56)	Localisation sur l'image
Dévonien	Dm-s	Schistes	Jaune et vert	Sud
	D5	Schistes	Bleu et violet	Sud
	D4	Schistes	Bleu et jaune	Sud
	D3	Carbonates	Vert jaunâtre	Sud
	D2	Schistes ± Carbonates	Vert bleu	Sud
	D1	Grès	Vert olive	Sud
Silurien	S5	Schistes	Bleu et vert	Sud
	S4	Grès	Vert	Sud
	S3	Schistes	Bleu	Sud
	S2	Schistes gréseux	Bleu et vert	Sud
	S1	Grès	Vert bleuté	Sud
Ordovicien	O6	Quartzites	Bleu moyen	S et NE
	O5	Quartzites	Bleu moyen	S et NE
	O4	Grès	Bleu moyen à foncé	S et NE
	O3	Grès schisteux	Jaune et rouge	S et NE
	O2	Schistes	Bleu clair	S et NE
	O1	Schistes	Bleu clair	S et NE
Cambrien. (moy. et inf.)	Km4	Quartzites	Bleu moyen	centre
	Km3	Schistes	Vert moyen	centre
	Km2	Grès	Vert et rouge	centre
	Km1	Schistes	Vert	centre
	Ki2	Grès passe aux schistes	Vert bleuté pâle	S et cent.
	Ki1	Calcaire	Violet clair à moyen	S et cent.
Infra-cambrien	IK3	Schistes	Vert très clair	SE, NO, cent.
	IK2	Grès	Vert clair	SE, NO, cent.
	IK1	Dolomie	Violet clair à moyen	E et centre
	IK0-e	Grès	Bleu moyen à foncé	E et centre
	IK0-w	Conglomérat	Vert blanc	Ouest
Limit. Infr-Préc.		Unités volcaniques	Rouge terne	N et centre

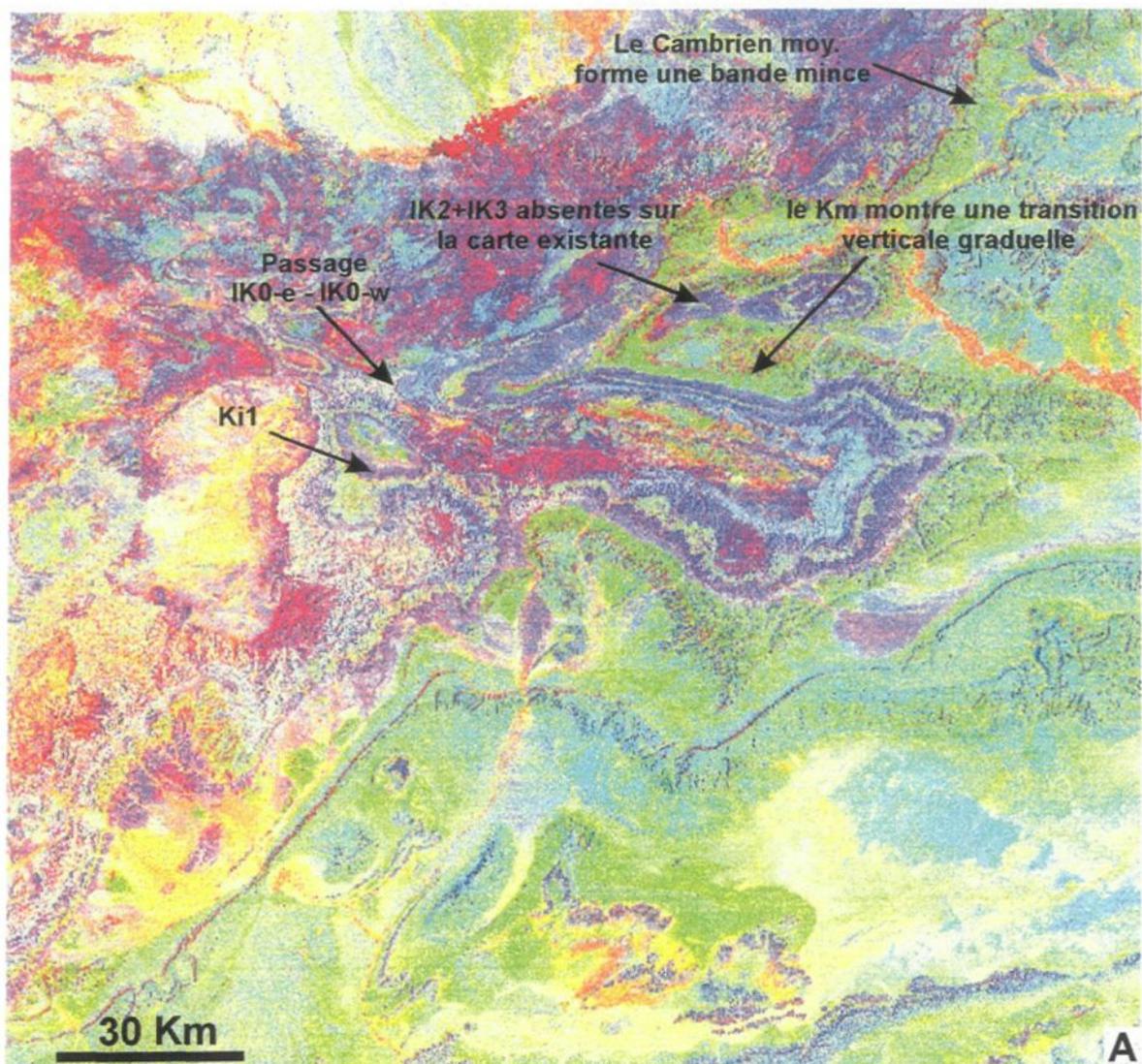


Figure 60: Comparaison entre la carte lithostratigraphique (A) réalisée à partir de la télédétection et la carte géologique existante de type chronostratigraphique (B). La carte A donne 27 unités stratiformes dans la couverture infra-cambrienne et paléozoïque au lieu de 9.

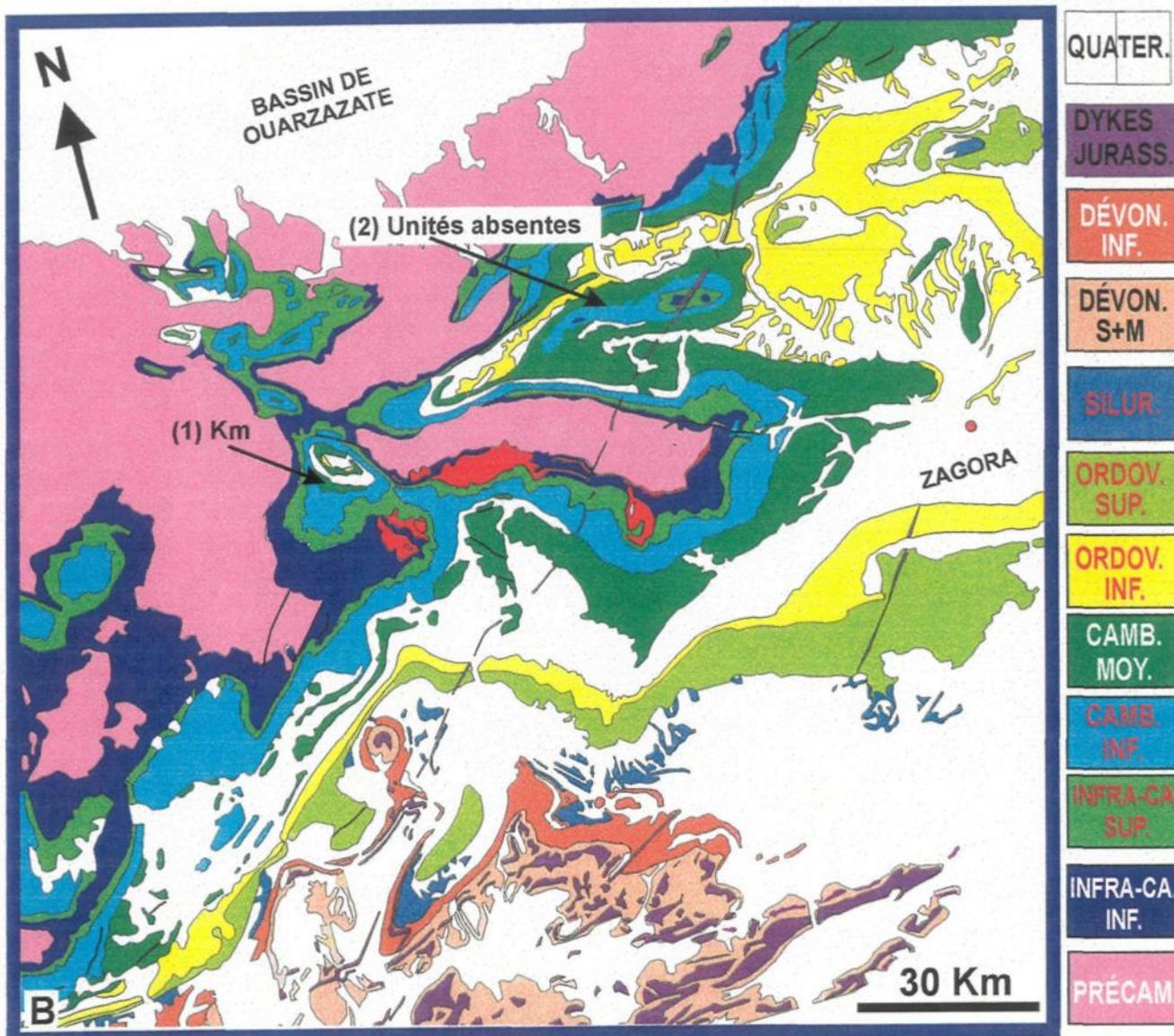


Figure 60 (suite).

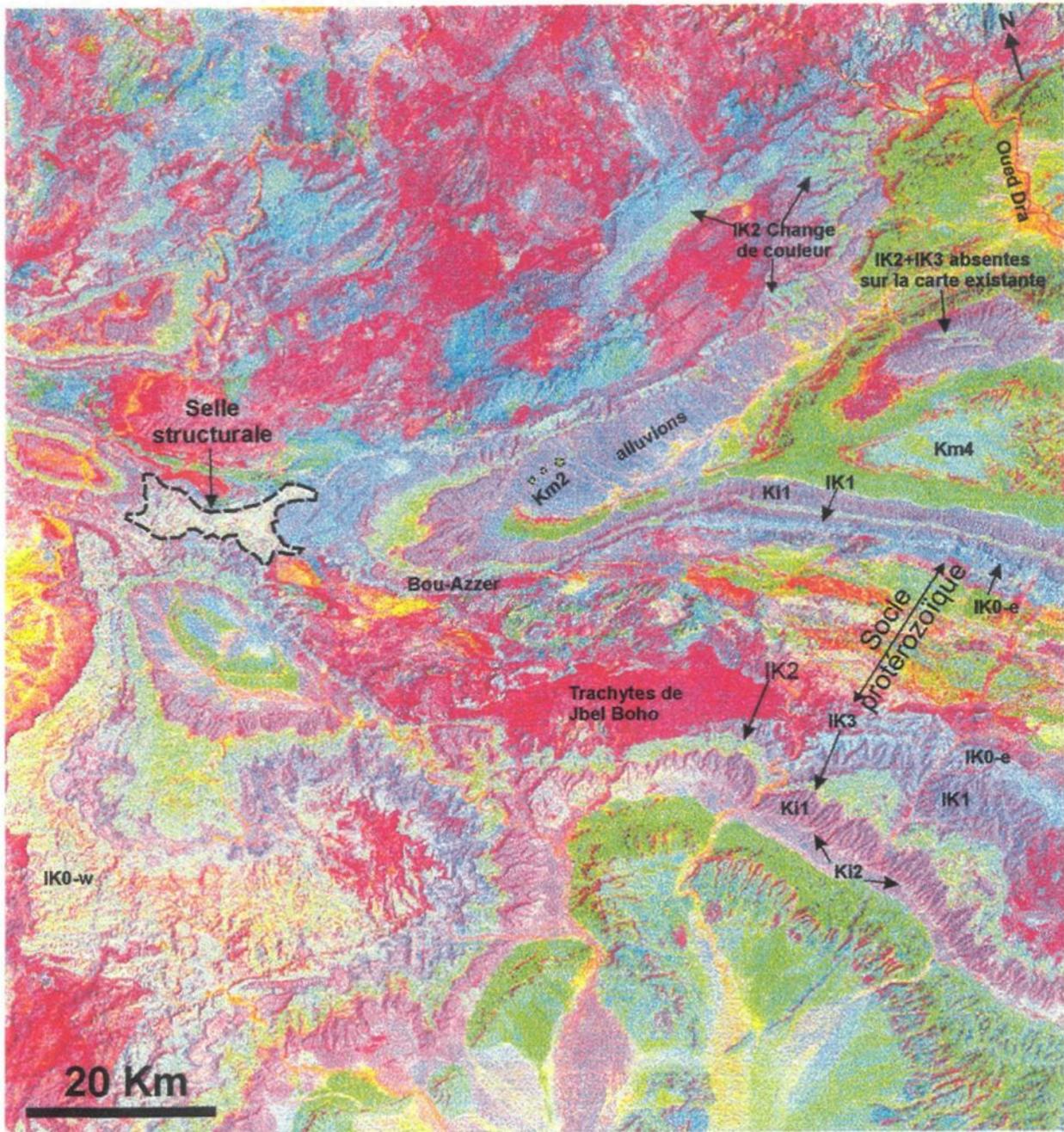


Figure 61: Transition latérale progressive entre les grès IK0-e et les conglomérats IK0-w .

#### 4.2.2- Signatures spectrales analogues

Ces 27 unités ont été regroupées en 4 ensembles selon leurs compositions lithologiques: les grès, les carbonates, les quartzites et les schistes. Par la suite, un spectre de réflectance a été établi pour chacun des 4 ensembles à partir des valeurs spectrales mesurées sur les versants les mieux éclairés.

Les carbonates possèdent les réflectances les plus faibles alors que les grès possèdent les valeurs spectrales les plus élevées dans toutes les longueurs d'ondes et surtout dans le canal TM5. Ce dernier montre un espacement important entre les 4 spectres et constitue le facteur principal de différenciation des lithologies les unes par rapport aux autres. Les valeurs spectrales des grès, des quartzites, des schistes et des carbonates dans le canal TM5 sont respectivement de 144, 133, 125 et 117. Une inversion de l'intensité de réflectance entre les schistes de l'Anti-Atlas central et les quartzites dans la bande TM5 a été remarquée (Figure 62).

La figure 62 montre que les schistes de l'Anti-Atlas sont systématiquement moins lumineux que les grès dans toutes les longueurs d'ondes. Ceci est le reflet de la composition argileuse normalement plus forte dans les schistes. En effet, les travaux de terrain de l'ONAREP (1991) et le BRPM (1961a, 1961b et 1962), qui indiquent que les grès de l'Anti-Atlas central contiennent des minéraux argileux. Les quatre ensembles de

roches de la région d'étude présentent des valeurs radiométriques très proches dans le TM3 et TM4.

Les résultats de cette étude pourraient constituer un outil de travail pour des recherches ultérieures et notamment l'identification des caractéristiques spectrales des carbonates et des quartzites dans des régions désertiques semblables. En effet, en condition désertique, les quartzites et les carbonates devraient avoir le même genre de caractéristiques spectrales que celles du tableau 10 et de la figure 62.

Tableau 10: Les valeurs spectrales des différentes unités de la zone d'étude.

CARBONATES	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
IK1	40.5	33	59	62.5	112	68.5
Ki1	42.5	35.5	56	56	126	81.5
D3	42.5	34.5	57	57.5	113	67.5
<b>Moyenne</b>	42	34	57	59	117	73
<b>Ecart-type</b>	1	1	1	3	6	6

GRÈS	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
IK0-e	41	36	64	70	142	88.5
IK2	48.5	41.5	74.5	78	156	95.5
Ki2	43	34.5	57.5	58	134	75.5
Km2	43	36.5	60.5	65	128	73.5
O4	47	39.5	68.5	75	167	105
S1	56.5	42	66.5	65	137	77.5
<b>Moyenne</b>	47	38	65	69	144	86
<b>Ecart-type</b>	5	3	6	7	13	12

SCHISTES	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
IK3	54	48	72.5	73.5	121	95.5
Km1	41.5	35.5	58.5	61.5	128	75
Km3	43	36.5	57.5	60.5	125	76
O1	42	37	61	61.5	128	75
O2	45.5	37.5	58	58.5	130	92
S2	40	32.5	57.5	59	122	77.5
<b>Moyenne</b>	44	38	61	62	126	82
<b>Ecart-type</b>	5	5	5	5	3	9

QUARTZITES	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
Km4	43	34	57	57	122	73
O5	42.5	37	58.5	64	142	85.5
O6	43.5	35.5	58.5	63.5	135	68
<b>Moyenne</b>	43	36	58	62	133	76
<b>Ecart-type</b>	0	1	1	3	8	7

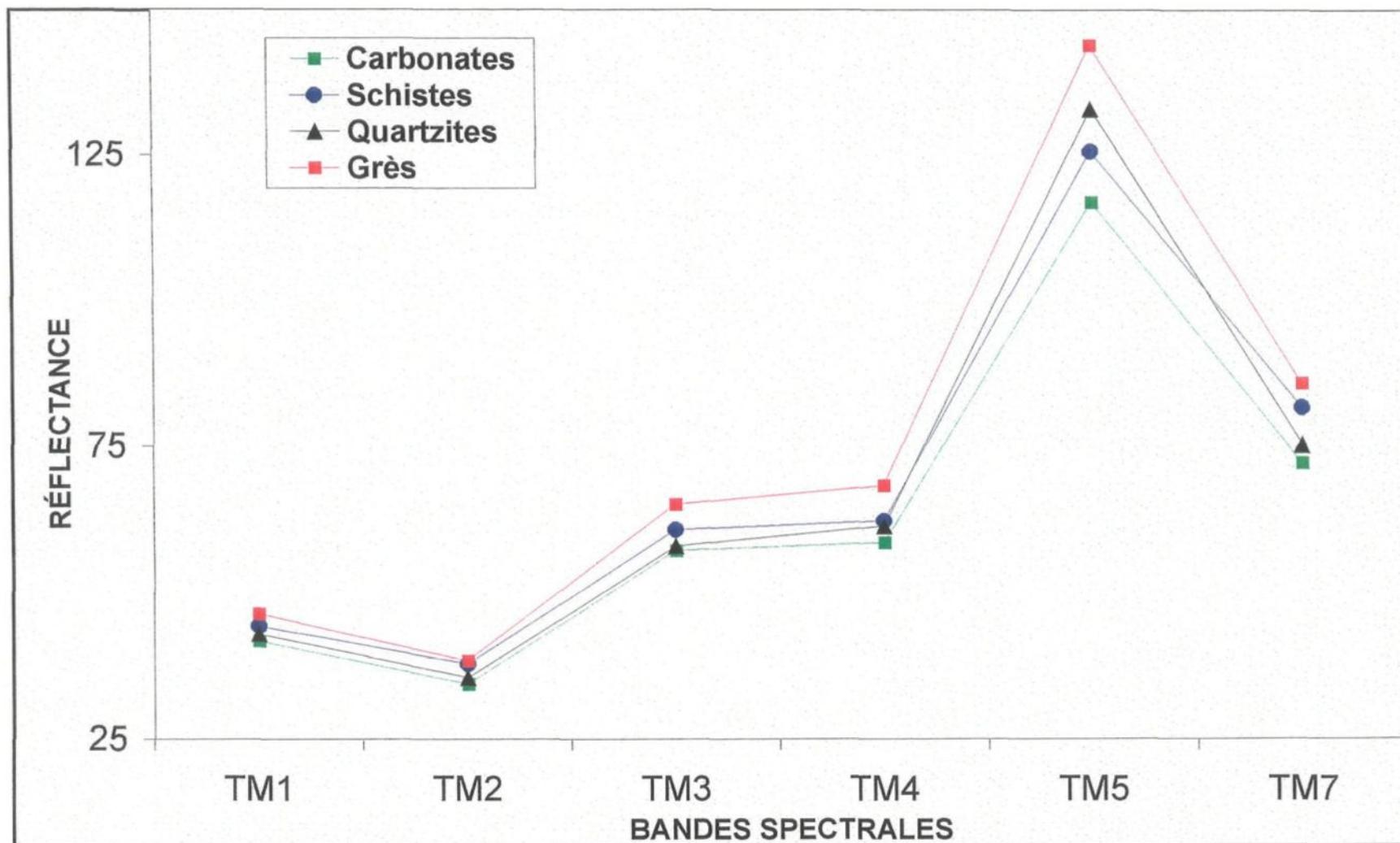


Figure 62: Moyennes des valeurs spectrales dans les six canaux pour chaque type de roche de la zone d'étude

## CHAPITRE 5

### **STRUCTURES ET SITES FAVORABLES AUX HYDROCARBURES**

L'identification de sites à potentiel pétrolier exige l'analyse structurale de la région d'étude que ce soit pour localiser les pièges structuraux (anticlinaux, failles) ou pour déterminer l'attitude favorable des pièges structuraux éventuels. Cette analyse débute par l'inventaire des structures plissées d'abord à l'échelle de l'Anti-Atlas puis à celle de la région d'étude et enfin à celle des plis individuels en vue de bien dégager l'image des patrons d'interférences que présente la région. L'analyse des structures suivra. Elle vise d'abord à repérer les failles principales et ensuite à dégager les patrons de fracturation caractéristiques du socle précambrien et de la couverture infracambrienne et paléozoïque. Une interprétation structurale sera réalisée pour cibler les sites à potentiel d'hydrocarbures. Les cartes de plis et de fractures seront établies et interprétées pour préciser les structures favorables à l'accumulation de pétrole dans la région. Enfin, les sites favorables aux hydrocarbures, où une ou plusieurs roches réservoir sont présentes et couvertes dans une structure piège (anticlinaux et failles.), seront localisés dans la zone d'étude.

### 5.1- LES STRUCTURES PLISSÉES

L'Anti-Atlas est une grande dalle bombée et légèrement basculée au SSE et "froissée" par des plissements de premier et deuxième ordre. La couverture paléozoïque dessine une grande structure en "S" au niveau de l'accident majeur de l'Anti-Atlas. Ce grand pli en "S" correspond à une vaste zone anticlinale d'axe ONO-SSE (grand anticlinal de l'Anti-Atlas) et à une structure synclinale de grand style d'axe ONO-ESE à NNO-SSE. Les axes de ces structures, synclinale et anticlinale, ont une allure courbe et présentent quelques ensellements qui se traduisent par des structures positives et négatives soit des dômes, des selles et des bassins structuraux. Les grandes structures (anticlinal et synclinal de premier ordre) sont disposées en éventail, se pincet au nord-ouest de Bou-Azzer. Leurs traces axiales se prolongent de plus de 100 km vers l'est. Ces structures ont un plongement axial général vers l'est. Le plongement axial des différents plis de la région a été déterminé par le sens de fermetures des plis puisqu'il a été montré que la séquence paléozoïque de l'Anti-Atlas est normale. Donc le plongement axial est de même sens que les fermetures anticlinales et de sens contraire pour les synclinaux.

L'analyse et l'interprétation de l'image CRDL et la carte géologique existante ont permis de réaliser une carte des plis de la région d'étude (Figure 63). En plus des grandes structures anticlinales et synclinales de l'Anti-Atlas, cette carte montre l'existence de trois directions de plissement de second ordre dans la région d'étude qui interfèrent les unes

avec les autres pour former un patron de dômes et bassins d'allongement et d'orientation variés. Ces trois directions de plissement sont:

1)- Les plis à axe OSO-ENE sont généralement parallèles à l'accident majeur de l'Anti-Atlas. Ils sont bien individualisés dans la partie nord de l'image. C'est ainsi qu'au nord-ouest de Zagora, apparaît l'anticlinal du Jbel Bou El Baroud affectant le cambrien et l'Infra-cambrien. Cette structure anticlinale secondaire est bordée de synclinaux de second ordre au cœur du synclinal de premier ordre au nord de Zagora. Ces plis secondaires à axe OSO-ENE, dont la longueur axiale est de l'ordre de 40 km, ont un étalement en éventail avec une ouverture vers le SE.

2)- Les plis à axe NE-SO sont parallèles à l'orientation de l'Anti-Atlas et aux axes du grand pli en "S". Ces plis sont bien développés dans la partie sud de l'image. En effet, le Jbel Bani montre une série de plis anticlinaux et synclinaux ouverts jusqu'à l'Infra-cambrien. Encore plus au sud et montrant toujours la direction NE-SO, se rencontrent une série de plis secondaires affectant d'abord l'Ordovicien puis le Silurien et enfin le Dévonien. C'est dans ce contexte qu'on trouve le Jbel Hamsaïlikh qui montre une structure anticlinale (dôme structural) occupée au centre par l'Ordovicien. Ces plis secondaires d'axe NE-SO plongent généralement au sud-ouest et pourraient être reliés au basculement de l'Anti-Atlas vers le sud. Ces plis ont un étalement en éventail avec une ouverture vers le NE et une longueur axiale moyenne de l'ordre de 60 km.

3)- Les plis à axe N-S sont moins fréquents dans la région d'étude et se localisent surtout dans la partie est de l'Anti-Atlas où ils semblent former des dômes structuraux ouverts jusqu'au Cambrien moyen. Sur la figure 63, ces plis sont plus isolés, et trois ou quatre seulement ont été identifiés: 1- axe anticlinal à la bordure est de l'image, 2- axe synclinal au sud de l'extrémité est de la boutonnière de Bou-Azzer, 3- axe synclinal très court à l'est de Jbel Hamsaïlikh et 4- peut-être un axe anticlinal parallèle à l'allongement de la boutonnière de Zenaga. Cette direction de plissement est perpendiculaire à l'accident majeur de l'Anti-Atlas.

En résumé, il y a dans la région d'étude et comme le montre la carte des plis de la figure 63, un grand pli en S de direction ONO-SSE, et auquel se superposent de multiples plis secondaires dans la couverture infra-cambrienne et paléozoïque. Ces plis, de directions variées, montrent généralement des ensellements et des culminations au nord et des dômes et des bassins au sud. Les dômes structuraux et les culminations correspondent à des structures pièges favorables à l'accumulation de pétrole. Ces structures pourraient avoir une importance majeure dans la région en tant qu'éventuels pièges de pétrole lorsqu'elles impliquent des roches réservoirs couvertes de roches imperméables.

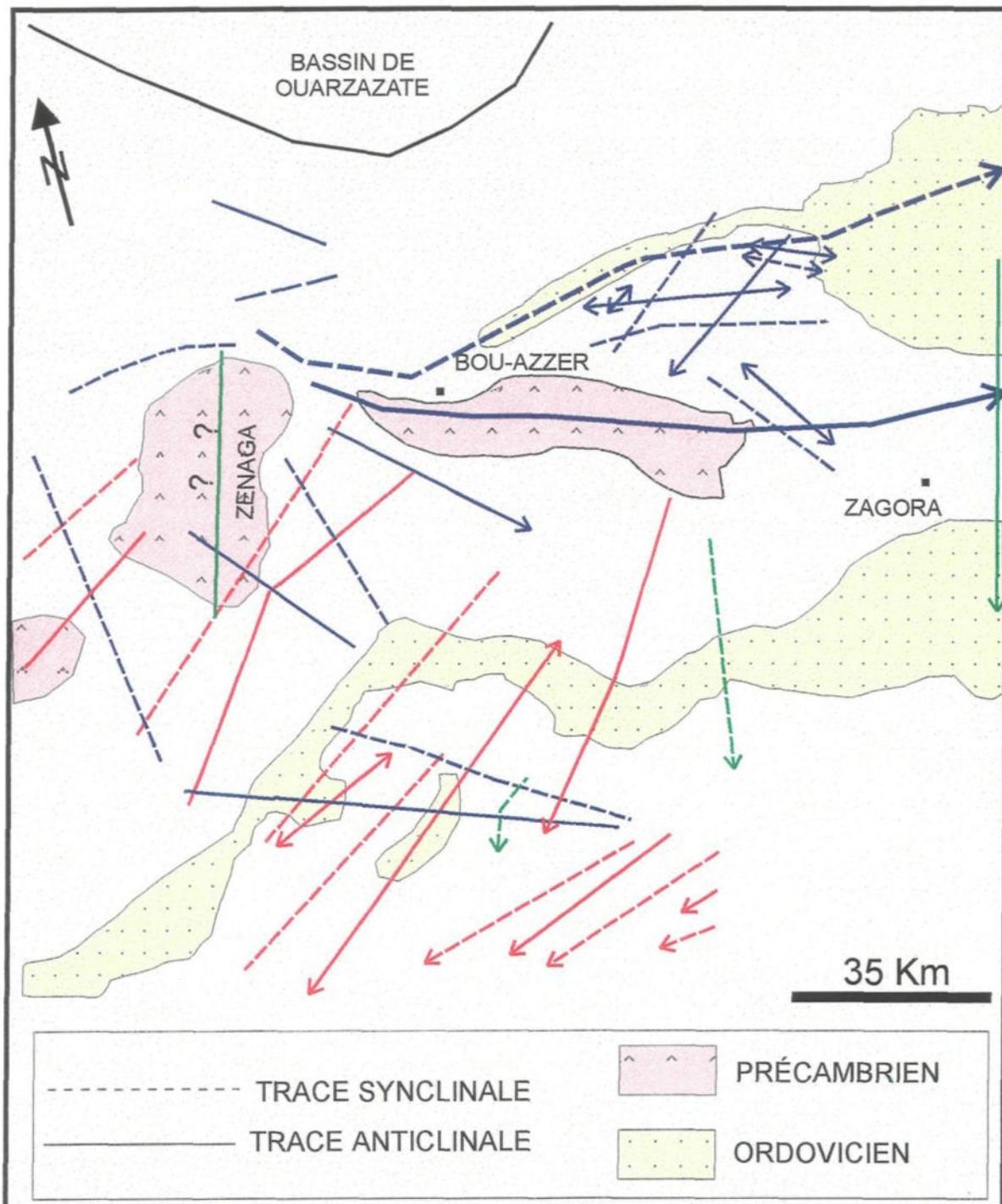


Figure 63: Carte des plis de la région, réalisée à partir de l'interprétation de l'image Landsat-TM. Les traits épais représentent les grands plis anticlinal et synclinal de l'AntiAtlas. Les trois principales directions de plissement sont représentées par des couleurs différentes.

## 5.2- LES LINÉAMENTS ET FAILLES

L'application des quatre filtres directionnels sur la première composante principale de l'image originale (scène 201-39) a permis de rehausser (Figure 64) et d'identifier des lignes de contact et des discontinuités structurales. Ces lignes de contact et de discontinuités structurales sont curvilignes ou rectilignes. Sur l'image, les discontinuités curvilignes peuvent correspondre à un contact géologique alors que les discontinuités rectilignes peuvent correspondre soit à des fractures soit à des dykes étroits. Cette étude s'intéresse essentiellement aux lignes droites ou légèrement courbes (linéaments géologiques) qui pourraient correspondre à des failles certaines. Ces failles pourraient, dans des certains cas, contribuer à fermer des pièges de pétrole amenant les roches réservoirs au contact d'un terrain imperméable.

Les critères qui ont été retenus pour l'identification des linéaments sur l'image sont les suivants: (1) il faut qu'ils soient continus, relativement rectilignes, qu'ils traversent plusieurs formations et qu'ils soient transverses aux contacts; (2) qu'ils soient rectilignes à l'intérieur de la même formation et (3) que leur longueur soit supérieure ou égale à 3,8 km.

### 5.2.1- Extraction des linéaments sur l'image de la zone d'étude

Étant donné la grande dimension de l'image de la zone d'étude, l'analyse a été réalisée sur des surfaces de 57 x 57 km soit 9 sous-images de la grande scène. L'assemblage de ces 9 sous images Landsat-TM a fourni une vue d'ensemble de la région, permettant de cartographier les principaux linéaments et de relever les directions majeures de la fracturation. Ce travail s'intéresse davantage aux failles qu'on trouve dans la couverture infra-cambrienne et paléozoïque et qui pourraient contribuer au piégeage de pétrole.

Les linéaments de la couverture infra-cambrienne et paléozoïque ont été extraits sur l'image filtrée et analysés statistiquement à l'aide de rosaces d'azimuts en longueurs cumulées et en fréquences. Comme le montre la carte de linéaments et la rosace directionnelle (Figure 65 et Tableau 11), les linéaments apparaissent selon quatre concentrations principales: a)- N040° à N069°, b)- N010° à N029°, c)- N100° à N109° et d)- N140° à N159°. Ensemble, elles présentent environ 50% du total des longueurs cumulées et des fréquences.

**N040° à N069°**: le mode de la concentration principale de linéaments se situe dans la classe 040° à 049° et la fréquence devient progressivement plus faible pour les deux autres classes de 10° (Figure 65 et Tableau 10). Les linéaments individuels de ces orientations sont, en moyenne, légèrement plus courts que la moyenne des linéaments relevés. Il faut noter aussi que cette orientation dominante est parallèle à l'allongement de la chaîne de l'Anti-Atlas.

La rosace de la figure 65 démontre les classes **N100° à N109°**, **N010° à N029°** et **N140° à N159°** regroupent les linéaments les moins abondants mais relativement les plus longs de la zone d'étude (Figure 65 et tableau 10).

Certains linéaments ont été identifiés comme failles certaines (représentées en vert sur la carte des linéaments de la figure 65) pour les raisons suivantes: (1)- ce sont des linéaments qui montrent des évidences de mouvement (décalage et troncature) sur l'image, (2)- les linéaments de l'image qui coïncident avec des failles certaines sur la carte géologique du Maroc (Saadi et al 1985) et sur les cartes géologiques télé-analytiques de Emran et al. (1988) et Trefois et al. (1993).

Ce sont les failles NE-SO dont l'orientation coïncide avec l'allongement de l'Anti-Atlas qui sont les plus fréquentes. Certaines de ces failles ont été prolongées sur plusieurs kilomètres au-delà des limites identifiées par les travaux antérieurs, notamment la carte

géologique existante. En plus, il a été constaté que certains de ces linéaments décelés sur l'image filtrée, sont placées à proximité des dômes structuraux (Figure 65) et pourraient avoir une importance majeure en tant qu'éventuels pièges de pétrole.

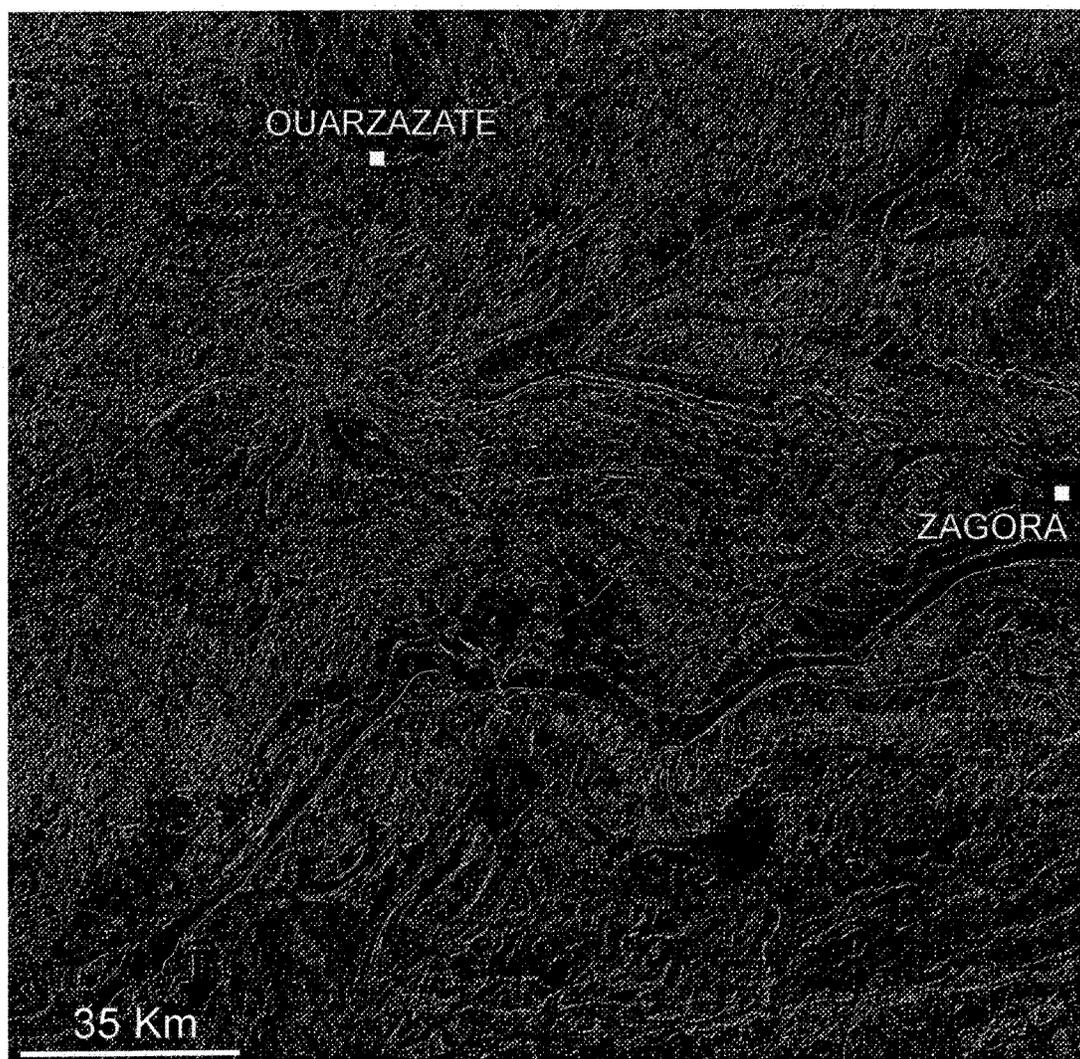


Figure 64: Rehaussement des linéaments de la région d'étude réalisé à partir de l'image Landsat-TM.

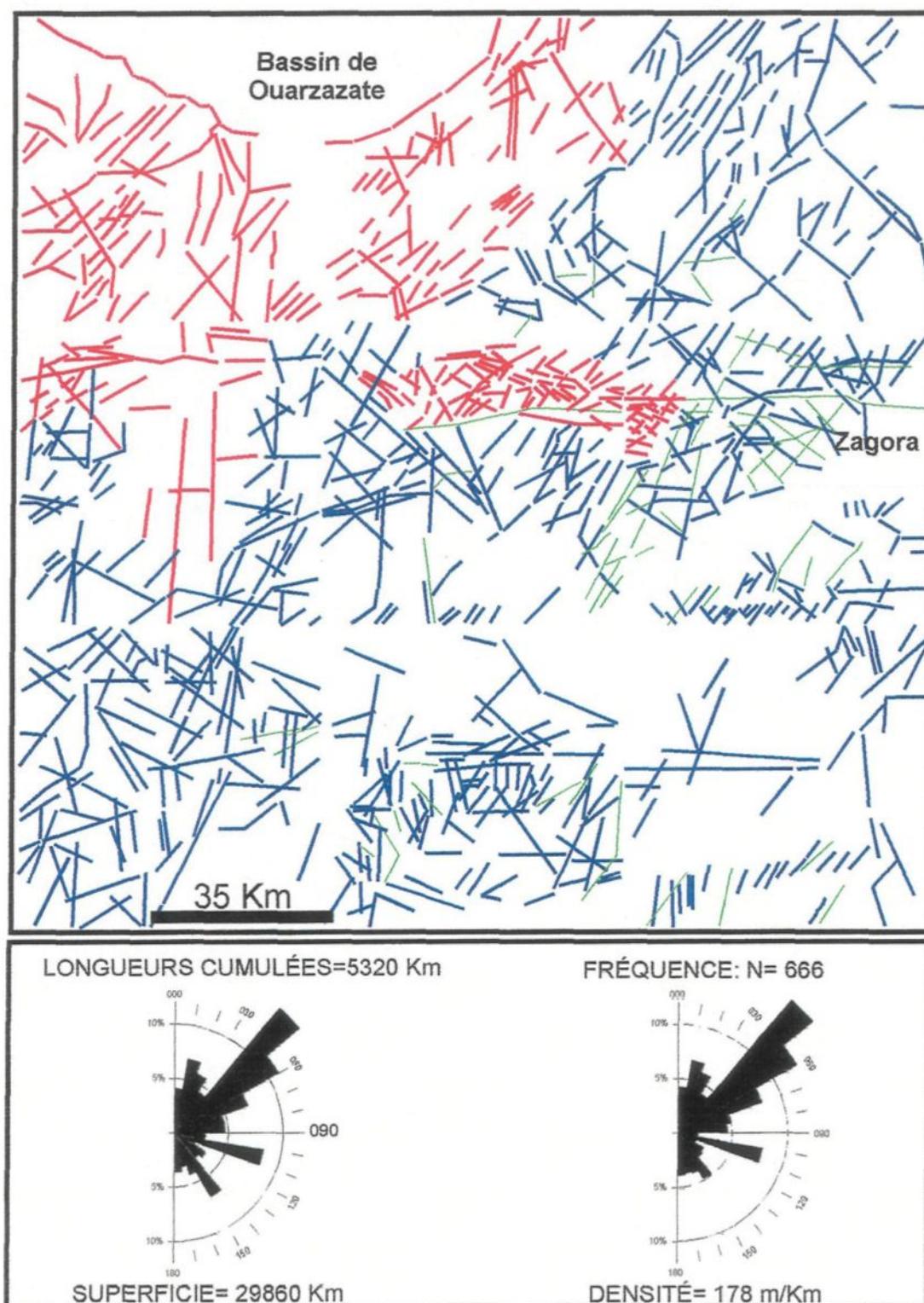


Figure 65: Carte des linéaments de la région d'étude réalisée à partir de l'image Landsat-TM (A) avec en rouge les linéaments précambriens; en bleu, les linéaments paléozoïques; et en vert, les failles certaines. (B): rosaces directionnelles et de fréquences des linéaments paléozoïques.

Tableau 11: Compilation des fréquences et des longueurs cumulées de l'ensemble des linéaments paléozoïques de la zone d'étude.

IDENTIFICAT.	Couverture de la scène totale	SUPERFECIE: 29 860Km <sup>2</sup> ÉCHELLE: 1: 200 000 000
--------------	----------------------------------	--

CLASSE	LONGUEUR CUMULÉE Km	FRÉQUENCE	% LONGUEUR CUMULÉE	% FRÉQUENCE
000-009°	215.05	28	4.04	4.20
010-019°	363.91	45	6.84	6.76
020-029°	306.81	39	5.77	5.86
030-039°	230.3	27	4.33	4.05
040-049°	794.64	106	14.94	15.92
050-059°	584.5	83	10.99	12.46
060-069°	380.97	54	7.16	8.11
070-079°	244.75	32	4.60	4.80
080-089°	248.45	30	4.67	4.50
090-099°	148.22	12	2.79	1.80
100-109°	439.68	52	8.27	7.81
110-119°	107.15	12	2.01	1.80
120-129°	176.19	18	3.31	2.70
130-139°	155.5	19	2.92	2.85
140-149°	355.18	32	6.68	4.80
150-159°	213.21	26	4.01	3.90
160-169°	165.51	25	3.11	3.75
170-179°	189.69	26	3.57	3.90
TOTAL	5319.71	666	100	100
DENSITÉ DES LINÉAMENTS = 178 m/Km <sup>2</sup>				

### 5.3- LES SITES FAVORABLES AUX HYDROCARBURES

La carte lithostratigraphique et structurale, résultant de ce travail, fournit un apport additionnel de données géologiques. Cette carte a été exploitée pour préciser les sites favorables à l'accumulation de pétrole dans la région d'étude. Les réservoirs possibles (Figure 66) sont constitués par les calcaires géorgiens et par les grès géorgiens, acadiens et ordoviciens. Ces unités réservoirs sont facilement discriminées et apparaissent respectivement en violet, en vert blanc, en vert et en bleu sur l'image CRDL. Les couvertures possibles (Figure 66) sont constituées par des schistes gréseux géorgiens et des schistes acadiens et ordoviciens. Ces unités ont été facilement mises en évidence sur la carte résultante, en raison de leur couleur spécifique.

L'interprétation structurale de l'image a permis d'identifier des structures qui semblent être potentiellement intéressantes. Il s'agit de dômes structuraux et de culminations axiales associées à des structures de deuxième et troisième ordre. Un site est considéré comme potentiellement intéressant seulement en présence d'un dôme structural ou d'une culmination, et où une couverture imperméable vient recouvrir les roches réservoirs. Dans la zone d'étude, au moins quatre sites pourraient constituer des pièges de pétrole:

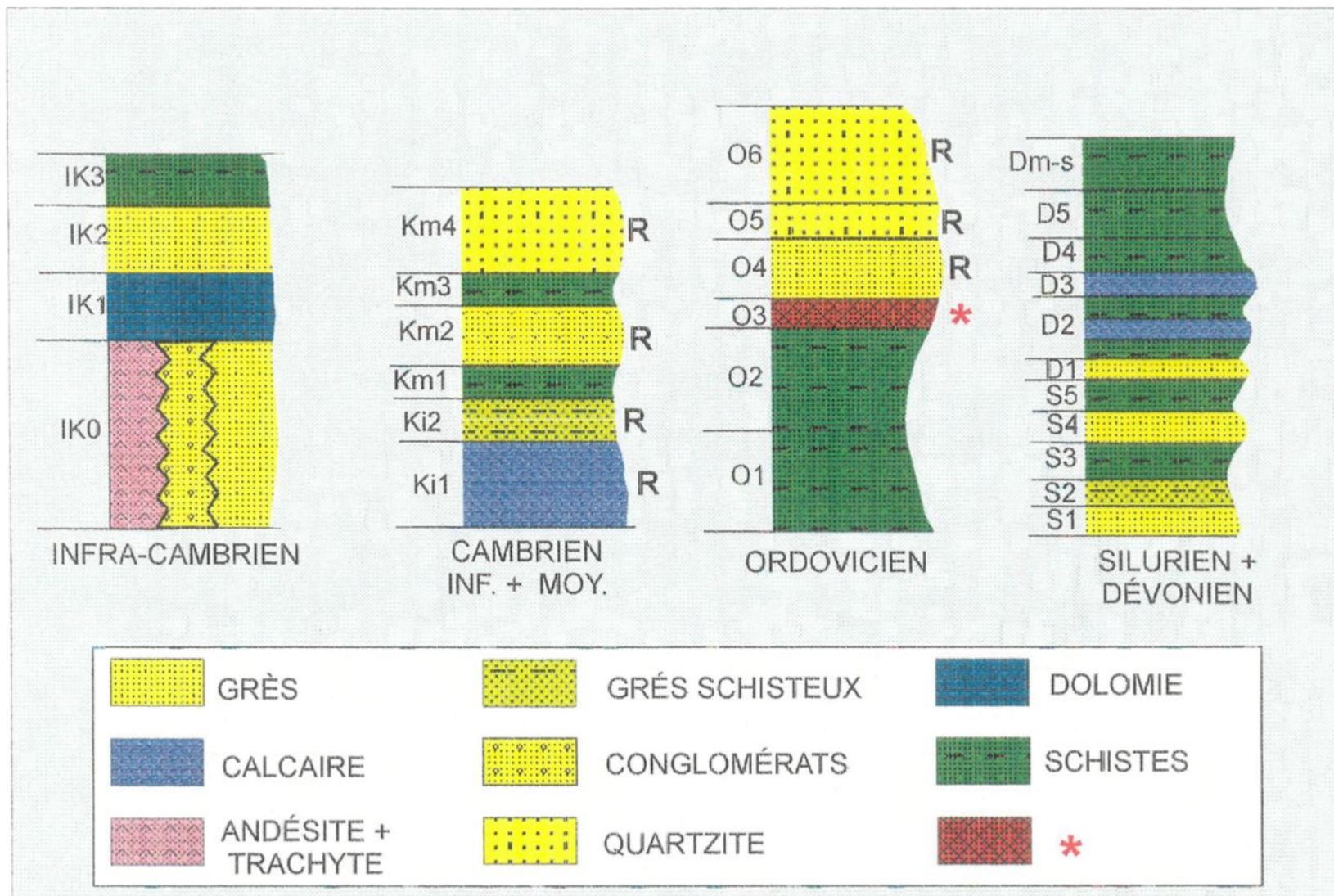


Figure 66: Colonnes stratigraphiques locales provenant du sud de la région d'étude et les réservoirs possibles (R). L'étoile= une unité ordovicienne, identifiée pour la première fois par télédétection

1)- Le premier site correspond au dôme structural et topographique de Jbel Hamsaïlikh qui se localise au sud de Jbel Bani. Cette structure anticlinale est occupée en son centre par les grès d'âge Ordovicien supérieur. Ce dernier est non couvert et ne pourrait pas servir de roches réservoirs dans ce cas. Les roches réservoirs à potentiel correspondent aux calcaires géorgiens et aux grès géorgiens et acadiens alors que les couvertures vont correspondre aux schistes gréseux géorgiens, acadiens et ordoviciens inférieurs (Figures 67 ).

2)- Le deuxième site favorable à l'accumulation d'hydrocarbures se localise dans le même secteur que le premier mais plus à l'ouest. Il s'agit toujours d'un dôme impliquant deux structures anticlinales faillées et au centre duquel affleurent les grès de l'Ordovicien supérieur. Dans ce cas les grès de l'Ordovicien supérieur ne peuvent pas constituer des roches réservoirs. Comme pour le premier site, ce sont les calcaires géorgiens et les grès géorgiens et acadiens qui correspondent à des réservoirs potentiellement intéressants. Les roches qui semblent constituer la couverture pour ce site sont les schistes gréseux géorgiens, acadiens et ordoviciens inférieurs (Figure 67).

3)- Le troisième site, toujours dans le même secteur sud et à l'est du premier, correspond à un dôme structural. Cette structure anticlinale est occupée en son centre par des affleurements du Silurien. Les roches réservoirs potentielles correspondent aux calcaires géorgiens, et aux grès géorgiens (Ki2), acadiens (Km2 et Km4) et ordoviciens

supérieurs (O4, O5 et O6) alors que les couvertures vont correspondre aux schistes gréseux géorgiens, aux schistes acadiens et ordoviciens inférieurs. Toutes les roches réservoirs et couvertures sont couvertes par des terrains postérieurs, ce qui pourrait accroître les possibilités d'accumulations d'hydrocarbures dans ce site (Figure 67 ).

4)- Le quatrième site se localise au nord de la zone d'étude sur le flanc nord de la structure anticlinale de Jbel Bou El Baroud et au sud de la trace axiale du synclinal de premier ordre. C'est une petite structure anticlinale de troisième ordre qui contrairement à Jbel Bou El Baroud a conservé sa couverture imperméable. Cette structure correspond à un dôme structural qui est occupé en son centre par des affleurements gréseux acadiens (Km2). Les roches réservoirs potentielles correspondent aux grès et carbonates géorgiens alors que les couvertures vont correspondre à des schistes gréseux du Géorgien et à la première unité schisteuse (Km1) du Cambrien moyen (Figure 67 ).

Nous avons probablement un réservoir cambrien moyen gréseux (Km2) pour les trois premiers sites potentiels. Comme cette unité (Km2) semble discontinue latéralement, nous n'avons pas la certitude qu'elle existe, ou que les faciès de cette unité favorables à être réservoirs sont effectivement présents à ces endroits.

Les principales structures à intérêt pétrolier du secteur d'étude semblent être les dômes structuraux; ils sont concentrés surtout dans la partie sud de la région d'étude (Figures 67 et 68). La figure 69 montre l'existence d'une fracturation dense autour des trois premiers dômes. Seulement certains linéaments de ce réseau de fractures ont été identifiés comme failles avec certitude (Figure 69). Ces fractures pourraient contribuer à fermer ou à ouvrir le piège selon la géométrie exacte du site. La fracturation peut créer une perméabilité secondaire avec une possibilité que les réservoirs soient vidés. Dans l'autre cas les failles pourraient avoir un rejet normal ou inverse susceptible d'amener les roches réservoirs au contact d'un terrain imperméable.

Il existe dans la région d'autres dômes où le réservoir le plus profond (calcaires géorgiens) est érodé ou absent. Ces dômes ne sont pas favorables aux hydrocarbures (Figure 67).

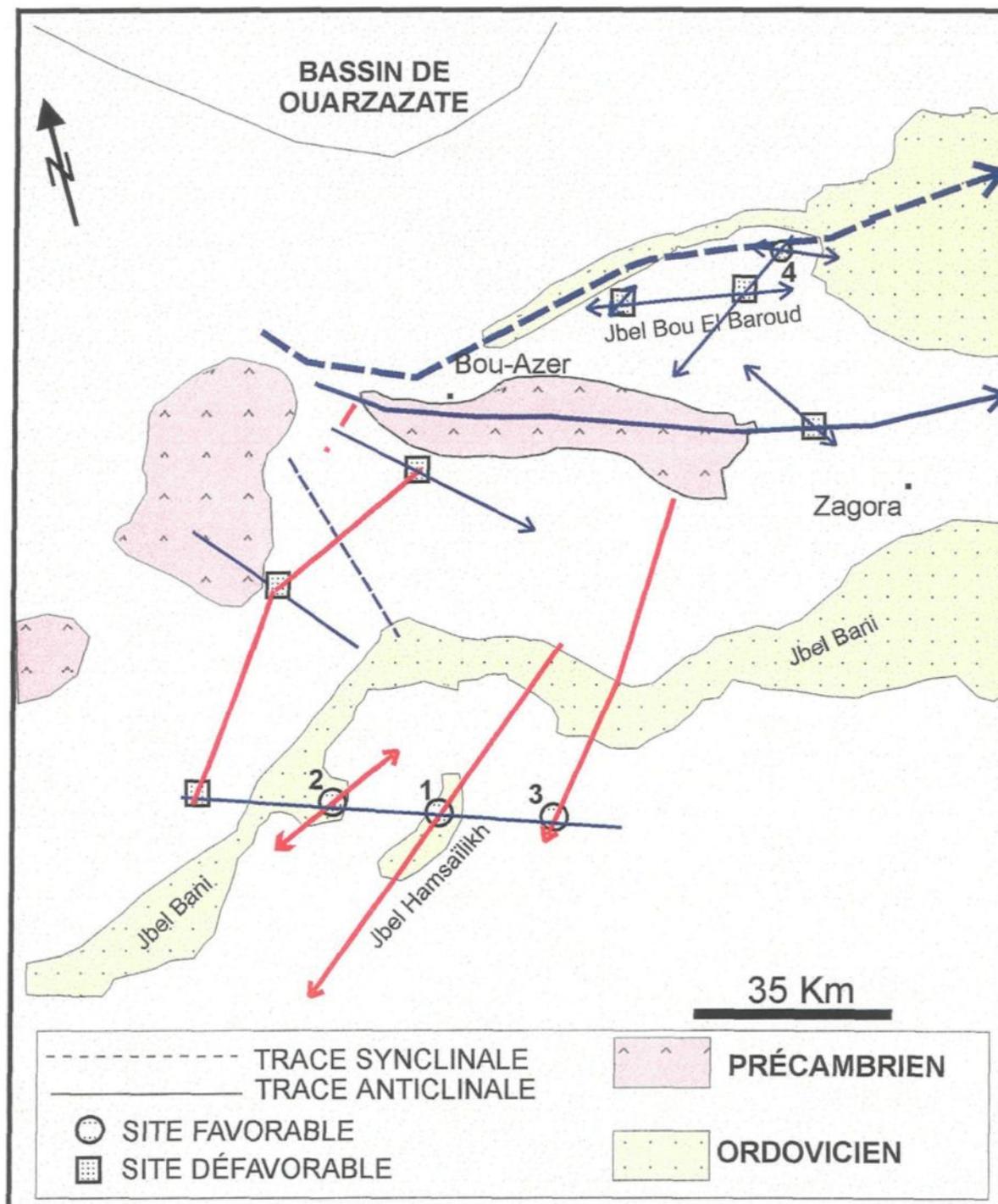


Figure 67: Carte de localisation des sites favorables aux hydrocarbures

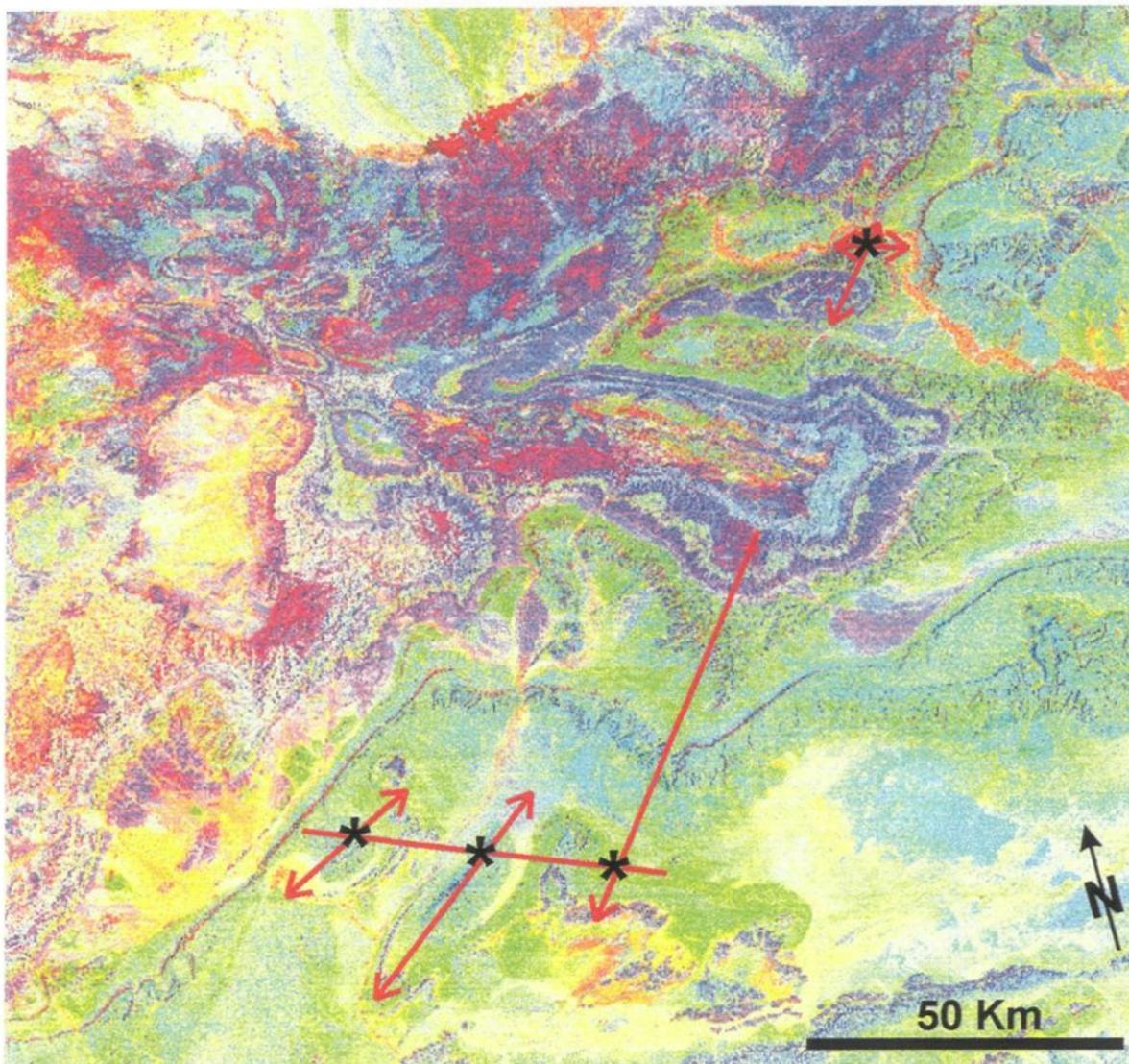


figure 68: Localisation des sites favorables aux hydrocarbures (\*) sur l'image CRDL

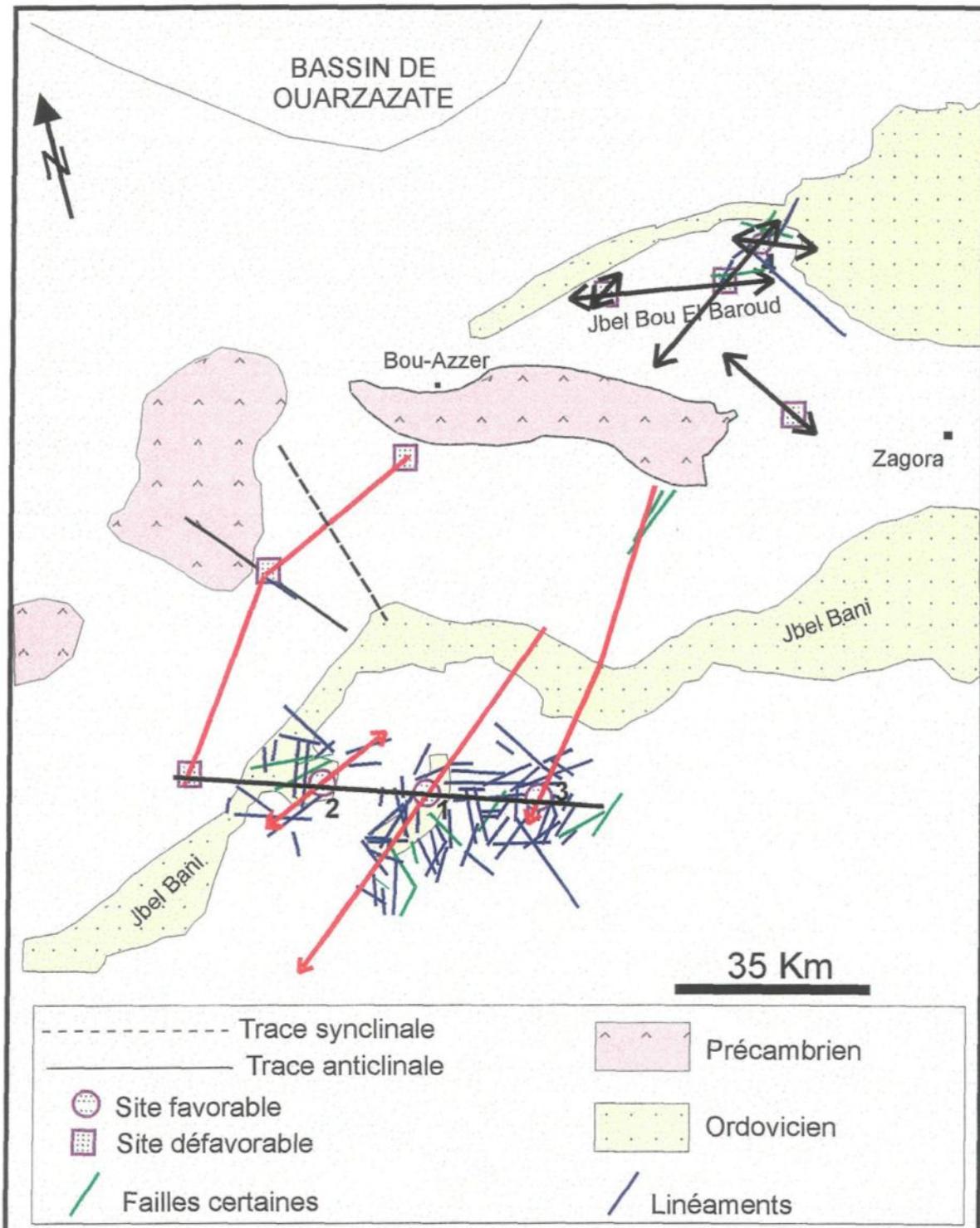


Figure 69: Fracturation autour des sites favorables aux hydrocarbures.

## CHAPITRE 6

### **DISCUSSION**

Ce chapitre discute du choix de la méthode et de ses limites ainsi que de l'information géologique obtenue, de sa validité et des améliorations possibles de différents aspects de la présente étude. Nous y discutons de l'originalité de la méthode utilisée, de ses avantages et de ses limites par rapport à certaines méthodes de la littérature dont certaines proposent des modèles de correction des effets topographiques. Par la suite nous discutons des utilités de l'analyse géomorphologique et à quel point elle peut faciliter la distinction des unités. Nous y discutons aussi des avantages de la carte lithostratigraphique résultante par rapport aux travaux antérieurs et notamment de la carte existante, et nous mettons en valeur le degré de dolomitisation dans la CRDL. Enfin, nous terminerons par une discussion sur l'apport de la télédétection pour localiser les sites favorables aux hydrocarbures.

### 6.1- CHOIX DE LA MÉTHODE

Les données satellitaires de la scène 201-39 sont considérablement influencées par la topographie de la région d'étude. Cette influence a abouti à des valeurs spectrales différentes sur des surfaces de même nature lithologique rendant nécessaire la correction des effets topographiques à l'aide de techniques classiques des rapports de bandes (Sabins 1987, Somma et Cavayas, 1993 et Crippen et al. 1988). L'utilisation de cette technique soulève deux problèmes: 1- la contribution de la lumière diffuse et 2- la multiplicité des rapports de bandes.

Comme pour Sabins (1988), Somma et Cavayas, (1993) et Crippen et al. (1988), la méthode utilisée dans ce travail, permis de réduire l'écart radiométrique dû aux effets topographiques. Cependant elle diffère des autres méthodes par la façon de procéder. En effet, les bandes TM1, TM3, TM4, TM5 et TM7 ont été normalisées suite à une analyse statistique significative. Alors que cette procédure n'a pas été prise en considération par Sabins (1988), Somma et Cavayas, (1993) et Crippen et al. (1988) pour choisir les rapports de bandes susceptibles de réduire les effets topographiques. En plus, le fait que nous ayons éliminé l'effet de l'ombre totale (effets atmosphériques) en soustrayant la valeur du pixel le plus sombre dans les zones d'ombre totale de chaque bande, avant la division de bandes, rend notre méthode plus fiable.

Vu l'importance des résultats, la méthode utilisée reste opérationnellement plus intéressante et rapide d'exécution. Elle offre l'avantage d'une meilleure discrimination lithologique et l'élimination des effets topographiques, alors que pour Somma et Cavayas, (1993) et Crippen et al. (1988), seulement le deuxième aspect a été traité. L'étude des valeurs radiométriques a rendu les résultats obtenus plus significatifs et de qualité supérieure. Il aurait été préférable que des mesures de valeurs radiométriques aient été faites parallèlement sur des échantillons provenant du terrain afin de vérifier si une meilleure concordance de résultats au niveau des signatures spectrales était possible.

## 6.2- UTILITÉS DE L'ANALYSE GÉOMORPHOLOGIQUE

Bien que la méthode employée a généré des corrections des effets topographiques sur toute l'image, les zones d'ombre étaient utiles à la reconnaissance géomorphologique des différentes unités de la zone d'étude. Ces zones d'ombre ont offert une possibilité de voir les différents styles d'érosion qui sont en fonction de la composition lithologique des unités. Alors que dans la CRDL, ces zones d'ombres sont largement atténuées. Les roches de la zone d'étude affleurent en surface, presque sans couverture végétale, c'est pourquoi les formes du relief de la zone d'étude se reconnaissent facilement sur l'image brute et sur la CP1 obtenue à partir de l'image brute, rendant l'analyse géomorphologique très utile et indispensable.

L'analyse géomorphologique a été utilisée pour confirmer l'identification de certaines roches réservoirs qui étaient discernables sur l'image CRDL par leur couleur différente des autres unités. C'est le cas des calcaires dolomitiques géorgiens (Ki1), des grès géorgiens (Ki2) et acadiens (Km2), et des quartzites acadiens (Km4). Alors que pour d'autres roches réservoirs (grès ordoviciens de teinte généralement bleu: O4, O5 et O6) et couvertures (schistes acadiens de teinte généralement vert: Km1 et Km3 et les schistes ordoviciens teinte généralement bleu: O1 et O2), l'identification ne pouvait pas s'appuyer sur les caractéristiques spectrales. Dans ce cas, c'est l'analyse géomorphologique qui a été utilisée pour la distinction et l'identification des unités en question.

Dans un troisième cas, l'analyse géomorphologique a été combinée à l'analyse spectrale pour mettre en évidence une unité ordovicienne (O3) absente sur la carte existante de Saadi et al. (1985) et à laquelle une signature spectro-géomorphologique a été attribuée. D'où l'utilité de l'analyse géomorphologique pour faciliter la distinction des unités lithologiques.

### 6.3- L'INFORMATION GÉOLOGIQUE

#### 6.3.1- Informations lithologiques.

La carte existante de Saadi et al. (1985) est très bonne, il y a des corrections mineures et locales, mais c'est une carte de type chronostratigraphique, ne donnant pas les lithologies. Sur la carte lithostratigraphique, nous avons distingué plus d'unités qu'il y en a de distinguées sur la carte de Saadi et al. (1985). La carte résultante apporte un niveau de détail supérieur à celui de la carte existante. Même comparée à une carte réalisée à partir d'une image Landsat MSS (Emran et al.1988), la carte lithostratigraphique a permis de détailler davantage les lithologies.

Quant à l'accentuation des contrastes de couleur entre les différentes unités, l'image CRDL est largement avantageuse par rapport à celle de Emran et al. (1988). Grâce en grande partie à l'image CRDL à la base de la carte lithostratigraphique, une meilleure discrimination des unités de la couverture infra-cambrienne et paléozoïque a été réalisée et notamment des différentes unités réservoirs et couvertures possibles. La CRDL a permis aussi d'identifier des changements dans la composition latérale des grès infra-cambriens (IK2), une transition progressive latérale entre les unités gréseuses (IK0-e) et les conglomérats (IK0-w) infra-cambriens et une transition latérale nette au nord de la boutonnière de Bou-Azzer pour les unités du Cambrien moyen, alors que ni la carte d'Emran et al. (1988), ni celle de Trefois et al. (1993), ne permettent de voir ces variations de composition.

### 6.3.2- Processus de dolomitisation

La variation de la réponse des carbonates dans la CRDL, qui se manifeste par une variation au niveau de l'intensité de la teinte violet, est en fonction du degré de la dolomitisation. L'étude du degré de dolomitisation est un apport additionnel de cette étude même si ce n'était pas un de ses objectifs. À notre connaissance, la mesure du degré de dolomitisation à l'aide de la télédétection n'a jamais été traitée dans la littérature. Apparemment c'est une nouvelle donnée qui est mise en évidence grâce au traitement développé dans cette étude. Dans la littérature, plusieurs modèles expliquent le processus de dolomitisation (Morrow 1982). Vu les objectifs spécifiques de ce travail, ces modèles n'y seront pas discutés.

Le processus de dolomitisation, impliquant un remplacement partiel probable de la calcite par le magnésium, est moins intense au sud de l'image où les sites favorables aux hydrocarbures sont concentrés. Ce processus de dolomitisation ne semble pas affecter la qualité des réservoirs possibles (calcaires dolomitiques du Cambrien inférieur), puisque les dolomies comme les calcaires peuvent être des réservoirs importants pour le pétrole.

En outre, il a été déjà montré, dans la littérature, que les dolomies pourraient constituer des sites importants pour la minéralisation Pb-Zn. Les résultats du traitement utilisé (CRDL) suggèrent que le nord de la région est marqué par des calcaires dolomitiques, de teinte violet relativement foncé, riches en magnésium (dolomitisation

intense). En plus, d'après la carte existante de Saadi et al. (1985), la région d'étude présente un potentiel de minéralisation de type Pb-Zn très important. Cette minéralisation est localisée essentiellement dans la partie Nord de la zone d'étude et coïncide avec l'abondance des dolomies dans ce secteur.

C'est pourquoi, il semble que le traitement utilisé (CRDL) pourrait aider à optimiser les campagnes de terrain, par la recherche des affleurements plus au moins dolomitiques qui alimentent la recherche minière de type Pb-Zn. En effet, la composition utilisée pourrait constituer un bon outil pour évaluer l'intensité du degré de dolomitisation et peut être devenir une aide à la prospection minière de type Pb-Zn, même si ce n'était pas un des objectifs de cette étude.

### **6.3.3- L'apport de la télédétection pour les hydrocarbures**

Les cartes résultantes de ce travail fournissent un apport additionnel de données géologiques qui ont été exploitées pour préciser les sites favorables aux accumulations de pétrole dans la région d'étude. En effet, l'analyse structurale est généralement possible avec la carte existante. D'ailleurs l'analyse structurale a été faite à partir des deux cartes en combinaison: la carte lithostratigraphique réalisée à partir de l'image CRDL et de la carte géologique existante. La carte lithostratigraphique, issue de ce travail, apporte des informations sur les continuités latérales des lithologies. Cette continuité latérale est un élément essentiel pour le pétrole. Ce dernier se trouve dans des roches réservoirs c'est-à-

dire dans des lithologies. Alors que la carte existante de Saadi et al. (1985) ne donne pas de certitude de continuité latérale même s'il y a une bonne correspondance en général. L'apport de télédétection dans ce travail, c'est de confirmer l'existence de roches réservoirs.

Du point de vue structural, l'image CRDL a permis de suivre les axes des plis et d'utiliser les patrons d'interférence. Les axes de plis ont été localisés, en combinaison avec la carte existante, et en particulier des enlèvements (zones où les plis varient d'amplitude dans le sens de leurs axes) le long des plis du premier ordre. L'utilisation des patrons d'interférence a permis de localiser des sites favorables aux hydrocarbures et ceux-ci ont tendance à se situer dans les dômes structuraux localisés principalement au sud de la zone d'étude.

Les failles de la carte géologique du Maroc (Saadi et al. 1985), sont moins denses que celles qui ont été tracées à partir de l'image satellitaire. La carte de la figure 65 montre dans certains cas une bonne superposition entre certaines failles de l'image satellitaire et celles de la carte géologique du Maroc. Cependant, certains linéaments de l'image filtrée montrent des décalages apparents et sont interprétés comme failles certaines (failles en vert sur la figure 65). Ces dernières, malgré leur longueur importante, ne figurent pas sur la carte existante de Saadi et al. (1985). Des vérifications sur le terrain s'imposent pour trancher de la nature de ces éventuelles failles.

## CHAPITRE 7

### CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

#### 7.1- CONCLUSIONS

L'image Landsat-TM de l'Anti-Atlas a été utilisée pour raffiner et améliorer la carte géologique existante. L'utilisation de la bande TM2 comme diviseur commun des bandes TM1, TM3, TM4, TM5 et TM7 et l'utilisation de divers traitements numériques spécialisés sur l'image (rapport de bandes, analyse en composantes principales et signatures spectro-géomorphologiques) ont permis d'obtenir l'image CRDL sur laquelle la perception des formes du relief est beaucoup atténuée par rapport à l'image brute. En effet, la méthode suivie dans ce travail a permis d'une part de minimiser l'effet topographique et d'autre part de maximiser la discrimination lithologique tout en donnant un meilleur contraste entre les diverses unités de la zone d'étude.

La carte réalisée par télédétection est surtout plus détaillée: 27 unités stratiformes dans la couverture infra-cambrienne et paléozoïque au lieu de 9 qu'on trouve sur la carte existante. Cette dernière est généralement fiable à part quelques corrections locales.

La carte lithostratigraphique réalisée par télédétection a permis: (1) de mettre en évidence quelques variations latérales de composition des unités gréseuses IK2 et une transition latérale progressive entre les grès IK0-e et les conglomérats IK0-w (2) d'identifier un changement dans l'intensité de teinte violet pour les calcaires dolomitiques (Ki1) du Cambrien inférieur, qui pourrait être due à un processus de dolomitisation. Donc le degré de dolomitisation est peut-être mesurable avec la méthode de traitement qui a été développée (CRDL). Les calcaires marneux dévoniens sont caractérisés sur la CRDL par une teinte bleu clair différente de celle des carbonates infra-cambriens et géorgiens. La composante marneuse des calcaires dévoniens semble responsable de cette différence de couleur. De plus les zones qui semblent fortement dolomitisées, présentent un potentiel de minéralisation de type Pb-Zn très important; (3) de mettre en évidence pour la première fois: **a)** une unité ordovicienne (O3) nouvelle, **b)** un doublet rouge au sommet du Cambrien moyen et **c)** une masse rouge dans l'extrémité sud-ouest du Jbel Bou El Baroud qui pourrait correspondre à des trachytes. Ces trois unités (a, b et c) apparaissent sur l'image alors qu'elles ne figurent pas sur la carte géologique existante. Ceci a permis d'améliorer et d'apporter des précisions sur ces unités qui pourraient faire l'objet d'une vérification sur le terrain. Il faut vérifier aussi la nature des taches plaquées sur Km4 au sud de la boutonnière de Bou-Azzer; (4) de préciser que les unités du Cambrien moyen montrent des transitions verticales graduelles entre elles, une transition latérale nette au nord de la boutonnière de Bou-Azzer, et, peut-être, un changement d'épaisseur entre le centre étudiée et son coin nord-est où on note un amincissement de ces unités. Cependant, la distinction des

unités de l'Acadien demeure relativement difficile. C'est pourquoi nous suggérons une étude spécifique de ces unités et en particulier de celles au nord de la boutonnière de Bou-Azzer; (5) la possibilité de cartographier et d'identifier par télédétection la variété des couvertures sur les schistes de l'Ordovicien inférieur et autres sur la composition 5/2, 7/2, 4/2 en RVB; (6) d'identifier les caractéristiques spectrales de quartzites et des carbonates de l'Anti-Atlas central et qui peuvent être exploitables dans régions désertiques semblables; (7) de discriminer et d'identifier d'une façon claire, sauf les schistes et les grès de l'Acadien, la continuité latérale des roches réservoirs et couvertures possibles et (8) à la fois de diminuer le prix de revient des cartes géologiques et d'accroître leur précision.

Cette étude a abouti aussi à la réalisation de deux cartes structurales: 1- une carte de plis et 2- une carte de linéaments et de failles. Ces cartes ont permis de voir une représentation d'ensemble continue et exacte de la région d'étude, de ses structures (plis et fractures) et de sa morphologie avec une vision à une petite échelle (1 : 500 000), soit 34 000 km<sup>2</sup> ou 185 x 185 kilomètres environ alors que ni le terrain ni les photographies aériennes classiques n'offrent un tel avantage et surtout ne présentent pas l'homogénéité nécessaire à une étude d'ensemble.

La carte des plis a permis de démontrer l'existence de trois directions de plissement de second ordre dans la région d'étude qui interfèrent les unes avec les autres pour former un patron de dômes et bassins d'allongement et d'orientations variés. La localisation des axes de plis, et en particulier les ensellements le long des charnières des plis de premier ordre ainsi que les dômes structuraux de deuxième et troisième ordre, a permis de localiser les structures potentiellement favorables par télédétection (pièges) au piégeage du pétrole.

La carte de linéaments et des failles a permis (1) de détecter des failles qui apparaissent sur l'image Landsat-TM alors qu'on ne les distingue pas sur les cartes géologiques et de prolonger certains accidents de la carte géologique et (2) de détecter quelques failles qui pourraient contribuer à la fermeture de pièges de pétrole.

## 7.2- RECOMMANDATIONS

À la lumière des résultats de cette étude, il est évident que l'Anti-Atlas présente des sites favorables pour la recherche pétrolière, c'est-à-dire des roches couvertures qui se superposent aux roches réservoirs dans les principales structures à intérêt pétrolier (les dômes structuraux). Au moins quatre sites pourraient être potentiellement intéressants et constituer des possibilités de gisements si les roches réservoirs renferment du pétrole. L'absence de roches réservoirs au sein de plusieurs culminations de la zone d'étude, rend ces structures défavorables à l'accumulation d'hydrocarbures.

Il faut donc chercher les possibilités de gisements surtout, (1) à la faveur des dômes structuraux. Trois des quatre sites favorables aux hydrocarbures sont localisés dans la partie sud de la région d'étude: la structure anticlinale de Jbel Hamsaïlikh, le deuxième et le troisième sites sont localisés de part et d'autre de Jbel Hamsaïlikh, toujours dans la partie sud de l'image. Le quatrième site est localisé dans la partie Nord de l'image et plus précisément au nord de Jbel Bou El Baroud et (2) dans le prolongement des culminations, à l'extérieur de la région vers l'est et le sud-est et qui pourraient être potentiellement intéressantes.

Ce serait donc dans ces deux zones que se situeraient les parties les plus intéressantes pour les recherches de territoires à prospecter pour le pétrole dans les affleurements paléozoïques. Il faut donc procéder à des méthodes géophysiques pour évaluer et préciser les possibilités indiquées par l'analyse par télédétection.

## RÉFÉRENCES

- AL-FASATWI, Y.A., et VAN-DIJK, P. M. 1989. Lineament and geomorphic analysis of remote sensing data as an aid to hydrocarbon exploration, Sirt Basin, Libya. *ITC Journal*, **2**: 137-144.
- BENZIANE, F. 1974. Étude pétrologique et géochronologique des granites de la boutonnière précambrienne d'Ifni. Thèse Doctorat de 3<sup>e</sup> cycle, Grenoble, France.
- BENZIANE, F., YAZIDI, A., et PROST, A. E. 1983. Le passage du Précambrien au Cambrien précoce volcanique et sédimentaire de l'Anti-Atlas oriental: comparaison avec l'Anti-Atlas occidental. *Bulletin de la Société géologique de France*, **25**: 549-556.
- BONN, F. et ROCHON, G. 1992. *Précis de télédétection*. Volume 1: Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec.
- BRPM 1961a. Étude stratigraphique des séries du Géorgien à l'Acadien de la région d'Aguerd (Anti-Atlas occidental). Bureau de Recherches et de Participations minières. *Rapport géologique*, **4**: 1-18
- BRPM 1961b. Étude stratigraphique des séries du Géorgien à l'Ordovicien de la région de Foun Akka ou Tamia (Caidat d'Akka) Anti-Atlas occidental. Bureau de Recherches et de Participations minières. *Rapport géologique*, **5**: 1-21

- BRPM 1962. Étude pétrographique des séries du Géorgien à l'Ordovicien de la région d'Aguerd (Anti-Atlas occidental). Bureau de Recherches et de Participations minières. Rapport géologique, 7: 1-23
- CARTER, J.S., et KOGER, D.G. 1988. Successful applications of remotely sensed data for oil and gas exploration. Proceedings of the Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 6: 19-25.
- CHOUBERT, G., et NELTHER, L. 1948. Compte-rendu de la tournée effectuée dans l'Anti-Atlas. Bureau de Recherche et de Participation minière (DE/DD REF 10008), 1: 1-14.
- CHOUBERT, G. 1957. Lexique stratigraphique du Maroc. Notes et mémoires du service géologique du Maroc, 134: 1-165.
- CHOUBERT, G. 1967. Histoire géologique du Précambrien de l'Anti-Atlas. Notes et mémoires du service géologique du Maroc, 162: 1-352.
- CHOUBERT, G. 1968. Note sur le mécanisme probable de granitisation: application à certains granites africains. UNESCO.
- CHOUBERT, G. 1974. Essai de comparaison du Précambrien terminal, le Cambrien inférieur de Sibérie et de Normandie (Carteret). Réunion annuelle des sciences de la terre, 2: 111 p.

- COSTAGLIOLA, A. 1992. Concepts de la géologie structurale et possibilités pétrolières dans le bassin de Ouarzazate. Office National de Recherches et d'exploitations pétrolières. First Conference on Petroleum exploration, 53 p.
- CRIPPEN, R. E, BLOM, R.G, ET HEYADA, J.R. 1988. Directed band ratioing for the retention of perceptually independent topographic expression in chromaticity-enhanced imagery. *International Journal of Remote sensing*, **9**: 749-765.
- DEKKER, F., BALKWILL, H., SLATER, A., HERNER, R., et KAMPSCHUUR, W. 1989. Hydrocarbon exploration through remote sensing and fieldwork in the onshore eastern Papuan fold belt, Gulf province, Papua New Guinea. Proceedings of the Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, **7**: 65-80.
- DING, X., WANG, Y-P., et HE, Z-C. 1993. The application research of satellite remote sensing to exploration of hydrocarbon alteration information. *Chinese Science Bulletin*, **38**: 1475-1479.
- DUCROT, J., et LANCELOT, J. R. 1977. Problème de limite Précambrien-Cambrien: étude radiochronologique par la méthode U-Pb sur zircons du volcan Jbel Boho (Anti-Atlas marocain). *Journal canadien des Sciences de la Terre*, **14**: 2771-2777.
- DUNCAN, I. J., RIVARD, B., ARVIDSON, R.E., et SULTAN, M. 1989. Structural interpretation and tectonic evolution of a part of Najd shear zone (Saudi Arabia) using Landsat thematic-mapper data. *Tectonophysics*, **178**: 309-335.

- EMRAN, A., CHOROWICZ, B., LYBRIS, N., TAMAIN, G., et ALEM, M. E. 1988. Cartographie géologique et analyse de la fracturation du sud de l'Anti-Atlas central (Maroc) à partir d'une image Landsat MSS. *Photo-Interprétation*, 2: 1-10.
- ESCADAFAL, R et POUGET, N. 1987. Cartographie des formations superficielles en zone aride (Tunisie Méridionale) avec Landsat-TM. *Photo-Interprétation*, 4: 9-13.
- FREI, M., et JUTZ, S.J. 1989. Use of Thematic Mapper data for detection of gold bearing formations in the Eastern desert of Egypt. *Proceedings of the seventh Thematic Conference on geologic Remote Sensing*, 7: 1157-1172.
- FOUCAULT, A et RAOULT, J-F. 1988. *Dictionnaire de Géologie*. 3 e édition. Éditeur Masson, France.
- HASSENFORDER, J. 1987. La tectonique pan-africaine et varisque de l'Anti-Atlas dans le massif de Kerdous (Maroc). Thèse de doctorat és-Sciences, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.
- GESS, G., CHOROWICZ, J., BECUE. B., CURNELLE, R., DEROIN, J-P., HUGER, J., PERRIN, G., et RONFOLA, D. 1988. Méthodologie d'utilisation de l'imagerie spatiale SPOT pour l'exploration pétrolière. *Techniques spatiales*, 1: 811-824.
- GUILLEMOT, J. 1964. Cours de géologie du Pétrole. Cours de l'école nationale supérieure du pétrole et des moteurs. Société des éditions Technip, 321 p.

- HOBSON, G. D., et TIRATSOO, E. N. 1981. Introduction to petroleum geology. Second Edition. Edited by Gulf Publishing Company Houston, Texas.
- HOPKINS, J.C. 1992. Porosity development within Devonian reefs and associated carbonates of Morocco. Office National de Recherches et d'exploitations pétrolières. First Conference on Petroleum exploration., 13 p.
- JABOUR, H. 1992. Depositional environments and hydrocarbon potential of the Devonian rocks of the Doukkala basin. Office National de Recherches et d'exploitations pétrolières. First Conference on Petroleum exploration., 34 p.
- KOGER, D.G., et CARTER, J.S. 1988. Use of remotely data in mature exploration: considerations on creating useful imagery. Proceedings of the Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 6: 103-109.
- LEBLANC, M., et MOUSSINE-POUCHKINE, A. 1994. Sedimentary and volcanic evolution of a Neoproterozoic continental margin (Bleida, Anti-Atlas, Morocco). *Précambrian Research*, 70: 25-40.
- MADEIRA NETTO, J. da S. 1996. Spectral reflectance properties of soils. *Photo-Interprétation*, 34: 59-70.
- MARRS, R.W. 1989. Remote sensing in petroleum exploration Field trip: Denver Basin, Colorado. Proceedings of the Thematic Conference on Geologic Remote Sensing , 7: 43-47.

- McCOY, R.M., SCOTT, L.F. et HARDIN, P.J. 1989. The spectral response of sagebrush in areas of hydrocarbon production. *Proceedings of the Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*, 7: 751-755.
- MERIN, I. S. 1988. Identification of cross strike Discontinuities in the Appalachian Basin and implication for hydrocarbon exploration. *Proceedings of the Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*, 6: 93-102
- MITRA, D. S., BHOJ, R., et JOSHI, S. V. 1992. Evaluation of Rajasthan desartic terrain, India, for logistic support in oil exploration using Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 13: 2773-2778.
- MOORE, J., et LIU, J. 1990. Image enhancement of epithermal gold deposit alteration zones in southeast Spain. *Remote Sensing: an operational technology for the mining and petroleum industries*, 49-58.
- MORABET, A. 1992. Historique de l'exploration pétrolière au Maroc. Office National de Recherches et d'exploitations pétrolières. *First Conference on Petroleum exploration*, 8-9 p.
- MORROW, D. W. 1982. Diagenesis, dolomite, Part 2, Dolomitization models and ancient dolostones. *Geoscience Canada*, 9: 95-107

- ONAREP. 1991. Tournée géologique dans le Paléozoïque de l'Anti-Atlas. Livret guide. Office National de Recherches et d'exploitations pétrolières (DE/DD REF 10139).
- ONAREP. 1992. First Conference on Petroleum exploration. Office National de Recherches et d'exploitations pétrolières.
- PONTUAL, A. 1989. Lithological information in enhanced Landsat Thematic mapper images of arid regions. Proceedings of the Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 7: 379-393.
- ROLET, J., YÉSOU, H., et BESNUS, Y. 1993. Structures circulaires et réseaux de fracture en pays granitique. Analyse de données SPOT, Landsat-TM et Seast sur le massif armoricain. Bulletin de la Société géologique de France, 164:199-214.
- ROUWANE, A., DEHBI, M., et BOUAMAMA, H. 1992. Contribution de la géophysique à la recherche pétrolière au Maroc. Office National de Recherches et d'exploitations pétrolières. First Conference on Petroleum exploration., pp. 41-42.
- SAADI, M. 1982. Schéma structural du Maroc au 1: 4000 000. Notes et mémoires du service géologique du Maroc No 278B.
- SAADI, M., HILALI, E.A et BOUDA, A. 1985. Carte géologique du Maroc au 1: 1000 000. Édition du service géologique du Maroc.
- SABINS, F.F. 1987. Remote sensing: Principles and interpretation, second edition. Edited by Freeman and Co, New York.

- SOMMA, J, et CAVAYAS, F. 1993. Comparaison de différentes méthodes de rapports de bandes pour l'application de la télédétection satellitaire à la reconnaissance géomorphologique d'un milieu montagneux subarctique semi-aride. Télédétection appliquée à la cartographie thématique. Édition AUPELF-UREF, pp.55-64.
- SULTAN, M., ARVIDSON, R.E., et STURCHIO, N. C. 1986. Mapping of serpentinite in the Eastern Desert of Egypt by using Landsat thematic mapper data. *Geology*, **14**: 995-999.
- SULTAN, M., ARVIDSON, R.E., STURCHIO, N. C., et GUINNESS, E. 1987. Lithologic mapping in arid regions with Landsat mapper data: Meatiq dome, Egypt. *Geological Society of America Bulletin*, **99**: 748-762.
- SULTAN, M., ARVIDSON, R.E., et DUNCAN, I.J. 1988. Extension of the Najd shear system from Saudi Arabia to the central Eastern Desert of Egypt based on integrated field and Landsat observations. *Tectonics*, **7**: 1291-1306.
- THIESSEN, R.L., SOOFI, K., et SHELINE, H. 1993. A New, Expandable Detector Applied to Digital Topography and TM Image Data in Support of petroleum Exploration. *Proceedings of the Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*, **11**: 383-394.
- TREFOIS, P., VOLON, C., et ZAKI, M. 1993. Targeting Cobalt mineralisations by remote sensing in the district of Bou-Azzer El Graaara (Anti-Atlas, Morocco). *Proceedings of the Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*, **11**: 183-194.