

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département : Génie Minier
Mémoire de projet de fin d'études
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier

**Contribution de la télédétection à la prospection minière
comparative entre les gisements métalliques ferrifères
d'Algérie.**

**Cas des gisements d'Ouenza, au Nord-Est d'Algérie et de Gara-
Djebilet au Sud-Ouest d'Algérie.**

Yasmine KASMI

Feriel ADJAOUT

Sous la direction du promoteur Mr. Larouci CHANANE

et du co-promoteur Mr. Yacine BOUROUBI

Présenté et soutenu publiquement le 04 juillet 2019

Composition du jury :

Présidente	Mme. Amira MERCHICHI	MAA	ENP
Promoteur	M. Larouci CHANANE	MAA	ENP
Co-promoteur	M. Yacine BOUROUBI	Professeur	UdeS
Examineur	M. Djamel BENKACI	MAB	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département : Génie Minier
Mémoire de projet de fin d'études
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier

**Contribution de la télédétection à la prospection minière
comparative entre les gisements métalliques ferrifères
d'Algérie.**

**Cas des gisements d'Ouenza, au Nord-Est d'Algérie et de Gara-
Djebilet au Sud-Ouest d'Algérie.**

Yasmine KASMI

Feriel ADJAOUT

Sous la direction du promoteur M. Larouci CHANANE et du co-promoteur
M. Yacine BOUROUBI

Présenté et soutenu publiquement le 04 juillet 2019

Composition du jury :

Présidente	Mme. Amira MERCHICHI	MAA	ENP
Promoteur	M. Larouci CHANANE	MAA	ENP
Co-promoteur	M. Yacine BOUROUBI	Professeur	UdeS
Examineur	M. Djamel BENKACI	MAB	ENP

DEDICACES

A nos familles et amis.

A tous ceux qui nous sont chers.

C'est pour vous que ce mémoire est dédié.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de notre stage et qui nous ont aidés lors de la réalisation de ce projet de fin d'études.

Nous voudrions dans un premier temps remercier vivement, notre directeur de mémoire M.CHANANE, enseignant à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour sa patience, sa disponibilité, son soutien et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion. Assurément, sans lui nous n'aurions pas abouti à ce résultat que nous soumettons à l'appréciation du jury.

Nous tenons à témoigner toute notre gratitude à notre co-directeur M.BOUROUBI, professeur à l'Université de Sherbrooke et qui nous a permis de réaliser ce stage. Il a partagé avec nous ses connaissances et expériences, tout en accordant sa confiance et une large indépendance dans l'exécution de nos missions.

Nous adressons également nos remerciements à tous les enseignants du département Génie Minier, pour leurs apports en flux de savoir.

Nous voudrions remercier les membres du jury, Mme. MERCHICHI et M. BENKACI pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Monsieur Mohamed HAMDI, à qui nous adressons nos sincères remerciements, pour son aide précieuse, son soutien constant et ses encouragements.

Monsieur Ludovic LEGROS, pour nous avoir communiqué des données indispensables pour la réalisation de notre étude.

ملخص

يعتبر الاستشعار عن بعد أحد التخصصات التي قدمت في السنوات الأخيرة أبعادًا جديدة للأبحاث في مجال علوم الجيولوجيا من أجل خلق فرص جديدة للباحثين، خاصة في مجال رسم الخرائط الجيولوجية والمنجمية المخصصة للتنقيب في المناطق التي يتعذر الوصول إليها، والتي تقع في مناطق جيولوجية مختلفة، سواء كانت جافة ذات مناطق قاحلة أو رطبة ذات غطاء نباتي.

هذا العمل هو دراسة لرسم الخرائط الجيولوجية، باستعمال مختلف تقنيات الاستشعار عن بعد، من أجل الحصول على البيانات الجغرافية والجيولوجية ثم تمثيلها، تحليلها ودمجها من خلال جمع، معالجة ونشر البيانات الجيولوجية بهدف إجراء استطلاع جيولوجي موثوق به، والمقارنة النسبية بين منطقتين جيولوجيتين في الجزائر: جبل الونزة في الشمال الشرقي، و غار جبيلات في الجنوب الغربي، وهذا من خلال تقييم مساهمة الاستشعار عن بعد متعدد الأطياف وخاصة استخدام صور *Landsat-8* OLI في التمييز الليثولوجي من أجل اكتشاف ورسم الحدود الجغرافية الممتدة، مما قد يسهل من عملية تصميم نماذج ثلاثية الأبعاد للرواسب الحديدية لكل منطقة جيولوجية ومقارنتها مع نتائج البحوث الأكاديمية الكلاسيكية السابقة.

الكلمات الدالة : الاستشعار عن بعد، التخطيط الجيولوجي والمعدني، الصور الفضائية، خام الحديد.

ABSTRACT

Remote sensing is a discipline that in recent years has introduced new dimensions of research In geosciences in order to create new opportunities to geologists, particularly in geological and mining mapping destined for mining prospection and in inaccessible areas, located in different geological regions, whether they are desert with arid areas or humid with vegetated areas as well.

This work is part of a geomatic mapping study, involving the commitment of various remote sensing techniques, *bringing together all the tools and methods to acquire, represent, analyze and integrate geological and geographic data through the collection, processing and diffusion of geological data*, with the aim to perform a promising geological recognition as reliable as possible and a comparative dimensioning between the two geological regions of Algeria, namely *Djebel-Ouenza* in the North -East and *Gara-Djebilet* in the South-West, and this, by evaluating the contribution of multi-spectral remote sensing and particularly the use of *Landsat-8-OLI* images support media in lithological discrimination in the perspective of the detection and mapping of boundaries and extended geological and geographical areas, *possibly leading to 3D modeling*, of ferriferous metal deposits of each geological region and compare them with the results of previous classical academic research. On the other hand, it should be noted that the results of this research work have been better and more perceivable in Gara-Djebilet than that in Ouenza.

Key words : Remote sensing, geological and mineral mapping, satellite images, iron ore.

RESUME

La télédétection est une discipline, qui durant les dernières années a introduit de nouvelles dimensions de recherches dans les géosciences permettant de créer de nouvelles opportunités qui s'offrent aux géologues, particulièrement lorsqu'il s'agit de la cartographie géologique et

minière destinée à la prospection et exploration minière en zones inaccessibles, situées dans différentes régions géologiques qu'elles soient désertiques à surfaces arides ou humides à surfaces végétalisées.

Le présent travail, s'inscrit dans le cadre d'une étude de cartographie géomatique, impliquant l'engagement des diverses techniques de télédétection, *regroupant l'ensemble des outils et méthodes permettant d'acquérir, de représenter, d'analyser et d'intégrer les données géologiques et géographiques au moyen de la collecte, traitement et diffusion des données géologiques*, dans le but d'effectuer une reconnaissance géologique prometteuse aussi fiable que possible et un dimensionnement comparatif entre les deux régions géologiques d'Algérie soit *Djebel-Ouenza* au Nord-Est et *Gara-Djebilet* au Sud-Ouest, et ce, par l'évaluation de la contribution de la télédétection multi-spectrale et particulièrement l'utilisation des supports-images **Landsat-8-OLI** dans la discrimination lithologique dans l'optique de la détection et la cartographie des limites et étendues géologiques et géographiques, *pouvant déboucher éventuellement sur une modélisation en 3D*, des gisements métalliques ferrifères de chaque région géologique et établir un comparatif par rapport aux résultats des travaux de recherches académiques classiques antérieurs. Par ailleurs, notons en substance que les résultats de ce travail de recherche ont été meilleurs et beaucoup plus perceptibles au niveau de Gara-Djebilet qu'à Ouenza.

Mots clés : Télédétection, cartographie géologique et minérale, images satellites, minerai de fer.

Table des matières

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations et symboles	
Liste des sigles	

INTRODUCTION GENERALE	16
------------------------------	----

CHAPITRE 1 : Cadre géographique et contexte géologique des zones d'étude

Introduction	19
1. Géologie régionale	20
1.1. Les monts Mellègues	20
1.1.1. Cadre géographique	20
1.1.2. Contexte de géologie structurale	20
1.1.3. Contexte de géologie lithostratigraphique	22
1.2. Le bassin de Tindouf	25
1.2.1. Cadre géographique	25
1.2.2. Contexte géologique	26
2. Géologie locale des zones d'étude	32
2.1. Gisement ferrifère de Djebel Ouenza	32
2.1.1. Localisation du cadre géographique	32
2.1.2. Contexte géologique	33
2.2. Gisement ferrifère de Gara-Djebilet	36
2.2.1. Localisation du cadre géographique	36
2.2.2. Contexte géologique	38
Conclusion	43

CHAPITRE 2 : Télédétection au profit de la prospection minière

Introduction	45
1. Historique de la télédétection	46
2. Notions de télédétection	46
2.1. Définition générale de la télédétection	46
2.2. Principe de fonctionnement	47
2.2.1. La source d'énergie	47
2.2.2. L'atmosphère	48
2.2.3. La cible	48
2.2.4. Le capteur et l'enregistrement de l'énergie	48
2.2.5. Transmission, réception et traitement	48
2.2.6. Analyse et interprétation	49
2.2.7. Application	49
2.3. Bases physiques de la télédétection	49
2.3.1. Rayonnement électromagnétique	50
2.3.2. Bandes spectrales (spectre électromagnétique)	51
2.3.3. Notions de réflectance et de signatures spectrales	52

2.4. Le système d'acquisition	55
2.4.1. Les satellites	55
2.4.2. Les capteurs	56
2.4.3. Les images satellitaires	56
3. Application dans le domaine minier	57
3.1. Prospection et exploration	58
3.2. Exploitation	58
3.3. Fermeture et réhabilitation.....	58
Conclusion	59

CHAPITRE 3 : Méthodes, Matériels et outils

Introduction	61
1. Approche méthodologique	62
1.1. Etapes de développement	62
1.1.1. Collecte de données et matériel utilisé	62
1.1.2. Prétraitement	67
1.1.3. Méthodes d'extraction de l'information à partir de l'imagerie	69
1.1.4. Interprétation des résultats	75
1.1.5. Validation et comparaison	75
1.2. Choix des méthodes	75
1.2.1. Acquisition des images et logiciels de traitement	77
1.2.2. Prétraitement	78
1.2.3. Méthodes d'extraction de l'information à partir de l'imagerie	78
1.2.4. Interprétation de résultats	86
Conclusion	88

CHAPITRE 4 : Interprétation des résultats

Introduction	90
1. Résultats du traitement d'image de Djebel Ouenza	91
1.1. Amélioration des images multi-spectrales en couleurs composite	91
1.1.1. Couleurs naturelles	91
1.1.2. Fausses couleurs	92
1.2. Classification non-supervisée	93
1.2.1. ISODATA	93
1.2.2. K-means	95
1.3. Classification supervisée	97
1.3.1. Maximum likelihood	97
1.3.2. Spectral Angle Mapper	99
1.4. Spectral Unmixing	101
1.5. Bandes Ratios ou combinaison de bandes	102
1.6. Transformation Minimum Noise Fraction	103
2. Résultats du traitement d'image de Gara-Djebilet	106
2.1. Amélioration des images multi-spectrales en couleurs composites	106
2.1.1. Couleurs naturelles	106
2.1.2. Fausses couleurs	107

2.2. Classification non supervisée	107
2.2.1. ISODATA	107
2.2.2. K-means	109
2.3. Classification supervisée	111
2.3.1. Maximum likelihood	111
2.3.2. Spectral Angle Mapper	113
2.4. Spectral Unmixing	115
2.5. Bandes ratios ou combinaison de bandes	116
2.6. Transformation Minimum Noise Fraction	118
Comparaison et Conclusion	121
CONCLUSION GENERALE	123
Bibliographie	126
Annexes	135

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Etat récapitulatif des réserves géologiques actualisées au 31/12/2007 (M.S. Taleb, 2012)	36
Tableau 3.1 : Caractéristiques du capteur TM (EOSAT, 1995)	63
Tableau 3.2 : Caractéristiques du capteur ETM+ (EOSAT, 1995)	64
Tableau 3.3 : Caractéristiques des capteurs OLI et TIRS (EOSAT, 1995)	65
Tableau 3.4 : Caractéristiques d'ASTER (M. Abrams et S. Hook, 2002)	66
Tableau 3.5 : Caractéristiques des images <i>Landsat-8-OLI</i> (usgs.gov, 2019)	77
Tableau 3.6a : Paramètres des essais de la méthode <i>ISODATA</i> pour la région de <i>Djebel Ouenza</i> (Elaboré par nous-mêmes)	79
Tableau 3.6b : Paramètres des essais de la méthode <i>ISODATA</i> pour la région de <i>Gara-Djebilet</i> (Elaboré par nous-mêmes)	80
Tableau 3.7a : Paramètres des essais de la méthode <i>K-means</i> pour la région de <i>Djebel Ouenza</i> (Elaboré par nous-mêmes)	80
Tableau 3.7b : Paramètres des essais de la méthode <i>K-means</i> pour la région de <i>Gara-Djebilet</i> (Elaboré par nous-mêmes)	81
Tableau 3.8a : Classes choisies et couleurs attribuées pour la région de <i>Djebel Ouenza</i> (Elaboré par nous-mêmes)	82
Tableau 3.8b : Classes choisies et couleurs attribuées pour la région de <i>Gara-Djebilet</i> (Elaboré par nous-mêmes)	82
Tableau 3.9a : Librairie spectrale pour la région de <i>Djebel Ouenza</i> (Elaboré par nous-mêmes)	83
Tableau 3.9b : Librairie spectrale établie pour la région de <i>Gara-Djebilet</i> (Elaboré par nous-mêmes)	83
Tableau 3.10a : Ratios communément utilisés pour <i>Landsat-8</i>	85
Tableau 3.10b : Les combinaisons de bandes utilisées pour la cartographie du minerai de fer pour la région de <i>l'Ouenza</i> (Elaboré par nous-mêmes)	85
Tableau 3.10c : Les combinaisons de bandes utilisées pour la cartographie du minerai de fer pour la région de <i>Gara-Djebilet</i> (Elaboré par nous-mêmes)	86
Tableau 4.1 : Bandes Ratios	102
Tableau 4.2 : Les combinaisons de bandes utilisées pour la cartographie du gisement de fer (Elaboré par nous-mêmes)	116

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Principaux ensembles structuraux de l’Afrique du Nord et situation de la région d’étude (Caire, 1967)	20
Figure 1.2 : Carte de géologie régionale (Dubourdiou, 1956)	22
Figure 1.3 : Colonne lithostratigraphique synthétique des monts du Mellègue (D’après Dubourdiou 1956, 1959 ; David 1956 ; Madre 1969 ; Fleury 1969 ; Thiéberoz et Madre 1976 ; Chikhi 1980 ; Othmanine 1987 ; Bouzenoune 1993 et Vila et al, 2000, in Sami, 2004)	25
Figure 1.4 : Situation géographique du bassin de Tindouf (BRONER et FABRE, in FABRE, 2005)	26
Figure 1.5 : Colonne lithostratigraphie du bassin de Tindouf (D’après CHABOU, 2001)	31
Figure 1.6 : Position géographique du gisement ferrifère de l’Ouenza (Google Maps, 2019)	32
Figure 1.7 : Carte topographique de la ville de l’Ouenza (Extrait de la carte topographique de Tébessa, 1/50000, coordonnées UTM)	33
Figure 1.8 : Carte géologique schématique du Djebel Ouenza (D’après Dubourdiou, 1956, modifié par Vila, 1994)	33
Figure 1.9 : Colonne lithostratigraphique de la coupe géologique de la mine de l’Ouenza (Khoudair Chaabane et al, 2015)	35
Figure 1.10 : Localisation géographique du gisement de Gara Djebilet (Bitam et al., 1997) ..	37
Figure 1.11 : Carte topographique de la région de Gara Djebilet (Extrait de la carte topographique de Tébessa, 1/500000)	37
Figure 1.12 : Extrait de la carte géologique de Gara Djebilet (Chabou, Saibi, Bersi ; 2015)	38
Figure 1.13 : Carte structurale de la région de Gara-Djebilet (d’après GEVIN, 1960)	39
Figure 1.14 : Colonne stratigraphique synthétique de Gara-Djebilet (modifié-Guerrak, 1988)	41
Figure 2.1 : Etapes du processus de traitement par télédétection (N. Boudali, 2012)	49
Figure 2.2 : Une onde électromagnétique (Nicolas, 2015)	50
Figure 2.3 : Le spectre électromagnétique (Fournil, 2017)	52
Figure 2.4 : Signature spectrales des surfaces naturelles (BRGM/RP 60227-FR, 2011)	53
Figure 2.5a : Identification spectrale des carbonates (BRGM/RP 60227-FR, 2011)	54
Figure 2.5b : Identification spectrale des argiles et micas (BRGM/RP 60227-FR, 2011)	54
Figure 2.5c : Identification spectrale des oxyde de Fer (BRGM/RP 60227-FR, 2011)	54
Figure 2.6 : Types de satellites (N. Boudali, 2012)	55
Figure 3.1 : Concept de la classification supervisée (N. Boudali, 2012)	72
Figure 3.2 : Concept de la méthode du SAM où α est l'angle spectral entre le spectre de référence et le spectre évalué dans un espace à deux dimensions (D’après Kruse et al, 1993)	73
Figure 3.3 : Organigramme du processus de traitement (Elaboré par nous-mêmes)	76
Figure 3.4a : Image Landsat-8 OLI en mode RVB de la région de Gara-Djebilet (usgs.gov, 2019)	77
Figure 3.4b : Image Landsat 8 OLI en mode RVB de la région de Djebel Ouenza (usgs.gov, 2019)	77
Figure 3.5a : Carte géologique de référence de la région de Djebel Ouenza (D’après Dubourdiou, 1956, modifié par Vila, 1994)	86
Figure 3.5b : Carte géologique de référence de la région de Gara-Djebilet (Chabou, Saibi, Bersi ; 2015)	87
Figure 4.1a : Amélioration en couleurs naturelle en RGB (Elaborée par nous-mêmes)	91

Figure 4.1b : Amélioration en fausses couleurs (Elaborée par nous-mêmes)	92
Figure 4.2a : Classification ISODATA (Elaborée par nous-mêmes)	93
Figure 4.2b : Post-classification ISODATA (Elaborée par nous-mêmes)	94
Figure 4.3a : Classification non-supervisée K-means (Elaborée par nous-mêmes)	95
Figure 4.3b : Post-classification non supervisée K-means (Elaborée par nous-mêmes)	96
Figure 4.4a : Classification supervisée par Maximum Likelihood (Elaborée par nous-mêmes)	97
Figure 4.4b : Post-classification supervisée Maximum Likelihood (Elaborée par nous-mêmes)	98
Figure 4.5a : Classification supervisée SAM (Elaborée par nous-mêmes)	99
Figure 4.5b : Post-classification supervisée SAM (Elaborée par nous-mêmes)	100
Figure 4.6 : Méthode Spectral Unmixing (Elaborée par nous-mêmes)	101
Figure 4.7 : Méthode des bandes ratios (Elaborée par nous-mêmes)	102
Figure 4.8a : Graphe Eigenvalue MNF (Elaborée par nous-mêmes)	103
Figure 4.8b : Méthode MNF (Elaborée par nous-mêmes)	104
Figure 4.9a : amélioration en couleurs naturelles réelles (Elaborée par nous-mêmes)	106
Figure 4.9b : Amélioration en fausses couleurs composite FCC (Elaborée par nous-mêmes) ..	107
Figure 4.10a : Classification non-supervisée IsoData (Elaborée par nous-mêmes)	108
Figure 4.10b : Post-Classification non-supervisée IsoData (Elaborée par nous-mêmes)	108
Figure 4.11a : Classification non-supervisée K-means (Elaborée par nous-mêmes)	109
Figure 4.11b : Post-Classification non-supervisée K-means (Elaborée par nous-mêmes)	110
Figure 4.12a : Classification Maximum Likelihood (Elaborée par nous-mêmes)	111
Figure 4.12b : Post-classification supervisée (Maximum Likelihood) (Elaborée par nous-mêmes)	112
Figure 4.13a : Classification supervisée par Spectral Angle Mapper (Elaborée par nous-mêmes)	113
Figure 4.13b : Post-Classification supervisée par Spectral Angle Mapper (Elaborée par nous-mêmes)	114
Figure 4.14 : Méthode de démixage par <i>Linear Spectral Unmixing</i> affiché en niveaux du gris de la bande 1 (Elaborée par nous-mêmes)	115
Figure 4.15a : Méthode des bandes ratios (combinaison 6) (Elaborée par nous-mêmes)	116
Figure 4.15b : Méthode des bandes ratios (combinaison 3) (Elaborée par nous-mêmes)	117
Figure 4.16a : Graphe des valeurs propres (Eigenvalue) de la méthode MNF (Elaborée par nous-mêmes)	118
Figure 4.16b : Minimum Noise Fraction (Elaborée par nous-mêmes)	119
Figure A.1 : Interface ENVI Classic	135
Figure A.2a : Fichier d'entrée d'empilement des couches	136
Figure A.2b : Configuration des paramètres d'empilement des couches	136
Figure A.2c : Résultat de l'empilement des couches (Layer stacking)	137
Figure A.3a : Fichier d'entrée des données de redimensionnement	138
Figures A.3b : Dimensions du sous-ensemble spatial de <i>Gara-Djebilet</i>	139
Figures A.3c : Dimensions du sous-ensemble spatial de <i>Djebel Ouenza</i>	139
Figure A.4 : Affichage en couleurs naturelles	140
Figure A.5 : Affichage en fausses couleurs	140
Figure A.6a : paramètres par défaut ISODATA	141
Figure A.6b : Paramètres IsoData de <i>Gara-Djebilet</i>	141
Figure A.6c : Paramètres IsoData de <i>Djebel Ouenza</i>	142

Figure A.7a : Paramètres K-means par défaut	142
Figure A.7b : Paramètres K-means pour la région de <i>Gara-Djebilet</i>	143
Figure A.7c : Paramètres K-means pour la région de <i>Djebel Ouenza</i>	143
Figure A.8a : Boîte de dialogue ROI par défaut	144
Figure A.8b : Configuration des paramètres de la région d'intérêt de <i>Gara Djebilet</i>	144
Figure A.8c : Configuration des paramètres de la région d'intérêt de <i>Djebel Ouenza</i>	145
Figure A.8d : Configuration des paramètres de Maximum Vraisemblance de <i>Gara-Djebilet</i>	145
Figure A.8e : Configuration des paramètres de Maximum Vraisemblance de l'Ouenza ...	146
Figure A.9a : Profil spectral	147
Figure A.9b : Fenêtre du graphique	147
Figure A.9c : Paramètres des données	147
Figure A.9d : Librairie spectrale de sortie	148
Figure A.9e : Librairie spectrale de la région de <i>Gara Djebilet</i>	148
Figure A.9f : Librairie spectrale de la région de <i>Djebel Ouenza</i>	149
Figure A.9g : Paramètres Spectral Angle Mapper	149
Figure 4.10a : Fichier d'entrée de la classification	150
Figure A.10b : Paramètres de la post classification Majority/Minority	151
Figure A.10c : Fichier d'entrée de la classification	152
Figure A.10d : Paramètres de la post classification Clump Classes	152
Figure A.11a : Fichier d'entrée de Démixage par défaut	153
Figure A.11b : Collecte des membres finaux pour <i>Gara Djebilet</i>	153
Figure A.11c : Collecte des membres finaux pour <i>Djebel Ouenza</i>	154
Figure A.12.a : Boîte de dialogue Band Math	155
Figure A.12b : Association des variables aux bandes	155
Figure A.12c : Définition des bandes des rapports	156
Figure A.12d : Rapports définis	156
Figure A.12e : Combinaison 3 pour la région de <i>Gara Djebilet</i>	157
Figure A.12f : Combinaison 6 pour la région de <i>Gara Djebilet</i>	157
Figure A.12g : Combinaison 3 pour la région de <i>Djebel Ouenza</i>	157
Figure A.13 : Paramètres de la transformation MNF	158

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

Ba : Baryte

Cu : Cuivre

F : Fluor

Fe : Fer

Pb : Plomb

Zn : Zinc

B : Bande

a : Angle spectral

S : Spectre de référence

t : Spectre évalué.

γ : Gamma

λ : Longueur d'onde

μm : Micromètre

cm : Centimètre

m : Mètre

Km : Kilomètre

Km² : Kilomètre carré

°C : Degré Celsius

° : Degré

' : Minute

'' : Seconde

% : Pourcentage

LISTE DES SIGLES

ACP : Analyse en Composante Principale

ArcGIS : Aeronautical Reconnaissance Coverage Geographic Information System

ASTER : Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

CERES : Cloud and the Earths Radiant Energy System

CP : Couleur Composite

E : Est

ENE : Est-Nord Est

ENVI : ENvironment for Visualizing Images

ESE : Est-Sud Est

Esri : Environmental systems research institute

ETM+ : Enhanced Thematic Mapper Plus

FCC : Fausses Couleurs Composite

FM : Frequency Modulation

GOES : Geosynchronous Earth Orbit Satellite

IDL : Interactive Data Language

Inc : Incorporated

IRCL : Infrarouge Courtes Longeurs d'ondes

ISODATA : Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique

ITTVIS : International Telephone and Telegraph Visualizing

Landsat : Land Satellite

METEOSAT: Meteorological Satellite

MGA: Map Grid Australia

MISR: Multi-angle Imaging Spectro Radiometer

MMA: Majority Minority Analysis

MNF: Minimum Noise Fraction

MODIS: Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer

MOPITT: Measurements Of Pollution In The Troposphere

N : Nord

NASA : National Aeronautics and Space Administration

NE : Nord-Est

NIR : Near Infrared

NOAA : National Oceanic Atmospheric Administration

NW : North-West (Nord-Ouest)

OLI : Operational Land Imager

PIR : Proche Infrarouge

RGB : Red Green Blue

ROI : Regions Of Interest

RVB : Rouge Vert Bleu

S : Sud

SAM : Spectral Angle Mapper

SE : Sud-Est

SIG : Systeme d'Information Géographique

SPOT : Système Probatoire d'Observation de la Terre / Satellite Pour l'Observation de la Terre

SSE : Sud-Sud-Est

SW : Sud-Ouest

SWIR : Short Wave Infrared

TIRS : Thermal Infrared Sensor

TM : Thematic Mapper

TV : Télévison

USGS : United States Geological Survey

UTM : Universal Transverse Mercator

UV : UltraViolet

VPIR : Visible et Proche Infrarouge

W : West (Ouest)

WNW : Ouest-Nord-Ouest

WSW : Ouest- Sud-Ouest

VMS : Volcanic Massive Sulfide Ore Deposit

MVT : Mississippi Valley-Type Lead-Zinc Deposit

SEDEX : Sedimentary Exhaustive deposits

INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie, qui est un pays riche de par ses ressources naturelles, a accordé depuis l'indépendance une importance majeure au secteur minier, et ce, pour répondre à ses préoccupations économiques. Bien que le pays dispose d'une immense diversité géologique, il fait néanmoins face à un grand défi, qui consiste en la mise en valeur des sites miniers potentiellement riches en gisements métallifères et minéraux. Au fil du temps, la croissance économique et la demande du marché en matière de ressources minérales, ont favorisé la prédominance de l'exploitation de certains minerais par rapport à d'autres, dont le minerai de fer qui a une place prépondérante dans le domaine de l'industrie extractive et le marché industriel, et c'est la raison pour laquelle nous allons consacrer ce travail de recherche à la prospection minière par satellite des deux grands gisements métalliques ferrifères, dont le premier situé au Nord-Est Algérien et qui correspond au site minier de l'Ouenza représentant le principal fournisseur en minerai de fer, alimentant à la fois le marché national Algérien et international, quant au deuxième, représenté par le gisement de Gara Djebilet, situé au Sud-Ouest Algérien, qui constitue un site minier d'une immense réserve non encore ouvert à l'exploitation.

L'exploration des gisements miniers est un défi que l'ingénieur des mines doit approcher avec le plus d'informations possible. C'est pour cela que la télédétection joue un rôle très prometteur dans les investigations des caractéristiques géologiques des surfaces à explorer sans la nécessité d'un déplacement sur terrain, et ce par l'acquisition, l'analyse et l'interprétation des données recueillies.

La télédétection implique de ce fait, la collecte d'informations d'une surface cible tout en mesurant les radiations réfléchies (ou émises) par celle-ci. Ainsi, la télédétection s'appuie sur un ensemble de techniques utilisant des appareillages et équipements incluant des organes très sensibles tels que les capteurs spécialisés permettant la collecte d'informations, structurées en données images numérisées adaptées à chaque bande spectrale, couvrant de larges surfaces terrestres. Les données issues de ces capteurs sont utilisées, notamment, dans des projets de recherche de nature à répondre aux besoins du marché économique, industriel et technologique, et aussi la surveillance de l'état de surface terrestre territoriale d'un pays donné, afin d'aboutir par exemple à une modélisation représentative et fidèle à la nature des surfaces géographiques et géologiques à explorer.

A cet effet, l'application de la télédétection a ouvert une nouvelle ère dans le domaine de l'exploration minière permettant ainsi de développer de nouvelles méthodes basées sur des techniques d'identification et de reconnaissance de la nature des différents types de gisements rocheux, abritant des concentrations de substance utiles à valeur marchande formant des minerais exploitables très variés, en relation avec les conditions tectoniques d'une région géologique donnée.

L'objet de notre projet de fin d'étude vise à orienter les prospecteurs miniers vers les zones susceptibles de contenir des concentrations intéressantes de minerais métalliques exploitables. A ce titre, nous nous intéresserons plus particulièrement aux gisements métallifères ferrifères de la région du Nord-Est algérien, en cours d'exploitation, et de la région du Sud-Ouest Algérien, non encore exploité. Dans notre approche, nous allons nous appuyer sur les techniques de télédétection permettant une localisation automatisée et non coûteuse des surfaces géologiques substantiellement minéralisées, ainsi que l'acquisition d'informations sur des zones non accessibles à l'homme.

Ainsi, l'objectif principal de notre étude est de mettre en valeur les méthodes de traitement d'images satellitaires adéquates à des fins de prospection minière, et ce, pour obtenir des résultats aussi précis que possible et nécessaires pour la réalisation d'un modèle géologique de la zone d'étude.

Pour atteindre cet objectif, nous devons répondre aux objectifs spécifiques suivants :

- ✓ Délimitation, localisation et dimensionnement des gisements métalliques ferrifères du Nord-Est et Sud-Ouest algérien ;
- ✓ Reconnaissances et identification des formations géologiques par télédétection ;
- ✓ Comparaison entre les méthodes de télédétection utilisées pour la détection des gisements métalliques ferrifères appartenant à deux régions géologiques différentes.

La réalisation d'un tel projet de recherche s'appuyant sur la télédétection nécessite une synthèse de recherche bibliographique englobant l'ensemble des informations requises (données géologiques du terrain à partir des travaux de recherches réalisés antérieurement, carte géologiques, données géochimiques, etc.) et requiert aussi une bonne maîtrise des méthodes et outils de traitement de données afin d'obtenir des résultats satisfaisants.

Le présent document est réparti en quatre chapitres. Le premier décrit le cadre géographique et géologique des sites d'étude, dans lequel sont détaillées les diverses caractéristiques aussi bien sur le plan structural que sur le plan stratigraphique.

Le deuxième chapitre représente des notions globales sur la télédétection dans son sens le plus large et son application dans le domaine minier en particulier.

Le troisième chapitre a été consacré pour définir le matériel et les méthodes habituellement appliqués à des fins de prospection, ainsi que les paramètres et techniques utilisés dans notre cas d'étude.

Enfin, le quatrième et dernier chapitre comporte le traitement et l'interprétation des résultats.

Chapitre 1

Cadre géographique et contexte géologique
des zones d'étude

Introduction

Le présent chapitre nous permettra d'avoir une description détaillée des différentes caractéristiques inhérentes au cadre géographique et au contexte géologique des deux régions abritant les sites miniers ferrifères. Il est nécessaire de mener une étude globale définissant les particularités géologiques propres aux deux zones d'étude dans le but d'exploiter le maximum de données recueillies et les mettre au profit de l'utilisation de la télédétection, et ce, dans l'optique de repérer les limites et identifier la nature minéralogique du minerai des deux gisements ferrifères présentant la même minéralisation mais appartenant à deux régions géologiques différentes.

1. GEOLOGIE REGIONALE

1.1. Les monts Mellègue

1.1.1. Cadre géographique

Les monts Mellègue font partie des masses montagneuses de l'Atlas tellien au nord et des Monts de Tébessa, avant-postes de l'Atlas Saharien, au sud qui se poursuit en Tunisie par l'Atlas tunisien. Ils se localisent dans la partie nord-oriental de la chaîne des Maghrébides de l'Algérie du nord qui s'étend de Gibraltar à Calabre sur plus de 2000 km, et ils sont délimités au nord et à l'ouest par les bassins de Sédrata et de Merhana. Ces monts représentent une région d'étude de plusieurs auteurs tels que (Durand Delga, 1955 ; Dubourdiou 1956 ; R. Guiraud, 1973; Wildi, 1983 ; Coiffait, 1992 ; Chadi, 2004).

1.1.2. Contexte de géologie structurale

La région d'étude appartient au bloc extrême oriental de l'Atlas Saharien qui se caractérise par d'importantes couvertures méso-cénozoïques avec une puissance d'environ 4000 à 5000 m ayant subies de fortes contraintes compressives affectant plusieurs zones de la région, qui sont identifiées généralement par des unités évaporitiques du Trias et coupées par des fossés d'effondrement (Othmanine, 1987).

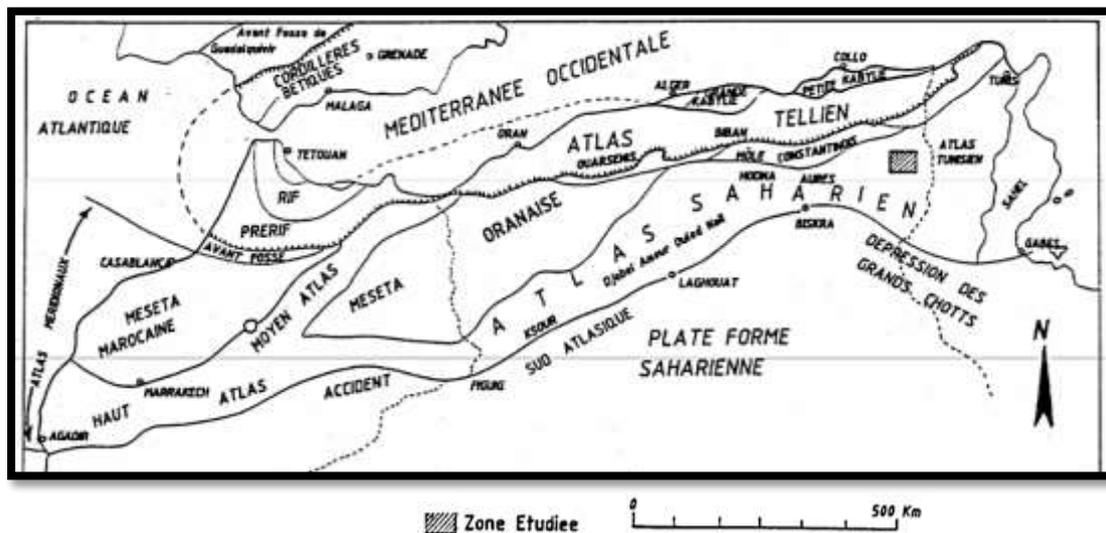


Figure 1.1 : Principaux ensembles structuraux de l'Afrique du Nord et situation de la région d'étude (L. Beguiret, 2007)

L'Atlas saharien, du Sud-Ouest vers le Nord-Est est constitué de trois faisceaux de plis établis en échelons et regroupant ainsi :

- Les Monts des Ksour, Djebel Amour.
- Les Monts d'Ouled Nail, les Aurès.

- Les Monts de Mellègue, qui représentent une partie qui s'étend de l'Atlas saharien jusqu'à l'Atlas tunisien.

Le Nord-Est algérien présente une très importante concentration en gîtes métallifères minéralisés suite à une intense activité magmatique qui s'est manifestée durant le Miocène. Sur le plan structural, deux directions majeures caractérisent la région :

- La direction NE-SW marquée par les extrusions triasiques.
- La direction NW-SE à WNW-ESE, marquée par les fossés d'effondrements.

Ce qui explique l'existence d'une continuité des grands ensembles structuraux au niveau de la frontière Algéro-tunisienne où les minéralisations arrivent obliquement sur cette dernière, (H. Rouvier, 1990).

Les traits structuraux majeurs de la région sont définies par :

a. La subsidence

Selon (Masse et al, 1982) et (Bouzenoune, 1993), la tendance générale qui caractérise la région est une subsidence considérable, brève et continue entraînant des poussées horizontales de direction NE- SW suivie d'un bombement sous-marin formant des hauts- fonds qui sont induits par l'activité diapirique à partir des fractures profondes du socle.

b. Le diapirisme

Le diapirisme est contrôlé par le fluage et l'ascension (Perthuisot, 1988). L'une des principales caractéristiques de la région est exprimée par les diapirs qui sont allongés sur une bande d'environ 80 km en direction NE-SW.

c. Les plissements

Suivant la direction NE-SW l'ensemble des formations sédimentaires a été plissé, tel que ces plis anticlinaux sont généralement relayés par des vastes structures synclinales. D'après (Dubourdieu, 1956), la série du Mellègue a été plissée au cours du Paléogène (Eocène supérieur-Oligocène).

d. La tectonique cassante

Les structures anticlinales sont recoupées par deux systèmes de failles :

- Un système primaire orienté selon deux directions tectoniques : Nord-Est (30°- 60°) et Nord-Ouest (280° - 320°), et qui est constitué par des failles majeures orientées subparallèlement aux axes des anticlinaux sous l'effet du plissement tels que les couches tendres se plissent et les couches dures se cassent au niveau des pendages des roches qui sont subverticaux à inverses.
- Un système secondaire caractérisé par d'importants rejets et de pendages de l'ordre de 60° de direction Est-Ouest ; presque perpendiculaire aux failles principales, favorisant ainsi les concentrations métallifères.

e. Les fossés d'effondrements

La région est représentée par des fossés d'effondrements ayant une puissance d'environ 170- 300 m sont enveloppés par des accidents majeurs avec des dépôts plio-quatérnaires, selon

(Dubourdiu et al, 1950 ; Zouari, 1984), les fossés d'effondrements sont le résultat d'une intense activité tectonique distensive post-miocène inférieur.

1.1.3. Contexte de géologie lithostratigraphique

Selon plusieurs études effectuées dans la région des confins algéro-tunisiens par plusieurs auteurs tels que (Dubourdiu, 1956 ; Rouvier, 1977 ; Perthuisot, 1978 et Perthuisot, 1992), on considère que la présence d'une formation triasique large dite « zone des diapirs » est liée aux phases compressives depuis l'Aptien jusqu'au Quaternaire, telles que cette région s'étale sur une centaine de kilomètres entre les Monts du Mellègue au Nord et la flexure saharienne au Sud.

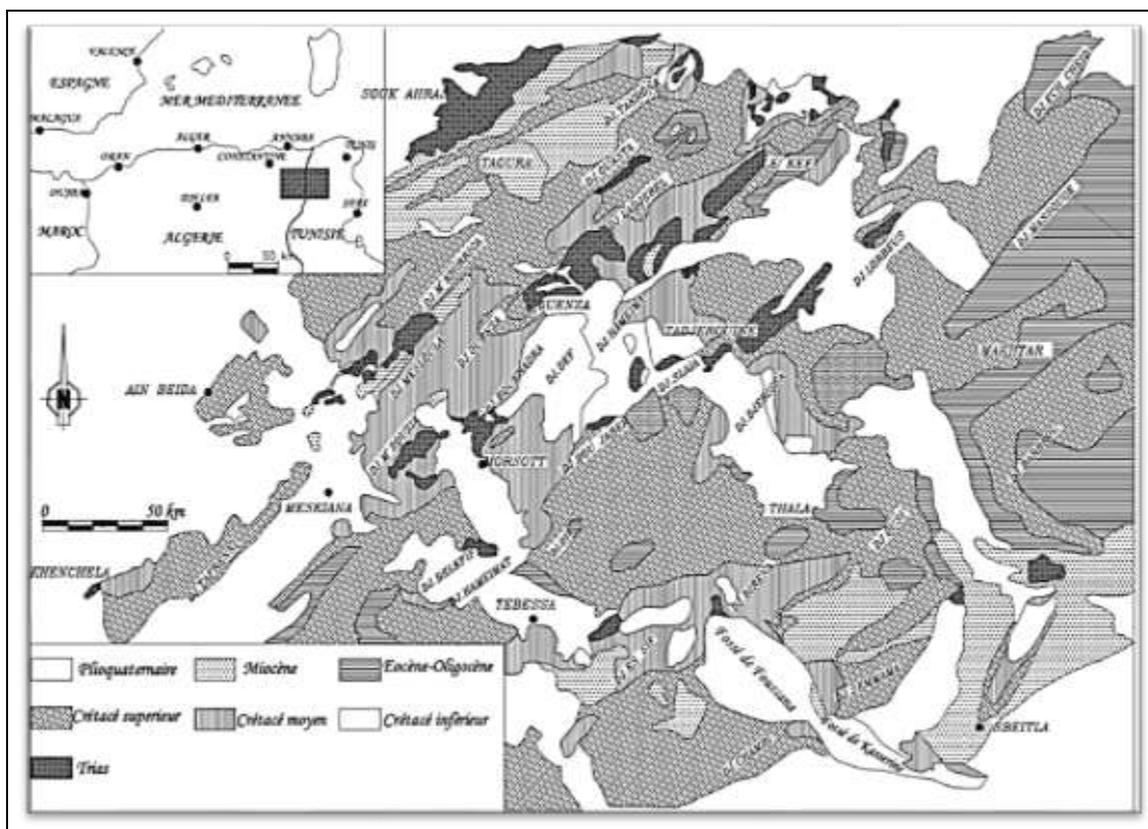


Figure 1.2 : Carte de géologie régionale (Dubourdiu, 1956)

Suivant les travaux de recherches de plusieurs géologues comme (Dubourdiu ; 1956, Chikhi; 1980 et Vila ; 1994) la lithologie ainsi que la subdivision stratigraphique de la région ont été établis dans les formations où l'on trouve des dépôts Mésozoïques-Cénozoïques allant du Trias au Quaternaire, encaissant généralement des minéralisations polymétalliques et ferrifères où nous distinguons :

a. Le Mésozoïque (Secondaire)

- **Le Trias**

Le Trias des Monts Mellègue est dit diapirique où il se retrouve au centre des structures anticlinales avec d'importants affleurements qui sont : Boukhadra, Ouenza, Hamimat Nord et Hamimat Sud, et Mesloula (Dubourdiu, 1956 ; Perthuisot et Rouvier, 1992 ; Aoudjehane et al. 1990 ; 1992). Il regroupe les différentes formations lithologiques telles que les marnes

bariolées à gypse, les dolomies, les calcaires dolomitiques, les grès et les fragments de roches.

- **Le Crétacé**

✓ **Le Crétacé inférieur** où on retrouve les étages suivants :

Le Barrémien

Selon (Dubourdiou, 1956), le barrémien affleure dans l'anticlinal de Sidi Embareka au Nord-Est de Djebel Ouenza avec une puissance de 200 m en moyenne ; il est formé de marnes grises et jaunes non fossilifères, intercalées par des calcaires argileux, noduleux.

L'Aptien

L'affleurement de l'Aptien s'étend sur des vastes surfaces, d'où il devient le plus remarquable dans la région. Ces dépôts ont un rôle de milieu encaissant important pour la mise en place de minéralisations polymétallique et ferrifère et sont distribués beaucoup plus, dans le noyau des anticlinaux, dans les bandes soulignées par les diapirs et dans d'autres horsts de la région. La formation aptienne représente une épaisseur totale entre de 250 à 600 m (Dubourdiou, 1956).

Suite à l'étude lithostratigraphique de l'Aptien, il a été retenu la succession suivante :

- ***L'Aptien marneux*** : On note la dominance des marnes verdâtres qui sont surmontées par des bancs de calcaires gréseux ou des grès sur une vingtaine de mètres telle que ces marnes représentent les termes les plus anciens de l'Aptien (Masse et Thieuloy, 1979).
- ***L'Aptien calcaire*** : Ces calcaires représentent un métalotecte lithologique car ils encaissent l'essentiel de la minéralisation ferrifère et/ou polymétallique (Dubourdiou, 1956 ; Bouzenoune, 1993). Ils renferment le plus souvent des Miliolites, des Rudistes, des Orbitolines et des Lamellibranches (Chikhi-Aouimeur, 1980).

Le Clansayésien

Ce dernier ayant une puissance entre 100 et 200 m, affleure dans divers anticlinaux de la région où on trouve des marnes grises, jaunes à Ammonites avec des calcaires gréseux (Dubourdiou, 1956).

L'Albien

Les dépôts albiens ont une puissance entre 400 et 500 m, dans la partie inférieure, l'Albien est composé de marnes argileuses, dans sa partie moyenne de calcaires, tandis que dans sa partie supérieure on y trouve des marnes noires. Suivant les recherches de Dubourdiou, (1956), les calcaires aptiens sont surmontés par des marnes datées de l'Albien inférieur et on trouve aussi selon Vila et al (1994) la présence d'une barre carbonatée albienne qui s'individualise à l'Ouenza.

Vraconien

Ayant une épaisseur de 500 m, il se compose essentiellement de marnes calcaires grises, bleues, séparant des petits bancs de calcaires et vers le bas des marnes calcaires très gréseuses.

✓ **Le Crétacé supérieur**, on y distingue les étages suivants :

Le Cénomaniens

Avec une puissance entre 600 et 900 m, le Cénomaniens est constitué de marnes argileuses verdâtres, caractérisées par des intercalations de la calcite fibreuse, plus explicitement on a deux assises (Dubourdiou, 1959) :

- L'assise inférieure, constituée de marnes jaunes avec des marnes calcaires blanches feuilletées.
- L'assise supérieure, formée par des calcaires argileux, gris blancs avec quelques niveaux de calcaires gris noirs.

Le Turonien

N'affleurant qu'aux environs de l'Ouenza et avec une puissance de 150 à 250 m, les formations turoniennes constituent les flancs des grands anticlinaux et synclinaux présentées essentiellement par des calcaires marneux en plaquettes gris- foncé à noir, et à la base, avec de la matière organique et de rares concentrations pyritiques et marcacitiques.

Le Sénonien

Le Sénonien selon (Dubourdiou, 1959) est représenté par :

- ***Le Sénonien inférieur*** : Ayant une puissance supérieure à 300 m et caractérisé par des calcaires marneux et des marnes.
- ***Le Sénonien supérieur*** : Affleurant au Sud de Tébessa avec une puissance entre 200 et 500 m est représenté par la succession des calcaires marneux du Campanien, des marnes gypsifères et enfin des calcaires massifs à rognons de silex riches en Inocérames avec une épaisseur comprise entre 200 à 500 m.

b. Le Cénozoïque (Tertiaire)

Les dépôts tertiaires selon David (1956) sont caractérisés par :

● **Le Paléogène**

✓ ***L'Eocène***

Avec une puissance d'environ 200 m, l'Eocène est caractérisé par des calcaires à silex et des calcaires à Nummulites, près des périmètres des Monts de Mellègue.

● **Le Néogène**

✓ ***Le Miocène inférieur et moyen***

Ils comportent une puissante accumulation de marnes et de grès, avec une épaisseur qui atteint les 1000 m (Dubourdiou, 1956; Kowalski et Hamimed, 2000) et aussi des conglomérats contenant des éléments de calcaires variés, de silex gris, des galets ferrugineux et des éléments du Trias (Bouzenoune, 1993), avec une épaisseur moyenne de 150 m (Dubourdiou, 1956).

✓ ***Le Mio-Pliocène***

Avec une puissance de 150 m, il est distribué essentiellement dans la moitié Nord de la région, et représenté par des conglomérats bariolés, des grès et des sables, des argiles et des calcaires lacustres. Sa puissance est de 150 m.

c. Le Quaternaire

Il renferme des croûtes de calcaires, limons, éboulis, cailloutis et poudingues avec une épaisseur de 10 à 30 m dans les fossés (Dubourdiou, 1956). Il est caractérisé aussi par des dépôts couvrant d'importantes surfaces étalées sur les parties basses des reliefs.

		Lithologie	Epaisseur (m)	Description lithologique			
CENOZOÏQUE	Quaternaire		⑥ 10-30	Dépôts clastiques d'origine continentale.			
	Néogène	Miocène		⑤ 10-150	Conglomérats à grains variés avec un ciment carbonaté, grès quartzeux et calcaire sableux avec intercalations d'argilites.		
		Eocène		200	Calcaires marneux à silice et intercalations de phosphates par endroits dans le mur.		
	CRAÏOÏQUE	SUPERIEUR	Maastrichtien		250-300	Calcaires gris clairs, calcaires crayeux et marnes argileuses avec intercalation d'argiles dans la partie supérieure.	
			Campanien		500-600	Marnes argileuses gris-foncées et des calcaires blancs dans la partie moyenne et supérieure.	
		Moyen	Con-Sant.		④ 500-600	Marnes argileuses grises et grises bleuâtres.	
			Turo		180-250	Calcaires en bancs, partiellement marneux à teinte noire et gris-foncée.	
		Inférieur	Cénomane		③ 900-1000	Marnes gris-verdâtres et grises dans la partie supérieure, avec intercalations de calcaires marneux.	
			Vracon.		② 500-600	Marnes et marnes-argileuses avec intercalations de calcaires argileux et argilites.	
		MÉSOZOÏQUE	Inférieur	Albien		480-600	Marnes grises et gris-foncées, noires dans la partie supérieure avec de minces intercalations de calcaires argileux.
				Clans		100-200	Marnes grises, gris-jaunes partiellement avec des intercalations de calcaires.
			Supérieur	Aptien		① 300-600	1- Faciès clastique, marnes argileuses avec intercalations de marnes sableuses et grès calcaires. 2- Faciès carbonaté, calcaires organo-détritiques, bioclastes, ooclastes et interclastes.
Barrem					< 250	Calcaires et dolomies, argilites et argiles dans la partie supérieure (Grès à Mesloula).	
Jurassique		< 700	Formations marno-gypsifères bariolées avec peu d'intercalations de grès à grains fins, dolomies et calcaires marno-dolomitique.				
Trias		< 700	Formations marno-gypsifères bariolées avec peu d'intercalations de grès à grains fins, dolomies et calcaires marno-dolomitique.				

Figure 1.3 : Colonne lithostratigraphique synthétique des monts du Mellègue (D'après Dubourdiou 1956, 1959 ; David 1956 ; Madre 1969 ; Fleury 1969 ; Thiéberoz et Madre 1976 ; Chikhi 1980 ; Othmanine 1987 ; Bouzenoune 1993 et Vila et al, 2000)

1.2. Le bassin de Tindouf

1.2.1. Cadre géographique

Le Bassin de Tindouf occupe la partie occidentale de la plateforme saharienne algérienne, occupant une surface d'environ 160 000 km. Le bassin de Tindouf s'étend de la vallée du Draa de l'Anti-Atlas marocain au Nord jusqu'au massif des Eglab (partie orientale du

Grand massif de Reguibet), il est limité à l'Est par la chaîne de l'Ougarta, à l'Ouest par la frontière Algéro-Marocaine (Fig. 1.4).

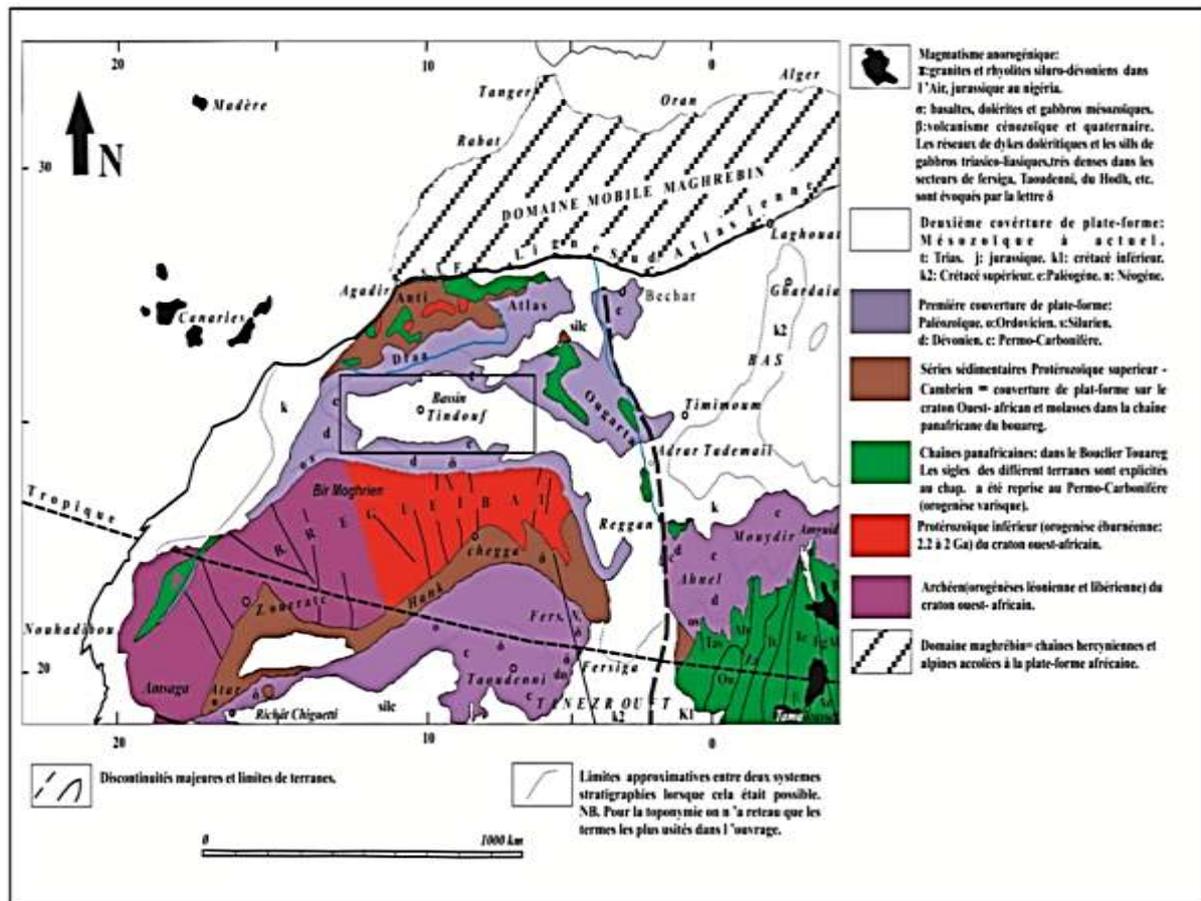


Figure 1.4 : Contexte morphostructural du bassin de Tindouf (FABRE, 2005)

1.2.2. Contexte géologique

a. Plan structural

La position du bassin de Tindouf entre l'Anti Atlas marocain et le massif des Eglab, lui donne un caractère stable sur le flanc Sud et plus ou moins instable sur le flanc Nord, et ceci est dû aux différentes orogénèses résultantes des collisions intercontinentales qui ont affecté la plaque Africaine et la plaque Nord-Américaine (WILSON, 1968 et SHENK, 1971).

Les processus tectoniques affectant la couverture de la région (GEVIN, 1960) sont illustrés par les phases suivantes :

- **La phase cadomienne**

Cette phase a introduit un système d'ondulation NW-SE tout en mobilisant les sédiments infracambriens avec détermination des horsts et grabens.

- **La phase calédonienne**

Représentée par des bombements du socle, principalement vers le méridien 6° Ouest.

- **La phase hercynienne**

Cette phase se caractérise par des plissements qui ont défini l'immense synclinal dissymétrique de Tindouf. Cependant, la fin de cette phase a engendré l'apparition d'immenses failles orientées (NE, SW) générées par des remontées doléritiques.

- **La phase des mouvements post hamadiens**

Les courbures stratigraphiques du Paléozoïque ont subi des mouvements tectoniques de cette phase.

- **La Phase permanente**

Cette phase est liée particulièrement au tassement des couches, introduisant ainsi des failles méridiennes tracées par les grands traits antécambriens.

b. Plan lithostratigraphique

Selon les travaux de recherche antérieurs de FABRE, 1976, HOLLARB, 1970 et CHABOU, 2001. Le bassin de Tindouf est caractérisé par des changements étonnants de puissance et de faciès. Le classement se fait de bas en haut comme suit :

- **Le Précambrien**

Dans cette ère, repose la série initiale schisto-quartzitique où on trouve une succession lithologique présentée comme suit :

- Le groupe (II-III) Saghro Précambrien : représentant particulièrement des volcano- détritiques.
- Le groupe de l'Ouarzazate : des volcano-détritiques.
- Le Précambrien III : à la différence des autres groupes celui-ci est composé de schisto-quartzitique.

- **Le Paléozoïque**

Reposant sur la discordance panafricaine, le Paléozoïque est constitué de :

- ✓ **Le Cambrien**

Le Cambrien inférieur

Il comprend également les faciès suivants :

- Ensemble carbonaté : correspond à une série avec une épaisseur de 200 m en moyenne, renferme les plus anciens Trilobites connus au monde, et elle est composée de lit argileux en alternance avec des bancs de calcaires.
- Ensemble schisto-calcaire : représentant une alternance de schiste verts à Trilobites et de calcaires à Archéocyathidés avec une épaisseur de 150 m.
- Ensemble détritique : Il correspond à des grès à Tigillites surmontés par des schistes à Trilobites marquant le passage au Cambrien moyen (CHABOU, 2001), et renfermant aussi par endroit des tufs volcaniques.

Le Cambrien supérieur

Il est constitué de bas en haut par :

- Un ensemble schisteux : correspond à une série avec une épaisseur d'environ 400 m, couronnée par la formation des grès à Paradoxides et Lingules.

- Un ensemble gréseux : avec une épaisseur qui atteint 450 m, cette série devient étroite en allant du Nord vers le Sud et disparaît totalement dans la région des affleurements paléozoïques du flanc Sud du bassin de Tindouf (CHABOU, 2001).

✓ **L'Ordovicien**

L'Ordovicien se remarque par la prépondérance des schistes, tels que nous distinguons la succession suivante de bas en haut :

- Les schistes : Dans certaines régions, des argilites plus ou moins silteuses sont rencontrées, riches en Graptolites et Trilobites du Trémadocien. Cependant, on rencontre aussi d'autres formations telles que les argiles glauconieuses riches en Graptolites.
- Les grès sont présents en grains fins à grossiers, riches en Scolytes.
- Les argiles : elles se distinguent par un faciès argileux, silteux, micacés et des grès riches en fossiles.
- d'autres types de grès qui comportent des schistes marqués par des argilites à intercalation de grès riches en faunes, mais aussi des grès quartzitiques à grains fins à moyen.

✓ **Le Silurien**

Dans la bordure Sud du bassin de Tindouf, le Silurien est surtout schisto-argileux. Cet ensemble, dénommé formation de « la Sebkhah Mahbès » (50 à 120 m) s'étend du Liandoverien moyen au Pridolien (CHABOU, 2001).

Dans le flanc Nord du bassin, la série argileuse s'épaissit et peut atteindre 800 m. Elle est représentée par des argiles à Graptolites avec des intercalations gréseuses, ainsi que des calcaires à Crinoïdes, Orthocères et Lamellibranches.

✓ **Le Dévonien**

La série lithostratigraphique dévonienne comprend :

Le Dévonien inférieur

Au Nord du bassin de Tindouf, le Dévonien inférieur comprend les deux formations suivantes (CHABOU, 2001) :

- Une formation argileuse : de 400 m à l'Ouest et quelques dizaines de mètres à l'Est où s'intercalent des niveaux gréseux et des calcaires.
- Une formation gréseuse : de 700 à 800 m, est constituée par des bancs de grès formant des crêtes (les Rich). Ces grès comportent des calcaires fossilifères datés de l'Emsien.

Au Sud du bassin de Tindouf, le Dévonien inférieur connu sous le nom de Formation de « Gara-Djebilet ». Cette dernière est subdivisée en deux membres :

- Les grès de Gara-Djebilet : sont représentés en grande partie par des grès à intercalations argileuses et des argilites.
- Les grès supra-minéraux : Ils comprennent à la base des grès, suivi par des argilites admettant des bancs de calcaires. La faune indique un âge Emsien.

Le Dévonien moyen

Dans le Nord du bassin de Tindouf, le Dévonien moyen est constitué par les formations suivantes :

- Une formation argilo-calcaire : épaisse de 300m, comportant des schistes à Goniates, des grès et de quelques niveaux calcaires. Cet ensemble est daté Eifélien.
- Une formation calcaire : D'âge Givétien très fossilifère (Goniates, Arthroires, Trilobites). La puissance de cette formation est faible (50 à 100m).

Au Sud de ce bassin, le Dévonien moyen correspondant à la formation de l'Oued Talha. Cette formation est subdivisée en deux membres :

- Les argilites de l'Oued Talha : Sont constituées d'un ensemble homogène d'argilites grises, feuilletées, avec des intercalations de bancs de calcaires gréseux riches en Brachiopodes. Ce membre serait d'âge Emsien supérieur à Eifélien.
- Les calcaires bioclastiques de la Kerb-Tsabria : Comportent des calcaires durs et compacts, formant de gros bancs intercalés d'argilites, qui sont très riches en Brachiopodes et Polypiers. L'âge de ce membre est Eifélien à Givétien supérieur.

Le Dévonien supérieur

Il est représenté au Nord du bassin de Tindouf par une puissante série argileuse « les argiles de la plaine du Draa ». Cette dernière comprend un Frasnien argileux à intercalations calcaires, un Famennien inférieur entièrement argileux et un Famennien supérieur argileux à intercalations gréseuses et grésocalcaires. L'épaisseur du Dévonien supérieur peut atteindre 3000 m.

Au sud du bassin de Tindouf, le Dévonien supérieur correspondant à la formation de « Kerb En-Naga » (220 à 300 m d'épaisseur). Cette formation comprend deux membres :

- Les siltites de l'Oued Rhazzal : Elles sont marquées par des argiles grises, indurées et des bancs gréseux à grains très fins.
- Les argilites de l'Oued Slougua : Argiles grises papyracées, couronnées par des lits de gypses translucides.

✓ Le Carbonifère

Le Carbonifère du flanc Nord du bassin de Tindouf est subdivisé en quatre unités lithostratigraphiques sur la base d'arguments stratigraphique, lithologique et morphologique, (CHABOU, 2001) :

Les grès et schistes de Tazoult, avec 111 m d'épaisseur : ils appartiennent au Tournaisien supérieur (HOLLARB, 1970).

Les grès et schistes de la Bétaina, avec 800 m d'épaisseur : ils sont datés du Viséen inférieur et de la première partie du Viséen supérieur.

La série de l'Ouarkiz, comprend trois membres :

- Les calcaires inférieurs de l'Ouarkiz, avec 356 m d'épaisseur : c'est des calcaires à Gigantoproductidés et polypiers du Viséen supérieur.
- L'Ouarkiz moyen, avec 111,5 m d'épaisseur : composé d'argiles et de marnocalcaires dolomitiques, avec localement des lentilles de gypse massif. Ce membre correspond à la limite Viséen supérieur-Namurien.
- Les Calcaires supérieurs de l'Ouarkiz, avec 102 m d'épaisseur, correspondent à des calcaires à Gigantoproductidés et polypiers du Namurien.

La série de la Bétaina : de nature continentale, comprend :

- A la base, la formation des grès du Djebel Réouina (500 m d'épaisseur), composée des grès, d'argilites et des calcaires. Elle contient de nombreux débris de végétaux terrestres du Namurien.
- Au sommet, la formation de Merkala (500 à 700 m d'épaisseur), est constituée essentiellement par une alternance de grès à grains fins, en bancs métriques, et d'argiles rouges. Cette formation contient des fougères caractéristiques du Stéphanien inférieur.

Le Carbonifère du Sud du bassin de Tindouf comprend les formations suivantes :

- La formation « de Kerb-Slougua » : Elle est composée des grès et des calcaires passant à des argiles et des grès. L'épaisseur de la formation atteint 584 m.
- La formation « de Kerb-Sefiat » : D'âge Viséen inférieur. Sa base est composée de grès, passant à une alternance d'argiles et de passées de calcaire gréseux à son sommet. L'épaisseur de cette formation est de 310 m.
- La formation « d'Aïn-el Barka » : Correspond au Viséen supérieur. Elle comprend des marnes gréseuses, des grès tendres et des bancs de calcaire. L'épaisseur de cette formation atteint 600 m.
- La formation de « Hassi-Aoulouel » : elle est représentée par des sédiments argilo- gréseux indifférenciés du Namurien et du Westphalien. Son épaisseur atteint 345 m.

- **Le Cénozoïque (Le Tertiaire)**

Dans le bassin de Tindouf, les terrains post-paléozoïques sont représentés par la Hamada de Tindouf (ou du Draa), qui ne dépasse jamais 100 m d'épaisseur.

Cette formation est constituée essentiellement d'un complexe grés-argileux, d'âge probablement Paléocène, supportant une dalle calcaire d'origine lacustre Néogène. Selon (FABRE, 1976, 2005), au Nord du bassin de Tindouf, la base de la Hamada comprendrait une série gréseuse du Cretacé inférieur, qui est surmontée par une dalle calcaire Cénomano- turonienne. Dans la partie centrale du bassin de Tindouf, les formations paléozoïques sont recouvertes par les terrains de Hamada.

- **Le Quaternaire**

Le Quaternaire comprend les regs, les alluvions, les éboulis, les sebkhas et surtout les ergs (dunes de sable), qui occupent une partie importante de la région (Erg-Iguidi).

Sur la bordure Nord des Eglab (fig. 1.5), le Bassin de Tindouf renferme des affleurements paléozoïques (Ordovicien à Carbonifère) de qualité médiocre pour l'Ordovicien et le Silurien et meilleure pour le Dévonien-Carbonifère. Le Bassin de Tindouf a été subdivisé en deux sous-bassins : le sous bassin de Djebilet et le sous bassin de l'Iguidi, séparés par le haut fond de Laroussi (Guerrak, 1987 ; Bitam et al., 1997).

Echelle stratigraphique		Bassin de Tindouf			
		Sud	Nord		
DEVONNIEN	Inférieur	Emsien	Grès supra-minéraux	Grès du 2ème Rich	
		Praguien Lochkovien	Grès de Djebilet	Argiles et calcaires du 1er Rich	
SILURIEN	Supérieur	Pridolien Ludlowien	Argiles de la Sebkhia	Argiles à Graptolites	
	Inférieur	Wenlockien Llandovérien	Mabbes		
ORDOVICIEN	Supérieur	Ashgillien	Grès de Rhezziane	Grès du 2ème Bani	
		Caradocien		Grès de Rouid Aïssa Schistes de Kfoua	
	Inférieur	Llandeïnlien	Argiles d'Arouetta	Grès du 1ème Bani	Argiles de Tachilla
		Llanvirnien			
		Arénigien	Schistes des Feija	Grès de Zani Schistes de Fazouata supérieurs	
		Trémadocien		Schistes de Fazouata inférieurs	
CAMBRIEN	Supérieur				
	Moyen	Grès d'Arouetta supérieurs	Grès à Lingules Schistes à Paradoxides		
	Inférieur	Grès d'Arouetta inférieurs	Grès terminaux Schistes de base Grès de Tikirt Calcaires à Archeocyathidés Groupe de Jata (Adoudounien)		
NEOPROTEROZOÏQUE			Groupe de Ouarzazate (PIII) (Série volcano-détritique et argilo-gréseuse rouge) Groupe de Saghro (PII-III) (Série volcano-détritique) Précambrien II (Série schisto-quartzique)		
	PALEOPROTEROZOÏQUE		SOCLE DE REGUIBAT (EBURNEEN)		

Echelle Stratigraphique		Bassin de Tindouf		
		Sud	Nord	
PERMIEN (Autunien)				
CARBONIFERE	Supérieur	Stépahanien		Série de Merkala Grès d'Ouadene
		Westphalien (Moscovien)		
	Inférieur	Namurien	Argiles et grès d'hassi Aoualcoul	Série de Djebel Rouina
		Viséen	Evaporites d'in Barka	Série de l'Ourkaziz
	Inférieur	Tournaisien		Série de Betaina
			Argiles et grès du Kerb Es Slouguia	Grès de Tazout
DEVONNIEN	Supérieur	Strunien	Grès de Kerb En Naga	Argiles du Dra
		Famennien	Argiles de l'Oued Slouguia	
	Moyen	Frasnien	Siltites de l'Oued Rhazzal	
		Givétien	Calcaire de la Kerba Tsabia	Calcaires à Ptéropodes
	Eifélien (Couvinién)	Argiles de l'Oued Talha	Argiles à Ptéropodes	

Figure 1.5 : Colonne lithostratigraphie du bassin de Tindouf (D'après CHABOU, 2001)

2. Géologie locale des zones d'étude

2.1. Gisement ferrifère de Djebel Ouenza

2.1.1. Localisation du cadre géographique

La ville de l'Ouenza, comme chef-lieu de Daira, se trouve à 90 km au Nord du chef-lieu de la Wilaya de Tébessa. Elle est située à 120 kilomètres au Sud-Est d'Annaba (Fig. 1.6).

Le gisement ferrifère de l'Ouenza est localisé à 60 Km au Nord de la ville de Tébessa dans l'anticlinal du Djebel Ouenza, dont les coordonnées géographiques sont : $35^{\circ} 56' 41.8$ » N et $8^{\circ} 05' 35.8$ » E.

Il repose sur le flanc nord d'un massif montagneux qui culmine à un pic de 1288 m, il est d'environ 12 km de longueur sur 5 km de largeur. Les amas métallifères, comprennent successivement du Nord-Est au Sud-Ouest : le Coudiat Douamis, le Coudiat Hallatif, la région des conglomérats, le quartier Sainte-Barbe, le gisement de Chagoura et le Coudiat Zerga. Le minerai affleure sur des longueurs atteignant parfois 250 mètres et des hauteurs de 45 mètres (CHAIN. R, 2006).

La topographie est très caractéristique à celle de l'Atlas saharien. Son relief est assez accidenté. L'altitude maximale signalée à Djebel Ouenza est de 1206 m enregistrée au niveau du lieu Chagoura.

Les réserves géologiques du gisement ont été estimées à 87 millions de tonnes avec une teneur en fer de 48% dont les minéraux prédominants sont l'hématite, la goethite et la limonite.



Figure 1.6 : Position géographique du gisement ferrifère de l'Ouenza (Google Maps, 2019)

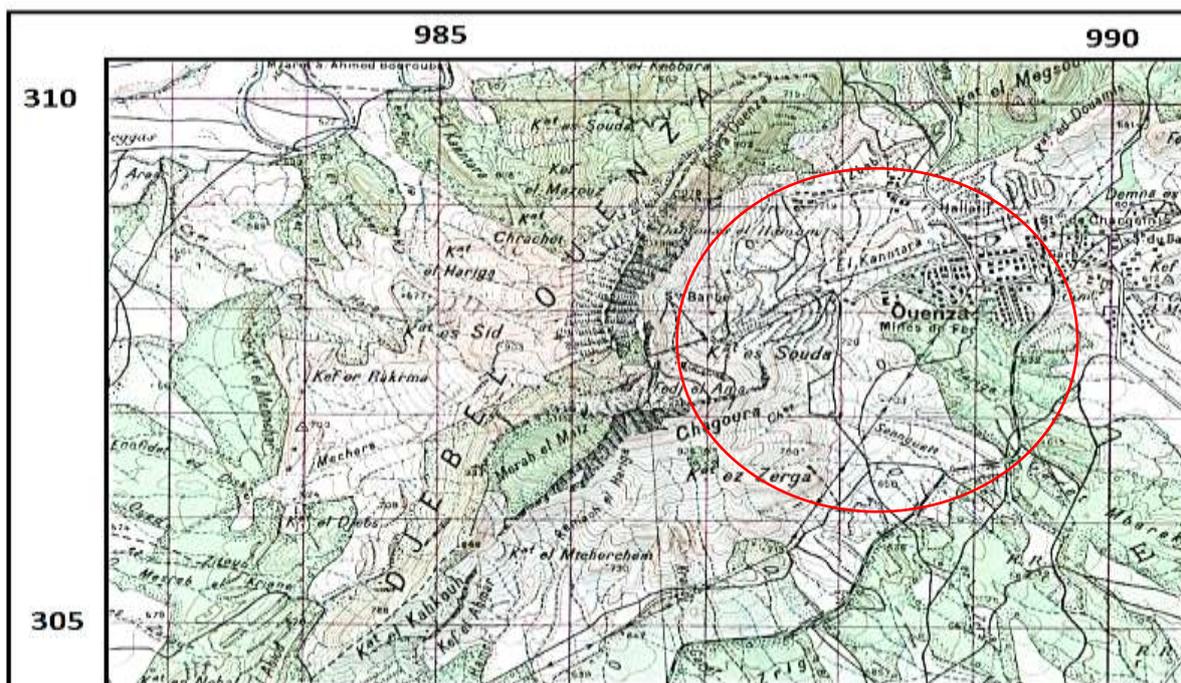


Figure 1.7 : Carte topographique de Djebel Ouenza (Extrait de la carte topographique de Tébessa, 1/50000, coordonnées UTM)

2.1.2. Contexte géologique

a. Plan structural

Le massif de l'Ouenza est situé dans l'Atlas du Sahara oriental, au sein d'un bassin d'affaissement dans l'avant-pays orogénique nord-africain. La structure du massif de l'Ouenza correspond à un anticlinal dissymétrique de direction NE-SW où le noyau de ce pli est occupé par un diapir triasique qui a pénétré dans la couverture sédimentaire du Crétacé au milieu et à la fin de l'évolution du bassin (Aoudjehane et al, 1992).

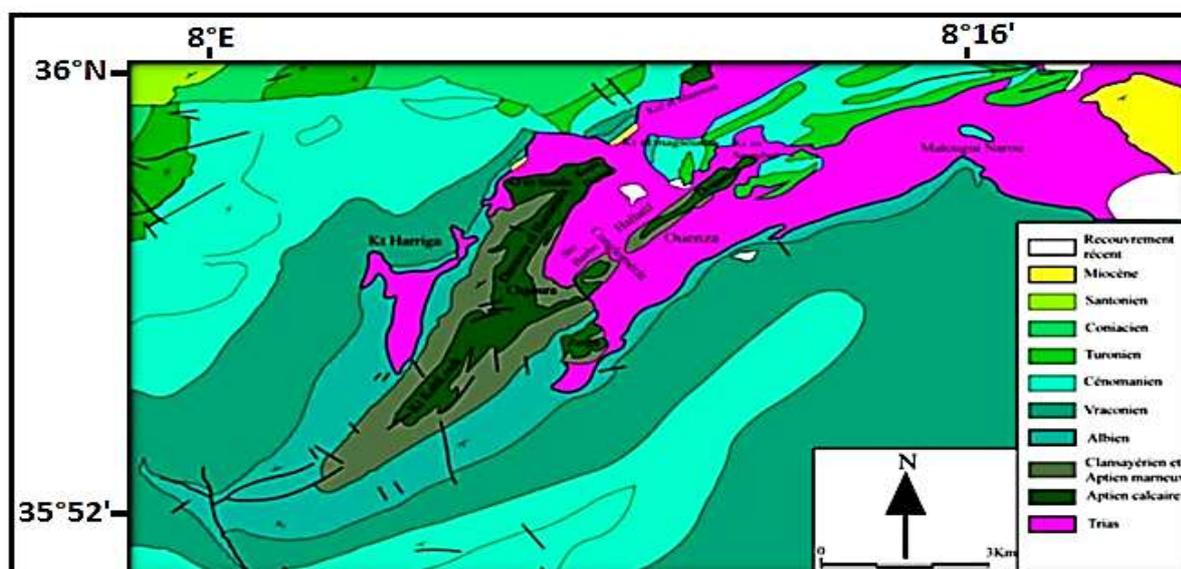


Figure 1.8 : Carte géologique schématisée du Djebel Ouenza (D'après Dubordieu, 1956, modifié par Vila, 1994)

La structure du massif de l'Ouenza qui est due aux effets de la poussée diapirique du Trias, est affectée par des failles inverses et des décrochements de directions WSW-ENE et WNW- ESE.

L'organisation structurale du massif de l'Ouenza est le résultat de la tectonique saline et de la compression néogène où on distingue trois zones triasiques :

- Une zone centrale où les roches triasiques sont profondément enracinées.
- Deux zones latérales, qui résultent de l'extravasation de l'évaporite centrale.

Les formations les plus anciennes exposées en surface sont les séquences évaporitiques entremêlées (marnes bariolées à gypse, blocs de dolomies plus ou moins stratifiées, calcaires, cargneules, grès et rarement des ophites du Trias) qui présentent un noyau halitique où l'on trouve une zone avec anhydrite secondaire (< 20 m) et une zone supérieure avec du gypse (de 50 à 200 m) (Bouzenoune, 1993).

b. Plan stratigraphique

La stratigraphie de l'Ouenza a été mise en place par un mouvement diapirique de deux périodes :

La première période du mouvement diapirique fut connu par la pénétration de la matière qui s'est produite pendant l'Aptien et s'est enregistré par une re-sédimentations de matériaux triasique dans les calcaires aptiens, ensuite par un amincissement vers le sommet du diapir avec des variations lithostratigraphiques sur le sommet et dans les puits périphériques (Dubourdiou 1956; Thibieroz et Madre 1976).

La deuxième période de ce mouvement s'accompagnant d'une infiltration d'évaporite, s'est produite avant la transgression Vraconienne. Cette extrusion qui fut inscrite par la resédimentation de quartz triasique et de dolomie dans le conglomérat Vraconien, a inversé les strates apto-albiennes. Cependant, au cours du Néogène, la compression a impliqué une déformation des structures préexistantes et le retour de l'halokinésie.

De ce fait, l'activité diapirique a pesé sur le régime de sédimentation, c'est pourquoi on remarque que le massif de l'Ouenza possède un caractère pratiquement sédimentaire car il est composé principalement de calcaires, de marnes et de grès selon la lithologie suivante :

- **Le Mésozoïque**

- ✓ **Le Trias**

Le Trias est essentiellement représenté par des formations affleurant sur de grandes surfaces avec des couvertures sédimentaires par endroit. Ainsi, les marnes bariolées à gypse, les dolomies, les débris de calcaire et les grès forment les dépôts du Trias.

- ✓ **Le Crétacé**

- L'Aptien*

Les dépôts sédimentaires de l'Ouenza sont caractérisés par deux lithologies distinctes, l'une à faciès carbonaté avec des intercalations de marnes et calcaire et l'autre à faciès terrigène composé de marnes, grès et calcaires.

Il est à noter que les calcaires micritiques en particulier, sont le siège des accumulations ferrifères. Le Clansayésien y est présent avec une unité d'une puissance d'environ 90 m, composée de marnes grises et gris-jaune contenant parfois des calcaires et des grès dans certains cas, minéralisés en oxyde de fer.

L'Albien

Les dépôts de cet étage sont répartis en trois niveaux :

- Le niveau inférieur d'une puissance de 50 m, il représenté par une intercalation de marnes jaunes et grise-jaunes et de calcaires gréseux et argileux.
- Le niveau moyen qui est composé de marnes gris-noires et d'inter-couches de calcaire et de calcaire argileux, possède une épaisseur de 130 m.
- Le niveau supérieur est caractérisé par une épaisseur de 200 m et un dépôt de marnes et de calcaires argileux.

• **Le Quaternaire**

Les formations sédimentaires du Quaternaire englobent essentiellement des travertins localisés au NE de la région et des éboulis de marnes et de carbonates.

Cependant, on rencontre dans certaines zones limitées des couvertures de 2-3 m de formations d'anciennes nappes d'épandage, constituées de marnes.

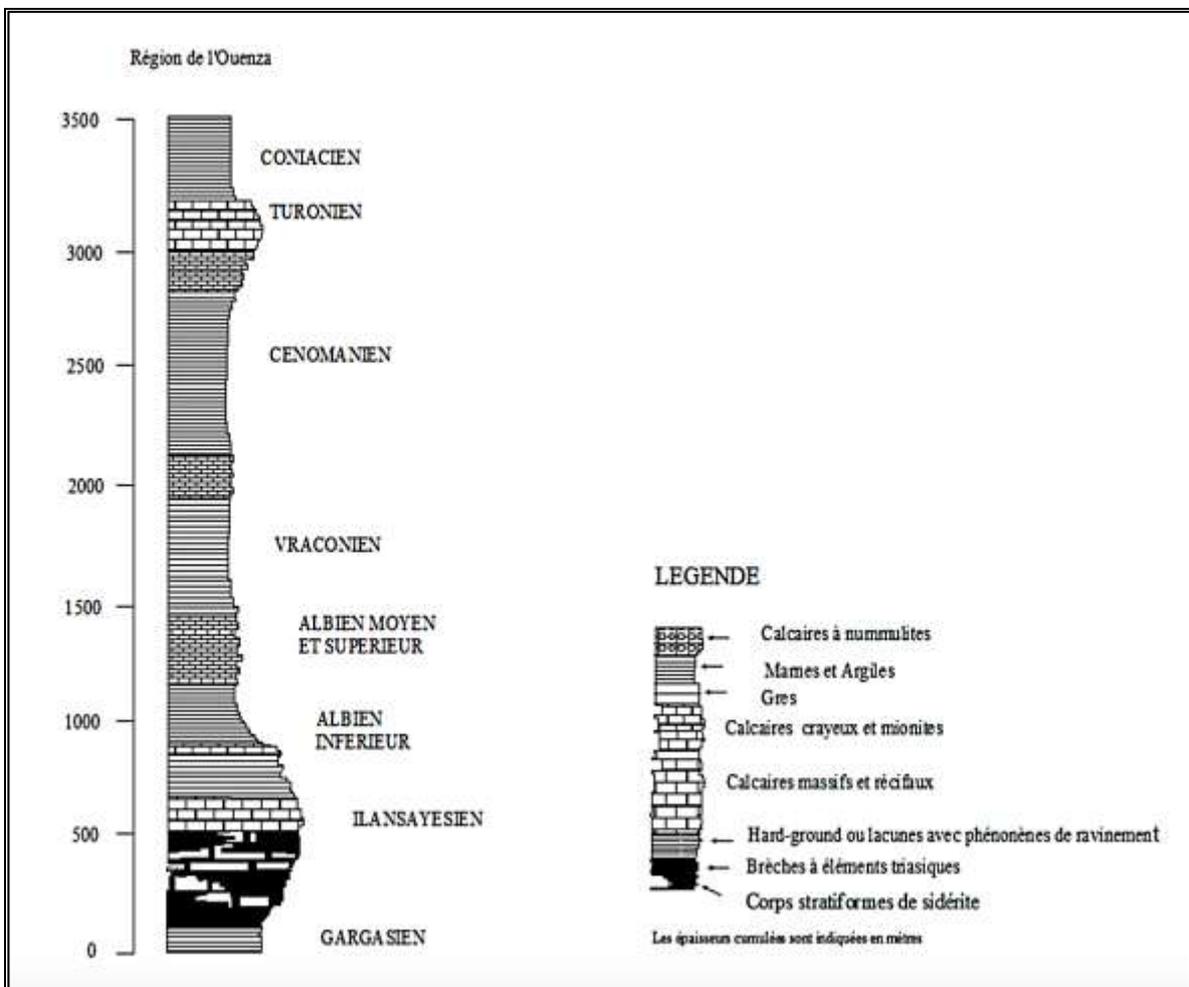


Figure 1.9 : Colonne lithostratigraphique de la coupe géologique de la mine de l'Ouenza (Khoudair Chaabane et al, 2015)

c. Minéralisation

La mine de l'Ouenza est connue par une très importante minéralisation qui correspond à une accumulation ferrifère, cependant on trouve d'autres minéralisations polymétalliques associées au Fer comme le Cu, Pb, Zn, Ba et F. Ces gîtes sont généralement encaissés dans des calcaires à caractère récifal de l'Aptien.

Le gisement contient de l'hématite qui est soit sous un aspect pulvérulent avec une couleur bleue ou noire rougeâtre, soit en tant que masse fade sans cristaux apparents ou encore en tant que masses homogènes ayant une toile rhomboédrique apparente reçue du minerai carbonaté.

Cependant, dans les géodes ainsi que les zones de fracture on trouve la présence de la goethite accompagnant l'hématite qui est très fréquente sous forme d'encroutements à surface mamelonnée.

Dans les zones bréchiques et de fracture, la limonite est fréquemment associée à la goethite, où elle correspond à des argiles imprégnées de limonites. Toutefois la sidérite et l'ankérite représentent les carbonates de fer qui montrent souvent un aspect bréchique (Chain.R, 2006).

Tableau 1.1 : Etat récapitulatif des réserves géologiques actualisées au 31/12/2007 (M.S. Taleb, 2012)

Site	Réserves en tonne	Teneur en Fe %
Chagoura Nord	21071817	48,87
Chagoura Sud - Pic	22408212	49,51
Saint Barbe	13224377	47,7
Conglomérat	6011290	47,4
Hallatif	4931028	51,00
Douamis	11419058	53,00
Zerga	3405440	42,7
TOTAL	82 471 222	-----
Moyenne	-----	49,19

2.2. Gisement ferrifère de Gara-Djebilet

2.2.1. Localisation du cadre géographique

Le gisement de minerai de fer de Gara-Djebilet est situé à 100 km environ au SSE sur le flanc Sud du bassin de Tindouf (Sud-Ouest de l'Algérie), et appartient à la ceinture de fer oolitique paléozoïque Nord-africaine. Il s'étale sur une distance dépassant les 3000 km de Zemmour (Mauritanie) jusqu'à la Lybie, et comporte des pierres ferrugineuses datant de l'Ordovicien, Silurien et Dévonien (Guerrak, 1988, 1991).

Occupant une surface de plus de 131 km² à 170 km Sud-Est de la ville de Tindouf, et à une altitude oscillant entre 400 et 600 m, dont les coordonnées géographiques sont : 26° 52' 53.8" N et 7° 10' 0.6" W. Le gisement de Gara-Djebilet, découvert à partir de 1952, comporte des réserves minières de 1 540 millions de tonnes, avec une teneur en fer de près de 56%.

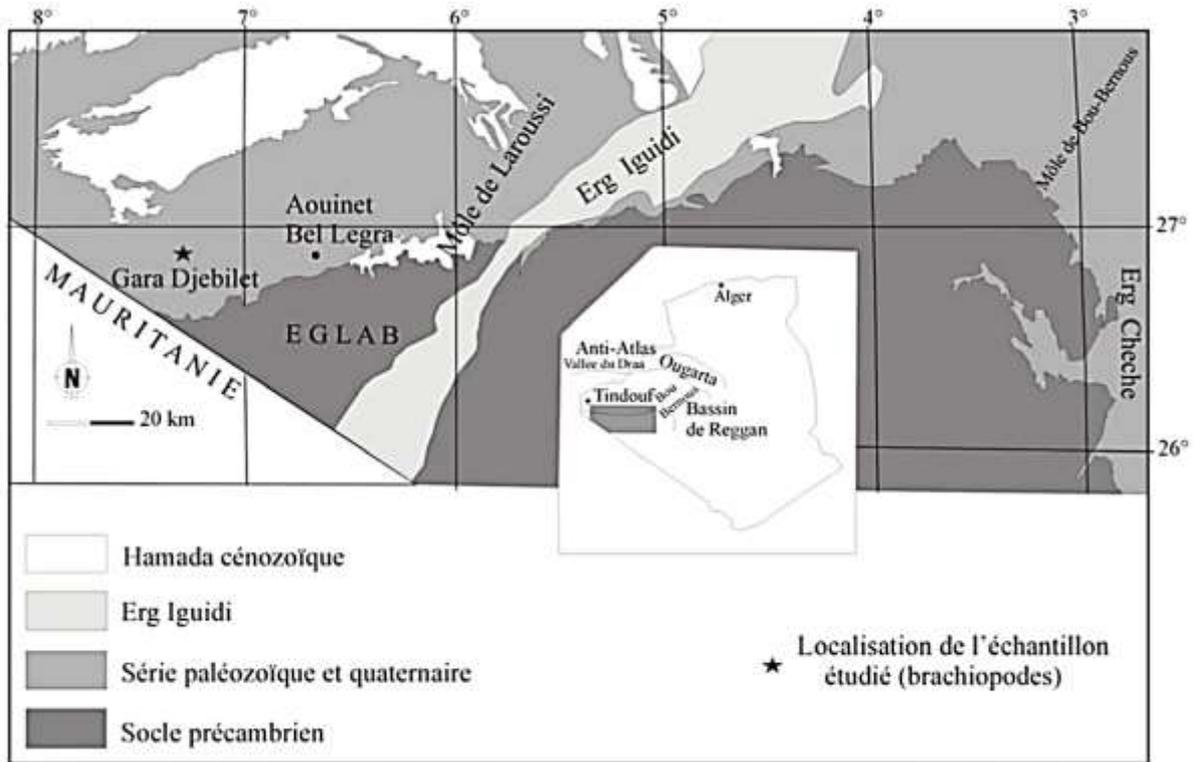


Figure 1.10: Localisation géographique du gisement de Gara Djebilet (Bitam et al., 1997)

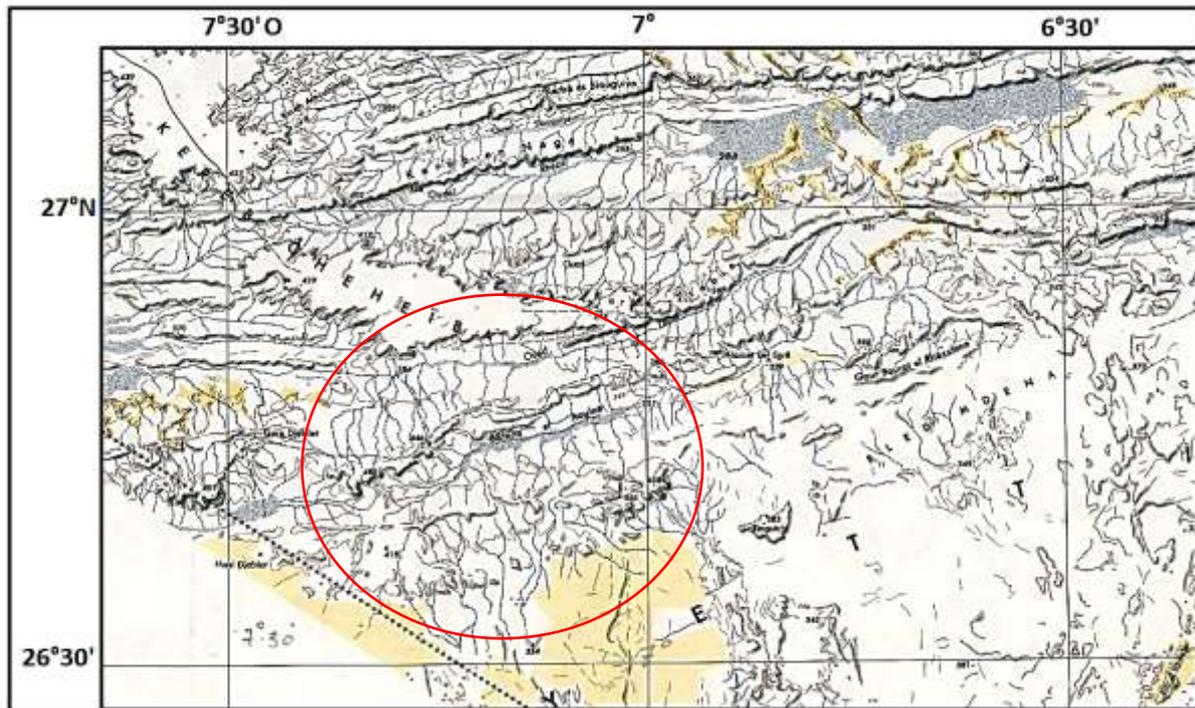


Figure 1.11 : Carte topographique de la région de Gara Djebilet (Extrait de la carte topographique de Tindouf NG-29 N-E, 1/500000)

2.2.2. Contexte géologique

Les sédiments du Dévonien inférieur (précoce) présents dans le bassin de Tindouf, connus sous le nom de "formation de Gara Djebilet", se composent principalement de grès avec des intercalations de schistes. Il est divisé en deux membres :

- Le membre inférieur " Grès de Djebilet " de l'âge Lochkovien-Praguien.
- Le membre supérieur " Grès supra-minéraux " de l'âge Emsien.

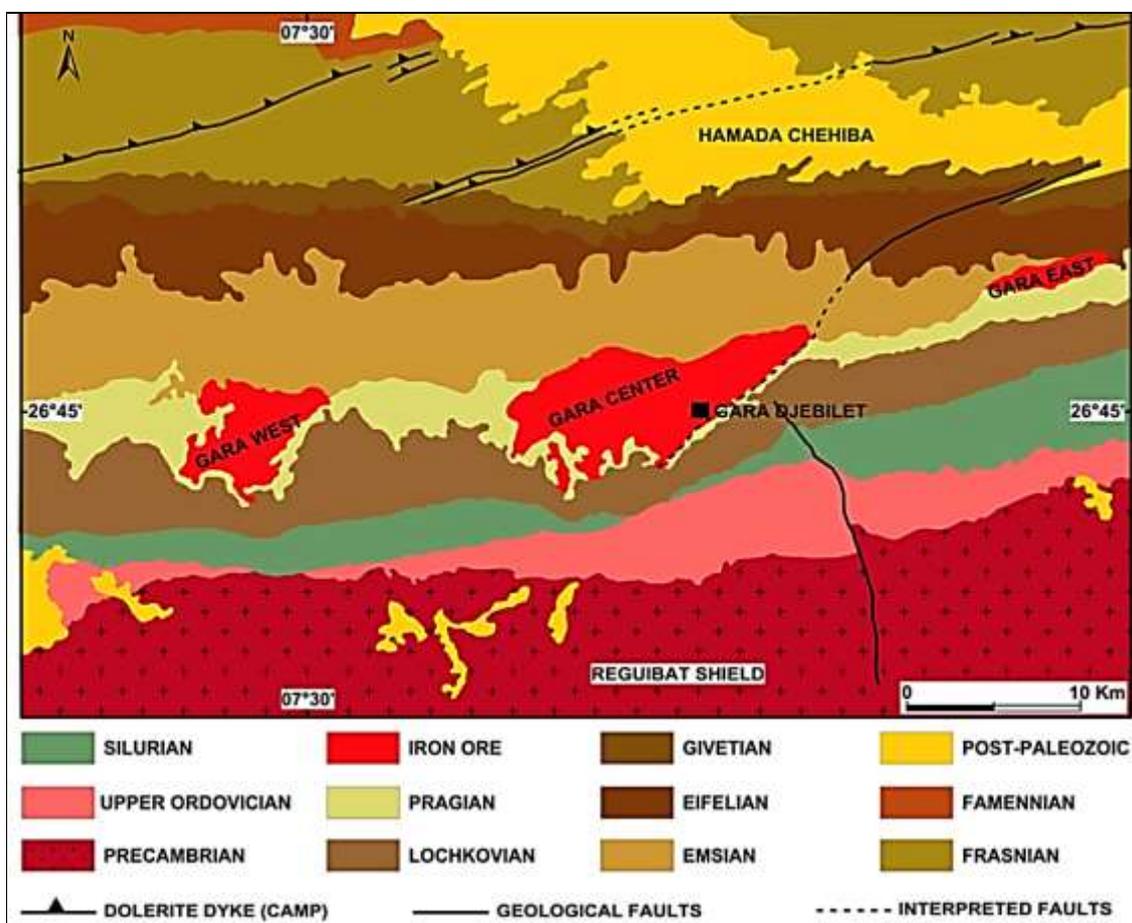


Figure 1.12 : Extrait de la carte géologique de Gara Djebilet (Chabou, Saïbi, Bersi ; 2015)

a. Plan structural

Les failles de direction NE-SW et ENE - WSW recoupant la région du flanc Sud du bassin de Tindouf représentent la cause principale de la tectonique affectant cette région, ces failles sont liées aux montées magmatiques (gabbro-dolérites).

Les roches qui constituent la région d'étude se présentent sous trois formes :

- En **dykes** : il s'agit de longs dykes d'environ 1 à 10 m d'épaisseur, orientés WSW-ENE, recoupant la série paléozoïque du flanc Sud du bassin de Tindouf entre les méridiens 6°10' et 8°30' Ouest. Cette forme correspond au type de structure le plus répandu dans cette région.
- En **sills** : souvent injectés dans des formations argileuses du Famennien, cependant, ils sont rares et peu épais. Parfois d'autres sills affleurent à l'Est.

- En **massifs** intrusifs ou en cheminées : connues dans la région et touchent des surfaces importantes.

La couverture sédimentaire du flanc Sud du bassin de Tindouf est constituée de dolérites d'âge postérieur au Carbonifère supérieur ou Mésozoïque.

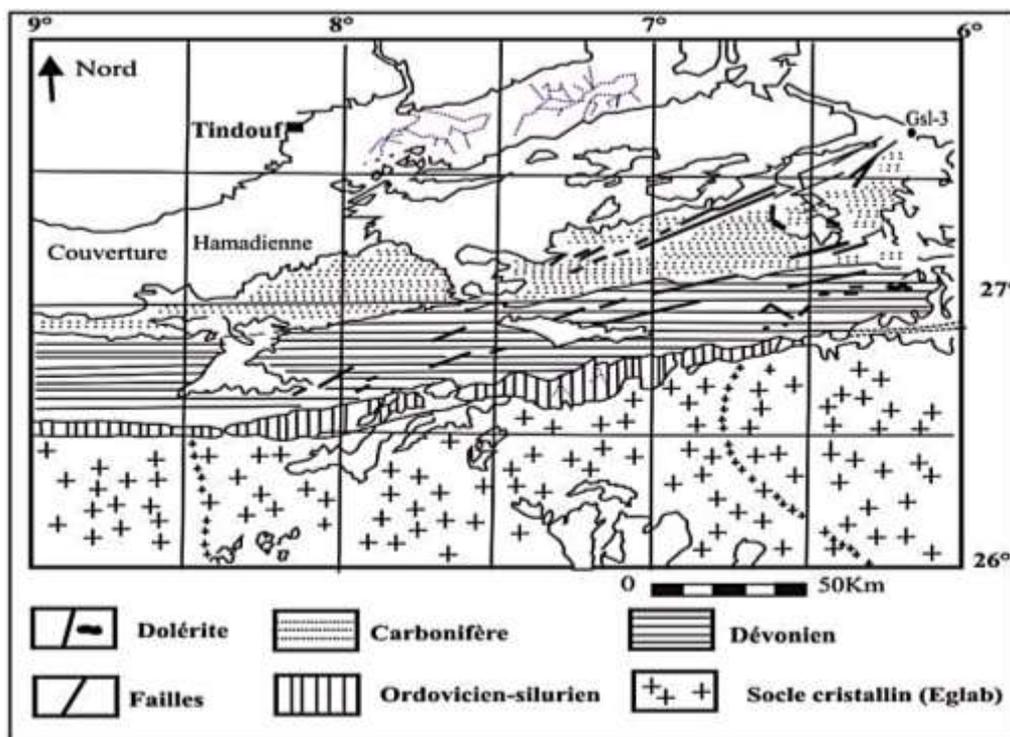


Figure 1.13 : Carte structurale de la région de Gara-Djebilet (d'après GEVIN, 1960)

b. Plan lithostratigraphique

Selon les travaux de recherche antérieurs (GEVIN, 1960; FABRE, 1978), la région de Gara-Djebilet se compose en majeure partie de la série lithologique suivante :

- **Le Précambrien**

Caractérisé par la présence de granites.

- **Le Paléozoïque**

- ✓ **Le Silurien**

Il comporte surtout des argiles et des séries monotones, il affleure en continuité de Zemmour jusqu'à l'Erg-Chech, mais avec une diminution des épaisseurs allant d'Aouinet à Bel-Egraa (de 120 à 200 m).

- ✓ **Le Dévonien**

Il affleure de l'Ouest à l'Est, et on y distingue plusieurs variations de faciès. Il est subdivisé en trois niveaux (GEVIN, 1960):

Le Dévonien inférieur

Représenté par d'importants changements dont l'épaisseur est de 150 m à Gara-Djebilet à 60 m à Gour-Jiffa. La série lithologique des régions (pays Mecham, Bou-Bernous), comme déjà mentionné par (GEVIN, 1960) est caractérisée de bas en haut par :

- Des conglomérats à la base : le faciès conglomératique est rare et souvent substitué par des micros conglomérats ferrugineux.

- Une formation argilo-schisteuse surmontée à l'Ouest par une formation argilo-calcaire assez similaire à celle du Gothlandien sous-jacent.
- Un complexe gréseux où les grès sont généralement grossiers et quelques fois ferrugineux et pouvant comporter des passées conglomératiques ou montrer des stratifications entrecroisées « Hard-grounds », et argilo-gréseux généralement micacé où on peut voir des ripple-marks, avec parfois des niveaux de minerai de fer.

Le Dévonien moyen

Caractérisé par des formations lithologiques d'origine marine affleurant dans le lit d'Oued Talha. Selon (GEVIN, 1960), les lithologies présentes dans le Dévonien moyen sont les suivantes :

- L'Emsien terminal à Eifelien basal (ex Couvinien inférieur) : caractérisé par des argiles gréseuses à l'Ouest, des grès dans la zone située entre Gara-Djebilet et le Mabbès et des marnes calcaires à l'Est. L'épaisseur de cette formation varie de 5 à 15 m.
- Le Couvinien supérieur d'une puissance maximale de 80 m à l'Oued Talha et composé de marnes gréseuses de couleur jaunâtre à Calceolas.
- Le Givétien inférieur : formation marno-calcaire dont la puissance varie de 90 à 10 m à l'Est et possède une forme de bancs « coralligènes », quelques fois caractérisés par des lentilles, riches en polypiers et brachiopodes.

Le Dévonien supérieur

Cet ensemble possède une épaisseur variant de 300 à 220 m de l'Ouest vers l'Est, et comporte trois unités du bas vers le haut présentées comme suit :

- Une formation argilo-gréseuse à intercalations de lentilles calcaires, généralement à lumachelles.
- Une formation argileuse, argilo-gréseuse caractérisée par des ripple-marks avec de fins lits de gypse.
- Une formation argilo-gréseuse allant vers l'argile silteuse vers l'Est.

✓ Le Carbonifère

Il représente les unités lithologiques du Paléozoïque du bassin de Tindouf, avec l'absence du Permien. On y trouve :

Le Carbonifère marin

Il est subdivisé en trois niveaux :

- Le Tournaisien : caractérisé par une épaisseur qui varie de 50 à 150 m de l'Ouest vers l'Est avec des grès calcaires à l'Ouest et des argiles gréseuses au méridien 7° Ouest.
- Le Viséen inférieur : ne comporte pas de discontinuités apparentes et possède une épaisseur qui croît de 80 à 300 m lorsqu'on se déplace vers l'Est.
- Le Viséen supérieur : composé de marnes gréseuses et de grès tendres dont la puissance diminue en se dirigeant vers l'Est de 600 à 550 m.

Le Carbonifère continentale

Il est subdivisé comme suit :

- Le Namurien : c'est une formation laguno-lacustre composée d'argiles gréseuses.
- Le Westphalien : il affleure sur une distance de 80 m, composé d'argiles et de grès avec des restes de végétaux (Corynopteriscoralloïdes, Annularia-radiata et enfin Neuropteris gantes).

AGE	FORMATION	THICKNESS (m)	LITHOLOGY	
NAMURO-WESTPHALIAN	HASSI AOULEOUEL	350		SANDY SHALES, FINE SANDSTONES
				SHALES
VISEAN	AIN EL BARKA	600		SHALES, LIMESTONES AND DOLOMITES
				ANHYDRITE
				SHALES AND LIMESTONES
	KERB ES SEFIAT	310		SHALES AND LIMESTONES
TOURNAISIAN	KERB ES SLOUGUIA	80-160		SHALES AND LIMESTONES
FAMMENIAN	KERB EN NAGA	100-140		SILTSTONES AND SHALES
	OUED GHAZAL	100-150		ARGILLACEOUS SILTSTONES
FRASNIAN	OUED TSABIA	80-160		SHALES SILTSTONES AND LIMESTONES
GIVETIAN	OUED TALHA	40-100		LIMESTONES AND SHALES
EIFELIAN				
EMSIAN				
PRAGIAN LOCHKOVIAN	DJEBILET	50-100		SILTSTONES AND SANDSTONES
SILURIAN	SEBKHA MABBES	80-200		SHALES
CAMBRO-ORDOVICIAN	GHEZZIANE	0-70		SANDSTONE
PRECAMBRIAN	YETTI-EGLAB	-		GRANITE

Figure 1.14 : Colonne stratigraphique synthétique de Gara-Djebilet (modifié-Guerrak, 1988)

c. Minéralisation

Le minerai de fer oolitique de Gara-Djebilet est remarqué par une intercalation dans les sédiments du Dévonien inférieur, selon (Guerrak, 1988), ces sédiments sont situés dans les extrémités entre les grès argileux du Praguien du grès de Djebilet inférieur et les conglomérats/grès Emsien du grès supra-minéraux supérieur.

On distingue trois gisements capitaux dans la région :

- Gara-Ouest avec 14 km de longueur, 4 km de largeur et 30 m d'épaisseur.
- Gara-Centre avec 20 km de longueur, 5 km de largeur et 30 m d'épaisseur.
- Gara-Est avec 7 km de longueur, 1 km de largeur, 9 m d'épaisseur.

Ces trois principaux gisements s'étendent sur environ 60 Km d'Ouest vers l'Est (Guerrak, 1988).

Les dépôts se trouvent sous forme de mesas de lentilles oolithiques, de ferstone, plates discontinues par des sédiments essentiellement argileux et sableux.

D'après (Guerrak, 1988), on distingue trois zones essentielles dans le gisement principal de minerai de fer de gara-Djebilet et qui sont les suivantes :

- Zone (1) de minerai *non magnétique inférieur* contenant de la chamosite, sidérite, hématite, goethite, apatite et quartz. Et une teneur en fer de 54,6%.
- Zone (2) de minerai *magnétique*, cette zone correspond à la zone dont le minerai est considéré comme économique et principal, ayant une teneur en fer de 57.8%, et contenant aussi de la magnétite, maghémite, chamosite, sidérite, hématite et de l'apatite.
- Zone (3) de minerai *non magnétique supérieur* avec une teneur en fer de 53%, contenant aussi la goethite, chamosite, hématite, sidérite, et apatite.

Conclusion

L'étude effectuée dans ce chapitre engendre la réalisation d'une bibliographie générale contenant les informations géologiques incluant les caractères lithologiques et la répartition spatiale des différentes roches rencontrées dans le secteur d'étude. Depuis le temps les géologues et géomorphologues s'intéressent à comprendre par divers moyens les mécanismes et les processus qui génèrent les formations des terrains, plus largement leurs compositions lithologiques et lithostratigraphique.

Dans le but d'améliorer les activités d'exploration des matières minérales et de contribuer ainsi au développement de l'économie, l'utilisation de moyens plus performants s'appuyant sur des concepts scientifiques évolués est nécessaire, d'où l'introduction de la télédétection qui constitue l'un des moyens les plus adaptés. Toutefois, son application dans le secteur minier nécessite la connaissance de certaines notions.

Chapitre 2

Téledétection au profit de la prospection
minière

Introduction

La télédétection désigne, dans son acception la plus large, la mesure ou l'acquisition d'informations sur un objet ou un phénomène, par l'intermédiaire d'un instrument de mesure n'ayant pas de contact avec l'objet étudié.

Toutefois, en pratique, la télédétection est surtout utilisée pour les applications géospatiales, et concerne essentiellement les techniques mises en œuvre et l'utilisation à distance des systèmes (par exemple, d'un avion, d'un engin spatial, d'un satellite ou encore d'un bateau) permettant l'observation de la surface de la Terre, ou d'autres planètes. Ces systèmes nécessitent l'utilisation des capteurs qui exploitent essentiellement la mesure du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par les objets.

Les applications de la télédétection ont évolué au fil du temps dans tous les domaines : météorologie, climatologie, océanographie, cartographie, géographie, agriculture, environnement, etc. L'imagerie de télédétection s'est ainsi largement diffusée et vulgarisée.

1. Historique de la télédétection

L'histoire de la télédétection est décrite en cinq grandes étapes (C. Kergomard) :

- Débutant en dix-huit-cents cinquante-six jusqu'à la première guerre mondiale où pour la première fois on a installé à bord d'un ballon de manière fixe un appareil photographique.
- De la première guerre mondiale à la fin des années cinquante où la photo aérienne devient un dispositif très important pour la cartographie, la recherche et la surveillance.
- Au début des années dix-neuf cents cinquante-sept jusqu'à dix-neuf cent soixante-douze, on assiste à un début d'exploration de l'espace qui donna ainsi naissance à l'apparition de la télédétection moderne.
- Ensuite à partir de dix-neuf cents soixante-douze, fut le lancement du premier satellite de télédétection des ressources terrestres appelé ERTS et qui a été renommé par la suite Landsat-1.
- Enfin, depuis les années soixante-dix jusqu'à présent, un intérêt mondial a été accordé à la télédétection où on remarque un développement extraordinaire et continu tant exprimé par le lancement des satellites (Terra, LANDSAT, SPOT et autres), mais aussi par rapport aux capteurs et aux techniques de traitement.

2. Notions de télédétection

2.1. Définition générale de la télédétection

La télédétection est définie comme étant l'ensemble des techniques, qui par l'acquisition de données ou d'images à distance, permettent d'obtenir des informations sur la surface terrestre par l'intermédiaire d'un instrument de mesure qu'on appelle capteur, et ce, sans contact direct avec l'objet étudié (S.C. Liew, 2001).

La télédétection est une discipline qui regroupe l'ensemble des processus qui consiste à capter l'énergie par le biais des capteurs, cette énergie est définie par le rayonnement électromagnétique qui est émis ou réfléchi par l'objet, représentant ainsi un support qui réalise des activités d'observation, d'analyse et d'interprétation de l'information en vue de la mettre en application.

Ces processus se distinguent entre eux par les types de capteurs utilisés qui peuvent être embarqués à bord des avions, navettes spatiales ou des plates-formes spatiales appelés satellites. Le mode d'acquisition peut être analogique ou numérique, actif ou passif. Il est également défini par la résolution spatiale, la gamme spectrale utilisée ainsi que la surface observée (S.C.Liew, 2001 ; T.M. Lillsand et R.W. Kiefer, 1994).

Dans la pratique, on utilise les données de la télédétection telles que des images collectées par des avions ou des satellites. Ces images satellites sont réelles et se définissent comme étant

une donnée numérique dont les différents paramètres peuvent être connus et pris pour une région déterminée de la surface de la terre. De nos jours, divers satellites permettent de procurer des images de la terre, où chaque satellite offre un ou plusieurs types d'images.

Le choix d'une image satellite peut se faire suite à deux critères importants qui sont : sa résolution et sa gamme spectrale (contenu des bandes spectrales). En outre, il est nécessaire de définir le périmètre de couverture qu'il faut utiliser sur l'image.

Pour générer une image, une mesure des rayonnements électromagnétiques est présentée en différentes bandes du spectre électromagnétique, l'objectif étant d'obtenir le plus d'informations en combinant ces bandes. L'intensité du rayonnement électromagnétique pour chaque bande est enregistrée numériquement pour des unités d'échantillonnage spatial qu'on appelle pixels (SEOS, 2015).

L'application de la télédétection a vu son étendu dans plusieurs domaines, par exemple, l'évaluation des risques naturels comme les tremblements de terre et les inondations ; la gestion des ressources naturelles ; l'estimation d'impact des catastrophes naturelles.

La télédétection est également utilisée dans l'évaluation des réserves géologiques et minérales, et c'est dans ce contexte que notre étude est proposée comme outil de support pour réaliser une prospection minière dans des régions données.

2.2. Principe de fonctionnement

Dans la plupart des cas, la télédétection implique une interaction entre l'énergie incidente et les cibles. Le processus de la télédétection comporte sept éléments que nous citons ci-dessous (A. Bourezg ; 2012) :

2.2.1. La source d'énergie

La source d'énergie est nécessaire pour illuminer la cible (objet étudié), dans deux types de télédétection :

a. En télédétection passive

Dans ce cas, les sources de rayonnement sont des sources naturelles (Terre, Soleil,...) et le capteur est un simple récepteur passif (exemples : Landsat, satellites SPOT, NOAA ou Météosat).

b. En télédétection active

Dans ce cas, la source de rayonnement est une source artificielle qui est embarquée à bord du satellite et l'émission se fait dans la direction des objets étudiés (les images radars en font partie).

Donc, selon le cas, le rayonnement provient du soleil, des objets au sol, ou du satellite lui-même.

2.2.2. L'atmosphère

Généralement, les capteurs reçoivent un rayonnement émis ou réémis par la Terre et l'atmosphère. Aussi, les particules atmosphériques (molécules gazeuses et aérosols) absorbent et/ou diffusent le rayonnement électromagnétique, ce qui crée un bruit indésirable dans les images de télédétection qu'il faut corriger dans plusieurs applications.

2.2.3. La cible

Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés physico-chimiques de la surface.

Les différentes interactions sont donc :

a. L'émission

Tout corps dont la température diffère du zéro absolu émet un rayonnement électromagnétique propre et le spectre d'émission de ce rayonnement est caractéristique de sa température. Cette loi n'est vérifiée que pour le « corps noir », mais plusieurs milieux naturels, comme l'eau, ont un comportement proche de celui du corps noir. L'émission du corps noir dépend de sa température. Plus la température d'un corps est élevée, plus son maximum d'émission tend vers les courtes longueurs d'onde. En télédétection optique, l'émission vient du soleil qui rayonne dans le visible, le proche infrarouge et le moyen infrarouge en raison de sa température générée par des réactions thermonucléaires.

b. La réflexion

Dans le cas de la réflexion, les rayonnements sont réfléchis et renvoyés vers l'espace. Généralement, la réflexion est diffuse, c'est-à-dire qu'elle se fait dans toutes les directions, mais elle peut comporter une composante spéculaire, comme celle observée sur un miroir d'eau calme.

c. L'absorption

Celle-ci représente la capacité d'un corps à ne pas réfléchir les rayonnements qu'il reçoit. Tout corps absorbant des rayonnements tend à s'échauffer.

2.2.4. Le capteur et l'enregistrement de l'énergie

Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée et transmise aux stations de réception terrestres. Le capteur constitue un instrument d'acquisition d'images d'observation de la Terre, souvent à bord des satellites, qui sont des objets gravitant autour de la Terre grâce à l'équilibre entre la force de gravitation et la force centrifuge. Selon les conditions, la trajectoire d'un satellite est soit un cercle, soit une ellipse.

2.2.5. Transmission, réception et traitement

L'énergie enregistrée par le capteur et convertie en données numériques est transmise, souvent par des antennes de télémétrie, à une station de réception où l'information est

transformée en images numériques fournies aux utilisateurs par différents moyens (ex. : serveurs nuagiques).

2.2.6. Interprétation et analyse

Durant cette étape, l'image enregistrée par les capteurs et traitée nécessite une interprétation visuelle et/ou numérique afin d'obtenir l'information voulue concernant la cible.

2.2.7. Application

La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, découvrir de nouveaux aspects relatifs aux phénomènes étudiés et aider à résoudre un problème particulier.

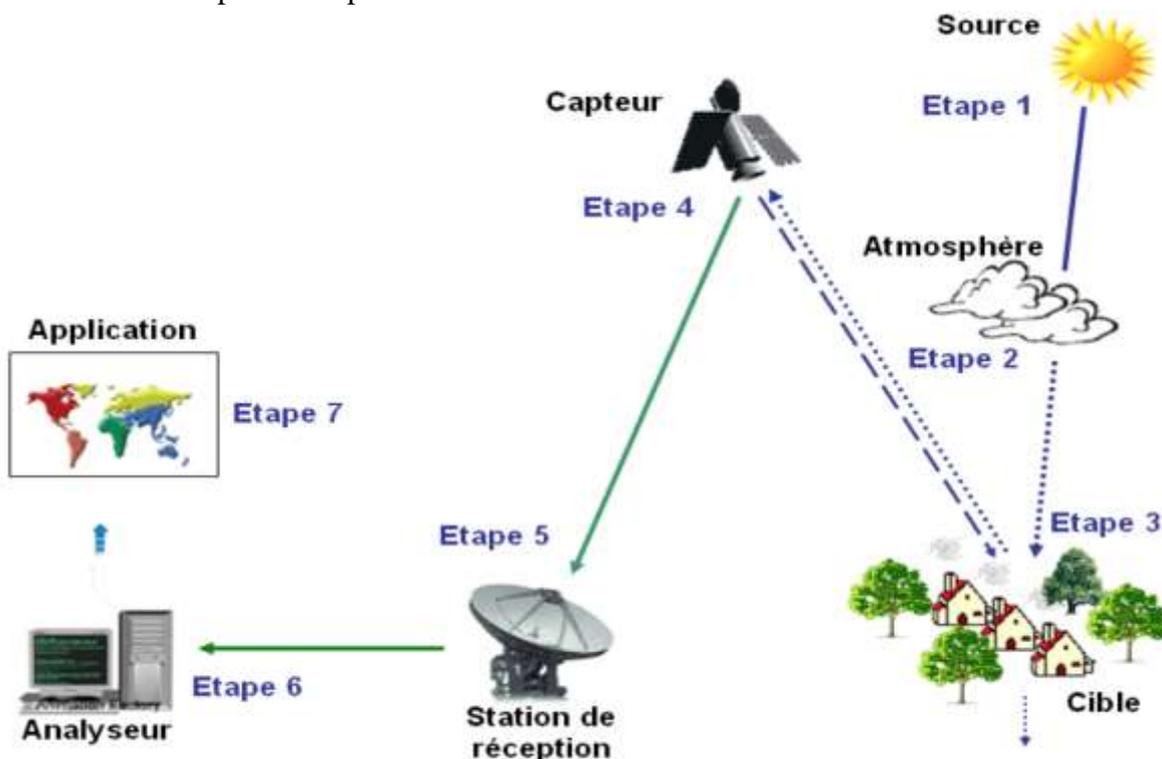


Figure 2.1 : Etapes du processus de traitement par télédétection (N. Boudali, 2012)

2.3. Bases physiques de la télédétection

L'élément principal qui permet de réaliser le processus de la télédétection est le capteur qui se définit comme étant un organe très sensible faisant objet d'un radiomètre imageur mesurant ainsi des rayonnements électromagnétiques qui par la suite sont organisés et structurés sous forme d'une image (L. Polidori).

Les images enregistrées et obtenues sont une source d'informations des objets qu'elles représentent. Toutefois, cette représentation se définit par le rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi qui lie entre l'image et l'objet. Bien entendu, la définition de base de la télédétection repose en premier lieu sur la connaissance du comportement et du contact des rayonnements électromagnétiques avec la surface de la terre à travers l'atmosphère. Cependant, la possibilité de mettre une équation rigoureuse qui permet de calculer les résultats de la télédétection est compliquée à effectuer, et ce, en raison de la complexité de l'image liée à la

nature du terrain ainsi que l'atmosphère de la région d'étude. De ce fait, l'analyse dans une majeure partie de la télédétection s'appuie sur l'expérience, les images de références et l'intuition d'interprétation de l'image (N. Boudali, 2012).

2.3.1. Rayonnement électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique se définit par deux théories, la première dite théorie corpusculaire de la lumière qui considère que le rayonnement est un flux de particules élémentaires (photons), la deuxième dite théorie ondulatoire qui définit le rayonnement électromagnétique comme une composition de deux vecteurs perpendiculaires entre eux, se déplaçant à la vitesse de la lumière, ces deux vecteurs sont le champ électrique et le champ magnétique (K. Soudani, 2005).

Les ondes électromagnétiques sont soit : naturelles (produites par la Terre et par chaque être vivant), soit artificielles (produites par des appareils). Chaque onde électromagnétique a une fréquence, une longueur et une puissance qui lui sont propres. La fréquence se mesure en hertz, la longueur d'ondes en mètres, et la puissance en watt. La longueur d'ondes est d'autant plus petite que la fréquence est élevée, il y a donc un rapport inversement proportionnel entre ces deux notions.

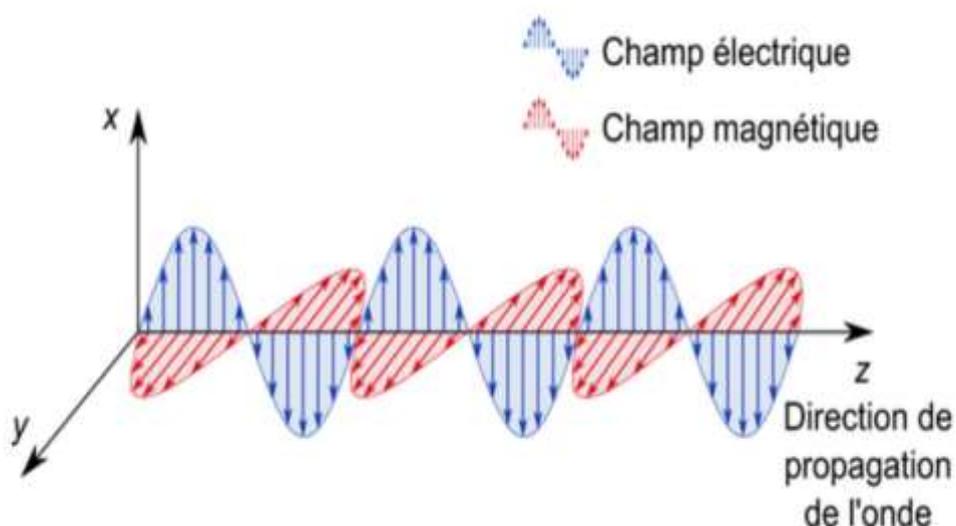


Figure 2.2 : Une onde électromagnétique (Nicolas, 2015)

En revanche la puissance de propagation de l'onde augmente si la fréquence est plus grande, de ce fait les ondes électromagnétiques sont classées en fonction de leur fréquence en :

a. Rayonnements ionisants

Ils englobent les ondes à très haute fréquence. Il s'agit des UV, des rayons X, des rayons gamma et des rayons cosmiques. Ceux-ci se situent au-delà du spectre visible. Ces ondes sont dangereuses, car elles ont la capacité de rompre la composition des atomes.

b. Rayonnements non-ionisants

On retrouve les ondes radio, les micro-ondes, l'infrarouge, le proche ultraviolet et la lumière visible.

2.3.2. Bandes spectrales (spectre électromagnétique)

Le spectre électromagnétique représente la répartition de l'ensemble des rayonnements électromagnétiques classés selon ses différentes composantes en termes de fréquence, d'énergie des photons ou encore de longueur d'onde associée. Le spectre électromagnétique s'étend théoriquement de zéro à l'infini en fréquence (ou en longueur d'onde), de façon continue. Pour des raisons tant historiques que physiques, on le divise en plusieurs grandes classes de rayonnement, qui s'étudient par des moyens particuliers à chacune d'entre elles. En partant des ondes les plus énergétiques, on distingue successivement (UVED, 2008) :

a. Les rayons gamma (γ)

Ils sont dus aux radiations émises par les éléments radioactifs. Très énergétiques, ils traversent facilement la matière et sont très dangereux pour les cellules vivantes. Leurs longueurs d'onde s'étendent d'un centième de milliardième (10^{-14} m) à un milliardième (10^{-12} m) de millimètre.

b. Les rayons X

C'est des rayonnements très énergétiques traversant plus ou moins facilement les corps matériels et un peu moins nocifs que les rayons gamma, ils sont utilisés notamment en médecine pour les radiographies, dans l'industrie (contrôle des bagages dans le transport aérien), et dans la recherche pour l'étude de la matière (rayonnement synchrotron). Les rayons X ont des longueurs d'onde comprises entre un milliardième (10^{-12} m) et un cent millième (10^{-8} m) de millimètre.

c. Les ultraviolets

Ce sont des rayonnements qui restent assez énergétiques, ils sont nocifs pour la peau. Heureusement pour nous, une grande part des ultraviolets est stoppée par l'ozone atmosphérique qui sert de bouclier protecteur des cellules. Leurs longueurs d'onde s'échelonnent d'un cent millième (10^{-8} m) à quatre dixièmes de millième ($4 \cdot 10^{-7}$ m) de millimètre.

d. Le domaine visible

Ce domaine correspond à la partie étroite du spectre électromagnétique perceptible par notre œil. C'est dans le domaine visible que le rayonnement solaire atteint son maximum ($0,5 \mu\text{m}$) et c'est également dans cette portion du spectre que l'on peut distinguer l'ensemble des couleurs de l'arc en ciel, du bleu au rouge.

Il s'étend de quatre dixièmes de micromètre ($0,4 \mu\text{m}$) - *lumière bleue* - à huit dixièmes de micromètre ($0,8 \mu\text{m}$) de millimètre - *lumière rouge*.

e. L'infrarouge

La gamme des infrarouges qui est composée du proche infrarouge (PIR), du moyen infrarouge (MIR) et de l'infrarouge thermique, couvre les longueurs d'onde allant de huit dixièmes de micromètre ($0,8 \mu\text{m}$) à un millimètre (1 mm).

f. Les ondes radar ou hyperfréquences

Cette région du spectre est utilisée pour mesurer le rayonnement émis par la surface terrestre à l'aide de capteurs passifs ou rétrodiffusés par celles-ci (dans le cas des capteurs radar actifs). Le domaine des hyperfréquences s'étend des longueurs d'onde de l'ordre du centimètre jusqu'au mètre.

g. Les ondes radio

Ce domaine de longueurs d'ondes est le plus vaste du spectre électromagnétique et concerne les ondes qui ont les plus basses fréquences. Il s'étend des longueurs d'onde de quelques cm à plusieurs Km.

Relativement faciles à émettre et à recevoir, les ondes radio sont utilisées pour la transmission de l'information (radio, télévision et téléphone). La bande FM des postes de radio correspond à des longueurs d'onde de l'ordre du mètre. Celles utilisées pour les téléphones cellulaires sont de l'ordre de 10 cm environ. Contrairement à l'œil humain qui n'est capable de capter le rayonnement que dans une fenêtre très étroite du spectre électromagnétique, celle correspondant au domaine du visible (longueurs d'ondes comprises entre 0,4 μ m et 0,7 μ m), les capteurs satellitaires utilisent une fraction beaucoup plus étendue du spectre (Minoprof, 2016).

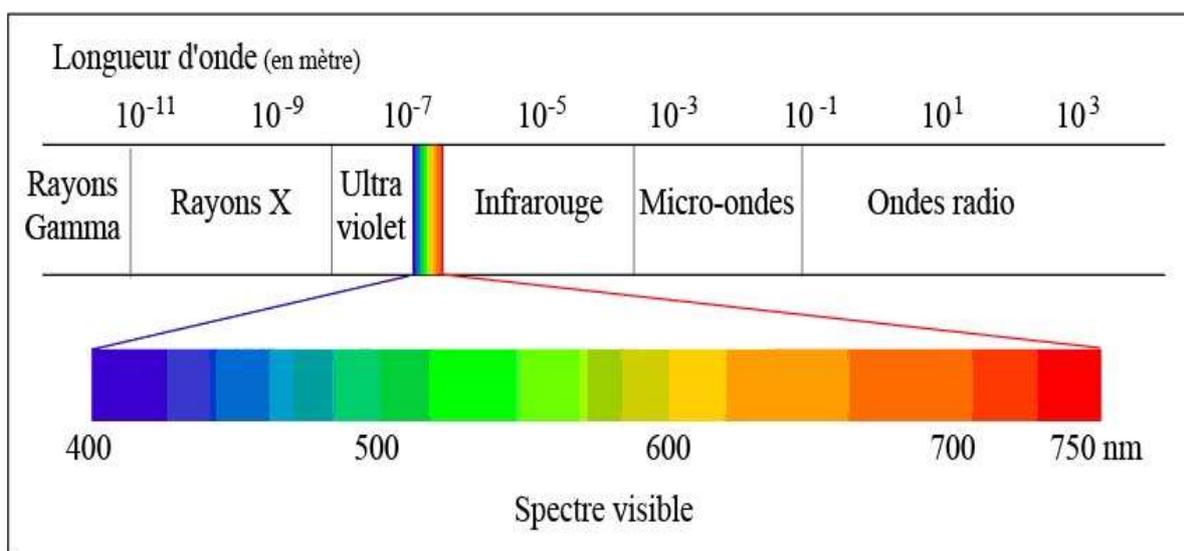


Figure 2.3 : Le spectre électromagnétique (Fournil, 2017)

2.3.3. Notions de réflectance et de signatures spectrales

a. Interaction du rayonnement électromagnétique à la surface terrestre

L'incidence du rayonnement électromagnétique induit une énergie qui est soit absorbée, transmise ou réfléchi par un élément de la surface terrestre (BRGM/RP 60227-FR., 2011).

Le principe de la conservation de l'énergie admet que l'énergie incidente totale (E) pour une longueur d'onde donnée (λ) est égale à la somme des énergies réfléchi, absorbée et transmise (BRGM/RP 60227-FR., 2011).

De ce fait, la réflectance pour une longueur d'onde donnée est définie par le rapport de l'énergie réfléchie d'une surface à l'énergie incidente totale reçue par la même surface (BRGM/RP 60227-FR., 2011). La réflectance symbolise une grandeur sans unité allant de 0 jusqu'à 1 ou de 0 jusqu'à 100 en pourcentage (BRGM/RP 60227-FR., 2011).

b. Signature spectrale

Un certain nombre de principaux matériaux du globe terrestre dont la végétation, l'eau (même sous sa forme cristallisée glace ou neige), les roches et les sols (disposition de minéraux) sont susceptibles de réfléchir la lumière solaire vers les satellites opérant dans le domaine de la télédétection (UVED, 2008), (BRGM/RP 60227-FR., 2011).

En mesurant l'énergie réfléchie par une cible en fonction de la variation de la longueur d'onde, on obtient une mesure qu'on définit par un spectre de réflectance spécifique ou signature spectrale de cette cible (BRGM/RP 60227-FR, 2011). De ce fait la signature spectrale symbolise une réponse radiométrique des objets qu'on représente par une courbe ayant comme ordonnée la réflectance et en abscisse la longueur d'onde (C. Gomez et al, 2005). Toutefois l'obtention de la signature se fait soit par modèle théorique qu'on appelle simulation, ou par mesures réelles, donc en laboratoire (résultats des manipulations du spectrophotomètre).

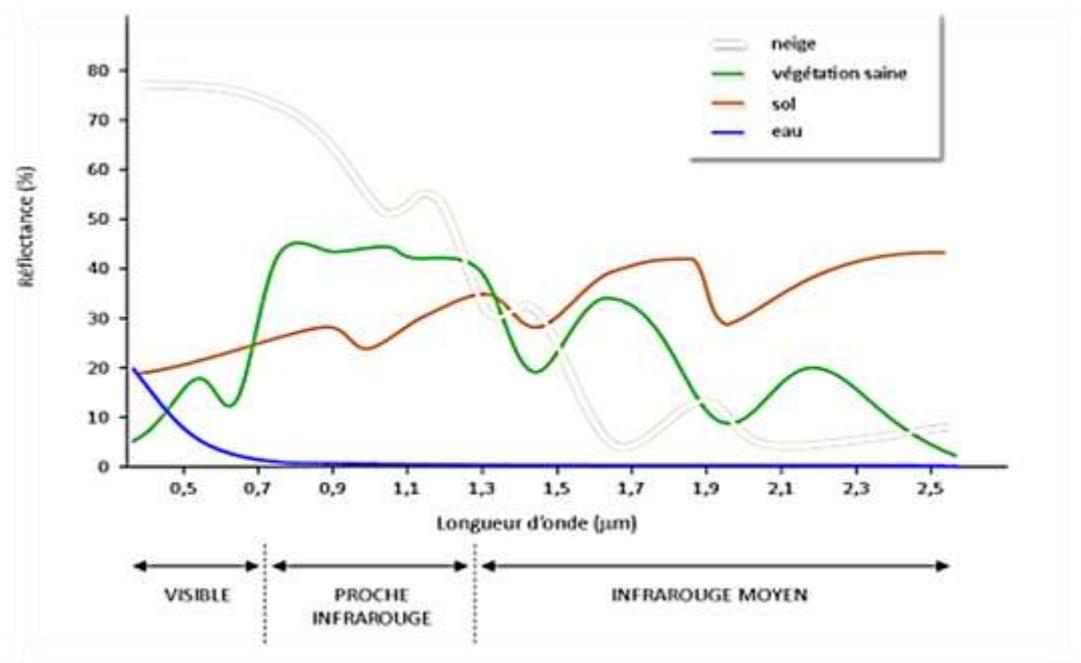


Figure 2.4 : Signature spectrales des surfaces naturelles (BRGM/RP 60227-FR, 2011)

Suivant la figure 2.4, on peut définir les caractéristiques de la signature spectrale qui sont les pics d'absorption et la longueur d'onde (position).

Principalement à partir des caractéristiques de la signature spectrale, on réalise une analyse sur la composition des objets, et ce, par le biais de la forme et la symétrie des pics d'absorption, de plus, à partir des profondeurs de ces pics, on obtient une information quantitative sur les matériaux présents (BRGM/RP 60227-FR., 2011).

Plus clairement, l'intensité de la réflexion du sol dépend de la composition chimique des matériaux réflecteurs, la morphologie de la surface et la micromorphologie de la même surface (C. Gomez et al, 2005). De ce fait, on déduit que la réflectance des roches dépend d'un côté de leur composition de l'autre de leur degré d'altération.

On trouve ci-dessous, certaines figures représentant les signatures spectrales de certains minéraux.

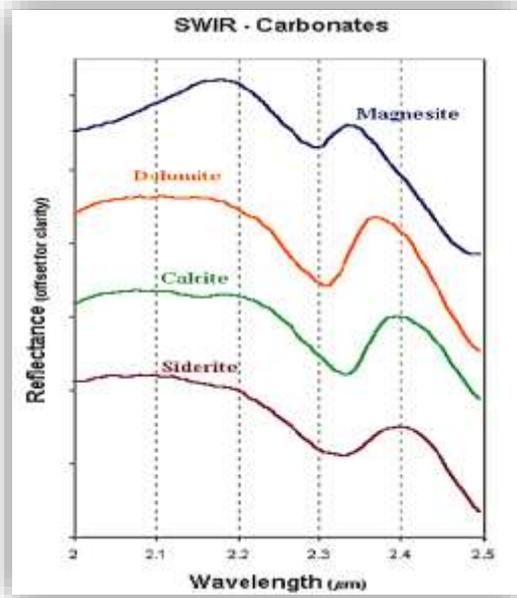


Figure 2.5a : Identification spectrale des carbonates (BRGM/RP 60227-FR, 2011)

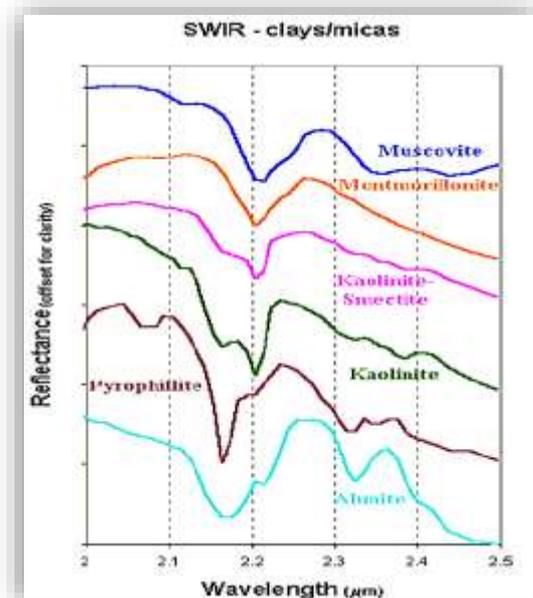


Figure 2.5b : Identification spectrale des argiles et micas (BRGM/RP 60227-FR 2011)

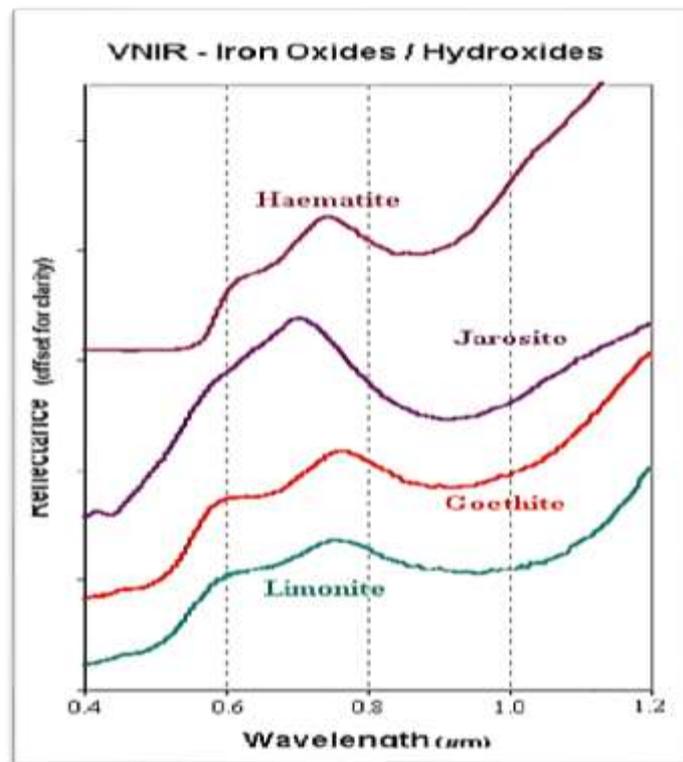


Figure 2.5c : Identification spectrale des oxyde de Fer (BRGM/RP 60227-FR, 2011)

2.4. Le système d'acquisition

En télédétection, un système d'acquisition est composé d'un outil principal qu'on appelle capteur, ce dernier est monté sur un vecteur ou une plateforme (satellite), et permet d'obtenir par la suite un résultat appelé image satellitaire (S. Ghardaoui et W. Benhabib, 2008).

2.4.1. Les Satellites

Le satellite nommé aussi vecteur, est une plateforme équipée de dispositifs électroniques, tels que les capteurs photoélectriques ou les cameras à haute résolution. Ce vecteur est parfait pour effectuer des observations sur la terre. Dans sa composition interne, le satellite comporte deux unités, la première, correspond à la plateforme, elle sert d'ailleurs à maintenir une ou plusieurs charges utiles, quant à la deuxième, elle représente cette charge utile qui correspond à un groupe d'éléments permettant de réaliser une fonction de télédétection (S. Ghardaoui et W. Benhabib, 2008).

A cet effet, on distingue selon la figure deux types de satellites :

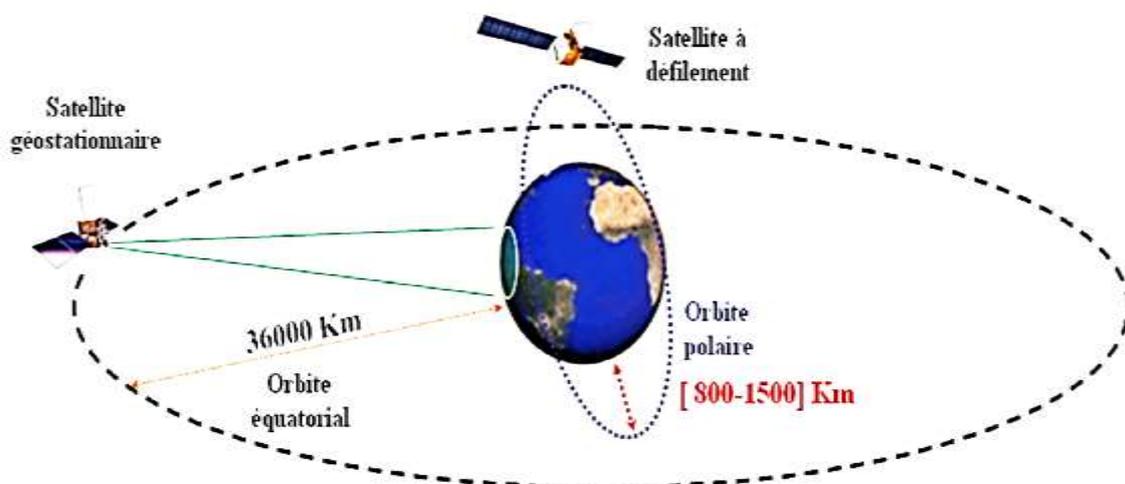


Figure 2.6 : Types de satellites (N. Boudali, 2012)

a. Les satellites géostationnaires

Avec une altitude de 36.000 km, ils ont une caractéristique principale qui est d'assurer une surveillance en forme continue d'une même partie de la sphère terrestre, de plus, leur vitesse angulaire est la même que la vitesse de rotation de la terre, de ce fait, et en tant qu'observateur terrestre, on les aperçoit comme immobiles, à titre d'exemple, on a les satellites GOES et METEOSAT.

b. Satellites à défilement

Correspondent à des satellites qui sont considérés comme étant mobiles par rapport à la sphère terrestre, ils sont caractérisés par une altitude oscillant entre 800 et 200 km, tout en décrivant des orbites circulaires, et ils peuvent garantir une observation sur un même point mais deux fois en vingt-quatre heures, et nécessitant environ cent minutes pour faire le tour complet autour de la Terre ; on cite parmi ces satellites SPOT et Landsat.

2.4.2. Les Capteurs

Par définition, un capteur représente un instrument électronique qui enregistre, ensuite transforme, dans une série de longueurs d'ondes, un rayonnement électromagnétique en un signal électronique, ensuite ce signal est codé afin de devenir un compte numérique (S. Ghardaoui et W. Benhabib, 2008). Le capteur est caractérisé par les propriétés qui définissent ses performances, ces propriétés sont les suivantes :

a. La résolution spatiale

Elle représente la dimension et la valeur d'observation du point élémentaire connu sous le nom de Pixel (Picture and elements), cependant, une résolution peut avoir 600 points au minimum par pouce.

b. La résolution spectrale

Elle se définit par l'aptitude du capteur de différencier entre les signaux des diverses longueurs d'ondes et est matérialisée par le nombre de bandes spectrales.

c. La résolution radiométrique

Elle indique la capacité du capteur à distinguer, dans une bande spectrale, les différents signaux électromagnétiques des différentes énergies générées par des différences de réflectance des surfaces visées.

d. La résolution temporelle

L'acquisition d'une image par le système d'un même point de la Terre, se fait par le biais d'une fréquence qu'on appelle résolution temporelle

Selon la source d'énergie, les capteurs sont décomposés en deux types (Ghar, 2008) :

a. Les capteurs passifs

Ils sont en relation directe avec les sources naturelles telles que le soleil, et ils réalisent aussi des mesures de l'énergie (émise ou réfléchi) par les surfaces au sol et l'atmosphère.

b. Les capteurs actifs

Ils sont caractérisés par la production de leur propre énergie pour illuminer la cible, ils dégagent un REM qui est perçu, mesuré (principalement les capteurs radar et lidar).

La majorité des satellites prennent à l'aide de leurs capteurs des images de la Terre, introduisant ainsi une image à format numérique qu'on appelle image satellitaire.

2.4.3. Les images satellitaires

Quels que soient les dispositifs de télédétection utilisés pour capter et enregistrer les rayons électromagnétiques, on obtient toujours un résultat sous forme de représentation graphique qu'on appelle image satellitaire. Mathématiquement, l'image satellitaire est une fonction $F(x, y)$ à deux variables entières x et y qui symbolisent la ligne et la colonne respectivement (S. Ghardaoui et W. Benhabib, 2008).

L'existence de plusieurs types de capteurs en télédétection, implique l'obtention de plusieurs images qui se différencient en termes de caractéristiques. De ce fait, on distingue deux ensembles d'images :

a. L'image optique

Ce sont des images acquises par des capteurs passifs qui, mesurent l'énergie réfléchie ou émise par une source externe, tels que certains de ces capteurs, mesurent l'énergie réfléchie du soleil activée dans les trois domaines Visible, PIR et MIR. Cependant, d'autres capteurs travaillent dans le domaine thermique pour mesurer l'énergie émise par la Terre elle-même (O.C. Viveros, 2003).

L'image optique se divise en trois sous-ensembles :

- **L'image panchromatique**

C'est une matrice de pixels, où chaque pixel est attribué une valeur correspondant à une intensité lumineuse représentée par une palette de couleurs. Cependant, si l'image est monochromatique, l'intensité lumineuse est définie par la gamme du gris allant du noir pour la plus faible intensité jusqu'au blanc pour la plus forte intensité (I. Boukrech, 2006).

- **L'image multi-spectrale (multi-bandes)**

Contrairement à l'image panchromatique, l'image en couleurs, est un vecteur à trois valeurs associé à chaque pixel, tel que ce vecteur est représenté dans le mode RVB (Rouge, Vert, Bleu). On parle d'images multi-spectrales lorsque le vecteur de valeurs associé à un pixel est au moins de dimension deux. *Par exemple*, les satellites d'observation de la Terre PLEIADES permettent l'acquisition d'images multispectrales avec les 4 bandes spectrales B0 à B3 dans le bleu, le vert, le rouge et le proche infrarouge. De plus la multiplication du nombre de bandes spectrales permet de distinguer la nature des objets observés (I. Boukrech, 2006).

- **L'image hyperspectrale**

On parle généralement d'images Hyper-spectrale, lorsque le nombre de bandes spectrales est supérieur à la centaine, ou lorsque l'ensemble des bandes spectrales acquises est continu, *à titre d'exemple*, Hypérior fut le premier capteur hyper-spectral lancé à bord du satellite EO-1 permettant d'acquérir 220 bandes comprise entre 400 et 2500 nm (E. Christophe, 2005).

b. L'image Radar

L'image radar représente une image obtenue par des capteurs actifs (émetteurs et récepteurs), qui envoient un signal électromagnétique pour illuminer le terrain, d'où l'écho de la cible est par la suite détecté, mesuré et chronométré (E. Christophe, 2005).

3. Application dans le domaine minier

Les images de télédétection peuvent être utilisées dans toutes les phases du cycle minier, lors de la prospection et l'exploration, l'extraction ainsi que la réhabilitation de mines. Bien que

l'arpentage des sols continue à être utilisé dans les opérations minières, la disponibilité étendue d'images provenant de satellites spatiaux ainsi que de plates-formes aéroportées a entraîné une augmentation significative de l'utilisation des images de télédétection.

La contribution de la télédétection dans chaque phase du cycle minier :

3.1. Prospection et exploration

Il s'agit de la recherche de gisements, qui repose sur différents types de données (photographies aériennes, images satellitaires, précédents miniers, géologiques, géophysiques, géochimiques, économiques, etc.). Une fois qu'un corps minéralisé est découvert, l'exploration est entamée pour évaluer qualitativement et quantitativement les ressources minérales, afin de définir la faisabilité technique et économique de l'exploitation d'un gisement. Cela se fait par des opérations minières de surface et des travaux souterrains qui permettent de reconnaître le corps minéralisé dans ses trois dimensions et c'est ici où la télédétection offre un nouvel outil pour explorer de plus grandes zones et se concentrer sur les détections lithologiques clés et les interprétations des structures géologiques et hydrogéologiques pour évaluer l'emplacement de gisements minéraux potentiels, mais aussi afin de réduire les coûts d'exploration et d'accroître le développement.

3.2. Exploitation

Cette phase commence lorsque les travaux pour la production minière commencent. Il existe de nombreuses méthodes d'exploitation différentes qui dépendent de l'état physique du minéral, de la profondeur, de la forme et d'autres caractéristiques.

Au cours de l'exploitation, la télédétection peut être utilisée pour détecter des mouvements de terrain subtils, ce qui est essentiel pour la protection des infrastructures. En outre, en utilisant des images multi-spectrales et chronologiques, on obtient des cartes topographiques et d'occupation du sol mais, il est possible aussi d'examiner les changements d'utilisation des sols et les incidences sur l'environnement et de mettre en œuvre des mesures de remise en état.

3.3. Fermeture et réhabilitation

Après l'épuisement du gisement et la fin de l'exploitation, la phase de réhabilitation et de fermeture de la mine vient compléter le cycle de l'exploitation minière. Cette phase consiste en la remise en forme des terrains, la mise en place d'une pépinière sur le site pour produire les plants nécessaire à la reforestation, l'enherbement qui permet d'éviter l'érosion et d'améliorer la structure et la fertilité des sols et enfin, la reforestation qui permettra de favoriser la clôture naturelle du milieu. La télédétection peut ainsi jouer un rôle important durant cette phase, et ce en localisant et en surveillant les déplacements de terrain (affaissement et soulèvement), les zones polluées et la végétation dans le but de minimiser les impacts environnementaux.

Conclusion

La télédétection couvre un grand champ d'applications qui satisfont de nombreux besoins, aussi bien pour les utilisateurs institutionnels que pour des acteurs privés. Elle offre des solutions qui sont souvent plus économiques que des moyens plus traditionnels ou qui bénéficient d'une intégrité, d'une objectivité qui en font un arbitre impartial. De plus, dans un certain nombre de cas, la télédétection reste la seule méthode pour traiter des problèmes qui ne peuvent être résolus par des moyens classiques.

Dans le secteur minier, la télédétection voit son essor ces dernières années et trouve ses meilleures applications en géomorphologie et en géologie. Ainsi, une exploration qui identifie et distingue entre les différents types de roche et leurs lithologies dans une région donnée, implique l'application de tout un processus incluant divers méthodes et outils afin d'obtenir un résultat considéré comme étant la base préliminaire des travaux de prospections minière.

Chapitre 3

Méthodes, Matériels et Outils

Introduction

Le présent chapitre présente les différentes approches extraites de plusieurs cas d'études et de recherches traitant l'utilité des techniques de télédétection en relation avec la cartographie géologique régionale, la cartographie des gisements potentiellement exploitables et des surfaces lithologiques, mais aussi en relation directe et indirecte avec les phases de prospection, exploration et les travaux d'exploitation minière.

1. Approche méthodologique

Il s'agit de présenter une synthèse bibliographique basée sur une évaluation approfondie de nombreux articles, décrivant le processus de traitement des données satellites adopté dans le but d'extraire des informations utiles pour la caractérisation des sites d'étude et d'obtenir des résultats de façon instantanée ayant une valeur significative dans l'optique de contribuer au projet d'exploration et d'industrie minière. Ce processus comprend des étapes nécessaires dont la collecte des données, les opérations de traitement et d'analyse et la comparaison avec les données réelles du terrain pour évaluer l'efficacité des différentes techniques adoptées pour le traitement d'images permettant une meilleure détection des surfaces de roches encaissantes minéralisées et une bonne discrimination des lithologies.

1.1. Etapes de développement

La télédétection correspond à l'ensemble des connaissances et techniques qui de nos jours est érigé en une discipline scientifique faisant office d'une spécialité de recherche permettant de déterminer certaines caractéristiques physiques et biologiques de points observés à la surface de la Terre, elle est fondée sur de nombreuses compétences et technologies appliquées à l'observation, l'analyse et l'interprétation de divers phénomènes. Ses sources fondamentales sont les équipements ou appareillages, les mesures et les images ou scènes extraites à partir de plateformes aériennes et spatiales. L'extraction d'informations à partir des images recueillies se fait selon un processus de traitement incluant diverses méthodes se basant sur les caractéristiques du site d'étude.

Dans ce qui suit, nous allons essayer de donner un aperçu général décrivant les outils de collecte d'images, les logiciels de traitement utilisés et les différentes méthodes et techniques de traitement et d'analyse habituellement appliquées à la cartographie géologique, pédologique et géomorphologique.

1.1.1. Collecte de données et matériel utilisé

a. Données

La réalisation du traitement d'images nécessite avant tout une collecte de données à partir des supports de cartes géologiques de la zone d'étude, les images satellites et éventuellement les échantillons prélevés sur le terrain. Cette étape représente la phase préliminaire avant le choix de la technique de traitement adéquate à adopter, selon le site d'étude et la nature des minéraux recherchés constituant l'objet de détection.

b. Matériel

L'ensemble de scènes ou images utilisées pour la suite des étapes est collecté à partir des capteurs embarqués à bord des satellites, sera traité à l'aide de logiciels adaptés. Cependant, les principaux satellites en rapport avec leurs capteurs sont :

- **Les satellites**

- **Landsat**

Landsat a été créé par la collaboration entre l'U.S. Geological Survey (USGS) et de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), il a été lancé en 1972, et depuis, d'autres satellites ont été lancés avec succès.

Les lancements de Landsat 2, Landsat 3, Landsat 4, Landsat 5, Landsat 7 et Landsat 8 se sont produits en 1975, 1978 et 1982, 1984, 1999 et 2013 respectivement ; ces derniers sont caractérisés par une largeur de piste de 183 km et des orbites répétitives, circulaires, héliosynchrones, quasi polaires, permettant d'avoir une couverture complète entre 81°N et 81°S. Cependant, Landsat 6 n'a pas réussi à atteindre son orbite en 1993 et Landsat 9 devrait être lancé en 2020.

Les satellites Landsat collectent des images spatiales du globe terrestre, fournissant des données nécessaires et applicables dans divers domaines, dont la foresterie, l'agriculture, la géologie et la planification régionale.

Le pouvoir de détection et de quantification des variations environnementales de la Terre dépend des capteurs ayant la capacité de procurer des mesures précises et cohérentes des caractéristiques spatiotemporelles.

Les principaux capteurs sont :

Les capteurs TM

Le capteur Landsat Thematic Mapper (TM) a été embarqué dans Landsat 4 et Landsat 5, procurant des images comportant six bandes spectrales d'une résolution spatiale de 30 m pour les bandes 1 à 5 et 7, et de 120 m pour la bande thermique (bande 6). Le capteur TM comprend un système d'étalonnage embarqué et procure des scènes de dimensions 170 km Nord-Sud sur 183 km Est-Ouest.

Tableau 3.1 : Caractéristiques du capteur TM (EOSAT, 1995)

Landsat 4-5	Bandes	Longueurs d'ondes (µm)	Résolution (m)
Thematic Mapper (TM)	Bande 1 - <i>Bleue</i>	0.45 - 0.52	30
	Bande 2 - <i>Verte</i>	0.52 - 0.60	30
	Bande 3 - <i>Rouge</i>	0.63 - 0.69	30
	Bande 4 - <i>Proche Infrarouge (PIR)</i>	0.76 - 0.90	30
	Bande 5 - <i>Infrarouge courtes longueurs d'ondes (IRCL) 1</i>	1.55 - 1.75	30
	Bande 6 - <i>Thermique</i>	10.40 -12.50	120* (30)
	Bande 7 - <i>Infrarouge courtes longueurs d'ondes (IRCL) 2</i>	2.08 -2.35	30

*L'acquisition de la bande 6 se fait à une résolution de 120 m, tandis que les produits sont rééchantillonnés à 30 m de pixel

Le capteur ETM+

Le capteur ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) de Landsat est installé sur Landsat 7, et les images fournies comportent sept bandes spectrales telles que la bande panchromatique (bande 8) possède une résolution spatiale de 15 m, tandis que les bandes

1-5 et 7 ont une résolution spatiale de 30 m. La taille de la scène obtenue est similaire à celle du capteur TM.

Le capteur ETM+ a été étalonné par procuration à l'aide de cibles terrestres et par recoupement à l'aide de nombreux capteurs et possède aussi trois systèmes d'étalonnage embarqués pour les bandes réfléchissantes.

Tableau 3.2 : Caractéristiques du capteur ETM+ (EOSAT, 1995)

Landsat 7	Bandes	Longueurs d'ondes (μm)	Résolution (m)
Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Bande 1 - <i>Bleue</i>	0.45 - 0.52	30
	Bande 2 - <i>Verte</i>	0.52 - 0.60	30
	Bande 3 - <i>Rouge</i>	0.63 - 0.69	30
	Bande 4 - <i>Proche Infrarouge (PIR)</i>	0.77 - 0.90	30
	Bande 5 - <i>Infrarouge courtes longueurs d'ondes (IRCL) 1</i>	1.55 - 1.75	30
	Bande 6 - <i>Thermique</i>	10.40 - 12.50	60 * (30)
	Bande 7 - <i>Infrarouge courtes longueurs d'ondes (IRCL) 2</i>	2.09 - 2.35	30
	Bande 8 - <i>Panchromatique</i>	0.52 - 0.90	15

*L'acquisition de la bande 6 se fait à une résolution de 60 m, tandis que les produits sont rééchantillonnés à 30 m de pixels.

Les capteurs OLI et TIRS

L'Imageur Terrestre Opérationnel (**OLI**) et le Capteur Infrarouge Thermique (**TIRS**) embarqués dans Landsat 8 contiennent neuf bandes spectrales ayant une résolution spatiale de 30 m pour les bandes 1 à 7 et 9, par contre, la bande 8 (panchromatique) a une résolution de 15 m, et les bandes thermiques 10 et 11 sont collectées à 100 mètres. Les dimensions des scènes sont les mêmes que celles de **TM** et **ETM+**. **L'OLI** dispose de deux dispositifs d'étalonnage radiométrique embarqués, en plus de ses calibreurs embarqués, **OLI** a la capacité de recueillir des observations lunaires et stellaires à des fins d'étalonnage.

Tableau 3.3 : Caractéristiques des capteurs OLI et TIRS (EOSAT, 1995)

Landsat 8	Bandes	Longueurs d'ondes (µm)	Résolution (m)
Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Bande 1 - <i>Ultra Bleue</i> (côtière/aérosol)	0.435 - 0.451	30
	Bande 2 - <i>Bleue</i>	0.452 - 0.512	30
	Bande 3 - <i>Verte</i>	0.533 - 0.590	30
	Bande 4 - <i>Rouge</i>	0.636 - 0.673	30
	Bande 5 - <i>Proche Infrarouge</i> (PIR)	0.851 - 0.879	30
	Bande 6 - <i>Infrarouge courtes longueurs d'ondes</i> (IRCL) 1	1.566 - 1.651	30
	Bande 7 - <i>Infrarouge courtes longueurs d'ondes</i> (IRCL) 2	2.107 - 2.294	30
	Bande 8 - <i>Panchromatique</i>	0.503 - 0.676	15
	Bande 9 - <i>Cirrus</i>	1.363 - 1.384	30
	Bande 10 – <i>Infrarouge thermique</i> (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100 * (30)
	Bande 11 – <i>Infrarouge thermique</i> (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100 * (30)

*L'acquisition des bandes 10 et 11 se fait à une résolution de 100 m, tandis que les produits sont rééchantillonnés à 30 m de pixels.

- **Terra**

Terra représente un projet de collaboration entre les États-Unis, l'Union européenne, le Japon et le Canada. Lancé le 18 décembre 1999, le satellite orbite au autour de la Terre, pratiquement d'un pôle à l'autre en direction perpendiculaire à la direction de la rotation de la terre.

Terra est caractérisé par une charge utile de cinq capteurs qui permettent de recueillir un ensemble de données globales représentant une base importante pour la recherche scientifique ce qui nous permet de comprendre tous les phénomènes se produisant dans notre planète.

Les principaux capteurs de ce satellite sont :

ASTER

Le *Radiomètre Spatial Avancé d'Emission et de Réflexion Thermiques (ASTER)*, est un capteur sous forme d'une caméra numérique essentielle permettant de capter des images de dimension 60 sur 60 km et collecter les données dans les deux domaines du visible et infrarouge. Ce capteur est utilisé dans le but de l'obtention d'informations importantes sur la surface de la terre particulièrement la température, l'émissivité, la réflectance et l'élévation.

Avec une caractéristique importante qui est la haute résolution spatiale de 15 à 90 m, ASTER regroupe 14 bandes spectrales, allant du visible jusqu'à l'infrarouge thermique procurant ainsi suivant la méthode de balayage transversal et un délai d'observation de 16 jours des images précises. Ce capteur est surtout utilisé pour détecter les changements durant l'utilisation du sol, les exercices de cartographie, l'état de la couverture végétale et aussi pour la surveillance de l'environnement régional (Net 1).

Tableau 3.4 : Caractéristiques d'ASTER (M. Abrams et S. Hook, 2002)

Paramètre	Bande	VPIR	Bande	IRCL	Bande	IRT
Longueur d'onde en μm	1	0.52 - 0.60	4	1.600 - 1.700	10	8.125 - 8.475
	2	0.63 - 0.69	5	2.145-2.185	11	8.475 - 8.825
	3N	0.76 - 0.86	6	2.185 - 2.225	12	8.925 - 9.275
	3B	0.76 - 0.86	7	2.235 - 2.285	13	10.25 - 10.95
	Capacité de stéréogramme en balayage longitudinal		8	2.295 - 2.365	14	10.95 - 11.65
			9	2.360 - 2.430		
Résolution au sol	15 m		30 m		90 m	

CERES

Le *Cloud and the Earths Radiant Energy System* est un capteur qui joue le rôle d'un mesureur de bilan radiatif de la Terre et le rayonnement atmosphérique pour fournir des évaluations sur les propriétés des nuages.

MISR

Le *Multi-angle Imaging Spectro Radiometer* est un capteur qui réalise des observations multidirectionnelles dans des angles différents d'où la possibilité d'obtenir des mesures de la réflectance des nuages et de la surface mais aussi des cartes globales des propriétés de la surface, des aérosols et de la végétation.

Il est composé de neuf caméras possédant chacune quatre bandes à 0,446 μm , 0,558 μm , 0,672 μm et 0,866 μm , ce qui permet de prendre des images dans la région du visible sous neuf angles de vue différents dans un cycle répétitif de neuf jours avec une résolution de 275, 550 ou 1,1 km.

MODIS

Le capteur *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* est un radiomètre multispectral à balayage transversal fonctionnant dans le domaine visible par le biais de l'infrarouge thermique.

Avec un fonctionnement tous les 1 à 2 jours avec 36 bandes spectrales dont deux ont une résolution de 250 m, cinq de 500 m et vingt-neuf de 1 km. MODIS a été conçu par une large couverture spectrale et un bon cycle de répétition afin de contribuer dans la compréhension globale du système terrestre (Net 2).

MOPITT

Le Measurements Of Pollution In The Troposphere, est un scanner avec une résolution spatiale de 22 km qui, utilise la spectroscopie de corrélation gazeuse pour collecter des données concernant la mesure du méthane et du monoxyde de carbone dans l'atmosphère.

- **Les logiciels**

Il est nécessaire de disposer de logiciels de pointe pour traiter efficacement ces données. Voici quelques exemples :

- **ArcGIS**

C'est un système constitué d'une série de logiciels, considéré comme l'une des principales plateformes de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (*SIG*). Développé par la société américaine **Esri** (*Environmental Systems Research Institute, Inc*). Il représente une infrastructure composée de plusieurs outils permettant de collecter, combiner, gérer et compiler des données géographiques afin créer des cartes conduisant ainsi à expliquer un phénomène donné. **ArcGIS** contribue fortement à l'amélioration de la visualisation, l'analyse et le traitement d'images.

Le système est disponible partout au moyen de navigateurs Web et sur tous types d'appareils.

- **ENVI**

ENVI (*ENvironment for Visualizing Images*), est un système de traitement d'images issu de la télédétection développé par le langage de programmation **IDL** (*Interactive Data Language*) et créé par la société « **ITTVIS** ». C'est un logiciel permettant de visualiser, extraire, analyser et traiter une large gamme de formats de données géospatiales. Il comprend plusieurs outils et fonctionnalités qui permettent de réaliser un grand nombre de méthodes de traitement d'images de corrections géométriques et radiométriques, d'analyse topographique et de classification cartographique.

1.1.2. Prétraitement

Le prétraitement d'images désigne l'ensemble des processus visant à améliorer les caractéristiques d'une image et à permettre une analyse thématique sur des données brutes. Les opérations de prétraitement des scènes recueillies consistent en une élimination des perturbations atmosphériques et géométriques permettant d'obtenir des images précises. C'est pourquoi, une stratégie comprenant plusieurs méthodes utilisées selon le besoin, doit être mise en place, on

compte parmi ces méthodes, la calibration des images avec les logiciels adéquats, la correction atmosphérique et géométrique, l'étalonnage radiométrique et l'orthorectification.

Il est conseillé d'entreprendre la stratégie de prétraitement afin de modifier l'aspect d'une image facilitant ainsi l'extraction des informations requises et la suppression du bruit en vue d'obtenir un meilleur résultat pour un traitement ultérieur.

Le type et le nombre de techniques de prétraitement est lié au système de télédétection. Les différents types de prétraitement sont :

a. Etalonnage radiométrique

Les images satellites peuvent contenir des « bruits radiométriques », causés par des défaillances des capteurs, par des problèmes de transmission des données ou d'interprétation (codage/décodage).

La correction radiométrique repose sur une approche physique et consiste à transformer le signal reçu par le capteur en une valeur ayant un sens physique qui est la radiance. Elle est généralement réalisée directement lors de la réception de l'image. Cette correction est destinée à l'amélioration de la lisibilité des images captées et à l'extraction de caractéristiques optiques (par exemple la réflectance) dans le but de développer l'utilisation de ces données.

b. Détection des nuages

Les nuages représentent parfois un problème majeur dans les images, car ceux-ci, sont susceptibles d'assombrir la surface sous-jacente du sol et provoquer un effet sur les processus de mise en mosaïque des images, c'est pour cela qu'il est nécessaire d'identifier et de masquer les nuages.

Cette technique de prétraitement consiste à masquer les pixels nuageux de l'image afin de garantir que les paramètres géophysiques soutirés sont bien caractéristiques de la surface terrestre.

c. Correction atmosphérique

Ce prétraitement vise à soustraire le signal causé par les effets atmosphériques tels que l'absorption et la diffusion dues aux gaz, à partir du signal mesuré au niveau du capteur. Il prend en compte la contribution du rayonnement atmosphérique qui arrive au capteur.

d. Création d'un fichier multibandes (empilement des couches)

L'ensemble de données doit être incorporé dans un seul fichier multibandes. Comme les trois sous-systèmes contiennent des données à différentes résolutions spatiales, tous les sous-systèmes d'entrées doivent être rééchantillonnés et projetés en un utilisateur de sortie sélectionné et une taille de pixels communs. Le fichier de sortie aura alors une étendue géographique englobant tous les fichiers d'entrées, et ce, dans le cas de l'utilisation de la totalité des données. Cependant, il est également possible de créer un fichier multibandes contenant des données ayant la même résolution spectrale, et ce, selon le besoin (J.R. Gozzard, 2006).

e. Mise en mosaïque des images

Il est possible que dans certains cas, la région d'étude soit couverte par plusieurs granules (scènes) en raison de l'empreinte relativement faible des granules.

Il sera donc nécessaire de combiner plusieurs images adjacentes pour former une seule image plus grande. Dans des circonstances normales, il y a trois restrictions à la création d'images en mosaïque. Premièrement, chaque image doit avoir le même point de référence, *par exemple*, GDA94. Deuxièmement, chaque image doit être de la même projection cartographique, *par exemple*, MGA, UTM, Albers Equal Area. Troisièmement, chaque image doit avoir une rotation commune. C'est-à-dire que chaque image doit être tournée de la même quantité à partir du nord (J.R. Gozzard, 2006).

f. Obtention de sous-scènes Landsat- 8-OLI

Cette étape permet de délimiter la zone d'étude exacte sur l'image satellitaire collectée, et ce, par rapport à la carte géologique de référence afin de faciliter la superposition et la comparaison des résultats.

1.1.3. Méthodes d'extraction de l'information à partir de l'imagerie

Le traitement d'images est défini comme étant l'ensemble des techniques et méthodes dont le but est d'obtenir des informations jugées pertinentes. Cette phase comporte plusieurs techniques essentielles, employées pour générer des produits utilisés par la suite à des fins géologiques.

Dans cette partie, nous introduisons un aperçu définissant les notions de base sur les techniques de traitement les plus fréquentes utilisées dans le domaine de la cartographie et de la prospection minière.

a. Le démixage spectral

Le démixage spectral est la procédure par laquelle le spectre mesuré d'un pixel mixte est décomposé en une collection de spectres constitutifs, ou éléments terminaux, et en un ensemble de fractions correspondantes, ou abondances, qui indiquent la proportion de chaque élément terminal présent dans le pixel. Les éléments terminaux correspondent normalement à des objets macroscopiques familiers de la scène, tels que l'eau, le sol, le métal, la végétation, etc. De façon générale, le non mélange est un cas particulier du problème inverse généralisé qui, estime les paramètres décrivant un objet à l'aide d'une ou de plusieurs observations d'un signal, qui a interagi avec l'objet avant d'arriver au capteur (A. Tarantola et al., 1982).

Le démixage spectral a fait l'objet d'une autre définition par (Nirmal Keshava and John F. Mustard, 2002), qui stipulent qu'elle est basée sur le principe de la décomposition d'un pixel mixte en une collection de spectres distincts, ou membres finaux, et un ensemble d'abondances fractionnaires qui indiquent la proportion de chaque membre final.

b. Les bandes ratios

Le rationnement des bandes représente une transformation d'image multispectrale basée sur la réflectance entre les bandes, telle que cette transformation s'effectue par un calcul de rapports selon la largeur totale du spectre électromagnétique. Une large plage de rapports peut être obtenue selon plusieurs critères, dont la zone d'étude, la nature des minéraux et le type de lithologies. Le but principal de cette technique est donc, d'améliorer les différences spectrales entre les bandes, réduire les effets d'ombre causés par la topographie (A. Ciampalini, 2013).

c. L'amélioration des images multi-spectrales en couleurs composites

C'est une transformation de l'image combinant le traitement des données de diverses bandes spectrales permettant de montrer plus facilement certains éléments de la scène traitée. Le principe des compositions colorées repose sur l'affectation d'une bande spectrale d'un capteur satellite pour les couleurs (rouge, vert et bleu). Selon l'affectation, on obtient deux types de composition, la composition en « vraies couleurs » et la composition en « fausses couleurs ».

- L'amélioration en vraies couleurs

Cette amélioration repose sur l'affectation des bandes rouge, verte et bleu aux canaux rouge, vert et bleu respectivement.

- L'amélioration en fausses couleurs composites (FCC)

Dans le cas de la composition en fausses couleurs, l'image est obtenue lorsque ses bandes spectrales ne correspondent pas aux trois couleurs primaires. D'où, la couleur réelle de l'objet et sa couleur affichée dans l'image sont différentes. De ce fait, pour chaque application donnée, est attribuée une méthode de production d'images en fausses couleurs.

Ainsi, la signature spectrale des surfaces et l'œil de l'observateur permettent de discriminer les différents types de milieux.

d. La classification

- La classification non-supervisée

Le but de cette classification est de détecter des groupements au sein de la population d'apprentissage sans aucune connaissance a priori sur les données à classer. Par conséquent, elle nécessite une quantité minimale d'entrée initiale de la part de l'analyste (E, Tonye, 2000). Des programmes appelés algorithmes de classification sont utilisés pour déterminer les groupes statistiques naturels ou les structures des données :

✓ L'algorithme des nuées dynamiques ISODATA

L'ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*) (Jahne, 1991), est un algorithme permettant de calculer les moyennes des classes uniformément réparties dans l'espace des niveaux de gris et regroupe les pixels restants de manière itérative en utilisant la technique de la distance minimale. A chaque itération, il faut recalculer les moyennes et classifier à nouveau les pixels en tenant compte des nouvelles moyennes. La fusion, l'éclatement ou l'annulation itérative des classes sont effectués selon des paramètres d'entrée fixant certains seuils. Tous les pixels sont associés à la classe qui leur est la plus proche à moins qu'un écart type ou une distance seuil soit spécifiée. Ce processus continue jusqu'à ce que le nombre de pixels dans chaque classe ne change plus d'une valeur supérieure au seuil fixe pour le nombre de pixels par classe, ou jusqu'à ce que le nombre maximal d'itérations soit atteint (Akono *et al.*, 2005).

✓ **Le regroupement par moyennes K-means** (H. Derdjini, 2017)

K-Means est un algorithme de clustering (en grappes) qui divise les observations en k -clusters. Puisque nous pouvons dicter le nombre de clusters, il peut être facilement utilisé dans la classification où nous divisons les données en clusters qui peuvent être égales ou supérieures au nombre de classes.

Le principe repose sur la supposition de l'existence de K -classes distinctes et différentes, puis l'attribution de K -centres de classes μ_1, \dots, μ_K , ces derniers peuvent être choisis ou aléatoires.

Par la suite, vient la réalisation des deux étapes suivantes :

- Pour chaque élément ne représentant pas un centre de classe, trouver quel est le centre de classe le plus proche, ce qui définit ainsi K -classes représentant l'ensemble des points les plus proches du centre.
- Définir pour chaque nouvelle classe un centre représentant le barycentre des points. La condition d'arrêt de l'algorithme est fixée par l'utilisateur et peut être soit le nombre maximal d'itérations, la convergence (entre deux itérations les classes formées restent les mêmes de l'algorithme ou la presque convergence (l'inertie intra-classe ne s'améliore quasiment plus entre deux itérations)).

✓ **L'analyse en composantes principales ACP**

C'est une technique statistique multivariée représentant une transformation mathématique basée sur le choix de combinaisons linéaires non corrélées de bandes et l'analyse de covariance de l'image. Les résultats de l'ACP montrent que le pourcentage de variance de données diminue de sa valeur maximale atteinte dans la première bande, jusqu'à sa valeur minimale dans la dernière bande (A. Ciampalini, 2013).

Il existe trois types d'analyses en composantes principales, qui sont les suivantes (A. Ciampalini, 2013) :

- **ACP non normalisée (matrice de covariance)**

C'est une transformation qui utilise des matrices de covariance adaptées selon les sous-ensembles traités. En général, les CP contiennent des informations spectrales utiles décrivant des caractéristiques spécifiques selon les bandes.

- **ACP standardisée (matrice de corrélation)**

C'est une technique de transformation basée sur l'utilisation de la matrice de corrélation permettant de donner une image.

- **ACP sélective**

C'est une transformation qui permet d'augmenter la fiabilité d'une CP afin de cartographier et délimiter les anomalies, éclairer la signature spectrale végétative.

En général, l'objectif de l'ACP est de séparer les composantes de bruit, réduire la dimensionnalité des ensembles de données, réaliser une cartographie géologique et une cartographie d'altération.

1. La classification supervisée

La classification supervisée est une technique qui utilise une base de connaissance décrivant les différentes classes d'un échantillon donné. Dans ce type de classification basé sur le pixel, il est nécessaire d'avoir une connaissance du site d'étude.

L'objectif de cette technique est de concevoir un classificateur pouvant attribuer toute observation inconnue à une classe parmi celles déjà définies. Le classificateur nécessite une phase d'apprentissage avant d'être utilisable, lors de cette phase, le classificateur divise l'espace prototype dont les paramètres des différentes classes ont été préalablement déterminés par un superviseur (E. Tonye, 2000).

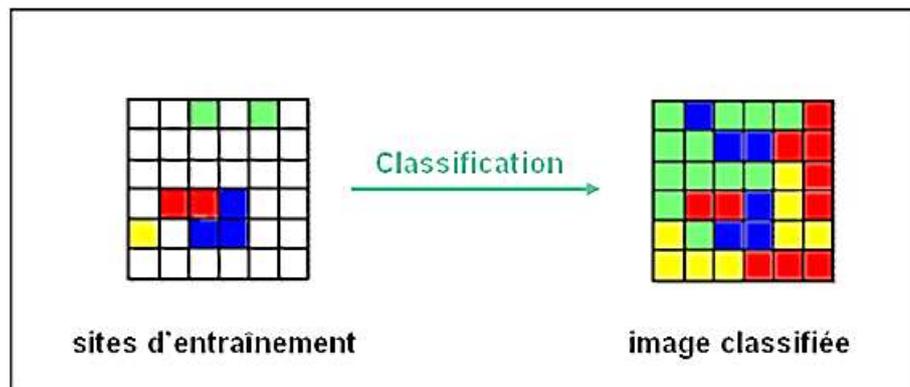


Figure 3.1 : Concept de la classification supervisée (N. Boudali, 2012)

La démarche scientifique reste la même pour chacune des méthodes de classification, à l'exception du choix des algorithmes de classification.

Les classifications supervisées sont des méthodes permettant d'obtenir un résultat rapide et généralement assez efficace, elles sont particulièrement utilisées dans le cadre d'images dont la résolution spatiale n'est pas très élevée.

✓ **Le maximum de vraisemblance**

La méthode de maximum de vraisemblance consiste à définir des échantillons distincts estimés représentatifs des classes auxquelles on veut les affecter, prédéfinies au préalable. Après la définition des classes et de leurs situations sur l'image, elles seront par la suite définies dans le logiciel de traitement comme étant des régions d'intérêts pour déterminer les classes spectrales les représentant pour appliquer par la suite un algorithme de classification, qui va affecter chaque pixel de l'image à une des classes.

✓ **Spectral Angle Mapper**

La méthode du SAM est une approche de classification basée sur la similarité angulaire entre les spectres de l'image et des spectres de référence. Extraits de l'image elle-même, ces derniers sont des spectres extrêmes, dits pôles spectraux, par rapport auxquels la méthode du SAM mesure l'angle spectral des pixels (Kruse *et al*, 1993). Ces derniers et les pôles spectraux sont considérés comme des vecteurs ayant des valeurs dans un espace de dimension égale au nombre de bandes de l'image utilisée. Leur représentation dans

un espace multidimensionnel permet de mesurer l'écart angulaire qui les sépare (Figure 3.2).

L'attribution d'un pixel à un thème donné se base sur la mesure de l'angle α , c'est-à-dire l'angle entre le vecteur du spectre de référence et celui de chaque vecteur dans l'image. Plus l'angle est petit, plus la similarité entre le spectre du pixel évalué et la référence est grande. Ainsi, le pixel sera affecté à la classe du pôle spectral avec lequel il a le plus petit écart angulaire. Cette mesure est peu sensible aux variations de l'éclairage dont l'augmentation ou la diminution n'affecte pas la direction du vecteur, mais plutôt son amplitude (Clark *et al*, 1995). Un mauvais choix de l'angle α peut engendrer un nombre minimal de classes, soit des confusions non souhaitables et un nombre maximal de pixels non classés (Crosta *et al*, 1998).

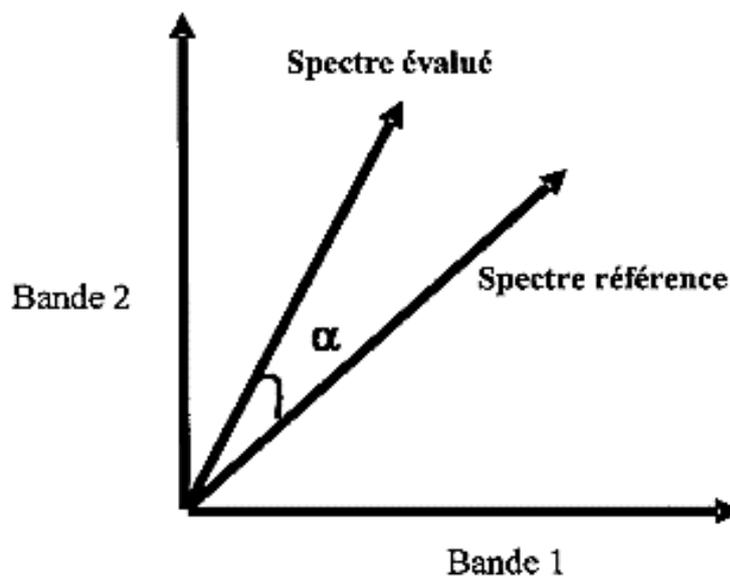


Figure 3.2 : Concept de la méthode du SAM où α est l'angle spectral entre le spectre de référence et le spectre évalué dans un espace à deux dimensions (D'après Kruse *et al*, 1993)

La méthode SAM qui est basée sur le calcul de l'angle spectral est utilisée pour cartographier les occurrences spectrales similaires permettant d'identifier les diverses classes de l'image satellite de la région d'étude. L'angle spectral est calculé entre le vecteur de test construit pour chaque *pixel* et le vecteur de référence construit pour chaque *classe* de référence.

Le codage couleur est ensuite appliqué pour distinguer entre les différentes classes qui ont été reconnues par l'algorithme SAM.

2. La post-classification

Les images classifiées manifestent souvent une apparence bruyante en raison de la variabilité spectrale inhérente qu'un classificateur rencontre lorsqu'il est appliqué pixel par pixel. Dans de telles situations, il est souvent souhaitable de lisser les images classifiées pour ne montrer que la classification dominante présumée correcte. Ainsi, des processus de post-classification ont été

appliqués sur une image classifiée afin d'éliminer les pixels isolés et de générer une image apparemment moins bruyante. Des recherches antérieures ont indiqué que le *traitement post-classification est une étape importante dans l'amélioration de la qualité des classifications* (Harris et Ventura 1995 Harris, P. M. et Ventura, S. J. 1995). Les différents outils de la post-classification sont décrits dans ce qui suit :

✓ **Agrégation de classification** (Classification agregation)

L'agrégation de classification est un outil de nettoyage utile lorsque le résultat de la classification inclut de nombreuses petites régions, son principe repose sur la réalisation d'un regroupement des régions de classe adjacentes plus petites à une région plus grande (H. Derdjini, 2017).

✓ **Regroupement des classes** (Clumping classes)

C'est un outil qui est utilisé pour regrouper des zones classifiées similaires adjacentes à l'aide d'opérateurs morphologiques. Du fait que les images classées manquent de cohérence spatiale (chatolement ou trous dans les zones classées), le Clumping classes regroupe les classes et applique un lissage en effectuant d'abord une opération de dilatation puis une opération d'érosion sur l'image classifiée (H. Derdjini, 2017).

✓ **Analyse de la minorité ou majorité** (Minority/Majority Analysis)

C'est une analyse qui se base sur la modification des pixels parasites au sein d'une classe unique de grande taille, où par un choix d'une taille de noyau qui fait référence à la classe, le pixel central dans le noyau sera remplacé par la valeur de classe qui a la majorité des pixels dans le noyau, sinon si on utilise une analyse par minorité le pixel central dans le noyau sera remplacé par la valeur de classe qui a la minorité des pixels dans le noyau (H. Derdjini, 2017).

e. La fraction minimale de bruit (Minimum Noise Fraction MNF)

C'est une méthode similaire à l'ACP et considérée comme étant une transformation préparatoire condensant la majorité des composants essentiels en bandes spectrales permettant ainsi une classification selon un intérêt croissant. La transformation de la fraction de bruit minimale (MNF), est un algorithme basé sur la réalisation de deux étapes, l'une après l'autre, où la première consiste en l'évaluation du bruit dans les images représentées par une matrice de corrélation et la deuxième permet d'obtenir un groupe de composantes qui contient des informations sur la variance dans les bandes, et ce, en prenant en considération les corrélations. Cette méthode facilite la détermination de la dimensionnalité des images, l'élimination, l'isolement et la réduction du bruit dans les données (F. Al-Nahmia et al, 2017) (E. Mansouri et al, 2013).

1.1.4. Interprétation des résultats

L'analyse des données obtenues qui suit la phase de traitement représente une étape fondamentale consistant à élaborer des réponses aux questions d'intérêt, et ce, dans le but de réaliser un examen, une évaluation et une interprétation des données afin de résumer et communiquer des résultats qui vérifie si l'hypothèse de la recherche est vraie ou fausse.

1.1.5. Validation et comparaison

Après l'obtention des résultats de traitement d'images, on entame la phase de validation basée sur la comparaison entre les produits de traitement et les données de terrain tels que les cartes géologiques de la région d'étude et les résultats d'analyse sur les échantillons prélevés. Le but de cette comparaison est de prouver l'efficacité du processus de traitement et l'exactitude des données recueillies préalablement.

1.2. Choix des méthodes

En se basant sur l'évaluation et la synthèse des diverses littératures traitant l'utilisation de la télédétection dans la prospection minière et la cartographie géologique, l'adaptation de l'approche méthodologique citée auparavant sur notre cas d'étude nous a permis de sélectionner un nombre de méthodes et outils nous facilitant d'extraire des informations utiles selon un processus décrit dans l'organigramme suivant :

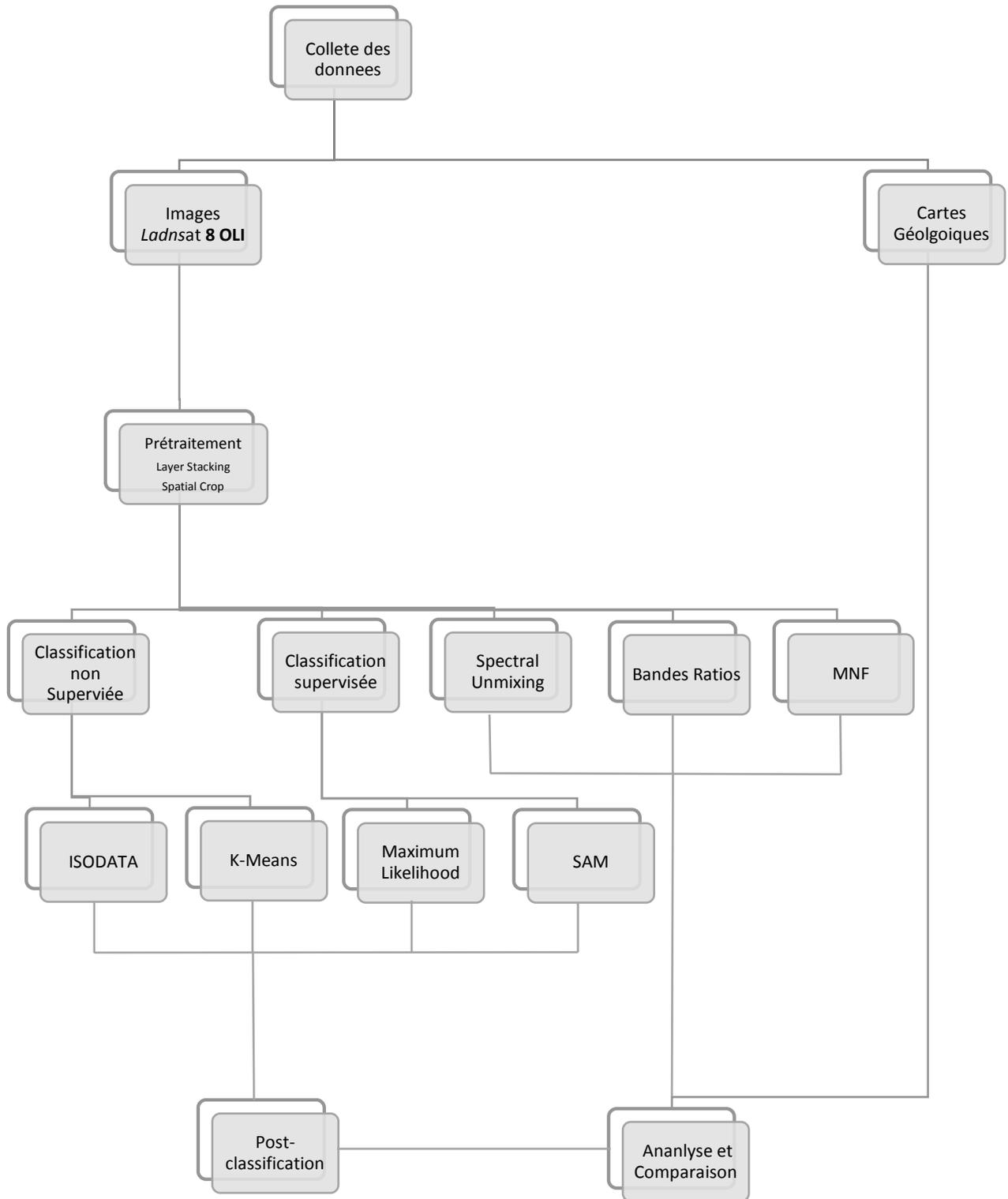


Figure 3.3 : Organigramme du processus de traitement (Elaboré par nous-mêmes)

1.2.1. Acquisition des images et logiciels de traitement

L'ensemble des méthodes de prétraitement et traitement ont été, dans notre cas d'étude sur des images satellitaires collectées par le satellite *Landsat-8-OLI*, obtenues à partir du site de la NASA – USGS : <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

La réalisation du processus d'extraction nécessite la disponibilité du matériels adéquats selon le besoin, donc pour réaliser ce processus, on utilisera les logiciels *ENVI* en raison de son accessibilité au public.

L'annexe 1 montre l'interface du logiciel ENVI.

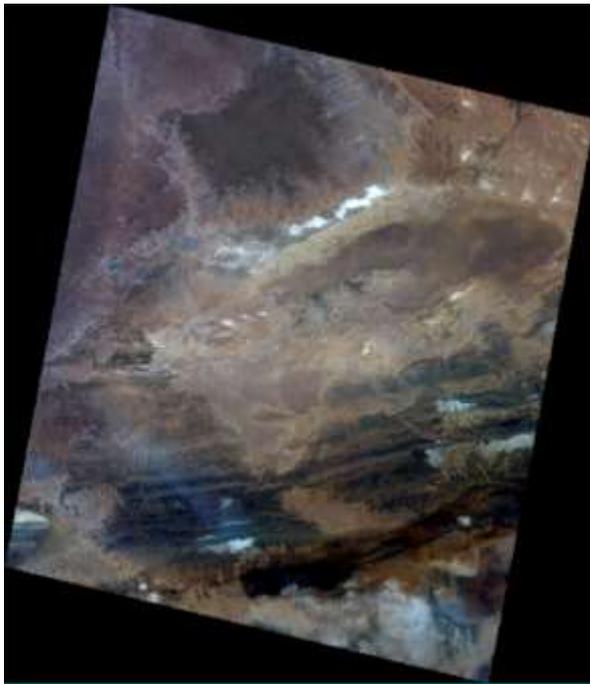


Figure 3.4a : Image Landsat-8 OLI en mode RVB de la région de Gara-Djebilet (usgs.gov, 2019)

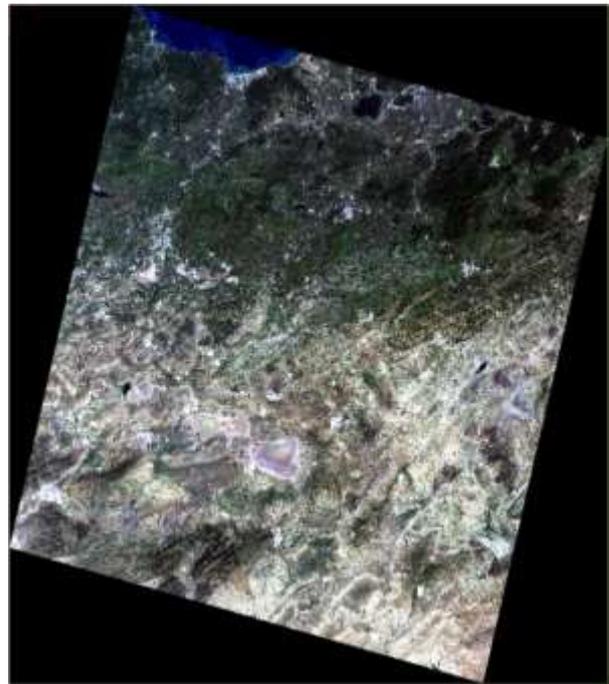


Figure 3.4b : Image Landsat 8 OLI en mode RVB de la région de Djebel Ouenza (usgs.gov, 2019)

Tableau 3.5 : Caractéristiques des images *Landsat-8-OLI* (usgs.gov, 2019)

Lieu	Coordonnées	Dates et heures locales des mesures
Gara-Djebilet (Tindouf)	26° 52' 53.8" N ; 7° 10' 0.6" W.	29-04-2019 ; 10 : 58 : 34
Ouenza (Tébessa)	35° 56' 41.8" N ; 8° 05' 35.8" E.	07-05-2019 ; 10 : 06 : 49

1.2.2. Prétraitement

Dans le cas du prétraitement des images *Landsat-8-OLI*, l'étalonnage radiométrique n'a pas été appliqué car les images acquises sont déjà en réflectance du fait que le capteur OLI établit des corrections au préalable en raison de ses deux dispositifs d'étalonnage embarqués, ce qui est de même pour la correction atmosphérique en raison de la non disponibilité des données atmosphériques pour la définition des paramètres pris en compte dans l'ENVI, mais aussi l'application d'un masquage de nuage n'est pas obligatoire du fait de la netteté des images satellitaires *Landsat-8-OLI*, de plus le prétraitement par mosaïquage d'images n'est pas nécessaire parce que chaque région d'étude est situé dans un seul granule pour chaque cas quelques soit la date d'acquisition de l'image. Cependant seules les étapes de création d'un fichier multibandes ou *empilement de couches* et l'obtention des sous scènes sont nécessaires.

✓ LAYER STACKING

✓ Djebel Ouenza

Dans le cas de la région de Djebel Ouenza, nous avons utilisé huit bandes, soient les bandes Aérosol, Bleu, Vert, Rouge, SWIR1 (IRCL1), SWIR 2 (IRCL2), NIR (PIR) et Cirrus.

✓ Gara Djebilet

Pour la région de Gara Djebilet, nous avons utilisé sept bandes, soient les bandes aérosol, bleu, vert, rouge, SWIR1 (IRCL1), SWIR2 (IRCL2), et NIR (PIR).

Voir l'annexe 2 pour les étapes de création d'un fichier multibandes.

✓ SPATIAL CROP

Les étapes de l'obtention des sous-scènes et les dimensions utilisées pour chacune des deux régions sont citées dans l'annexe 3.

1.2.3. Méthodes d'extraction de l'information à partir de l'imagerie

Pour effectuer le traitement des images des deux régions d'Algérie Ouenza et Gara-Djebilet, une sélection de méthodes a été mise en place en relation avec la zone d'étude, et ces méthodes sont :

a. L'amélioration des images multi-spectrales (Couleurs réelles et Fausses couleurs)

La technique d'amélioration en couleurs naturelles est généralement utilisée comme première image pour l'analyse des données satellitaires et comme image complète pour les non experts dans les données satellitaires. Elle est considérée comme l'une des plus simples combinaisons où en accorde de manière élémentaire les bandes 4, 3 et 2 aux canaux rouge, vert et bleu respectivement.

Toutes les autres combinaisons sont en fausses couleurs, donc suite à l'application d'un certain nombre d'essais, l'attribution des bandes 7, 3 et 2 aux canaux rouge, vert et bleu respectivement a donné de meilleurs résultats dans les deux régions.

L'annexe 4 décrit le processus de réalisation des deux types d'amélioration.

b. La classification

3. La classification non supervisée

✓ **ISODATA**

L'algorithme *IsoData* sélectionne le nombre de classes à définir dans les paramètres selon la carte de référence. On introduit ensuite le nombre maximum d'itérations et le seuil de changement. Ce dernier est utilisé pour terminer le processus itératif si le nombre de pixels dans chaque classe varie de moins que le seuil. On introduit le nombre minimum de pixels requis pour former une classe. Enfin, on introduit la distance minimale entre les moyennes de chaque classe.

Les paramètres utilisés selon les différents essais pour chaque région sont :

Djebel Ouenza

Tableau 3.6a : Paramètres des essais de la méthode *ISODATA* pour la région de Djebel Ouenza
(Elaboré par nous-mêmes)

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Intervalles du nombre de classes	8 – 11	4 - 6	6 – 10	6 – 10
Nombre maximal d'itérations	1	2	3	3
Seuil de changement (%)	5	5	5	5
Nombre minimal de pixels dans une classe	1	7	14	20

Gara-Djebilet

Tableau 3.6b : Paramètres des essais de la méthode *ISODATA* pour la région de Gara-Djebilet
(Elaboré par nous-mêmes)

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Intervalles du nombre de classes	6 – 10	6 – 12	6 – 10	6 – 12
Nombre maximum d'itérations	2	4	4	2
Seuil de changement (%)	5	5	5	5
Nombre minimal de pixels dans une classe	1	5	7	10

Parmi les différents essais effectués comme cités dans les tableaux précédents, nous avons choisi les paramètres de l'essai 3 pour les deux régions en raison des bons résultats obtenus.

✓ **K-means**

Pour la classification *k-means*, nous avons limité notre choix sur un nombre de classes adéquats et ce, en prenant en considération la carte de référence afin de rendre la classification plus claire, nous avons aussi effectuer un changement de valeurs au niveau des itérations pour avoir des résultats plus fiables et pour ce qui est du seuil de changement les valeurs attribuées était aléatoires au voisinage de la valeur par défaut.

Djebel Ouenza

Tableau 3.7a : Paramètres des essais de la méthode *K-means* pour la région de Djebel Ouenza (Elaboré par nous-mêmes)

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Nombre de classes	8	10	6	8
Seuil de changement (%)	4	3	6	5
Nombre maximal d'itérations	8	10	6	10

Gara-Djebilet

Tableau 3.7b : Paramètres des essais de la méthode *K-means* pour la région de Gara Djebilet
(Elaboré par nous-mêmes)

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Nombre de classes	10	5	12	10
Seuil de changement (%)	5	7	5	3
Nombre maximal d'itérations	4	1	5	7

Pour le choix des paramètres des différents essais réalisés, on opte pour l'**essai 1**, concernant la région de l'Ouenza et l'**essai 3** pour Gara-Djebilet.

En principe, l'analyse non-supervisée est un processus itératif où l'utilisateur définit des valeurs arbitraires qui, seront modifiées selon les résultats. Cette analyse nous permettra par la suite d'affirmer nos choix par rapport aux régions d'intérêts.

L'annexe 5 décrit le processus de classification non-supervisée.

4. La classification supervisée

✓ **Maximum Likelihood**

Le principe de la classification dirigé par la procédure de *maximum de vraisemblance* consiste à comparer la signature spectrale de chaque pixel dans les bandes choisies (dans notre cas : bleu, vert, rouge et proche infrarouge et courte longueur d'onde infrarouge) avec celle des Régions d'intérêts (**Regions Of Interest**).

Il s'agit de sélectionner un minimum de pixels spectralement représentatif dans chaque ROI. Cet échantillon, ou 'ROI' est défini à l'écran par la numérisation des pixels ou polygones pour chaque classe spectrale. Sur la base des polygones ainsi définis, l'extraction automatique des valeurs de pixels contenues à l'intérieur des polygones et le calcul de leur moyenne et écart-type produira la signature spectrale de chaque classe à partir des bandes choisies de l'image *Landsat*. Puis affecter chaque pixel à la classe dont laquelle la signature spectrale est proche.

Voici ci-dessous les tableaux représentatifs des ROI avec leurs couleurs attribuées :

Djebel Ouenza

Selon plusieurs essais pour la région de Djebel Ouenza, il était nécessaire d'établir un regroupement de classes ayant des formations similaires, tel qu'on a défini seulement **5 classes** en regroupant le *cénomaniens*, le *Santorien*, le *Turonien* et le *Coniacien* dans une seule classe appelée *Crétacé Supérieur* et l'*Aptien calcaire* et *Aptien marneux* en une classe appelée *Aptien*, et ce pour avoir un résultat explicite.

Tableau 3.8a : Classes choisies et couleurs attribuées pour la région de Djebel Ouenza (Elaboré par nous-mêmes)

Classe	Couleur
Aptien calcaire	Red
Aptien marneux	Yellow 2
Albien	Cyan 2
Vraconien	Cyan 3
Crétacé supérieur	Aquamarine
Trias	Magenta 1

Gara-Djebilet**Tableau 3.8b** : Classes choisies et couleurs attribuées pour la région de Gara-Djebilet (Elaboré par nous-mêmes)

Classes	Couleur
Post Paléozoïque	Yellow
Frasnien	Green
Eifelien	Marron 3
Emsien	Cyan 3
Praguien	Marron 2
Fer	Red
Lochkovien	Blue
Givétien	Cyan
Silurien	Blue 3
Ordovicien sup	Magenta
Précambrien	Red 3

✓ Spectral Angle Mapper (SAM)

C'est une autre méthode assez fréquemment utilisée dans la classification supervisée qui partant d'une librairie spectrale préexistante généralement prise sur le terrain à l'aide d'un spectromètre ou en laboratoire avec des échantillons de terrain de référence tel que l'on attribue chaque pixel de l'image à une classe en le comparant avec les échantillons de référence de la librairie. Dans notre cas, nous ne disposons pas d'une librairie spectrale pour les deux régions Ouenza et Gara- Djebilet, il faudrait donc la construire en se basant sur l'attribution d'un spectre de référence pour classifier les pixels.

Djebel Ouenza

Tableau 3.9a : Librairie spectrale pour la région de Djebel Ouenza (Elaboré par nous-mêmes)

Nom du spectre	Couleur
Aptien	Red
Albien	Green
Vraconien	Blue
Cénomanién	Yellow
Trias	Cyan

Gara-Djebilet

Tableau 3.9b : Librairie spectrale établie pour la région de Gara-Djebilet (Elaboré par nous-mêmes)

Nom du spectre	Couleur
Post Paléozoïque	Yellow
Frasnien	Blue
Eifelien	Sienna 1
Emsien	Aquamarine
Praguien	Magenta
Fer	Red
Lochkovien	Maroon
Givétien	Purple
Silurien	Sea Green
Ordovicien supérieur	Magenta
Précambrien	Red 3

Voir l'annexe 6 pour le processus de classification supervisée.

5. La post-classification

Afin de mieux améliorer les résultats obtenus à partir des méthodes de la classification qu'elle soit supervisée ou non-supervisée, une post-classification est nécessaire, parmi les méthodes citées auparavant, deux processus de la post-classification ont été appliqués aux images qui sont classées par ISODATA, K-means, Maximum Likelihood et SAM,

- Le premier étant l'analyse en minorité ou majorité où une modification des pixels parasites est établie,

- par la suite le deuxième processus qui est celui du regroupement par classes est réalisé où le clump est lancé pour ajouter une cohérence spatiale aux classes existantes en combinant des zones classées similaires adjacentes.

La plupart des classifications d'images sont basées sur des réponses spectrales détectées. En raison de la complexité des environnements biophysiques, la confusion spectrale est courante parmi les classes de couverture terrestre. Ainsi, les données auxiliaires sont souvent utilisées pour modifier l'image de classification sur la base de règles d'expertise établie.

L'annexe 7 décrit le processus de post-classification dans ENVI Classic.

c. Le démixage spectral linéaire

Le démixage linéaire repose sur le même principe que la méthode de classification SAM, pour définir les bibliothèques spectrales de référence pour arranger les pixels, cependant la seule différence réside dans le résultat obtenu où les classes deviennent des bandes spectrales, de plus dans l'affichage, on peut repérer une classe précise par affichage en niveau de gris ou bien on peut attribuer les classes qu'on juge importantes dans notre étude au canaux rouge, vert et bleu en mode RGB.

Djebel Ouenza

Pour la région de Djebel Ouenza, la bibliothèque spectrale utilisée est identique à celle de la méthode SAM, où nous avons utilisé **5 classes** ayant permis la distinction entre *l'aptien calcaire* et *l'aptien marneux*.

Gara-Djebilet

Concernant la région de Gara- Djebilet, l'utilisation de la même bibliothèque spectrale que celle de la méthode Spectrale Angle Mapper a donné un meilleur résultat dans les différents essais.

L'annexe 8 décrit la méthode de démixage spectral linéaire réalisé sous ENVI pour Djebel Ouenza et Gara Djebilet.

d. Les bandes ratios

Les ratios de bandes généralement utilisés avec *Landsat- 8-OLI* sont :

Tableau 3.10a : Ratios communément utilisés pour *Landsat-8*

Features	Band or ratio	Reference
Ferric iron, Fe ³⁺	4/1	Drury, 1993 ; Abrams and Hook, 1995 ; Lillesand and Kieffer, 2004 ; Kalinowski and Oliver, 2004
Ferrous iron, Fe ²⁺	6/5	Drury, 1993 ; Abrams and Hook, 1995 ; Lillesand and Kieffer, 2004 ; Kalinowski and Oliver, 2004
Iron oxide	3/1	Gad and Kusky, 2006
Clay minerals	6/7	Drury, 1993 ; Abrams and Hook, 1995 ; Lillesand and Kieffer, 2004 ; Kalinowski and Oliver, 2004
Magnetic contents	5/1	Sabins, 1999
Hydroxyl bearing rocks or carbonates	5/7	Sultan et al, 1987
Iron ore and mafic saprolite	(4+6)/5	Rockwell 2013
Clay minerals	7/4	Laake, 2011
Metavolcanic	(5/4)*(3/4)	Rajendran et al, 2007
Ferrous minerals	(5/4)	Carranza and Hale, 2002
Biomass - vegetation	(5/4)	Drury, 1993 ; Abrams and Hook, 1995 ; Lillesand and Kieffer, 2004 ; Kalinowski and Oliver, 2004

Djebel Ouenza

Tableau 3.10b : Les combinaisons de bandes utilisées pour la cartographie du minerai de fer pour la région de l'Ouenza (Elaboré par nous-mêmes)

MODE	COMBINAISON 1	COMBINAISON 2	COMBINAISON 3	COMBINAISON 4	COMBINAISON 5
R	NIR	6/5	(4+6)/5	(4+6)/5	5/7
V	(4+6)/5	(4+6)/5	SWIR 1	SWIR1	SWIR1
B	4/3	NIR	Vert	6/5	Vert

Gara-Djebilet

Tableau 3.10c : Les combinaisons de bandes utilisées pour la cartographie du minerai de fer pour la région de Gara-Djebilet (Elaboré par nous-mêmes)

MODE	COMBINAIS ON	COMBINAIS ON 2	COMBINAIS ON 3	COMBINAIS ON 4	COMBINAIS ON 5	COMBINAIS ON 6
R	4/1	4/1	(4+6)/5	6/7	(4+6)/5	4/1
V	SWIR 1	(4+6)/5	SWIR 1	3/1	NIR	3/1
B	Vert	3/1	Vert	(4+6)/5	SWIR 1	6/7

L'annexe 9 décrit le processus d'application de la méthode des bandes ratios.

e. Minimum Noise Fraction (MNF)

Cette méthode facilite la détermination de la dimensionnalité des images, l'élimination, l'isolement et la réduction du bruit dans les données.

L'annexe 10 décrit le processus permettant d'effectuer l'analyse en fraction de bruit minimale MNF.

1.2.4. Interprétation des résultats

L'interprétation des résultats du traitement sera faite selon les cartes géologiques de référence des deux régions.

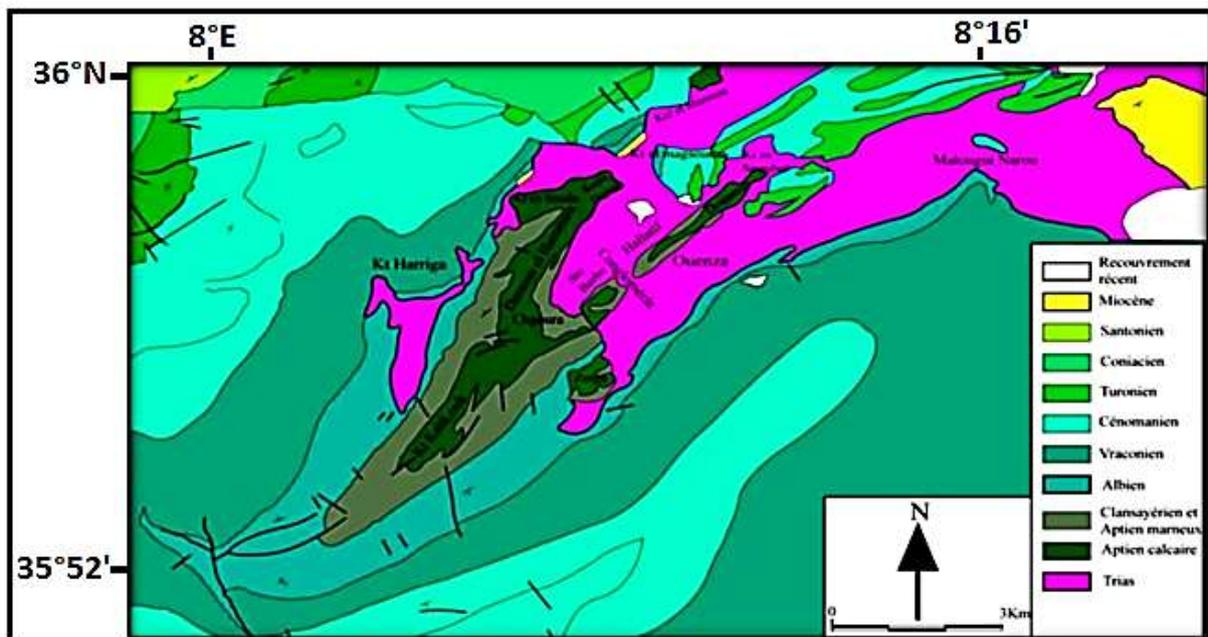


Figure 3.5a : Carte géologique de référence de la région de Djebel Ouenza (D'après Dubourdiou, 1956, modifié par Vila, 1994)

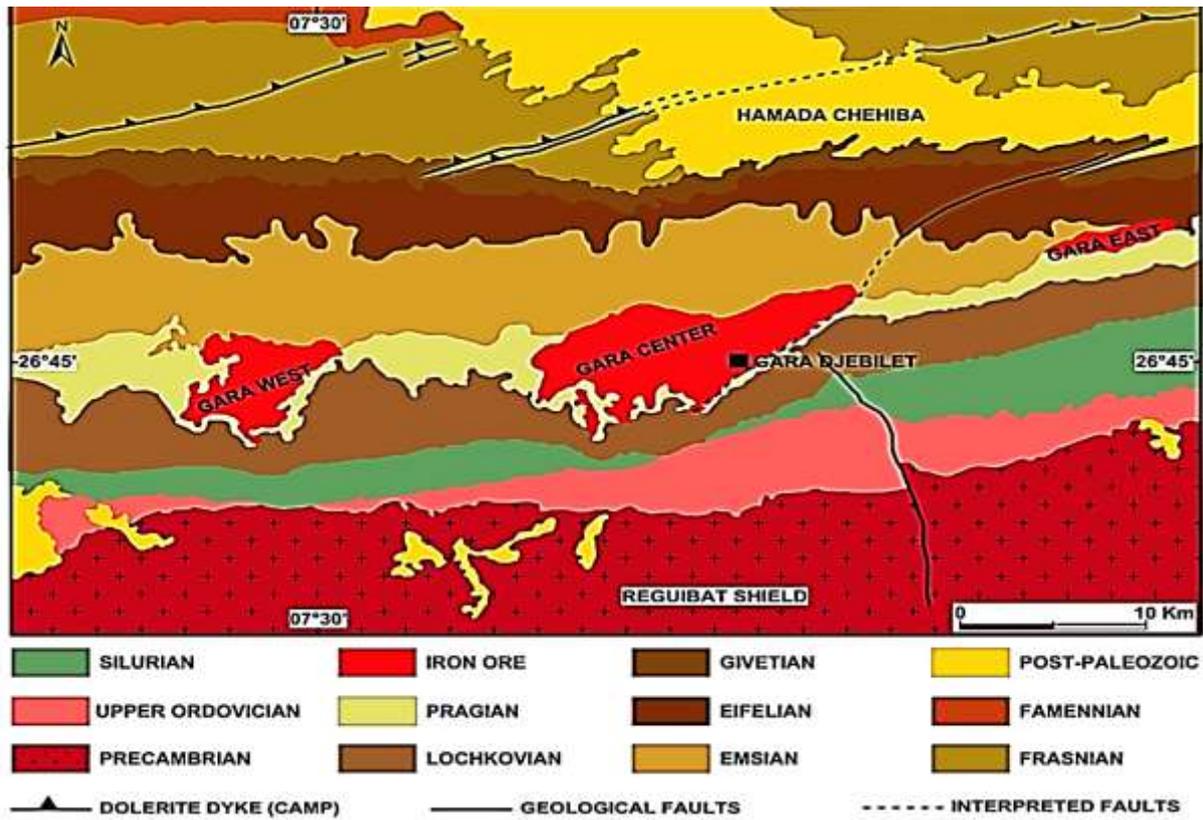


Figure 3.5b : Carte géologique de référence de la région de Gara-Djebilet (Chabou, Saibi, Bersi ; 2015)

Conclusion

Compte tenu des caractéristiques des régions d'études, il a été jugé indispensable et préférable d'utiliser des images Landsat, et ce, *premièrement* en raison de leur disponibilité et caractère pratique, et *deuxièmement*, ils fournissent des images récentes et de bonne qualité et principalement pour leur avantage, au besoin, de cartographier les zones de fortes oxydation (chapeau de fer) dont les minéraux composants possèdent des patrons d'absorption dans les bandes Proche Infrarouge.

De ce fait, les méthodes utilisées dans les deux cas d'études, sont jugées adéquates et appropriées selon les recommandations des spécialistes en géologie et en télédétection qui, définissent que l'efficacité de ces méthodes est liée de manière directe aux sites d'études et la nature des types de gisements ciblés (VMS, MVT, SEDEX et filons ferrifères), et ce, pour la réalisation de notre travail portant sur la détection, délimitation et la cartographie des deux gisements minier et minéral métalliques ferrifères, situés dans deux régions géologiques différentes d'Algérie, à savoir Ouenza au Nord-Est et Gara Djebilet au Sud-Ouest.

Chapitre 4

Interprétation des résultats

Introduction

Comme cité dans les chapitres précédents, les applications des techniques de télédétection connues et rentables pour détecter et cartographier les zones contenant des gisements minéraux, grâce à la mise en valeur des images Landsat 8 OLI ont été utilisées pour mettre en évidence la présence de dépôts de fer d'où la nécessité d'une démarche d'interprétation afin de mieux décrire et expliquer les résultats obtenus, qui sera développé dans le chapitre suivant.

1. Résultats du traitement d'image de Djebel Ouenza

1.1. Amélioration des images multi-spectrales en couleurs composites

1.1.1. Couleurs naturelles

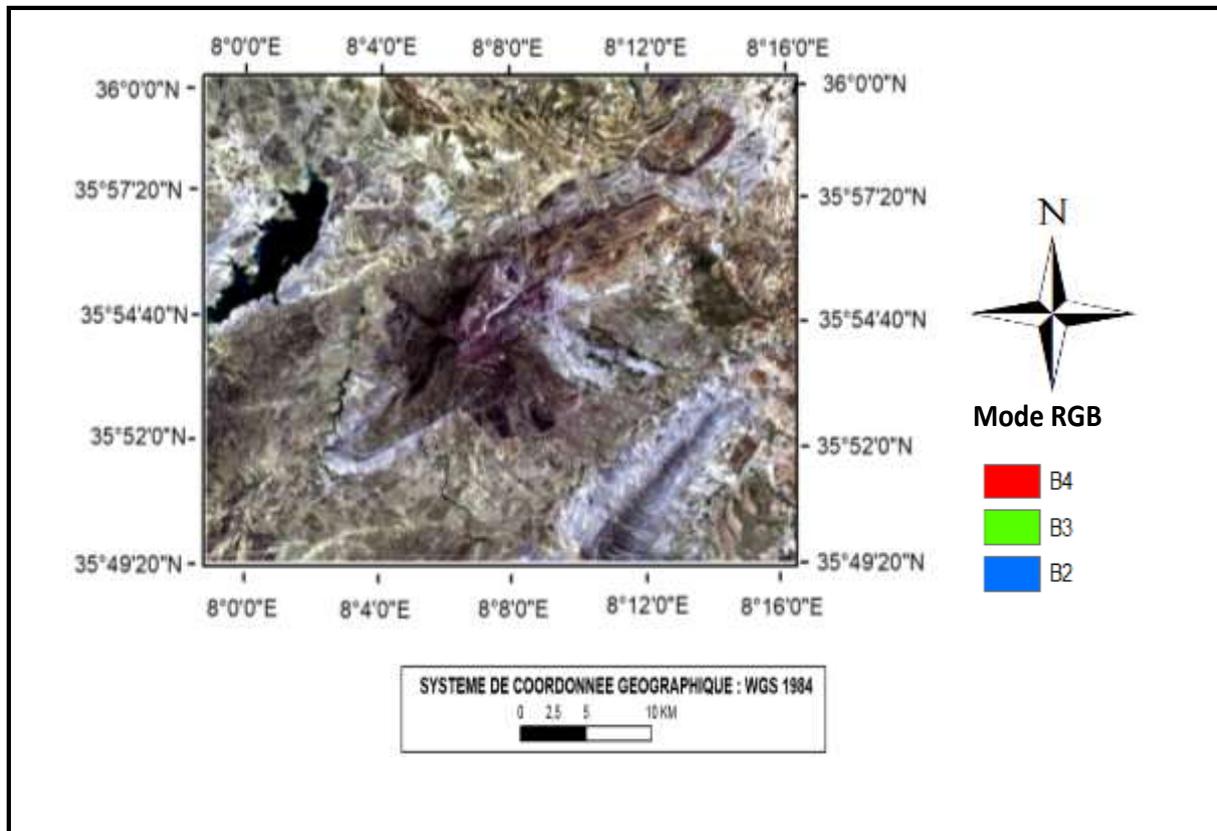


Figure 4.1a : Amélioration en couleurs naturelle en RVB (Elaborée par nous-mêmes)

La Combinaison RVB est considérée comme l'une des plus simples combinaisons car, on accord de manière simple avec les bandes 4, 3 et 2 aux canaux rouge, vert et bleu respectivement. L'image 4.1a, nous a servi de support pour l'application de cette combinaison de bandes en Mode RGB, et qui nous a permis d'effectuer une première interprétation sur l'image traitée, où l'on aperçoit la région de l'Ouenza en couleurs naturelles réelles, montrant ainsi les limites des anciens fronts de taille d'extraction du minerai, juxtaposés aux actuels front d'exploitation du minerai, semble-t-il de hautes concentrations de dépôt ferrifère, situés au sommet du Djebel Ouenza à un niveau hypsométrique de 1400 m (Pic de Chagoura), et les fronts de taille récents et actuels d'exploitation du minerai à partir d'autres étages géologiques situés à un niveau de 800 m aux alentours du sommet (Chagoura Nord, Sud et Ouest).

Pour avoir plus de détails, de précision et de vérification, on a essayé d'introduire d'autres bandes en mode RGB, mis à part les bandes 4, 3, et 2, on a introduit la notion de la composition en fausse couleur pour avoir plus de contraste à partir du rapport absorption / réflexion du rayonnement de la surface du gisement.

1.1.2. Fausses couleurs

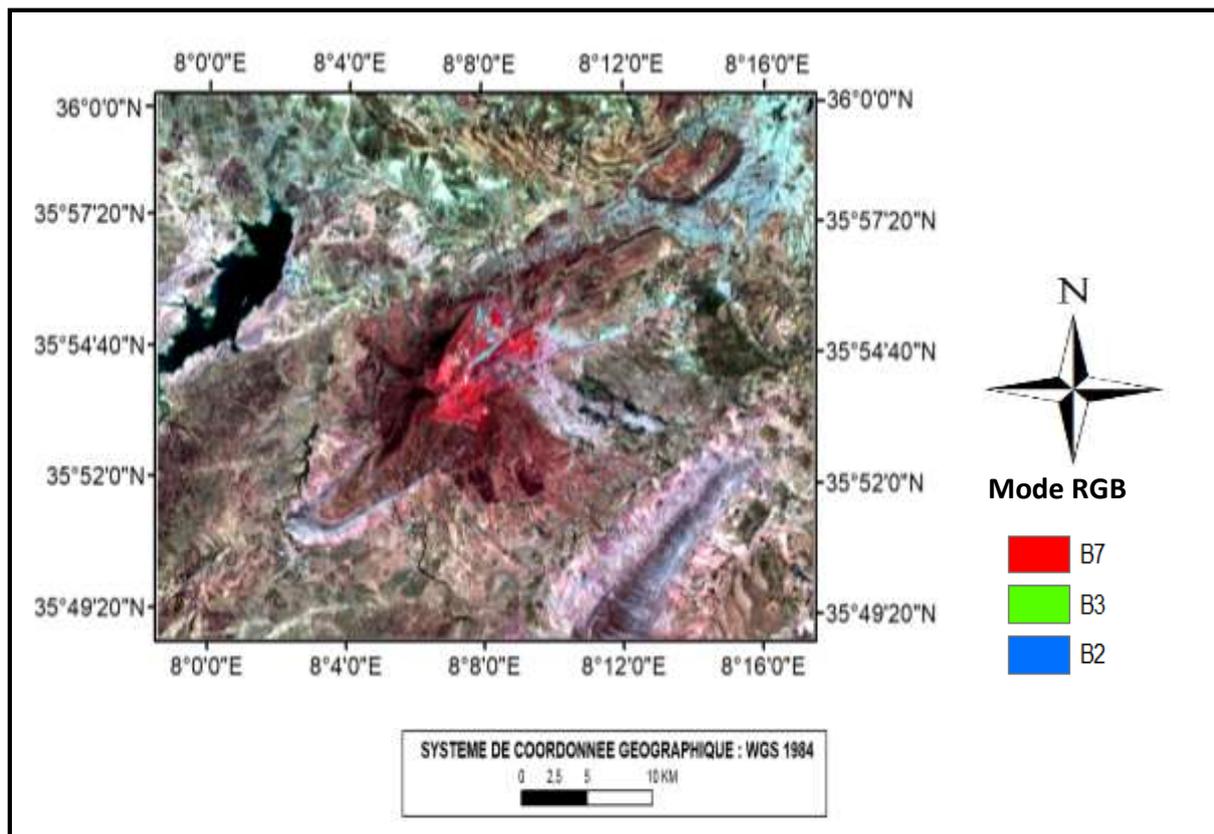


Figure 4.1b : Amélioration en fausses couleurs (Elaborée par nous-mêmes)

La surface d'oxydation du gisement est mise clairement en évidence par la présence du fer dans le minerai générant une forte absorption dans la bande 7, avec une réflectance supérieure dans la bande 3, et exprimant aussi une altération très visible des oxydes de fer décelée par une absorption élevée dans la bande 2.

Donc suite à ces caractéristiques, on a utilisé une combinaison de bandes 7, 3 et 2, où chaque bande est introduite respectivement dans les canaux Rouge, Vert et Bleu.

En s'appuyant sur la carte géologique de la région, la figure 4.1b illustre clairement l'affleurement de certaines formations géologiques (étages géologiques en relation avec leurs lithologies) en larges surfaces dont l'Aptien en couleur marron, et une forte oxydation de minéralisation ferrifère présente en couleur rouge appartenant à l'Aptien calcaire, cependant les autres formations sont visible à l'œil nu mais sans pour autant reconnaître leurs limites lithologiques. Donc il est indispensable de faire appel à d'autres méthodes d'extraction de données sur la région étudiée afin d'obtenir plus de résultats beaucoup plus fiables pour mener à bien des études ultérieures et développer une analyse plus exhaustive.

1.2. Classification non-supervisée

1.2.1. ISODATA

Pour une première application d'une méthode d'extraction de données, on a procédé par la classification non-supervisée ISODATA à travers laquelle on a défini un nombre représentatif de classes des formations lithologiques correspondant à la carte géologique de la région utilisée comme support et référence.

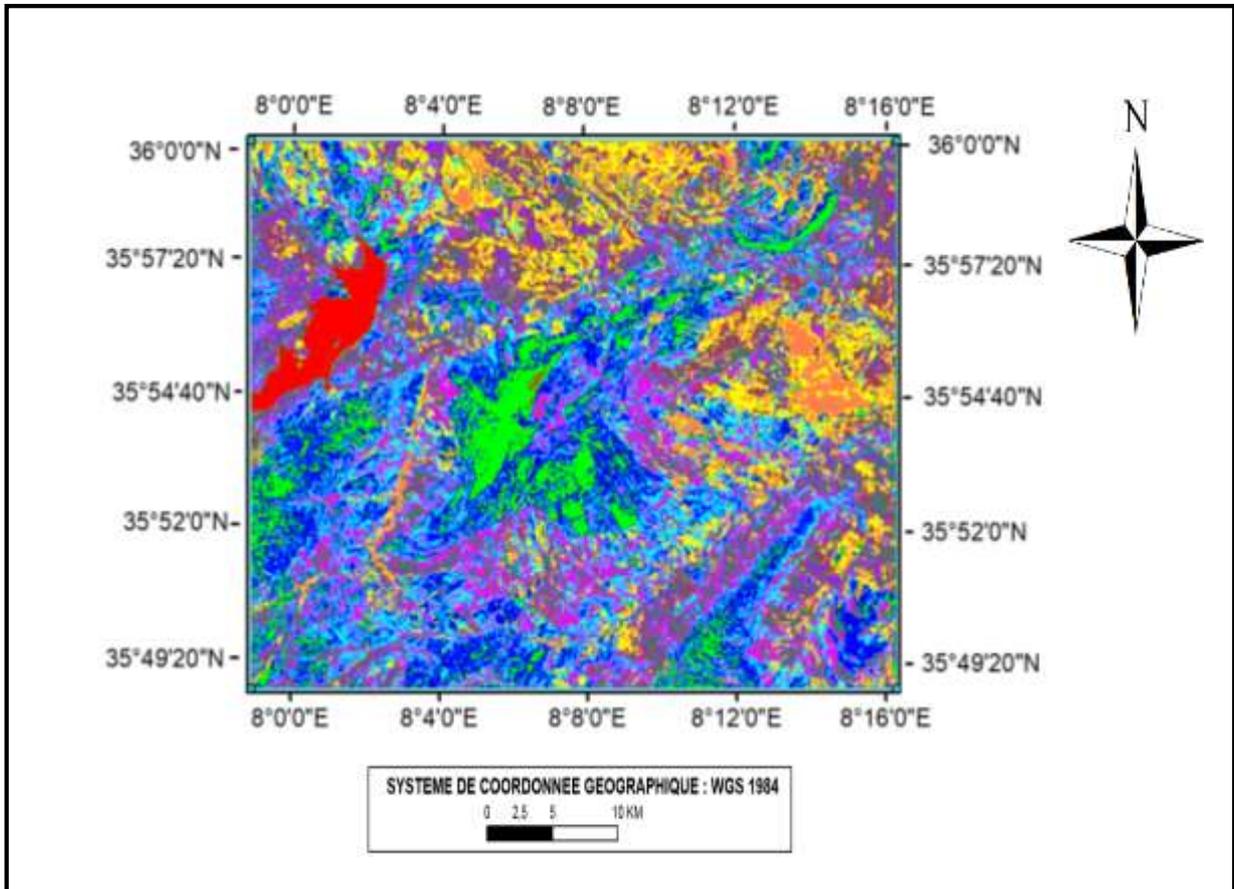


Figure 4.2a : Classification ISODATA (Elaborée par nous-mêmes)

Selon la figure 4.2a, on distingue que les étages géologiques sont globalement individualisés mais se confondent entre eux dans le détail en raison du nombre élevé de pixels lié à la présence de différentes lithologies dans chaque étage géologique formant une classe dans la région de l'Ouenza

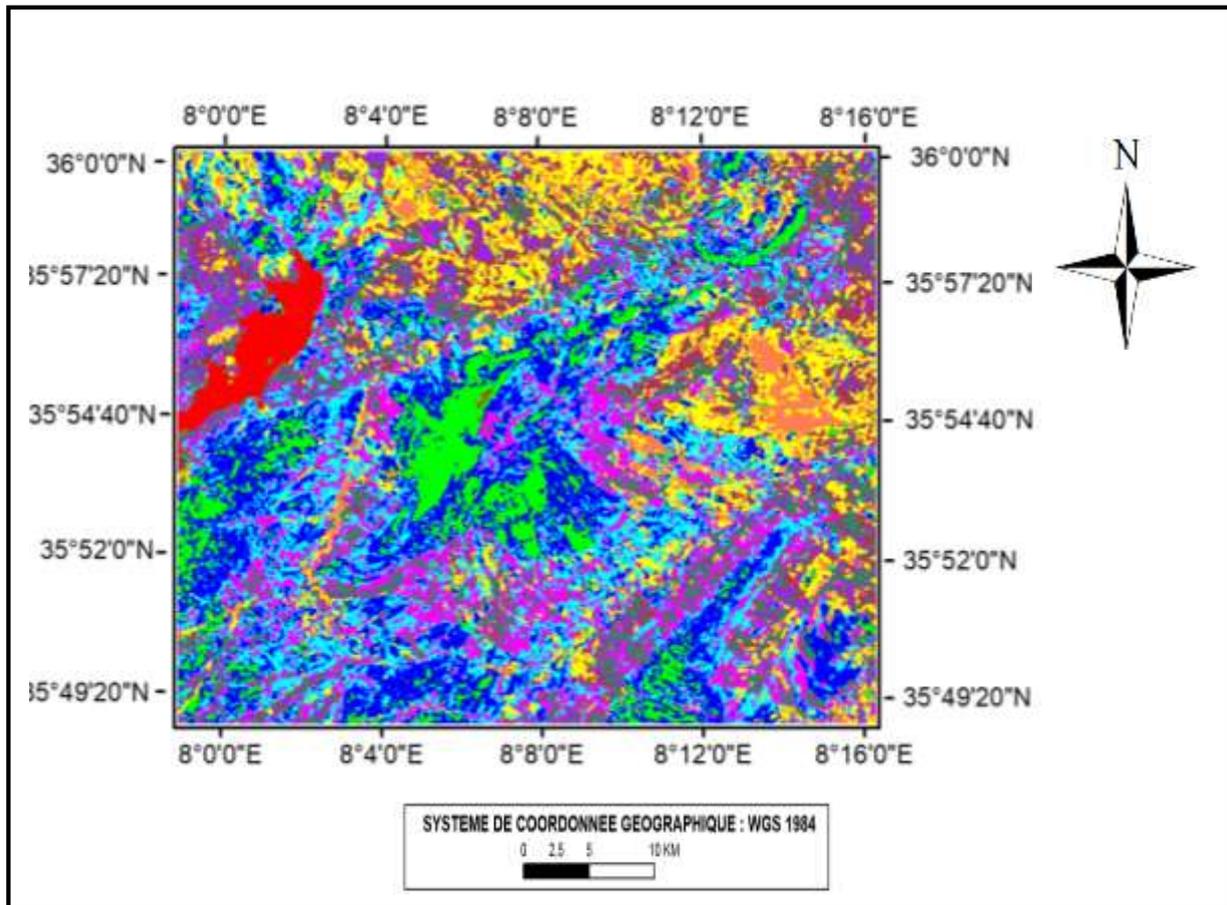


Figure 4.2b : Post-classification ISODATA (Elaborée par nous-mêmes)

Cependant, on note que les travaux d'exploitation du gisement ferrifère de l'Ouenza sont à l'origine du remaniement, perturbation des surfaces lithologiques et déplacement des masses rocheuses relatives au minerai favorisant ainsi la présence des différentes lithologies dans chaque classe ou étage géologique. Pour pallier à ce problème de foisonnement lithologique, il est impératif d'effectuer une classification supplémentaire nommée post-classification afin de rendre le résultat meilleur ou de vérifier et confirmer les mêmes caractères élucidés par la figure 4.2a.

Toutefois, en s'appuyant sur la carte géologique de référence, la figure 4.2b, vérifie et confirme les mêmes caractéristiques relatives aux lithologies des étages géologiques illustrées dans la figure 4.2a, excepté l'étage de l'*Aptien* calcaire qui est partiellement représenté par la zone verte formant de larges surfaces continues localisées dans le Djebel Ouenza. On repère aussi une large zone rouge correspondant à la retenue collinaire de l'Oued Mellègue, située à l'Ouest du gisement ferrifère de l'Ouenza.

1.2.2. K-means

Le traitement par K-means a donné le résultat représenté par la figure 4.3a suivante :

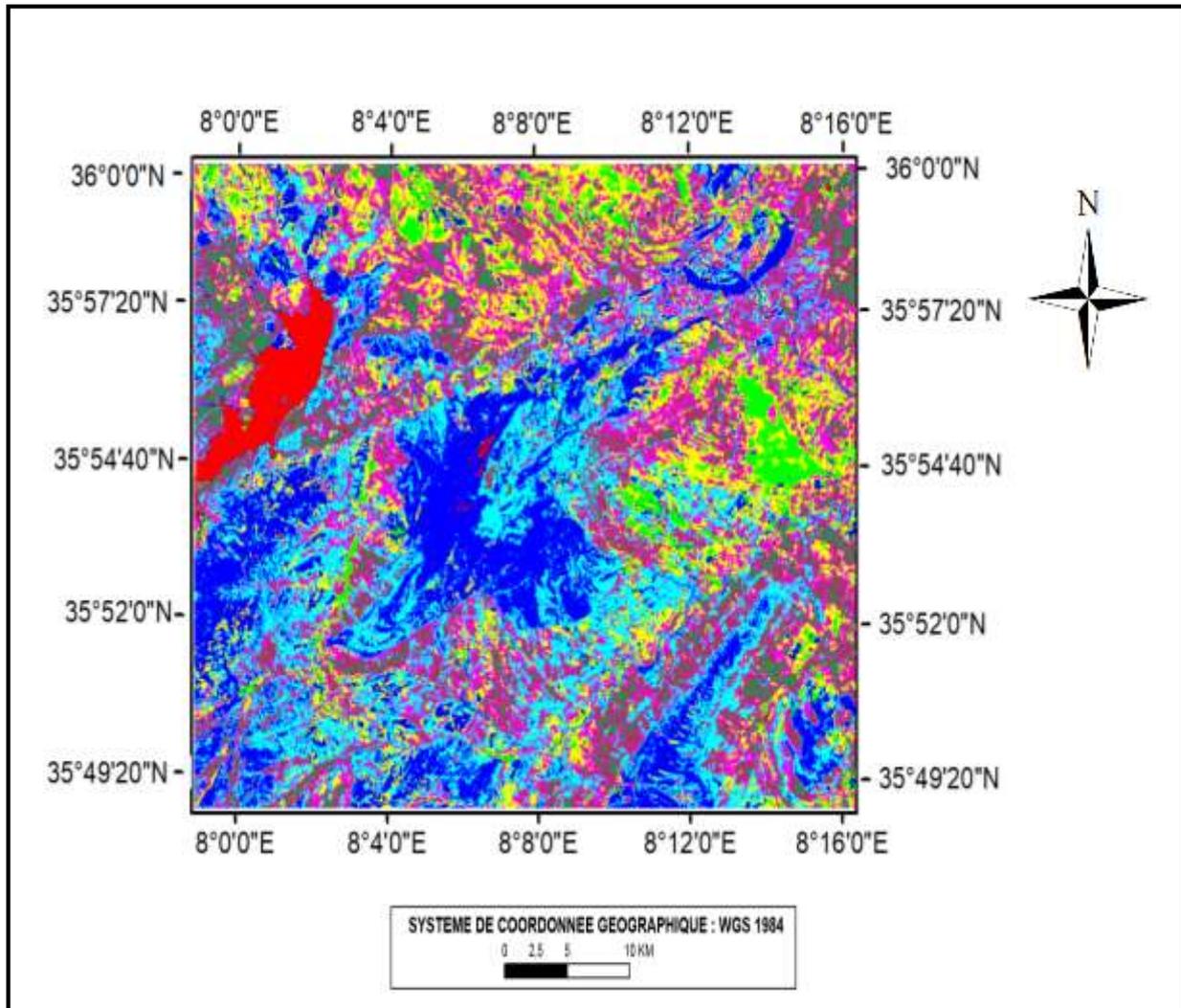


Figure 4.3a : Classification non-supervisée K-means (Elaborée par nous-mêmes)

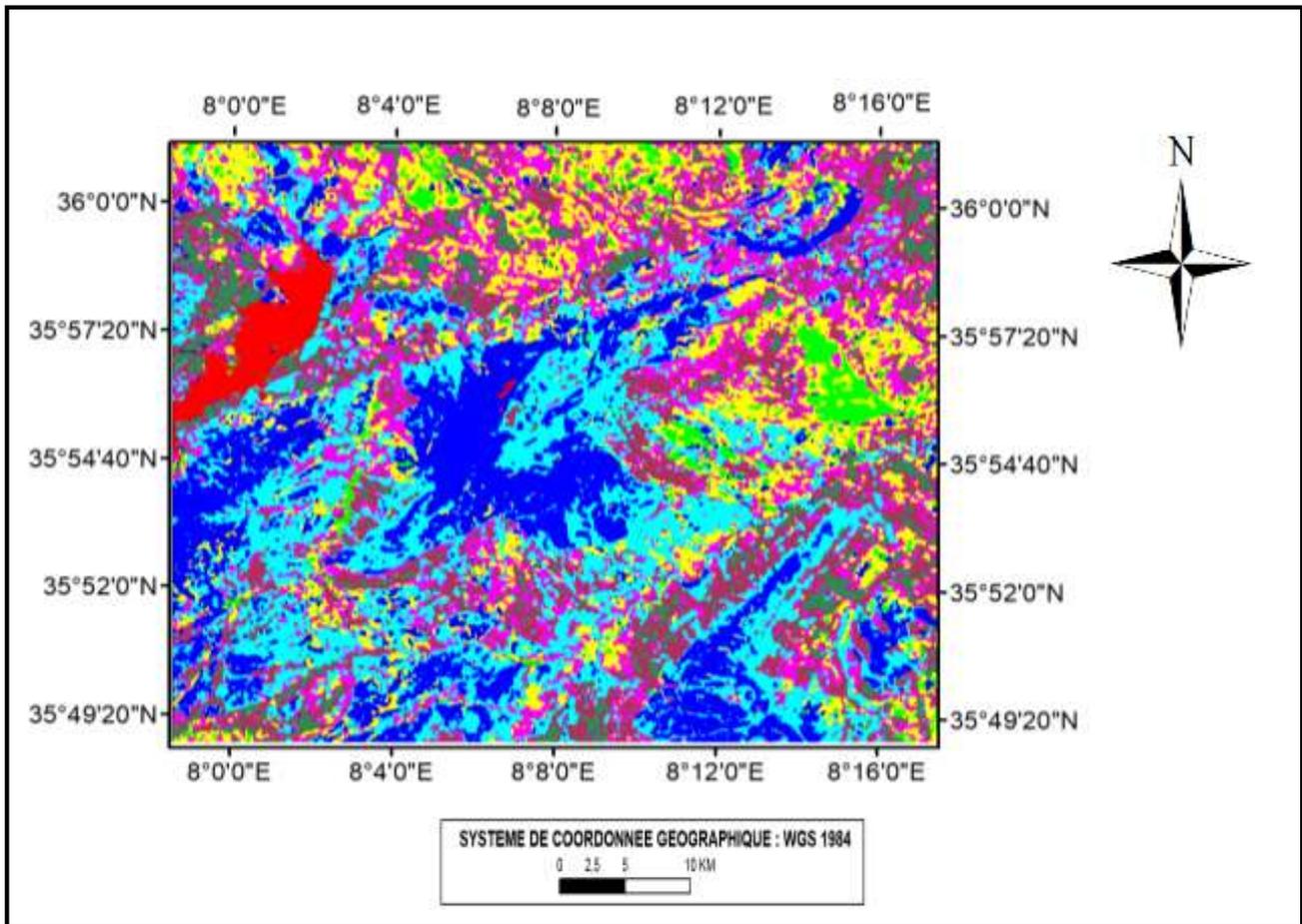


Figure 4.3b : Post-classification non supervisée K-means (Elaborée par nous-mêmes)

Les figures 4.3a et 4.3b, nous permettent de repérer les formations des étages géologiques les plus dominants de la région de Djebel Ouenza abritant le gisement ferrifère d'Ouenza, il s'agit de l'Aptien marneux et l'Aptien calcaire, dominées par de large surfaces bleues où se localise la concentration du minerai de fer conformément à la description lithostratigraphique de la région d'Ouenza; par contre le *Trias*, les étages du *Crétacé* moyen tels que le *Barrémien*, *l'Aptien*, le *Clansayésien*, *l'Albien*, le *Vraconien* et le *Crétacé* supérieur ne sont pas distincts les uns des autres, ce qui nous amène à dire que les méthodes de classification et Post-classification non-supervisées K-means ne sont pas précises car la distribution des classes ne concorde pas avec la carte géologique de référence.

Par conséquent, aucune des deux classifications non supervisées, soit IsoData et K-means ne permet de différencier clairement entre les limites des diverses formations lithostratigraphiques qui se trouvent dans le Djebel Ouenza, d'où la difficulté de localiser le gisement ferrifère de manière précise, c'est pourquoi on procède par la classification supervisée.

1.3. Classification supervisée

1.3.1. Maximum Likelihood

La procédure de classification a été établie en regroupant certaines classes selon leur affinité et similitude en termes de lithologie et en éliminant d'autres en raison de leur faible occurrence dans la zone d'étude.

La prise en considération de la totalité des classes lithostratigraphiques conduit en général à une représentation exagérée de l'unité géologique concernée, qui se voit étendue de manière anormale par rapport aux différentes unités lithologiques

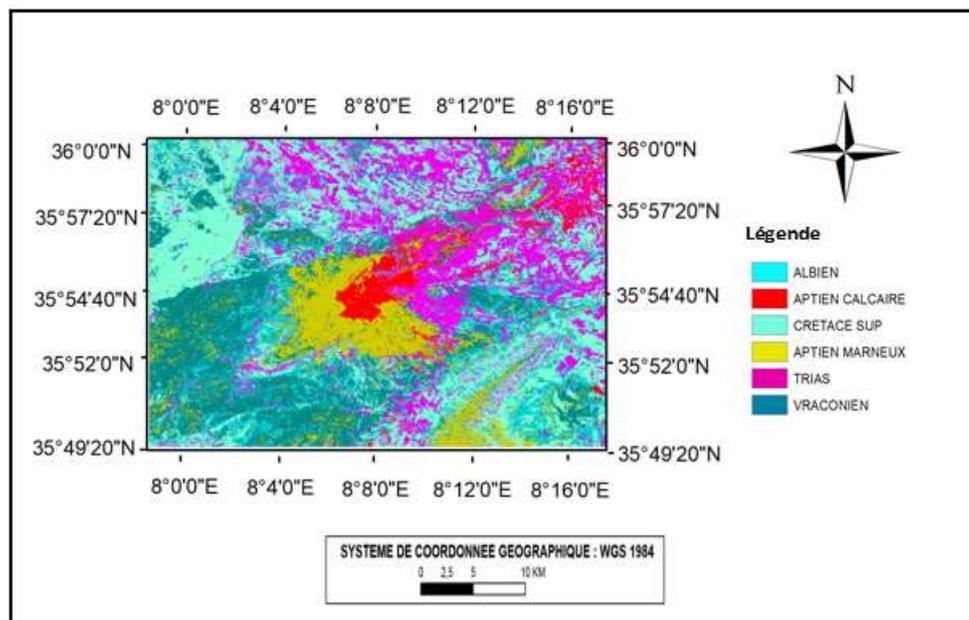


Figure 4.4a : Classification supervisée par Maximum Likelihood (Elaborée par nous-mêmes)

Dans le cas de la région de l'Ouenza, nous avons regroupé les unités ayant les mêmes formations géologiques comme le *Cénomanién*, le *Turonien*, le *Coniacien* et le *Santonien* pour former ainsi la classe du *Crétacé* supérieur selon l'échelle des temps géologiques, quant au *Miocène*, celui-ci n'a pas été pris en considération lors de la définition des ROI (Région d'intérêt).

Donc, dans cette classification, le nombre de classes les plus représentatives de la région, a été réduit à six, ces classes permettent de localiser et distinguer les limites du minéral de fer par rapport aux autres formations géologiques voisines.

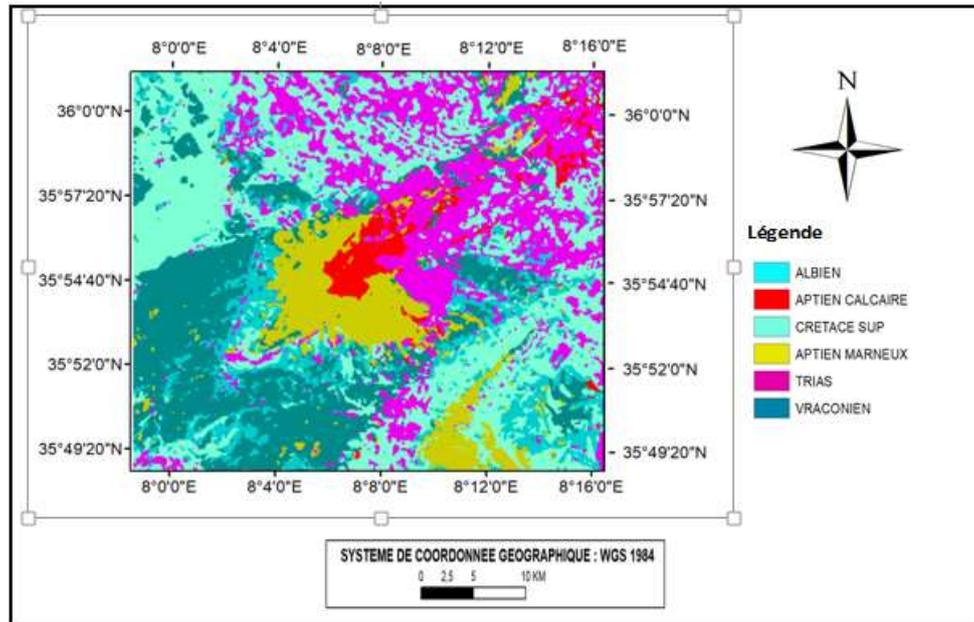


Figure 4.4b : Post-classification supervisée Maximum Likelihood (Elaborée par nous-mêmes)

Il est clair que certaines formations sont plus ou moins visibles sur la figure 4.4b, tel que l'on peut distinguer la formation *triasique* en magenta, l'*Aptien* calcaire en rouge contenant potentiellement les bonnes concentrations métalliques ferrifères, l'*Aptien* marneux en jaune-ocre qui contient de très faibles concentrations ferrifères, le *Crétacé* supérieur représenté par le bleu-cyan et le *Vraconien* en bleu gris.

1.3.2.Méthode Spectral Angle Mapper

L'application de la *Spectral Angle Mapper* sur une Image *Landsat-8- OLI*, a été réalisée par la création d'une librairie spectrale, en attribuant 5 spectres aux zones représentatives des formations géologiques

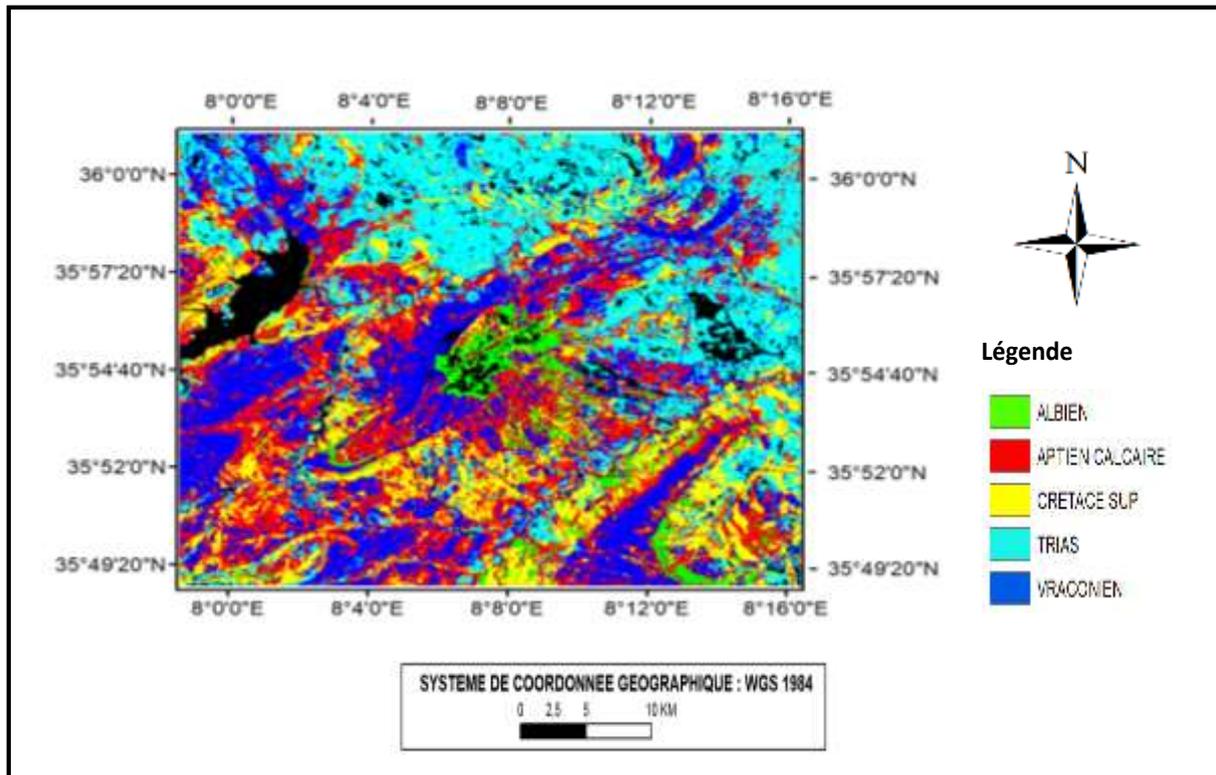


Figure 4.5a : Classification supervisée **SAM** (Elaborée par nous-mêmes)

Les résultats collectés à partir de cette classification nous ont permis, suite à une comparaison avec la carte géologique de référence de la région de l'Ouenza, de déterminer les limites des concentrations ferrifères fortement oxydées, il s'agit semble-t-il des anciens fronts de taille d'exploitation, indiquée par les surfaces vertes localisées dans le site minier ferrifère de Djebel Ouenza, d'autant plus que les zones noires correspondent aux surfaces d'eaux et aux surfaces hydromorphes.

Afin de mieux distinguer les formations géologiques de la région de l'Ouenza abritant le gisement ferrifère, on a procédé par la méthode post-classification *Méthode Spectral Angle*, représentée par la figure 4.5b suivante.

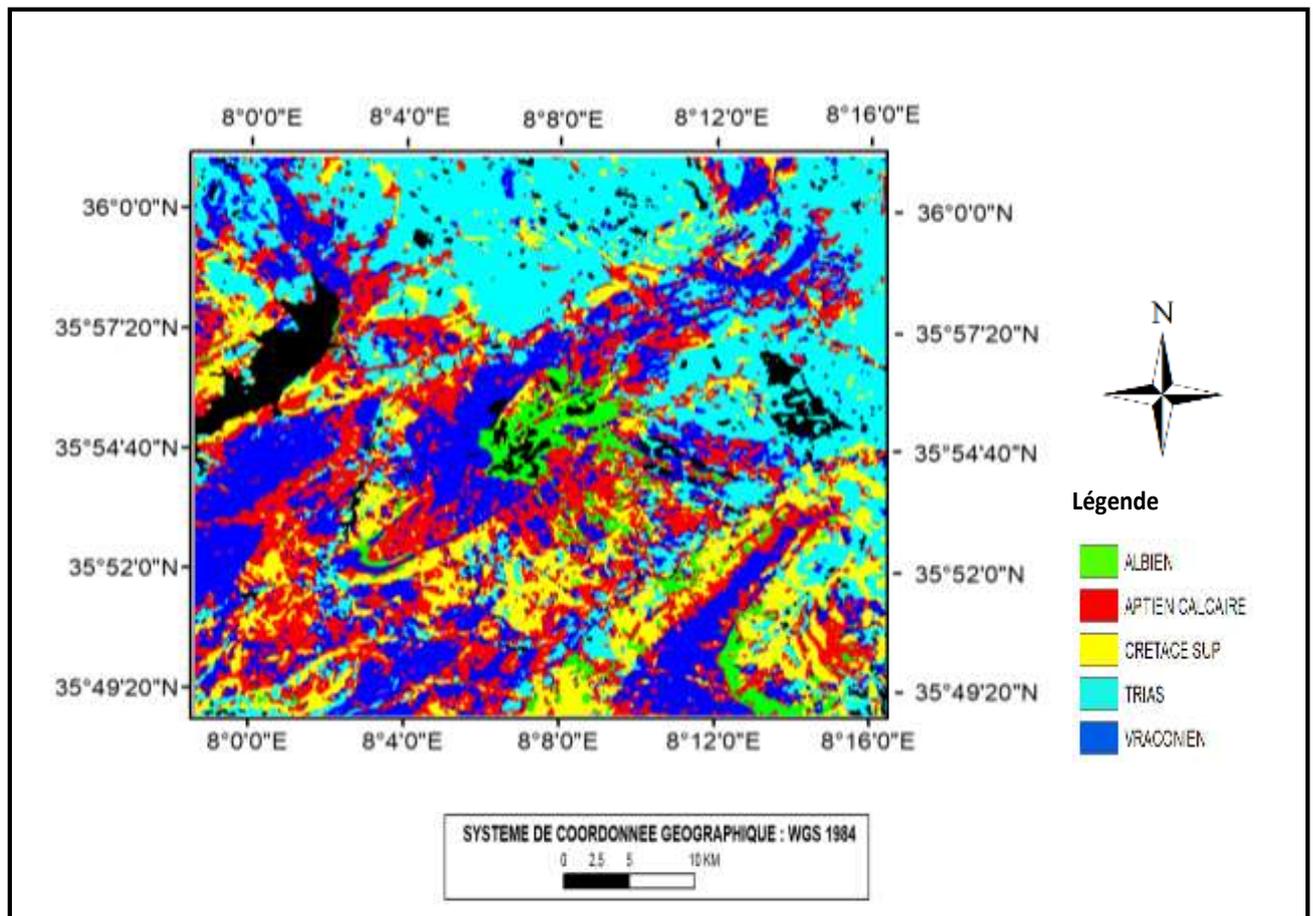


Figure 4.5b : Post-classification supervisée SAM (Elaborée par nous-mêmes)

L'objet de l'opération d'amélioration une fois effectuée, est supposée apporter une meilleure lecture et compréhension de l'image permettant ainsi de distinguer entre les diverses unités lithologiques. Cependant, le résultat conduit à l'établissement d'une interprétation déduisant une confusion entre toutes les entités lithostratigraphique se trouvant dans la région d'étude relative au périmètre du gisement ferrifère de l'Ouenza.

Selon les interprétations précédentes des deux méthodes de classification et post-classification supervisées (Maximum Likelihood et SAM), on constate qu'il est impératif de faire appel à d'autres méthodes de traitements pouvant aboutir à des résultats plus fiables et convenables.

1.4. Méthode Spectral Unmixing

En se basant sur le principe de la méthode de Spectral Unmixing, nous avons utilisé une librairie spectrale similaire à celle de la méthode SAM, qui considère l'existence de cinq classes, et ce, pour ne pas engendrer des anomalies et confusions entre les unités lithologiques.

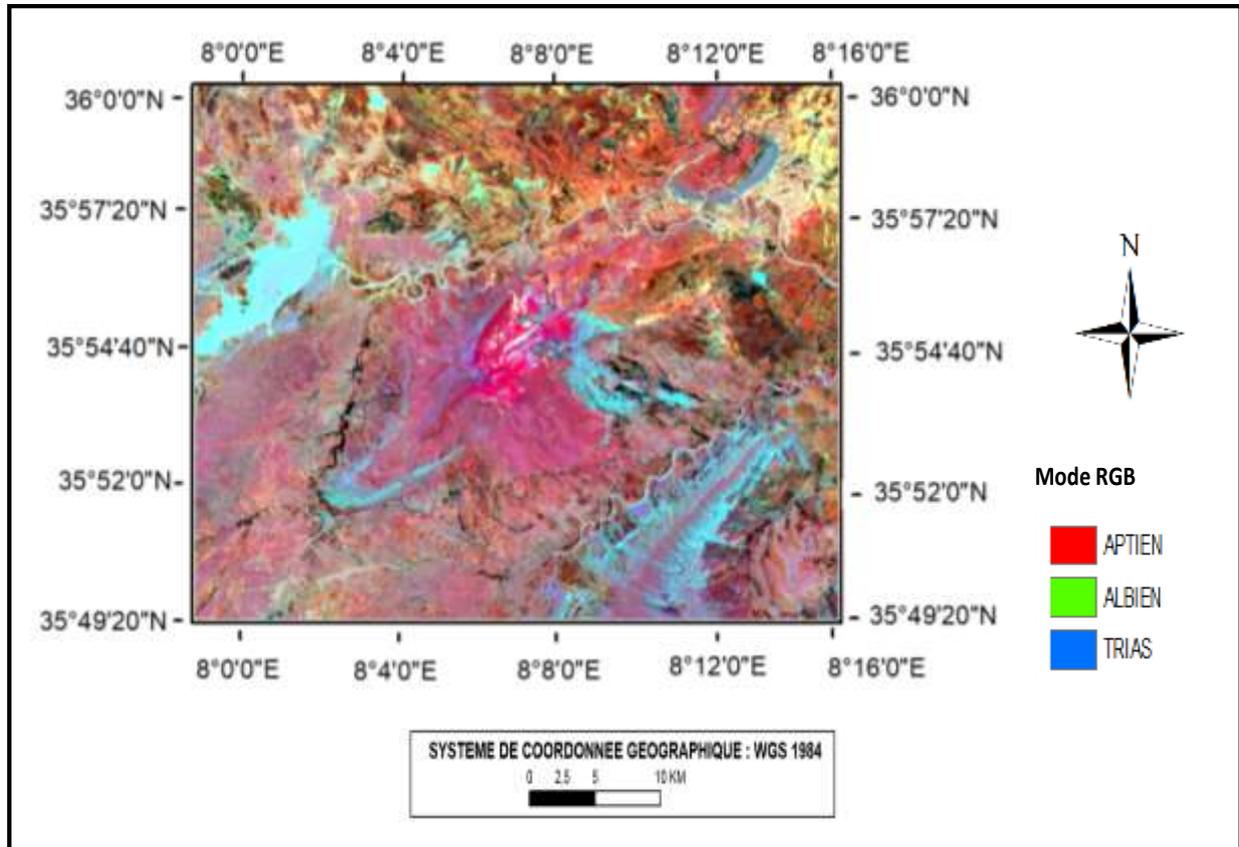


Figure 4.6 : Méthode Spectral Unmixing (Elaborée par nous-mêmes)

La figure 4.6 ci-dessus, nous permet de visualiser les classes caractérisant la région de Djebel Ouenza, soit le **Trias** en *orange-clair*, l'**Albien** en *rose-violacé*, le **Vraconien** en mélange de *rose* et *marron*, le **Crétacé Supérieur** en un mélange de *bleu-cyan* et *rose*, et on aperçoit enfin en couleur *rose* la concentration ferrifère qui se localise dans l'**Aptien**.

En comparant le résultat obtenu par cette méthode et la carte géologique de référence de la région, on constate que la distinction entre les formations géologiques n'est pas conforme en raison de la non superposition des limites entre les couleurs n'est pas très évidente, ce qui empêche d'aller dans le grand détail dans l'enrichissement de l'interprétation.

1.5. Méthode des Bandes Ratios ou combinaison de bandes

Les minéraux d'oxydes et d'hydroxydes de fer présents dans la région d'étude de l'Ouenza tels que l'hématite, la goethite et la jarosite (minéral d'altération) sont identifiés à partir de plusieurs combinaisons de bandes ratios appliquées à l'image, permettant ainsi de mettre en évidence cette minéralisation. Ces bandes ratios sont illustrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4.1 : Bandes Ratios (Elaborée par nous-mêmes)

MODE	COMBINAISON 1	COMBINAISON 2	COMBINAISON 3	COMBINAISON 4	COMBINAISON 5
R	NIR	6/5	(4+6)/5	(4+6)/5	5/7
V	(4+6)/5	(4+6)/6	SWIR 1	NIR	SWIR
B	4/3	NIR	Vert	6/5	Vert

a. Combinaison 4

Etant donné que les minéraux contenant le Fe_2O_3 et $FeO(OH)$, respectivement l'hématite et limonite comme la goethite, ont une capacité d'absorption élevée dans les bandes 4, 5 et 6, d'où l'utilisation du rapport de bandes (4+6)/5 est justifiée. Sachant que l'oxyde de fer provoque une réflectance supérieure dans la bande 3, donc l'utilisation de celle-ci en rapport avec la bande 4 permet de mettre en évidence l'oxyde de fer, d'où le choix de la combinaison 4.

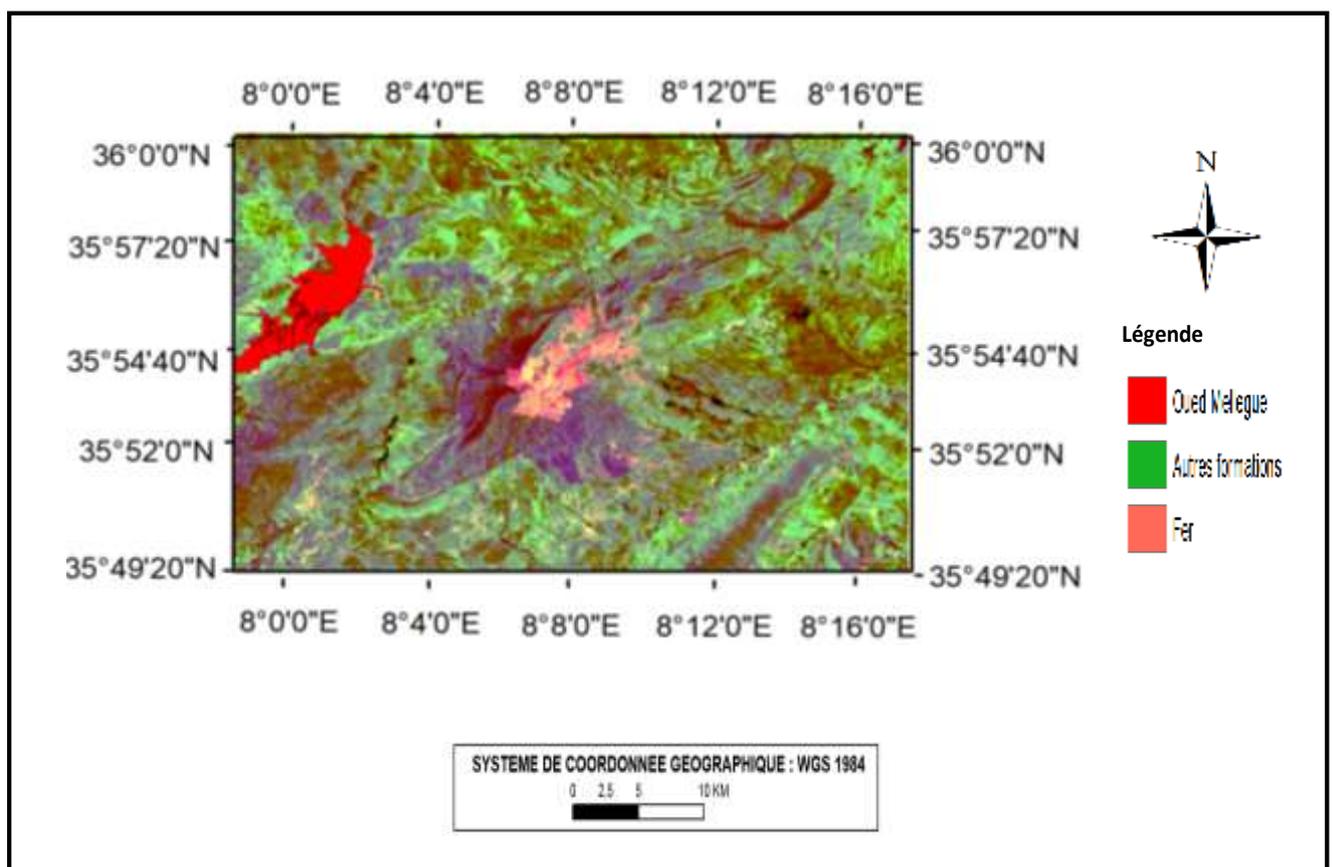


Figure 4.7 : Méthode des bandes ratios (Elaborée par nous-mêmes)

En s'appuyant sur cette combinaison, on retrouve plus clairement le contraste entre la zone de haute concentration en fer et le reste de la région du Djebel Ouenza (Fig. 4.7).

L'utilisation de ce traitement, montre la formation *aptienne* en vert-foncé qui contient un important potentiel en fer, développant ainsi une surface de forte oxydation, représentée par des surfaces continues en rose avec des taches disséminées dans les formations de *l'Albien* et le *Vraconien* en couleurs violet-vif et vert-vif où affleure une autre surface de concentration ferrifère et où domine le maximum des fronts de tailles d'exploitation du gisement.

Cette combinaison a permis de connaître, distinguer et discriminer le fort potentiel en concentration ferrifère se trouvant dans la région de Djebel Ouenza. Cependant la discrimination entre les différentes formations, n'est pas très visible car plusieurs formations sont confondues et non discernables en raison de leurs couleurs similaires qu'on aperçoit sur l'image en figure 4.7, c'est la raison pour laquelle on a procédé par un autre type de traitement qui est la fraction de bruit minimal (*Minimum Noise Fraction*).

1.6. Méthode Minimum Noise Fraction

La méthode MNF est utilisée pour intercepter et isoler le bruit du signal dans l'ensemble des données et réduire les exigences de calcul pour un meilleur rendement dans les traitements ultérieurs.

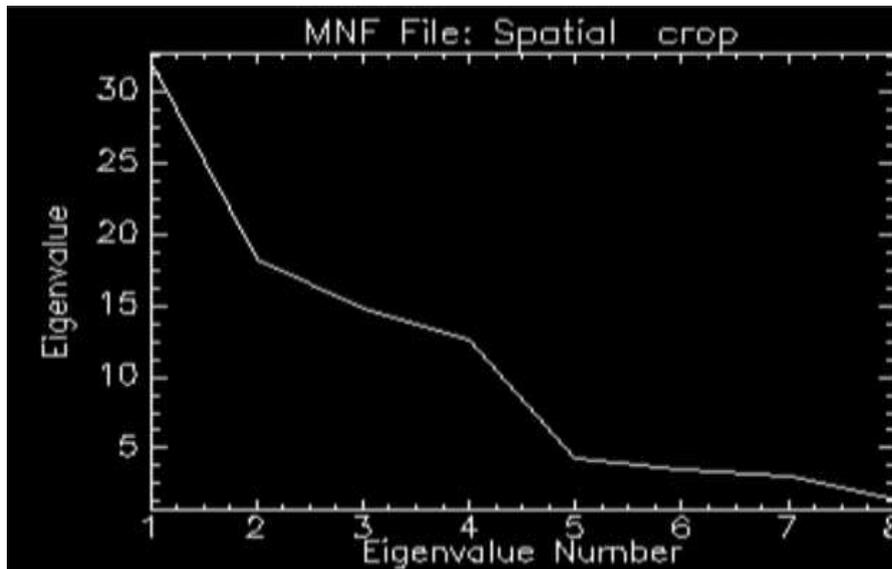


Figure 4.8a : Graphe Eigenvalue MNF (Elaborée par nous-mêmes)

La figure 4.8a illustre un graphique qui représente la variation des valeurs propres en fonctions des bandes spectrales, on remarque sur le graphe que la bande MNF1 implique les valeurs propres les plus élevées avec le bruit le plus faible, et que la dernière bande MNF8 implique les valeurs propres les plus faibles avec le bruit le plus élevé. En se basant sur ce graphe on effectuera des essais en combinant les bandes MNF ayant les valeurs propres les plus élevées.

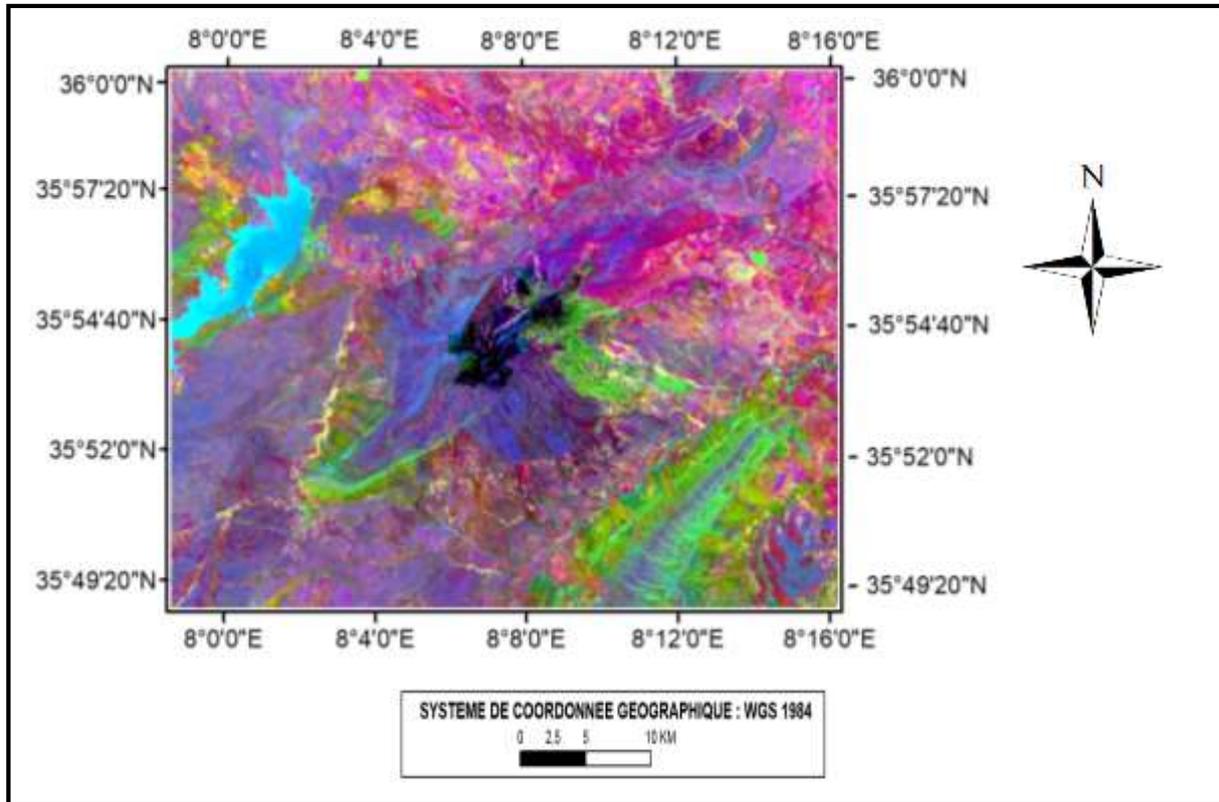


Figure 4.8b : Méthode MNF (Elaborée par nous-mêmes)

Suite aux applications de plusieurs combinaisons entre les bandes, le résultat obtenu est une combinaison des bandes MNF1, MNF3 et MNF2 en mode RVG respectivement, comme le montre la figure 4.8b ci-dessus qui, donne une bonne réflectance de la surface de la région où l'image reflète clairement les différentes formations géologiques existantes qui se superposent fidèlement avec la carte géologique utilisée comme référence sur la région de Djebel Ouenza.

L'interprétation de la figure 4.8, montre que l'*Aptien* calcaire est visible en couleur sombre, montrant une surface fortement oxydée où est encaissé le maximum de concentration de la minéralisation ferrifère, juxtaposant à l'*Aptien* marneux en bleu-violacé, encaissant aussi de moindres concentrations ferrifères, le *Trias* quant à lui apparait en rose. On aperçoit aussi la retenue collinaire de l'Oued Mellègue en bleu-cyan, localisée à l'Ouest de la région, toutefois, les limites des autres formations sont faiblement perceptibles en raison de la confusion des couleurs.

Discussion des résultats sur le gisement d'Ouenza

L'objectif principal visant à la détermination des zones pouvant contenir des concentrations en fer a été atteint en utilisant un processus de traitement appliqué sur une image multispectrale *Landsat-8-OLI* de la région de *Djebel-Ouenza*.

Toutes les méthodes appliquées ont donné de meilleurs/bons résultats, cependant l'unique méthode ayant repéré les limites de la zone contenant des concentrations ferrifères exploitables est celle des *bandes-ratios* où la *combinaison-3* a clairement localisé les surfaces d'oxydation du minerai de fer dans les zones déjà exploitée, avec toutefois un fort potentiel de fer au sommet de *Djebel-Ouenza*.

La méthode de *démixage* a fourni une panoplie d'informations montrant la localisation des limites de la zone du minerai de différentes concentrations ferrifères, et décrivant aussi les limites lithologiques voisines.

La discrimination entre les limites lithologiques a été établie par certaines méthodes en l'occurrence celles de la méthode *Minimum Noise Fraction* MNF et de la méthode de classification-non supervisée par *Maximum Likelihood*.

Le choix de la méthode de traitement ayant donné le meilleur produit est celui de la méthode de *démixage-spectrale* du fait que celle-ci a produit un résultat meilleur et plus efficace comparé à l'ensemble des autres techniques qui n'ont pas été prises en considération même si elles sont complémentaires.

2. Résultats du traitement d'image de Gara Djebilet

2.1. Amélioration des images multi-spectrales en couleurs composites

2.1.1. Couleurs naturelles

L'amélioration spectrale de l'image composite en couleur naturelle (OLI 4 : 3 : 2 ; Fig. 4.9a) donne une image d'une assez bonne qualité, où l'ensemble de la série des Garas (Est, Centre et West) est en couleurs sombres, ce qui permet une meilleure distinction des limites du périmètre de la minéralisation ferrifère par rapport aux autres formations géologiques (étages géologiques en relation avec leurs lithologies) voisines qui sont visibles en couleurs claires, dont le *post-paléozoïque*, le *Frasnien* et le *Praguien*. Cependant, les limites entre le reste des formations géologiques voisines sont relativement perceptibles sur l'image.

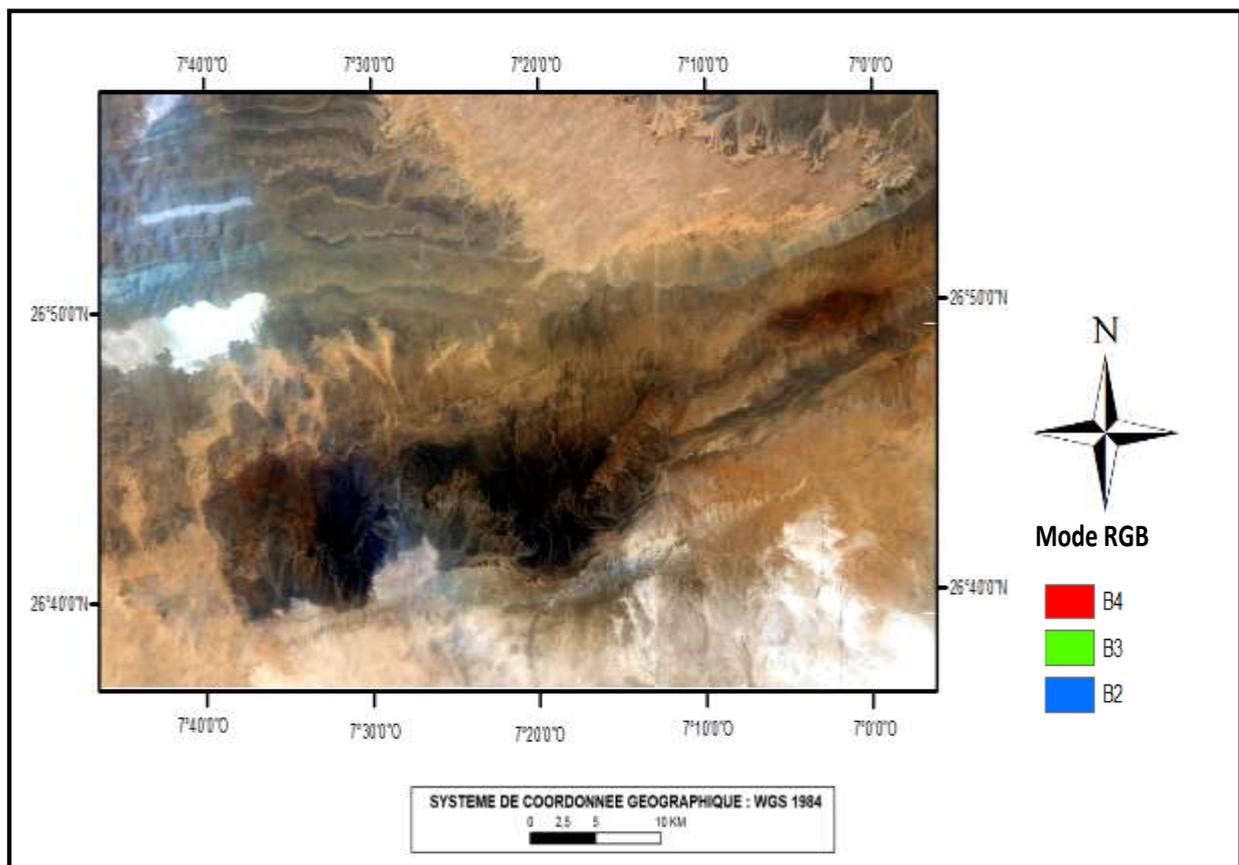


Figure 4.9a : amélioration en couleurs naturelles réelles (Elaborée par nous-mêmes)

On constate un bon contraste de couleur entre la zone la plus sombre (la série des trois Garas) et la moins sombre de l'étage géologique du *Praguien* (dévonien Inférieur) localisé aux alentours pour représenter la variation graduelle de concentration en fer allant de la plus haute concentration jusqu'à la plus faible.

2.1.2. Fausses couleurs composites

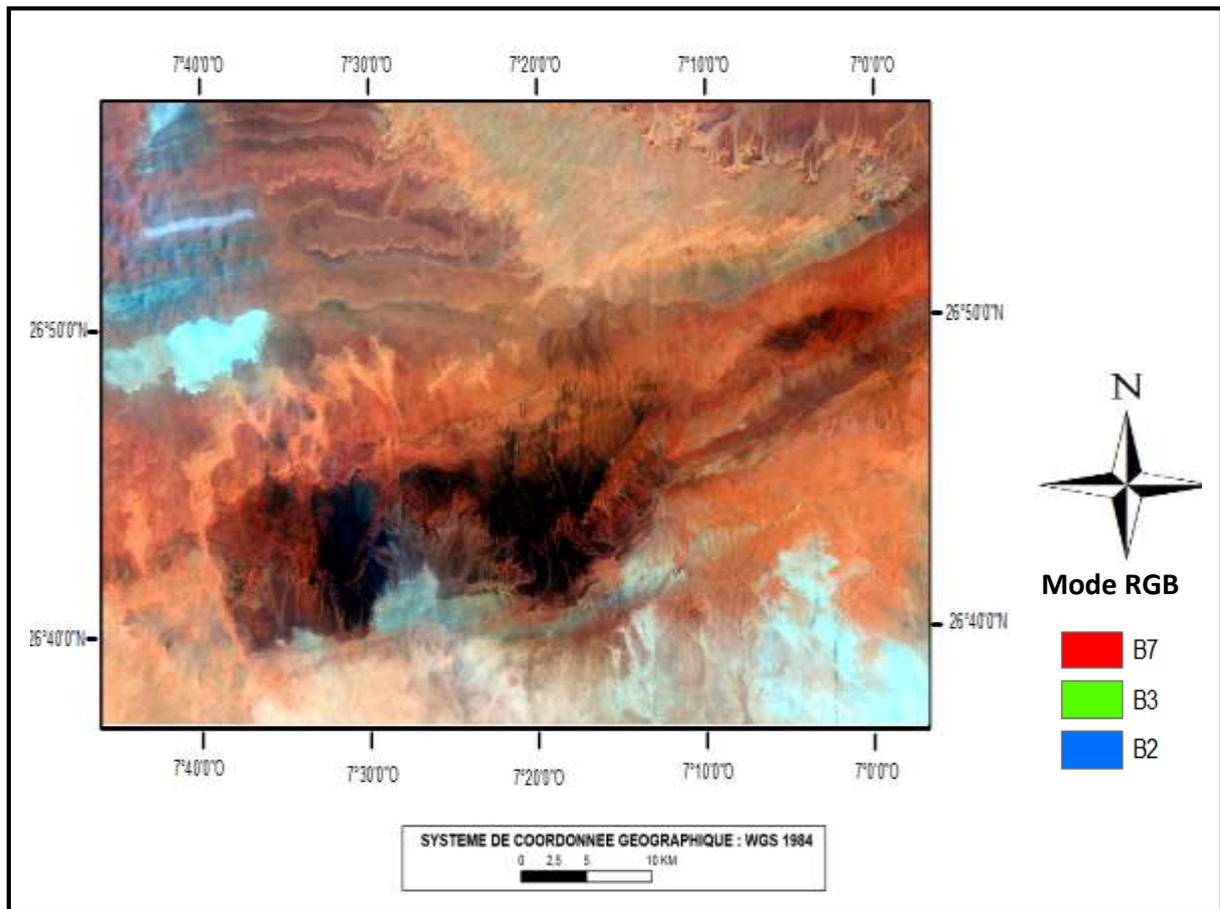


Figure 4.9b : Amélioration en fausses couleurs composite FCC (Elaborée par nous-mêmes)

Il est généralement conseillé d'utiliser la combinaison des bandes 7, 3 et 2 représentées respectivement par le SWIR2, le vert et le bleu en RVB. Cette combinaison a permis d'obtenir de bons résultats dans le cas défini par la zone d'étude de Gara-Djebilet, et par conséquent distinguer clairement les limites de certaines formations lithologiques. Les concentrations de minéralisation ferrifère sont facilement repérées car elles sont visibles en couleur sombre de gamme brunâtre (Fig. 4.9b).

2.2. Classification non supervisée

2.2.1. ISODATA

La classification non supervisée IsoData a été appliquée sur une image rognée à partir d'une scène brute contenant toutes les bandes spectrales de Landsat-8-OLI, permettant ainsi l'obtention d'un produit de résolution illustré par la figure 4.10a suivante.

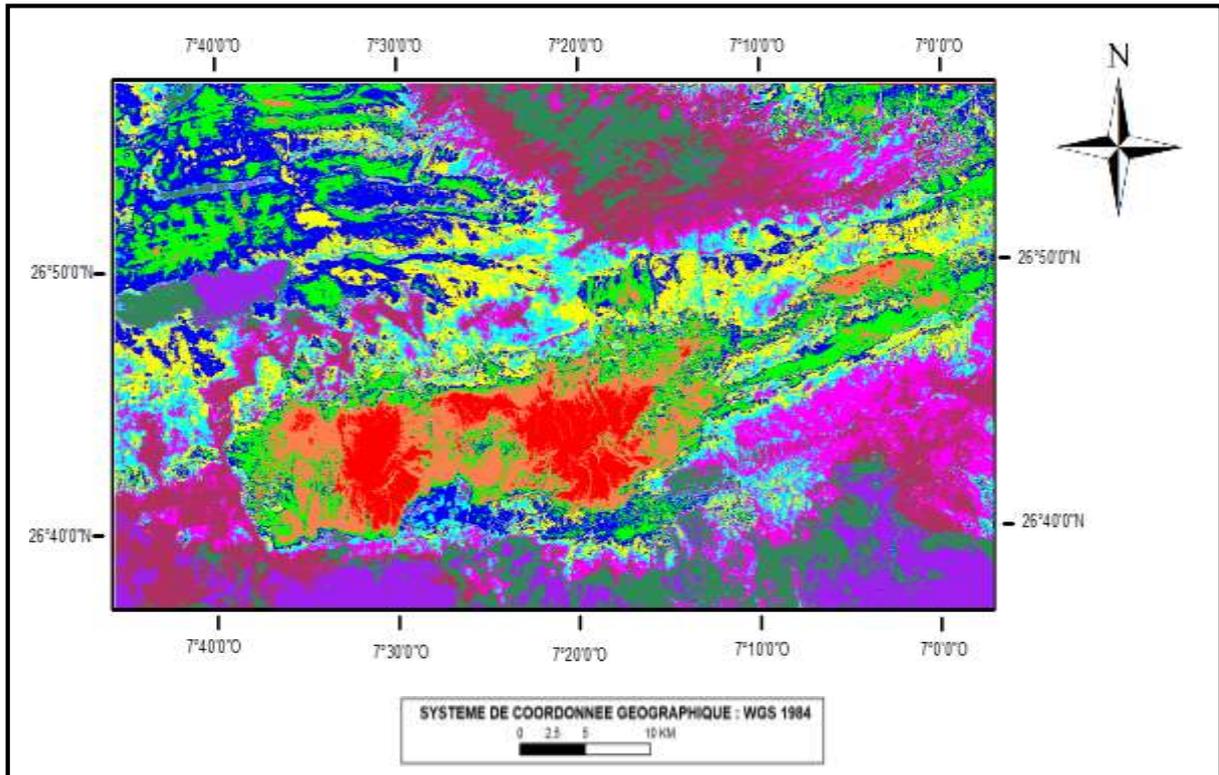


Figure 4.10a: Classification non-supervisée IsoData (Elaborée par nous-mêmes)

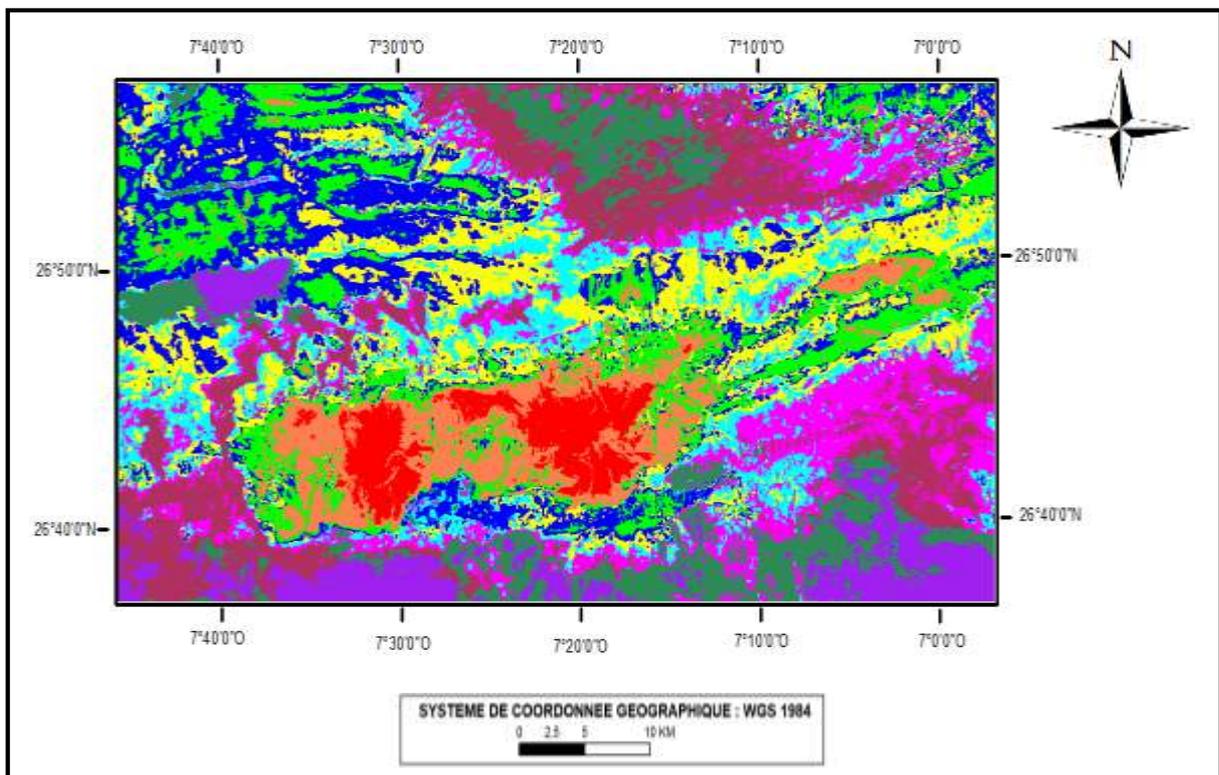


Figure 4.10b : Post-Classification non-supervisée ISODATA (Elaborée par nous-mêmes)

Les résultats de la classification et Post-classification ISODATA ont permis de discriminer les hautes concentrations de dépôts de fer visibles en couleur rouge (Figures 4.10a et 4.10b) et représentées par la série des Garas Centre et West. Les zones de couleur orange-clair entourant les zones ferrifères de hautes concentrations sont constituées de grès minéralisés par de faibles concentrations en fer comparées à la série des trois Garas richement concentrée en minerai de fer. Cette méthode n'a pas donné lieu à de bons résultats pour ce qui est de la détermination et la délimitation des diverses formations géologiques contenant les différentes lithologies se trouvant dans la zone d'étude de Gara-Djebilet, ce qui nous amène à souligner que cette méthode n'est donc pas appropriée pour la cartographie géologique dans la région de Gara Djebilet. Néanmoins, la série des trois Garas est amplement mise en évidence avec des contours nettement délimités.

2.2.2. K-means

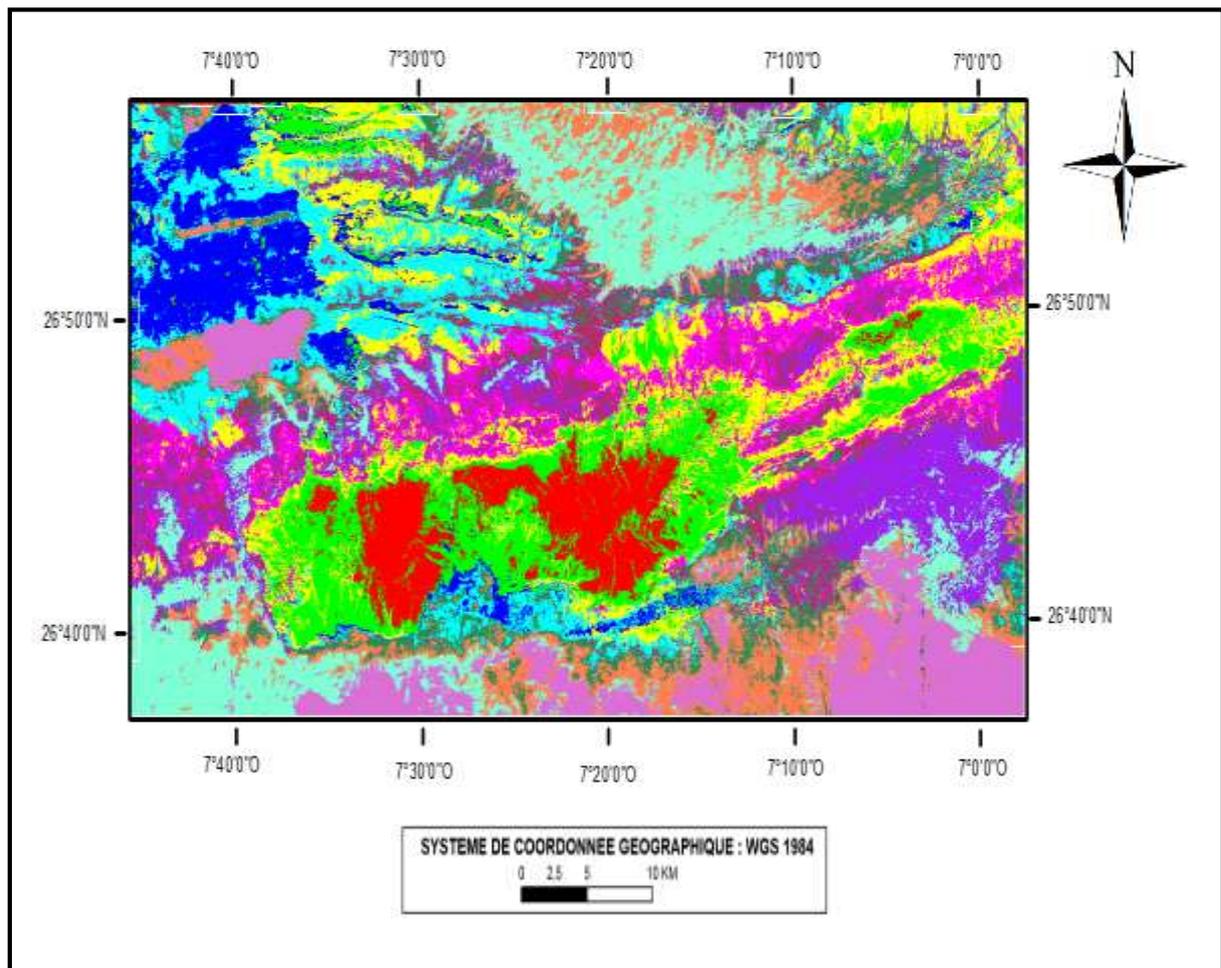


Figure 4.11a : Classification non-supervisée K-means (Elaborée par nous-mêmes)

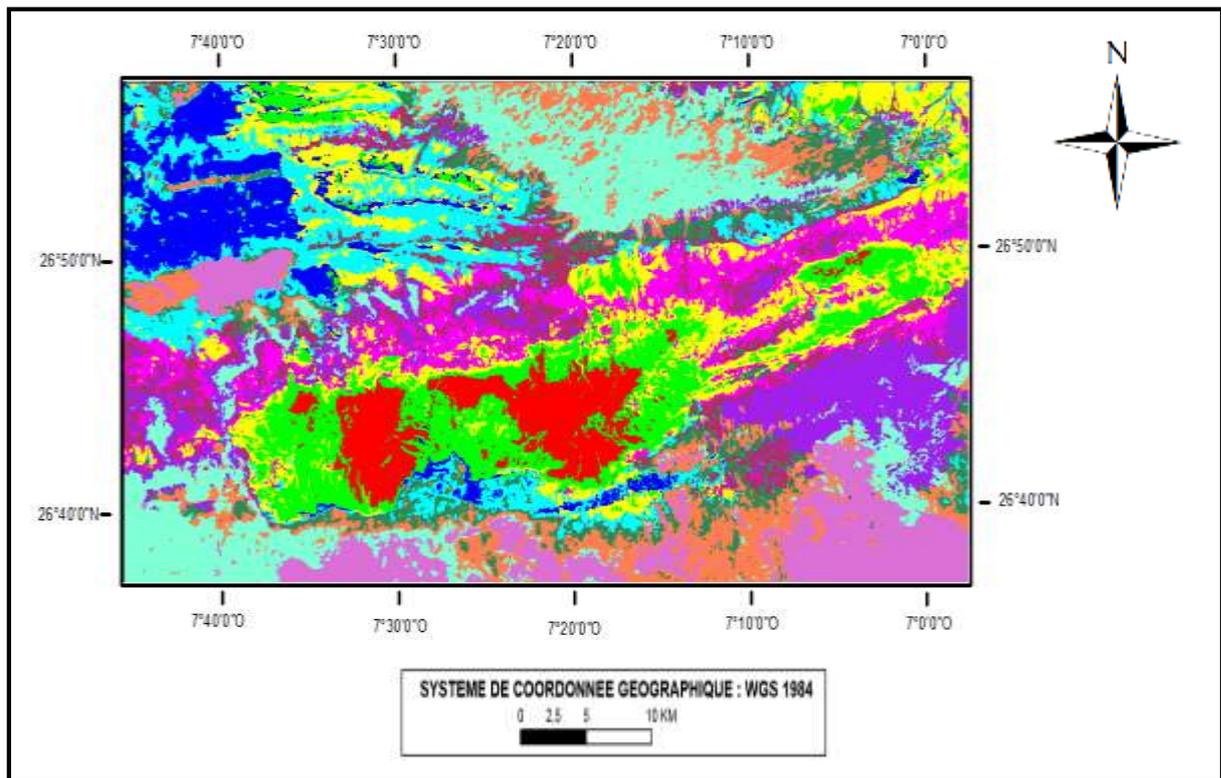


Figure 4.11b : Post-Classification non-supervisée K-means (Elaborée par nous-mêmes)

La méthode de classification et post-classification non supervisées K-means dont le principe repose sur la mise en *clusters* « grappes » des classes a permis de mettre en évidence les limites des zones riches en concentration ferrifère développant de larges surfaces continues en couleur rouge, soit Gara Centre et Gara Ouest comme le montre les figures 4.11 a et 4.11b.

Cependant, Gara-Est se caractérise par de petites surfaces rouges accusant de faibles concentrations ferrifères, disséminées le long d'une zone allongée W-E en couleur verte. Les autres lithologies ne sont pas perceptibles, ni clairement localisées avec cette méthode, mais d'ores et déjà, on peut constater avec une grande évidence l'étendue de l'affleurement du Précambrien en surface rose.

L'utilisation d'une méthode autre que la classification non-supervisée est plus que nécessaire pour obtenir un meilleur résultat concernant la discrimination des lithologies affleurant dans la région de Gara Djebilet. En raison de l'existence de plusieurs classes « formations géologiques ou étages géologiques contenant des affinités lithologiques», on a jugé utile de procéder par l'application de la classification supervisée permettant de mieux gérer le choix de l'emplacement des classes conformément à la carte géologique de référence de la région de Gara-Djebilet.

2.3. Classification supervisée

2.3.1. Maximum-Likelihood

La classification supervisée a été réalisée en définissant 11 classes nommées ROI présentes dans la zone d'étude et en attribuant une couleur appropriée pour chaque région d'intérêt.

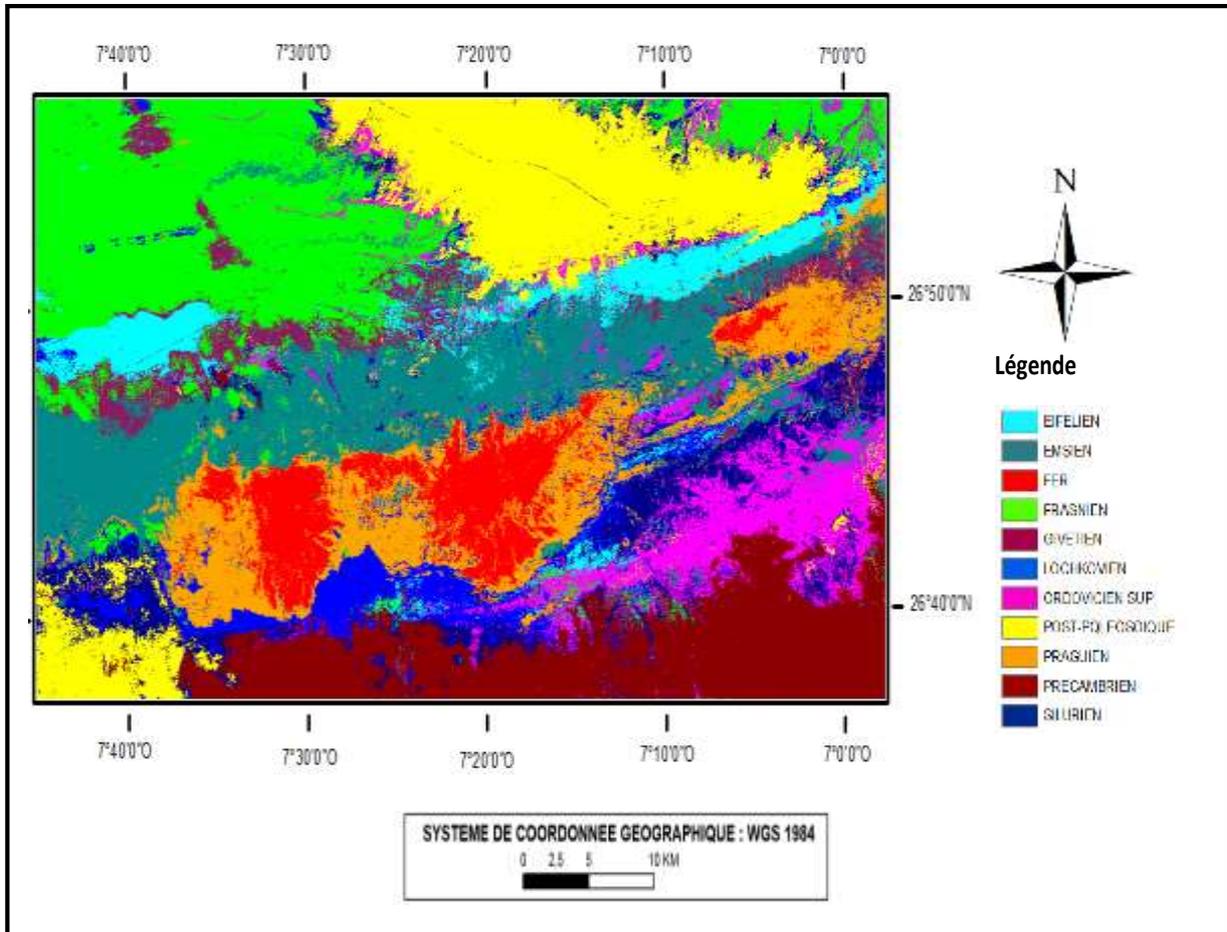


Figure 4.12a : Classification Maximum Likelihood (Elaborée par nous-mêmes)

Le résultat ainsi obtenu de la figure 4.12a, permet de vérifier et définir les hautes concentrations ferrifères indiquées par les surfaces rouges, ainsi que d'autres formations lithologiques dominantes formant les différentes classes. Cependant, l'image est saturée par un grand nombre élevé de pixels, et c'est la raison pour laquelle, le produit de la classification par Maximum Likelihood a été soumis par la suite à une post-classification permettant ainsi d'améliorer l'image de la classification.

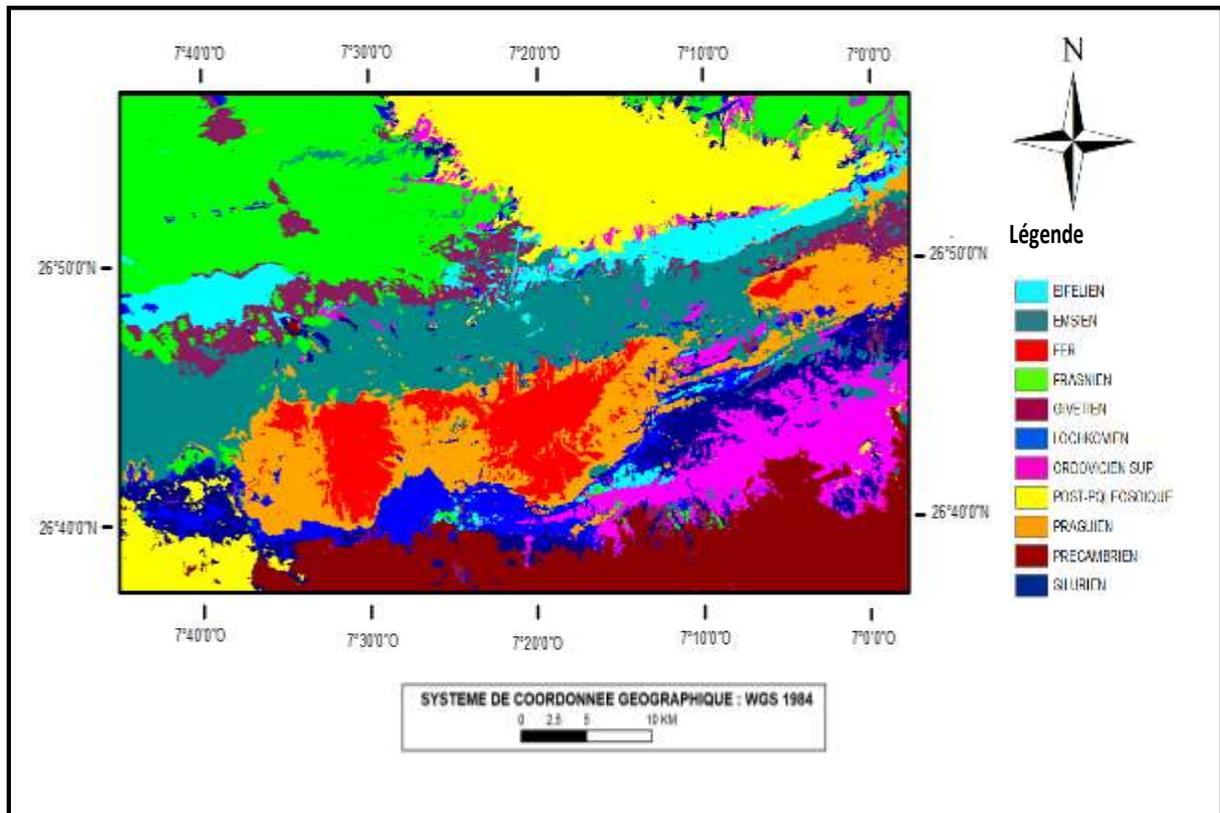


Figure 4.12b : Post-classification supervisée (Maximum Likelihood) (Elaborée par nous-mêmes)

Une fois la post-classification établie, l'identification et l'extraction des informations géologiques à partir de l'image (Figure 4.12b) sont plus faciles à réaliser, telles que les zones à l'intérieur du site d'essai, caractérisées par la présence de concentration de fer, correspondent aux zones rouges de l'image accusant une forte minéralisation ferrifère et les zones oranges périphériques représentées par le *Praguien* (Dévonien inférieur) accusant une faible minéralisation ferrifère. Concernant les autres lithologies existantes dans la région de Gara Djebilet, on distingue le *post-Paléozoïque* en jaune, le *Frasnien* (Dévonien supérieur) en vert, le *Précambrien* qui est visible en rouge bordeaux est surmonté par l'*Ordovicien* supérieur en magenta, le *Silurien* en bleu et l'*Emsien* (Dévonien inférieur) en gris. Par contre, le reste des formations lithologiques visibles sur la carte géologique de référence sont plus difficiles à distinguer ; malgré leur présence indiquée par les couleurs attribuées au préalable, celles-ci sont confondues avec les formations dominantes en raison de la similitude des ROI attribuées lors de l'exécution de la méthode.

L'utilisation d'une autre méthode plus adéquate permettant d'améliorer les résultats obtenus jusqu'à présent est nécessaire dans le but de détecter le potentiel ferrifère et toutes les lithologies appartenant à d'autres classes y compris celles qui n'ont pas été détectées par les méthodes précédentes.

2.3.2. Spectral Angle Mapper

Etant donné que nous nous concentrons sur l'exploration minérale pour cartographier les minéralisations ferrifères, nous avons utilisé les spectres des minéraux déterminés à partir des formations géologiques de la région.

Cette classification a été réalisée sur une image *Landsat-8-OLI* avec une composante des bandes 4, 3 et 2 en RVB respectivement.

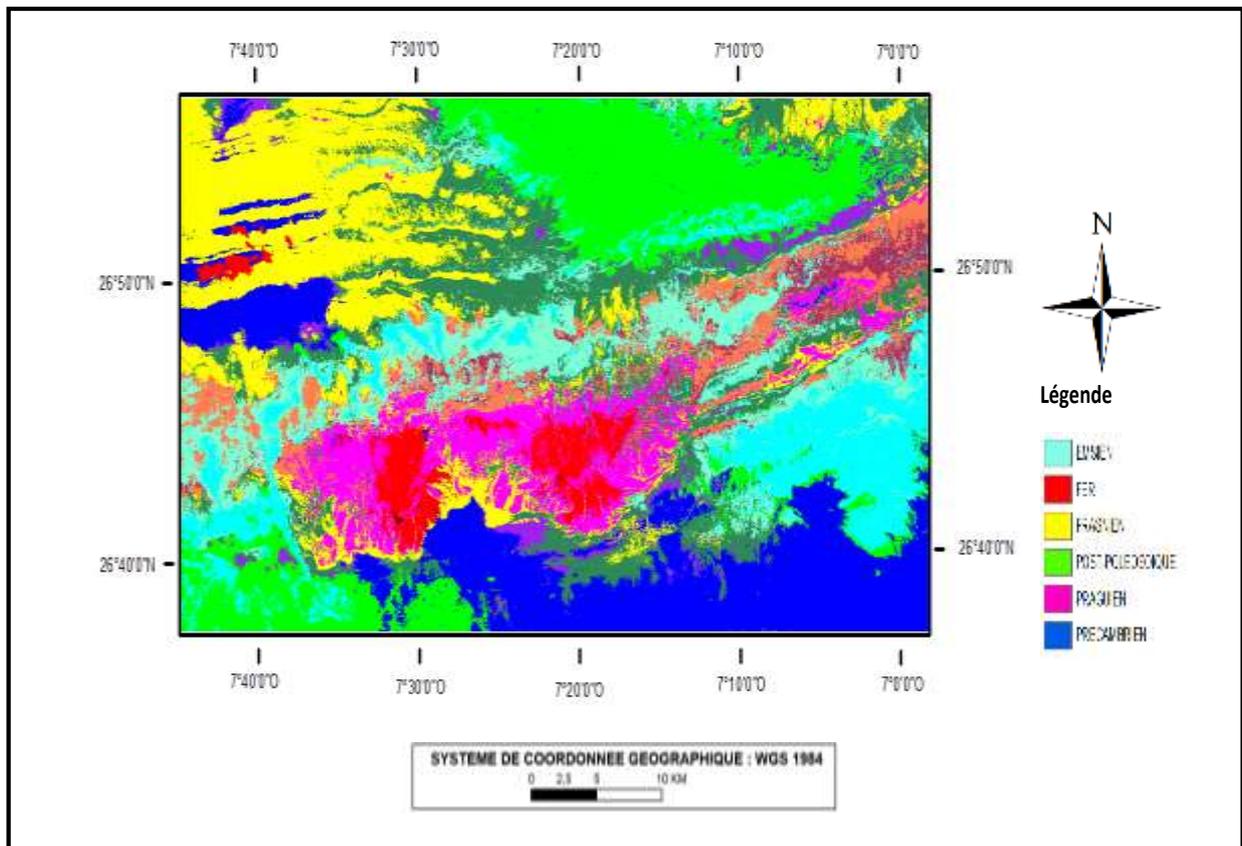


Figure 4.13a : Classification supervisée par Spectral Angle Mapper (Elaborée par nous-mêmes)

Dans le but d'obtenir une image beaucoup plus nette et plus représentative des limites géologiques, on exécute une post-classification illustrée par la figure suivante (Fig. 4.13b).

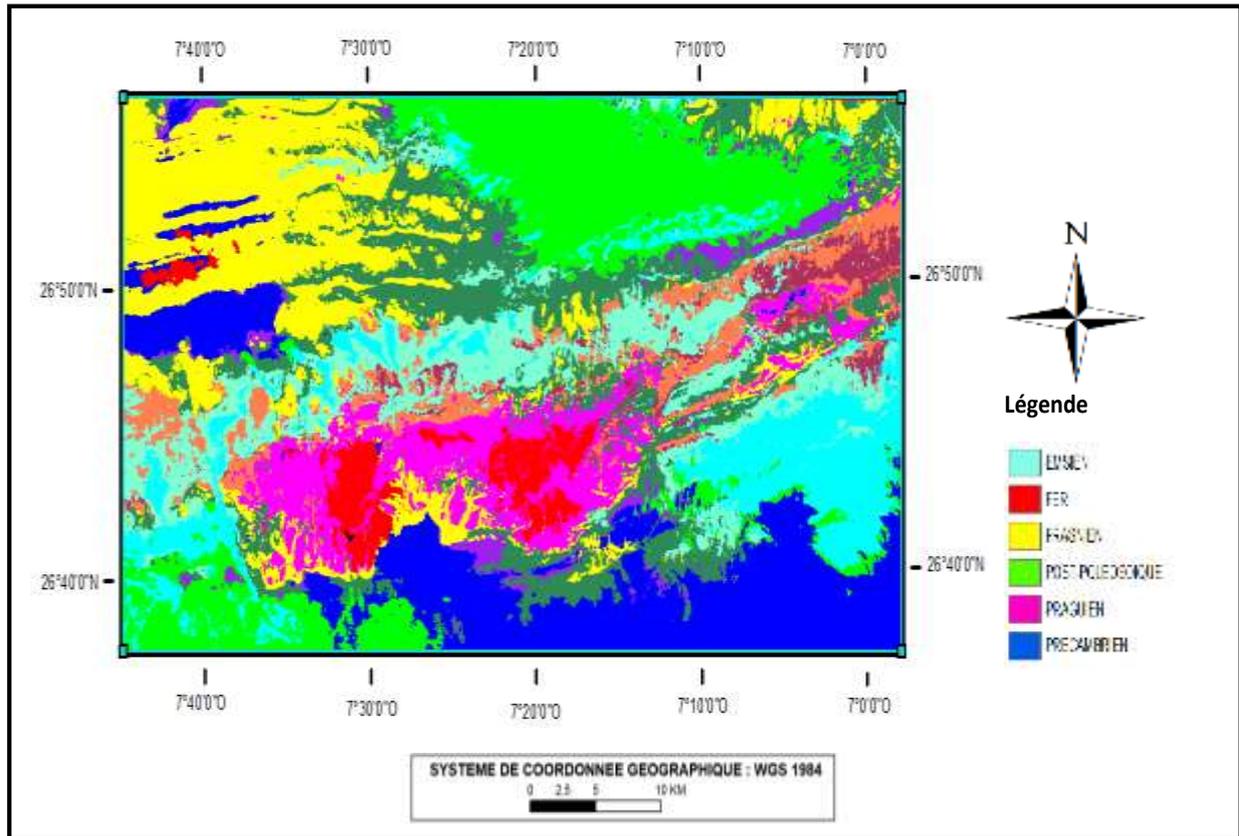


Figure 4.13b : Post-Classification supervisée par Spectral Angle Mapper (Elaborée par nous-mêmes)

En comparant les résultats obtenus à partir de la *carte géologique de référence*, on peut détecter et repérer les zones ferrifères d'une manière plus ou moins précise. La série des trois Garas sont visibles en couleur magenta représentant la formation *praguienne* (Dévonien inférieur) contenant des grès et siltites encaissant la minéralisation ferrifère, d'autant plus qu'on peut également remarquer la présence des zones de couleur rouge situées toujours au sein de la formation *praguienne* vérifiant les hautes concentrations en Fe.

Les affleurements des autres formations géologiques présentes dans la région sont plus évidents, on aperçoit ainsi le *Précambrien* en couleur bleu et le *post-Paléozoïque* en vert. La zone où la couleur jaune est plus étendue représente la formation *Frasnienne* (Dévonien supérieur) confondue avec le *Givetien* (Dévonien moyen). Pour ce qui est du *Silurien*, *Emsien* (Dévonien inférieur), *Ordovicien* supérieur et *Lochkovien* (Dévonien inférieur), ceux-ci sont aussi confondus et apparaissent en couleur bleu-cyan. Par contre la formation *Eifélienne* (Dévonien moyen) n'est guère discernable sur l'image.

Les deux méthodes de classification supervisée, nous ont donné la possibilité d'extraire des renseignements beaucoup plus précis comparés aux méthodes précédentes de la classification non-supervisée. Même si les résultats obtenus sont jugés satisfaisants, nous avons tout de même opté pour l'utilisation d'autres méthodes pouvant apporter des informations supplémentaires afin d'aboutir à de meilleur résultat.

2.4. Spectral Unmixing

Cette technique est utilisée pour déterminer l'étendue de l'abondance relative des minerais représentés dans l'imagerie multispectrale en fonction des caractéristiques spectrales des minéraux.

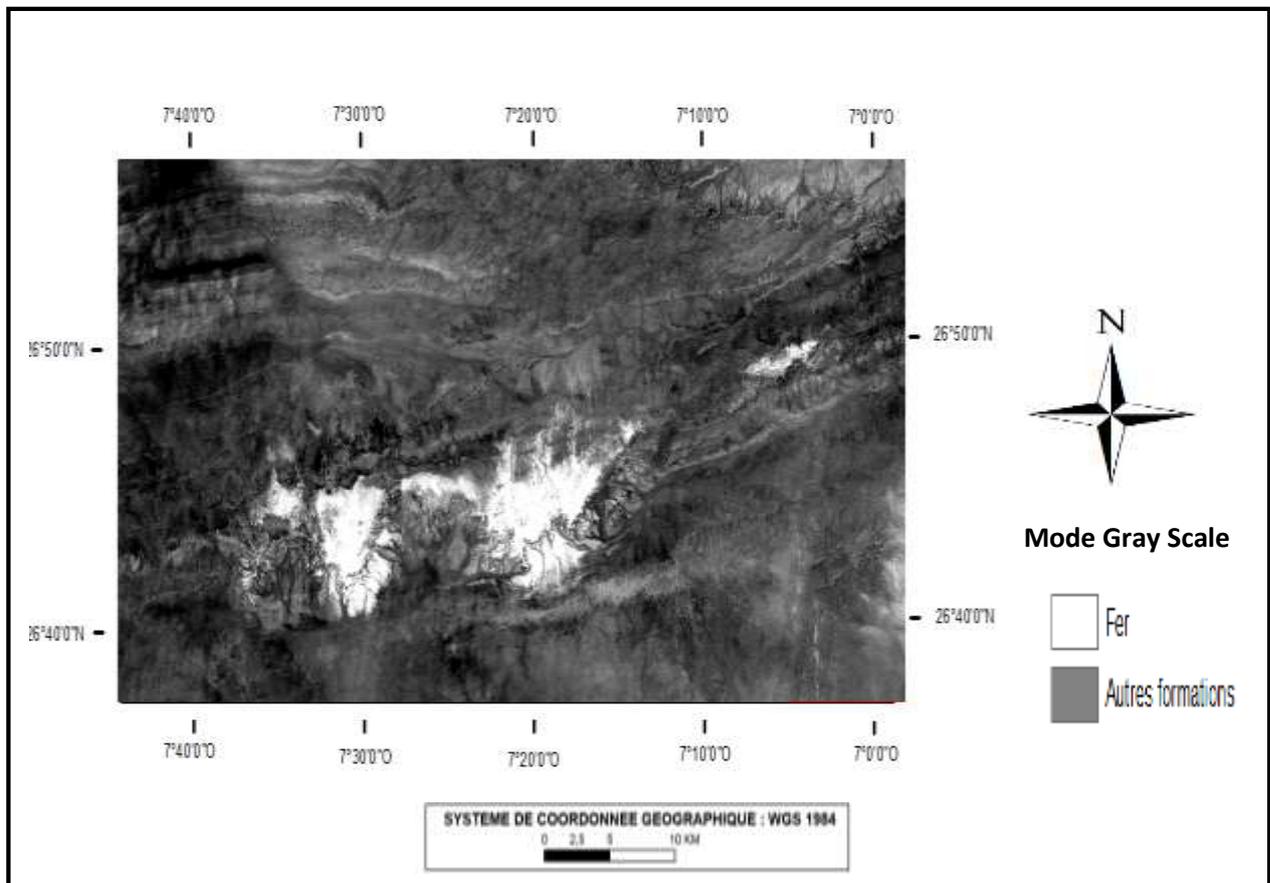


Figure 4.14 : Méthode de démixage par *Linear Spectral Unmixing* affiché en niveaux du gris de la bande 1 (Elaborée par nous-mêmes)

Le résultat de la méthode de démixage a donné une meilleure discrimination du minerai de fer affiché sur un fond nuancé en gris, représenté précédemment par la figure 4.14.

Les minéralisations ferrifères caractérisant la série des trois Garas sont représentés en blanc, tandis que les affleurements des autres formations lithologiques sont visibles en nuances de gris.

Cette méthode a fourni un meilleur résultat sur la mise en évidence de la présence du gisement métallique ferrifère avec des limites très perceptibles vis-à-vis des lithologies voisines, cependant, étant donné que les autres formations géologiques ne sont pas discernables entre elles, cette méthode de démixage ne sera pas considérée ou retenue comme étant exhaustive et informative sur le plan lithologique.

2.5. Bandes ratios ou combinaison de bandes

Plusieurs ratios de bandes ont été utilisés pour mettre en évidence la série des trois Garas dans la région contenant le minerai de fer, ces bandes ratios sont illustrées sur le tableau 4.2 suivant :

Tableau 4.2 : Les combinaisons de bandes utilisées pour la cartographie du gisement de fer
(Elaborée par nous-mêmes)

Mode	COMBINAISON	COMBINAISON 2	COMBINAISON 3	COMBINAISON 4	COMBINAISON 5	COMBINAISON 6
R	4/1	4/1	(4+6)/5	6/7	(4+6)/5	4/1
V	SWIR 1	(4+6)/5	SWIR 1	3/1	NIR	3/1
B	Vert	3/1	Vert	(4+6)/5	SWIR 1	6/7

Après les différents essais effectués, on opte pour deux combinaisons 3 et 6 en RVB.

Combinaison 6

Le choix de la combinaison 6, est lié au fait que le rapport 4/1 permet d'identifier le fer ferrique Fe^{3+} , le rapport 3/1 pour les oxydes de fer (Fe_xO_x) et le rapport 6/7 pour les minéraux argileux en raison de leur présence sur le site.

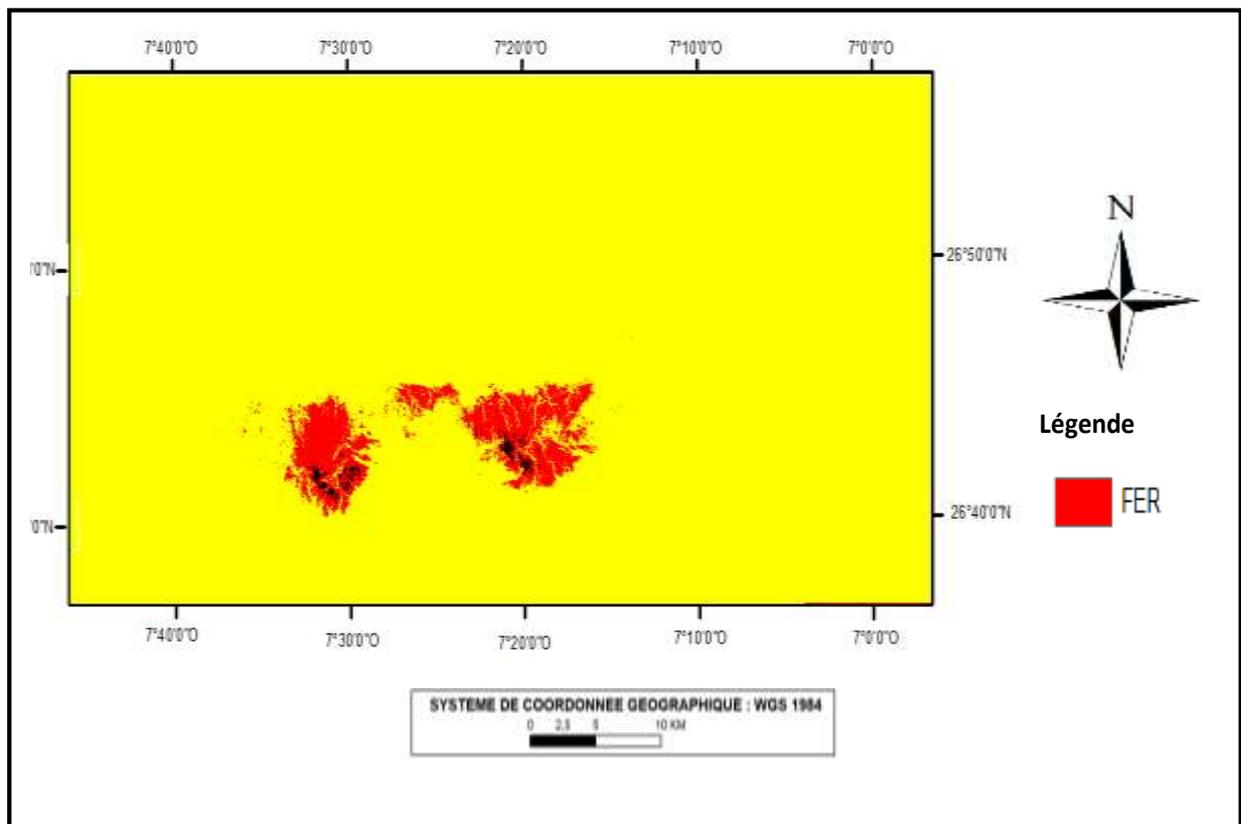


Figure 4.15a : Méthode des bandes ratios (combinaison 6) (Elaborée par nous-mêmes)

Comme la région de Gara Djebilet contient majoritairement des roches telles que les grès et les conglomérats ferrugineux renfermant les minéraux ($FeCO_3$, Fe_2O_3 et $FeO(OH)$) composés de Fe^{3+} , on obtient une bonne résolution délimitant exclusivement du fer qu'on peut observer très

clairement en rouge sur l'image étant donné que le rapport 4/1 a été attribué au canal rouge. Cependant, les deux rapports 3/1 et 6/7 attribués aux canaux vert et bleu respectivement n'ont pas permis la discrimination du fer.

Combinaison 3

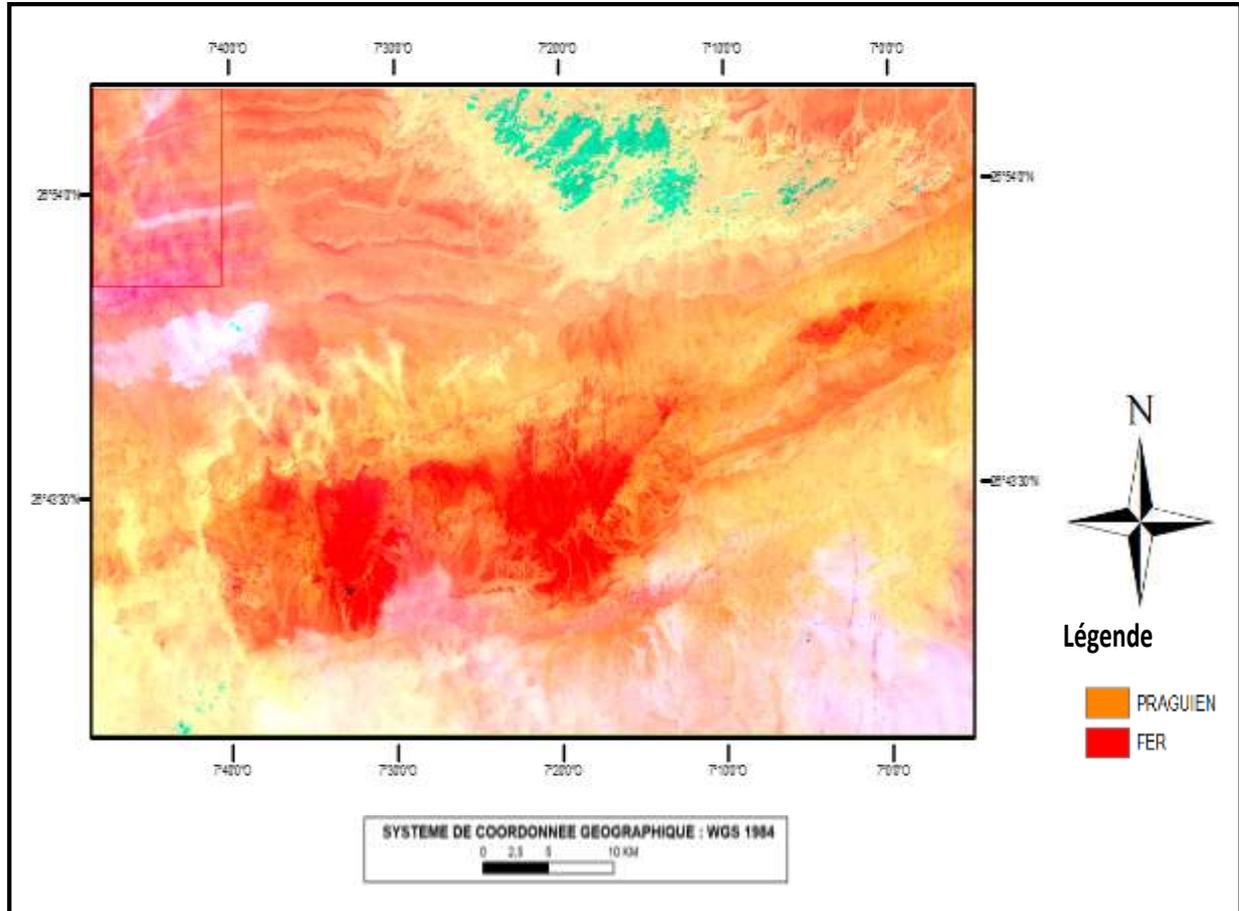


Figure 4.15b : Méthode des bandes ratios (combinaison 3) (Elaborée par nous-mêmes)

L'utilisation de cette combinaison a produit de meilleurs résultats en montrant plus de détails concernant la délimitation de l'étendu des fortes concentrations ferrifères dans les Garas Est, Centre et Ouest qu'on peut nettement voir en couleur rouge sur l'image (4.15b). On peut également discerner aisément en couleur orange les zones de moindre concentration en fer, situées à la périphérie des zones de hautes concentrations ferrifères en couleur rouge. Le *post-Paléozoïque* est visible en couleur clair tâchée en bleu-cyan.

Dans cette image en figure 4.15b, seules les minéralisations ferrifères sont différenciées et clairement délimitées par rapport aux autres lithologies voisines, contrairement aux autres formations qui restent confondues entre elles, et c'est la raison pour laquelle on a procédé par un autre traitement permettant d'identifier d'une manière beaucoup plus poussée à la fois les limites des autres lithologies et les gisements de fer de toute la série des Gara-Djebilet.

2.6. Transformation Minimum Noise Fraction

La transformation MNF a pour but d'éliminer le bruit et délimiter les unités lithologiques dans la zone d'étude. Elle permet aussi d'identifier les emplacements des anomalies spectrales. La méthode MNF a été appliquée aux huit bandes de l'image *Landsat-8-OLI*. Les résultats obtenus montrent que les dernières MNF soit MNF7 et MNF8 ne contiennent aucune information utile en raison de la grande quantité de bruit qu'elles interceptent, celles-ci ne sont donc pas prises en considération lors de l'interprétation.

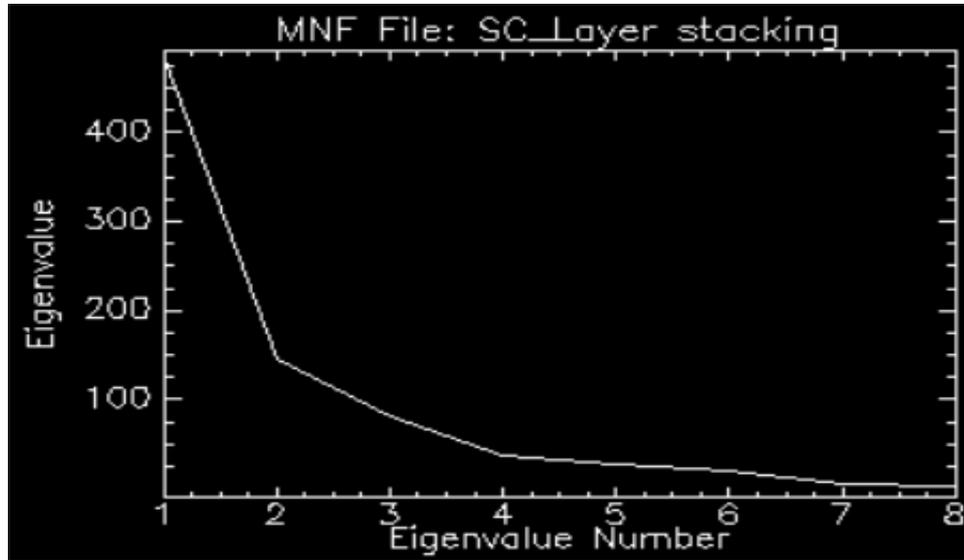


Figure 4.16a : Graphe des valeurs propres (Eigenvalue) de la méthode MNF (Elaborée par nous-mêmes)

Les résultats obtenus de cette transformation *MNF* montrent une relative diminution de la qualité d'image jusqu'à la dernière MNF pour les autres lithologies, néanmoins, la qualité d'image pour la série ferrifère des trois Garas est amplement exhaustive.

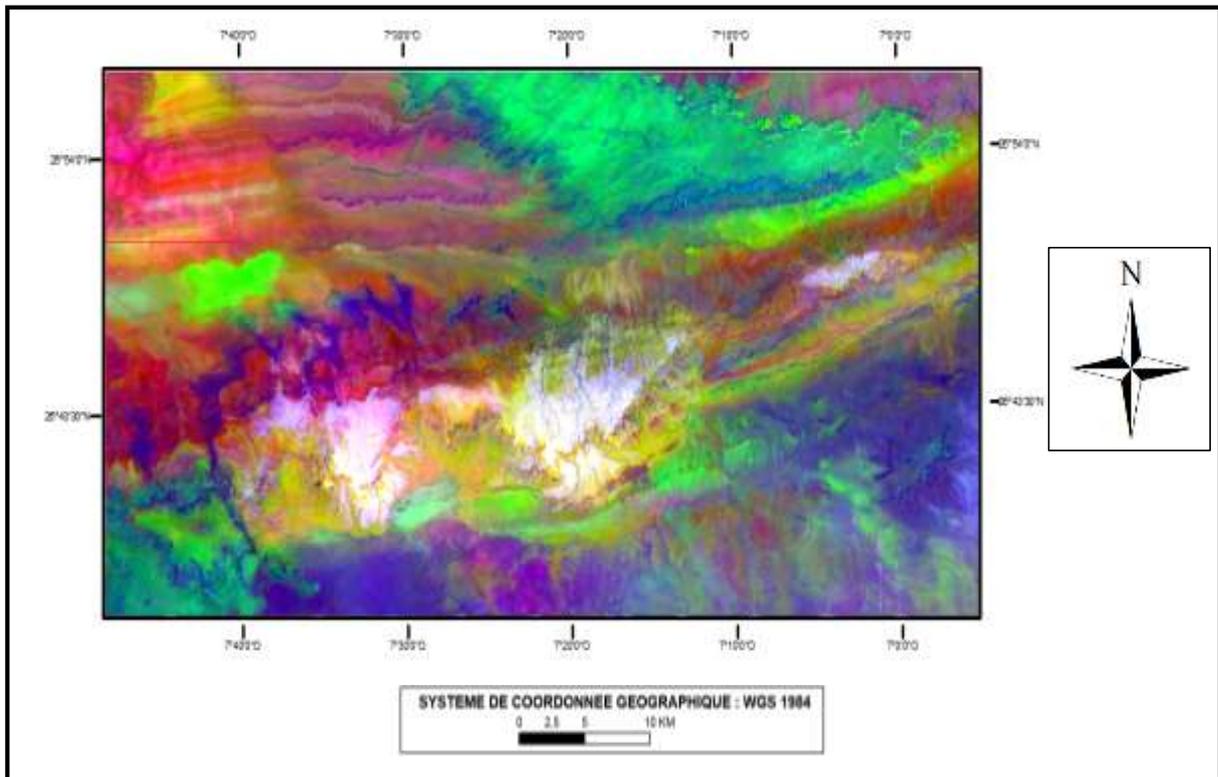


Figure 4.16b : Minimum Noise Fraction (Elaborée par nous-mêmes)

La figure 4.16b est le résultat de la combinaison des bandes MNF2, MNF3 et MNF4 en RVB respectivement.

La région d'étude de la série des gara-Djebilet, caractérisée par la minéralisation d'une forte concentration ferrifère, correspond aux zones blanches de l'image (Figure 4.16b). Le *post-Paléozoïque* est visible en vert-fluo, tandis que le *Précambrien* apparaît en bleu.

Discussions des résultats sur le gisement de Gara-Djebilet

L'ensemble des techniques de mise en valeur appliquées sur l'image multispectrale *Landsat-8- OLI* de la région de *Gara-Djebilet*, ont permis d'obtenir des résultats plus ou moins satisfaisants concernant la localisation et la détection des limites et étendue du gisement ferrifère de la série des trois Gara-Djebilet en relation avec les limites d'autres formations géologiques. Les résultats de chaque méthode diffèrent les uns des autres par l'information extraite sur la discrimination des diverses formations géologiques. Parmi ces méthodes, certaines ont donné de meilleurs produits pour souligner la présence et la distinction des limites des concentrations ferrifères juxtaposant d'autres lithologiques voisines.

Par exemple, la *méthode des bandes- ratios* où la combinaison-6 a montré uniquement les zones à haute concentration en fer, soit Gara-Centre et Gara-Ouest, ainsi que la *méthode de démixage spectral* qui a donné un résultat similaire ayant mis en évidence les trois Gara, Cependant, l'amélioration en *fausses couleurs composite* (FCC) ainsi que la *méthode de la classification supervisée* par *Maximum Likelihood* et la *méthode Minimum Noise Fraction (MNF)* ont permis de différencier entre toutes les lithologies existantes.

Toutefois, l'obtention d'un produit final contenant toutes les informations utiles sur la zone d'étude de *Gara-Djebilet*, nous a conduits à sélectionner et retenir la *classification supervisée* par *Maximum Likelihood* comme étant la méthode ayant donné des résultats forts convenables aussi bien pour la détection et la localisation géographique des limites des surfaces de concentrations ferrifères de la série des *Gara-Djebilet* que pour la distinction des autres limites lithostratigraphiques adjacentes et voisines.

Comparaison et conclusion

Grâce à la télédétection, deux cas d'étude, portant sur deux régions géologiques différentes sur plusieurs plans, ont été choisis pour évaluer l'efficacité des multiples techniques de traitement d'images pour cartographier les limites des gisements métalliques ferrifères et discriminer les différentes limites lithostratigraphiques adjacentes et voisines.

Le premier concerne le *Djebel-Ouenza* dans le Nord-Est algérien et le deuxième celui de *Gara-Djebilet* dans le Sud-Ouest algérien, caractérisés par la présence des formations géologiques de fortes concentrations en minerai de fer.

Une série de méthodes de traitement d'images a été appliquée sur les deux régions d'études renfermant les gisements de fer, dont celles de l'amélioration en couleurs-composites, la classification non-supervisée, la classification-supervisée, la méthode-MNF, la méthode des bandes-ratios et la méthode de démixage-spectrale.

Cependant, les différentes propriétés spécifiques de chaque région, du point de vue de conditions bioclimatiques inhérentes à la situation géographique, la région de *Djebel-Ouenza*, correspond à un espace naturel rural comportant des massifs forestiers et des points de sources d'eaux naturelles, est caractérisée par un climat mitigé entre sub-humide à semi-aride, quant à la région de *Gara-Djebilet*, elle correspond à un espace naturel désertique caractérisé par un climat aride. Ce qui revient à dire que la méthode utilisée et jugée adéquate pour chaque région d'étude est différente.

Les résultats obtenus et discutés auparavant dans notre travail de recherche, nous ont permis d'obtenir des données analytiques propres à chaque région, où l'on remarque au niveau de la région de l'Ouenza, l'existence d'une certaine dissemblance ou écart avec la carte géologique de référence, se traduisant par un relatif décalage entre les limites de la zone de concentration ferrifère qui se confondent avec celles des autres formations lithologiques voisines où, en raison des travaux antérieurs d'exploitations du minerai de fer assistés par les effets des altérations chimiques, d'innombrables masses rocheuses du minerai sont déployées et disséminées à travers toutes les surfaces des formations voisines, ce qui a provoqué un foisonnement et un mélange enregistrés à la surface lithologique de ces formations géologiques voisines, situées à la périphérie de la zone de concentration du minerai du fer.

Cependant, les résultats obtenus de la région de *Gara-Djebilet* ont montré une bonne corrélation avec la carte géologique de référence, exprimant une concordance et conservation aussi fidèle que possible des limites lithostratigraphiques de toutes les formations géologiques de la région qui sont restées à l'état naturel juvénile, en raison de l'absence des travaux d'exploitation du gisement.

Notons que l'intérêt de l'utilisation de la télédétection dans le domaine minier s'étend à plusieurs plans, en l'occurrence la prospection minière pour la détection et les limites de nouveaux gisements minéraux (ressources), et la configuration de leurs géométries au moyen d'une modélisation en 3D avant d'engager les travaux d'exploitation, ce qui est valable pour le cas du gisement ferrifère de la série des *Gara-Djebilet* dont les limites des formations

géologiques de toute la région sont très bien conservées en raison de la non-entame des travaux d'exploitation du gisement, et aussi de leur position géographique dominée par un climat à caractère sec et chaud à froid, d'où le déficit d'humidité de l'air et son effet sur l'absence d'altération chimique sur les roches de surfaces.

Cependant, en ce qui concerne le gisement ferrifère de l'Ouenza, dont les travaux d'exploitation sont en cours depuis plus de cinquante ans, l'apport de la télédétection se résume fondamentalement à superviser l'évolution des travaux d'exploitation et surtout orienter les travaux d'exploitation vers les zones de concentration à teneur de coupure exploitable. Contrairement à la région de Gara-Djebilet, les limites des formations géologiques de la région de l'Ouenza ne sont guère conservées en raison de l'altération chimique plus ou moins prononcée et générée par un climat à caractère humide qui, a été à l'origine de l'altération chimique affectant aussi bien le chevauchement des limites que les surfaces des formations géologiques voisines.

CONCLUSION GENERALE

L'apport de la télédétection dans la prospection minière est devenu incontestable et plus qu'impératif, pour ne pas dire exigeant dans certaines conditions de régions jugées inaccessibles. Les progrès techniques de la télédétection font que nous pouvons extraire davantage de détails sur les informations enregistrées sur les supports d'images-satellites.

Toutefois, l'avantage de ce travail de recherche, nous a offert une grande opportunité pour mettre à profit la réalisation d'une étude de prospection minière comparative tout en s'appuyant sur les différentes techniques de traitement d'images-satellites appliquées à deux différentes régions géologiques d'Algérie, *Djebel-Ouenza* au Nord-Est et *Gara-Djebilet* au Sud-Ouest.

La présente étude a mis l'accent sur l'efficacité et l'utilité des données *Landsat-8-OLI* pour la détection et la cartographie de la distribution spatiale des zones, appartenant à deux régions géologiques différentes, contenant des gisements de minerai de fer à concentration exploitable.

Diverses méthodes de traitements d'images relatives à la télédétection ont été utilisées dans notre étude, dont *l'amélioration multispectrale* des images, la *classification non-supervisée* et *supervisée*, la méthode de *démixage spectral*, la méthode des *bandes ratios* et la *MNF*.

Les résultats de ces différentes méthodes utilisées et appliquées à nos deux zones d'études offrent des perspectives intéressantes motivant la possibilité de détecter d'autres gisements ferrifères exploitables, et permettent aussi une cartographie rapide et peu coûteuse des caractéristiques géologiques des différentes surfaces terrestres.

L'approche de notre travail de recherche s'est attelée à trouver une méthode idoine adaptée pour l'extraction d'informations lithologiques, lorsqu'il s'agit de régions géologiques abritant des gisements déjà exploités et non-exploités, et comme nous l'avons déjà discuté dans le dernier chapitre, la méthode de *classification-supervisée* a été tout à fait satisfaisante pour le cas de *Gara-Djebilet*, cependant la méthode de *démixage spectral* a donné de meilleurs résultats pour le cas de *Djebel-Ouenza*. De ce fait, nous avons pu mettre en évidence les limites et l'étendue des zones de concentrations ferrifères par rapport à celles des formations géologiques voisines.

En effet, pour le cas du gisement ferrifère non-exploité de la série de *Gara-Djebilet*, la discrimination des limites lithostratigraphiques est clairement discernable, aussi bien entre les zones de concentrations ferrifères et les formations adjacentes que celle observée entre toutes les autres formations géologiques voisines de toute la région, alors que pour le cas du gisement ferrifère en cours d'exploitation de *Djebel-Ouenza*, seules les limites lithologiques de la zone de concentration ferrifère avec les autres formations voisines sont discernables, tandis que la discrimination des limites lithostratigraphiques entre les autres formations voisines sont très confuses pour des raisons qui ont été déjà élucidées.

La méthodologie adoptée dans notre projet de fin d'études peut être appliquée et généralisée, de manière profitable, à d'autres régions éloignées et parfois difficilement accessibles du territoire algérien, nécessitant des moyens financiers, humains et logistiques lourds et coûteux. D'autant plus que cette méthodologie pourrait fournir de grandes

perspectives sur la possibilité de détecter l'existence de nouveaux gisements métalliques ferrifères et non ferrifères à concentrations exploitables et de repérer fidèlement leurs localisations géographiques avec une très grande précision à partir d'une station de recherche sans pour autant engager de gros moyens d'investissements qui pourraient s'avérer inutiles dans le cas de certaines ressources à teneur non exploitable présentant de très minces résultats positifs. L'avantage de cette nouvelle méthodologie de recherche en prospection minière offerte par la télédétection garantit au domaine minier un développement durable et efficace permettant de rentabiliser le rapport coût-avantage en termes de gain de temps, financement et moyens logistiques de terrain dans des régions géologiques éloignées et inaccessibles.

Une autre approche de prospection minière peut être réalisée afin de compléter ou d'améliorer les résultats obtenus à partir des données multi-spectrales de *Landsat-8-OLI*, réside dans l'utilisation d'un autre type de capteur, à titre d'exemple l'outil **ASTER** qui est connu pour sa puissante performance dans la cartographie géologique.

De plus, on souligne pour notre travail de recherche, que la disponibilité des données de prospections géophysiques et les logs de forages en relation avec les coordonnées géographiques X, Y et Z sur les deux gisements, nous **auraient permis** non seulement la construction d'un modèle en 3D décrivant la configuration géométrique des deux régions d'études pour mettre en relief les zones de concentrations ferrifères, mais aussi l'estimation des réserves géologiques ferrifères de chaque gisement dans l'optique d'apporter plus d'informations utiles à la détermination du tonnage à extraire, conformément à la teneur de coupure déjà calculée, et aussi de la durée de vie du gisement. Mais à notre grande stupéfaction et déception, et en dépit de nombreuses tentatives de contact établies avec les différentes entreprises minières, publiques et privées, les sollicitant de nous fournir ces données de terrains, malheureusement, toutes nos demandes sont restées sans suite, avec parfois un refus validé par le fait que ces données constituent une propriété confidentielle propre à ces entreprises.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

1. **A. Bourezg**, “*Apport de la télédétection à l'étude de la fracturation. Exemple: la couverture sédimentaire des monts de Rhar-Rouban (Algérie nord occidental)*” 2012.
2. **A. Bouzenoune**, « *Minéralisations périadiapiriques de l'Aptien calcaire : les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie orientale)* ». Thèse Doctorat, d'Université. Paris IV. 1993, P 206.
3. **A. Ciampalini, F. Garfagnoli, B. Antonielli, S. Moretti, G. Righini**, “ *Remote sensing techniques using Landsat ETM+ applied to the detection of iron ore deposits in Western Africa* ” Arabian Journal of Geosciences. November 2013, Volume 6, pp 4529–4546.
4. **A. Ciampalini, F. Garfagnoli, C. Del Ventisette, S. Moretti**, “ *Potential Use of Remote Sensing Techniques for Exploration of Iron Deposits in Western Sahara and Southwest of Algeria* ”. Natural Resources Research September 2013, Volume 22, Issue 3, pp 179–190
5. **A. Othmanine**, « *Les minéralisations en fluorine, barytine, Pb, Zn et fer sidéritique autour du fossé de Tébessa-Morsott (Algérie). Relation entre paléogéographie aptienne, diapirisme, structure et métallogénie* ». Thèse de 3ème cycle, Univ, Pierre et Marie Curie, 1987, Paris VI Fr, 221p.
6. **A. P. Crosta, C. Sabine, and J. V. Taranik**, « *Hydrothermal Alteration Mapping at Bodie, California, using AVIRIS Hyperspectral Data* ». Remote Sensing of Environment, 1998, vol. 65, n° 3, p. 309-319.
7. **Abrams, M., Hook, S.J.**, (1995). « Simulated ASTER data for geologic studies ». IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens. 33 (3)
8. **B. Jahne**, « *Digital Image Processing* », New-York : SpringerVerlag, 1991, 383 p.
9. **BOUDALI Noureddinne**, : « *Classification Multi source des Données Optiques en Intégrant la Texture, Option : télédétection, Analyse et Traitement Informatique des Données Spatiales* ». Université des sciences de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2012.
10. **Boukhadra et Rouina**, “*Contexte géologique et Méthodes d'exploitation*”, Université Abderrahmane Mira-Bejaïa, faculté de technologie, 2015.
11. **C. Delacourt**, “*Télédétection et Rayonnement Electromagnétique*”. Cours en ligne, Université de Brest. 2004.
12. **C. Kergomard**, « *La télédétection aérospatiale : une introduction* ». Paris centrale-Belgique. Tervuren Africain géoscience” collection vol. 108, 2005). 572P.
13. **Carranza, E.J.M., and Hale, M.** (2002). « Mineral imaging with Landsat Thematic Mapper data for hydrothermal alteration mapping in heavily vegetated terrane ». Int. J. Remote Sens. 23, 4827–4852.
14. **Chain R., 2006** : « *Influence des travaux de forage et de tir sur la stabilité des talus et des gradins des mines à ciel ouvert (cas : mine de fer de l'Ouenza), option ; exploitation des mines*. Thèse doctorat d'état. Université Badji Mokhtar (Annaba). Algérie. 145g.
15. **Christophe Emmanuel**, “*Images hyper spectrales et critère*”, Colloque annuel des Doctorants EDIT 05, Page 132-136, Avril 2005.

16. **COIFFAIT, PH-E.** “Un bassin post-nappe dans son cadre structural: exemple du bassin de Constantine (Algérie nord-orientale). Thèse Sciences, Univ. Nancy, 1992, 87 Fig., p. 5-2.
17. **D. Darabid, M. K. Bouchekara,** “Extraction des différents indices de végétation à partir des images satellitaires”, 2014. d'Orsy-Université Paris sud XI”. 2005.
18. **Doris Duchain,** “Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution par l'intégration d'un SIG, de la télédétection et d'un modèle mathématique ”, 11 Novembre 1998.
19. **Drury, S.A.,** (1993). « *Image Interpretation in Geology* ». 2^e éd., Chapman & Hall, New York, xii + 283 p., 259 fig., 10 tabl
20. **DURAND DELGA, M.** (1955), « *Etude géologique de l'Ouest de la chaîne Numidique* ». Publ. Serv. Carte géol. Algérie. Bull. n°24. 533p, 143 fig., 16 pl., 10pl. ht
21. **E. A. Atillah, E. Z. Morjani, et M. Souhassou,** (n.d.), « *Utilisation de l'image Multispectrale pour l'exploration et la recherche des ressources minérales* » : Etat des connaissances et propositions d'un modèle de traitement ”, Aout 2018.
22. **E. Mansouri, F.Feizi,** “*Introducing the Iron Potential Zones Using Remote Sensing Studies in South of Qom Province, Iran*”, Open Journal of Geology, January 2013.
23. **E. Pirard,** « *Télédétection et Télégestion des Informations Géologiques : Applications à la Région du Sud-Lapaz (Bolivie)*”. Université de Liège Département Geoma-C (2003).
24. **Emmanuel Tonye,** “*Traitement des images de télédétection* ” 2000.
25. **F. Al-Nahmia , O. Saddiqia , A. Hilalia , H. Rhinanea , L. Baiddera , H. El arabia , K. Khanbarib** “*APPLICATION OF REMOTE SENSING IN GEOLOGICAL MAPPING, CASE STUDY AL MAGHRABAH AREA – HAJJAH REGION* ”. YEMEN Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume IV-4/W4, 2017.
26. **F. Chikhi Aouimeur,** « *Les Rudistes de l'Aptien supérieur de Dj Ouenza (NE Algérie). Paléontologie, contexte stratigraphique et paléogéographie* ». Thèse 3ème cycle, USTHB, Alger, 1980, p 114.
27. **F. Yang, B. Zhao, J. J. Wu, Y. Z. Liao and T. Zhang,** “*Remote-sensing ores prediction in and around the Linghou copper-polymetal deposit, Southeastern China* ”, IOP – Publishing, (2017).
28. **G. Dubourdieu et Durozoy,** « *Observation tectonique dans les environs de Tébessa et de l'Ouenza (Algérie)* », Bull. serv. Géol. France, 5ème série, 1,1950, XX,p, 257, 266. Géol. Algérie” ; 28 ,1958.
29. **G. DUBOURDIEU,** “ *Etude géologique de la région de l'Ouenza (confins algéro-tunisiens)* », Pub. Du Serv.de la carte Géol. De l'Algérie. (.S.), 1956, n°10. 659p.
30. **G. Dubourdieu,** « *Esquisse géologique du Djebel Mesloula (Algérie orientale)* ». Publ. Serv. Carte géol. Algérie, n.s, Bull., 1959, n°21, 162p.
31. **Green, S., J. Boissoles, and C. Boulet,** « *Accurate collision-induced line-coupling parameters for the fundamental band of CO in He* » : Close coupling and coupled states scattering calculations. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, **39**,33-42, 10.1016/0022-4073(88)90017-9. 1988.

32. **GUERRAK S.**, « *Etudes des minerais de fer oolithiques du Paléozoïque saharien* ». Thèse Doctorat d'état, Université de Rennes I : 422 p. (inédit). 1987
33. **Guerrak, S.**, « *The Palaeozoic Oolitic Ironstone Belt of North Africa : from the Zemmour to Libya* ». In : Salem, M. J., Busrewil, M. T., Ben Ashour, A. M. (Eds.), *The Geology of Libya*, VII. Elsevier London, 1991, pp. 2703 et 2722.
34. **GUIRAUD R.**, « *Evolution post-Triasique de l'avant-pays de la chaîne alpine en Algérie, d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines* ». Thèse Sciences, Nice, 1973, ronéot, p 270, fig.114, XII pl.h.t.
35. **H. H. Posey, J. A. Pendelton and D. Van Zyl**, (red.) Proceedings : Summitville Forum 95. Colorado Geological Survey Special Publication, Colorado, vol. 38, p. 56-73.
36. **HOLLARD H.**, « *Silurien-Dévonien-Carbonifère* ». Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, 1970, 229, pp. 161-168.
37. **I. Boukerch**, « *Intégration de l'imagerie satellitaires THR spatiale dans la filière cartographie- Elaboration et actualisation d'une carte numérique à grande échelle- Application à la confection d'une ortho image de la région d'Arzew* », Mémoire de Master en sciences et technologies de l'espace, Centre régional africain des sciences et technologie de l'espace, 2006.
38. **J. F. Mustardet Nirmal Keshava**, « *Spectral Unmixing* », Article in IEEE Signal Processing Magazine · February 2002.
39. **J. FABRE**, « *Géologie de Sahara occidental et central* », Musée royal de l'Afrique centrale Belgique. Géoscience, 2005, p. 1-572.
40. **J. FABRE**, « *Introduction à la géologie du Sahara algérien et des régions avoisines* ». Soc. Nat. Ed. SNED. Alger, 1976, 142 p., 163 fig., 4 tab. 4 pl.
41. **J. J. Fleury**, « *Stratigraphie du Crétacé et de l'Eocène (Aptien à Lutétien)* », de la feuille 1/50 000 Morsott, N° 178. Publ. Serv. Géol. Alg., Nlle Série, Bull. n°39, 1967, pp. 145-157.
42. **J. P. Perthuisot, O. Guelorget**, « *Morphologie, organisation hydrologique et sédimentologique des bassins paraliqes* ». 1992, Vie Milieu 42, 2, 93-109.
43. **J. R. Gozzard**, « *IMAGE PROCESSING OF ASTER MULTISPECTRAL DATA* », Department of Industry and Resources, 2006.
44. **K. Soudani**, « *Téledétection : Initiation à ENVI* ». Cours en ligne. Faculté des sciences
45. **K. Amri, G. Rabai, I. M. Benbakhti, M. N. Khennouche** « *Mapping geology in Djelfa District (Saharan Atlas, Algeria), using Landsat 7 ETM+ data: an alternative method to discern lithology and structural elements* », Arabian Journal of Geosciences, February 2017.
46. **Kamel Amrim, Yamina Mahdjoub, Lazhar Guergou**, « *Use of Landsat 7 ETM+ for lithological and structural mapping of Wadi Afara Heouine area (Tahifet–Central Hoggar, Algeria)* Arabian Journal of Geosciences ,November 2011, Volume 4, Issue 7–8, pp 1273–1287
47. **Kanlinowski, A., Oliver, S.**, (2004). « *ASTER mineral index processing. Remote Sensing* » Application Geoscience Australia. Australian Government Geoscience.
48. **Khoudair Chaabane et al**, Conférence : « *3^{ème} Colloque International sur la Géologie du Sahara, Thème-I Géologie Fondamentale, LE PASSAGE CENOMANIEN-TURONIEN DANS LE MASSIF D'EL OUENZA (NE ALGERIE) : BIO EVENEMENTS ET ISOTOPES STABLES* ». Université Kasdi Merbah Ouargla. 2015.

49. **Kowalski, W. M. et Hamimed, M.**, « *Diapirisme polyphasé ou glacier du sel albien, Dilemme du Matériel triasique des confins algéro-tunisiens* ». Bull. Serv. Géol. Algérie, 2000, vol 11, n°1, pp 29-60.
50. **Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J.W., Heiderbrecht, K.B., Shapiro, P.J. and Goetz, A.F.H.**, « *The spectral image processing system (SIPS) - interactive visualisation and analysis of imaging spectrometer data* ». Remote Sensing of Environment, 1993 vol. 44, n° 2-3, p. 145-163.
51. **L. A. I. N.Akono, N.T.nkam, & E.Tonye**, « *Nouvel algorithme d'évaluation de texture d'ordre n sur la classification de l'occupation des sols de la région volcanique du mont Cameroun*. Télédétection, 2005, 5(1). P227-244.
52. **L. Beguiet**, « *Etude Gîtologique et Géostatistique des Minéralisations Ar-Fe- Cu du Gisement de Douamis (Ouenza-Algérie)* ». Faculté des Sciences de la Terre Départements de Géologie 2007
53. **L. BEGUIRET**, « *Etude géologique et géostatistique des minéralisations A-Fe-Cu du gisement de Douamis (OUENZA- ALGERIE), 2007* », Option Prospection des Ressources minérales et énergétiques
54. **L. Bitam, R. Gourvenec, et M. Robardet** « *les formations paléozoïques anté-carbonifères du sous-bassin de Djebilet (flanc sud du Bassin de Tindouf, nord-ouest du Sahara Algérien)*. Mémoire du Service Géologique de l'Algérie, 8, 6 annexes 1996: 91-111.
55. **L. David**, « *Etude géologique des monts de la haute Medjerda* ». Thèse Sci. Paris. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, n.s, Bull, 1956, n°11, 189p.
56. **Laake, A.** (2011). « *Integration of satellite Imagery, Geology and geophysical Data*. In Earth and Environmental Sciences ». (INTECH Open Access Publisher), pp. 467–492.
57. **Laurent POLIDORI**, « *Introduction à la télédétection spatiale* », conservatoire national des arts et métiers. Ecole Supérieure Des Géomètres ET Topographes.
58. **LEMRAKET Abdelkrim, TAYEBI Abdallah**, « *Approche comparative de deux gisements de fer* », 2015.
59. **Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. and Chipman, J.W.** (2004). « *Remote Sensing and Image Interpretation* ». 5th Edition, John Wiley, New York.
60. **Lillesand et Kiefer, Lillesand, T.M. and Kiefer, R.W.**, « *Remote Sensing and Image Interpretation*. 3rd Edition, 1994, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, 750.
61. **M. Aoudjehane**, « *Structures et gîtologie des concentrations de Zn+Pb et Fe dans le Nord-Est algérien. Exemple des gîtes de l'Ouenza, Ouasta et Boujaber* ». Analyses et recommandations de recherches. Rapport de mission Nord-Est algérien, n°2, CRD/EREM, Boumerdes, Algérie, 1990, 54p.
62. **M. Aoudjehane, A. Bouzenoune, H. Rouvier et J. Thibiéroz**, « *Halocinèse et dispositifs d'extrusions du Trias dans l'Atlas saharien oriental (NE algérien)*. Gèol. Médit., Marseille, XIX, 1992, pp, 273-287.
63. **M. Bersi, H. Saibi, M C. Chabou**, « *Aerogravity and remote sensing observations of an iron deposits in Gara Djebilet* », southwestern Algeria, Journal of African Earth Sciences, 116 (2016) 134 et 150, 2016.

64. **M. C. CHABOU**, « *Etude pétrographique et géochimique du magmatisme mésozoïque de l'Ouest de la plate-forme saharienne* », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2001, 181 p.
65. **M. CHADI**, « *Cadre géologique et structural des séries crétacées néritiques du Constantinois (Est-Algérien)* ». Thèse Doct. 2004, 197P.
66. **Madre, M.**, « *Contribution à l'étude géologique et métallogénique du Djebel Ouenza (Est-Algérien)*. Thèse 3ème cycle, Paris, France, 1969, 98p.
67. *Mapping iron oxides with Landsat-8/OLI and EO-1/Hyperion imagery from the Serra Norte iron deposits in the Carajás, Mineral Province, Brazil* – Brazilian, Journal of Geology 46(3):331-349-September 2016.
68. **Masse P. et Thieuloy J. P.**, « *Précisions sur l'âge des calcaires et des formations associées de l'Aptien Sud-constantinois (Algérie). Conséquences paléogéographiques*. Bull. Soc. 1979, Géol. Fr., vol. 7, n°1, pp. 65-71.
69. **Masse, P. et Chikhi-Aouimeur, F.**, « *La plateforme carbonatée de l'Ouenza (Sud constantinois, Algérie). Organisation et dynamique durant l'Aptien supérieur* ». Géol. Méditer., Marseille, 1982, vol. IX, n°3, pp. 259-267.
70. **Mohamed Seddik Ben Yahia**, « *Origin of the Oued Amizour Zn-Deposit, NE Algeria* », University – Jijel, Université Badji Mokhtar Annaba, Université de Bordj Bou Arreridj, A Stable Isotope Study (S, O, C), 2017.
71. **N. Menchar**, « *Etude Comparative de Deux Gisements de Fer en Contextes Géologiques Distincts. Le Gisement de Sidi Marouf (Petite Kabylie, Jijel) et de Boukhadra (Monts du MELLEGUES, Tébessa) Algérie Nord Orientale* ». Université Mohamed Mentouri – Constantine, 2007
72. **N. S Taleb**, « *Contribution à l'étude d'impact de l'exploitation du gisement ferrifère de la mine de l'Ouenza sur l'environnement Option : Pollution des écosystèmes ; diagnostic et procédés de traitement* ». Mémoire magister. Université Badji Mokhtar, 2012, Annaba-Algérie.
73. **P. Gevin**, « *Etudes et reconnaissances géologiques sur l'axe cristallin Yetti-Eglab et ses bordures sédimentaires. Service de la Carte Géologique de l'Algérie* », 1960 328 p.
74. **P. GEVIN**, « *Etude et reconnaissance géologique sur l'axe cristallin Yetti-Eglab et ses bordure sédimentaire* » ; premier partie : Bordure sédimentaire. Publ. Servcart Geol. Algérie. Bull n°. 23, 328 p. 1960
75. **P. Gevin**, « *Notice explicative des cartes au 1/500.000 Eglab –Tindouf* » ; Serv. Carte
76. **P. m. Harris, and S. J. Ventura**, « *The Integration of Geographic Data with Remotely Sensed Imagery to Improve Classification in an Urban Area* ». Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1995, 61, 993-998.
77. **PERTHUISOT V. & ROUVIER. H.**, « *Les diapirs du Maghreb central et Oriental : des appareils variés, résultat d'une évolution structurale et pétrogénétique complexe* », Bull. Soc. Géol. Fr, 1992, Vol, 163, p 751-760.
78. **Perthuisot V.**, « *Dynamique et pétrogénèse des extrusions triasique en Tunisie septentrionale* », Travaux du laboratoire de géologie de l'ENS, Paris -1978, 12, 312p.

79. **Perthuisot V.**, « Les diapirs du Maghreb central et oriental : Des diapirs variés, résultats d'une évolution structurale et pétrogénétique complexe ». 1992 Bull. Soc. Géol., France, t. 163, n°6, pp. 751-760.
80. **PERTHUISOT V., ROUVIEHR, & SMATI, A.**, « *Style et importance des déformations anté-vraconiennes dans le Maghreb oriental : exemple du diapir du Djebel Slata* (Tunisie centrale). Bull. Soc. géol. France 1988 (8), IV/3,391-398.
81. **R. N. Clark, T. V. V. King, C. Ager and A. G. Swayze**, « *Initial vegetation species and senescence/stress mapping in the San Luis Valley, Colorado* », using imaging spectrometer data. 1995, P. 64-69, in
82. **Rajendran, C. P., Rajendran, K., Earnest, A., Anu, R., Machado, T. and Freymueller, F.**, (2007) . « The style of crustal deformation and seismic history associated with the 2004 Indian Ocean earthquake ». A perspective from the Andaman-Nicobar Islands, Bull. Seism. Soc. America, 97, doi: 10.1785/0120050630
83. **Rockwell B.W.** (2013). « Automated mapping of mineral groups and green vegetation from Landsat Thematic Mapper imagery with an example from the San Juan Mountains, Colorado. U.S ». *Geological Survey Scientific Investigations Map 3252*, pamphlet, 1 map sheet, scale 1:325,000, 25 p.
84. **Rouvier, H.**, « *Géologie et l'extrême –Nord tunisien : tectoniques et paléogéographies superposées à l'extrémité orientale de la chaîne nord-maghrébine* ». Thèse Univ. P. et M. Curie, Paris. France. 1977, 898 p.
85. **ROUVIER, H.**, « *Les concentrations polymétalliques liées aux diapirs évaporitiques des confins algéro-tunisiens* ». Rapport interne EREM, Boumerdes-Algérie, 1990, 71p.
86. **S. C Liew**, “*Satellite detection of forest fires and burn scars*”, Mars 2001, research gate.
87. **S. Chevrel**, « *Potential d'identification des sels de carbonates sodiques par spectroradiométrie et télédétection* », Rapport final FR-BRGM/RP 60227- juillet 2011.
88. **S. Ghardaoui, W. Benhabib**, “ *Classification des Images par les Séparateurs à Vaste Marge Un-Contre -Tous*”, mémoire de projet de fin d'étude. Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Oran, 2008.
89. **S. Guerrak**, « *Geology of the early Devonian oolitic iron ore of the Gara Djebilet field, Saharan Platform, Algeria* ». Ore Geol. Rev. 1988, 3 (4), 333 et 358.
90. **S. Narsis**, “*Contribution à l'étude d'impact de l'exploitation du gisement ferrifère de la mine de l'Ouenza sur l'environnement, Algérie*”, 2012.
91. **Sabins, F.F.** (1999). « Remote Sensing for Mineral Exploration ». Ore Geology Reviews, 14, 157-183.
92. **Sabins, F.F.**, 1987. « Remote Sensing Principles and Interpretation », 2nd edition. Freeman, New York.
93. **Sevin, et Brice**. “*Cartographie du régolithe sur formation ultrabasique de Nouvelle-Calédonie: Localisation dans l'espace et dans le temps des gisements nickélicifères*”. (2014, July 25).
94. **SHENK.P. E.** (1971) - Southeastern Atlantic Canada, Northwestern Africa and continental drift Can. Jour of earth. Sci. 8. p. 1218-1251.
95. **Sultan, M., Arvidson, R.E., Sturchio, N.C., and Guinness, E.A.**, (1987). « Lithologic mapping in arid regions with Landsat thematic mapper data: Meatiq Dome,

- Egypt ». *Geological Society of America Bulletin* , v. 99, no. 6, p. 748–762, doi: 10.1130/0016-7606(1987)99<748:LMIARW>2.0.CO;2.
- 96. T. M. Redha**, “*Creusement et soutènement des excavations souterraine, cas de mine de Boukhadra -Tébessa*”.2016.
- 97. Tarantola and B. Valette**, “*Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion*”, *Rev. Geophys. Space Phys.*, vol. 20, pp. 219-232, 1982.
- 98. Thibiéroz, J. et Madre, M.**, « *Le gisement de sidérite du Djebel El Ouenza (Algérie) est contrôlé par un golfe de la mer aptienne* ». *Bull. Soc. Hist. Nat. Afrique du nord*, Alger, 1976, t.67, fasc. 3-4, pp. 126-150.
- 99. VILA J. M.**, « *Mise au point des données nouvelles sur les terrains triasiques des confins algéro-tunisiens : Trias Allochtone « glacier de sel » sous-marin et vrais diapirs* », *Mém. Serv. Géol. Algérie*, 1994, n°5, p 105-152.
- 100. Vila J.M., Ben Youssef M., Charrière A., Chikhaoui M., Ghanmi M., Kamoun F., Peybernès B., Saadi J., Souquet P. et Zarbout M.**, « *Découverte en Tunisie, au SW du Kef, de matériel triasique interstratifié dans l’Albien : extension du domaine à "glaciers de sel" sous-marins des confins algéro-tunisiens* ». *C. R. Acad. Sci. Paris*, 1994, t.318, sér.II, n°12, pp.1661-1667.
- 101. Vila, J.M., Benkhérouf, F., Charrière A.**, « *Interprétation du matériel triasique de la région de l’Ouenza (confins algéro-tunisiens) : un vaste « glacier de sel » sous-marin albien, à l’image des structures off-shore d’Aquitaine* », *C. R. Acad. Sci. Paris*, 1994, t. 318, série II, pp. 109-116.
- 102. Viveros Oscar Cancino**, “ *Analyse du milieu urbain par une approche de fusion de données satellitaires optiques et radar* ”, Thèse de Doctorat en sciences, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2003.
- 103. WILSON J. T.**, « *Did the Atlantic close and then re-open* », 1968, *Nature* n°21, p. 676-681.
- 104. WILDI W.**, « *La chaîne Tello-Rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène* ». *Rev. Géol. Dym et Géogr. Phys.* 1983 Vol, 24. Fasc. 3. p 201-297.
- 105. Zouari, M.**, « *Etude structurale du Djebel Chambi (Tunisie centrale). Relation entre la minéralisation et la structure* ». Thèse Doct. 3 ème cycle. Univ Besançon, France, 1984, 93p.

Sites internet

- **Nicolat, 2015:** Polarisation de la lumière. [En ligne] https://fr.science-questions.org/comment_ca_marche/158/Polarisation_de_la_lumiere/
- **Didier FOURNIL, 2017:** Spectre électromagnétique et filtres à réjection de pollution lumineuse. [En ligne] <http://astrocoach60.blogspot.com/2017/01/spectre-electromagnetique-et-filtres.html>
- **Minouprof, 2016:** Spectre des ondes électromagnétique. [en ligne] <https://emreclmic.wordpress.com/2016/06/12/spectre-des-ondes-electromagnetiques/>
- **UVED, 2008:** Elements physique du rayonnement.[En ligne] <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvved/envcal/html/rayonnement/1-rayonnement-electromagnetique/index.html>
- **(Net1):** <http://nilerak.hatfieldgroup.com/French/NRAK/EO/html/aster.html>
- **(Net2) :** <http://nilerak.hatfieldgroup.com/French/NRAK/EO/html/modis.html>

ANNEXES

Annexe 1

Interface du logiciel ENVI Classic



Figure A.1 : Interface ENVI Classic

Annexe 2

Création d'un fichier multibandes ou empilement de couches

Dans ENVI Classic sélectionner Basic Tools à partir du menu → Layer stacking → Import File (sélectionner les images représentant chaque bande).

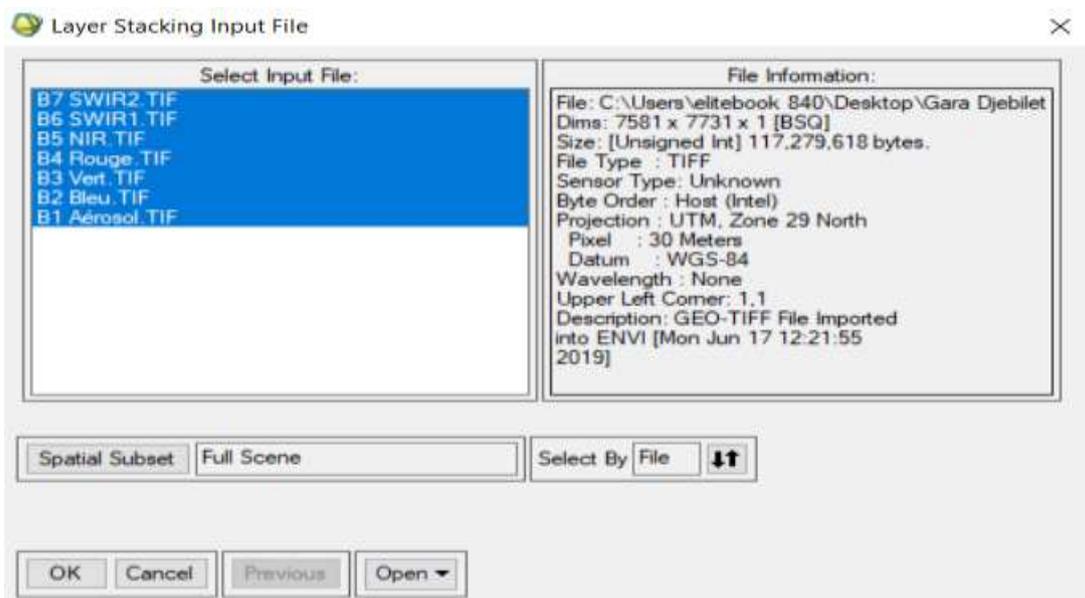


Figure A.2a : Fichier d'entrée d'empilement des couches

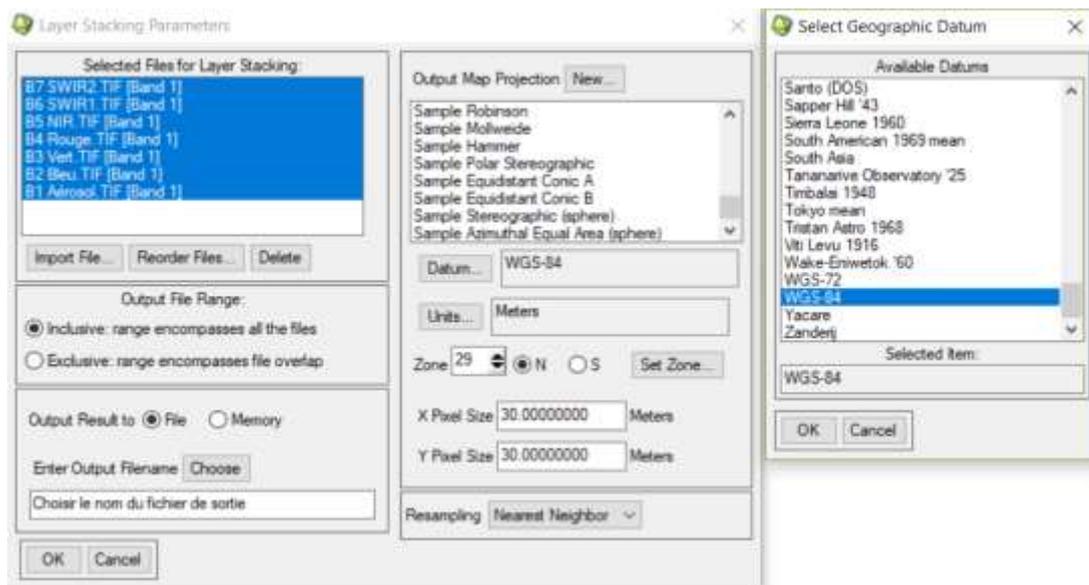


Figure A.2b : Configuration des paramètres d'empilement des couches

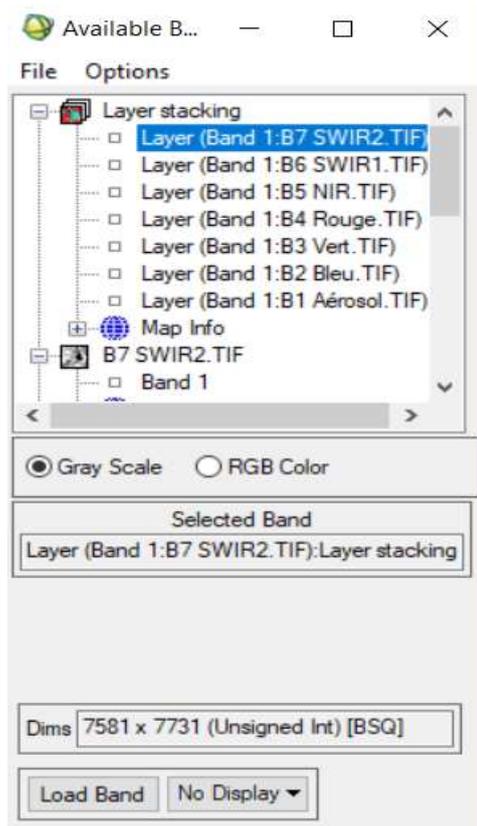


Figure A.2c : Résultat de l'empilement des couches (Layer stacking)

Annexe 3

Obtention des sous-scènes des images Landsat 8 OLI

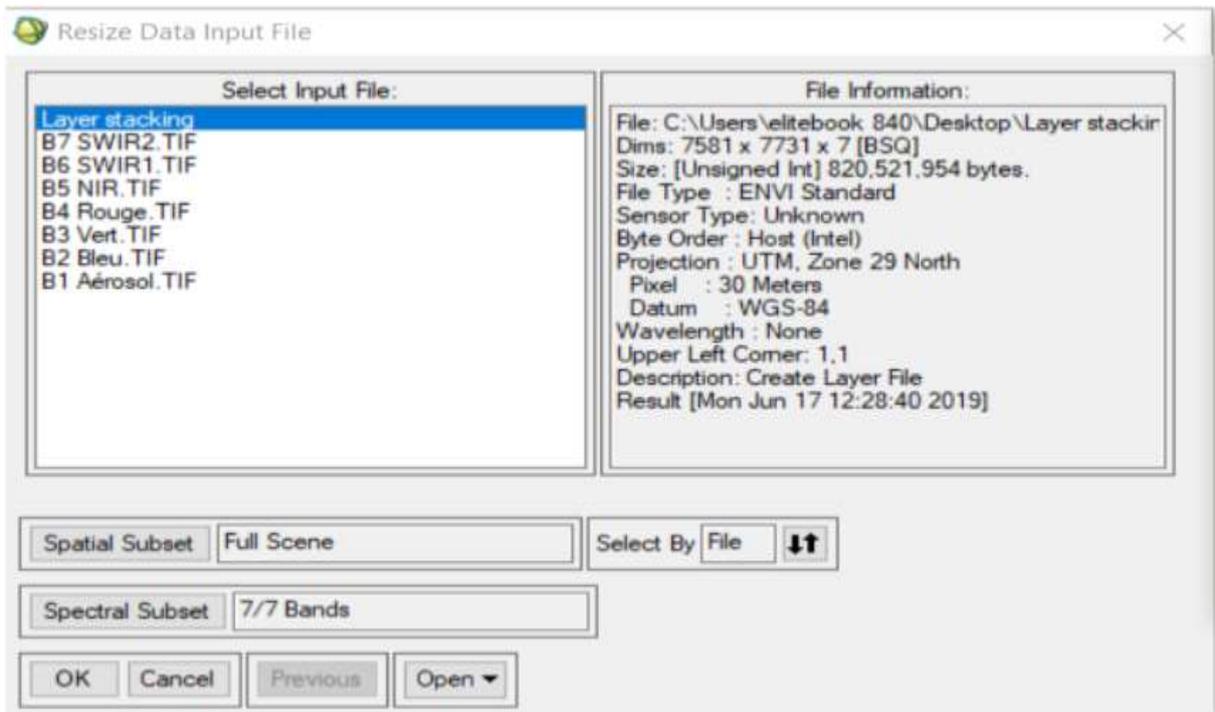
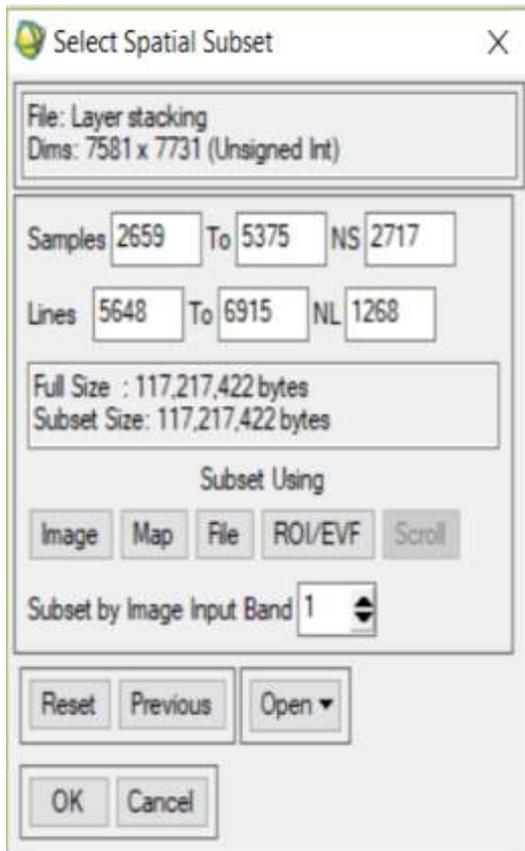
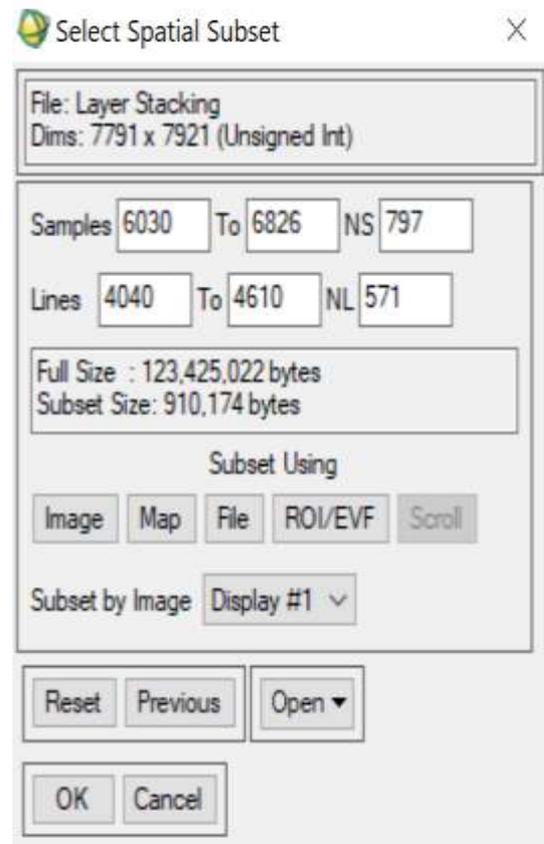


Figure A.3a : Fichier d'entrée des données de redimensionnement

A partir du menu, sélectionner File → Open Image File (choisir l'image) → Basic Tools → Resize Data → Spatial Subset.



Figures A.3b : Dimensions du sous-ensemble spatial de Gara-Djebilet



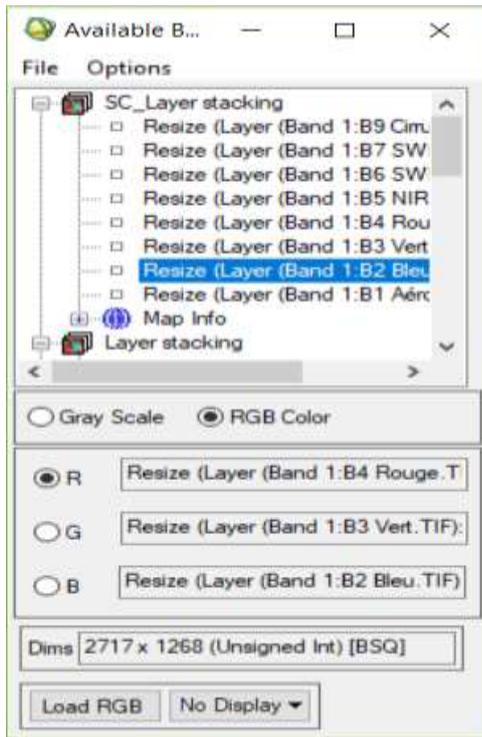
Figures A.3c : Dimensions du sous-ensemble spatial de Djebel Ouenza

Le choix des dimensions des deux régions s'est fait par analogie entre les images satellites collectées et les cartes géologiques de référence.

Annexe 4

Amélioration multispectrales des images en couleur composite

1. Couleurs naturelles



Dans le menu, sélectionner File → Open Image File → sélectionner le fichier déjà empilé.

Pour l'amélioration en couleurs naturelles, attribuer la bande rouge pour le canal rouge, la bande verte pour le canal vert et la bande bleue pour le canal bleu en mode RGB Color.

Pour visualiser le résultat, cliquer sur Load RGB.

Figure A.4 : Affichage en couleurs naturelles

2. Fausses couleurs

Dans le menu, sélectionner File → Open Image File → sélectionner le fichier déjà empilé.

Pour l'amélioration en fausses couleurs, attribuer les bandes 7, 3 et 2 pour le canal rouge, le canal vert et le canal bleu respectivement en mode RGB Color.

Pour visualiser le résultat, cliquer sur Load RGB.

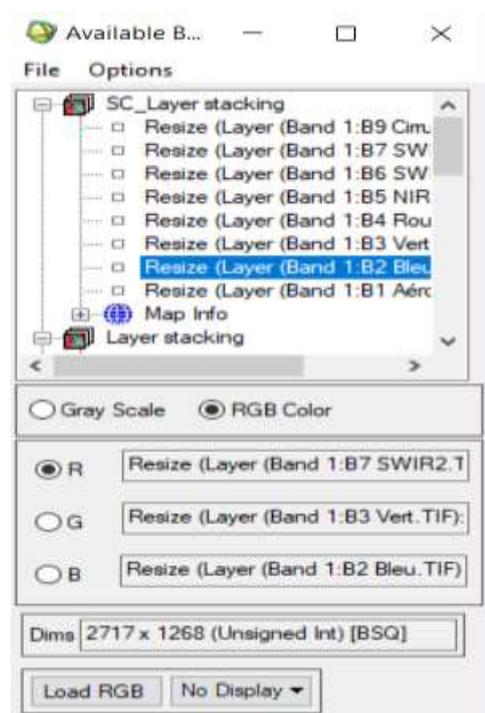


Figure A.5 : Affichage en fausses couleurs

Annexe 5

La classification non supervisée

1. ISODATA

Dans le menu, cliquer sur Classification → Unsupervised → IsoData (choisir l'image).

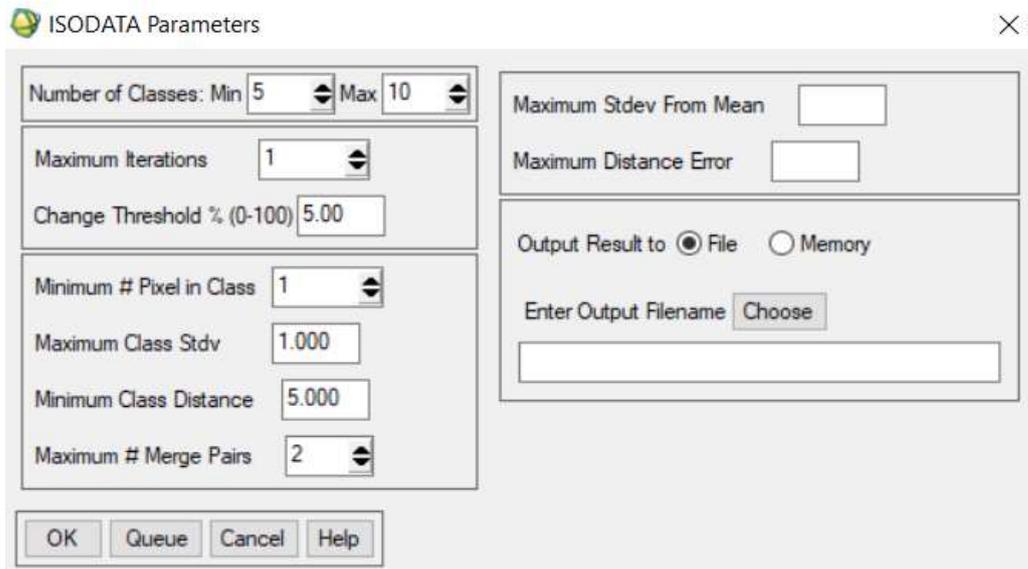


Figure A.6a : paramètres par défaut ISODATA

En choisissant l'algorithme IsoData, la fenêtre de configuration du classificateur s'affiche :

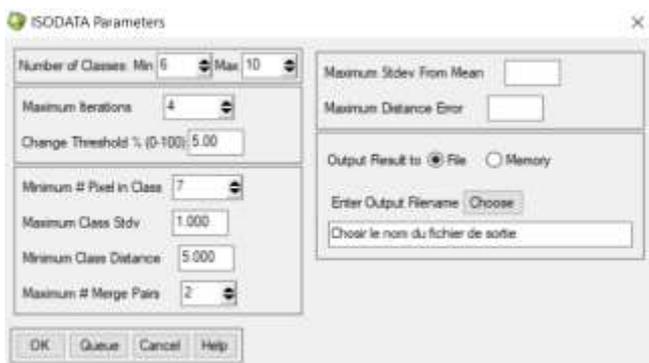


Figure A.6b : Paramètres ISODATA de Gara-Djebilet

Pour la région de Gara Djebilet, on sélectionne un nombre de classes compris entre 6 et 10, nombre d'itération égale à 4 pour effectuer le programme et aussi 7 pixels regroupés pour une classe

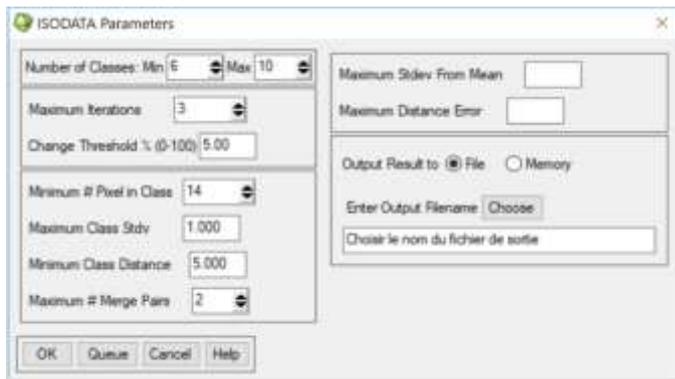


Figure A.6c : Paramètres ISODATA de Djebel Ouenza

Pour la région de l'Ouenza, on sélectionne un nombre de classes compris entre 6 et 10, un nombre d'itération égale à 3 pour effectuer le programme et aussi 14 pixels regroupés pour une classe.

2. K-means

Dans le menu ENVI Classic, cliquer sur Classification → Unsupervised → k-means (choisir l'image).

En choisissant la méthode de classification non supervisée K-means, la fenêtre de configuration des paramètres s'affiche (Fig. A.7a) :

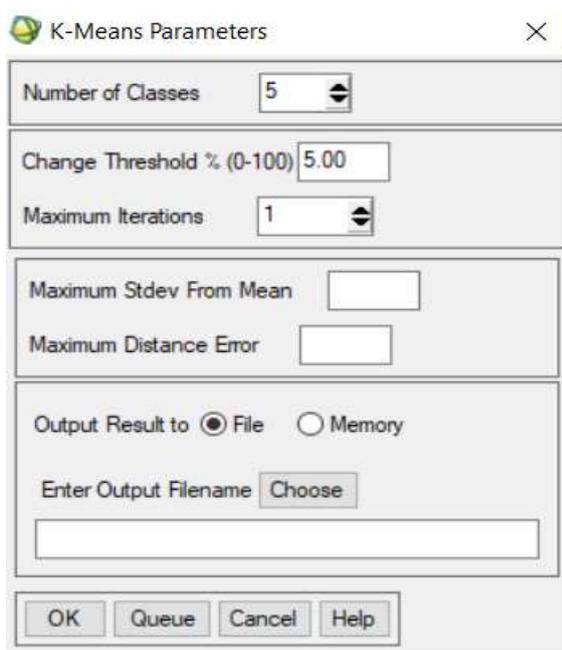


Figure A.7a : Paramètres K-means par défaut

Le choix du nombre de classes est lié au nombre de formations lithologiques présentes sur la carte géologique de la région, c'est pour cela que le nombre de classes a été défini sur 12.

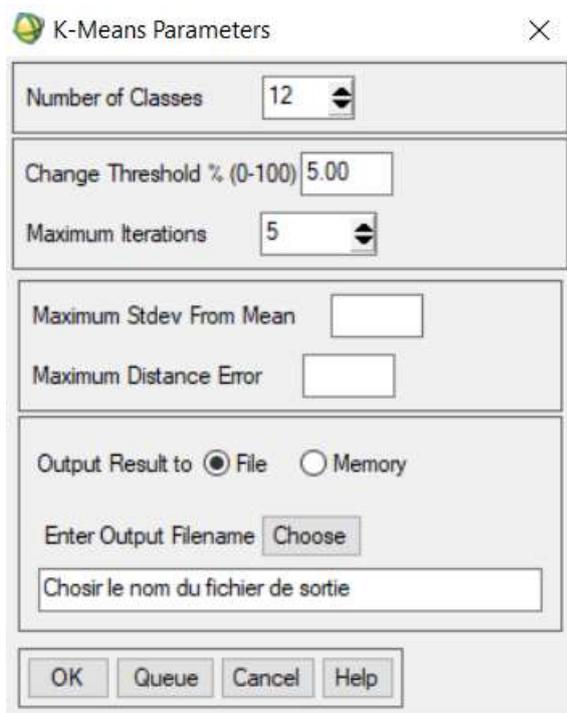


Figure A.7b : Paramètres K-means pour la région de Gara Djebilet

Le nombre d'itérations maximal est, dans ce cas égal à 5, et ce, selon les résultats des nombreux essais effectués.

Par contre, pour la région de Djebel Ouenza le nombre des classes est égal à 6 et le nombre d'itérations est de 8.

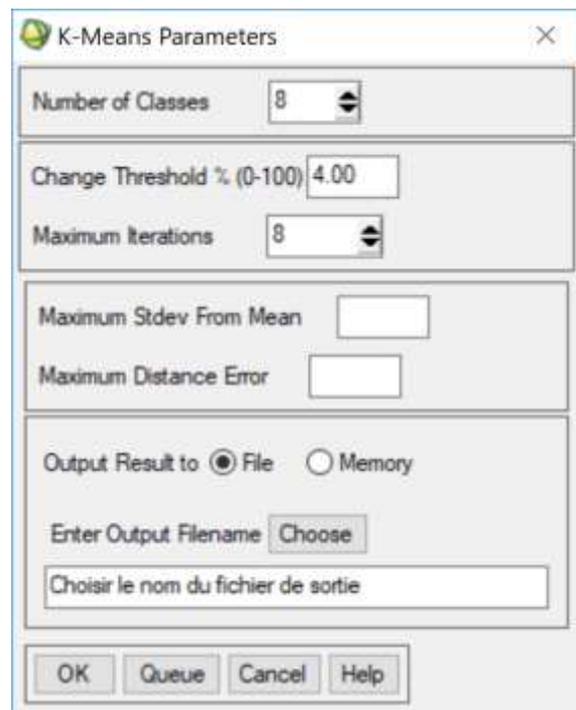


Figure A.7c : Paramètres K-means pour la région de Djebel Ouenza

Annexe 6

La classification supervisée

1. Maximum Likelihood

Dans le menu ENVI on sélectionne File → Open Image File → Sélectionner l'image empilée.

Une fois l'image affichée, on clique sur Tools dans la barre de menu de l'image → ROI Tool, on obtient boîte de dialogue par défaut.

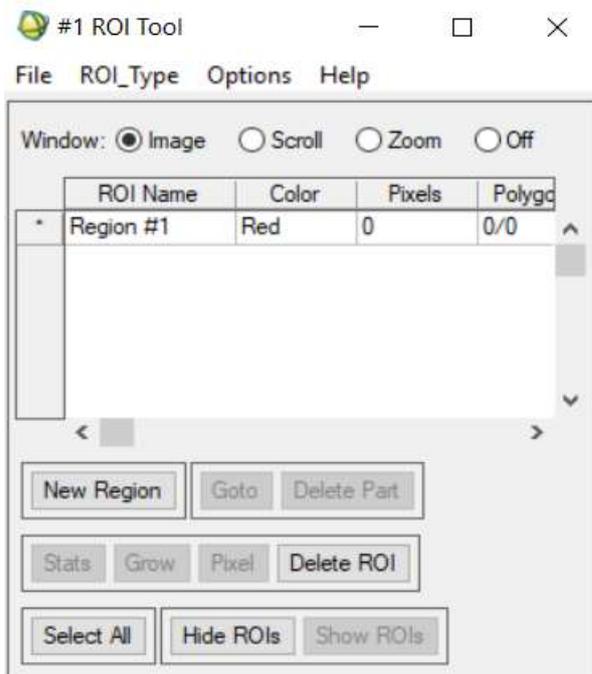


Figure A.8a : Boîte de dialogue ROI par défaut

Une fois la boîte de dialogue ouverte on définit la région d'intérêt ROI sur l'image en attribuant la surface adéquate pour chaque classe ainsi qu'une couleur représentative.

Dans le menu de ROI Tool → Sélectionner Select All → File → Save ROIs → Select All items → choisir le nom de fichier de sortie → OK.



Figure A.8b : Configuration des paramètres de la région d'intérêt de Gara Djebilet

Pour la région de Gara Djebilet on choisit 11 ROI représentatifs de la région et ce par analogie avec la carte géologique de référence, tandis que pour la région de l'Ouenza on définit 6 régions d'intérêt.

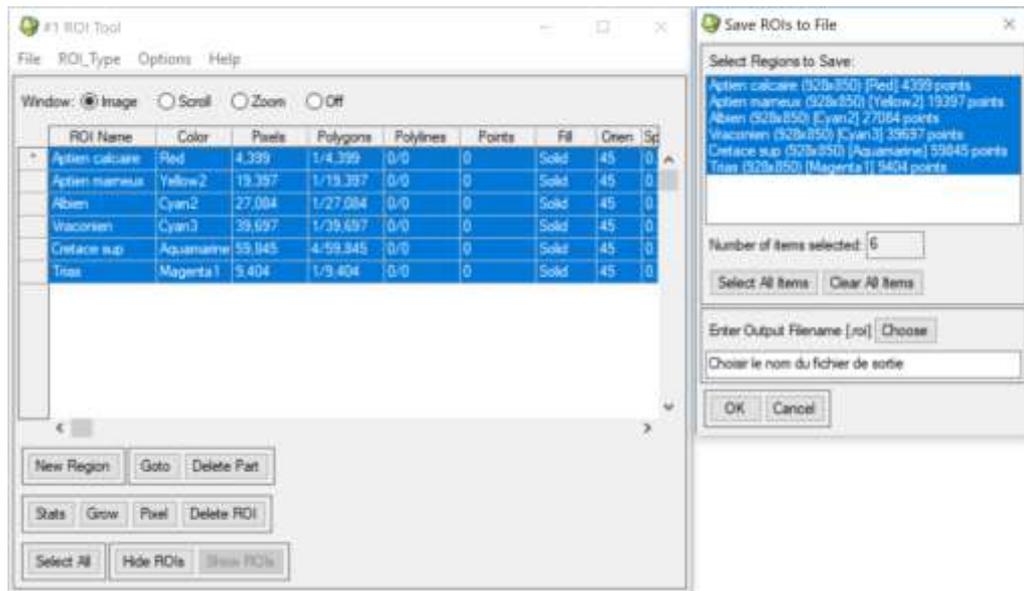


Figure A.8c : Configuration des paramètres de la région d'intérêt de Djebel Ouenza

Une fois la définition des ROI est faite, on procède à l'application de la classification du Maximum de Vraisemblance comme suit :

Dans la menu ENVI sélectionner Classification → Supervised → Maximum Likelihood → Sélectionner l'image contenant les ROI → OK → Select All items → OK.

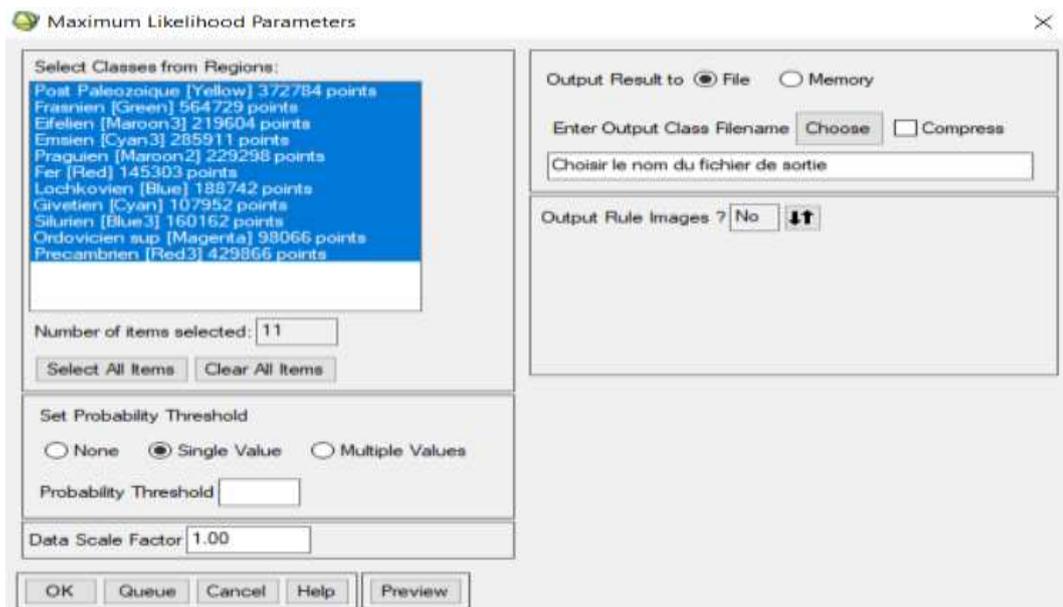


Figure A.8d : Configuration des paramètres de Maximum Vraisemblance de Gara-Djebilet

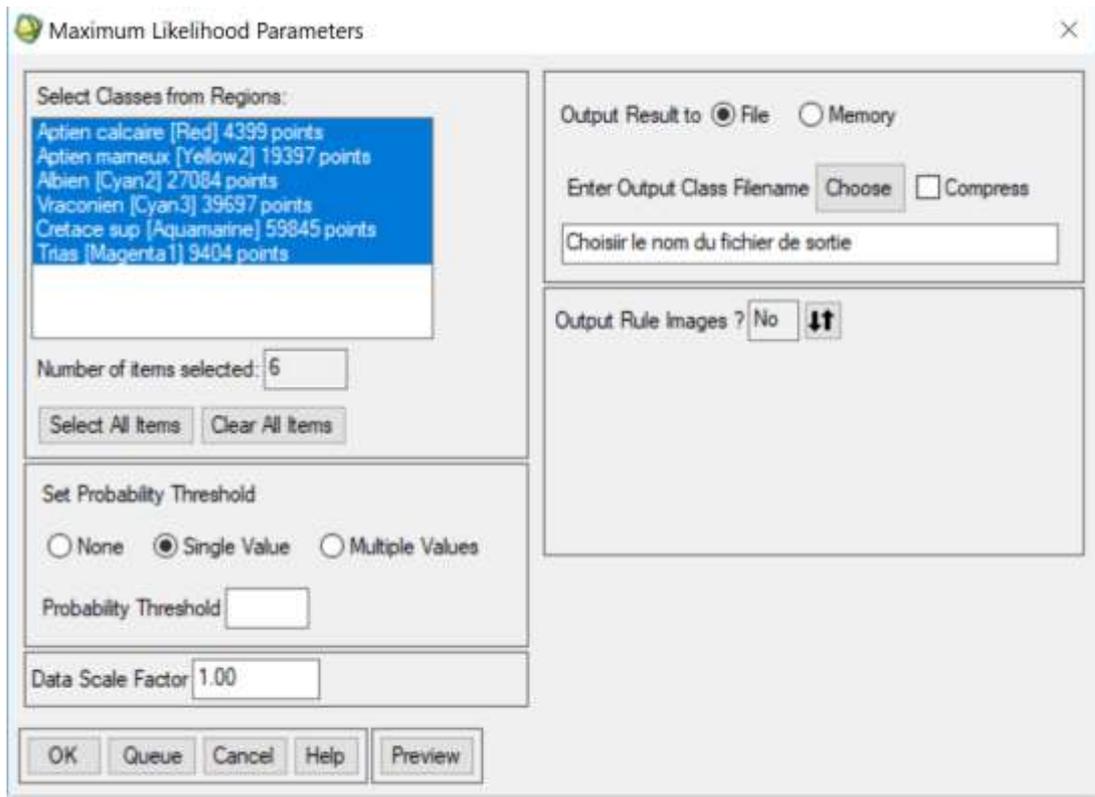


Figure A.8e : Configuration des paramètres de Maximum Vraisemblance de l'Ouenza

2. Spectral Angle Mapper

Pour réaliser la méthode SAM, il faut tout d'abord créer une bibliothèque spectrale comme suit :

Dans ENVI, cliquer sur File → Open Image File → sélectionner l'image résultante de l'empilement.

Dans le menu de l'image affichée, sélectionner Tools → Profiles → Z Profile (Spectrum). Le profil spectral de la figure (A.9a) s'affiche.

Dans le menu du profil spectral affiché, cliquer sur Option → Plot Key. Le profil spectral de la figure (A.9b) s'affiche.

Encore une fois, dans le menu du profil spectral cliquer sur Options → New Window : with Plots...

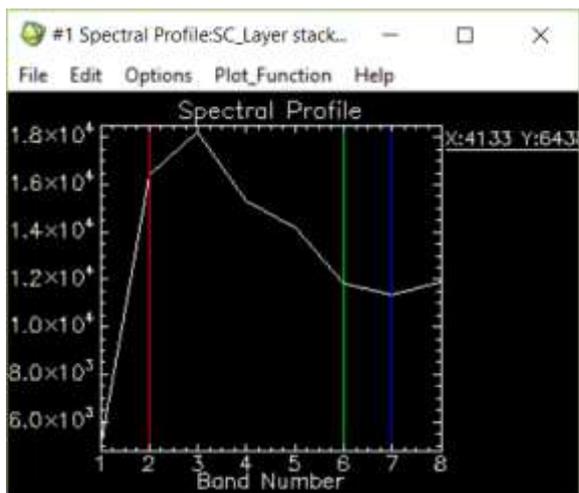


Figure A.9a : Profil spectral

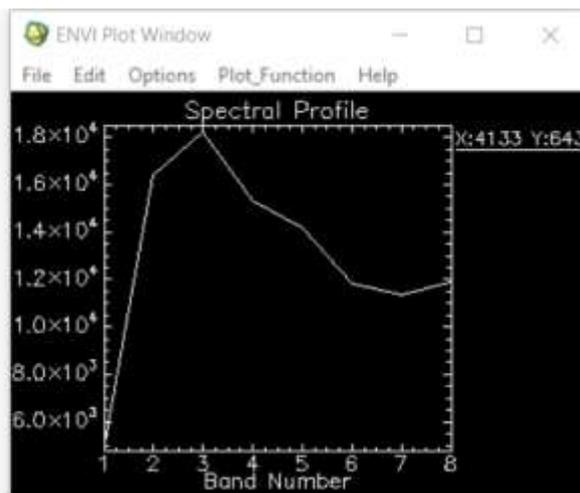


Figure A.9b : Fenêtre du graphique

Aller sur l'image et cliquer sur une zone représentative de la lithologie ou classe souhaitée, puis glisser les coordonnées X et Y qui s'affichent sur le profil spectral vers la fenêtre du graphique puis, dans le menu de la boîte de dialogue Plot Window cliquer sur Edit → Data Parameters.

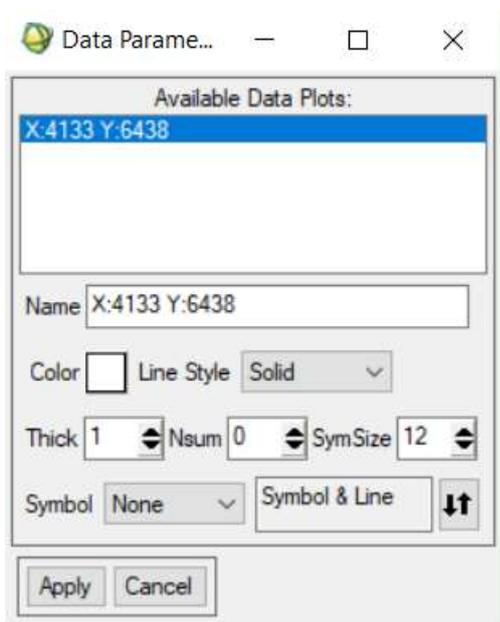
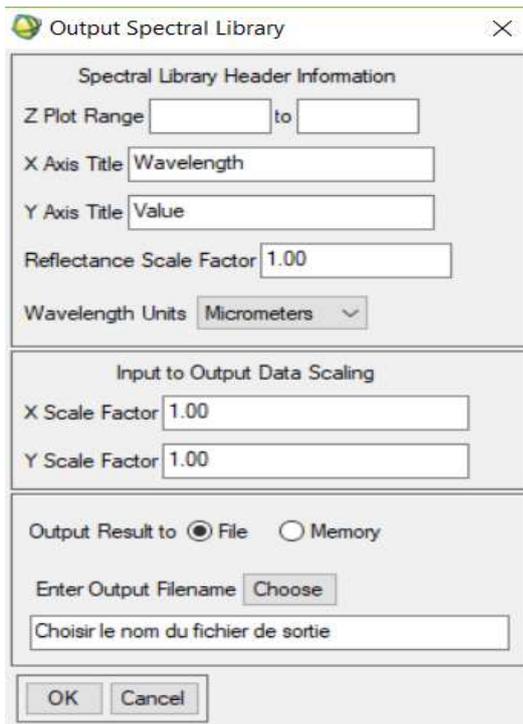


Figure A.9c : Paramètres des données

Dans la boîte de dialogue Data Parameters, attribuer le nom de la classe sélectionnée dans la case Name, et attribuer une couleur dans la case Color.

Répéter les étapes pour toutes les classes/lithologies de l'image.



Dans la fenêtre Plot Window cliquer sur File → Save Plot As → Spectral Library. Puis, dans la boîte de dialogue qui s'affiche cliquer sur Select All items puis sur OK.

Une autre boîte de dialogue s'affiche (Fig. A.9f), cliquer sur OK.

Figure A.9d : Librairie spectrale de sortie

On obtient ainsi une librairie spectrale pour chaque région :

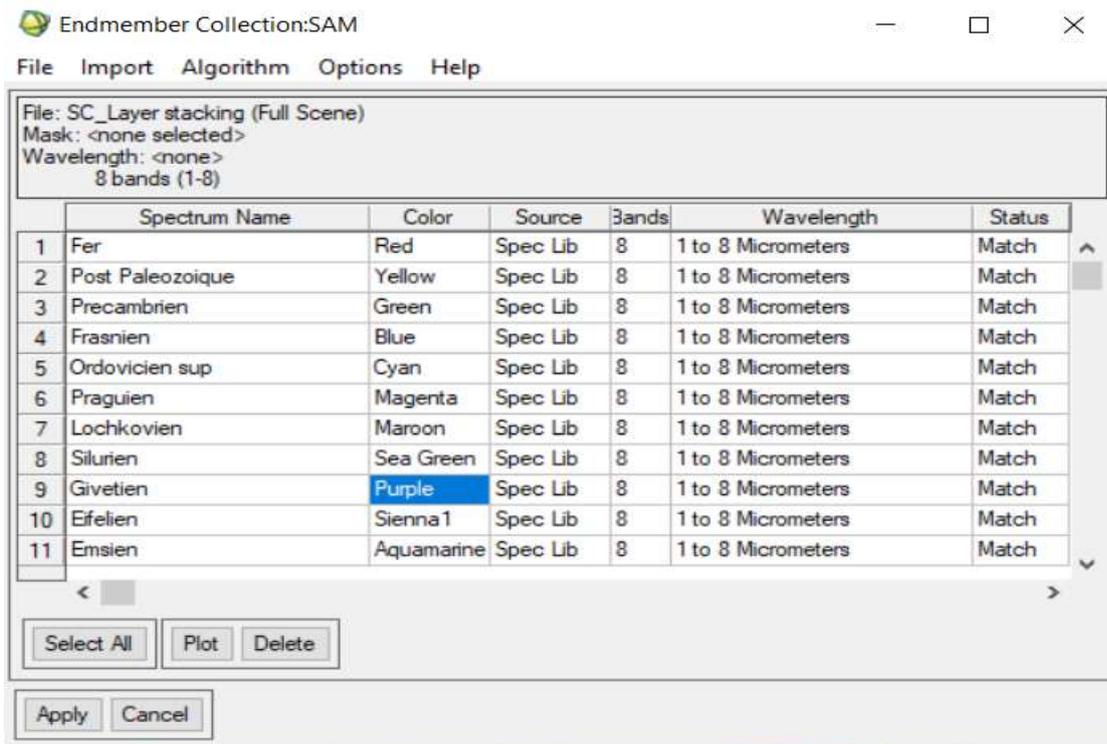


Figure A.9e : Librairie spectrale de la région de Gara Djebilet

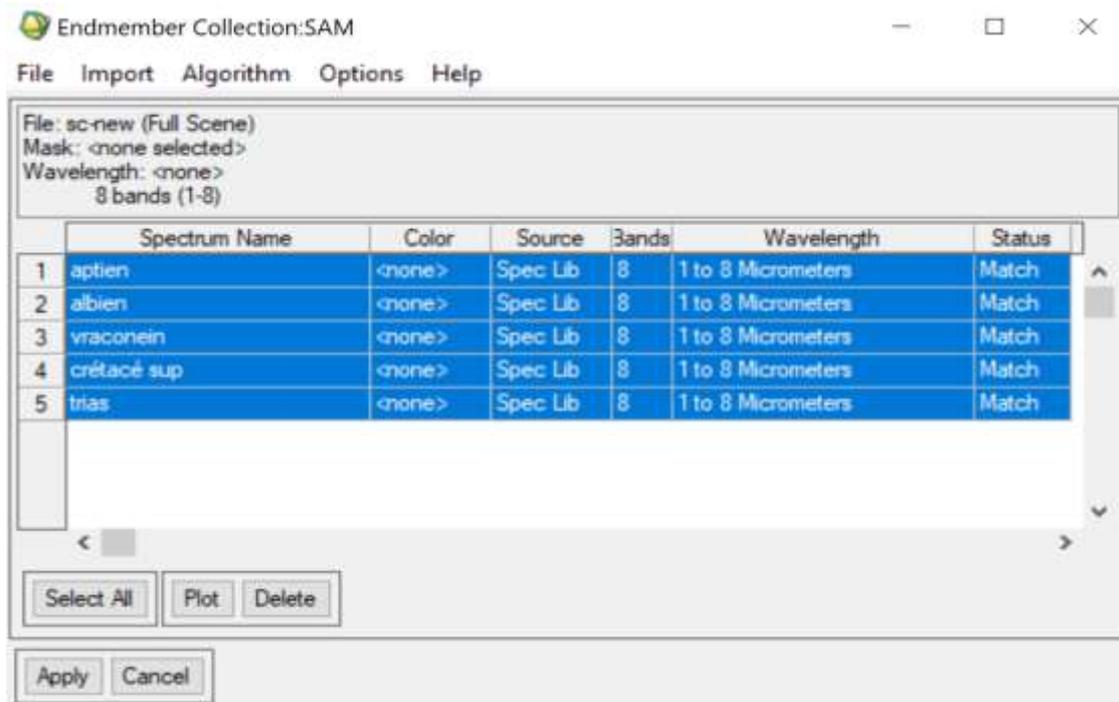


Figure A.9f : Librairie spectrale de la région de Djebel Ouenza

Pour appliquer la classification supervisée, cliquer sur Classification : Supervised : Spectral Angle Mapper : Sélectionner le fichier d'entrée : OK

Dans la boîte de dialogue Input Spectral Library cliquer sur Select All items : ok

Dans la nouvelle boîte de dialogue qui s'affiche, cliquer sur Select All : Apply. La boîte de dialogue suivante s'affiche (Fig A.9g) cliquer sur OK.

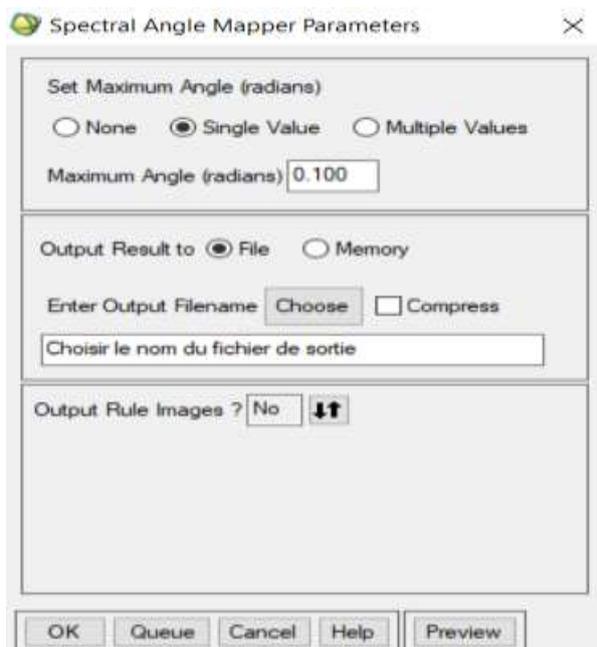


Figure A.9g : Paramètres Spectral Angle Mapper

Annexe 7

La post classification

Dans le menu Envi sélectionner Classification → Post Classification → Majority/Minority Analysis → Sélectionner l'image à traiter → OK.

L'image à traiter représente le produit obtenu à partir des techniques de classification supervisée et non supervisée.

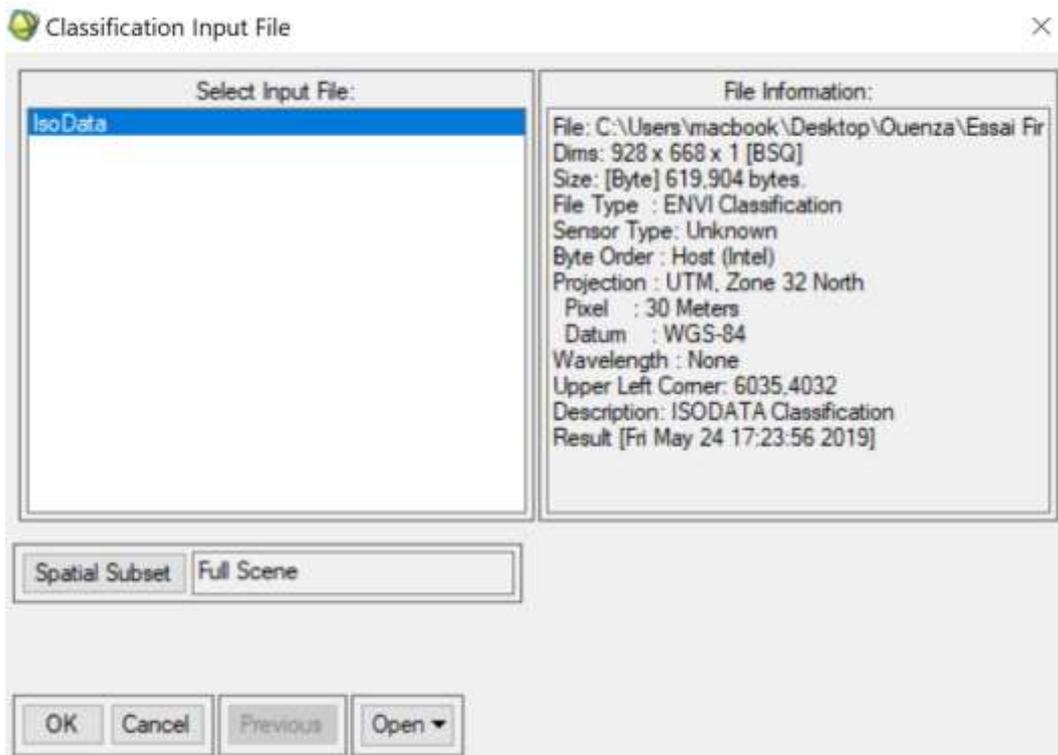


Figure A.10a : Fichier d'entrée de la classification

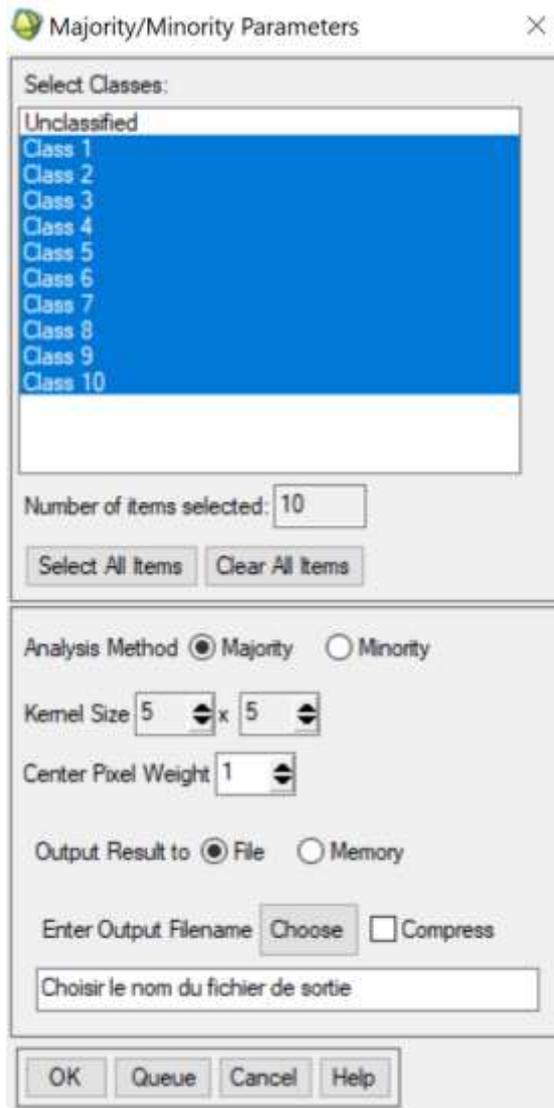


Figure A.10b : Paramètres de la post classification Majority/Minority

Dans le menu ENVI, cliquer sur Classification → Post Classification → Clump → Sélectionner l'image obtenue de la poste classification précédente → MMA → OK.

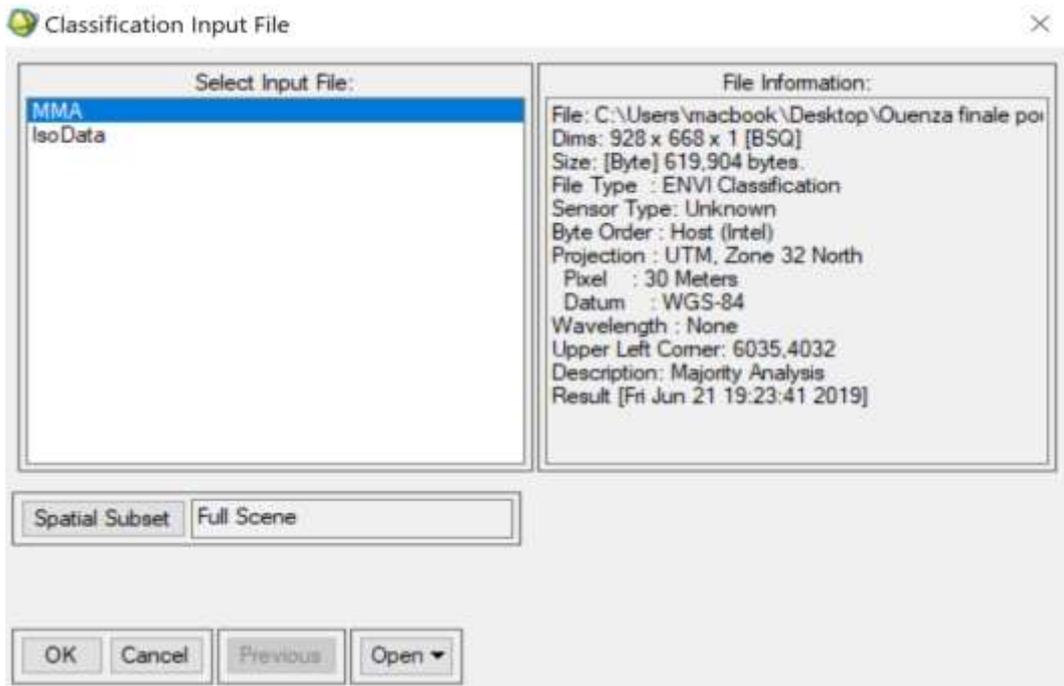


Figure A.10c : Fichier d'entrée de la classification

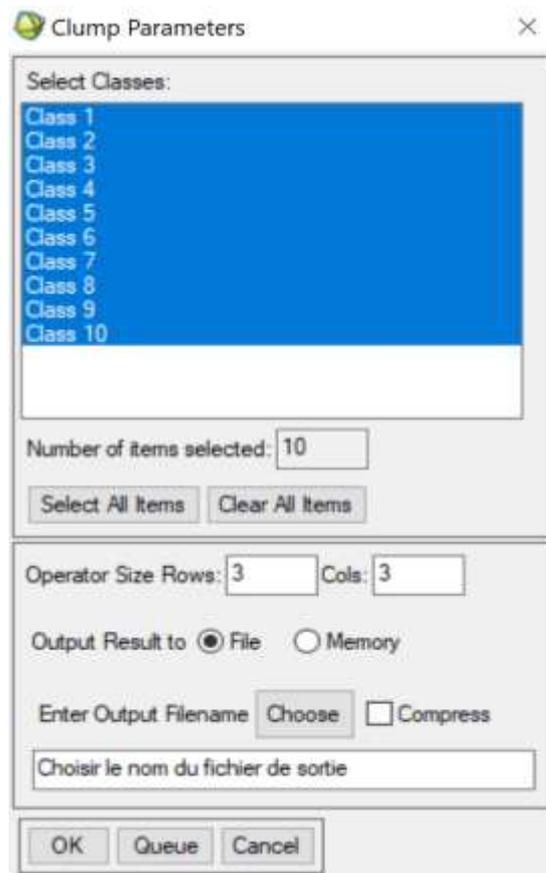


Figure A.10d : Paramètres de la post classification Clump Classes

Annexe 8

Le démixage spectral



Dans la barre de menu ENVI → Sélectionner Spectral → Mapping Methods → Linear Spectral Unmixing → Sélectionner l'image empilée → OK.

Figure A.11a : Fichier d'entrée de Démixage par défaut

Une fois l'image sélectionnée → Cliquer sur Import → From Spectral Library file → open → New file → Sélectionner la librairie spectrale adéquate → OK → Select All items → OK.

Nous avons utilisé la même librairie spectrale que celle de la méthode Spectral Angle Mapper définie auparavant pour les deux régions.

Pour Gara Djebilet

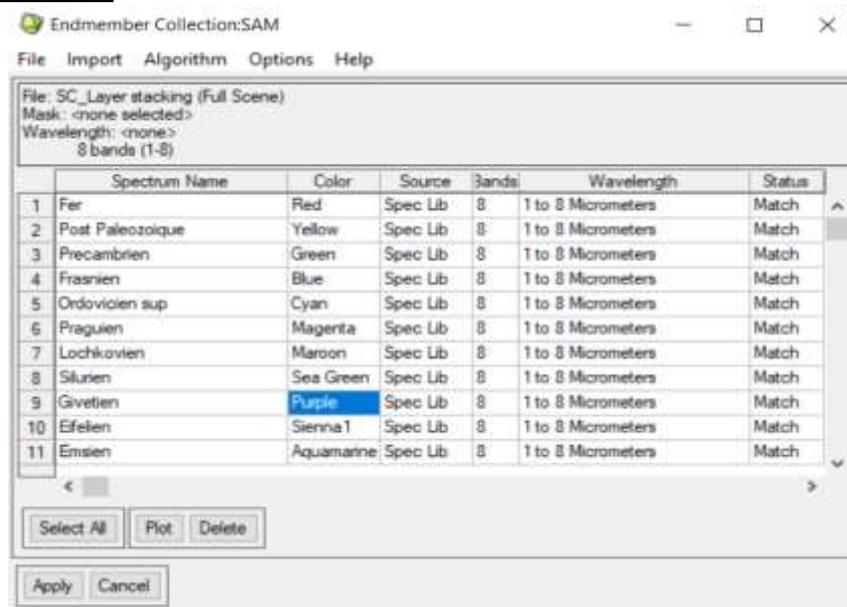


Figure A.11b : Collecte des membres finaux pour Gara Djebilet

Pour l'Ouenza

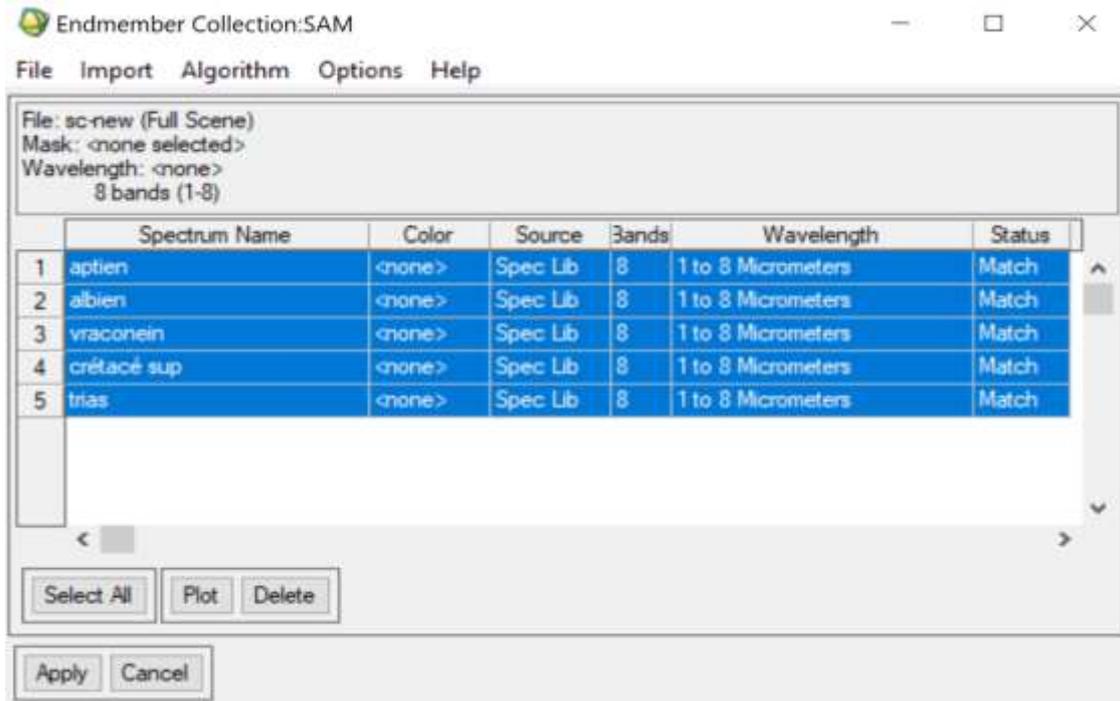


Figure A.11c : Collecte des membres finaux pour Djebel Ouenza

Une fois les spectres importés : cliquer sur Select All → Apply.

Annexe 9

Les bandes ratios

Dans ENVI, cliquer sur File → Open Image File → sélectionner l'image résultante de l'empilement.

Dans le menu ENVI, cliquer sur Basic Tools → Band Math → affichage de la figure ci-contre :

Après avoir inséré l'expression du rapport, cliquer à chaque fois sur Add to list.

Une fois tous les rapports ajoutés, cliquer sur OK.

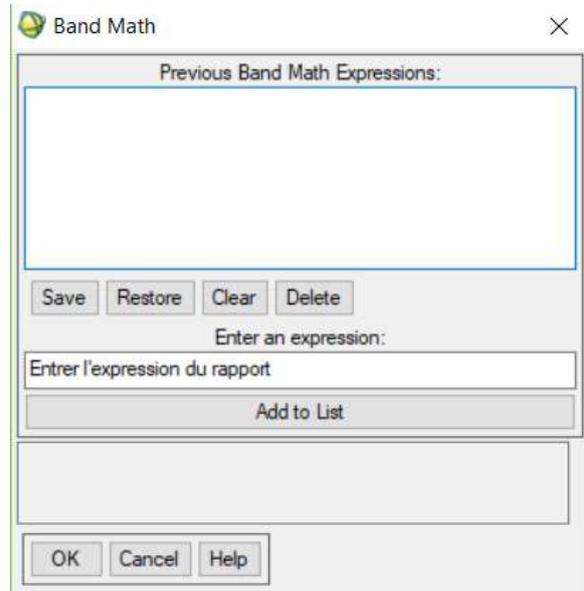


Figure A.12.a : Boite de dialogue Band Math

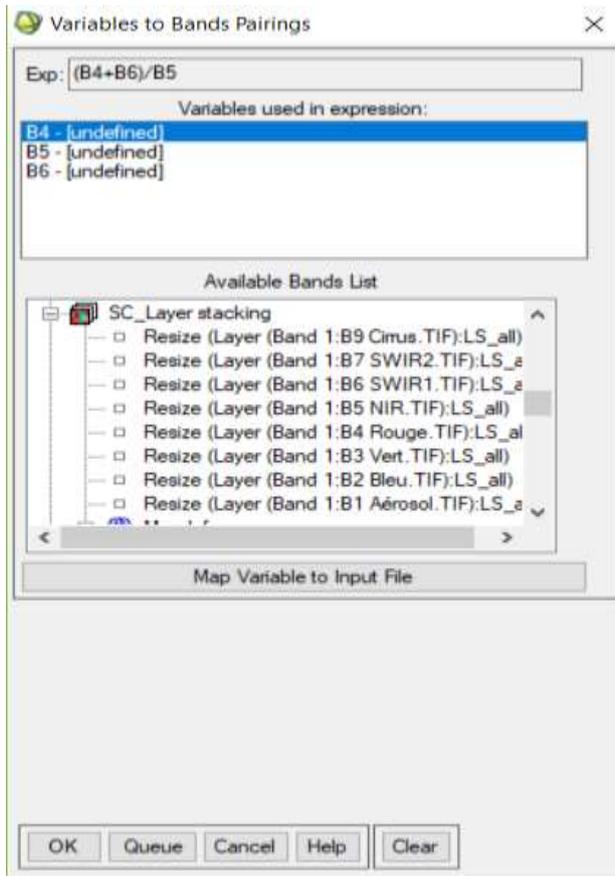


Figure A.12b : Association des variables aux bandes

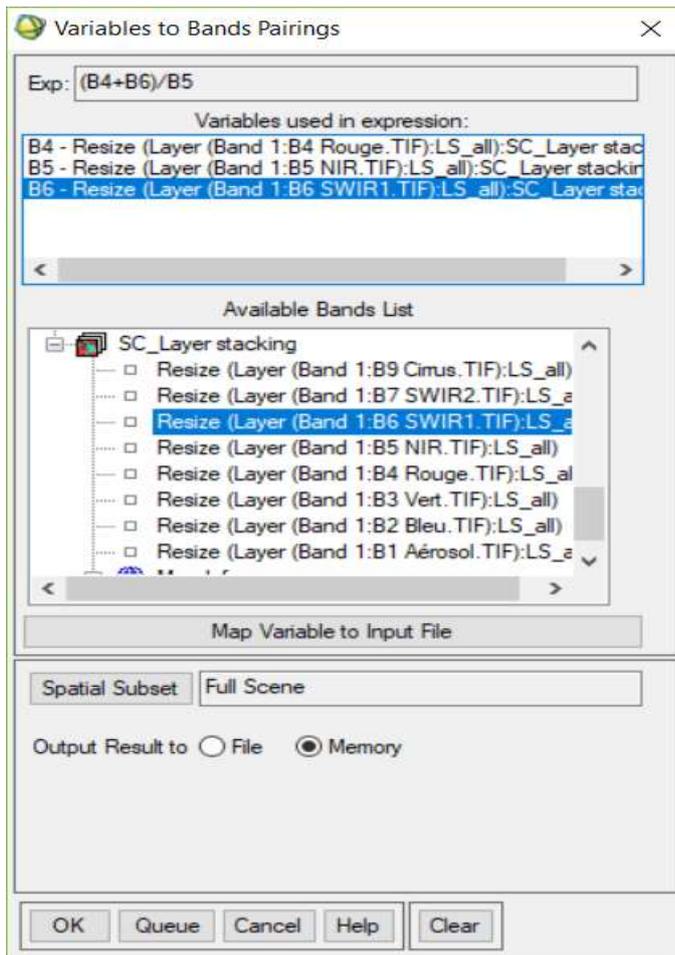


Figure A.12c : Définition des bandes des rapports

Définir les bandes des ratios à partir des bandes de l'image à traiter et cliquer sur OK. Une fois tous le rapport défini, choisir Memory pour le paramètre Output Result to, comme illustré dans la figure ci-contre :

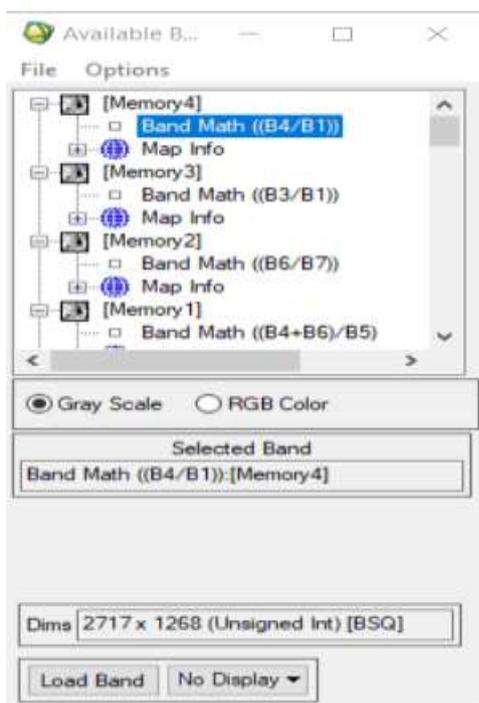


Figure A.12d : Rapports définis

Après avoir défini tous les ratios, on obtient le résultat représenté dans la figure (A.12d) :

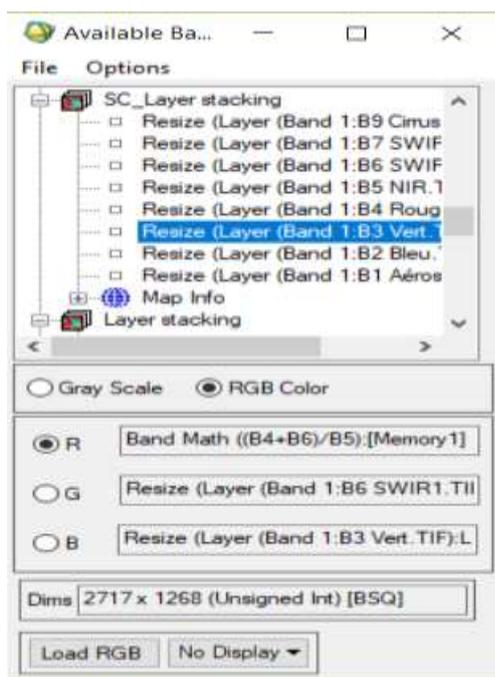


Figure A.12e : Combinaison 3 pour la région de Gara Djebilet

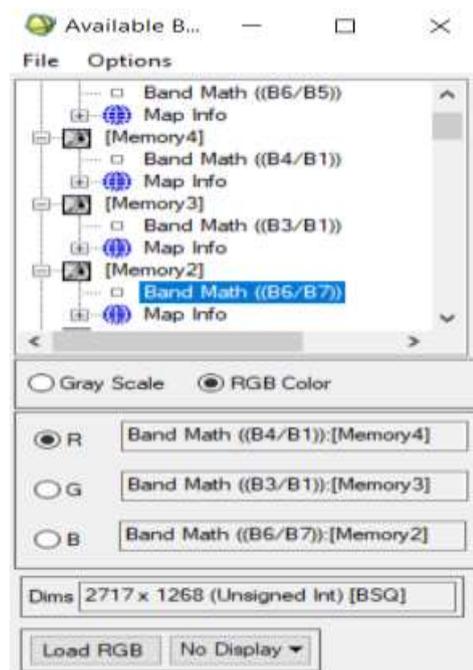


Figure A.12f : Combinaison 6 pour la région de Gara Djebilet

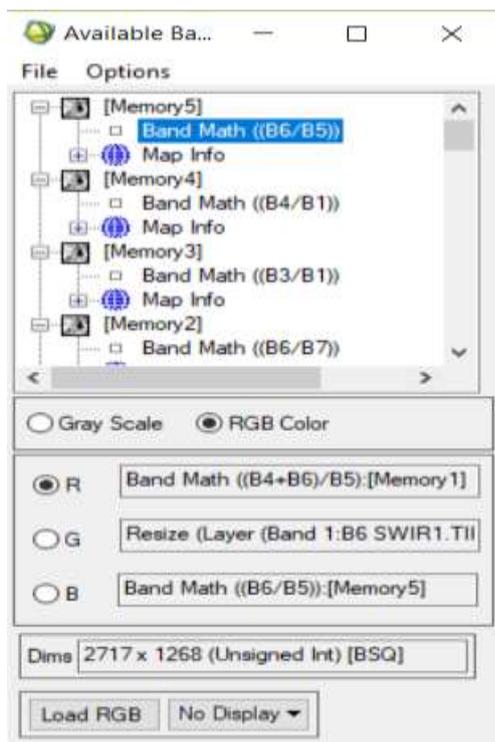
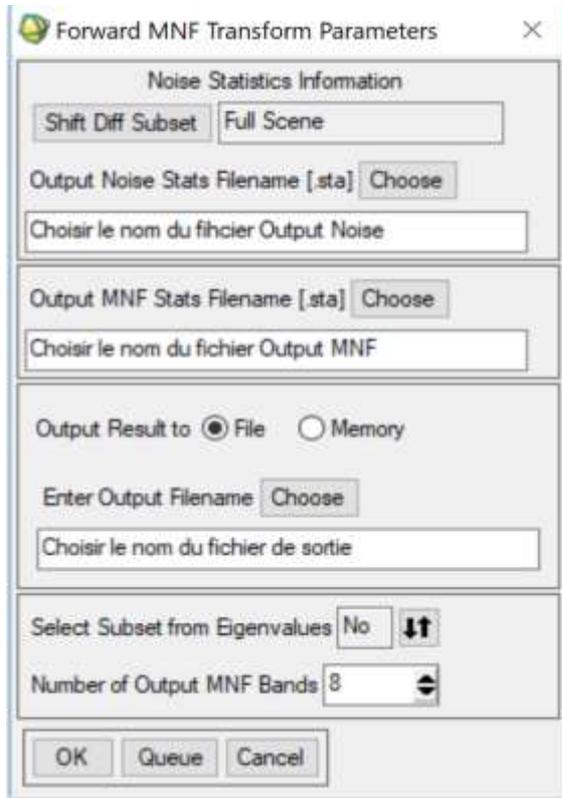


Figure A.12g : Combinaison 3 pour la région de Djebel Ouenza

Pour visualiser le résultat, attribuer pour chaque canal un rapport ou une bande et cliquer sur load RGB.

Annexe 10 Minimum Noise Fraction (MNF)

Dans la barre menu ENVI cliquer sur Transform → MNF Rotation → Forward MNF → Estimate Noise Statistics from Data → Sélectionner l'image empilée → OK.



On obtient la fenêtre illustrée par la figure A.13a, et par la suite on remplit les cases vides comme citée sur la figure.

Figure A.13 : Paramètres de la transformation MNF