

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Projet PNR : ALLUVSOL



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET DES
SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de :

Magister

Spécialité : Géosciences & Environnement

Option : Géochimie de surface

Thème

Essai de caractérisation géochimique et minéralogique de la surface des sols par télédétection, cas de la région d'Ouargla.

Présenté par :

HADJ KOUIDER MOHAMED

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

NEZLI IMED-EDDINE Maitre de conférences A, Univ. de Ouargla

HACINI MESSOUAD Maitre de conférences A, Univ. de Ouargla

AISSANI BELKACEM Maitre de conférences A, Univ. de Ouargla

HAMDIAISSA BELHADJ Professeur, Univ. Ouargla

Président

Examinateur

Examinateur

Encadreur

Promotion 2011/2012

RESUME

Cette étude vise la caractérisation minéralogique et géochimique de la surface des sols au Sahara septentrional avec comme zone d'étude : la zone Nord de la région d'Ouargla.

Le travail est réalisé en combinant les relevés de terrains et les traitements des données de la télédétection. Les traitements numériques ont permis de faire une classification de l'image satellitale et de faire ressortir à la fin une carte des formations superficielles de la région d'étude. La démarche de recherche utilisée dans cette étude et les résultats obtenus peuvent être extrapolés à d'autres régions similaires où les relations climat /composition de surface de sol sont équivalentes

La comparaison des données de télédétection et les données collectées sur terrain ont abouti à la conception de la légende de la dite carte (carte des formations superficielles) avec neuf principaux états de surface des sols :

- Etat de surface Sables éoliens moyens à grossiers ;
- Etat de surface Sables fins à moyens limoneux (sable alluvial) ;
- Etat de surface Plateau Pliocène continental (reg calcaire) ;
- Etat de surface Terrasse alluviale ;
- Etat de surface Grès rouges Mio-Pliocène ;
- Etat de surface Sables gypseux blanchâtres ;
- Etat de surface Encroûtement gypseux ;
- Etat de surface Sols salins humides ;
- Etat de surface non sol (eau et végétation).

En effet, la composition minéralogique des sols constitue un véritable critère de différenciation des sols, mesurable directement sur le terrain et observable par télédétection.

La carte finale des formations superficielles montre qu'il existe des forts risques d'érosion des zones hautes, d'ensablement des zones basses et salinisation des espaces proches de sebkha. A cet effet, il est important de prendre des décisions pour éviter la perte continue des terres de la région.

Cependant, il serait intéressant, pour un futur travail de recherche de :

1-développer une relation teneur en sels-réflectance comme signe indirect de salinisation des terrains de région test.

2-déterminer les spectres des sols sur le terrain au moyen d'un spectroradiomètre portable (0,4 - 2 μm) placé dans des conditions de mesure proches de celles des capteurs de la télédétection spatiale.

Mots clés : Sahara, Ouargla, télédétection, sol, Sebkha, états de surface de sol, minéralogie, géochimie

ABSTRACT

This study aims to characterize the mineralogical and geochemical soil surface in the northern Sahara with as study area: the area north of the region of Ouargla. The work is done by combining the land datas and data processing of remote sensing. Numerical processing has allowed classifying the satellite image and bringing out at the end the surficial mappe of our study area. The research approach used in this study and the results can be extrapolated to other regions where similar relations climate/surface composition of soil are equivalent.

The comparison of remote sensing data and field data collected have lead to the design of the legend of the settled map with nine major soil surface states:

- Surface wind medium to coarse sands;
- Surface fine to medium silty sands (alluvial sand) ;
- Surface Pliocene Continental Shelf (reg limestone) ;
- Surface Terrace alluvial ;
- Surface red Sandstone Mio-Pliocene ;
- Surface white gypsum sands ;
- Surface crusting gypsum ;
- Surface Saline and wet soils ;
- No soil (water and vegetation).

Indeed, the mineralogical composition of soils is a real differentiator soil, measured directly on the ground and observable by remote sensing.

The final surficial mappe shows that there are high-risk erosion of high areas, silting of low areas and salinization of areas close to salt lake. For this purpose, it is important to take decisions to prevent the continual loss of land in the region.

However, it would be interesting for future research work:
1-develop a relationship salt content-reflectance as indirect evidence of salinization of land area test.
2-determine the spectra of the soils in the field using a portable spectroradiometer (0.4 to 2 μm) placed in the measuring conditions close to those of remote sensing sensors.

Keywords: northern Sahara, Ouargla, soil, Sebkhha, remote sensing, surficial mappe, mineralogy, geochemistry, soil surface.

ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى التوصيف المعدني والجيوكيميائي لسطح التربة في الصحراء الشمالية الشرقية وكمثال لدراسه: المنطقة الواقعة شمال منطقة ورقلة. يتم خلال هذا العمل الجمع بين المسح الأراضى ومعالجة بيانات الاستشعار عن بعد. وقد سمحت معالجة الرقمية لصور القمر الصناعي بتصنيف الصور الفضائية و ابراز الخارطة السطحية لمنطقة دراستنا. ويمكن استقراء مناهج البحث المستخدمة في هذه الدراسة ونتائجها إلى مناطق أخرى حيث تتماثل العلاقات المناخ و سطح تكوين التربة مقارنة ببيانات الاستشعار عن بعد والبيانات الميدانية التي تم جمعها قادة إلى تصميم مفتاح الخريطة النهائي مع تسعة حالات رئيسية لسطح التربة

- سطح رمال الرياح خشنة إلى متوسط ؛
- سطح رمال متوسطه إلى ناعمه طميبه (الرمال الطمي) ؛
- سطح هضبة البليوسين القاري (رق الحجر الجيري)؛
- سطح رمال الوديان القديمه؛
- سطح الحجر الرملي الأحمر MIO-البليوسيني ؛
- سطح رمال الجبسيه بيضاء؛
- سطح القشره الجبسيه؛
- سطح التربة المالحة والأسطح الرطبة؛
- لا التربة (المياه والغطاء النباتي)..

التركيبه المعدنيه لتربه من أهم الخصائص التي يمكن الإعتماد عليها في تصنيف سطح التربه، وتقاس على الأرض مباشرة، ويمكن ملاحظتها بواسطة الاستشعار عن بعد. الخارطة السطحية النهائية تبين أن هناك مجالات معرضه لمخاطر تآكل في المناطق المرتفعه، تراكم الرمال في المناطق المنخفضه وتملح لمناطق القريبة من السبخه والأحواض المائيه المالحة لهذا الغرض، يجب اتخاذ القرارات المناسبه للحيلولة دون استمرار فقدان الأراضى في المنطقه. ومع ذلك، سيكون من المهم للعمل البحثي في المستقبل:

- 1 تطوير علاقة بين كمية الملح المحتوى في سطح التربه و الانعكاس كدليلا غير مباشر عن ملوحة مساحة الأرض.
- 2 تحديد أطياف التربة في الحقل باستخدام مقياس الطيف المحمول (0.4 إلى μm^2) في ظروف قياس قريبة من ظروف قياس أجهزة الاستشعار عن بعد.

الكلمات الدالة: الصحراء الشمالية، ورقلة، التربة، السبخة، التوصيف المعدني والجيوكيميائي , بيانات الاستشعار, لصور القمر الصناعي.

REMERCIEMENT

C'est une habitude saine que de remercier au début d'un tel travail tous ceux qui, plus ou moins directement, ont contribué à le rendre possible. Même si dans mon cas, cette liste peut sembler plus longue que d'habitude, c'est avec mon enthousiasme le plus vif et le plus sincère que je voudrais rendre mérite à tous ceux qui (plus ou moins récemment) à leur manière m'ont aidé à mener à bien cette thèse.

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes très vifs remerciements à tous mes enseignants de magister de la filière géologie /option géochimie de surface de la Faculté des sciences de la terre, université d'Ouargla, auxquels je dois beaucoup pour ma formation.

Je remercie particulièrement mon promoteur Monsieur HAMDY AÏSSA BELHADJ, qui m'a fait profiter de ses connaissances et de son soutien moral et qui n'a pas hésité un seul instant à m'encourager et pour tous les conseils et l'aide précieux qu'il m'a transmis.

Il m'est également impossible d'oublier Monsieur MOSTFAOUI TEWFIK (Chargé de recherche, CRSTRA. Biskra), pour avoir accepté la charge d'être mon Co-Rapporteur.

Au docteur NEZLI IMED EDDINE qui m'a honoré en acceptant d'être Président de ce jury mais également pour tous ses conseils toujours pertinents et attentifs et pour ses cours de Magister très précieux pour améliorer notre formation.

Aux docteurs HACINI MESSOUAD, AISSANI BELKACEM et DJIDEL MOHAMED, qui m'ont honoré en acceptant d'être Examineurs dans ce jury et d'être présents ici aujourd'hui. Chacun d'eux mérite un remerciement plus particulier.

Mes vifs remerciements vont également à monsieur DJILI et mademoiselle HELIMI de l'université d'Ouargla, pour leurs soutiens et ses encouragements. Je remercie également mes collègues GARRADI HOUCINE, TOUAHRI ABDELJABAR et MENAD-HOUARI IDDIR qui ont mis à ma disposition les informations nécessaires et l'aide qui j'ai besoin pour l'élaborer ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance à Madame BEN ARRACHE SOUAD, responsable de laboratoire DRX à l'université de Laghouat pour les services qu'ils m'ont rendus.

Je remercie l'ensemble du personnel de LTPS unité de Ghardaïa et spécialement NACER, SBAA, KALTHOUM, LAID ET TYAB, pour les services qu'ils m'ont rendus.

Je tiens également à remercier toute ma famille pour son soutien constant tout au long de mes études de magister et de préparation de cette thèse. Par crainte d'avoir oublié quelqu'un, que tous ceux et toutes celles dont je suis redevable se voient ici vivement remerciés.

Enfin merci à toutes les personnes que je n'ai pas citées ici et qui se reconnaîtront dans ces quelques lignes.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION :	0
LA PREMIERE PARTIE:ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
CHAPITRE .1. Contexte général de la région d'étude	3
1.1- Introduction	3
1.2- Situation géographique	3
1.3-Cadre géologique	4
1.3.1/Cadre géologique régional	4
1.3.1.1-Le Paléozoïque (Primaire)	4
1.3.1.1-c /Silurien.....	5
1.3.1.1-d/Dévonien	5
1.3.1.1-e/Carbonifère	6
1.3.1.2/Le mésozoïque (secondaire)	6
1.3.1.2-a/Le Trias	6
1.3.1.2-b/Le Jurassique.....	6
1.3.1.2-c/Le Crétacé	6
1.3.1.2-d/Le Néocomien	6
1.3.1.2-e/Le Barrémien	6
1.3.1.2-f/L'Aptien	7
1.3.1.2-g/L'Albien	7
1.3.1.2-h/Le Cénomanién	7
1.3.1.2-i/Le Turonien	7
1.3.1.2-j/Le Sénonien.....	7
1.3.1.3-Le cénozoïque (Tertiaire)	8
1.3.1.3-a/L'Eocène	8
1.3.1.3-b/Le Mio-Plio-Quaternaire.....	8
1.3.1.4/La tectonique	9
1.3.2-/Cadre géologique local	10
1.3.2.1/Les affleurements	10
1.3.2.2/Litho-stratigraphie.....	10
1.3.2.2-a/Le Barrémien	10
1.3.2.2-b/L'Aptien.....	10
1.3.2.2-c/L'Albien	10
1.3.2.2-d/Le Vraconien	11
1.3.2.2-e/Le Cénomanién	11
1.3.2.2-f/Le Turonien	11
1.3.2.2-g/Le Sénonien	11
1.3.2.2-h/Le Sénono-Eocène	12
1.3.2.2-i/Le Mio-Pliocène	12
1.3.2.2-j/Le Quaternaire	13
1.3.3/La géologie de surface	15
1.3.3.1/Le quaternaire des régions sahariennes	15
1.3.3.2/Les sols et états de surfaces de la région d'Ouargla	16
1.3.3.2. a/Sur le plateau	16
1.3.3.2. b/Sur le glacis	16
1.3.3.2. c/Dans le chott	16
1.3.3.2. d/Les sols salés de la sebkha	16
1.3.3.2. e/Les sols du centre de la sebkha	16
1.3.3.2. g/Les sols de la bordure de la sebkha	16
1.3.3.2. h/Les dunes sont des regosols sableux	17

1.4. L'hydrologie	17
1.5- L'hydrogéologie.....	18
1.6-Le climat	19
1.6.1/ Les précipitations	19
1.6.2/ La température	20
1.6.3/ L'évaporation	21
1.6.4/ L'humidité	21
1.6.5/ L'insolation	22
1.6.6/ La nébulosité	22
1.7- Caractéristiques géomorphologiques de la région d'Ouargla	23
1.8- Réseaux hydrographiques de la région d'Ouargla.....	24
1.8.1/ Oued Mya.....	24
1.8.2/ Oued N'sa et Oued M'zab	25
CHAPITRE. 2- Le principe physique de la télédétection.....	27
2.1. Définition	27
2.2- Les dimensions de la télédétection.....	27
2.2.1)- La dimension spectrale.....	27
2.2.2)- La dimension spatiale.....	28
2.2.3)- La dimension temporelle	28
2.2.4)- La dimension directionnelle.....	28
2.3 Les composantes des états de surfaces	29
2.3.1- Graviers et caillouteux.....	29
2.3.2- Faciès/ rugosité	30
2.3.3- Texture et porosité	30
2.3.4- Les croûtes de surface.....	30
2.3.5- Les formations géologiques et la lithologie.....	31
2.3.6- Le microrelief	31
2.3.7- L'humidité de surface.....	33
2.3.8- La couleur de surface.....	33
2.3.8.1- Relation couleur & composition des sols.....	34
2.4- Conclusion.....	34
CHAPITRE.3- Description des méthodes de mise en œuvre	35
3-1- Critères de choix de site étudié.....	35
3-2- Présentation de site d'étude	35
3-3- Choix de la méthode d'investigation	35
3-4- Sur terrain	36
3.4.1. Objectifs.....	36
3-5- Au laboratoire.....	36
3.5.1. Les méthodes analytiques	36
3.5.1.1/ Acquisition des données analytiques	36
3.5.1.2/ Analyses physiques et chimiques	37
3.5.1.3/ Analyses minéralogique	37
3.5.1.3.1/ Analyse par diffractomètre aux rayons X.....	37
3.5.2. Les traitements numériques de l'image satellitale.....	39
3.5.2.1/ Présentation d'ERDAS IMAGINE	39
3.5.2.2/ Les données de Télédétection	45
3.5.2.2.a/ Images satellitaires	45
3.5.2.2.b/ Le choix de la date de la prise de vu	45
3.5.2.3/ Traitement numérique de l'image.....	46
3.5.2.3.1/ Pré-Traitement.....	46

3.5.2.3.1.a / Corrections géométriques et radiométriques	46
3.5.2.3.1.b/Traitement de la distribution spectrale	46
3.5.2.3.1.c/Les rapports	46
3.5.2.3.2./Analyse en composantes principales	47
3.5.2.3.3./Réalisation de la composition colorée	47
3.5.2.4/Les classifications	48
3.5.2.4.1/La classification non supervisée	49
3.5.2.4.2/Les traitements statistiques	50
3.5.2.4.3/Le choix des classes	50
3.5.2.4.4/Réalisation du profil spectral sur image	51
3.5.2.4.5/Classification supervisée	52
3.5.2.5/Les paramètres influant la classification de l'image	52
3.5.2.6/Vérification de la précision de la classification.....	53
3.5.2.6.1/Teste de séparabilité	53
3.5.2.6.2/Matrice de confusion.....	54
3.5.2.7/le résultat final du Classification.....	56
3.5.2.8/Présentation des résultats.....	56
3.5.2.8.a/Le système de projection	56
3.5.2.8.b/Le choix de L'échelle	56
3.5.2.8.c/Conception de la légende	56

TROISIEME PARTIE RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE.4. Résultats des prospections sur le terrain.....	70
4.1. Introduction :	70
4.2/Les états de surface salins	70
4.3/Les états de surface à blocs	70
4.4/Etat de surface sableux.	70
4.5/Etat de surface reg gravelo-caillouteux	70
4.6/Etat de surface ancienne terrasse alluviale	70
4.7/Etat de surface grés rouge Mio-Pliocène	71
4.8/état de surface encroûtement gypseux	71
4.9/ Les chotts et sebkhas	71
4.2. Photographies des différents états de surface de sol	72

CHAPITRE.5. Discussion des résultats de la classification de l'image

Landsat7	81
5.1. Interprétation de la carte finale des états de surface des sols :	82
5.1.2-les surfaces à sables éoliens et alluviaux	82
5.1.3-Les surfaces gypseuses	82
5.1.4-Les surfaces à sols salins humide et efflorescences saline	82
5.1.5-Les surfaces calcaire et calcaire dolomitique	82
5.1.7-Les terrasses alluviales)......	83
5.2-Les histogrammes bi-canaux de l'image Landsat	83
5.3-Les comportements spectraux des différents états de surfaces de sol.....	86
5.4-La droite des sols	88
5.5-Les modèles d'interprétation des sols sur l'image.....	89

CHAPITRE.6. Discussion des résultats géochimiques et minéralogiques 92

6.1-Etat de surface à sable éolien moyen à grossier	92
6.1.1/Localisation	92
6.1.2/Description visuelle	92
6.1.3/Caractéristiques physico-chimiques, géochimiques et minéralogique ...	92
6.1.4/- Résultats d'analyses en DRX	93

6.2-Etat de surface à sables fins à moyens limoneux	93
6.2.1/Localisation	93
6.2.2/Description visuelle	93
6.2.3/Caractéristiques physico-chimiques, géochimiques et minéralogique...	93
6.2.4/Résultats d'analyses en DRX :.....	94
6.3-Etat de surface à sables fins gypseux blanchâtres :	94
6.3.4/Résultats d'analyses en DRX :.....	95
6.4-Etat de surface Terrasse alluviale :	96
6.4.1/Localisation : coté Est de la région d'étude (Planche.5.1).	96
6.4.2/Description visuelle	96
6.4.3/Caractéristiques physico-chimiques, géochimiques et minéralogique :..	96
6.4.4/Résultats d'analyses en DRX :.....	96
6.5-Etat de surface Encroûtement gypseux :.....	97
6.5.1/Localisation :	97
6.5.2/Description visuelle :	97
6.5.3/Caractéristiques physico-chimiques, géochimiques et minéralogique :..	97
6.5.4/Résultats d'analyses en DRX :.....	97
6.6-Etat de surface :.....	98
6.6.1/Localisation :	98
6.6.2/Description visuelle :	98
6.6.3/Caractéristiques physico-chimiques, géochimiques et minéralogique :..	98
6.6.4/Résultats d'analyses en DRX :.....	99
6.7-Etat de surface plateau pliocène continental (Reg calcaire) :	99
6.7.1/Localisation	99
6.7.2/Description visuelle :	99
6.7.3/Caractéristiques physico-chimiques, géochimiques et minéralogique :..	99
6.7.4/Résultats d'analyses en DRX :.....	100
6.8-Etat de surface grès rouges Mio_Pliocène:.....	100
6.8.1/Localisation	100
6.8.2/Description visuelle	100
6.8.3/Caractéristiques physico-chimiques, géochimiques et minéralogique :	100
6.8.4/Résultats d'analyses en DRX :.....	101
6.9-Etat de surface : Non sol	101
6.9.1/Localisation	101
6.10-Relation entre les différents états de surfaces	102
6.10.1-Relation génétique.....	102
6.10.2-Relation spatial	102
6.10.3-Relation chronologiques :	103
6.11-Conclusion :.....	104
CONCLUSION GENERALE :.....	105
Références bibliographiques	107
LISTE DES FIGURES.....	113
LISTE DES PHOTOS.....	115
LISTE DES PLANCHES.....	115
LISTE DES TABLEAUX.....	116
DOCUMENTATION CARTOGRAPHIQUE :	117
Cartes topographiques :.....	117
Cartes géologiques :.....	117
Image satellitaire du capteur ETM+ de landsat 7:	117

INTRODUCTION :

Les cartes géologiques et pédologiques sont des outils fondamentaux pour de multiples applications.

Toutefois, lors d'un travail de cartographie géologique ou pédologique, les réalisateurs sont confrontés à différents problèmes. Un accès limité aux affleurements (ensablement, relief escarpe et propriété privée), une durée de mission limitée (des conditions climatiques plus ou moins favorables) engendrent une hétérogénéité et une discontinuité de l'information recueillie.

Les régions sahariennes arides sont souvent difficilement accessibles, ainsi leurs cartographies avec les méthodes ordinaires (visites de terrain, échantillonnage..... ect) sont très longues et insoutenables en plus les études géologiques et pédologiques localisées ne permettent pas aux organismes chargés du développement de ces régions de comprendre de façon rationnelle les espaces très étendues dont ils sont chargés.

Pour pallier ces problèmes, l'utilisation de données de télédétection spatiales peut constituer une source d'information considérable. En effet chaque capteur mesure une propriété physique de la surface terrestre avec des caractéristiques précises (résolution spatiale, spectrale et radiométrique, angle de prise de vue, date d'acquisition et rapport Signal sur Bruit). L'utilisation de données de télédétection permet de disposer d'informations sous forme numérique et toutes géoréférencées dans un même système.

Divers auteurs (Escadafal, 1989 ; Courault, 1989 ; Girard et Isavwa, 1990 ; Goossens et Van Ranst, 1998 ; Girard. M.C et Girard. C.M, 1999 ; Hamdi-Aïssa et Girard, 2000 ; Hamdi-Aïssa, 2001 Benchallal & al, 2009) ont montré qu'il existe des fortes relations entre les comptes numériques des images satellitaires et les états de surface des formations superficielles, en particulier en milieu aride. Détection facile par les satellites de la surface du sol dû à la faible densité du couvert végétale.

Les différents états de surface du sol sont caractérisés par : leur couleur, leur rugosité (surfaces battantes, croûtes, efflorescence, éléments grossiers, ombre, texture, structure), leur teneurs en calcaire, en matière organique, en fer, leur humidité et leur composition chimique.

C'est dans cette optique, que la présente étude intitulée "Essai de caractérisation géochimique et minéralogique par télédétection de la région Nord d'Ouargla" a été proposée dans le cadre du projet PNR (**ALLUVSOL**) : "les sols des milieux alluvionnaires en zones sahariennes : inventaire, organisation spatiale, qualité des sols et approche paleo-écologique", menée par le Laboratoire de biogéochimie des milieux désertiques de université de Ouargla en collaboration avec Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les régions arides (C.R.S.T.R.A Biskra).

Le présente travail vise l'utilisation de la télédétection pour la cartographie et la caractérisation géochimique et minéralogique de la surface du sol en milieu alluvionnaire, il consiste en première étape à la discrimination des états de surface de sols puis à l'analyse et la caractérisation physico-chimique et minéralogique de chaque états de surface à part.

INTRODUCTION

En référence au thème sus-cité, cet ensemble de réflexions conduit à poser quelques questions spécifiques qui sont :

- 1-Peut-on arriver à établir des cartes des sols et/ou des cartes géologiques par exploitation des données de télédétection spatiales ?
- 2-Y'a t-il une relation direct ou indirect entre les caractéristiques physico-chimiques de surface de sol et leurs réponses spectrales (réflectance) ?
- 3-Quels peuvent être les facteurs les plus influant des réponses spectrales de surface de sol et comment réagissent sur le comportement de ce paramètre prépondérant du sol ?

Pour répondre à ces différentes questions, la présente étude s'est articulée autour de six (6) chapitres.

Après une présentation du cadre général de la région d'étude (chapitre-1), nous définirons dans la deuxième partie (chapitre-2) les notions théoriques de la télédétection et les composantes des états de surface.

Dans le troisième chapitre nous présentons la problématique, les objectifs et la démarche que nous allons suivre. Une troisième partie subdivisée en trois chapitres fera le point des résultats auxquels nous sommes parvenus.

En fin dans le sixième et le dernier chapitre nous concluons ce travail par une synthèse, quelques recommandations et perspectives.

LA PREMIERE PARTIE:ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE .1. Contexte général de la région d'étude

1.1- Introduction :

La région d'Ouargla, par sa position géographique centrale et de sa proximité aux bassins pétroliers et gaziers, s'installe progressivement comme le centre administratif, technique et industriel du territoire saharien (Fig.1.1).

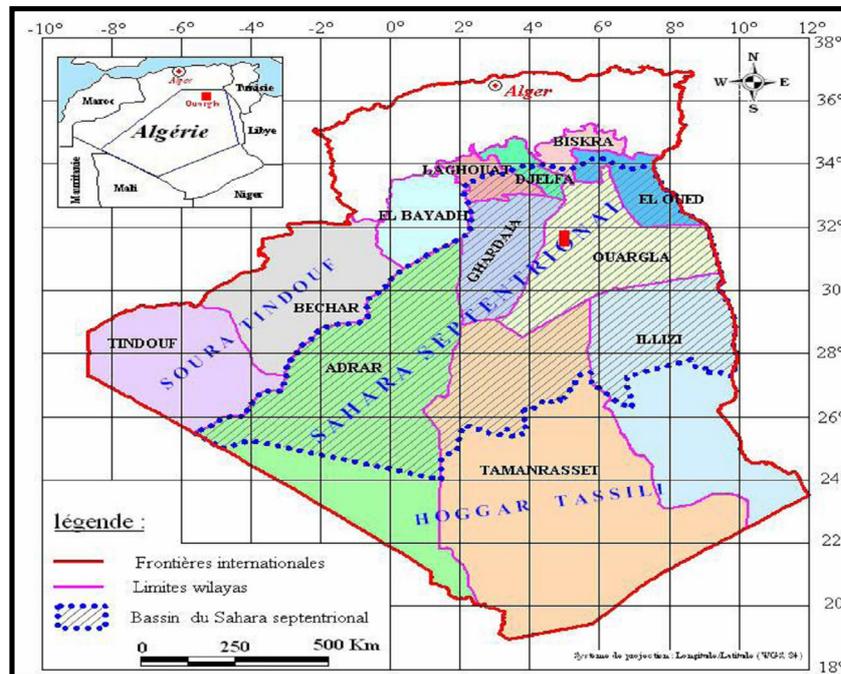


Fig. 1.1 : Carte de situation géographique

1.2- Situation géographique :

La ville de Ouargla se situe dans une dépression (cuvette), elle inclut les agglomérations de Ouargla, N'Goussa, Rouissat, Ain El Beida et Sidi Khouiled (Fig.1.2).

Le site concerné par cette étude se trouve au Nord Est de la ville d'Ouargla et s'étend entre les coordonnées géographiques suivantes :

✓ **X = 15° 15' à 15° 4' Est ;**

✓ **Y = 32° 15' à 32° 30' Nord.**

Elle présente une superficie totale presque de 259872.5.ha (2599km²) qui s'étale sur une longueur d'environ de 60km et une largeur de 44km de, orientée Sud-Ouest / Nord-Est ; limitée :

- Au Nord par l'agglomération d'Elhjira et versant de Oued N'sa ;
- A l'Est par les Ergs de Touil et Arifdji la route Ouargla-Hassi Mesouad ;
- Au Sud par les dunes de Sedrata et l'agglomération de N'Goussa ;
- A l'Ouest par l'Oued N'sa et Oued M'zab (Fig.1.2).

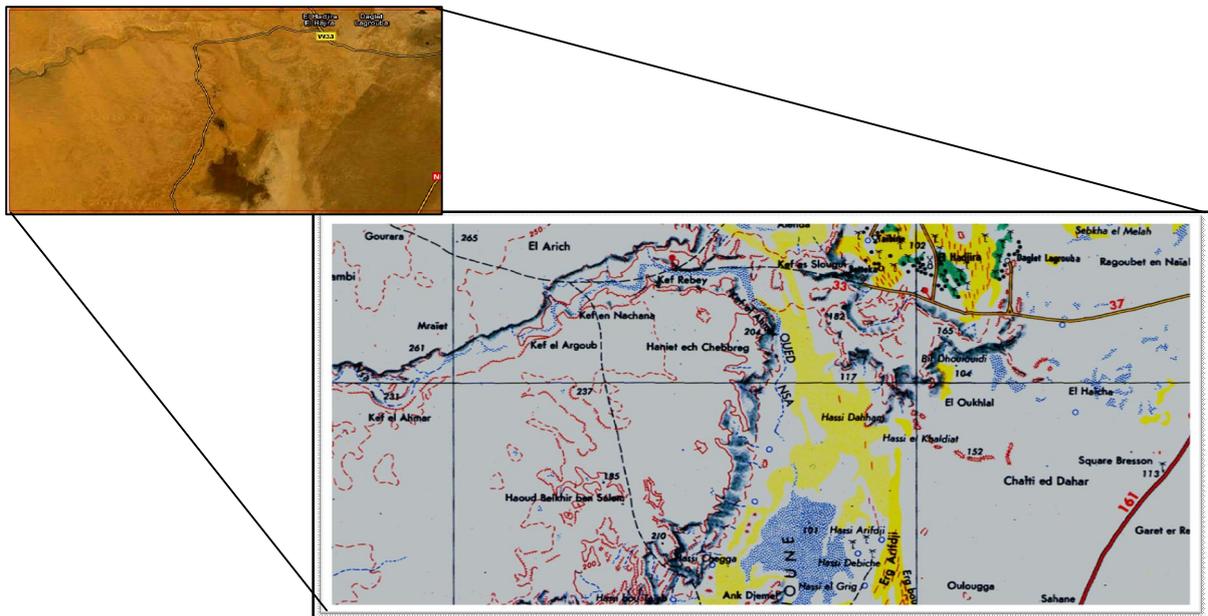


Fig. 1.2 : La situation géographique et géomorphologique de la zone d'étude

1.3-Cadre géologique :

Introduction :

Dans ce chapitre consacré à la géologie de la région, nous allons présenter une synthèse bibliographique des travaux de nombreux auteurs qui ont publié des travaux sur la géologie du Sahara septentrional (Conrad., 1969, Busson;1970, Fabre, 1976).

1.3.1/Cadre géologique régional :

Par opposition à l'Algérie du Nord considérée comme une zone instable, complexe et mobile, le Sud ; à savoir la plate forme Saharienne est stable, monotone, consolidé depuis des centaines de millions d'années.

La région d'Ouargla fait partir du bassin sédimentaire Nord-Est du Sahara septentrional (Fig.1.13), dont les grands traits géologiques sont :

1.3.1.1-Le Paléozoïque (Primaire) :

1.3.1.1-a/Cambrien : Les dépôts cambriens reposent sur le socle cristallin, formé par : au sommet, la zone des alternances qui constitue la transition entre le cambrien et l'Ordovicien. Elle est formée de grés fins; plus ou moins quartzitiques et d'argilites noires ou vertes silteux micacées à nombreux galets de silts bruns pyriteux. Les tigillites sont abondantes et la sédimentation de type fluidal et le passage au faciès sous-jacent est progressif (Fig.1.14).

Le cambrien (s.s) qui est représenté par des grés quartzites blancs, fins à moyens à ciment siliceux abondant et à nombreux feuillet d'argilite vert très micacée, plus fréquents vers le haut. Les tigillites sont rares et la stratification de type oblique est représentée par des grès et des quartzites a passées conglomératiques (Hamel, 1988).

1.3.1.1-b/L'Ordovicien :

Il est entièrement détritique, constitué de haut en bas par la dalle quartzeuse de M'kratta, les argiles microconglomératique, les grés de Oued Saret, les grés

d'Azél, les grès de Ouargla, les grès de Hamra, les grès d'El Atchane et enfin les grès d'El Gassi (Hamel, 1988).

Les coupes les plus complètes se situent dans les dépressions de l'oued Mya et de Timimoun.

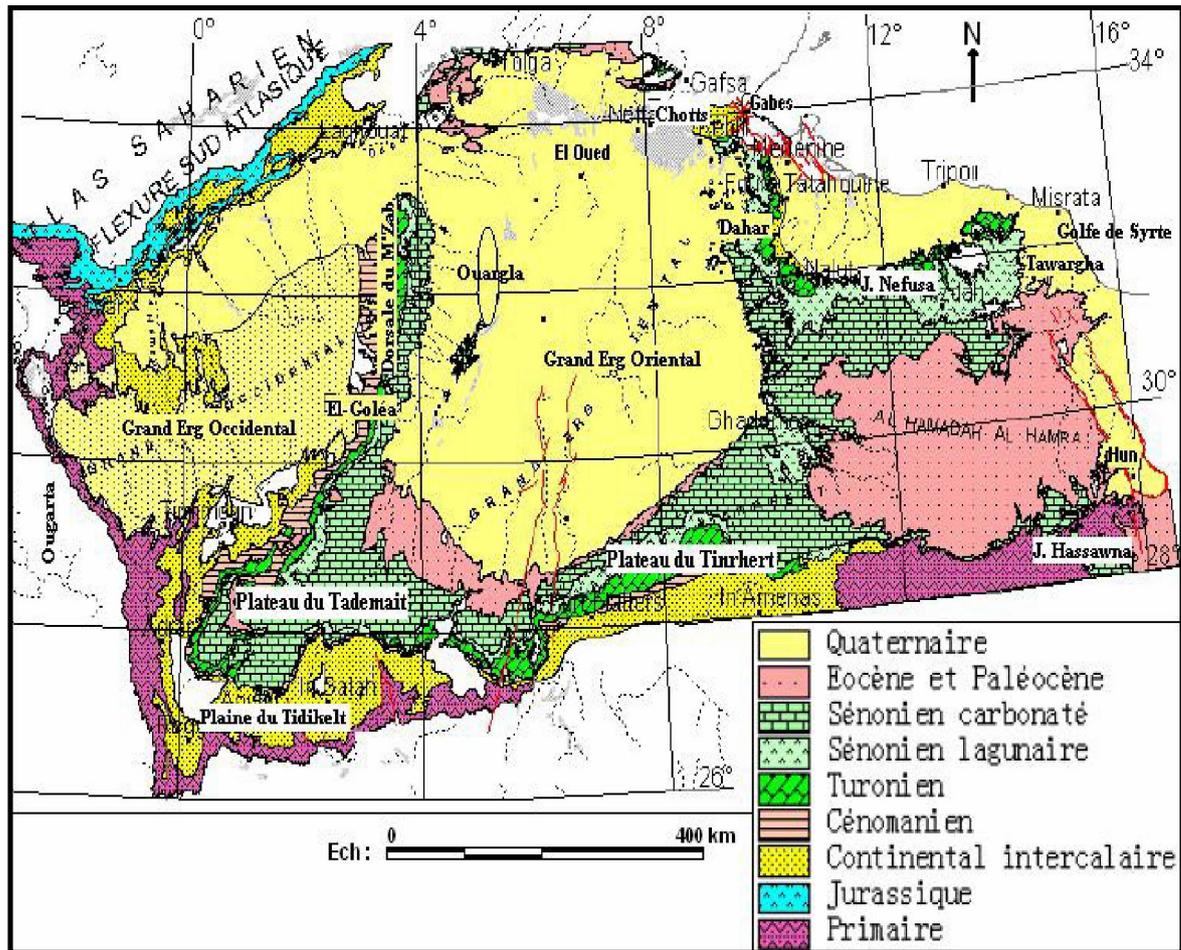


Fig. 1. 3: Carte de la géologie régionale (OSS, 2003)

Les dépôts proximaux (fluviaux) s'agencent autour des régions émergées et forment les falaises du Tassili interne. Les dépôts marins se rencontrent au Nord en sub-surface et dans ce qui est devenu les chaînes de l'Ougarta. Des traces de glaciation ont été décelées dans l'Ordovicien terminal.

1.3.1.1-c /Silurien :

Cette période est caractérisée par une sédimentation terrigène fine, argileuse en milieu marin. Cette série d'apparence homogène est représentée par des argiles noires à Graptolites et des argiles à passés gréseux et rares bancs carbonatés.

1.3.1.1-d/Dévonien :

Le Dévonien inférieur est essentiellement argilo-gréseux présentant des faciès très variés.

- Le Dévonien moyen et supérieur est caractérisé par des lacunes de sédimentation. Autour des affleurements du socle, s'étagent des couches gréseuses et schisteuses des Tassilis. Les mouvements hercyniens du Périmo-Carbonifère, vont provoquer l'érosion du bouclier. Il s'installe alors une grande période continentale avec pénéplanation post-hercynienne pendant le Trias et

le Jurassique et formation d'un manteau de grès, de sable et d'argile, qui va constituer le "Continental Intercalaire".

1.3.1.1-e/Carbonifère :

Carbonifère est constitué de calcaire fossilifère au sommet et de grès à la base.

1.3.1.2/Le mésozoïque (secondaire) :

1.3.1.2-a/Le Trias :

Busson (1972), souligne la grande variabilité de faciès et d'épaisseur du Trias. Il est divisé en grandes unités lithologiques distinctes qui peuvent être : salifères, argilo-gréseuses ou carbonatées. L'épaisseur de ces différentes formations varie principalement là où s'intercalent des bancs salifères. L'épaisseur du Trias argilo-gréseux inférieur augmente vers le Nord-Ouest (150-180 m). Elle diminue dans les zones des haut-fonds (Hassi Messaoud et Rouhd El Baguel). Le Trias salifère présente son grande épaisseur à 700m au Nord-Est de Ghadamès, il atteint 1300m à Hassi Messaoud.

1.3.1.2-b/Le Jurassique :

Le Jurassique inférieur (Lias et Dogger) comprend principalement des couches évaporitiques constituées essentiellement de sel, d'anhydrite et d'argile surmonter des couches franchement marines et qui se présentent sous forme de calcaires et d'argiles avec des bancs d'anhydrite. Par contre, le Jurassique moyen est caractérisé par une transgression couvrant tout le bassin du Grand Erg Oriental et les dépôts y sont épais.

Le Jurassique supérieur (Malm) est caractérisé par une permanence relative du régime marin avec des sédiments de milieux confinés. Dans la partie occidentale du bassin, le régime marin accuse une certaine régression à l'image de ce qui se passe plus à l'Ouest et vers le Sud. Le passage du Jurassique supérieur au Crétacé inférieur se caractérise par des apports terrigènes ayant pour origine les reliefs nourriciers situés au Sud du bassin saharien (Hoggar), (Busson, 1972).

1.3.1.2-c/Le Crétacé :

L'étude des données des sondages qu'a effectué Busson (1972), a permis de préciser la succession lithologique au cours du Crétacé. Il est constitué par des couches terrigènes fluvio-deltaïques qui sont en contraste lithologique et sédimentaire avec les formations marines du Jurassique supérieur. Il comprend, en partant des formations les plus anciennes :

1.3.1.2-d/Le Néocomien :

Comprend dans le bas Sahara des argiles vertes et rouges avec de l'anhydrite en bancs massifs plus fréquents à la base. Elles sont surmontées par une alternance de dolomies et d'argiles Busson, (1972).

1.3.1.2-e/Le Barrémien :

Selon Busson (1972), cet étage est caractérisé par un épandage généralisé des formations détritiques du Crétacé inférieur jusque au bas Sahara. Ces formations se présentent sous forme des grès fins ou grossiers et d'argiles provenant apparemment du Sud (Hoggar). Les intercalations

carbonatées sont peu nombreuses et cantonnées au Nord-Est du Sahara algérien.

1.3.1.2-f/L'Aptien :

C'est un bon repère lithologique dans les sondages. Il est représenté dans la grande partie du bas Sahara, par 20 à 30m en moyenne, de dolomies alternant avec des lits d'anhydrite, d'argiles et de lignites (sédimentation lagunaire).

1.3.1.2-g/L'Albien :

Il est caractérisé par un remarquable retour de la sédimentation terrigène. Cet étage regroupe la masse des sables et argiles comprise entre la barre aptienne et l'horizon argileux sus-jacent attribué au Cénomaniens. On remarque que le changement de régime sédimentaire et l'arrivée en masse des sédiments détritiques s'est produite entre le Néocomien et le Barrémien et au cours de l'Albien, (Fabre, 1976).

1.3.1.2-h/Le Cénomaniens :

Il est formé par une alternance de bancs de dolomies, de calcaires dolomitiques, d'argiles et d'évaporites (anhydrite ou sel), son faciès varie, au Sud de Ouargla, les argiles et les évaporites dominent; au Nord, au contraire, les bancs de calcaire et de dolomies sont majoritaires; de plus, l'épaisseur augmente du Sud vers le Nord (de 50m dans le Tademaït à 350m dans le bas Sahara).

La présence de nombreux banc d'évaporites et d'argiles rendent le Cénomaniens imperméable (Bel et Cuhe, 1969). Selon Busson, 1972, le Cénomaniens inférieur à moyen est argileux dans le Tinhert et le bas Sahara ; le Cénomaniens supérieur y est calcaire.

1.3.1.2-i/Le Turonien :

Il se présente sous trois faciès différents, du Sud au Nord :
Au Sud du parallèle d'El Goléa, il est calcaro-marneux, Entre El Goléa et Djamaâ, il est essentiellement calcaire, Au Nord de Djamaâ, il est à nouveau calcaro-marneux. Son épaisseur moyenne varie entre 50 à 100m. Elle augmente cependant dans la région des chotts où elle dépasse les 300m (Bel et Cuhe, 1969).

1.3.1.2-j/Le Sénonien :

Il s'individualise en deux faciès :
Le Sénonien inférieur (Sénonien salifère et anhydritique) à sédimentation lagunaire caractérisée par des formations argileuses et salifères à anhydrite, il est très peu perméable, (Busson, 1972).
Le Sénonien supérieur (Sénonien carbonaté) se présente par des formations carbonatées perméables.

*1.3.1.3-Le cénozoïque (Tertiaire) :**1.3.1.3-a/L'Eocène :*

On distingue deux ensembles différents du point de vue lithologique, à la base : L'Eocène carbonaté formé essentiellement par des dolomies et des calcaires dolomitiques avec quelques intercalations de marnes, d'argile et même d'anhydrite et de sel. La puissance de cette formation varie entre 100 et 500m, l'épaisseur maximum se situant dans la zone du bas Sahara.

Au sommet l'Eocène évaporitique est formé par une alternance de calcaire, d'anhydrite et de marnes. Son épaisseur atteint une centaine de mètres sous les Chotts, (Bel et Cuche, 1969). L'Eocène constitue le dernier épisode marin du Sahara algérien, (Busson, 1972).

1.3.1.3-b/Le Mio-Plio-Quaternaire :

Le Tertiaire continental du Sahara peut être relativement épais (150m). Il se présente sous forme d'un faciès sableux et argileux avec du gypse. Dans le bas Sahara, la sédimentation lacustre se présente sous forme de séries sableuses et argileuses connues sous le nom du Continental Terminal (Mio-Pliocène) dont l'épaisseur peut atteindre dans la région des Chotts algéro-tunisiens quelques centaines de mètres. On y identifie, dans la région d'Oued Righ, deux niveaux aquifères au sein des sables qui sont séparés par une couche argileuse au milieu (première et deuxième nappe d'Oued Righ). L'ensemble est surmonté par le Plio-Quaternaire argilo-sableux et gypseux qui résulte de la sédimentation en milieu lacustre durant la phase d'assèchement des lagunes et des chotts, (Busson, 1972).

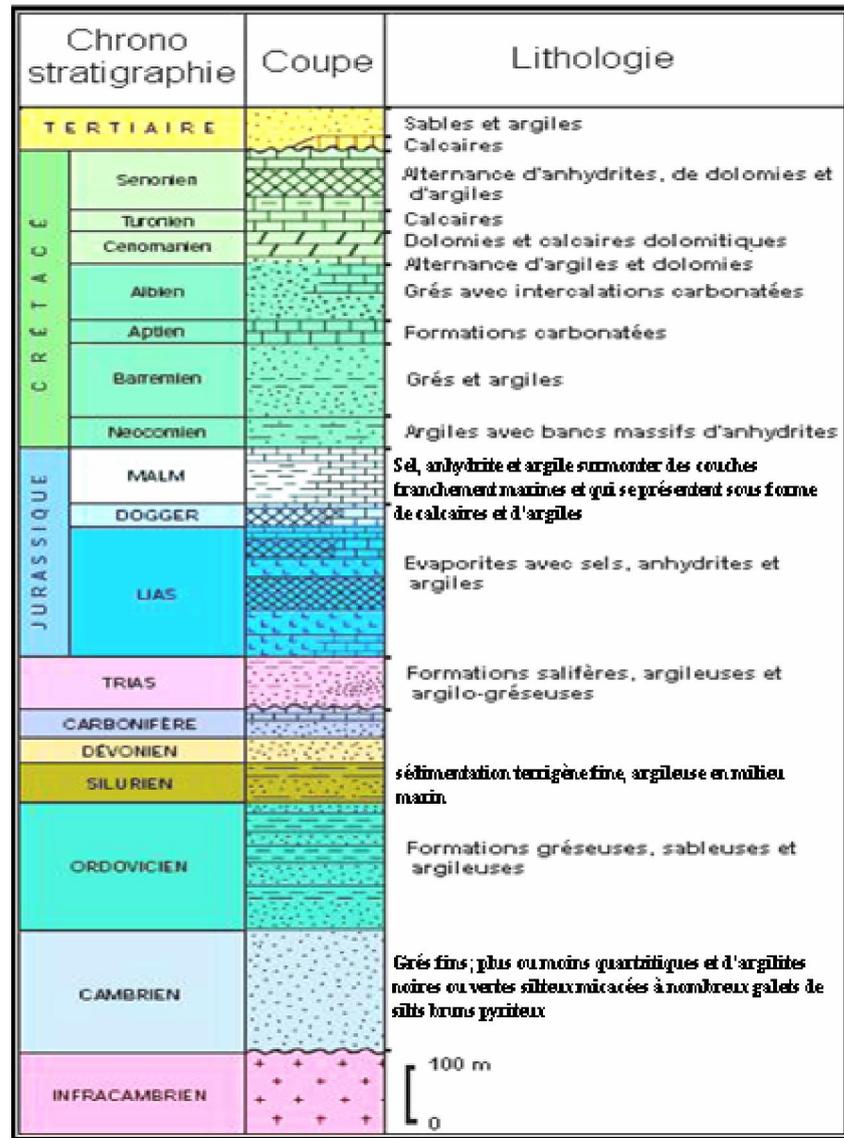


Fig.1. 4 : Colonne stratigraphique synthétique du Sahara Nord-Est Septentrional (Sonatrach & Schlumberger, 1990)

1.3.1.4/La tectonique :

La tectonique de la région d'Ouargla s'inscrit dans le cadre de la tectonique globale de la plateforme saharienne. Celle-ci a subi une structuration qui, quoique assez faible, s'est effectuée principalement au cours de deux cycles tectoniques :

- Le cycle panafricain qui a engendré des déformations sensiblement subméridiennes et qui a donné la dorsal Idjerne-M'zab. Cette structuration a été bien évidemment reprise par le cycle Hercynien ;
- Le cycle alpin, avec notamment sa phase atlasique, qui a donné des déformations sub-latitudales et à la suite de laquelle la dorsale Djamaa-Touggourt, est née.

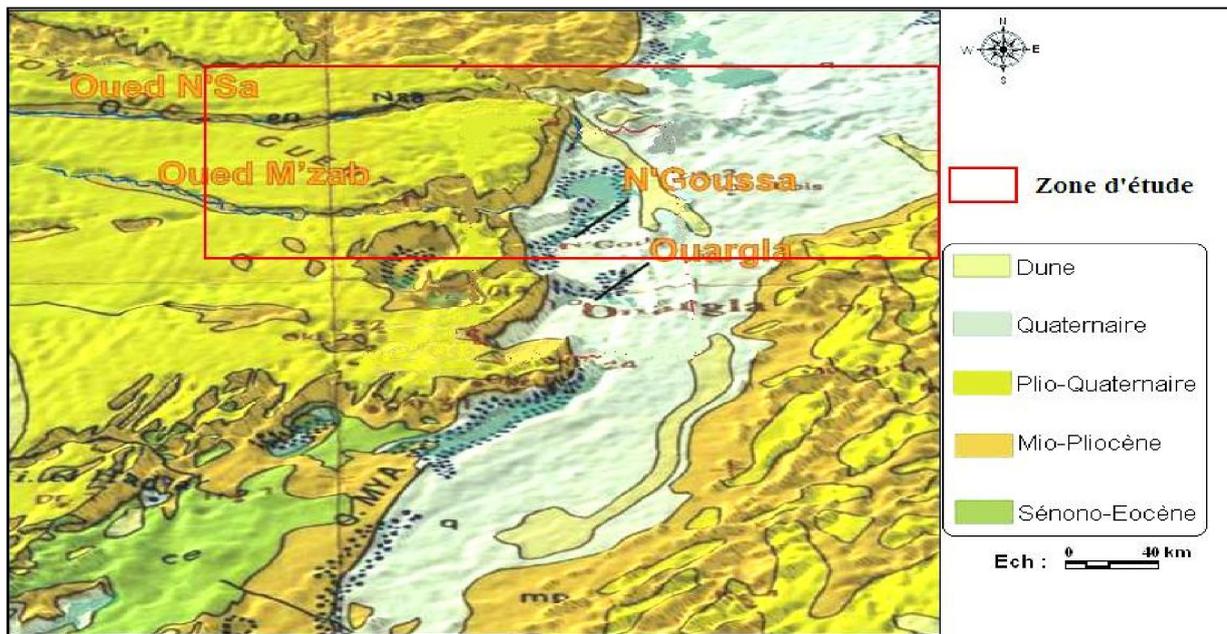


Fig. 1. 5 : la carte 3D de la géologie locale (BG, 2004)

1.3.2-/Cadre géologique local :

1.3.2.1/Les affleurements :

Dans la notre région d'étude et dans Ouargla en générale, seuls les terrains du Mio-Pliocène affleurent, ils sont recouverts par une faible couche de dépôts quaternaires (Ergs et Dunes) (Fig. 1.15 et 1.17).

1.3.2.2/Litho-stratigraphie : (Fig. 1.16 et 1.18)

1.3.2.2-a/Le Barrémien :

Capté à partir de 1500m environ. Il présente une alternance de grès et d'argile, avec des intercalations calcaro-dolomitiques.

1.3.2.2-b/L'Aptien :

Il est constitué par la "barre aptienne" dans la région d'Ouargla, elle est formée de marnes dolomitiques, gris, vertes, brunes ou blanches et de dolomies cristallines. Son épaisseur est variable, généralement inférieur à 50m.

1.3.2.2-c/L'Albien :

Il correspond à la série lithologique supérieure du Continental Intercalaire, des grès, argiles et des sables. L'épaisseur de ces formations est variable (> 400m). Les éléments détritiques (non argileux) sont largement prépondérants (70 à 90%) et sont représentés par des grès fins avec des passées de grès moyens et parfois des intercalations de sables grossiers à limons argileux ou carbonatés. On note des passées d'argiles brunes-rougeâtres, elles sont même pélitiques et sableuses dans les puits les plus septentrionaux.

1.3.2.2-d/Le Vraconien:

L'intercalation albo-cénomaniennne caractérise un épisode dolomitique remarquable entre les sables de l'Albien et les marnes du Cénomanienn, il est formé de dolomies et quelques fois de calcaires dolomitiques parfois argileux contenant de rares débris de mollusques, les épaisseurs y sont de 50 à 100m et argiles et marnes dolomitiques et des éléments détritiques.

1.3.2.2-e/Le Cénomanienn :

Il est formé de deux séries : (inférieure et supérieure):

La série inférieure est constituée par des argiles dolomitiques et des marnes grises, avec parfois des argiles brunes-rougeâtres ou grises-verdâtres, son épaisseur varie entre 60 et 80m. On note aussi quelques passées de calcaires dolomitiques en particulier à la partie médiane de la série.

La série supérieure est formée d'une alternance d'argiles et de marnes dolomitiques grises, parfois d'argiles salifères, de bancs d'anhydrite et de quelques intercalations dolomitiques, son épaisseur est de l'ordre de 70 m.

1.3.2.2-f/Le Turonien :

Il se présente sous forme d'une dalle "*barre turonienne*" ayant une épaisseur régulière de l'ordre de 70m. Il s'agit d'une formation essentiellement calcaire; calcaire poreux blancs, parfois grisâtres, pulvérulent, quelques fois dolomitique, de calcaire beige dolomitique et de calcaire fin légèrement dolomitique.

1.3.2.2-g/Le Sénonien :

Il est constitué de deux formations lithologiques superposées :

Le Sénonien lagunaire à la base qui est constitué par une alternance irrégulière de bancs d'anhydrite, de dolomies, d'argile et de sel. Les pourcentages varient d'un endroit à un autre :

L'anhydrite forme des bancs dont l'épaisseur peut atteindre 250m ;

La dolomie constitue parfois des barres plus importantes (\approx 60m);

Les niveaux d'argile et de marne ne dépassant généralement pas 120m d'épaisseur.

Le Sénonien carbonaté au sommet (200m environ); formé de calcaire blanc, tendre à moyennement dure par fois crayeux à vacuolaire avec passées de marne dolomitique grise tendre à pâteuse.

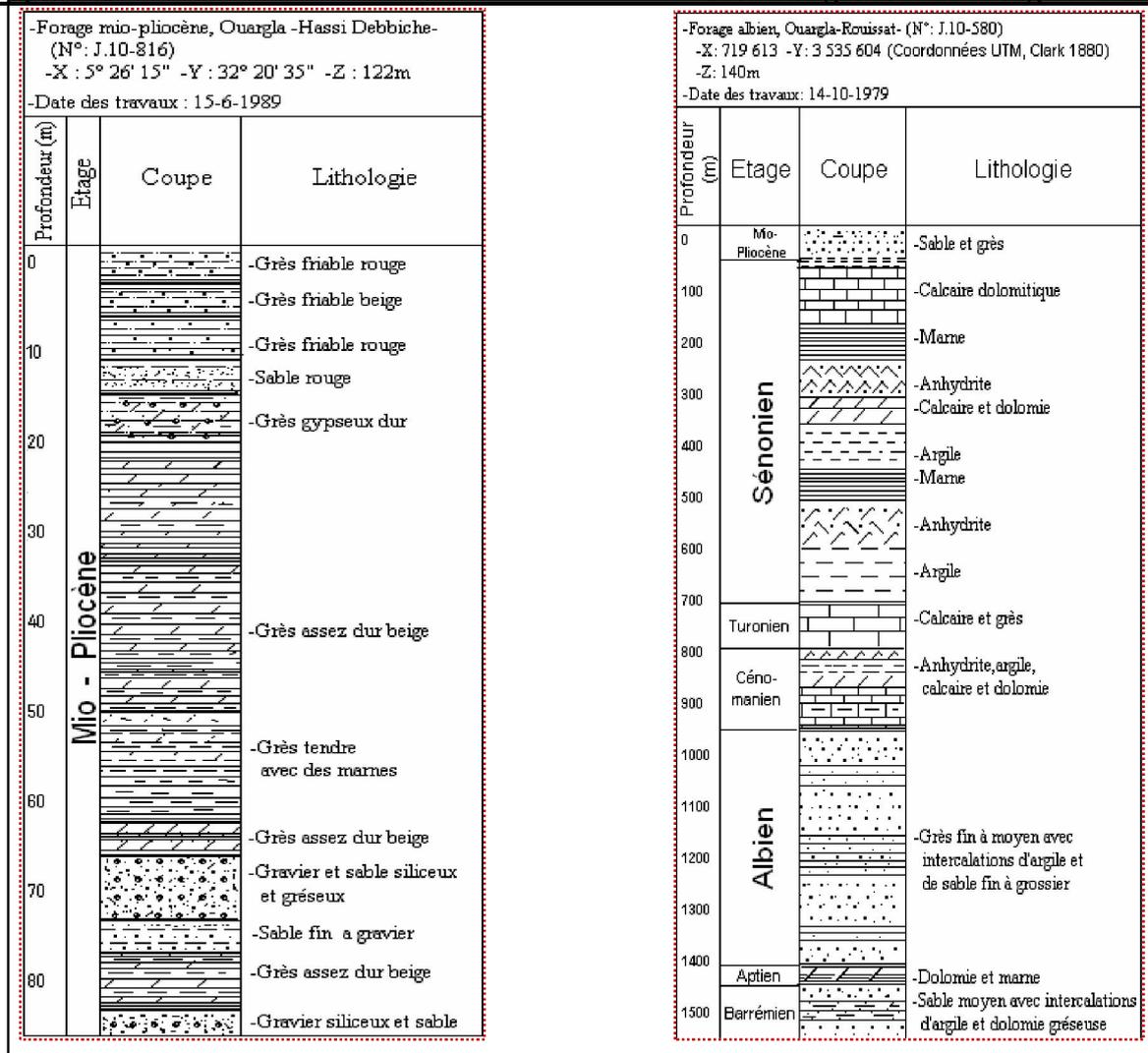


Fig. 1. 6 : Colonnes stratigraphique des sondages J.10-580 et J.10-816 (LATRECH, D. 1997)

1.3.2.2-h/Le Sénono-Eocène :

Il est formé essentiellement de carbonates ayant une épaisseur comprise entre 150 et 200m. Il s'agit de calcaires dolomitiques cristallins ou microcristallins parfois vacuolaire ou crayeux ou carrément argileux.

1.3.2.2-i/Le Mio-Pliocène :

Il correspond au Continental Terminal tel qu'il à été défini par Kilian, (1931). C'est un puissant ensemble de sables et d'argiles, qui s'étend sur tout le Sahara et qui repose en discordance sur le Sénono-Eocène (Fig.1.16).

On distingue quatre niveaux différents dans la région de Ouargla, se sont de bas en haut :

- Un dépôt argileux peu épais (< 10m) recouvrant dans la partie centrale de la cuvette et suivant une bande Nord-Sud du Sénono-Eocène.
- Un niveau grés-sableux qui devient argileux vers le sommet, c'est le niveau le plus épais (> 30m) et le plus constant.
- Un niveau argilo-sableux dont les limites inférieures et supérieures sont assez mal définies. Cette couche n'apparaît que dans certains endroits.

- Un niveau très épais (≈ 30m) dans la zone des chotts, à sommet affleurant sur de grandes surfaces et souvent constitué par une croûte de calcaire gréseux (croûte hamadienne).

1.3.2.2-j/Le Quaternaire :

A la base, il existe un niveau argilo-gréseux qui se présente comme une croûte ancienne. Le niveau le plus superficiel est constitué de sables éoliens parfois gypseux et de produit de remaniement des terrains du Mio-Pliocène (fig. I-16).

Les sondages superficiels effectués dans différentes localités de la cuvette, ont permis de rencontrer les ensembles suivants :

Sur les plateaux, le sol est constitué d'un matériau meuble exclusivement détritique, hérité de l'altération des grès à sable rouge du Mio-Pliocène, c'est le sol le plus pauvre en gypse dans la région, à 10m de profondeur, il s'agit d'un sol sableux à graviers. Sur les Chotts et les terrains intermédiaires, l'horizon de surface est une croûte gypseuse épaisse, blanchâtre partiellement couverte de voiles de sable éolien gypso-siliceux.

De 10 à 20cm de profondeur, on trouve un encroûtement gypseux pulvérulent, homogène de couleur jaune rougeâtre très claire. En dessous, on trouve un encroûtement gypseux induré de 40cm d'épaisseur ; plus en profondeur un tuf présente une teneur de gypse décroissante.

- **Les Sebkhass** : sont caractérisées par une salure extrêmement élevée, des croûtes salines reposent sur des matériaux limono-sableux.
- **Les dunes** : sont formées de sable éolien d'origine gréseux provenant de la Hamada Mio-pliocène. Elles existent dans les talwegs, sur les bordures des Sebkhass et sur les versants rocheux.

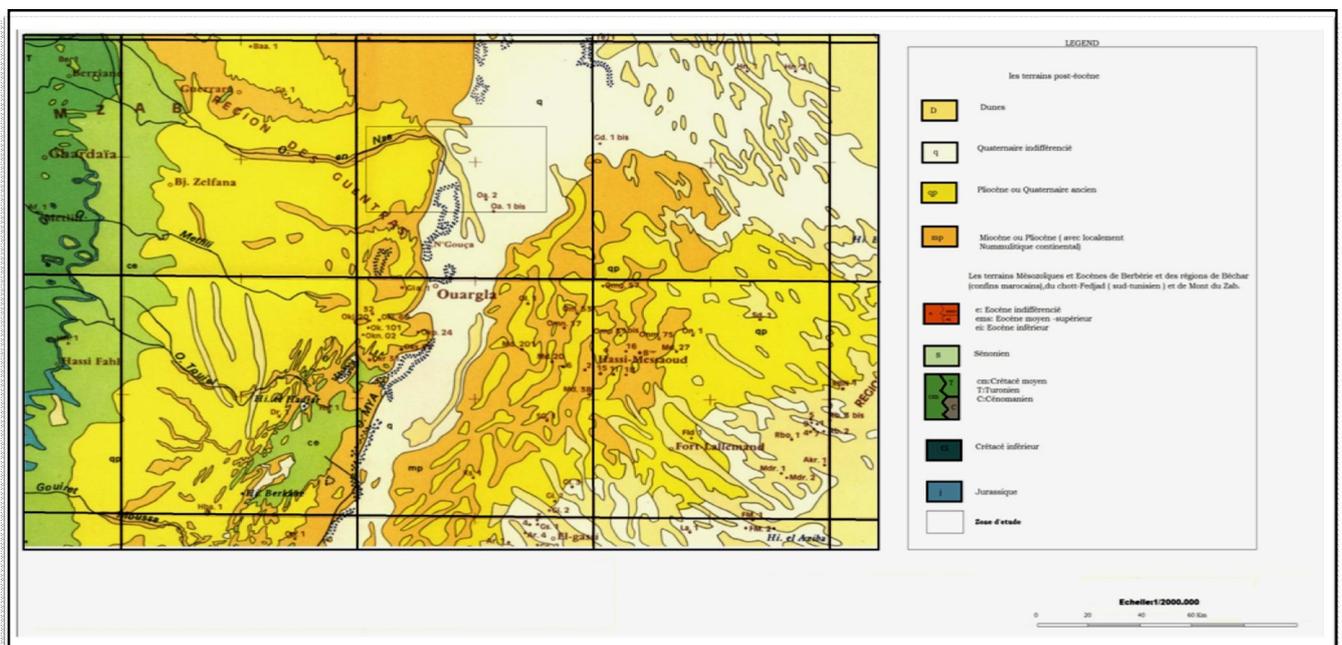


Fig. 1. 7 : carte géologique de la région d'étude d'après Busson., 1971.

Ere	Etages	Prof	Chronostratigraphie	
CÉNOZOÏQUE	QUATERNAIRE	10m	Sables	
			Argiles	
			Évaporites	
			Sables	
	Mio-pliocène			Argiles
				Gravier
				Grès
				Argiles
				Argiles Lagunaires
				Dolomies
	ÉOCÈNE	Moyen	180m	Argiles Lagunaires
		Inférieur		Dolomies
	MESOZOÏQUE	SÉNONIEN	280m	Calcaires
			500m	Carbonaté
LAGUNAIRE				Evaporites
				Anhydrite
				Sel massif
				Argiles
TURONIEN				Marnes
				Calcaire marneux
CÉNOMANIEN				Dolomies
				Argiles
VRACONIEN				Anhydrite
				Marnes
ALBIEN				Argile et dolomie
	1200m			
	1280m			
	Sables			
	Grès			
APTIEN			Argile sableuse	
			1500m	
BARRÉMIEN			Dolomies	
			1550m	
			Sables	
			Et	
			Grès	

Fig. 1. 8 : Colonne stratigraphique synthétique de la région de Ouargla (ANRH, 2004 modifié)

1.3.3/La géologie de surface :**1.9.3.1/Le quaternaire des régions sahariennes**

Le quaternaire saharien se caractérise par des formations meubles et discontinues. La tectonique n'a eu que peu d'effets, hors la surrection de la Dorsale saharienne.

Au cours du Quaternaire la géomorphologie et la sédimentologie font état d'une aridification de plus en plus prononcée (Aumassip et al., 1972).

Une croûte de grés conglomératique à ciment siliceux en forme la surface "cette période, d'abord nettement sub-aride atténuée, correspond vraisemblablement au Pliovillafranchien" (Aumassip et al., 1972; Rouvilois-Brigol, 1975). C'est une phase tectonique légère qui détermine des reprises d'érosion locales suivies de dépôts évaporitiques puis calcaires (Aumassip et al., 1972).

Au Pléistocène inférieur, le paysage actuel se met en place, dès alors les formations majeures se limitent à des glacis, terrasses, ergs et remblaiements. L'holocène se réduit à une terrasse dans la vallée de région, les zones rocheuses et leur périphérie et à des dépôts éoliens dont les caractéristiques varient au cours du temps (Aumassip et Ferhat., 2002).

Au villafranchien supérieur le réseau hydrographique endoréique s'oriente vers des zones basses et légèrement subsidentes, le Touat et le bas Ahnet dans cette dernière zone, le développement de grands lacs à Cardium et Ostracodes indique un climat tropical tandis qu'au Sahara Nord-Occidental les croutes calcaire, les écoulements torrentiels suggèrent un milieu plus aride de type méditerranéen (Fabre, 1974,1976 ; Gibert, 1984 ; Rognon, 1989). L'empâtement gypso-calcaire du glacis le plus élevé traduit, ensuite, une diminution des précipitations et une évolution vers un climat subaride (Aumassip et al., 1972).

Au **pléistocène moyen** une première phase de désertification s'installe voit l'édification des grande ergs de Sahara. Au **pléistocène supérieur** et suite à une phase humide les conditions redevenaient arides et provoquent l'ébauche de l'erg Chech.

Dans son étude détaillée des sédiments lacustres du paléo-lac de Mellala près d'Ouargla, Gilbert(1984) a distinguée des phases humides autour de 13000 (B.P).

L'Holocène, depuis 10 000 ans environ nous vivons une dernière période aride. Autre évènements, se reforme le Grand Erg Occidental, et la plupart des grand massifs dunaires que nous connaissons (Fabre, 1976; Coué-Gaussen, 1991).

1.3.3.2/ Les sols et états de surfaces de la région d'Ouargla :

Dans la région d'Ouargla Hamdi-Aissa et Girard (2000) caractérisent d'Ouest en Est sept principaux types de sol, selon la dénomination du référentiel pédologique (fig.1.19).

1.3.3.2. a/Sur le plateau : les sols présentent une surface graveleuse, reg à graviers ou pierreuse, reg à pierre, et des voiles éoliens. Cet horizon de surface surmonte une croûte calcaire à dolomie (Km), très dure, de 30 cm d'épaisseur. On trouve ensuite un horizon calcaire, nodulaire, moins dur et fissuré, entre 35 et 60cm puis, au-delà de 60cm, un horizon pétrogypsiq ue à 57% de gypse. La conductivité électrique (CE) est faible (1,97 à 3,4 dS.m⁻¹), le pH est neutre. C'est un LITHOSOL pétrocalcaire de Hamada à encroûtement gypseux en profondeur.

1.3.3.2. b/Sur le glacis : à 140m d'altitude, le sol est constitué d'un matériau meuble, exclusivement détritique, hérité de l'altération du grès à sable rouge du mio-pliocène. C'est le sol le plus pauvre en gypse de la région ; jusqu'à 8 m de profondeur, il ne présente aucun niveau d'encroûtement ; le maximum de CE est de 22,05 dS.m⁻¹ entre 25 et 75 cm de profondeur. Il s'agit d'un REGOSOL sableux à graviers, saliques.

1.3.3.2. c/Dans le chott : l'horizon de surface est une croûte gypseuse épaisse ou polygonale, blanchâtre (7,5 YR 8/4), partiellement couverte de voiles de sable éolien gypso-siliceux et de nebkhas associés à une végétation gypsohalophiles à *Zygophyllum album*. À 15-20cm d'épaisseur, on trouve un encroûtement gypseux pulvérulent (Ys), homogène, de couleur jaune rougeâtre très claire (7,5 YR 7/4 en sec). En dessous, on trouve un encroûtement gypseux induré de 40cm d'épaisseur, moins riche en gypse que l'horizon précédent. La nappe phréatique est à 5,80m. Le solum non calcaire présente une teneur en gypse décroissante de 68,6 % dans la croûte polygonale à 43%. La CE varie de 17,2 à 54,6 dS.m⁻¹, le pH est de 7,8. C'est un SALISOL chloruré sulfaté à horizon gypseux (Ys) et pétrogypsiq ue de surface.

1.3.3.2. d/Les sols salés de la sebkha : se caractérisent par une salure extrêmement élevée de l'horizon de surface et des croûtes et efflorescences salines continues. La nappe phréatique varie de 40cm (février) à 60cm (septembre) et jusqu'à 1 m. Sa CE moyenne est de 17,9 dS.m⁻¹.

1.3.3.2. e/Les sols du centre de la sebkha : se caractérisent par une croûte saline qui repose sur un matériau limono-sableux. La teneur en gypse est de 11 à 21%. Le pH est de 6,8 à 7,6. La CE est de 160,7 dS.m⁻¹ dans la croûte saline, puis descend à 38,2 dS.m⁻¹ dans les horizons sous-jacents. Il s'agit d'un SALISOL chloruré sulfaté.

1.3.3.2. g/Les sols de la bordure de la sebkha : se caractérisent soit par une croûte saline de surface similaire à celle du centre de la sebkha, soit par une croûte peu développée à surface lisse plus ou moins battante. Dans les deux cas, la couverture pédologique peut comporter ou non des horizons gypseux et/ou calcaire. Les teneurs en gypse varient de 8,5% dans la croûte saline à 77,8% dans l'horizon pétrogypsiq ue de profondeur. On a ainsi toute

une gamme de SALISOLS chloro-sulfatés, avec ou sans horizon gypseux et/ou calcaire.

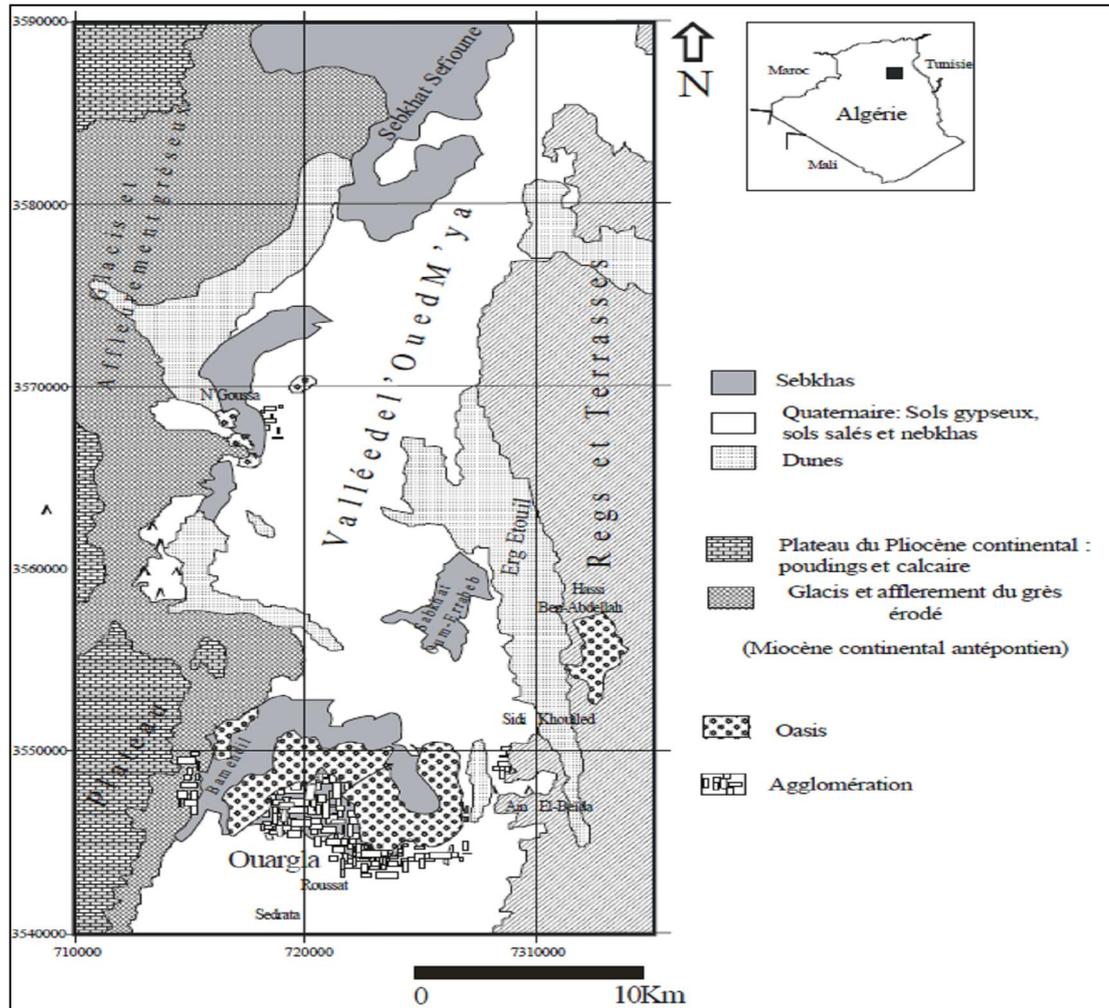


Fig. 1. 9 : Carte des affleurements de la région d'Ouargla d'après (NEZLI et al., 2007).

1.3.3.2. h/Les dunes sont des regosols sableux : Il existe aussi des cordons dunaires. Enfin dans les talwegs et sur les versants rocheux, on trouve en surface des affleurements de grès rouge du mio-pliocène (Fig. 1.19).

1.4. L'hydrologie :

Dans ce désert typique qu'est le Sahara, les précipitations sont non seulement rares, mais toujours très irrégulières. Par suite les conditions de l'écoulement y sont particulières (l'absence d'un écoulement permanent dans les talwegs, la désorganisation du réseau hydrographique et la dispersion de l'eau en "mares,"gueltas" ou " redirs"). (CAPOT-REY, 1952 ; ESTIENNE et GODARD, 1970).

En effet, les Oueds sahariens n'ont pas un régime de crues régulier mais plutôt de caractère accidentel, quand les pluies s'abattent, les Oueds coulent quelques jours et débordent même (fig.1-3). Ce phénomène se produit jusqu'à trois fois par an aux limites Nord du Sahara, beaucoup plus rarement au centre (GARDI, 1973).

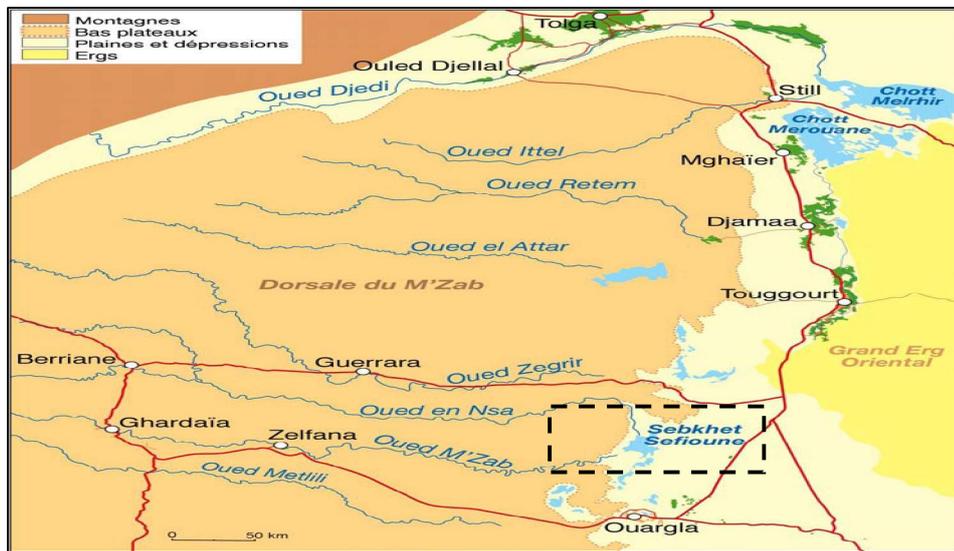


Fig. 1-10 : Les Oueds de la dorsale du M'Zab d'après BALLAIS, 2010.

1.5- L'hydrogéologie :

Au Sahara septentrional, le bassin sédimentaire constitue un vaste bassin hydrogéologique d'une superficie de 780 000 Km², avec un maximum d'épaisseur de 4000 à 5000m (CASTANY, 1982).

Selon LATRECH (1997), ce grand bassin comporte deux vastes aquifères profonds et superposés, relativement indépendants en Algérie, qui sont :

- Le continental intercalaire, surtout gréseux, situé à la base ; il constitue la formation la plus étendue ;
- Le complexe terminal au sommet, est plus hétérogène, il comprend de haut en bas :
 - o La nappe phréatique ;
 - o La nappe du Mio-Pliocène ;
 - o La nappe du Sénono-Eocène ;
 - o La nappe du Turonien.

Les potentialités du Sahara algérien en termes de ressource en eau, sont évaluées à 5 milliards de m³ par l'A.N.R.H Ouargla (2000).

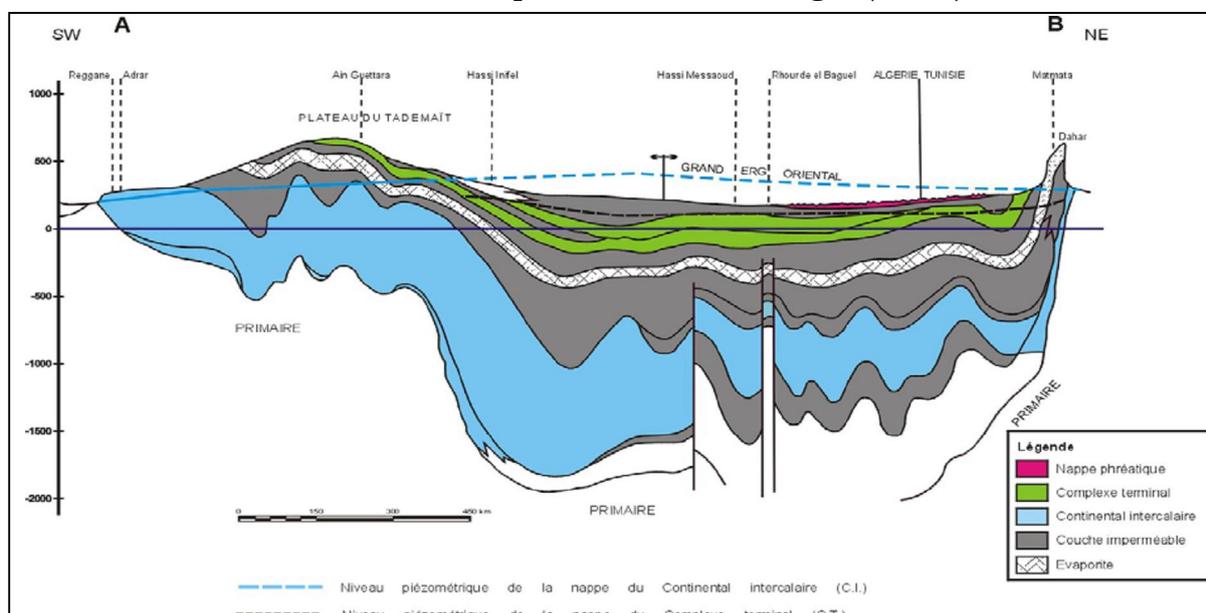


Fig. 1.11: Coupe hydrogéologique à travers le Sahara d'après UNESCO 1972.

1.6-Le climat :

Les caractères du climat saharien sont dus tout d'abord à la situation en latitude, au niveau du tropique, ce qui entraîne de fortes températures, et au régime des vents qui se traduit par des courants chauds et secs (OZENDA, 1991).

Le climat saharien est caractérisé notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations, une luminosité intense, une forte évaporation et de grands écarts de température.

1.6.1/ Les précipitations :

Selon DUBIEF (1953), les précipitations ont pratiquement toujours lieu sous forme de pluies. Ces dernières sont caractérisées par leur faible importance quantitative et les pluies torrentielles sont rares. Elles sont liées aux perturbations soudano-sahariennes ou sahariennes.

Cette insuffisance de pluies sahariennes est accompagnée d'une irrégularité très marquée du régime pluviométrique et d'une variabilité inter annuelle considérable, ce qui accentue la sécheresse (OZENDA, 1991 in CHEHMA, 2005).

Pour caractériser les précipitations à notre région d'étude, nous avons fait une synthèse sur les précipitations couvrant une période de 10ans allant de 1994 jusqu'au 2004.

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Moy
Précipitation (mm)	18,29	5,78	10,08	3,93	2,47	0,25	0,10	1,05	3,44	8,52	6,85	4,17	64,94

Tableau. 1.1 : moyennes annuelles des précipitations (1994-2004)

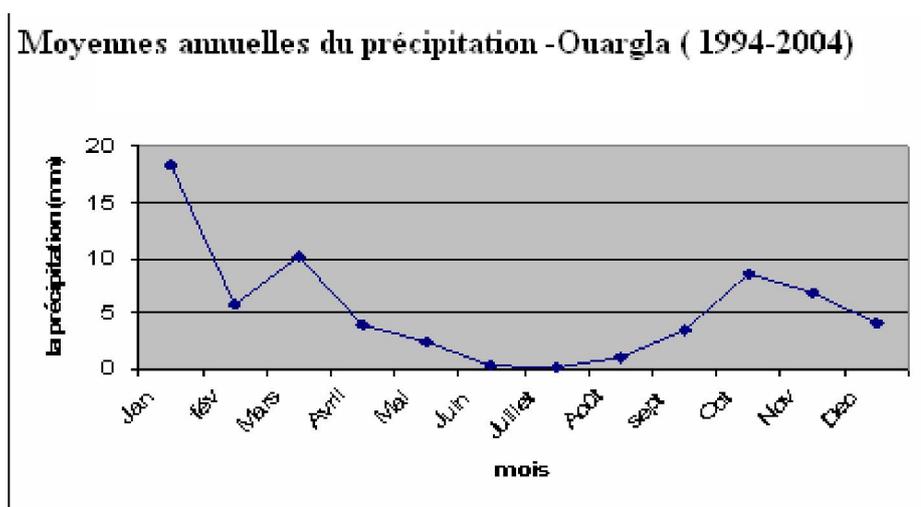


Fig. 1.12 : les variations des moyennes annuelles des précipitations (1994-2004)

L'analyse des moyennes mensuelles de pluie, fait ressortir un maximum en mars avec un minimum en juillet et août (Figure :1-5)

Toutefois, Il faut noter que ces valeurs mensuelles peuvent fortement varier d'une année à l'autre (DUBIEF, 1953 ; THIERRIOT et MATARI, 1998 ; MEDDI, M. & MEDDI, H. 1998).

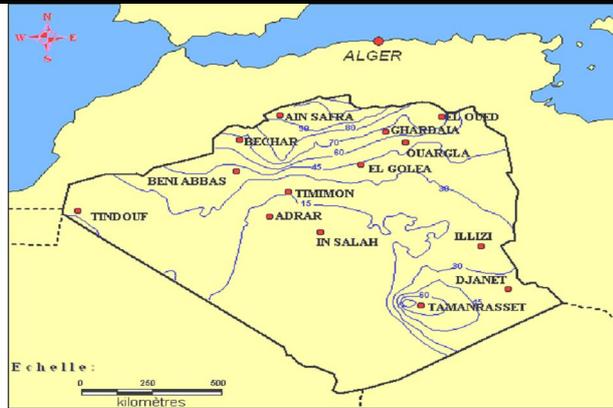


Fig. 1.13 : Carte en isohyètes moyennes annuelles du Sahara algérien (Meddi, M. & Meddi, H. 1998).

La carte de la répartition spatiale des pluies (Fig.1-6), indique une diminution de la pluviométrie du Nord au Sud, notre région se trouve dans la gamme 30 à 50 mm/an (Meddi, M. & Meddi, H. 1998).

1.6.2/La température

La température est l'un des facteurs qui caractérisé le climat de la région. Les résultats enregistrés au niveau des stations montrent bien que l'année est devisée en deux périodes ou saisons, l'une chaude et l'autre froide. Les températures sont toujours positives, très fraîches en hiver et très élevées en été, ce qui se traduit par une forte évapotranspiration potentielle (voir tableau1.2).

		Jan	fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	sept	Oct	Nov	Dec	Moy
Température (C°)	min	4,95	6,41	11,42	15,06	19,68	24,83	28,02	27,66	23,50	18,51	10,48	6,35	6,35
	max	18,55	21,14	26,24	29,17	34,21	39,97	43,50	42,44	37,28	33,13	23,22	19,01	30,66
	moy	11,75	13,77	18,83	22,12	26,95	32,40	35,76	35,05	30,39	25,82	16,85	12,68	23,53

Tableau. 1-2 : moyennes mensuelles de température (1994-2004)

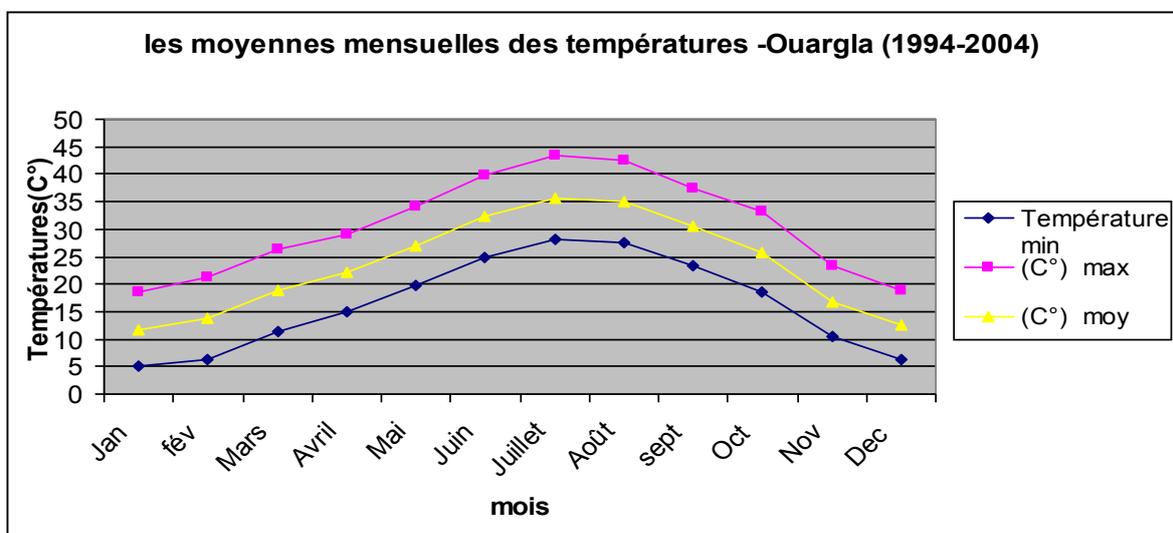


Fig. 1-14 : les variations des moyennes mensuelles de température (1994-2004) (O.N.M., 2005)

1.6.3/L'évaporation :

C'est un phénomène physique qui augmente avec la température, la sécheresse de l'air et l'agitation de cet air (Ozenda, 1991 in CHEHMA, 2005). Selon DUBIEF, (1950 in CHEHMA, 2005) le Sahara apparaît comme la région du monde qui possède l'évaporation la plus élevée. Cette perte d'eau, peut avoir comme origine :

- l'évaporation de masses d'eau libre ou de celle contenues dans le sol : évaporation physique.
- l'évaporation par les végétaux (qui peut être considérée comme secondaire dans les régions sahariennes) : évaporation physiologique.

	Jan	fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	sept	Oct	Nov	Dec	Moy
Evaporation (mm)	112,07	143,67	184,73	231,53	263,80	343,53	382,60	374,93	275,36	215,20	139,60	187,43	2854,46

Tableau. 1.3 : moyennes annuelles d'évaporation (1994-2004) (O.N.M., 2005)

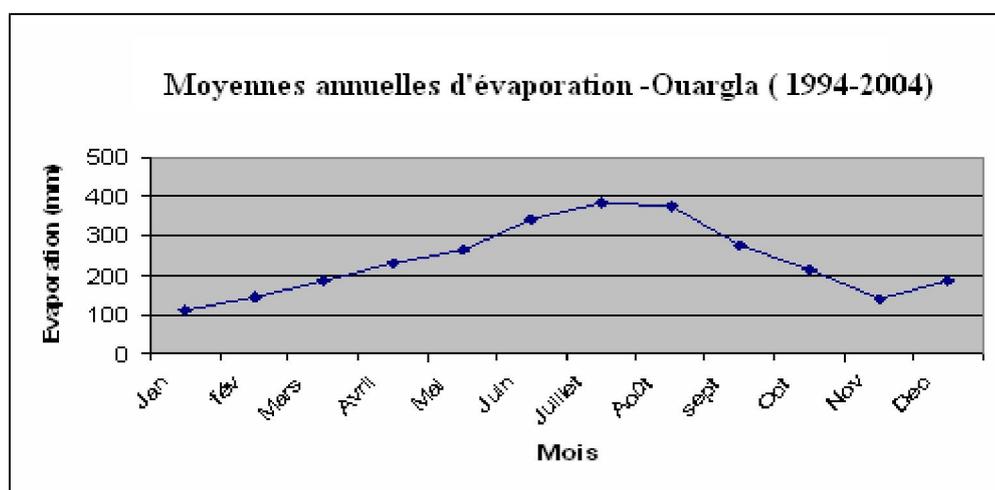


Fig. 1.15: les variations des moyennes annuelles d'évaporation (1994-2004) (O.N.M., 2005)

1.6.4/L'humidité

L'humidité relative au Sahara est faible, souvent inférieure à 20% (MONOD, 1992 in CHEHMA, 2005) même dans les montagnes, ce n'est qu'exceptionnellement que l'on observe des valeurs plus fortes, tandis qu'au Sahara septentrional elle est généralement comprise entre 20 et 30% pendant l'été et s'élève à 50 et 60% parfois davantage en janvier (OZENDA, 1991 ; LE HOUEROU, 1995 in CHEHMA, 2005).

	Jan	fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	sept	Oct	Nov	Dec	Moy
Humidité (%)	62,97	55,47	46,37	39,13	34,30	27,97	28,33	29,17	36,97	47,50	59,33	61,83	44,11

Tableau. 1.4 : moyennes annuelles de d'humidité (1994-2004) (O.N.M., 2005)

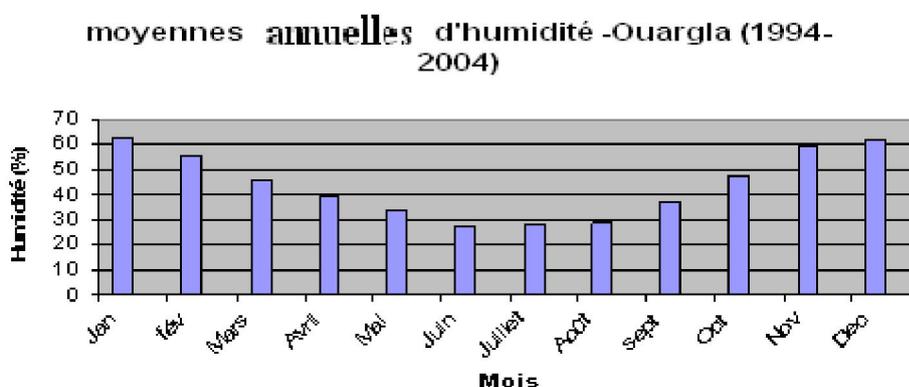


Fig.1.16 : les variations des moyennes annuelles de d'humidité (1994-2004) (O.N.M., 2005)

1.6.5/L'insolation :

A cause de la faible nébulosité de l'atmosphère, la quantité de lumière solaire est relativement forte, ce qui à un effet desséchant en augmentant la température (OZENDA, 1991 in CHEHMA, 2005).

	Jan	fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	sept	Oct	Nov	Dec	Moy
Insolations (1994-2004) (h/mois)	210,33	214,88	240,24	275,73	300,58	304,12	337,61	313,48	262,21	220,97	208,09	141,94	252,52

Tableau. 1.5 : moyennes annuelles de d'insolation (1994-2004) (O.N.M., 2005)

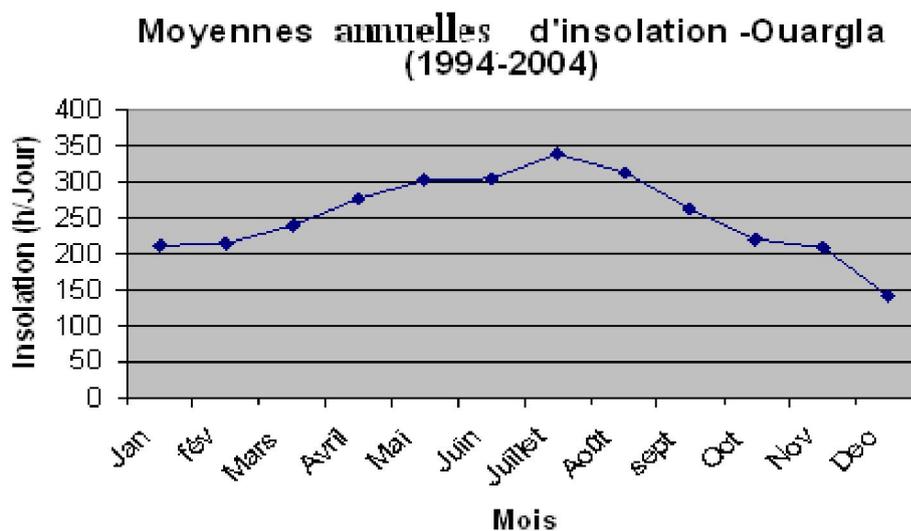


Fig.1.17 : les variations des moyennes annuelles d'insolation (1994-2004) (O.N.M., 2005)

1.6.6/La nébulosité :

La nébulosité moyenne annuelle, exprimée en dixième de ciel couvert est partout très faible. Le nombre de jours clairs, sans aucun nuage, peut s'élever à 230.

1.7- Caractéristiques géomorphologiques de la région d'Ouargla :

L'étude géomorphologique de la région d'Ouargla fait apparaître les éléments suivants (Fig.1.2 et 1.11) :

A l'Ouest de Ouargla, la vallée est limitée par le plateau de la Hamada pliocène de 200 à 250m d'altitude, appelé localement "plateau des Gantra". Il s'abaisse légèrement d'Ouest en Est. Il est interrompu par une vaste dépression ovale de Sebkhha de Mellala (30Km de long, de 6 à 11Km de large, 80 à 90m de profondeur), qui s'étend parallèlement à la vallée de l'Oued M'ya. D'après Capot-Rey (1959); cette dépression peut être considérée comme un phénomène karstique.

La dissymétrie de la vallée de l'Oued M'ya est marquée par la présence d'une falaise gréseuse occidentale, particulièrement nette et continue, avec une pente très abrupte, tandis que la limite orientale est beaucoup plus imprécise (Hamdi-Aïssa., 2001).

Le versant Ouest de la cuvette présente quatre niveaux étagés de glacis caractéristiques, la plus ancienne recoupe le sommet de la bordure du plateau en buttes. Sa couverture très caractéristique est une croûte gypso-calcaire épaisse de 1,5m ; son altitude s'abaisse de 225m à l'Ouest à 200m environ à l'Est; son exigüité le rend souvent difficile à distinguer de la surface du plateau de la Hamada. C'est à ce niveau qu'il faut rattacher certains Gara(s) de la vallée Djebel Abbad, Gara Krime, Bab el Hattabat, les buttes de Trois pitons sur la route de Touggourt...etc.).

Le second glacis, beaucoup plus visible, est à une altitude de 180m environ, comme le troisième niveau, à 160m, caractérisé par l'affleurement du substrat gréseux de Mio-Pliocène (Fig. 1.12). Ce dernier est souvent recouvert de sable et de graviers gréseux plus ou moins encroûtés de gypse ; sa pente est faible. Le glacis de 160m a été fortement démantelé lors de la formation du dernier glacis, développé à 140m d'altitude environ, et a donné naissance à des formes de relief originales sur lesquelles se sont installées quelques palmeraies de Bamendil. Leur position topographique sur élevée par rapport au niveau de la sebkha les protège de risque de remontée de nappe qui menace actuellement les oasis de bas-fond, (Côte1998) (Hamdi-Aïssa et al., 2000).

Les formations quaternaires occupent tous les points bas des grands bassins sédimentaires et forment généralement des zones salées appelées Sebkhhas, ou Chott (chott de Ouargla). Se sont de grandes zones d'épandage de matériel alluvial, sableux le plus souvent. La pente Sud-Nord de la vallée est légèrement inférieure à 0,1%; (150m d'altitude aux ruines de Sedrata, 136m à Ouargla, 131m dans la sebkha de Ouargla). Elle s'accentue légèrement en aval de Ouargla où les sebkhas (Oum Raneb, El Mergueb et Safioune) alternent avec les massifs dunaires (Et-Touil, Arifdji, Bou-Khezana...etc.).

La limite Est de la cuvette de Ouargla est marquée par un dénivelé d'une trentaine de mètres, plus ou moins net. Après le seuil d'Ain Beida (144m), qu'emprunte la route de Touggourt, l'altitude remonte à 163m au dessus de Sidi Khouiled, puis la falaise disparaît sous les sables de l'erg Et-Touil. Cette falaise correspond probablement au glacis du niveau 140m à l'Ouest de la cuvette, (Hamdi-Aïssa., 2001).

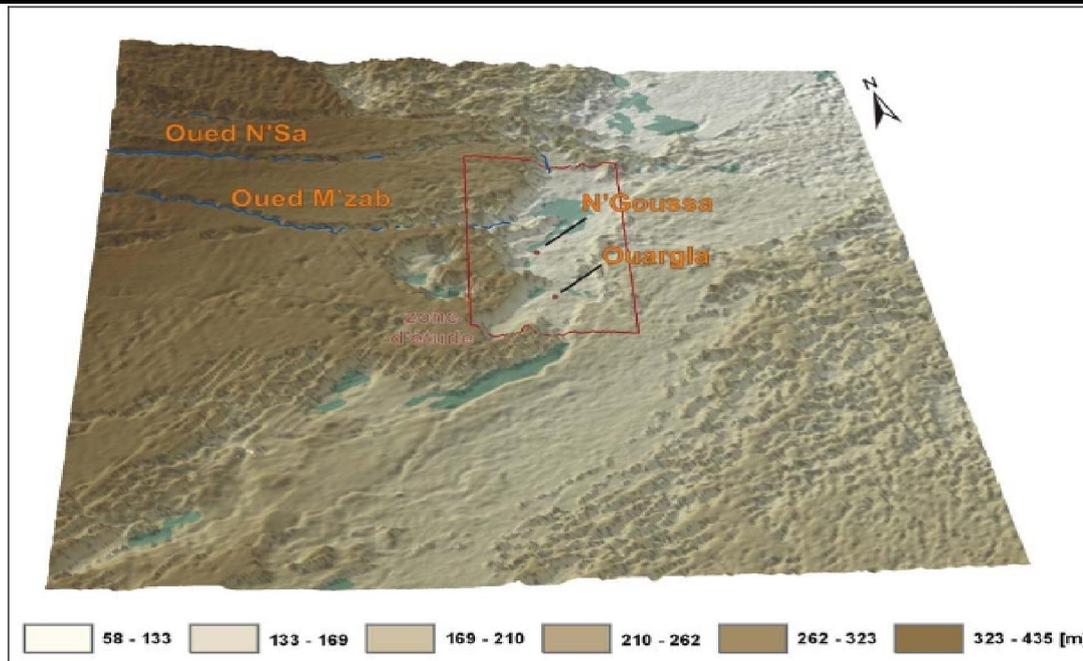


Fig. 1.18: Relief de la région de Ouargla (MNT) (BG, 2004).

D'après Hamdi-Aïssa (2001) la cuvette d'Ouargla est creusée dans les formations continentales du Mio-Pliocène, il s'agit des sables rouges et des grès tendres à stratification entrecroisée, avec des nodules calcaires, entrecoupés de niveaux calcaires ou gypseux que l'on voit affleurer sur ses bords Est et Ouest. Après son creusement, la cuvette a été occupée par un lac au fond duquel se sont déposés des sédiments fins argileux ou d'origine chimique ; craies, calcédoines et évaporites (Fig. 1.11).

Des Oueds, descendants de la dorsale de M'zab à l'Ouest (Oued M'zab, N'sa et Z'gag) ou du Tademaït (Oued Mya) au Sud, se déversaient dans ce lac en abandonnant leurs alluvions en larges cônes (Ank Djemel pour Oued M'zab) ou barrant la vallée (Oued N'sa et Z'gag au Nord de sebkha Safioune).

1.8- Réseaux hydrographiques de la région d'Ouargla :

L'hydrographie de la cuvette d'Ouargla se caractérise par son endoréisme (Dubief, 1953). Différents bassins versants (Mya, M'zab, N'sa) forment le réseau hydrographique qui aboutit à sebkhet Safioune au Nord de la cuvette de Ouargla. Le ruissellement est en fait insignifiant, (Hamdi-Aïssa, 2001) (Fig. 1.3).

1.8.1/Oued Mya:

Il draine le versant Nord-Est du plateau de Tademaït. Le bassin de l'Oued Mya est en forme d'une vaste gouttière relevée du Sud (800m) avec une inclinaison très faible (0,1 à 0,2%) vers le Nord-Est, il s'étend sur 19800 Km². Au Nord de Ouargla, la vallée n'est plus discernable. Si l'on admet cependant que l'Oued Mya quaternaire se jetait le chott Melrhir actuel, sa longueur devait atteindre 900Km, (Dubief, 1953).

Avec la fin de la dernière grande période pluviale, le lac s'est retiré, l'Oued Mya n'a pas pu qu'épisodiquement de couler de sebkha en sebkha sans beaucoup de vigueur, son cours étant complètement coupé par les reliefs situés à l'aval de sebkha Safioune où un lac se formait à nouveau à chaque période un peu pluvieuse. Actuellement, les grandes crues de l'Oued Mya s'arrêtent à 200km à l'amont d'Ouargla.

1.8.2/Oued N'sa et Oued M'zab :

A l'inverse de l'Oued Mya qui est considéré comme fossile, ces deux Oueds sont fonctionnels, ils peuvent avoir une ou deux crues par an ils n'atteignent la cuvette d'Ouargla que lorsque la crue est importante. Ils drainent le versant des piedmonts Sud-Est de l'Atlas saharien (la dorsale mozabite) ; ils coulent donc de l'Ouest vers l'Est –Sud-Est jusqu'à sebkha Safioune.

Les alluvions de Oued N'sa ferment la vallée au Nord de sebkha Safioune, empêchant un écoulement vers l'aval. Les sebkhas sont apparues au cours d'une période humide antérieure, vraisemblablement le dernier grand épisode pluvial contemporain à la glaciation de Würm.

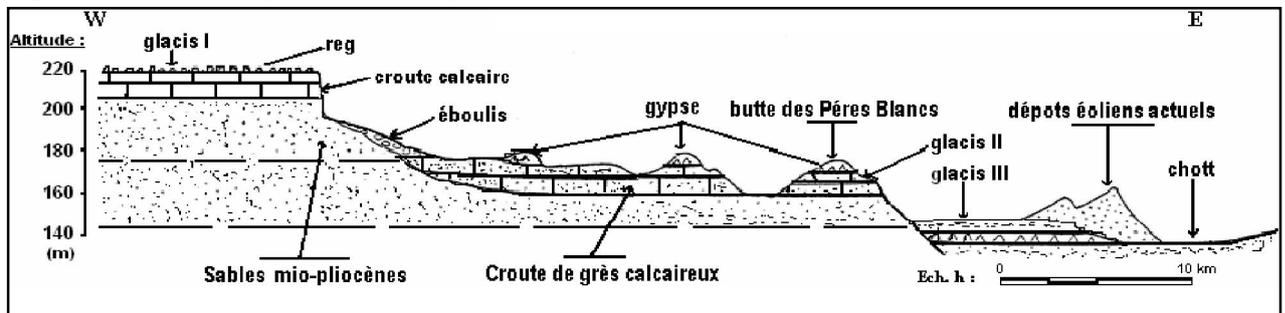


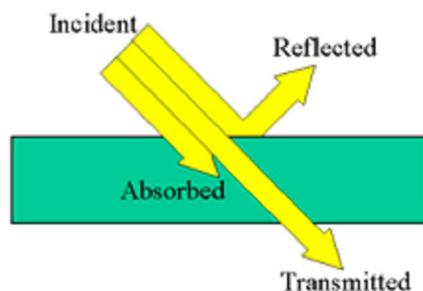
Fig. 1.19 : Coupe géomorphologique schématique Ouest-Est de la cuvette d'Ouargla (LELIEVRE, 1969).

CHAPITRE. 2- Le principe physique de la télédétection :

2.1. Définition

La télédétection est le résultat de l'interaction entre trois éléments fondamentaux, une source d'énergie, une cible et un capteur. Elle consiste à mesurer un signal électromagnétique émis ou réfléchi par une cible. La mesure se fait à distance depuis un capteur spatial ou aéroporté dans le domaine solaire réfléchissant (0.4-2.5 μ m). L'information mesurée est liée à la quantité d'énergie (lumière solaire) réfléchi par la surface. Trois processus peuvent avoir lieu lorsque l'énergie solaire incidente (φ_i) atteint la surface de la terre (Lillesad & Kiefer, 2000).

Cette énergie incidente est absorbée (φ_a), transmise (φ_t), et réfléchi (φ_r), ces processus illustrés par la figure (2.1), sont traduits par l'équation suivante



$$\varphi_i = \varphi_a + \varphi_t + \varphi_r \equiv \alpha + \rho + \tau = 1 \quad (\text{La loi de conservation d'énergie}).$$

Avec :

α : l'absorptance ; ρ : La transmittance ; τ : la réflectance

Fig. 2.1 : Les trois processus qui ont lieu lorsque l'énergie solaire entre en interaction avec la surface terrestre.

En raison de sa forte dépendance des propriétés intrinsèques des objets, la réflectance représente la principale grandeur extraite des données de télédétection pour décrire les caractéristiques des surfaces détectées.

A partir de ce principe il est possible d'acquérir une mesure sur les surfaces continentales de quatre dimensions, spectrale, spatiale, temporelle et directionnelle.

2.2-Les dimensions de la télédétection :

2.2.1)-La dimension spectrale :

Est celle associée à la signature spectrale de chaque type de surface. Il s'agit de la variation dans l'intensité du rayonnement selon les différentes longueurs d'ondes (les surfaces minérales naturelles ou artificielles (pollutions), les surfaces en eau, et la végétation ont des signatures spectrales caractéristiques illustrées dans (figure.2.2).

Ce sont ces différences de comportements spectraux en fonction de la longueur d'onde qui montrent l'importance de la dimension spectrale en particulier pour la distinction entre différents types de sols de composition et textures variées (i.e sol limoneux et sol calcaire).

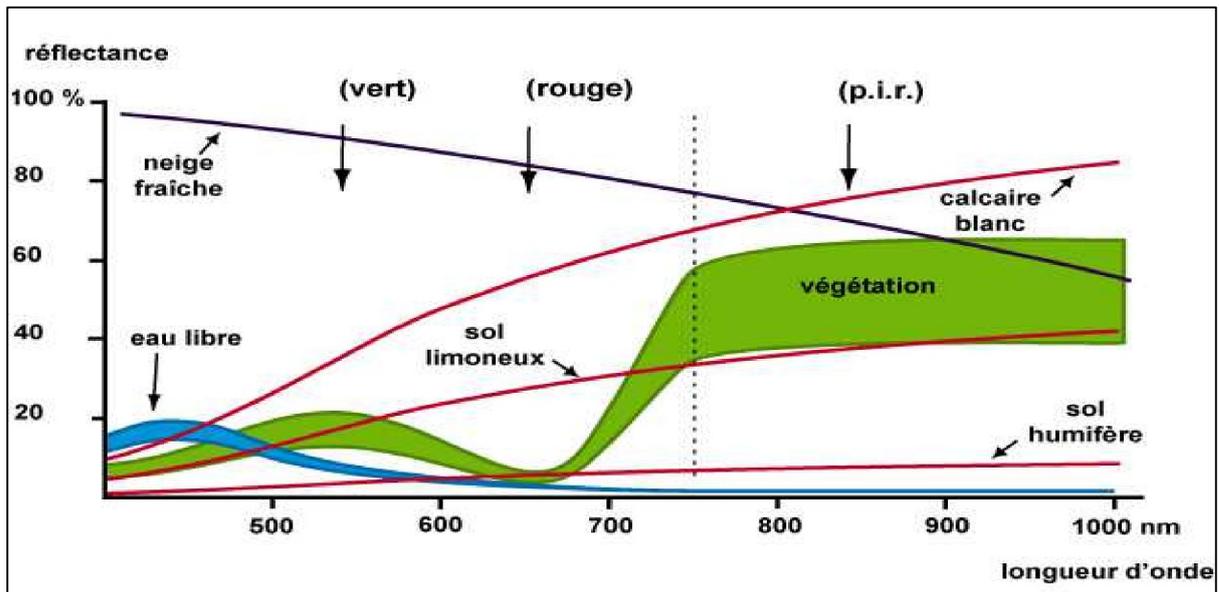


Fig. 2.2 : Signatures spectrales comparées de plusieurs cibles (Rees, 2001 in Corbane, 2006).

2.2.2)-La dimension spatiale :

Représente la distribution spatiale des variables radiométriques d'une image (i.e. la réflectance). On parle d'hétérogénéité spatiale de l'image, caractérisée par le degré de variabilité (la variance) et par des échelles de variation (les structures spatiales). La dimension spatiale des images, présente un potentiel pour détecter l'hétérogénéité spatiale d'objets réels et de variables surfaciques et pour détecter leurs échelles de variation.

2.2.3)-La dimension temporelle : ou la périodicité fait référence à la capacité des capteurs à acquérir des données sur une même surface, fréquemment et avec les mêmes paramètres instrumentaux. Cette dimension offre un potentiel pour détecter les changements dans le temps qui affectent les caractéristiques spectrales des objets observés. Cette capacité à détecter ces changements dépend de la fréquence avec laquelle les données sont recueillies. Si la dimension temporelle permet d'analyser la dynamique d'objets géographiques variés, elle est également largement utilisée pour différencier les objets difficiles à discriminer à partir d'une seule date (Henderson, 1976 ; Campbell et al., 1987; Largouët & Cordier, 2000).

2.2.4)-La dimension directionnelle :

Est associée à la Fonction de Distribution de la Réflectance Bidirectionnelle (FDRB) qui décrit la distribution angulaire de la radiation sortante d'une surface donnée. Est une propriété fondamentale et intrinsèque de la surface. En particulier, elle représente le rapport entre la luminance (L) (énergie sortante), et l'irradiance (L_i) (énergie incidente) incidente contenue dans l'angle solide $d\omega$ (figure II-3). (Jacquemoud et al., 1993; Rahman et al., 1993; Cierniewski & Verbrughe, 1997 in Corbane,C., 2006).

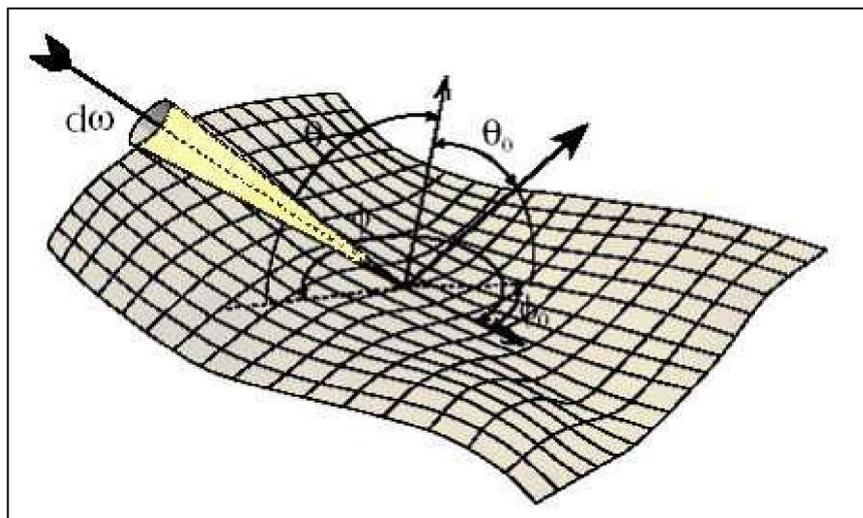


Fig. 2.3 : Géométrie d'acquisition de fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle (FBDR) (d'après Corbane, C., 2006).

2.3 Les composantes des états de surfaces :

Plusieurs travaux ont cherché à identifier les principales composantes des états de surface. En effet, Les paragraphes ci-dessous examinent comment chacune des composantes de l'état de surface dans le spectre électromagnétique et résumet les relations entre ces composantes.

2.3.1-Graviers et caillouteux :

Le comportement spectral réflectif d'un ensemble de cailloux à la surface est identique à celui du sol minéral.

Si l'on suppose que les cailloux à la surface représentent la roche mère dont la matrice du sol est dérivée par altération, le comportement spectral d'un ensemble de cailloux diffère du sol uniquement par l'influence spectrale de la différence en minéralogie due à l'altération. En effet lorsque les produits d'altération s'accumulent sur les roches, leurs bandes spectrales caractéristiques peuvent alors être détectées (Christensen et al., 2000).

La variation de la réponse spectrale des cailloux individualisés dépendra donc de la nature de la roche dont ils sont issus. Si cette roche est caractérisée par une minéralogie homogène à l'échelle de la taille des cailloux (plusieurs centimètres) leur réponse spectrale est la même que celle décrite ci-dessus pour un ensemble de cailloux. Mais souvent la roche est caractérisée par une variation plus ou moins forte à cette échelle (cailloutis de terrasses, stratification dans une roche sédimentaire, segmentation minéralogiques dans d'autres types de roches), ce qui se répercute sur la réponse spectrale des cailloux individuels (Jacquemoud et al., 1993 in Corbane,C., 2006).

Le comportement bidirectionnel de la réflectance d'un ensemble de cailloux est complexe. La rugosité perçue dépend du rapport entre la taille des cailloux, leur position (posés/noyés) et la densité de la distribution à la surface et l'échelle d'observation (Pinty et al., 1989 ; Jacquemoud et al., 1992).

La réflectance bidirectionnelle des surfaces caillouteuses est par contre complexe et fortement dépendante de l'indice de réfraction (partie réelle) des

constituants des cailloux (Jacquemoud et al., 1993), l'angle d'incidence et d'observation joueront donc un rôle important.

2.3.2-Faciès/rugosité

Selon Girard & Girard, 1989 et Escadafal, 1994 Le faciès et la rugosité étant liés à des aspects morphologiques de la matrice du sol minéral, et que celle-ci est caractérisée par les aspects suivants.

- Une variabilité importante en luminosité (fonction de différentes composantes dont le taux de matière organique du sol, son état d'humectation, le taux de calcaire, etc.);
- La courbe de réflectance dans le spectre électromagnétique augmente graduellement de l'ultraviolet jusque dans le moyen infrarouge (MIR : 1.3 à 3 μ m, (figure 2.2) ; La forme est convexe ou sigmoïdale ;
- Dans le moyen infrarouge les spectres dépendent des phénomènes d'absorption liés à la minéralogie du sol et à son humidité.

Les variations directionnelles de la réflectance à la surface de cette matrice peuvent être importantes. Des modèles permettent de décrire ce comportement bidirectionnel car aussi fonction de l'angle de l'énergie incidente ; (Pinty et al., 1989 ; Jacquemoud et al., 1992 ; Baret & Jacquemoud, 1994).

Au travers de la rugosité le faciès n'influencera donc que très peu la forme de la courbe de réflectance (De Jong, 1992 ; Escadafal, 1994).

Les variations de faciès se traduisent par des différences en intensité de la réflectance, issues de différences en albédo et du pourcentage d'ombre (Courault, 1989 ; de Jong, 1992).

2.3.3-Texture et porosité

Se situe dans le même cadre que celui de la rugosité, car il s'agit surtout d'aspects morphologiques de la surface de la matrice du sol. Ces caractéristiques influencent donc le comportement bidirectionnel et la réflectance générale (par un effet d'ombre portée à des échelles variant de la motte au grain de sable), et non pas la forme de la courbe de réflectance.

Dans le cas où de fortes différences en texture sont liées à des changements d'aspects de la minéralogie du sol, la texture et la porosité influencent la forme de la courbe (Stoner & Baumgardner (1981) et King & Lefebvre d'Hellencourt (1982)). Ce sont ces relations-là qui sont à l'origine des (faibles) corrélations entre texture et réponse spectrale comme l'ont trouvé De Jong (1992) et Coleman et al. (1993).

2.3.4-Les croûtes de surface

Les études menées sur le comportement spectral des croûtes de surface partent toutes du principe que la radiation réfléchiée par une surface donnée est le résultat du produit entre la distribution de la taille des particules (effet physique) et la composition chimique (effet chimique) de la surface du sol (Goldshleger et al., 2001). La réflectance des sols dans le domaine du spectre solaire (0.4-2.5 μ m) est affectée par ces deux composantes qui, ensemble, produisent des signaux radiométriques permettant de détecter la croûte physique formée à la surface du sol.

Généralement, les sols compactés sont détectables par la rareté du couvert végétal qui présente une réponse typique dans le visible et le PIR ainsi

que par leur comportement thermique spécifique (Mulders & Girard, 1993). D'autre part, la présence de la croûte induit un comportement spectral bien caractéristique du processus d'encroûtement et qui s'observe à $2.2\mu\text{m}$ dans la bande d'absorption du radical hydroxyle (OH) des minéraux argileux comme sur la figure 2.4 (Goldshleger et al., 2001; Goldshleger et al., 2002 in Corbane, 2006). Sur cette figure où sont représentés les rapports de spectre d'un substrat de sol et des croûtes de surfaces de trois types de sols différents, le creux observé autour de $2.2\mu\text{m}$ indique un enrichissement de la surface en sels et en minéraux gypseux au sein de la couche croûtée.

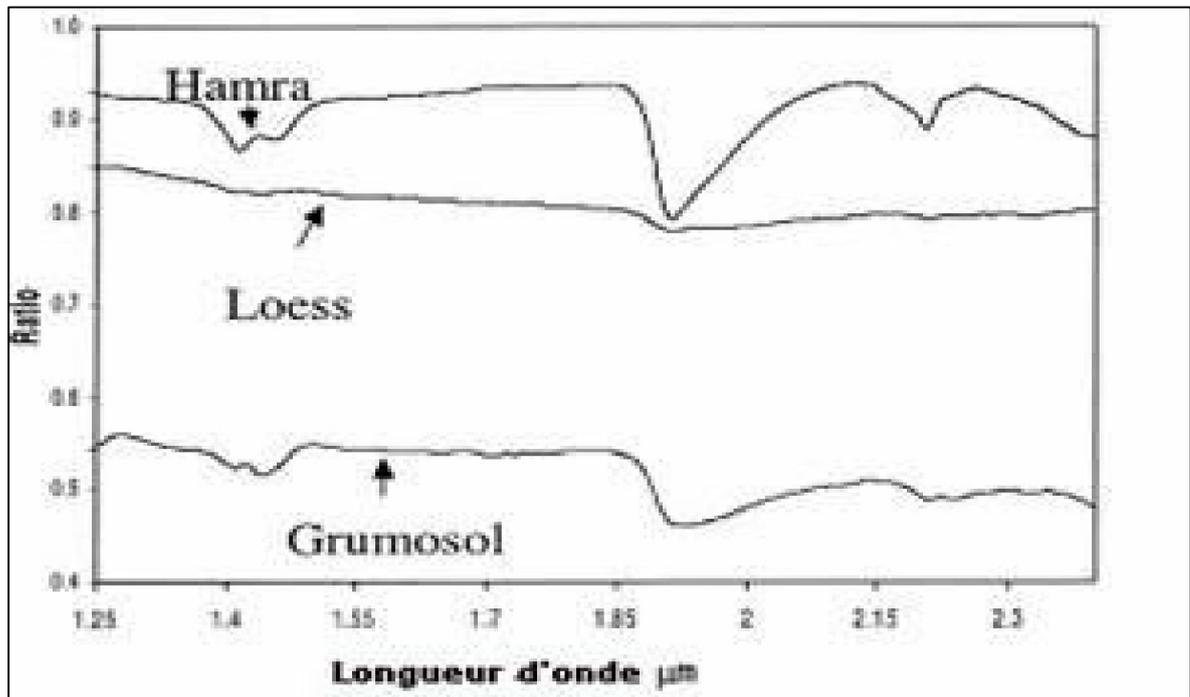


Fig. 2.4 : Ratios des réflectances entre un substrat de sol et des couches croûtées pour trois types de sols différents (Goldshleger et al., 2001 in Corbane, 2006).

2.3.5-Les formations géologiques et la lithologie :

Il est possible d'identifier certaines formations en recoupant des critères variables en fonction de la région (tableau 2.1), les calcaires et les grès peuvent se distinguer par leur modelé, les uns formant de reliefs aigus alors que les autres constituent des crêtes arrondies. la présences de traces lithologiques et la fracturation peuvent, dans certaines conditions, caractériser une formation géologique (Chorowicz, J & al., 2003).

2.3.6-Le microrelief

Une altération du microrelief, donc de la rugosité aléatoire se manifeste par une altération de l'albédo (Potter et al., 1987). La modification des valeurs de l'albédo de sols secs ou humides sous l'effet d'un changement de microrelief est surtout fonction de l'angle d'illumination du soleil (φ) (Cresswell et al., 1993). Ce comportement des sols rugueux a poussé les chercheurs à s'orienter vers des modèles géométriques qui tiennent compte des réflexions spéculaires et diffuses des mottes de terre (Cierniewski, 1987 ; Irons et al., 1992;

Cierniewski & Verbrugghe, 1997) afin de prévoir la nature du microrelief des surfaces imagées.

	calcaire	dolomie	Grés	argile	basalte	granite	gneiss	alluvions
Reliefs	+	+	+	-	+	+	+	plat
Modelé	Vif	Vif	Arrondi	Concave	Vif	Convexe	Arrondi	Vif
Intensité	Claire	Gris	Variable	Variable	Sombre	Claire	Claire	Variable
Signature	Droite	Droite	Droite	Absorption MIR	Droite	Droite	Droite	Variable
Végétation	Rare	Rare	Moyenne	Abondante	Moyenne	Abondante	Abondante	Abondante
Culture	Non	Non	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
Texture	Variable	variable	variable	Lisse	Lisse	Grain de riz	Lisse	Lisse
Réseau hydrographique	Lâche	Lâche	Moyenne	Serré	Lâche	Serré	Lâche	Nul
Couches apparentes	Oui	Oui	Oui	non	Oui	Non	Non	Non
Fracture	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Non

Tableau.2.1 : Exemple de recoupement de différents critères permettant l'identification des formations lithostartigraphiques sur image (Chorowicz, & al., 2003).

L'analyse du microrelief dans le domaine des micro-ondes est aujourd'hui passée du domaine de la recherche fondamentale à l'application, grâce aux possibilités d'intégration des données sur la rugosité, issues des images radar, aux modèles de ruissellement (King et al., 2005a).

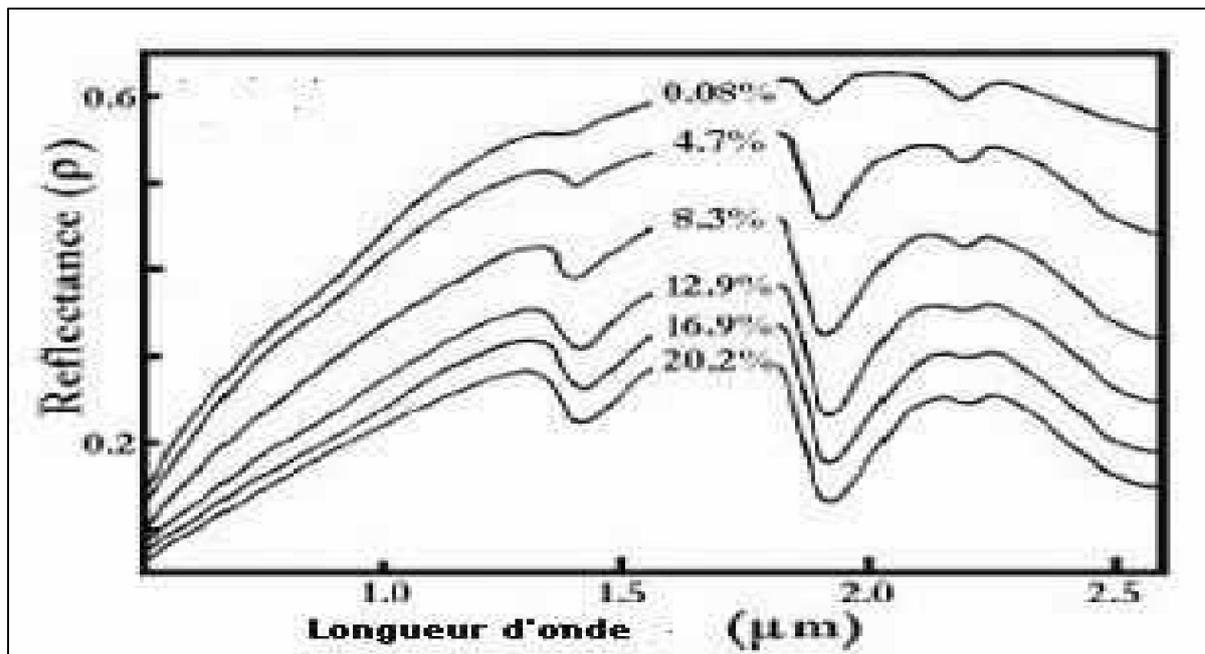


Fig. 2.5 : Evolution du spectre de réflectance d'un sol limoneux en fonction de son humidité d'après Browsers & Hank, 1965.

2.3.7-L'humidité de surface :

Même si elle ne rentre pas explicitement dans la détermination des classes des états de surface, l'humidité de surface est une caractéristique importante des états de surface grâce au rôle qu'elle joue en faveur de la réflectance. Parmi un nombre important de facteurs étudiés, Beck et al (1976) ont trouvé que l'humidité du sol est le facteur qui affecte le plus les propriétés de réflexion du sol. Une relation linéaire entre le facteur d'absorption du sol et le pourcentage en eau a été mise en évidence par Bowers et Smith (1972) et des courbes illustrant la décroissance de la réflectance d'un échantillon de sol avec l'augmentation de la teneur en eau furent publiées depuis 1965 par Bowers et Hanks (1965) (Figure 2.5). La diminution de la réflectance est observable sur tout le spectre avec deux bandes d'absorption de l'eau qui s'identifient dans le proche infrarouge à $1.45\mu\text{m}$ et $1.95\mu\text{m}$. Cette diminution est d'autant plus importante que les longueurs d'onde augmentent (Dubois et al., 1995).

L'eau ayant un indice de réfraction très différent de celui de l'air (figure 2.5), sa présence entraîne une baisse générale de la réponse spectrale des formations de surface. Ce sont les propriétés diélectriques du sol qui influencent l'interaction d'une onde électromagnétique plane avec le sol, Ces propriétés diélectriques du sol dépendent de l'état énergétique de l'eau dans le sol, l'eau étant le constituant de plus forte permittivité : elles dépendent donc de la texture du sol et de sa teneur en eau (Benallegue, 1993) et la proportion et l'état énergétique de l'humidité déterminant la réflectance.

2.3.8-La couleur de surface

Plusieurs auteurs se sont intéressés aux problèmes méthodologiques liés à l'appréciation et à la mesure de la couleur des sols, et leur conséquences sur

le rôle de ce critère dans les classifications (Shields et al., 1966 ; Karmanov. 1970 : Melville et Atkinson. 1985).

Selon Escadafal, (1994) l'influence de la couleur a donc été mise en évidence dans toutes les études concernant la réflectance des sols dans le domaine visible, mais sans qu'une loi générale puisse être dégagée de ces travaux.

2.3.8.1-Relation couleur & composition des sols

Globalement, les effets des principaux constituants sur la couleur des sols ont été résumés par Taylor (1982). Des divers travaux publiés sur le sujet on peut retenir les points suivants :

A/ la présence de matières organiques en quantité notable (plus de 2 %) se traduit par une couleur foncée (clarté Munsell faible), correspondant à une faible réflectance dans toutes les longueurs d'onde (Shields et al. 1968 ; Leger et al., 1979 ; Krishnan et al., 1980).

B/ des taches de couleur noirâtres (oxydes de manganèse), verdâtres ou bleuâtres (carbonates et sulfates d'hydroxydes ferreux) sont rencontrées dans certains sols, mais rarement à leur surface,

C/ les carbonates et aluminosilicates ont une couleur claire, liée à une réflectance élevée dans le domaine visible, qui varie sensiblement avec la taille des particules (Leu. 1977). Cette couleur est souvent masquée par celle des autres composés,

D/ les différentes formes d'oxydes de fer sont responsables de la couleur des sols jaunes, orangés et rouges (Schwertmann et Taylor, 1977).

L'influence de la texture sur la couleur et la réflectance a été étudiée sur des mélanges de proportions variées de sable et d'argile. Gerbermann et Neher (1979) ont montré que plus l'échantillon est sableux, plus la couleur est claire.

2.4- Conclusion :

De la description des principales propriétés spectrales des composantes des états de surface, on s'aperçoit que pour chaque type de composante, il existe un domaine spectral privilégié permettant sa reconnaissance. Le domaine des micro-ondes semble adapté à l'analyse de l'encroûtement de surface ainsi qu'à l'estimation de la rugosité et de l'humidité du sol sous certaines conditions :

Le PIR est adapté à la caractérisation des résidus de culture et des surfaces encroûtées et de la végétation verte. Une information sur l'humidité du sol et sur les cailloux est également accessible grâce à l'infrarouge thermique (IRT). L'hyperspectral donne accès à une information sur l'état de dégradation de la surface du sol et permet d'identifier les sols croûtés. Finalement, le domaine du visible est utile pour l'étude de la végétation ainsi que pour l'analyse de l'encroûtement des sols, du microrelief de l'humidité et des cailloux grâce à l'albédo. Sachant que l'état de surface est constitué par un assemblage des différentes composantes, il est donc difficile de privilégier un domaine spectral pour l'identification un état sans tenir compte d'autres paramètres liés aux capteurs de télédétection. Parmi ces paramètres, les résolutions spatiale et temporelle sont, en effet, déterminantes pour le potentiel de reconnaissance des états de surface.

DEUXIEME PARTIE MATERIELS ET METHODES

CHAPITRE.3-Description des méthodes de mise en œuvre

3-1-Critères de choix de site étudié

Le choix de site a été effectué selon les critères suivants :

- 1-Couvrir le maximum de surface et présente le plus grand nombre des états de surfaces (une mosaïque des états de surfaces);
- 2- Egalement ce choix est effectué dans le but de répondre aux exigences du projet PNR dans le quel est inscrits notre sujet (**ALLUVSOL** : les sols des milieux alluvionnaires en zones sahariennes : inventaire, organisation spatiale, qualité des sols et approche paleo-écologique).

3-2-Présentation de site d'étude

Selon leurs caractéristiques géomorphologiques, lithologiques et minéralogiques le site d'étude peut être subdivisé en cinq unités principales :

- Le plateau calcaire et reg (plateau pliocène) ;
- Les sables éoliens (dunes et voiles sableuses) ;
- Les collines gréseuses (les affleurements des grès rouges de Mio-Pliocène) ;
- La sebkha et les sols salins (sebkha Safyoune et ses environs) ;
- Les anciennes terrasses alluviales.

3-3- Choix de la méthode d'investigation

La mission de terrain a été effectuée suivant les résultats de la classification non supervisée et le rendu cartographique attendu. Ainsi nous avons opté pour la méthode des transects.

La méthode consiste à établir un itinéraire linéaire en passant par le maximum d'unités de surface. La matérialisation du transect se fait premièrement sur l'image par un profile spectral (Fig. 5.5) passant presque par tous les classes radiométriques identifiées sur image en composant (RVB-641), ensuite sur le terrain, à l'aide d'un GPS suivant les coordonnées correspondants au profile sur l'image.

Le choix de transect est guidé par le souci de visiter les endroits des pics a forte réflectance sur le profile spectral (fig.5.6) et explorer le maximum d'unités pour discerner les variabilités. Le long des cheminements sont marqué des stations d'observation et d'échantillonnage. Si le nombre de stations semble numériquement faible (09 stations), il s'avère cependant représentatif du fait de leur répartition sur toutes les unités.

Les investigations dans leur ensemble permettent une bonne connaissance de la zone grâce aux données acquises sur le terrain. Ces données constituent l'information réelle du terrain et seront comparées aux documents d'interprétation dans le but de tenter une identification aussi précise que possible des éléments du états de surface sur image classifier. La troisième étape de notre démarche est consacrée aux traitements des données satellitaires pour les confrontées à la réalité de terrain.

3-4-Sur terrain :

Nous avons précédemment souligné les avantages de la télédétection dans l'exploration des ressources naturelles mais aussi ses limites qui induisent la nécessité d'une vérification sur terrain.

A cet effet, PARNOT (1988) remarque que la télédétection est une technique et ne peut prétendre fournir à elle seule l'ensemble des informations nécessaires à la confection des cartes ; l'observation à distance de la terre présente des avantages appréciables mais ne supprime pas la nécessité d'observer, de mesurer et de consulter les données déjà disponibles.

Deux missions ont été réalisées sur le terrain de la zone d'étude. Celles-ci ont été respectivement effectuées en Avril 2011 et janvier 2012, ont permis d'acquérir de l'information sur la réalité de terrain, les différentes occupations du sol et de repérer celles-ci géographiquement par GPS. Ces informations ont joué un rôle important dans la réalisation d'une liste de classes pour les classifications.

3.4.1. Objectifs

- 1/Vérifier et contrôler les unités discriminées lors de l'interprétation de la classification non superviser ;
- 2/Analyser et relever les différents paramètres (nature et état des sols, couleur, la position des différents états les un par rapport au autres....) ;
- 3/Collecter des données utiles à la classification (géo-référencé les zones échantillonnées)
- 4/prélèvement des échantillons en surface du sol en vu d'analyses physico-chimiques et minéralogiques

3-5-Au laboratoire

3.5.1. Les méthodes analytiques :

3.5.1.1/Acquisition des données analytiques :

La préparation des échantillons de sols pour analyse physico-chimique.

L'échantillon destiné au laboratoire est soumis à différents traitements :

- Réceptions – identification (description) ;
- Séchages à l'air et/ou à l'étuve a environ 40°C ;
- Réductions des mottes ;
- Tamisages (avec pesée du refus si nécessaire) sur tamis 2mm ;
- Divisions sur échantillonneur-diviseur et broyage d'une aliquote sur broyeur planétaire ;
- Mise en boîte (terre fine) et en godet plastique (terre rebroyée).

3.5.1.2/Analyses physiques et chimiques :

Les analyses physiques et chimiques ont été réalisées aux laboratoires :

- laboratoire de biogéochimie des milieux désertiques ;
- laboratoire de pédologie de l'université d'Ouargla ;
- laboratoire de travaux public du sud (LTPS, Ghardaia) ;
- laboratoire d'analyse chimique de l'agence nationale de ressources hydrique (ANRH-Ouargla).

➤ Granulométrie :

Elle a été faite sur des échantillons de sol meuble (inférieur à 2mm) séchée à l'air libre, selon la méthode internationale à la pipette de Robinson, après décarbonatation et destruction de la matière organique puis la dispersion des particules par un dispersant énergétique (hexamétaphosphate de sodium) et par agitation mécanique. Puis effectuer des prélèvements à l'aide de la pipette de Robinson, en appliquant la loi de Stokes (Aubert, 1978). Cependant pour certains échantillons nous avons effectué la granulométrie par tamisage (en 5 classes).

➤ Calcaire total :

Il a été déterminé par calcimétrie volumétrique à l'aide d'un calcimètre de Bernard, on utilisant la propriété du carbonate de calcium de se décomposer sous l'action d'un acide, en eau et gaz carbonique, ce dernier est recueilli, dans un tube gradué en millilitres (Aubert, 1978).

➤ Gypse :

Le dosage du gypse a été effectué selon la méthode proposée par Coutinet (1965), et dont le principe est le dosage des ions SO_4^{2-} après une attaque aux carbonates d'ammonium et le chlorure de baryum.

➤ Matière organique :

Elle a été déterminée par un spectrophotomètre (DR 2000), en se basant sur le principe d'oxydation de la matière organique par une quantité en excès de dichromate de potassium en milieu sulfurique (AFNOR, 1999).

➤ Conductivité électrique :

Elle a été obtenue à partir de l'extrait de solutions de pâte saturées de sols. La mesure a été effectuée après la mise en équilibre.

➤ pH :

La mesure a été effectuée sur des extraits dont le rapport terre/eau est de 1/2,5.

3.5.1.3/Analyses minéralogique :

3.5.1.3.1/Analyse par diffractomètre aux rayons X (DRX) :

L'analyse en diffraction de rayon X a été faite au laboratoire de physique de l'université de Laghouat en utilisant un appareil (Philips X'Pert-MPD X-ray Diffraction System). Nous avons analysé des échantillons en poudre représentant les principaux états de surfaces caractérisés.

Le diffractomètre des Rayons X utilisé (Philips X'Pert-MPD X-ray Diffraction System) ; utilise le montage de BRAGG – BRENTANO (photo III-1). Le faisceau de rayons X émis par le tube est limité par une fente de divergence

afin de contrôler la surface irradiée de l'échantillon situé au centre du goniomètre. Le faisceau est focalisé par une fente réceptrice placée devant le détecteur qui enregistre l'intensité. L'anode du tube à Rayons X, les cristallites de l'échantillon participant à la diffraction et la fente du détecteur se trouvent sur le cercle de focalisation. Les Rayons X collectés par le détecteur sont convertis en impulsions électriques qui permettent de tracer les diagrammes de l'intensité du rayonnement diffracté en fonction de l'angle de diffraction : $I=f(2\theta)$ qui sont la base de l'analyse. Pour les caractéristiques de l'appareil (voir tableau 3.1) :

Unité de contrôle	PW 3040
Goniomètre (theta/theta)	PW 3050/60
Générateur	PW 3040 (mppc)
Générateur de tension (kv)	40
Générateur de courant (mA)	50
Tube rayon X	PW3373/00 Cu LFF
Tube focus	Line
Take off angle (°)	6.00000
Radiation utilisée	K-Alpha1
K-Alpha1-longueur d'onde (Å°)	1.54056
K-Alpha2- longueur d'onde (Å°)	1.54439
K-Alpha1/ K-Alpha2 (Å°)	
K-Béta- longueur d'onde (Å°)	1.39222

Tableau. 3.1 : Caractéristiques physiques de diffractomètre des Rayons X utilisé.



Photo .3.1: diffractomètre des Rayons X sur poudre (Philips X'Pert-MPD X-ray Diffraction System)

3.5.2. Les traitements numériques de l'image satellitale :

3.5.2.1/Présentation d'ERDAS IMAGINE : Erdas Imagine (Earth Resource Data Analysis System) est un logiciel de télédétection avec des fonctionnalités d'édition d'images raster développé par la société Erdas. C'est une boîte à outils qui permettent d'acquérir, d'orienter, de mesurer, d'analyser, de traiter et de mettre en forme des données géoréférencées. Il a été conçu pour le traitement d'image, sa suite d'outils, sa simplicité d'utilisation et son apprentissage rapide vous permettra de créer rapidement l'imagerie rectifiée nécessaire à l'amélioration de votre SIG. Il est capable de modifier le niveau de luminosité ou de réflectance des éléments des images, de faire des extractions, de réaliser des chaînes de traitement (workflows), d'importer et d'exporter un grand nombre de formats, de mosaïque des images, ect.

Erdas imagine est l'un des premiers logiciels qui permet à l'utilisateur de créer des systèmes experts de traitement de données d'imagerie. IMAGINE Expert Classifier™ offre aux utilisateurs d'IMAGINE Professional un outil pour construire et exploiter un système expert pour la classification, le post-traitement des données classées et la modélisation avancée d'un SIG.

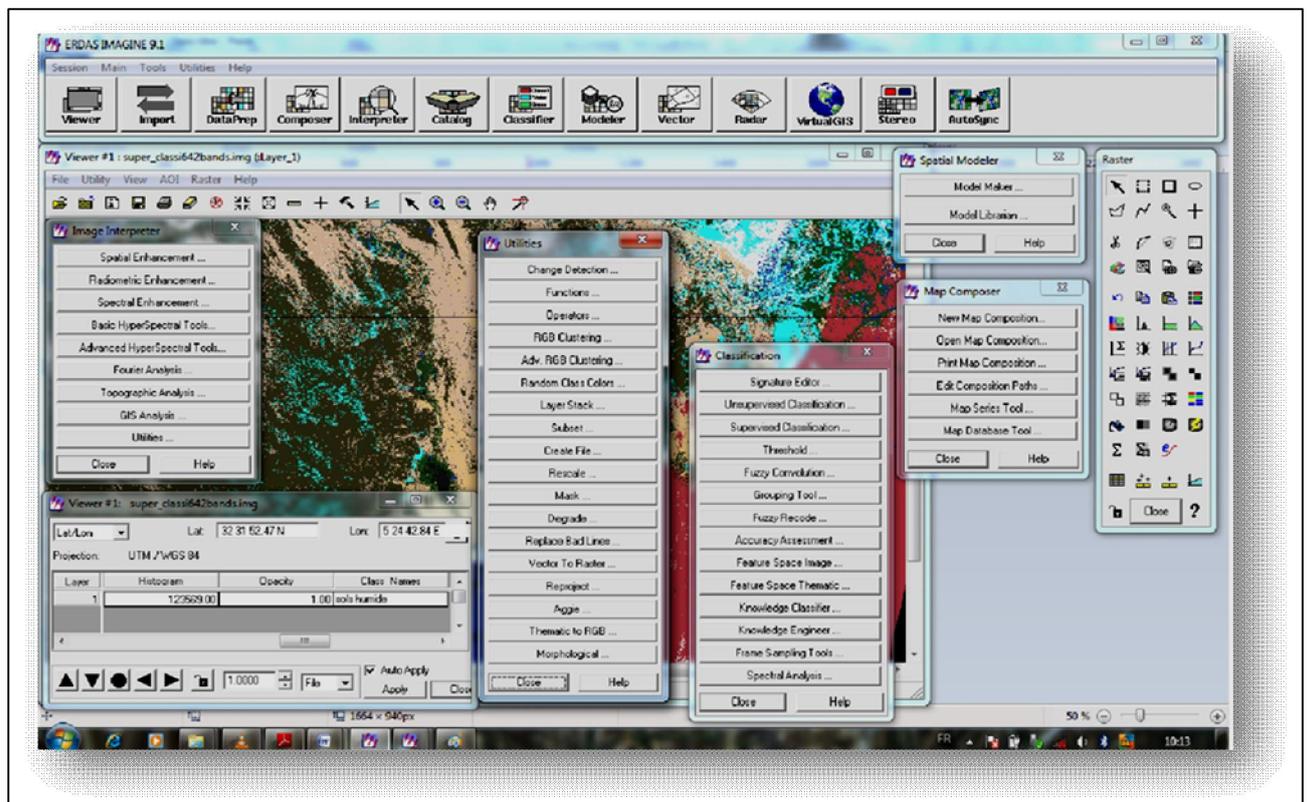


Fig.3.2 : Interface générale d'Erdas Imagine (V.9.1).

- Fonctionnalités : Les utilisateurs d'imagerie multi-spectrale souhaitant en extraire rapidement une carte avec des interactions simplifiées verront immédiatement l'intérêt des nouveaux outils d'analyse spectrale (Spectral Analysis) (Erdas Field Guide, fifth edition., Erdas .ENC.1999 ; erdas Imagine tour guide Leica geosystems LLC. 2006).
- Procédures standard prédéfinies :
 - Détections d'anomalies ;
 - Recherche de matériaux particuliers ;
 - Cartographie de matériaux sélectionnés par l'utilisateur ;
 - Identification de matériaux spécifiques.
- Pré-traitement d'images hyperspectrales
 - Spécification de la Largeur/Longueur d'onde des bandes ;
 - Extraction par sous-groupe de bandes utiles (indices et ratio) ;
 - Correction Atmosphérique ;
 - Fraction de bruitage minimum.

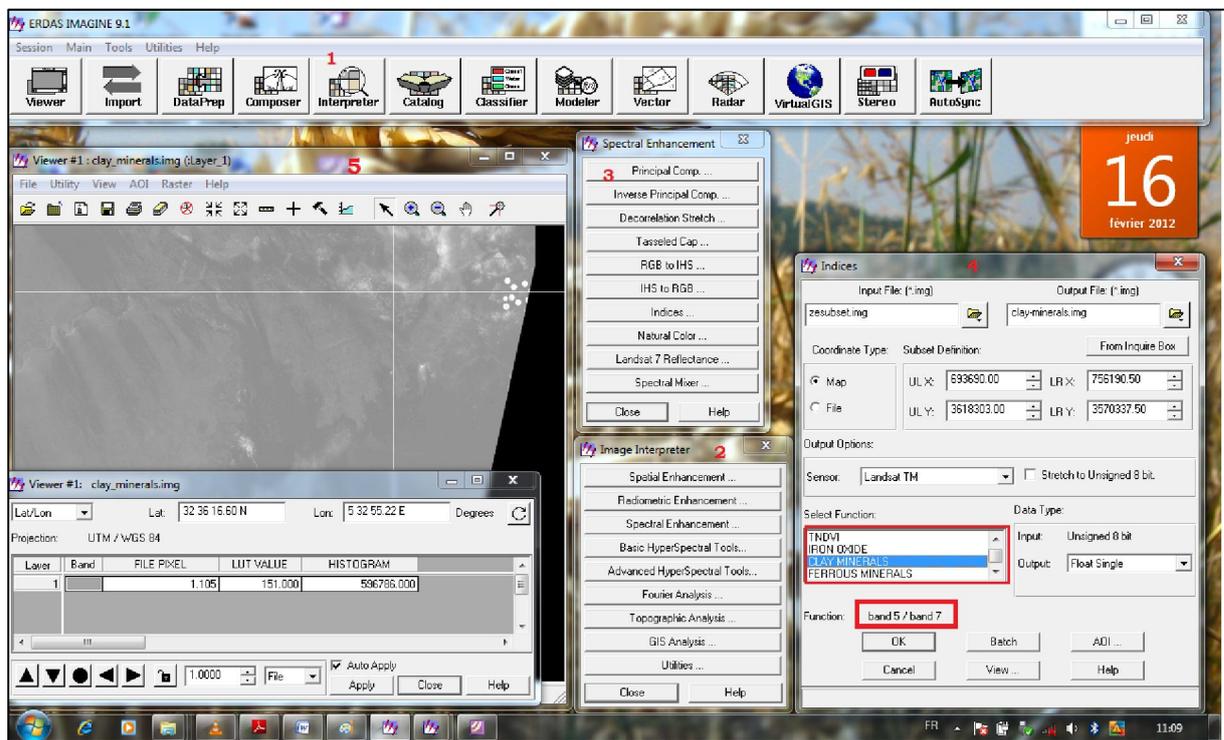


Fig.3.3 : les étapes de traitement et d'analyse spectrale avec Erdas Imagine (composante principale).

- Bibliothèques spectrales de références fournies :
 - ASTER ;
 - JPL ;
 - USGS ;
 - Import des nouvelles versions de ces bibliothèques (mise à jour) ;
 - Import des bibliothèques SITAC ;
 - Import des bibliothèques SPECMIN ;

- Station de traitement d'analyse spectrale :
 - Espace de travail multi-fenêtres, permettant d'accéder à tous les outils, fonctionnalités et fenêtres d'affichage pour l'analyse interactive d'imagerie hyperspectrale, des signatures spectrales et à l'affichage des autres données.
 - Trois visualiseurs synchronisés et géoréférencés (vue principale, vue générale, vue locale) ;
 - Outil intégré affichant les diagrammes des signatures spectrales ;
 - Outil intégré affichant les bibliothèques spectrales ;
 - Interaction par glisser-déposé entre les pixels de l'image, les diagrammes et les bibliothèques ;
 - Accès à tous les pré-traitements et tâches.

- Méthodes d'analyses spectrales :
 - Orthogonal Sub-space Projection (OSP) ;
 - Spectral Angle Mapper (SAM) ;
 - Spectral Correlation Mapper (SCM) ;
 - Constrained Energy Minimization (CEM).

- Classification multispectrale
 - Classification non dirigée ;
 - Filtrage par convolution floue ;
 - Algorithme ISODATA ;
 - Initialisation des moyennes des classes (centres) à partir des statistiques de l'image ou à partir de signatures spectrales optionnelles ;
 - Définition du seuil de convergence, du nombre maximum d'itération et des limites ;
 - Traitement d'une ou de plusieurs zones d'intérêt (AOI) ;
 - Création d'un fichier de signatures en sortie ;
 - Définition du nombre de classes et du schéma couleur dans la segmentation résultat ;
 - Sélection et mise en évidence interactive des groupes de classes de travail ;
 - Sauvegarde des groupes de classes dans une image ;
 - Estimateurs de précision s'appuyant sur des données auxiliaires permettant de mesurer les erreurs ;

- Classification dirigée
 - Contrôle des attributs statistiques automatiquement générés dans le fichier image en sortie ;
 - Création d'un fichier de distances pour le seuillage ;
 - Contrôle de la classification ;
 - Les signatures non paramétriques peuvent être ignorées, ou classées en fonction des limites parallélépipédiques ou en fonction d'un masquage dans l'espace objet ;
 - Règles de superposition de pixels ;
 - Par des règles paramétriques ;
 - Classification en fonction d'un ordre ;

- Laisser tel quel ;
 - Les pixels non classés sont évalués suivant une règle paramétrique ou laissés tels quel ;
 - Les signatures paramétriques peuvent être évaluées par une des règles suivantes : maximum de vraisemblance, distance de mahalanobis ou distance minimale.
 - Classification hybride paramétrique/non paramétrique ;
 - Sélection, évaluation et édition des signatures ;
 - Création de signature ;
 - Croissance automatique de zones ;
 - Objet vecteur sélectionné ;
 - AOI point, ellipse, polygone, ou polyligne définie par l'utilisateur ;
 - Editeur sophistiqué pour l'extraction et l'évaluation de signatures à partir d'histogrammes bi-dimensionnels ;
 - Evaluation et manipulation de signatures ;
 - Matrices de contingences ;
 - Mesures de séparabilité ;
 - Sélection de bandes par l'utilisateur pour chaque mesure ;
 - Image test, incluant les zones de recouvrement entre classes (fonction image-Alarm) ;
 - Moyenne sur chaque bande ou affichage de l'histogramme ;
 - Combinaisons définies par l'utilisateur ;
 - Liens images-histogrammes bidimensionnels ;
 - Extraction de signatures non paramétriques ;
 - Fusion, suppression et remplacement de signatures ;
 - Spécification des bandes à utiliser lors de la classification ;
 - Edition manuelle des limites parallélépipédiques ;
 - Définition de valeurs en sortie des classes, des couleurs, des probabilités a priori et de l'ordre de classification.
- Vérification de la précision de la classification :
- Sélection aléatoire ou définie par l'utilisateur de placettes de vérité terrain,
 - Génération automatique d'un rapport sur la précision avec statistiques Kappa, matrices d'erreurs et indice global de précision.
- Estimation de la couverture (Area Frame Sampling)
- Cette nouvelle fonction utilise une approche statistique pour estimer la couverture du sol dans une région donnée en se basant sur l'interprétation d'échantillons d'images à plus haute résolution.
- Model Maker
- C'est un outil graphique orienté objet pour la création d'analyse de données images, vectorielles et de modélisation spatiale, basé sur le Spatial Modeler Language (SML) ;
 - Plus de 50 modèles livrés en standard ;
 - Utilisation d'un schéma graphique de la chaîne de traitement pour réaliser rapidement des analyses SIG sophistiquées ;
 - Combine des fonctions d'analyse spatiale SIG et de traitement d'image dans le même modèle ;

- Combine imagerie, vecteur et données d'attributs dans un seul modèle ;
 - Application d'un même modèle à de nouvelles données ou à des zones géographiques différentes simplement en appuyant sur un bouton ;
 - Définition d'un objet par double clic ;
 - Fonctions Objets ;
 - Accès à plus de 200 fonctions séparées ;
 - Présentation de la syntaxe type ;
 - Utilisation et création d'attributs ;
 - Définition de la zone géographique d'application et de la résolution spatiale ;
 - Couper, copier et coller des objets ;
 - Modification et ré-exécution rapide du modèle ;
 - Lancement direct depuis Model Maker d'un modèle ou génération d'un script SML en vue d'une intégration dans l'EML (interface graphique) IMAGINE Radar Interpreter™.
- Modification de la luminance
- Production d'images non dégradées, à luminance forte ou faible
 - Spécification de la valeur d'interception locale de la luminance
 - Normalisation de l'illumination dans la direction de visée
 - Multiplicateur du contraste de la scène défini par l'utilisateur
 - Correction de l'illumination par colonnes et par lignes

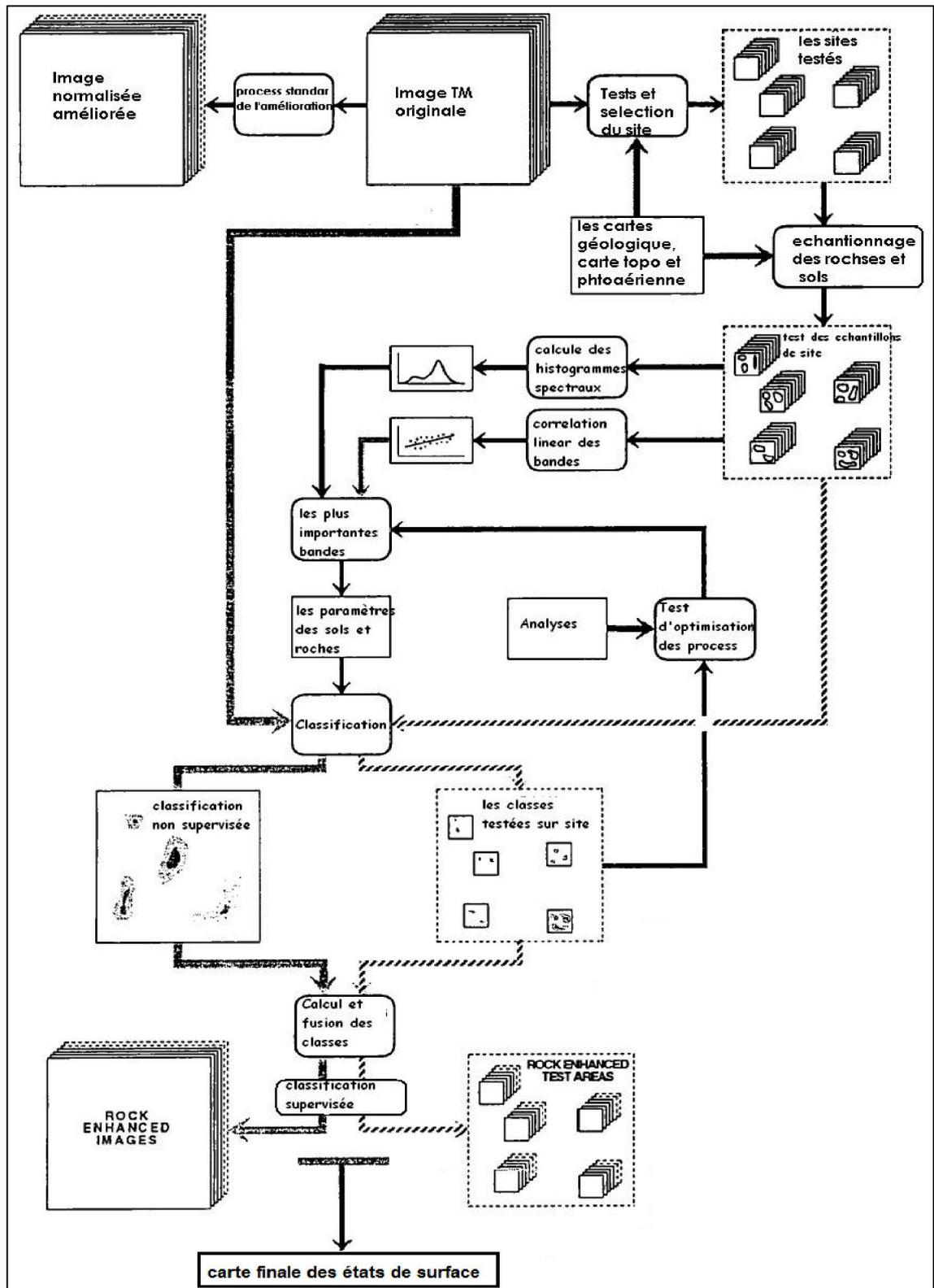


Fig. 3.4 : Organigramme de l'étude

3.5.2.2/ Les données de Télédétection :

Capteur	Couverture Spectrale		Résolution Spatiale
Landsat7 ETM+	Visible au Proche Infrarouge	TM1 : 0.45 – 0.52	30m
		TM2 : 0.52 – 0.6	
		TM3 : 0.63 – 0.69	
		TM4 : 0.76 – 0.9	
	SWIR	TM5 : 1.55 – 1.75	30m
		TM7 : 2.09 – 2.35	
	Infrarouge Thermique	TM6 : 10.42 – 12.5	60m
	Panchromatique	TM8 : 0.52 – 0.90	15m

Tableau 3.2 : caractéristiques techniques du capteur Landsat7 TM+.

3.5.2.2.a/ Images satellitaires

L'image utilisée dans le cadre de cette étude, est une scène de satellite Landsat7 ETM+ acquise le 02 Avril 2001. Le tableau (3.2) et (3.3) montrent les caractéristiques spectrales et spatiales du capteur Landsat7 et les caractéristiques générales de l'image utilisée.

N° de la scène	P194 r 037	
Date de prise de vue	02.04.2001	
Heure de prise de vue	09 :35.43.71	
Dimension	8637x7695x1 [BSQ]	
Taille	66.523,758 bytes	
Élévation solaire	38.78 km	
Azimut solaire	135.81	

Tableau 3.3 : Caractéristiques techniques de la scène utilisée (P194r037).

3.5.2.2.b/ Le choix de la date de la prise de vu :

Le projet de notre étude prévoit l'utilisation de l'image télédéteectée pour la cartographie de la surface de sol exposé au jour. A cet effet le choix de la date de la prise est de vu est primordiale et doit prendre en compte les exigences suivantes :

- 1-Des conditions climatiques favorables tel que le degré de la luminance (L'insolation) et ciel clair sans nuages ;
- 2-Etat du couvert végétal favorable (surface dépourvu de couvert végétal où a couvert végétal peut dense) ;
- 3-Etat de sol favorable (sol à l'état sec).

L'image datée d'Avril 2001 utiliser dans cette étude répond bien aux conditions susdites.

3.5.2.3/Traitement numérique de l'image :

3.5.2.3.1/Pré-Traitement

3.5.2.3.1.a / Corrections géométriques et radiométriques :

Avant d'utiliser les données pour le traitement, il est important de souligner que les images de la télédétection issues de radiomètre sont le plus souvent entachées de défauts inhérents à la prise de vue (KOUUDA. M, 1981). Alors ces données subissent un prétraitement. Ces prétraitements se rapportent à la radiométrie et à la géométrie des pixels.

Noté que on a reçu les images déjà prétraitées, donc nous l'avons pas incluse dans nos différentes étapes de traitement.

3.5.2.3.1.b/Traitement de la distribution spectrale: L'une de caractériser les signatures spectrales est de créer des combinaisons arithmétiques entre bandes spectrales. Il s'agit de calculer une grandeur à partir des différents comptes numériques multibandes d'une même tâche.

3.5.2.3.1.c/Les rapports : les ratios sont particulièrement intéressants en géologie car ils mettent mieux en évidence les contrastes dus à des différences dans les signatures spectrales (Chavez et al., 1983 ; Crippen et al., 1988 ; Davis et Berlin, 1989). En effet, dans chaque compte numérique interviennent les propriétés de réflectivité ou d'émissivité de la surface, et l'angle que fait la tâche avec l'éclairement solaire (essentiellement la pente topographique de la tâche).

Dans un rapport, le facteur de pente topographique ainsi que la plupart des autres facteurs (l'atmosphère, l'élévation et azimut solaire ainsi que l'angle de visée de l'instrument) se trouvent à la fois dans le numérateur et dans le dénominateur, et sont donc éliminés. Le calcul donne une grandeur influencée principalement par la réflectance multibande de la surface de la tâche, ce qui permet d'atténuer les ombres dans les images (Pelton, 1987). Pour rechercher les argiles (kaolinite, montmorillonite, illite, alunite), le minimum de réflectance étant dans l'infrarouge lointain TM7 et le maximum dans le moyen infrarouge TM5, le rapport TM5/TM7 est recommandé.

Pour les minéraux ferrugineux (limonite, goéthite, hématite) qui ont une réflectance minimale dans le bleu et maximale dans le rouge, il faut faire le rapport TM3/TM1 (planche 11.). Les rapports TM3/TM1, TM3/TM2 et TM5/TM4 montrent les oxydes de fer, alors que TM5/TM7 souligne les hydroxydes (planche 3.4).

On utilise dans ce cas les deux canaux extrêmes : Le canal 1 et le canal 7, leurs valeurs sont très peu corrélées, en effet, plus la corrélation est faible, plus il est possible d'extraire de l'information.

- Le Ratio 7/4 : (Planche 3.5 et 3.6) Lyon (1977) préconise l'utilisation de ce ratio pour montrer les détails significatifs de changements lithologiques.

- Le Ratio 1/7 : (Planche 3.7 et 3.8) Escadafal (1989), en utilisant sur une image de Thematic Mapper les bandes TM1 de 450 à 520nm, et TM7 de 2100 à 2350 nm, a distingué le gypse des carbonates et du quartz.
- Les indices : sont des formules qui expriment des relations entre les bandes spectrales, traduisant les caractéristiques des tâches. Ils peuvent être normalisés en les divisant par la somme des facteurs pris en compte. Par exemple, l'indice de végétation ($IV = \frac{PIR-R}{PIR+R}$) est souvent utilisé sous sa forme normalisée pour diminuer les effets multi-temporels et de capteur. $IV = \frac{PIR-R}{PIR+R}$ est fortement corrélé avec l'activité chlorophyllienne. L'indice de stress hydrique ou NDWI (Normalised Difference Water Index) : $NDWI = \frac{PIR-MIR}{PIR+MIR}$ met en évidence la végétation humide et les surface en eau. L'indice de brillance ($IB = \sqrt{R^2 + PIR^2}$) exprime la clarté du sol, et dépend du couvert végétal et de l'humidité du sol.

3.5.2.3.2./Analyse en composantes principales :

Le but du traitement en composantes principales (C.P) est de condenser les données initiales de (n) bandes –souvent corrélées – en un nouveau groupement de données qui sont moins corrélées ; il est possible de définir (n) composantes principales correspondant à (n) axes d'un nuage de (n) dimensions.

En fait, pour la plupart des informations (généralement à 90%) se trouvent dans la première composante principale.

A chaque axe correspond un nouveau fichier image appelé composante principale (C.P) ; l'axe le plus allongé est la C.P.1 avec la plus forte variance et présente donc le plus d'information. L'objectif de ce traitement est donc, de générer un petit nombre d'images riches en information à partir des fichiers-image multi-bandes d'une scène TM de Landsat7 par exemple C.P1 donne les variations de l'albédo, C.P2 celle des oxydes de fer, C.P3 et C.P5 celles de la végétation, C.P4 celles des roches, C.P7 le bruit instrumental (Chorowicz & al., 2003).

3.5.2.3.3./Réalisation de la composition colorée :

Elle est obtenue par synthèse additive des trois couleurs : rouge, verte et bleue, associées chacune à un canal de l'image : le rouge pour le canal TM3, le vert pour le canal TM2 et le bleu pour le canal TM1. Le résultat d'une telle combinaison est une image couleur (composition colorée en fausses couleurs). En effet les trois canaux TM1, TM2 et TM3 pris isolément ne suffisent pas pour permettre une identification judicieuse des différentes unités de surface. Nous avons donc établi des compositions colorées en combinant les différents canaux entre eux après leur avoir affecté différentes couleurs. Des seuils ont été établis sur l'histogramme de chaque canal pour obtenir une image avec le maximum de contraste. Il nous est apparu que la composition colorée (TM7, TM4, M1) donnait des résultats plus satisfaisants. C'est cette dernière qui a servi aux différents traitements effectués.

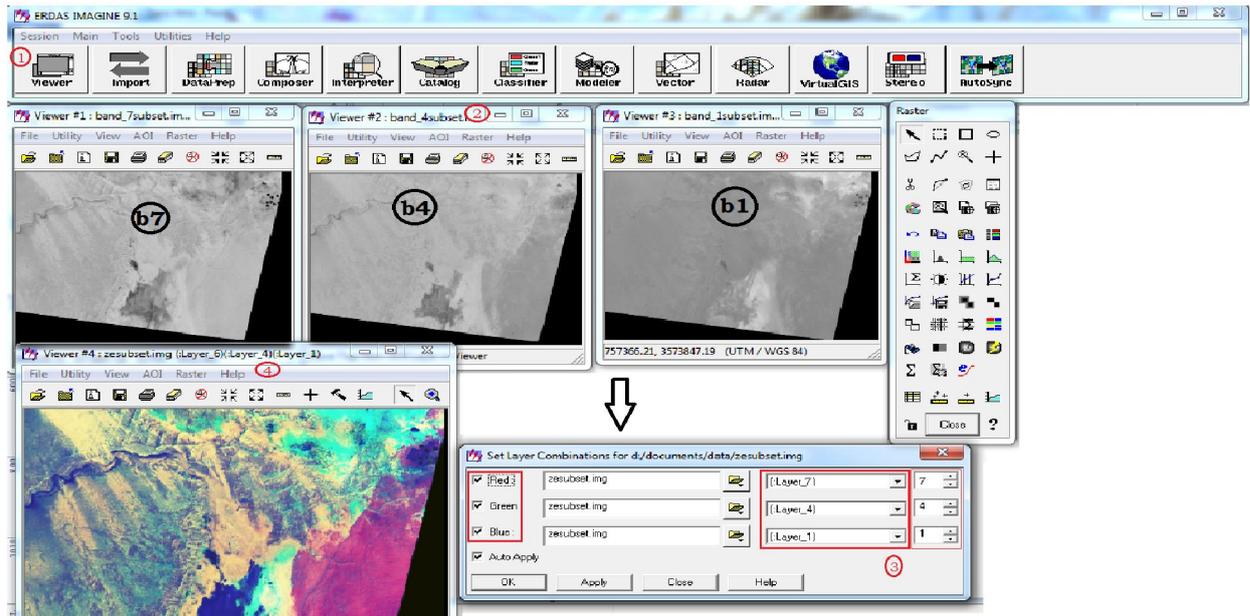


Fig. 3.5 : les étapes de réalisation d'une composition colorée avec Erdas imagine.

3.5.2.4/ Les classifications

L'objectif des classifications est de regrouper les pixels d'une scène ou de plusieurs scènes en familles, caractérisée chacune par sa signature spectrale. Pour mettre en œuvre valablement cette technique en géomorphologie et géologie, il faut faire l'hypothèse que l'occupation du sol ou les signatures de sol nu sont corrélées avec des formations lithostratigraphiques ou pédologiques (Chorowicz et al., 2003). La classification peut être dirigée ou non selon que l'on utilise des échantillons connus au départ ou non.

La classification multi-bandes dirigées utilise la connaissance préalable de terrain et comporte plusieurs étapes 1) recherche des surfaces dont la réalité de terrain est connue ; choix de nombre de classes et leurs première définition. Les connaissances de départ peuvent être des observations de terrain ou une carte géologique locale détaillée.

2) délimitation sur les images de polygones d'apprentissage. Pour une formation lithostratigraphique, il faut définir plusieurs types de surfaces d'entraînement homogènes car chaque formation présente différents aspects.

Dans notre cas d'étude, nous avons utilisé la classification au maximum de vraisemblance. Est un algorithme de classification où le pixel est attribué à la classe à laquelle il a la plus grande probabilité d'appartenir, suivant le critère de Bayes.

L'algorithme du maximum de vraisemblance suppose que les signatures des différentes classes d'objets soient distribuées normalement.

Critère de Bayes : $q(i/v) = Q(v/i)q(i) / Q(v)$

Cette formule permet de calculer la probabilité conditionnelle de la classe i. Le théorème de Bayes dit que: "Soit une valeur de pixel v et, pour chaque classe i, la probabilité q(i/v) que le pixel appartienne à la classe i, alors, la meilleure classe à laquelle attribuer le pixel sera celle pour laquelle (qi/v) sera maximum".

3.5.2.4.1/La classification non supervisée :

Parce que la classification non supervisée réalisée automatiquement produit des classes indépendantes de l'intérêt recherché, il s'est avéré préférable, pour y parvenir, d'opter pour un procédé de classification semi-automatique ou partiellement directif.

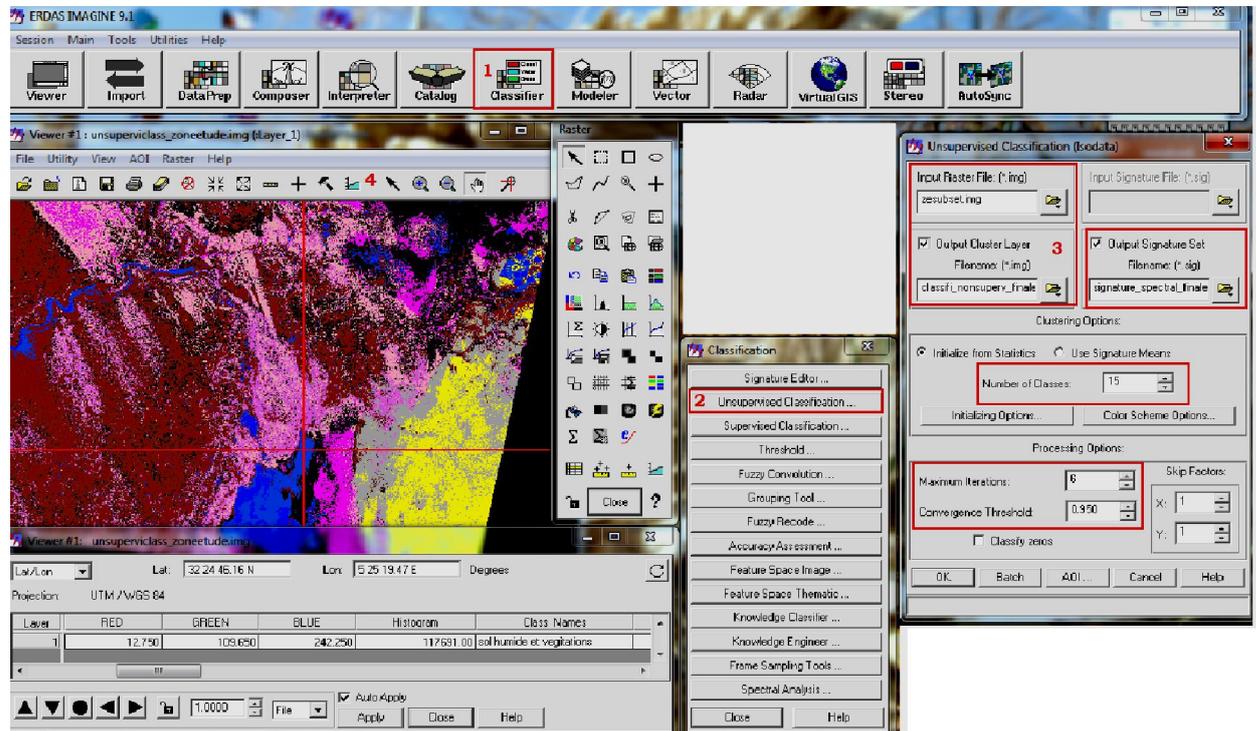


Fig.3.6 : les étapes de réalisation d'une classification non-supervisée avec Erdas imagine.

En effet, il est important, pour que l'interprétation soit efficace, de supprimer ou fusionner les subdivisions inutiles et de valoriser les différences intéressantes. Cela peut concerner les classes des sables, la classe de gypse, la classe des sols humides et de végétations. Ce mode de classification, qui comporte nécessairement une part d'arbitraire et demande une connaissance minimum préalable du terrain, offre l'avantage de réduire les discordances entre les classes radiométriques.

Les classifications non supervisées, ainsi obtenues à partir des divers documents référentiels, ont été interprétées directement sur le terrain. Elles expriment globalement neuf (9) classes du domaine minéral et deux classes du domaine non sol (planche 5.1).

On constate que une classe "pure", désignant par un thème unique est rare, en général, les classes représentées ont une signification pédologique globale, mais elles incluent aussi un certain nombre d'unités secondaires occupant une surface moindre, les thèmes secondaires varient en nature et en surface selon les traitements.

Noté qu'il ya toujours certaines confusions communes entre les classes à comme celle entre végétation et sols rugueux du reg ; entre sols salins (efflorescences salines légèrement humides) et sols humides ; efflorescences salines et encroûtement gypseux et sols salins humides et surfaces d'eaux.

3.5.2.4.2/ Les traitements statistiques

Le programme Erdas imagine permet de calculer les paramètres statistiques par classe et par canal à savoir la superficie de la zone en pixel, le minimum et le maximum, la moyenne des pixels classés dans le thème, la variance dans les trois canaux, la covariance, les coefficients de corrélation entre les canaux.

On pourrait penser qu'une composition colorée obtenue à partir de trois canaux portant des informations assez différentes (faible coefficient de corrélation) sera plus discriminante qu'une autre obtenue par la combinaison de canaux portant des informations semblables (coefficient de corrélation élevé). Alors la meilleure combinaison est la combinaison des canaux à faible coefficient de corrélation.

3.5.2.4.3/ Le choix des classes

Les classes décrites sur le terrain sont repérées approximativement sur l'image et visualisées grâce au programme ERDAS Imagine de « Leica geosysteme ». Ainsi les différentes classes établies lors de l'interprétation ont été prises comme « input signature file» de classification. La classification ainsi créée est sauvegardée dans un fichier ".img". Chacune des classes étant identifiées par l'extension de sa signature spectrale (couleur attribuée a chaque classe) sur l'image (Fig.3.7). Par exemple le champ de la classe encroûtement gypseux est indiqué avec la couleur cyan.

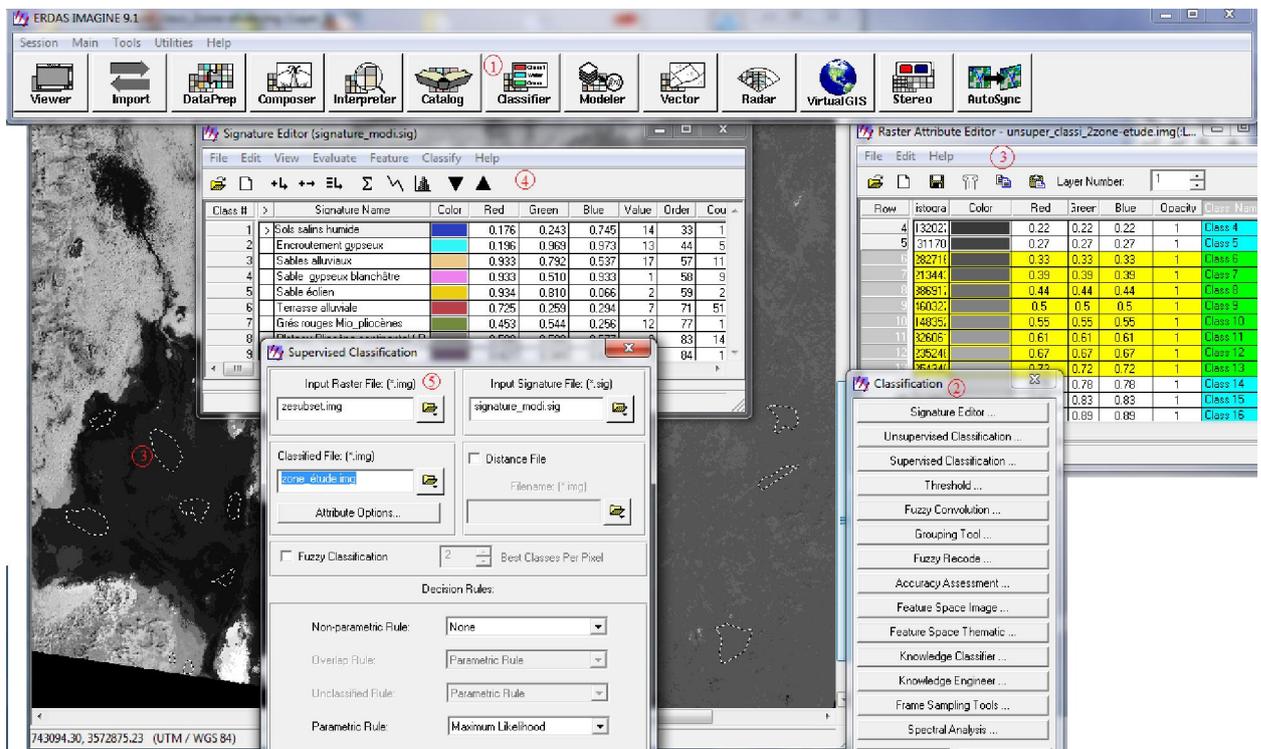


Fig.3.7 : les étapes d'échantillonnage des zone-test pour la classification supervisée avec Erdas imagine (choix des AOI's).

Le traitement numérique nous permet de définir nettement les constituants de sol, dans le but de fournir des informations thématiques. Le problème est qu'il n'est pas toujours possible d'associer un seul type d'objet à

une signature spectrale précise (la faible résolution de l'image). Pour une meilleure discrimination des états de surface nous sommes passés à une classification de type supervisé : Elle consiste en un premier temps à définir des zones-test (aera-of-interst AOI) sur les compositions colorées retenues et visualisées à l'écran, ce sont des échantillons des thèmes retenus par le traitement de l'image et l'homogénéité est le critère principal pour délimiter une zone- test (fig.3.7). Une zone-test devra comporter un minimum de 30 pixels (BASTOS, 1989).

Le programme Erdas imagine permet de délimiter (sur l'image retenue) à l'écran avec la souris, les zones- test sous forme de polygone. On crée ainsi ce qu'on appelle une file de polygones qui sera utilisée plus tard dans la classification.

Dans tous ces processus le critère homogénéité-hétérogénéité doit nous guider vers une distribution normale de ce qui a été classé.

Il faut donc vérifier sur l'image après le traitement, que les pixels du même thème sont tous classés. Si des pixels supposés être d'un thème donné restent encore (une confusion entre les classes), on refait un nouveau découpage des échantillons. L'opération est ainsi répétée jusqu'à ce que les résultats soient satisfaisants.

3.5.2.4.4/Réalisation du profil spectral sur image

La réalisation d'un profil spectral sur image par Erdas imagine se fait comme suite (Fig.3.8) :

- Choix du profil ;
- Sélection du type de profil (ponctuel, spatial où surface) ;
- Choix des bandes spectrales (en fonction de l'objectif de l'étude) ;
- Choix de la couche thématique à superposée sur le profil.

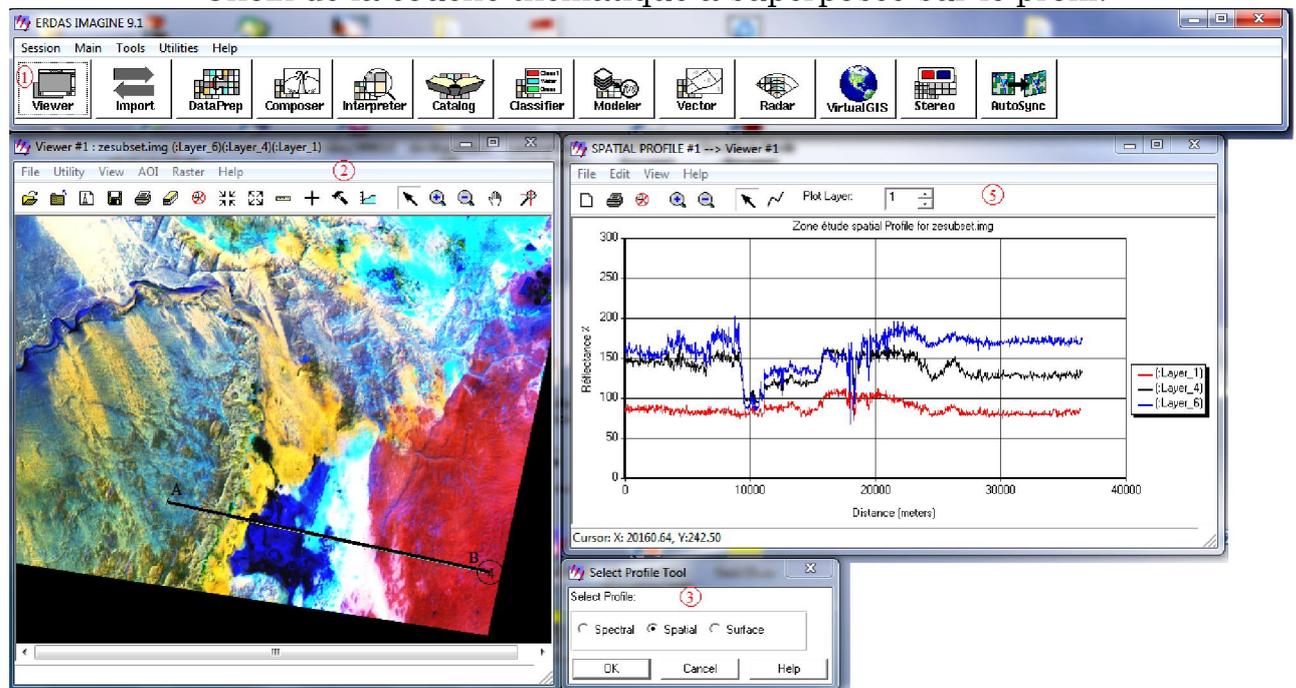


Fig. 3.8 : les étapes de réalisation d'un profil spectral avec Erdas imagine.

3.5.2.4.5/Classification supervisée

Délimiter une unité de sol sur le terrain ou sur un document cartographique de référence, puis s'en servir d'échantillon dans une procédure de classification supervisée paraît être la démarche la plus simple. Le but des traitements numériques est de déterminer les caractéristiques radiométriques des parcelles test en vue de faire une extrapolation aux sites similaires à notre région.

Les traitements dirigés ou supervisés (Maximun Likelihood) ont pour objectifs de regrouper les pixels de l'image en classe sur la base de leurs similarités spectrale et thématique.

Certaines associations de canaux se sont révélées plus discriminantes pour des groupes de sols particuliers dont elles facilitent sensiblement l'extraction, alors plusieurs essais complémentaires ont été effectués en combinant notamment des néo-canaux (indices de brillance, ACP, combinaisons arithmétiques diverses).

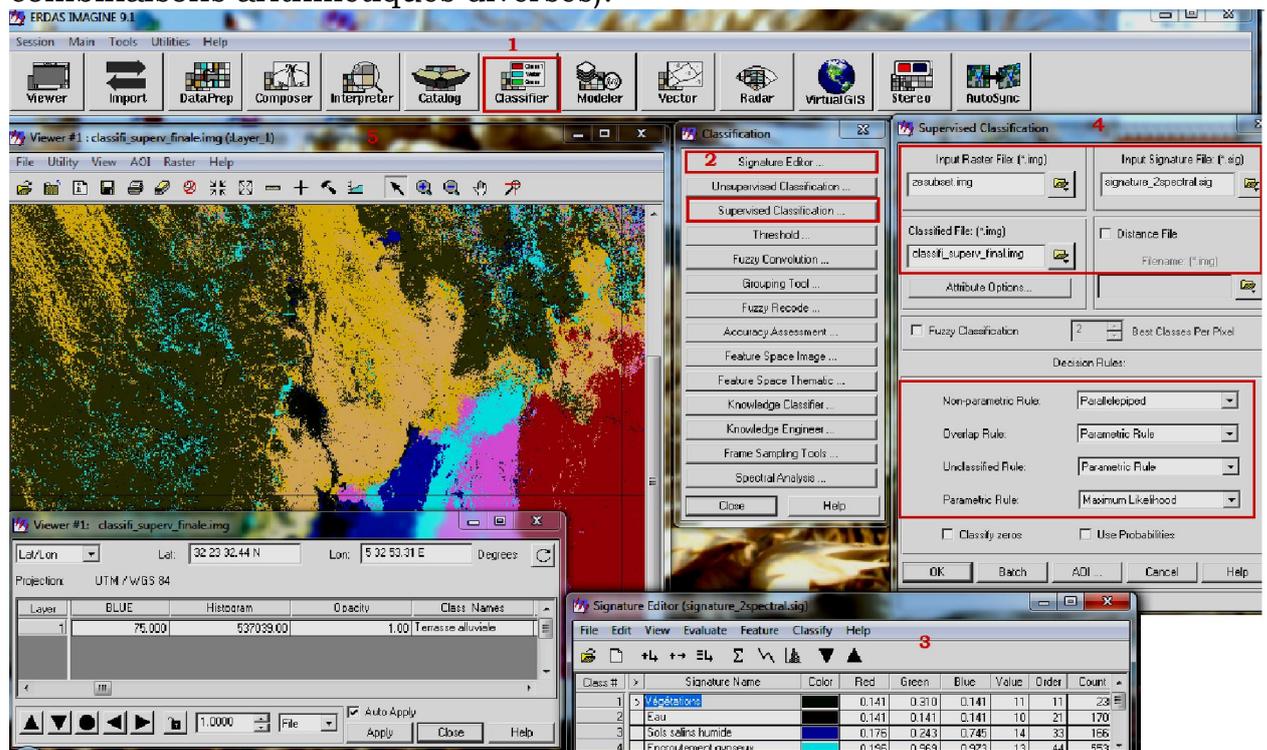


Fig. 3.9 : les étapes de réalisation d'une classification supervisée avec Erdas imagine (Maximun Likelihood).

3.5.2.5/Les paramètres influant la classification de l'image :

Qu'ils proviennent de classifications supervisées ou non supervisées des données satellitaires, les résultats obtenus sont donc fortement conditionnés par quelques éléments de surface qui prédominent dans l'image (Fig.3.7). Le sable, le gypse, la croûte calcaire, la pierrosité ; la végétation, la croute de battance et la texture fine, sont de puissants facteurs de regroupement dans les classifications. Ils déterminent le comportement spectral des sols indépendamment de leurs constituants lithologiques ou minéralogiques ou de leur appartenance à une unité pédologique.

De nombreux auteurs dont : Bendali et El Hamroui (1986) ; Courault (1989), Escadafal (1989), Escadafal et Pouget (1986) ou King (1985) estiment

que les aspects de surface qui influencent la réponse spectrale et favorisent ou défavorisent l'identification des sols sont fortement corrélés à la couleur et à la rugosité.

En dehors de ces aspects physiques, il est intéressant d'évaluer l'influence de quelques uns de ces paramètres sur la cartographie. Les états de surface ont donc été associés en fonction des éléments qu'ils avaient communs, et à titre d'exemples, nous avons distingué parmi les sols quatre ensembles en fonctions des critères suivants :

- -Groupe des sols salins gypseux (encroûtement gypseux, efflorescences salines et sables gypseux) ;
- -Groupe des sols sableux (sables éoliens fins limoneux, sables éoliens grossiers et les terrasses alluviaux);
- -Groupe des sols carbonatés (plateau calcaire et les gris rouges Mio-pliocènes) ;
- -Groupe des non sols (eau et végétations).

3.5.2.6/Vérification de la précision de la classification

3.5.2.6.1/Teste de séparabilité

Signature Separability Listing

File: d:/documents/data/signature_spectral2.sig

Distance measure: Euclidean Distance

Using bands: 1 2 3 4 5 7

Class :

- 1 Sable éolien moyen à grossier
- 2 Sable fin à moyen limoneux
- 3 Plateau Pliocène continental (Reg calcaire)
- 4 Grés rouges Mio-Pliocène
- 5 Sable gypseux blanchâtre
- 6 Sols salins humides
- 7 Encroûtement gypseux
- 8 Terrasse alluviale
- 9 Non sol (eau et végétations)

Separability Listing

Bands	AVE	MIN	Class Pairs:						
	51	12	1: 2	1: 3	1: 4	1: 5	1: 6	1: 7	1: 8
			1: 9	2: 3	2: 4	2: 5	2: 6	2: 7	2: 8
			2: 9	3: 4	3: 5	3: 6	3: 7	3: 8	3: 9
			4: 5	4: 6	4: 7	4: 8	4: 9	5: 6	5: 7
			5: 8	5: 9	6: 7	6: 8	6: 9	7: 8	7: 9
			8: 9						
1 2 3 4 5 7	57	88	100	116	127	138	111		
	97	32	44	60	71	82	55		
	45	25	28	39	54	28	21		
	23	27	42	18	22	20	31		
	30	28	20	22	39	28	55		
	37.								

Best Minimum Separability

Bands	AVE	MIN	Class Pairs:							
	51	12	1: 2	1: 3	1: 4	1: 5	1: 6	1: 7	1: 8	
			1: 9	2: 3	2: 4	2: 5	2: 6	2: 7	2: 8	
			2: 9	3: 4	3: 5	3: 6	3: 7	3: 8	3: 9	
			4: 5	4: 6	4: 7	4: 8	4: 9	5: 6	5: 7	
			5: 8	5: 9	6: 7	6: 8	6: 9	7: 8	7: 9	
			8: 9							
1 2 3 4 5 7			57	88	100	116	127	138	111	
			97	32	44	60	71	82	55	
			45	25	28	39	54	28	21	
			23	27	42	18	22	20	31	
			30	28	20	22	39	28	55	
			37.							

Best Average Separability

Bands	AVE	MIN	Class Pairs:							
	51	12	1: 2	1: 3	1: 4	1: 5	1: 6	1: 7	1: 8	
			1: 9	2: 3	2: 4	2: 5	2: 6	2: 7	2: 8	
			2: 9	3: 4	3: 5	3: 6	3: 7	3: 8	3: 9	
			4: 5	4: 6	4: 7	4: 8	4: 9	5: 6	5: 7	
			5: 8	5: 9	6: 7	6: 8	6: 9	7: 8	7: 9	
			8: 9							
1 2 3 4 5 7			57	88	100	116	127	138	111	
			97	32	44	60	71	82	55	
			45	25	28	39	54	28	21	
			23	27	42	18	22	20	31	
			30	28	20	22	39	28	55	
			37.							

L'examen de ce test montrer que les centres des classes sont généralement bien séparés ce qui réaffirme la fiabilité de la classification réalisée ci-dessus.

3.5.2.6.2/Matrice de confusion :

L'évaluation de la qualité de la classification se fait par l'établissement de la matrice de confusion en reportant les pixels connus par rapport aux pixels classés, on peut alors consulter le taux des pixels bien classés grâce à un fichier de référence représentant la réalité de terrain (tableau.3.4).

La précision générale s'obtient en divisant le nombre de pixels bien classés (sur les diagonaux) par le nombre total de pixels de l'image, l'estimation finale de la classification se fait en utilisant le coefficient Kappa qui un estimateur de qualité tenant compte des erreurs en lignes et en colonnes, il varie de 0 à 1.

Les regs, les grés rouges Mio_pliocène et les sables fins à moyens limoneux ne sont pas bien classés, les grés rouges se confondent avec la classe de reg. La classe des sables fins se confonde avec celle des sables éoliens car par fois elle présente presque les mêmes réponses spectrales (voir la fig.).

La précision des formations gypseuses est de 100% où les pixels de ces classes sont bien classés.

L'examen de l'indice Kappa qui est de 0.9275 traduit la qualité de classification puisqu'elle atteint les 92.75% des pixels bien classés, donc le résultat de classification correspond presque réellement à la réalité de terrain.

La précision globale de 93,72% indique que 96,74% des pixels de l'image sont bien classés.

Les classes	Non Sols	Sols salins humides	Terrasse alluviale	Grés Mio-pliocène	Calcaire - pliocène	Sables fins moyes	Sables éoliens grossier	Sable gypseux blanchâtre	Encroût gypseux
Non Sols	20	0	0	0	0	0	0	0	0
Sols salins humides	0	70	0	0	0	0	0	0	0
Terrasse alluviale	0	0	340	0	10	0	0	0	0
Grés rouges Mio-pliocène	0	0	0	260	0	0	0	0	0
Calcaire Pliocène	0	0	10	0	360	0	0	0	0
Sable fin moye	0	0	0	0		260	20	0	0
Sable éolien grossier	0	0	0	0	0	20	390	0	0
Sable gypseux blanchâtre	0	0	0	0	0	0	0	230	0
Encroutement gypseux	0	0	0	0	0	0	0	0	240
Précision producteur	100 %	100 %	100 %	96.30 %	97.30 %	66.67 %	95.12 %	92.86 %	100 %
Erreur d'omission	0	0	0	4.70	2.70	33.33	4.80	7.14	0
Précision d'utilisateur	100 %	100 %	97.15 %	100 %	98.30 %	92.86 %	95.12 %	100 %	100 %
Erreur de commission	0	0	2.85	0	2.70	7.14	4.87	0	0
Indice kappa	0.9275								
Précision globale	93.72%								

Tableau-3.4 : évaluation de la classification (matrice de confusion).

3.5.2.7/le résultat final du Classification :

Le type de classification employée est une classification supervisée par le maximum de vraisemblance. Dans ce type de classification, les pixels sont classés par rapport à la probabilité d'appartenir à la classe. Cette classification est effectuée automatiquement par l'ordinateur. Les résultats issus de cette classification constituent les résultats finaux dont la légende est presque identique à celle des cartes géologiques de la région et corrélient bien avec la réalité de terrain (Planche.5.1).

Sur les thèmes retenus, on remarque une distinction nette entre les différents états de surface. Finalement neuf thèmes sont assez bien classés. Il s'agit

- ✚Classe1 : Sables éoliens moyens à grossiers ;
- ✚Classe2 : Sables fins à moyens limoneux (sable alluvial) ;
- ✚Classe3 : Plateau Pliocène continental (reg calcaire) ;
- ✚Classe4 : Terrasse alluviale ;
- ✚Classe5 : Grés rouges Mio-Pliocène ;
- ✚Classe6 : Sables gypseux blanchâtres ;
- ✚Classe7 : Encroûtement gypseux ;
- ✚Classe8 : Sols salins humides ;
- ✚Classe9 : Non sol (eau et végétation).

3.5.2.8/Présentation des résultats :

3.5.2.8.a/Le système de projection :

Pour la réalisation des cartes de notre étude, nous avons retenu la projection UTM (Universel Transverse Mercator) qui divise la terre en 60 parties dont la région concernée par cette étude appartient à la zone 31 de l'hémisphère Nord, l'ellipsoïde correspond au Datum WGS-84.

3.5.2.8.b/Le choix de L'échelle :

L'échelle choisie pour la présentation de la carte finale des états de surface est liée à la superficie de la région d'étude et au format de papier utilisé pour que la carte finale soit lisible et claire (légendes et figurés) et après plusieurs essais le choix final est opté pour une échelle de 1/250.000.

3.5.2.8.c/Conception de la légende :

Après toutes les opérations de traitement d'images, de classification, de validation sur terrain, d'analyse et d'interprétation on a pu établir la carte finale des sols à 1/250.000 avec la légende suivante (planche 5.1) :

- ✚Classe 1 : figurée en jaune, présentant l'état de surface sable éolien moyen à grossier ;
- ✚Classe 2 : figurée en jaune pâle, présentant un état de surface sable fin à moyen limoneux légèrement carbonaté (sable alluvial);
- ✚Classe 3 : figurée en cyan, présentant un état de surface encroûtement gypseux ;

- Classe 4 : figurée en vert olive, présentant un état de surface grés rouge Moi-pliocène ;
- Classe 5 : figurée en marron claire, présentant un état de surface plateau Pliocène continental (Reg calcaire) ;
- Classe 6 : figurée en rouge sang, présentant un état de surface terrasse alluviale (sable grossier et gravier de silex, gris à gris claire, blanc pâle parfois transparent très arrondi) ;
- Classe 7 : figurée en bleu ciel, présentant un état de surface sables salins humide ;
- Classe 8 : figurée en rose, présentant un état de surface à sable gypseux blanchâtre ;
- Classe 9 : Figurée en noir, présentant les non sol (l'ombre, eau et végétation).

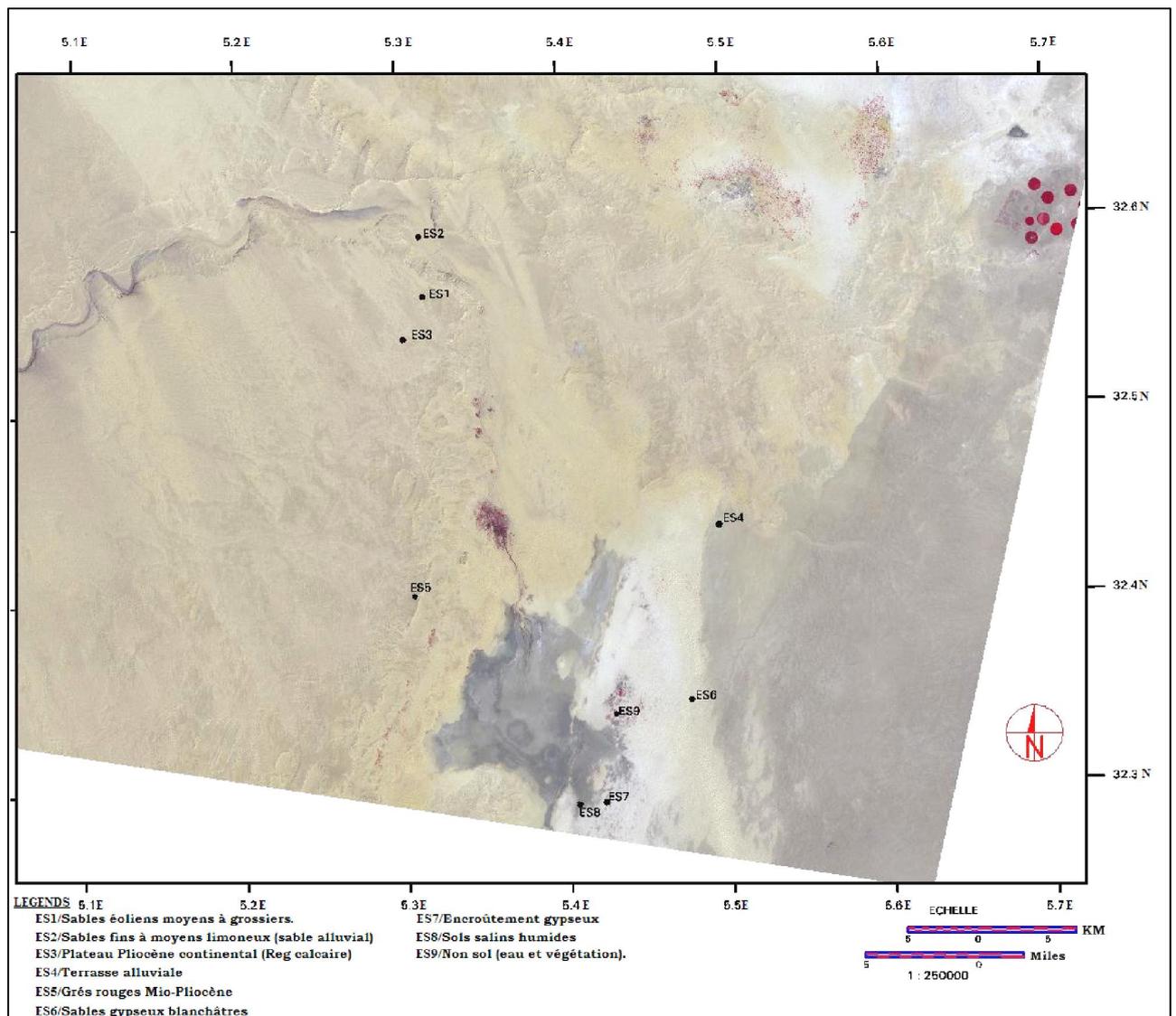


Planche 3.1 : Plan de position des échantillons prélevés.

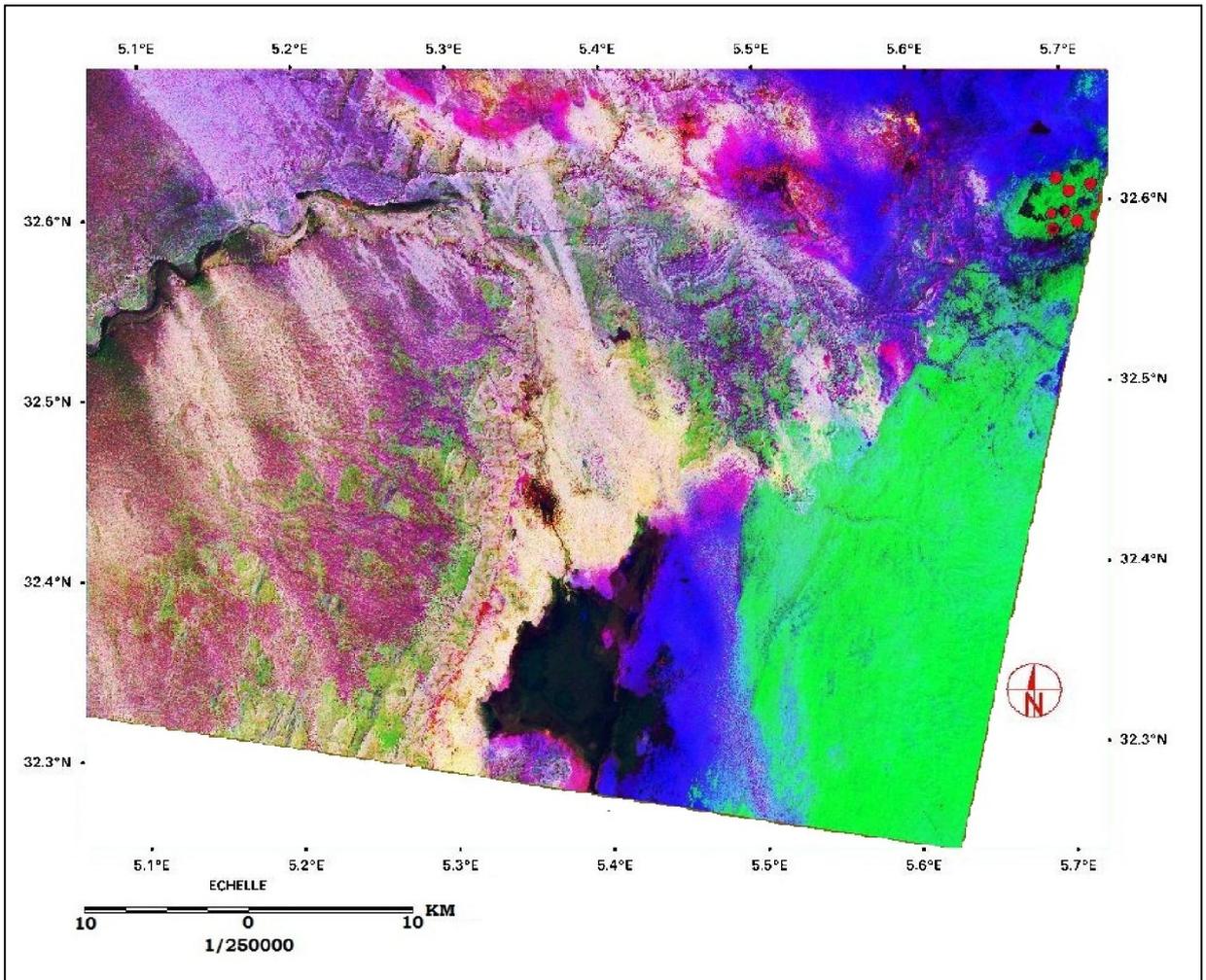


Planche. 3.2 : Résultat de l'Analyse en Composante Principale (ACP1).

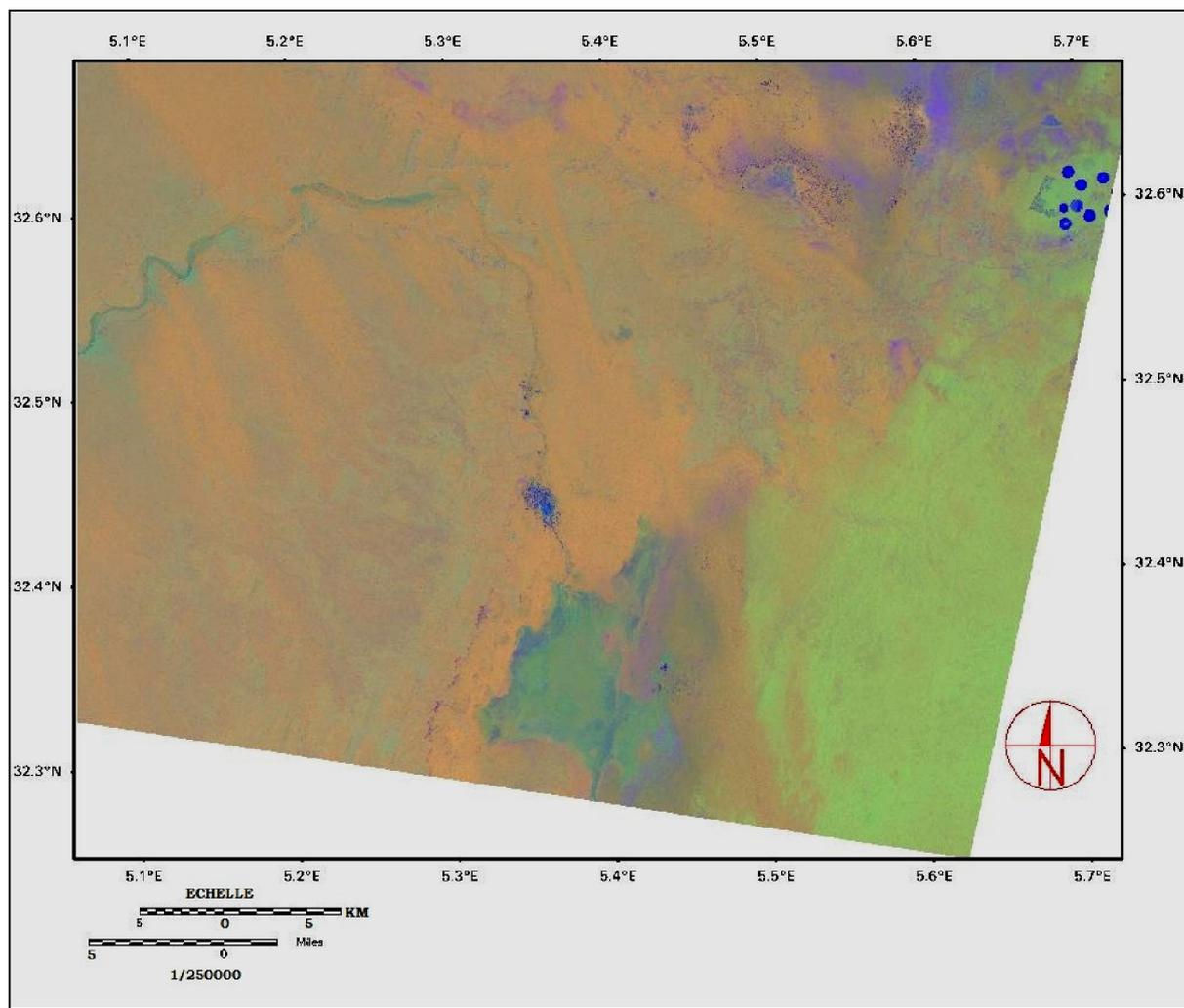


Planche. 3.3 : composition colorée (b5/b7, b5/b4 et b3/b1) les minéraux composites.

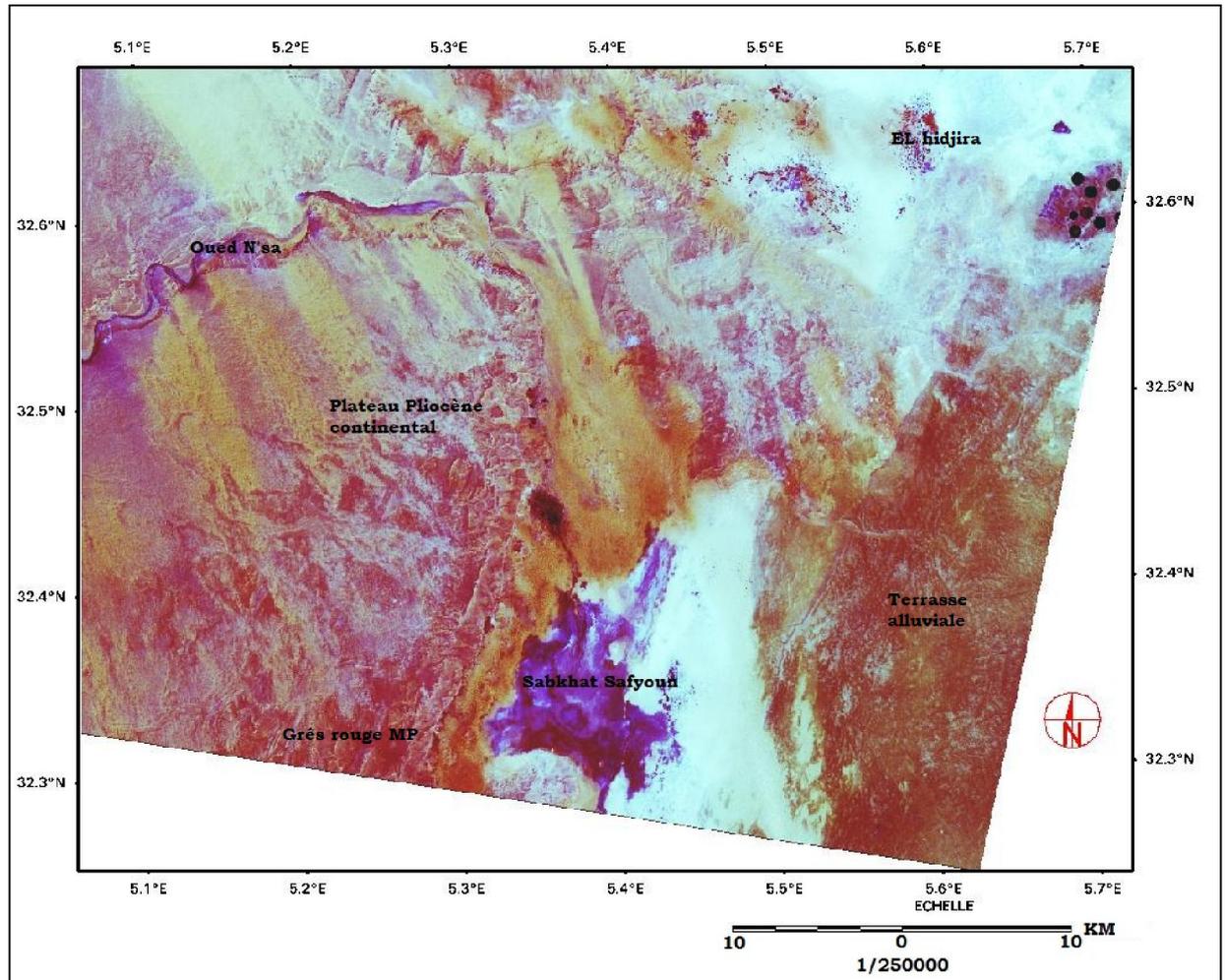


Planche. 3.4 : composition colorée (b3, b2, b1) en couleur naturelle

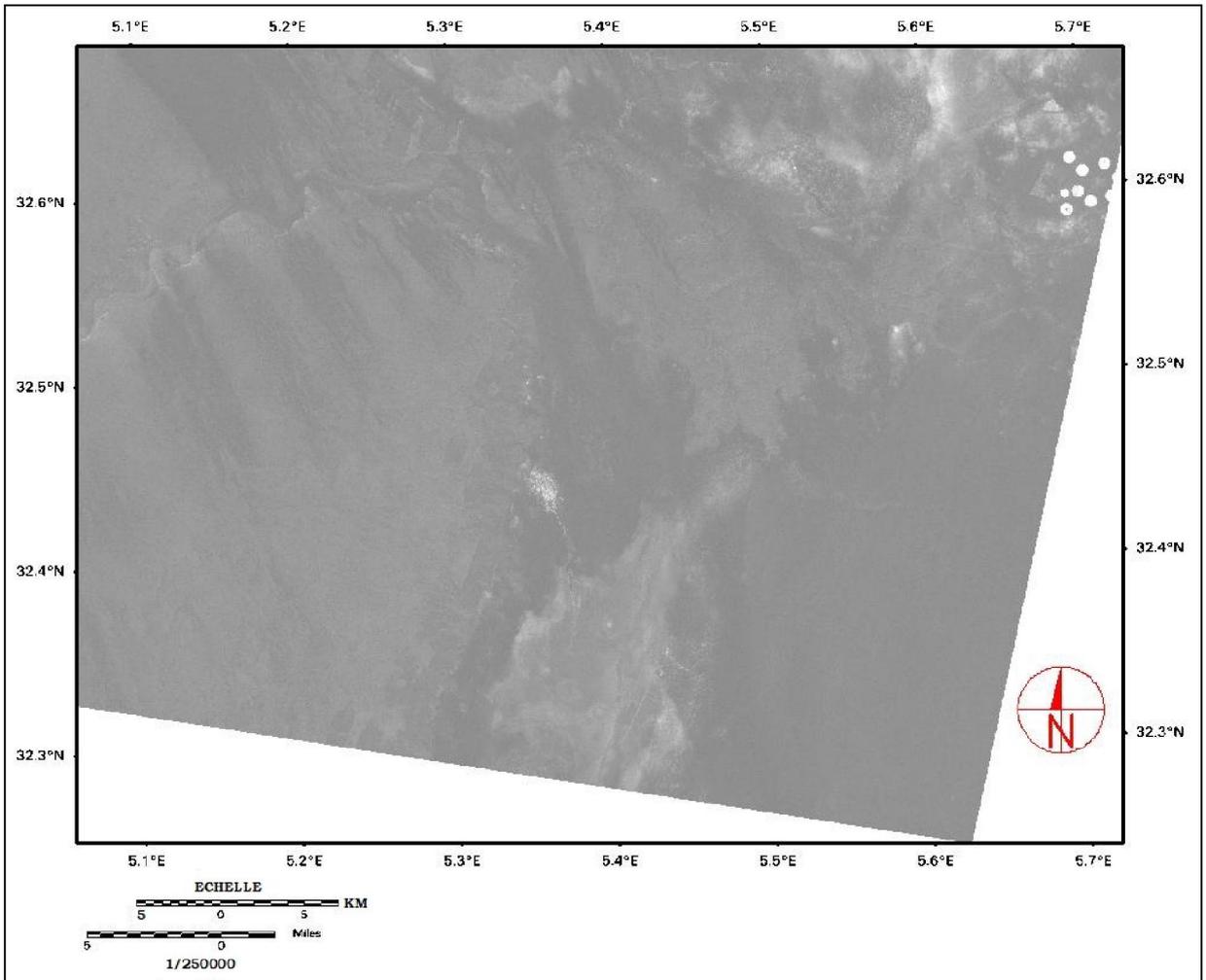


Planche. 3.5 : Résultat du Ratio b5 /b7 (les minéraux argileux)

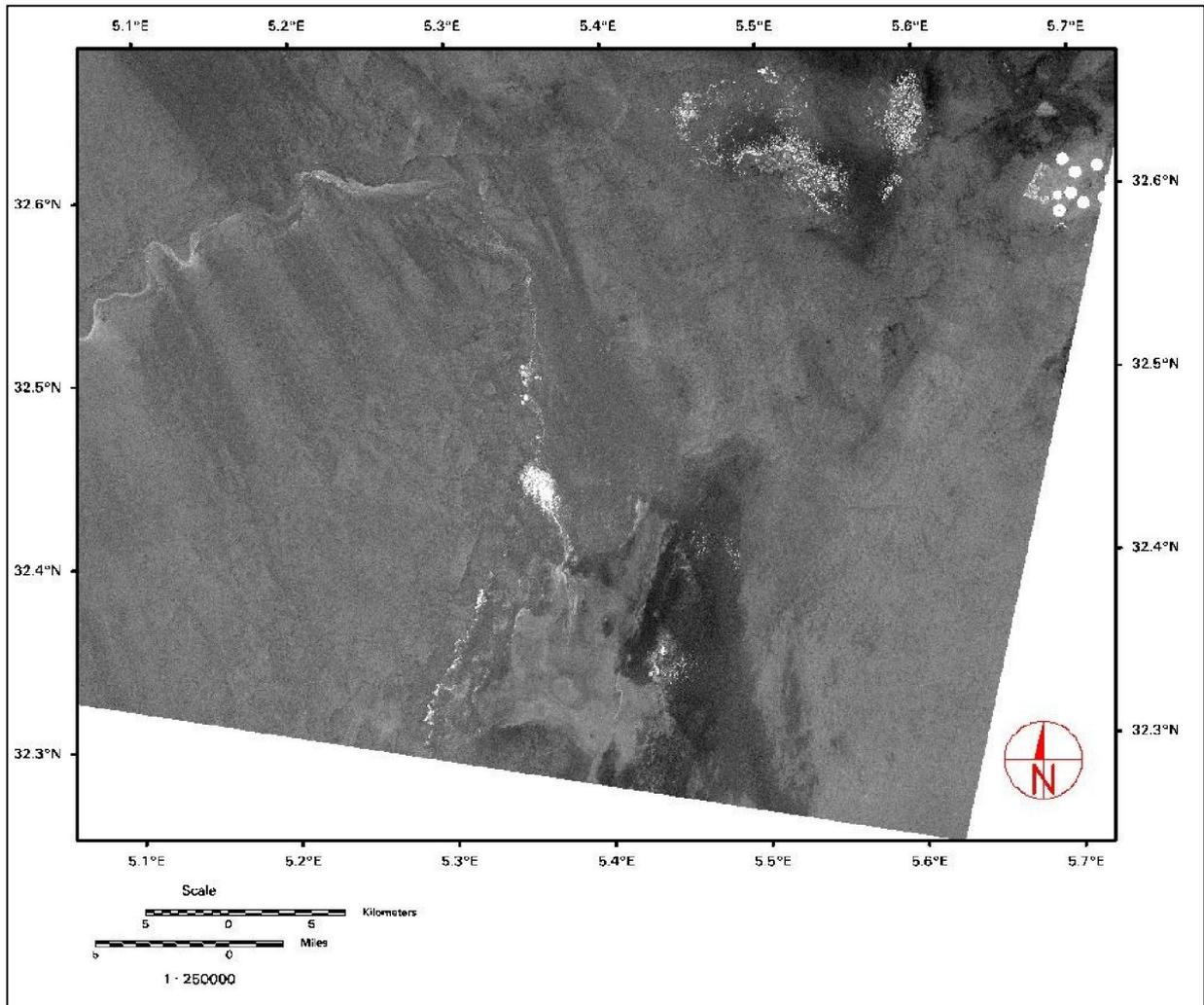


Planche. 3.6 : Résultat du Ratio $b4/b3$ (index de la végétation)

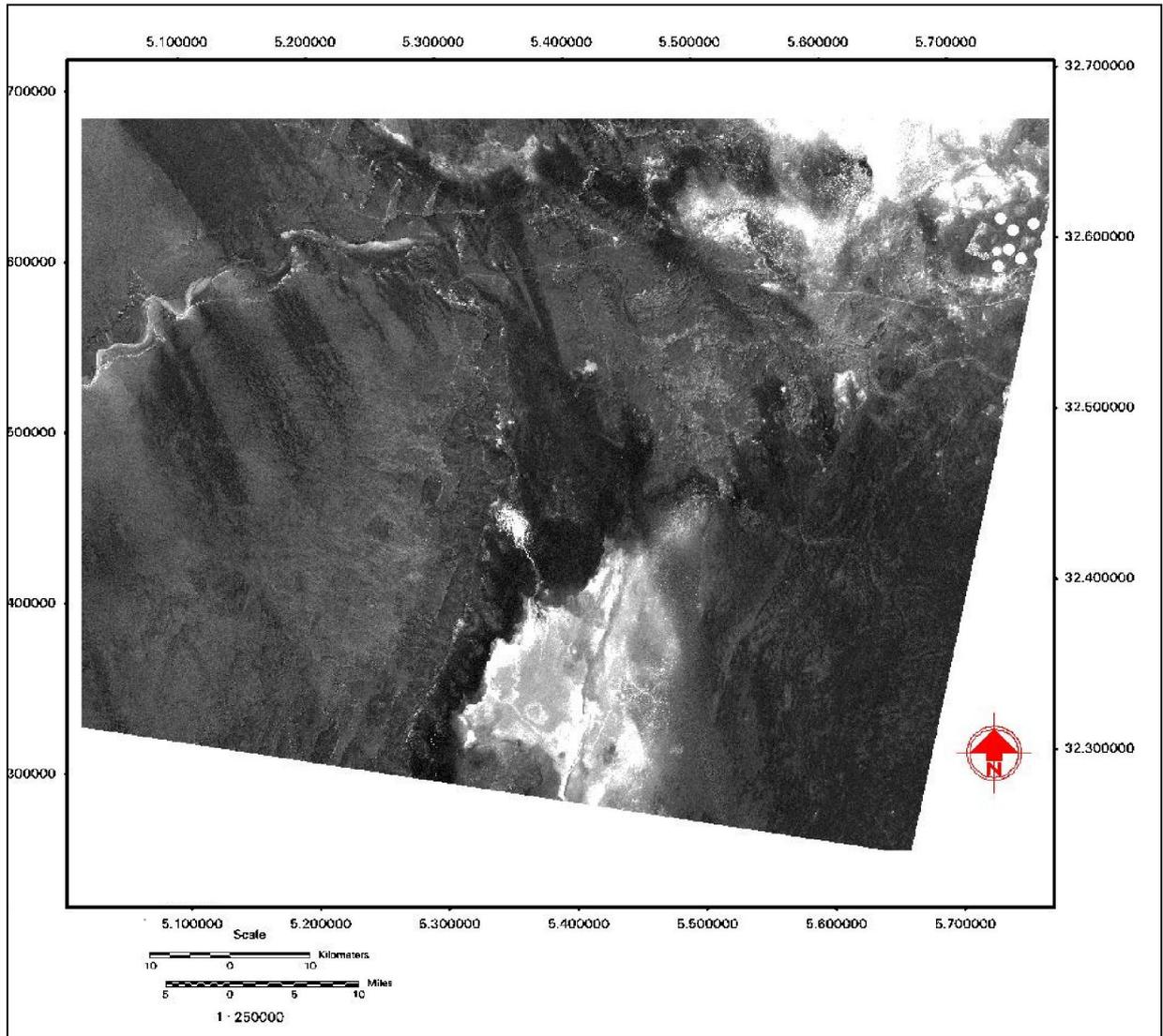


Planche. 3.7 : Résultat du Ratio 1 /7.

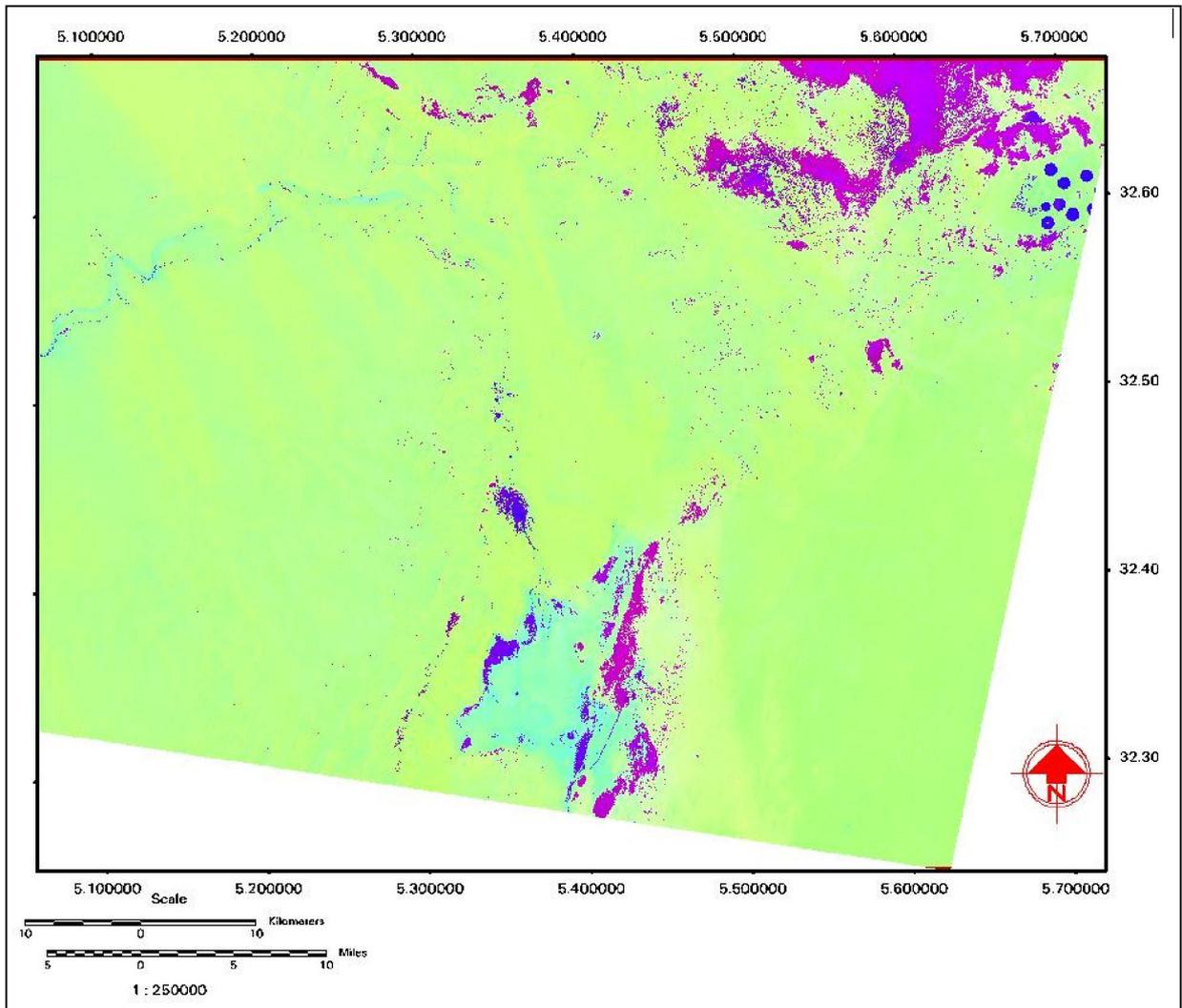


Planche. 3.8 : Résultat du de composition colorée (ACP1-Ratio (7/4) et ratio (1/7)).

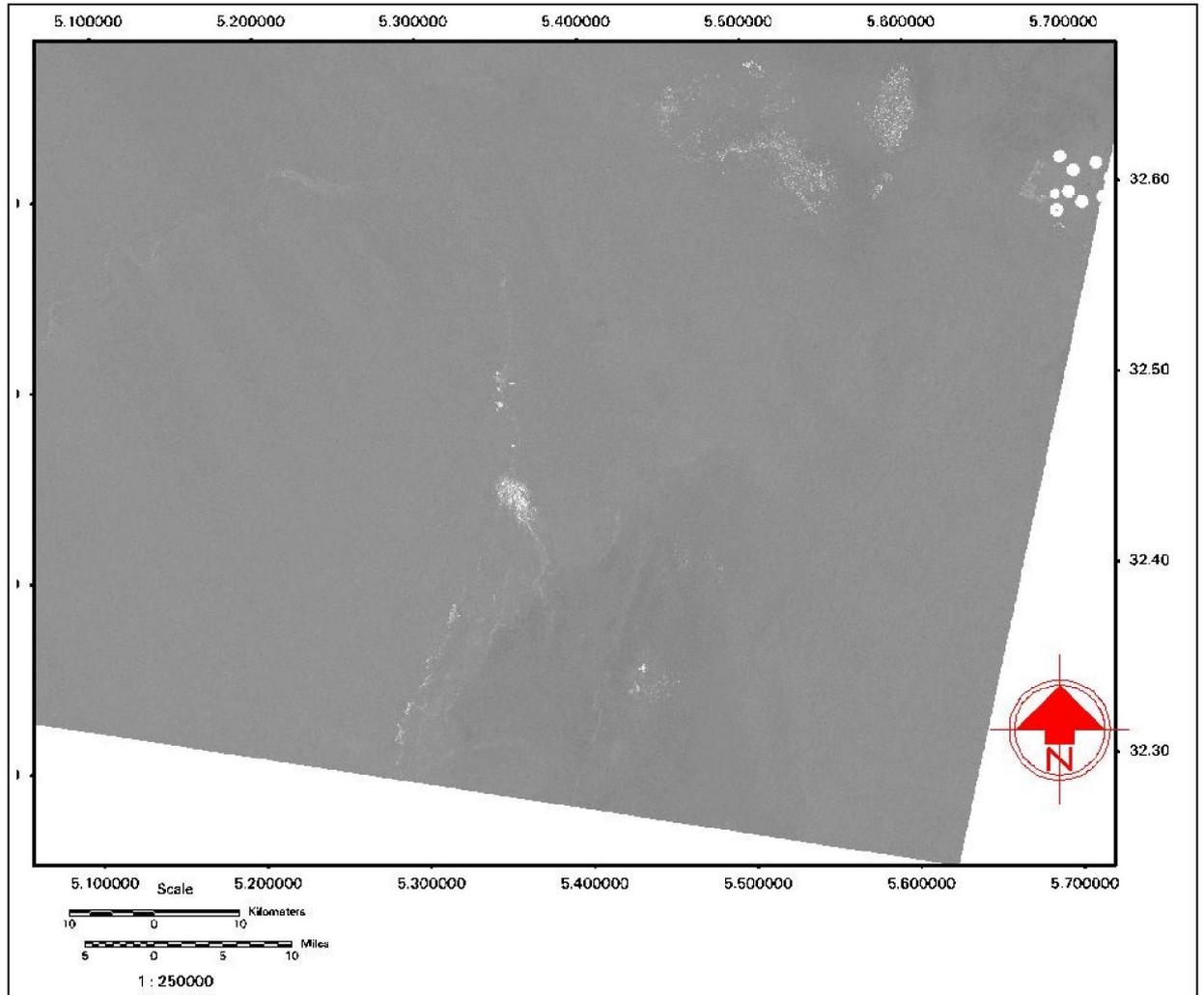


Planche. 3.9 : Résultat du Ratio IR / R (b4/b3).

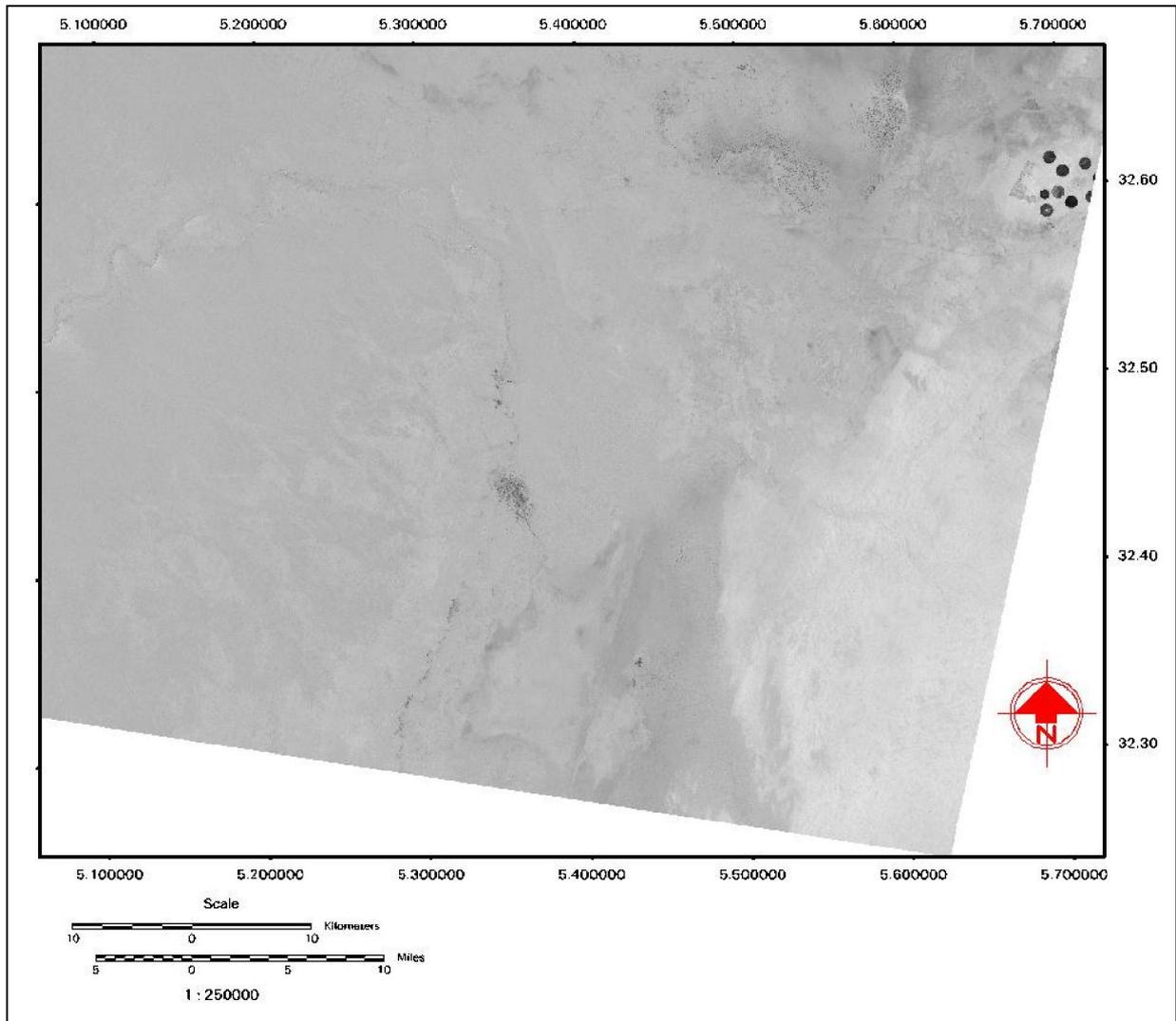


Planche. 3.10 : Résultat du Ratio b5 /b 4 (les minéraux ferrifère).

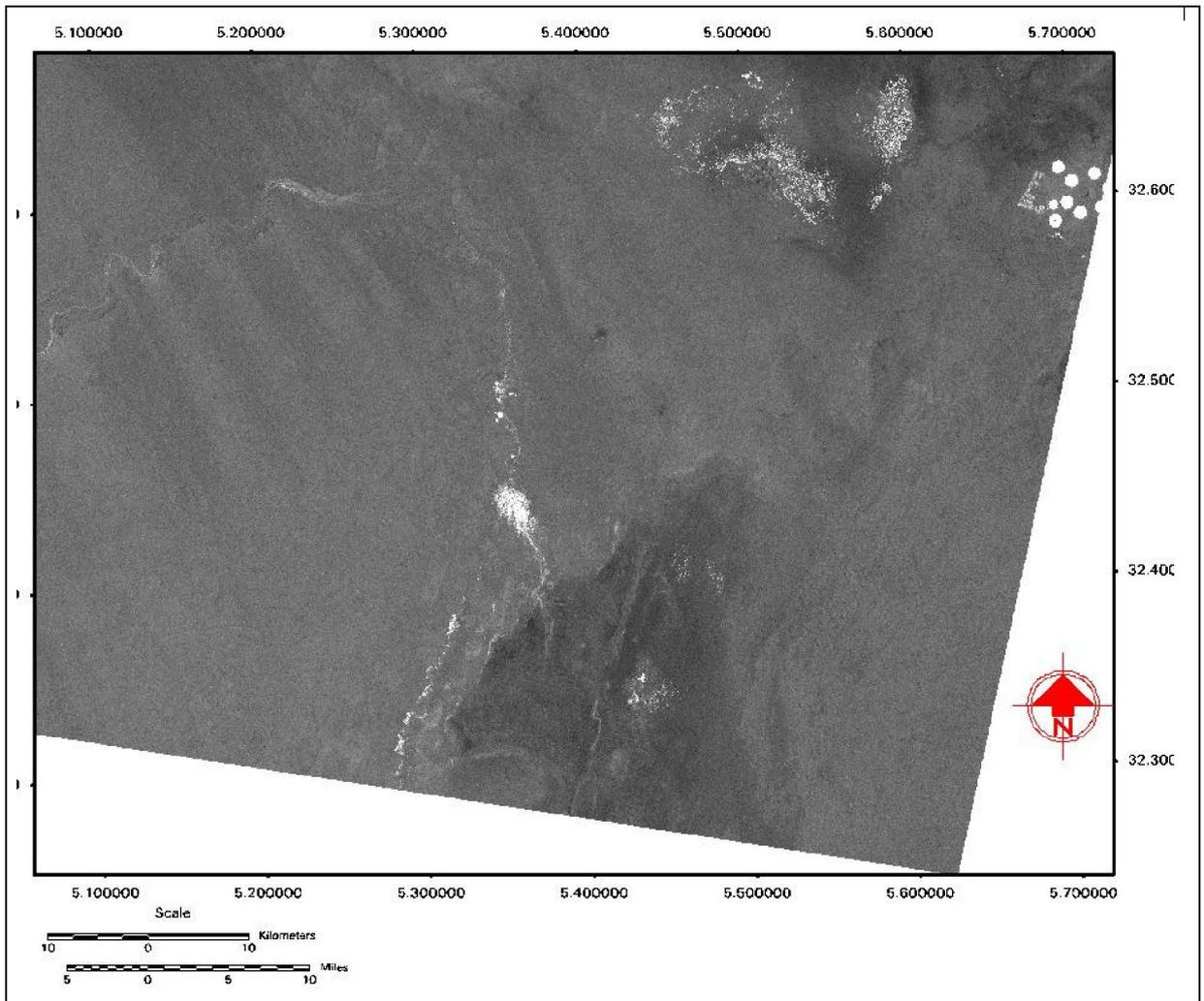


Planche.3.11 : Résultat du Ratio $b4-b3 / b4+b3$ (NVDI).

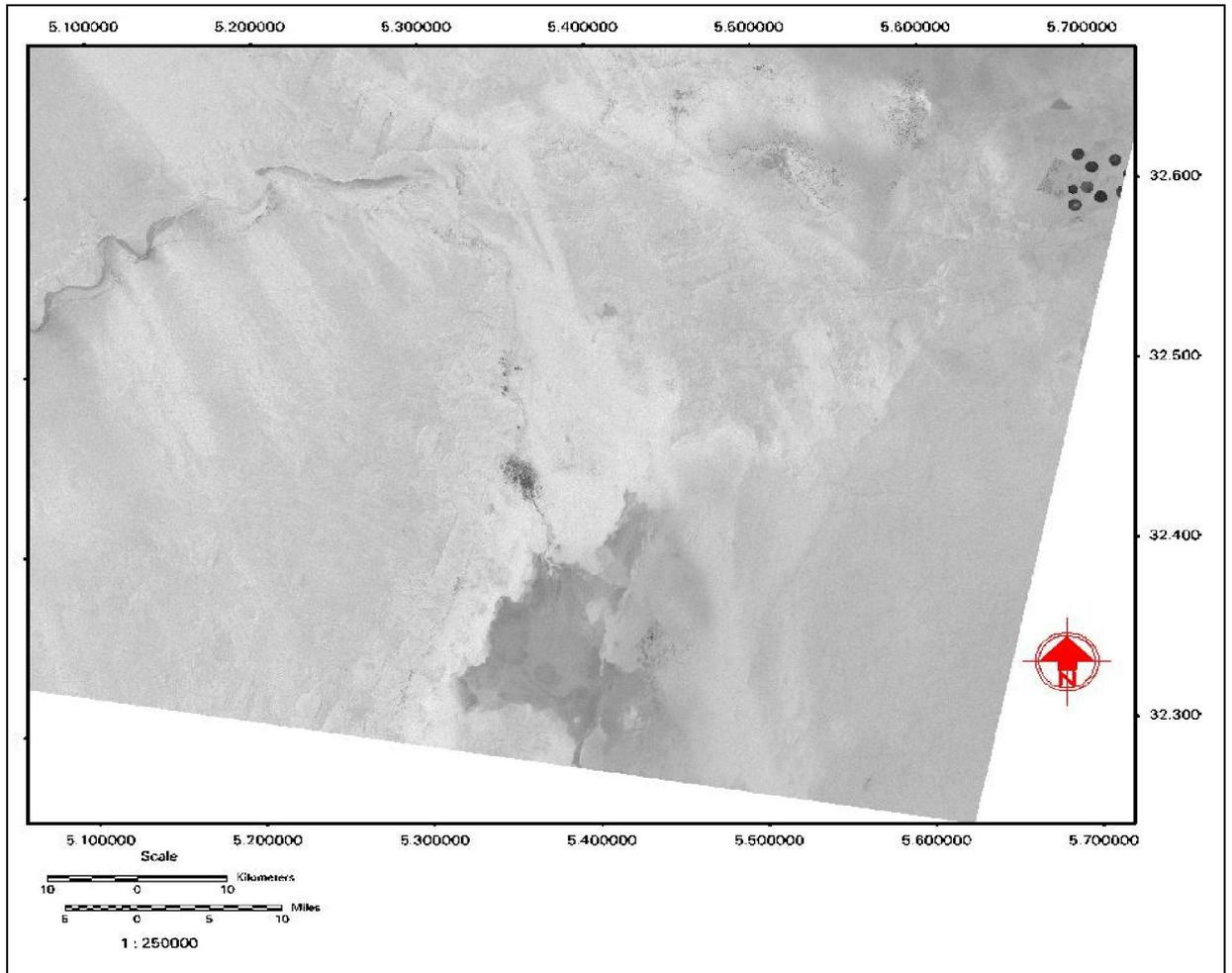


Planche. 3.12 : Résultat du Ratio b3 /b1 (les oxydes de fer).

TROISIEME PARTIE RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE.4. Résultats des prospections sur le terrain

4.1. Introduction :

Deux missions ont été réalisées sur le terrain de la zone d'étude. Celles-ci ont été respectivement effectuées en Avril 2011 et janvier 2012, ont permis d'acquérir des informations sur la réalité de terrain, d'analyser et relever les différents paramètres des états de surface de sol (nature et état des sols, couleur, la position des différents états les un par rapport au autres....). Par la suite, ces informations ont joué un rôle important dans la classification supervisée.

La reconnaissance de terrain a permis de caractériser les états de surface suivants :

4.2/ Les états de surface salins : rencontrés dans les dépressions salées, caractérisés à l'état sec par la présence d'efflorescences salines de couleur claire.

L'horizon de surface, sablo-limoneux à limoneux, sans éléments grossiers, présente souvent une pellicule superficielle à "nanorelief" tacheté ou craquelé, reposant sur un matériau à structure particulière soufflée (voir photo 8, planche 5). La couleur de ce type d'état de surface varie avec l'état hydrique qui fluctue en fonction des précipitations et des remontées de nappes. Une végétation halophyte verte entretenue par ces nappes peut souvent se maintenir toute l'année avec un taux de recouvrement de l'ordre de 20 à 40 %.

Ce type d'état de surface est donc caractérisé par une humidité variable. Limités aux dépressions endoréiques salées ("chotts" et "sebkhas").

4.3/ Les états de surface à blocs : affleurements de roche dure en blocs et cailloux, très étendus dans notre zone ils caractérisent le plateau et reg calcaire.

Suivant la nature et le faciès des roches, la taille et la forme des blocs varient dans tous les cas, le microrelief ou la rugosité sont très marqués. Le dépôt toujours présent sur ces blocs, donne une couleur généralement assez claire (5 YR 7/2 à 7.5 YR 7/3).

4.4/ Etat de surface sableux : voile éolienne avec de sable siliceux Ridesh Yellow (jaune rougeâtre).

4.5/ Etat de surface reg gravelo-caillouteux : avec la présence de microconglomérats (poudingue) à ciment carbonaté de couleur (7.5YR/5/4), la charge en éléments grossiers est de 30% de classes granulométriques (0.5 à 2cm) et (5 à 10cm) arrondi à sub-arrondi. Sable siliceux de couleur (7.5YR/6/8) moyen à grossier de grains arrondis.

4.6/ Etat de surface ancienne terrasse alluviale : formée de plus de 30% d'éléments de tailles de 0.2 à 0.5 cm, arrondi à sub-arrondi de nature siliceuse (gravier roulé) de couleur (7.5YR/7/6), d'une fraction sableuse de

couleur (7.5YR/5/8) et d'éléments grossiers et graviers de couleur (7.5YR/8/2, 10YR/6/8, 10.5YR/3/2).

4.7/Etat de surface grès rouge Mio-Pliocène: avec une charge en éléments grossiers de +50% de diamètre de 0.5 à 2cm sub-anguleux ; grès fin à ciment carbonaté, dure de couleur rougeâtre ; sable moyen à grossier (5YR/6/6) – les éléments grossiers de couleur (5YR/5/3).

4.8/état de surface encroûtement gypseux : formés d'affleurements d'horizons gypseux, soit des roches gypseuses altérées en surface, soit des accumulations secondaires de gypse dans les sols sous forme d'encroûtement et de croûtes.

Croûte massive très fissurée (fissure polygonale) couverte par des traces de lichen (taches noire, grise laiteux porosité de 40% (2.5Y/6/1)) de couleur (10YR/8/2, 5YR/8/2) partiellement couverte par les autres classes.

La couleur est très claire couleur Munsell (7,5 YR 8/2) et l'aspect mat à pulvérulent ; le microrelief est parfois polygoné jamais très accentué

4.9/ Les chotts et sebkhas

C'est une étendue plate, endoréique, où s'accumulent les eaux du bassin versant. La nappe phréatique y affleure en hiver. Sa salure dépend fortement de la microtopographie, elle varie de selon l'endroit (12 à 30 dS.m-1), mais peut atteindre localement des valeurs supérieures à 50 dS.m-1 .

Le chott fonctionne comme système évaporatoire de sels divers, dont le gypse qui est remobilisé par le vent alors que les sels plus solubles, NaCl, MgSO₄, Na₂SO₄ se concentrent sur place. Ces sels repassent en solution lors des pluies importantes, envahissant les parties basses de la région. Les argiles du milieu du chott sont à dominante de montmorillonite en profondeur et de montmorillonite associée à de la kaolinite et de l'illite en surface. (Sassi, S. 1969).

En dehors de ces cas limites, la surface des formations superficielles de la zone étudiée présente toute une gamme d'états de surface intermédiaires, composés de matériaux nu affleurant, de sables fins et grossiers, de graviers et de cailloux en diverses proportions. Des échantillons représentatifs de ces états de surface ont été analysés au laboratoire, le protocole de notre échantillonnage est tel que chaque classe fournie (couleur) doit être parcourue sur terrain, de préférence dans des zones qui paraissent les plus représentatifs possibles.

Noté que le positionnement géographique de relevés de terrain (sites tests) par rapport à l'image classifiée a été facilité par l'utilisation d'un système GPS (Global Positioning System).

4.2. Photographies des différents états de surface de sol :



-Couleur de l'échantillon sur l'image classifiée : Jaune claire

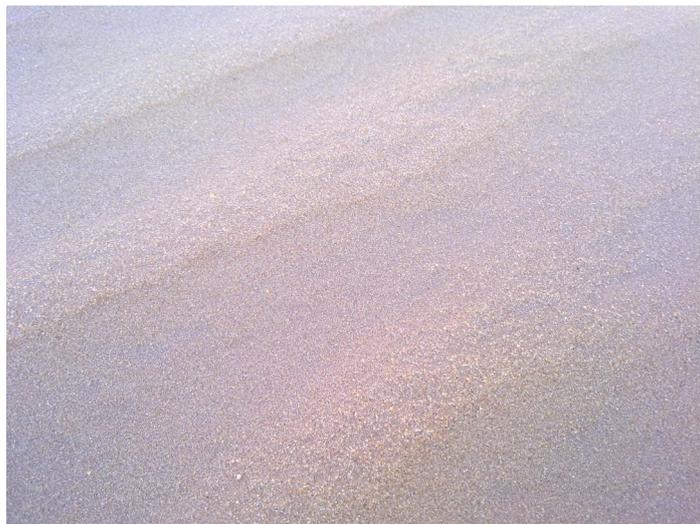
-Couleur de l'échantillon sur terrain : 7,5 YR 8/4
X:05°18'56" Y:32°33'31"

Photos 1-2 : Etat de surface sables éoliens moyens à grossiers



-Couleur de l'échantillon sur l'image classifiée : jaune pâle -
crème
-Couleur de l'échantillon sur terrain : 5 YR 6/6
-Position : x : 5 22 59.43 E y : 32 24 00.91 N

Photos 3-4 : Etat de surface sables fins à moyens limoneux



-Couleur de l'échantillon sur l'image classifiée : magenta
-Couleur de l'échantillon sur terrain : 7,5 YR 7/6
-Position : x : 05°28'29.26"E ; y : 32°20'44"N.

Photos 5-6-7 : Etat de surface sables fins gypseux blanchâtres



-Couleur de l'échantillon sur l'image classifiée : grena
-Couleur de l'échantillon sur terrain : [7.5YR/7/6], [7.5YR/5/8]
- position X 5° 29' 49",53E Y: 32° 26' 36",77N

Photos 8-9 : Etat de surface terrasse alluviale



-Couleur de l'échantillon sur l'image classifiée : cyan
-Couleur de l'échantillon sur terrain : [10YR/8/2, 5YR/8/2]
X: 5°25' 19"E Y: 32°17' 32"N

Photos 10-11 : Etat de surface encroûtement gypseux (polygonal et massif)



-Couleur de l'échantillon sur l'image classifiée : bleu foncé
-Couleur de l'échantillon sur terrain : 7,5 YR 4/6
X: 5° 24' 49" E Y: 32° 17' 32" N

Photos 12-13 : Etat de surface sols salins humides et efflorescences salines



-Couleur de l'échantillon sur l'image classifiée : marron ;
-Couleur de l'échantillon sur terrain : 7,5 YR 8/4 ;
Position: x : 5° 18' 03"E y: 32° 32' 16N

Photos 14-15 : état de surface plateau Pliocène continental (Reg calcaire)



-Couleur de l'échantillon sur l'image classifiée : vert olive ;
-Couleur de l'échantillon sur terrain : 5YR/5/3 ;
Position : x : 5° 18' 26"E y : 32° 24' 11"N

Photos 16-17 : Etat de surface grés rouges Mio-Pliocène



-Couleur de la classe sur l'image classifiée : Noir
-Position : x : 05°25'19".26E ; y : 32°17'32"N

Photo 18 : Etat de surface non sol (eau, végétations et ombre).

CHAPITRE.5. Discussion des résultats de la classification de l'image Landsat7 :

Dans chacune des bandes spectrales, le signal enregistré par le capteur renferme, l'ensemble du rayonnement électromagnétique provenant d'un élément de la surface du sol ; il est la résultante des réponses spectrales des objets qui le compose. Les valeurs enregistrées dépendent donc du comportement spectral des différents composants minéraux et végétaux et de leur organisation au moment de la prise de vue, c'est-à-dire de l'état de surface (ESCADAFAL, 1989).

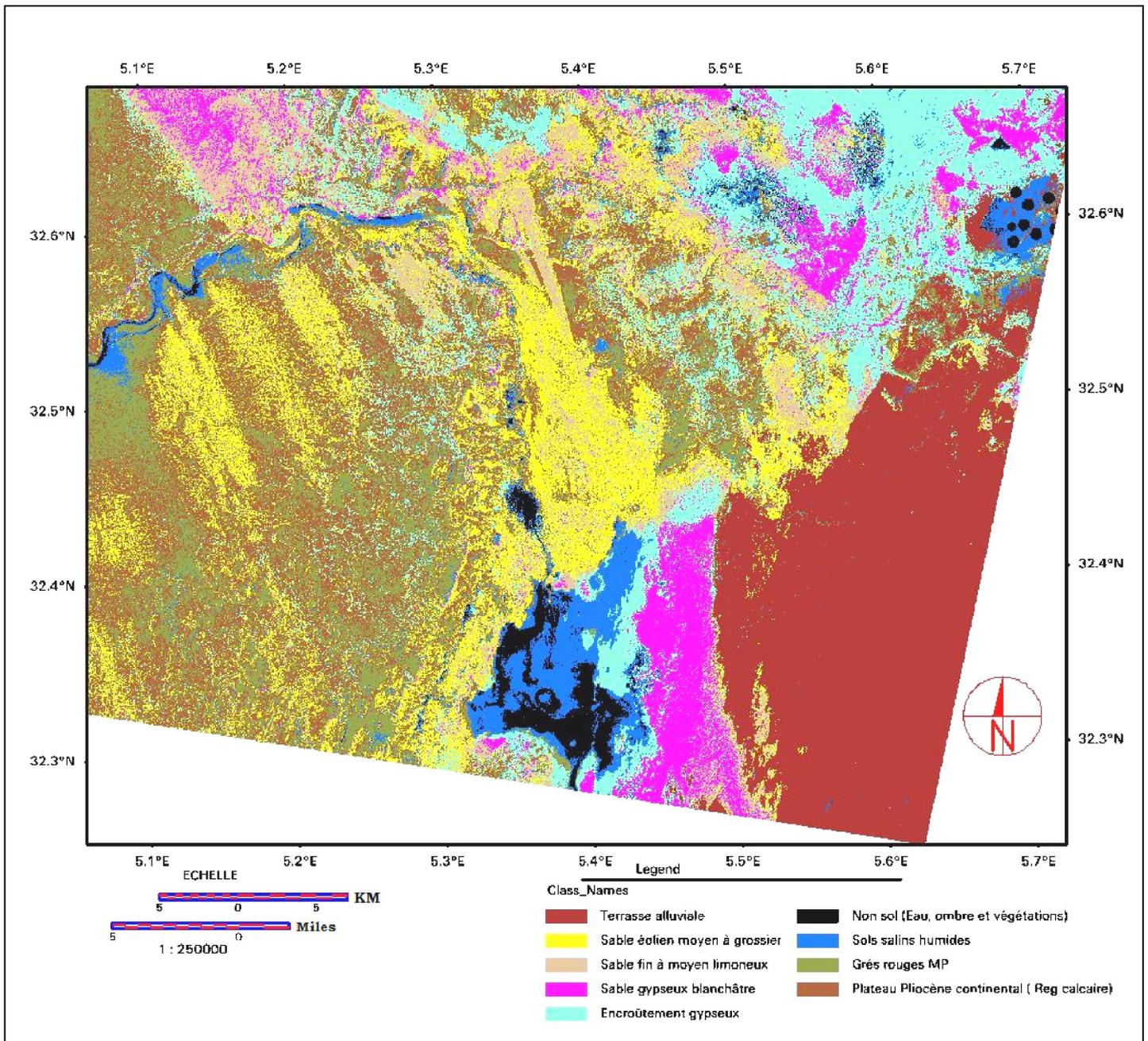


Planche.5.1 : Carte finale des états de surface des sols de la région d'étude

5.1. Interprétation de la carte finale des états de surface des sols :

Le premier essai de classification de l'image TM est basé sur l'utilisation de la paire de canaux la moins corrélée, à savoir TM1 et TM7. La légende de la planche 5.1 fait apparaître les centres des classes sur l'histogramme de ces deux canaux (Fig. 5.2).

La définition des classes a donc été beaucoup plus aisée dans ce cas, leur distribution est d'ailleurs très simple.

Comme l'indique la planche 5.1, neuf grandes classes de l'ensemble d'états de surface ont été distingués selon leur dominante minéralogique exprimée sur la carte par des teintes différentes :

5.1.2-les surfaces à sables éoliens et alluviaux : (dominante quartzeuse) y apparaissent nettement, quelle que soit leur position dans la région. Les plus rugueuses, les nebkas et voiles éoliens sont en jaune doré, les plus fins sont en jaune pâle (sables fin alluviaux) (planche 5.1). Ces dernières correspondent aux produits d'altération des collines gréseuses voisins et au tout-venant qui forme le lit d'oued (tout-venant d'Oued). La réflectance relativement forte des deux classes sableuses est liée aux caractéristiques intrinsèques (composition minéralogie, texture et structure) ;

5.1.3-Les surfaces gypseuses : apparaissent dans deux classes très bien individualisées, la première en couleur cyan correspond aux reliefs gypseux disséqués et aux encroûtements gypseux, l'autre en rose (planche 5.1) correspond au sable gypseux blanchâtre qui est le produit d'érosion éolien de la roche gypseuse sur les collines gréseuses et sur le plateau (photos 5, 6, 7, 10 et 11) ;

5.1.4-Les surfaces à sols salins humide et efflorescences saline : sur la carte correspondent aux plages de couleurs bleu ciel (planche 5.1), se sont des sols salins a texture sableuse, avec beaucoup de tâches blanchâtres et de cristaux de gypse, de couleur à l'état sec brun grisâtre sombre (2,5Y4/2) (photos 12,13) pas d'effervescence à l'HCl.

Les variations du niveau moyen de réflectance de ces classes sont dues ici, en dehors de la minéralogie (les sels), à l'humidité, aux éléments fins et à la microrugosité.

5.1.5-Les surfaces calcaire et calcaire dolomitique : apparaissent sur la carte en marron clair (planche 5.1) et correspondent aux matériaux de plateau qui se matérialise par de cailloux et gravier de calcaire dolomitique de couleur gris à gris clair et des blocs et pierre micro-conglomératique (grès, calcaire gréseux et gypso-calcaire). Elles sont souvent composées d'éléments hétérogènes ; les obstacles et les fissures retiennent fréquemment des sables éoliens piégés au vent et sous le vent, parfois localement couvert d'un voile de sable éolien grossier (photos 14,15).

Les valeurs de réflectance relativement fortes de surfaces calcaires sont dues principalement à la présence de calcaire, car la teneur en calcaire intervient

sur la réflectance des sols en augmentent les valeurs de réflectances dans la bande bleue.

Un autre paramètre important dans la variation des valeurs de réflectance de ce type d'états de surface est le phénomène de pierrosité (éléments grossiers), le plus souvent la réflectance augmente avec la pierrosité. Ceci est principalement dû à ce que l'énergie réfléchiée par les éléments grossiers, qui jouent souvent comme des surfaces spéculaires, est plus importante que les ombres qu'ils occasionnent, (GIRARD. M- C, GIRARD. C- M, 1999).

5.1.6-Les surfaces gréseuses : à ciment carbonaté apparaissent sur la carte en vert olive (planche 5.1) ils se matérialisent par le substrat gréseux rouge à ciment argilo-carbonaté d'âge Mio-Pliocène (5YR 6/4) (photos 16, 17).

La réflectance relativement faible de cette classe est dû principalement à leur couleur sombre-saturées et la teneur relativement forte en éléments fins (grés à ciment argilo-limoneux légèrement carbonaté).

5.1.7-Les terrasses alluviales : sont des surfaces homogènes constituées de matériaux détritiques de nature siliceuse de tailles centimétriques, très arrondis mêlés dans un sable quartzique éolien grossier (photos 8-9). La réflectance faible de cet état de surfaces est probablement due la couleur sombre des constituants et à la rugosité homogène de la surface de cette classe. Cette classe apparaît sur la carte en grenat (planche.5.1).

Les classifications et les modèles développés ci-dessous mettre en évidence le rôle de la rugosité, de la couleur et de la dominante minéralogique dans l'interprétation des sols sur l'image en télédétection.

5.2-Les histogrammes bi-canaux de l'image Landsat :

Ces histogrammes ont été calculés pour la partie de l'image qui couvre la notre région d'étude (Fig.1.2). La densité de points est croissante vers le centre du nuage.

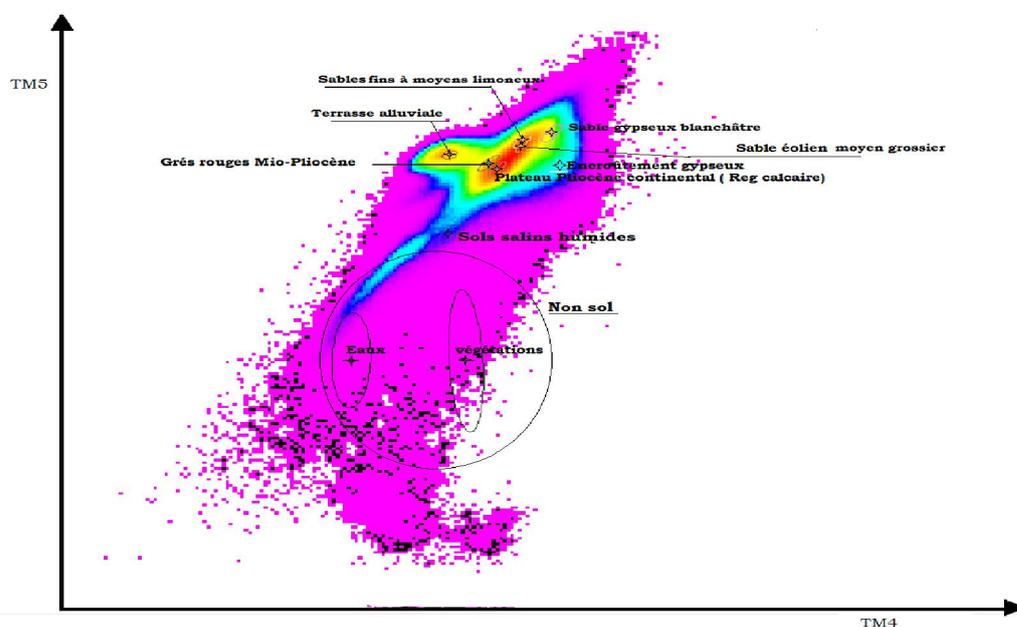


Fig. 5.1 : L'historgramme bi-canaux (TM5-TM4).

Sur l'histogramme bidirectionnel de deux canaux (TM5/TM4) (planche. 5.1), les classes d'états de surface peuvent être distinguées suivant la rugosité et la saturation de leur couleur, selon la partition schématisée en figure 5.8. La classe non sol (ombre, eaux et végétations) correspond aux classes les plus sombres ; à l'autre extrême, les classes (sable éolien, sables alluviaux et sables gypseux blanchâtres) correspondent aux surfaces les plus brillantes. Les classes terrasse alluviale et grès rouges correspondent aux surfaces de couleurs les plus saturées (grès rougeâtres et gravier siliceux grisâtre).

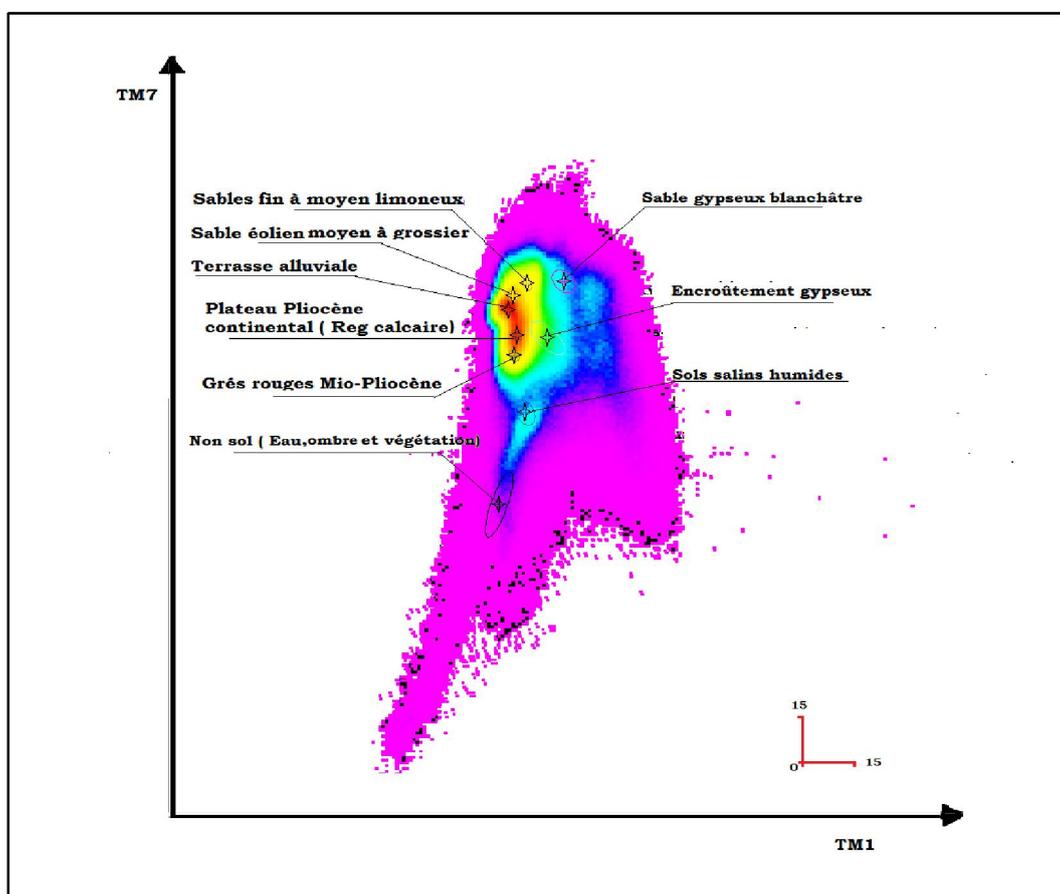


Fig. 5.2 : L'histogramme bi-canaux (TM7-TM1).

Sur l'histogramme bidirectionnel de deux canaux (TM 1/TM7) les classes se situent tous sur un faisceau de points orientés globalement dans la direction de la première bissectrice.

D'après Escadafal (1989), ces classes sont ordonnées d'une part suivant la rugosité, et d'autre part, selon le rapport TM 1/TM7 ce qui correspond aux thèmes suivants :

- Ombres (terrasse alluviale et reg calcaire) ;
- surfaces gypseuses ;
- surfaces à dominante carbonatée (calcaires et grès à ciment calcaires) ;
- surfaces à limons, calcaires et sable ;
- surfaces à dominante quartzeuse (voiles de sables fins éoliens, dunes fixées. Ergs).

La nature minéralogique des surfaces se traduit essentiellement dans le canal 7 (Escadafal, 1989).

La composition minéralogiques des surfaces ne varie pas de façon continue, on observe trois grands caractéristiques minéralogique : les carbonates (surfaces limono-sableuses, colluvions, dalles calcaires, roches calcaires et calcaire dolomitiques), le quartz (sables fins éoliens, sables grossiers) et les gypses (roches gypseuse, croûtes gypseuse et sable gypseux).

Les deux canaux du domaine visible TM1 et TM3 sont relativement peu corrélés et l'histogramme montre plusieurs populations de pixels. Les études ont montrées que cette paire de canaux est celle qui permet la meilleure discrimination des surfaces d'après leur couleur.

Au contraire les canaux, TM3 (rouge) et TM4 (proche infrarouge), sont la paire de canaux la plus corrélée.

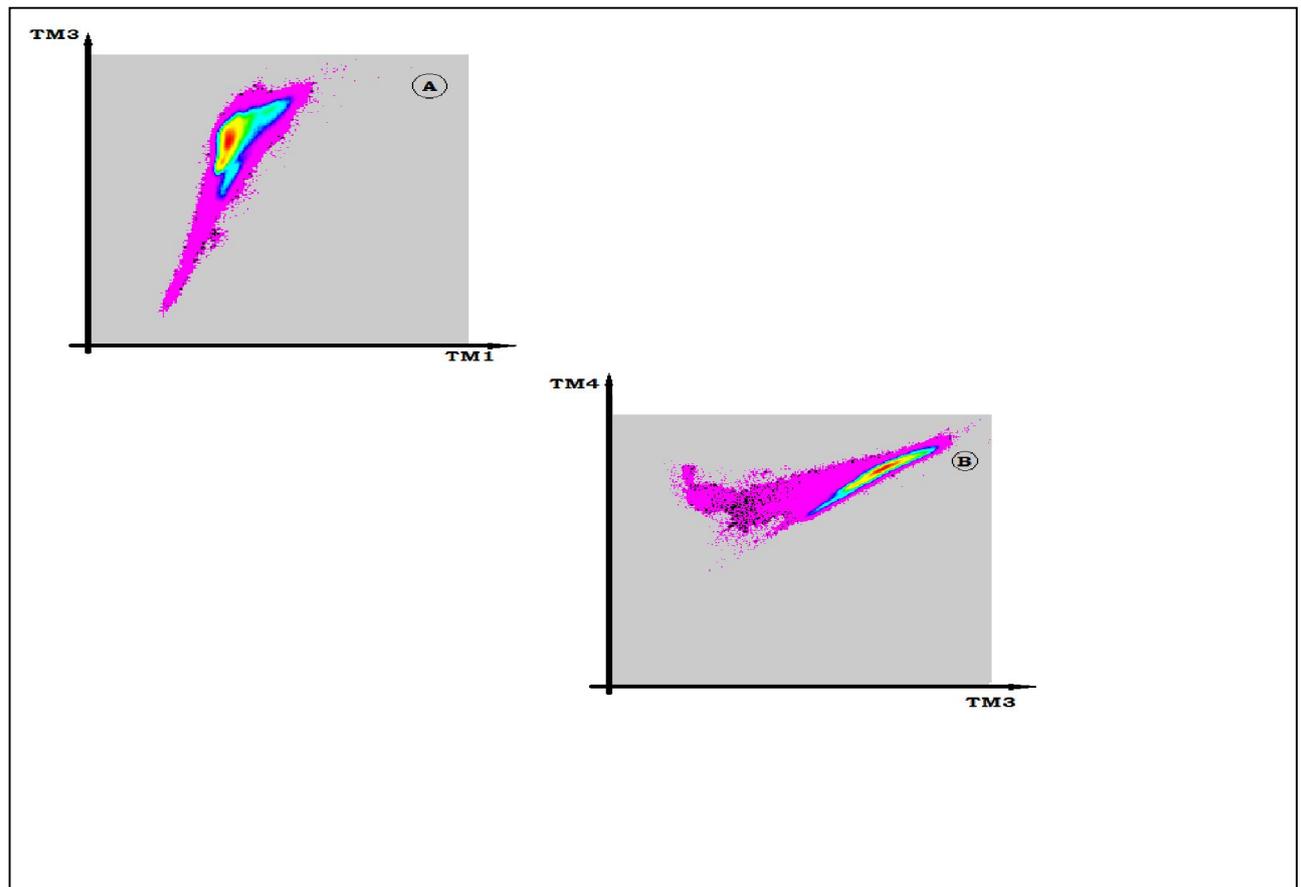


Fig. 5.3 : Les histogrammes bi-canaux (TM3-TM1 et TM4-TM3).

5.3-Les comportements spectraux des différents états de surfaces de sol :

Le comportement spectral des objets est une voie privilégiée pour analyser et interpréter les images de télédétection, car il repose sur des lois physiques générales, Girard MC et Girard C (1999).

Les réponses spectrales des classes que nous avons pu mettre en évidence est illustré dans la figure (fig.5.4) qui présente les courbes de réflectance diffuse de chaque classe

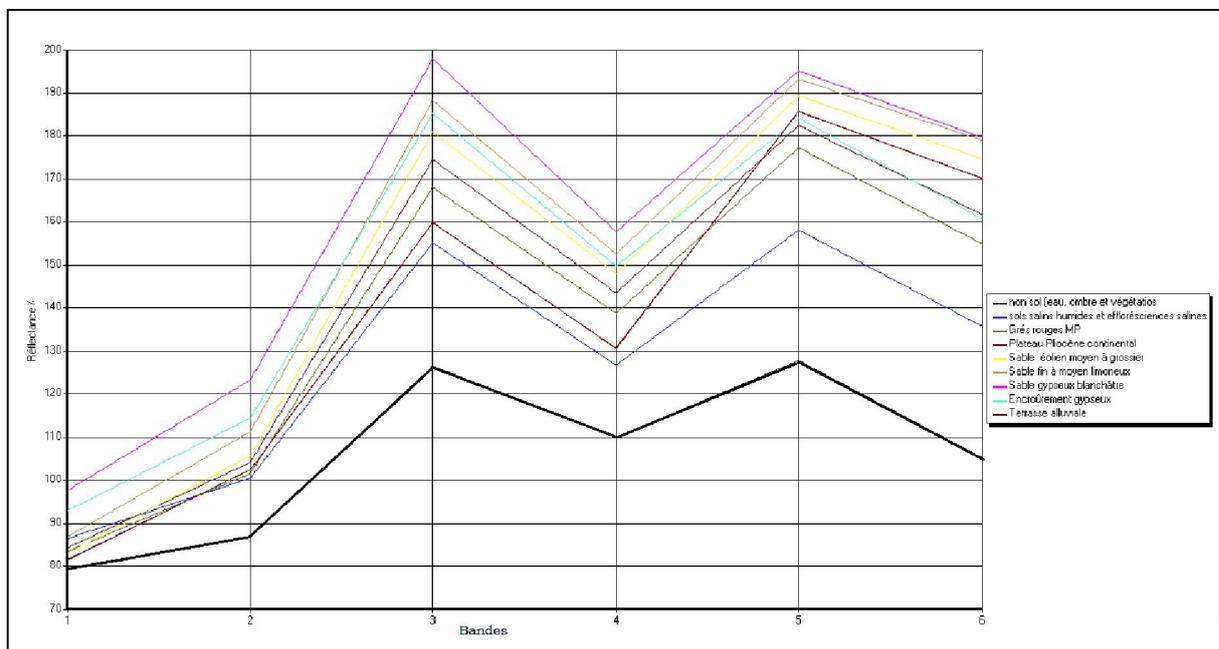


Fig. 5.4 : Les courbes des signatures spectrales des différents états de surfaces de sol.

Dans cette étude nous allons nous intéresser essentiellement au comportement spectral des sols.

L'examen de la figure (5.4) montre que :

_ Le comportement spectral des classes des sols se caractérise en général par des courbes de réflectance régulièrement croissantes dans le visible (TM1, TM2, TM3) et le moyen infrarouge (TM5), Tandis qu'elles sont généralement faibles dans le proche infrarouge (TM4) et le moyen infrarouge (TM7).

Ces classes ne présentent pas des valeurs des réflectances semblable (la même bande spectrale montre des valeurs différentes pour chaque classe).

On peut déduire aussi de cette figure que la réflectance varie en fonction du couleur et la clarté des sols :

1- Plus la clarté est forte, plus la réflectance est forte ;

2- Plus la clarté est faible, plus la réflectance est faible.

Les fortes réflectances dans tous les bandes sont celles des sols claires, les plus fins et des sols secs (les sables gypseux blanchâtres, encroûtement gypseux, les sables éoliens et alluviaux).

Les réflectances les plus faibles dans tous les bandes sont celles des surfaces de couleur sombre, rugueux, humides et surfaces absorbant de lumières (grès rouges, reg calcaire du plateau, terrasse alluviales, sols salins humides et surfaces d'eau de sebkha).

En effet, c'est la raison pour laquelle les sols gypseux présentent des valeurs de réflectances élevées dans les bandes du visibles : ils sont généralement clairs, blanchâtres présentant une forte clarté (7,5 YR 8/4) des courbes de réflectance des sols sableux (sables éoliens et sables alluviaux) succède à celles des sols gypseux (sables et encroutement gypseux) car cette classe présente une clarté inférieure à ces deux dernières (7,5 YR 7/6). De même pour les autres classes qui sont moins réfléchant que la classes des sables ainsi de suite jusqu'à la classe des sols salins humides qui présente la clarté la plus faible.

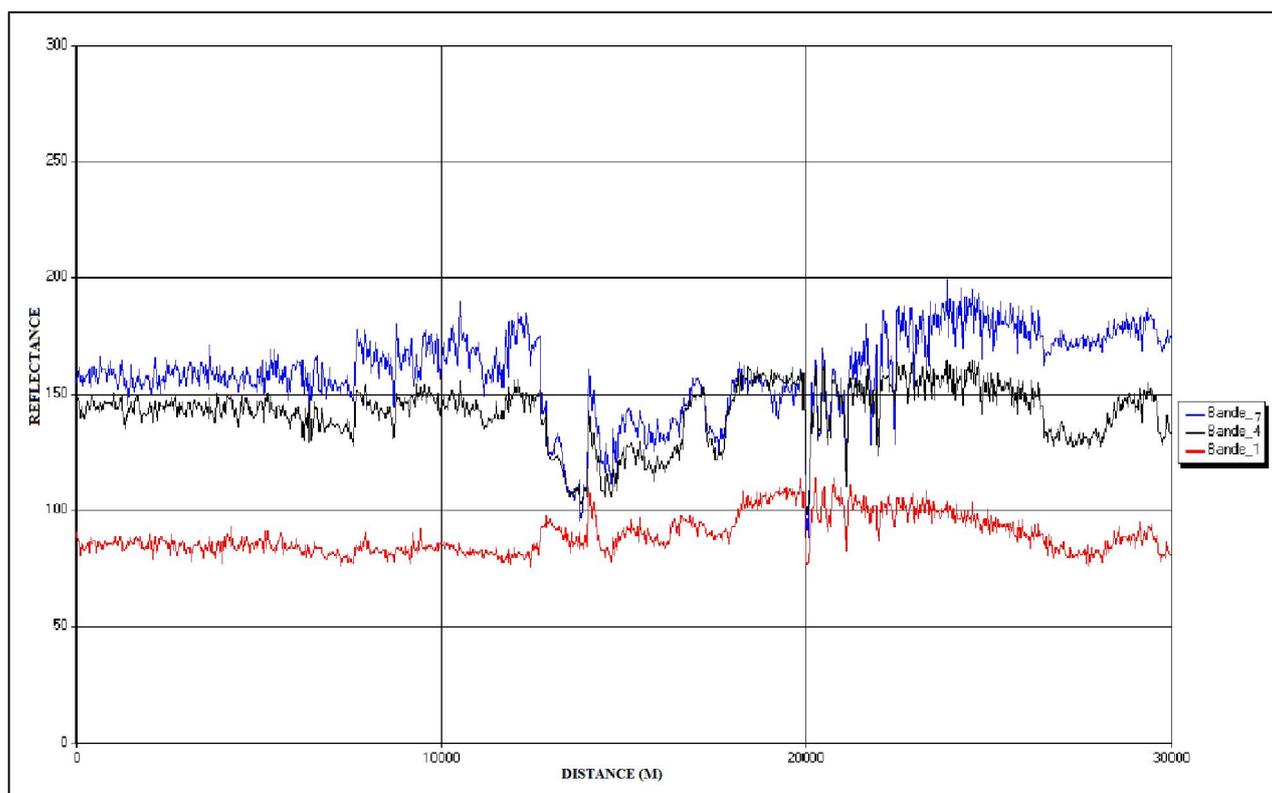


Fig.5.5 : Profil spectral à travers la zone d'étude

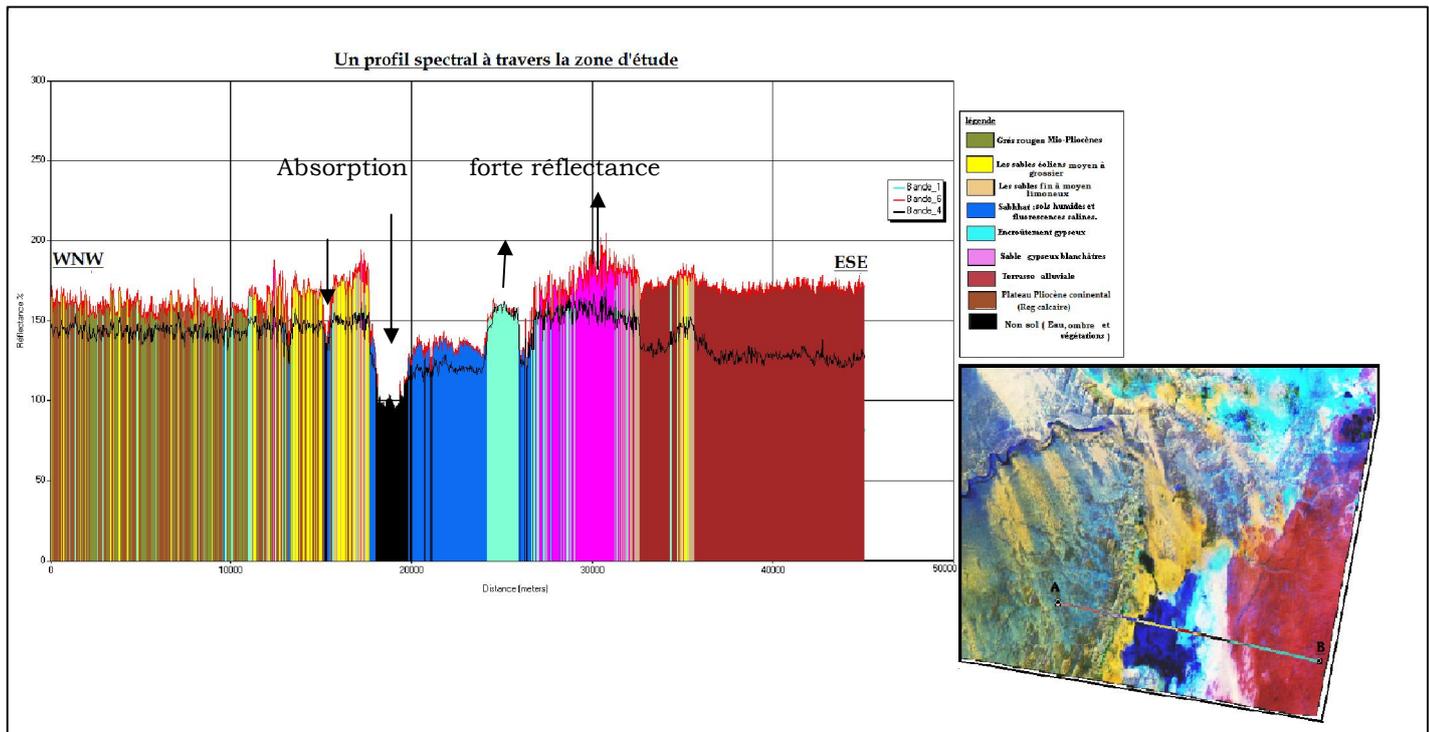


Fig. 5.6 : un profil spectral à travers la zone d'étude corrélé aux états de surfaces

L'examen du profil spectral figure (5.5 et 5.6) montre que : Dans le domaine du visible (TM1 et TM4), la réflectance est croissante. L'effet de l'absorption par l'eau est remarqué au centre et aux bordures Ouest de la sebkha (l'eau libre de la nappe et sol très humide) ; en fait à mesure qu'on s'éloigne de centre de sebkha l'humidité décroît et la réflectance augmente.

Lors de passage sur les sables gypseux blanchâtres et sables éoliens, des pics de réflectance peuvent être observés (forte réflectance). Au niveau des sols sombres on remarque une baisse remarquable de la réflectance, cette chute est due à l'effet conjugué de la minéralogie et l'état physique des sols (texture, structure et granulométrie).

La topographie et la géomorphologie des sols peuvent également entraîner une perturbation de leur réponse spectrale par l'effet d'ombre à cause de l'acquisition de l'image avec un angle oblique.

5.4-La droite des sols :

A partir de l'étude des différents histogrammes bi-canaux on s'aperçoit que toutes les valeurs de réflectances des sols se situent sur une direction suivant globalement la première diagonale (fig. 5.7).

Cette diagonale principale peut être qualifiée de "droite des sols nus" (GIRARD. M- C, GIRARD. C- M, 1999), puisque les réflectances R et PIR sont proches pour ce type de corps. Cette droite rassemble les sols nus sombres près de l'origine et les sols nus clairs plus loin, le long de cette droite. Puisque R et PIR sont très différents pour les végétations, celles-ci se regroupent donc loin de la "droite des sols" autour d'un "pôle végétation", décalé selon l'axe PIR.

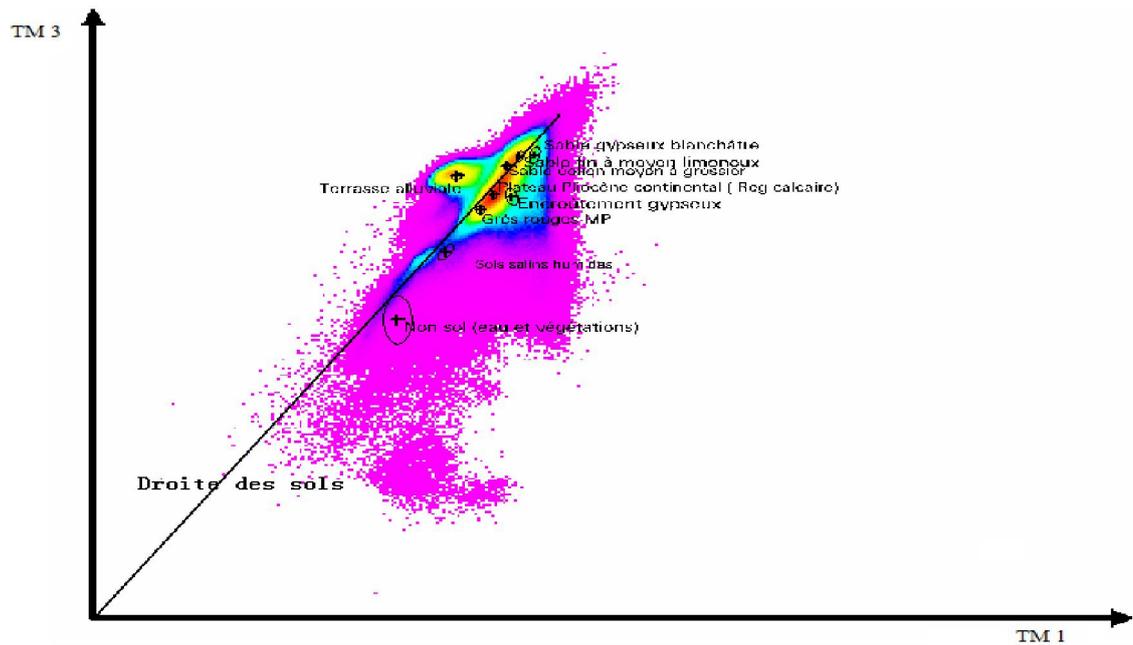


Fig. 5.7 : la droite des sols de la région d'étude

5.5-Les modèles d'interprétation des sols sur l'image :

Un modèle reliant la minéralogie aux luminances peut être mis en évidence ici. Cependant, les relations suivantes ont été observées (Fig. 5-8) :

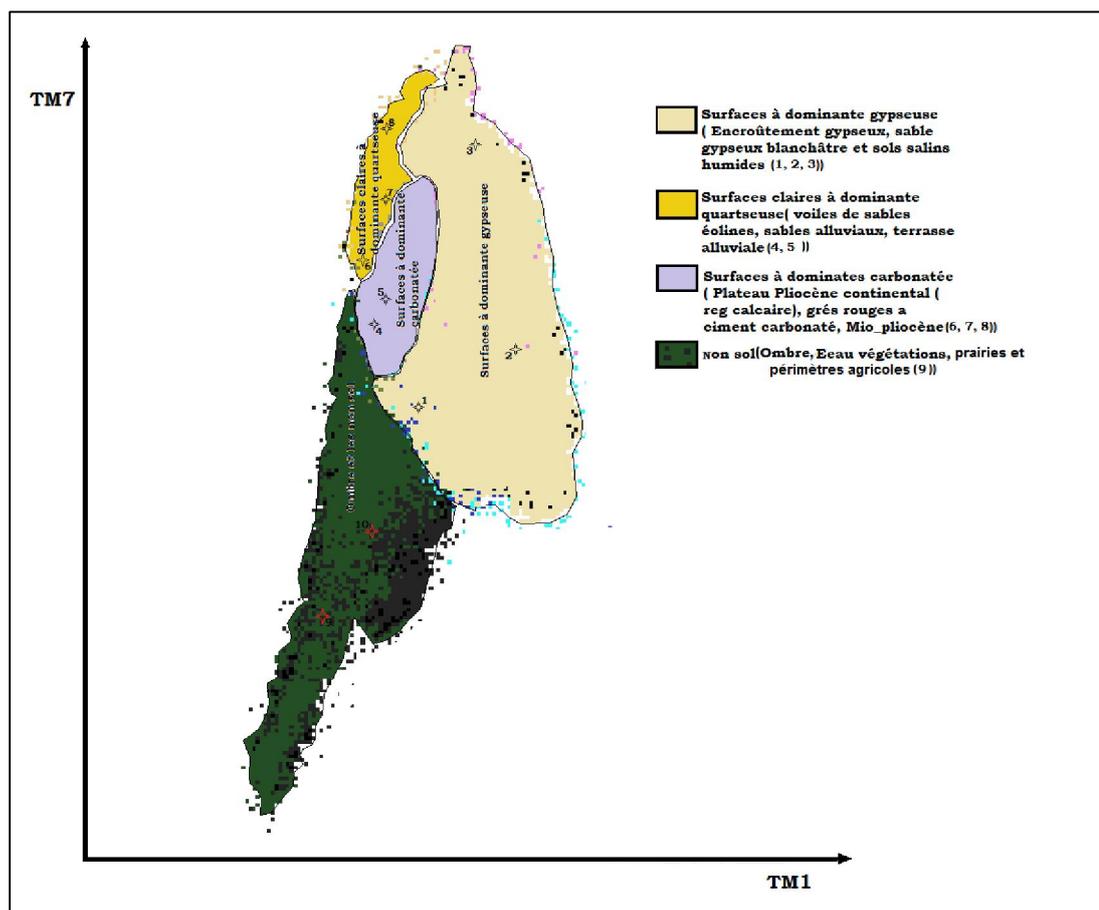


Fig.5.8 : Model d'interprétation des sols de la région d'étude sur l'image.

- Luminance moyenne à forte dans le visible et moyenne à forte dans le canal 7 : surfaces à dominante gypseuse ;
- Luminance faible à moyenne dans le visible et moyenne dans le canal 7 : surfaces à dominante calcaire ;
- Luminance moyenne dans le visible et forte dans le canal 7 : surfaces à dominante quartzeuse (sables éoliens et sable alluvial) ;
- Luminance faible dans le visible et faible à moyen dans le canal 7 : les surfaces non sol (ombre, eau et végétations).

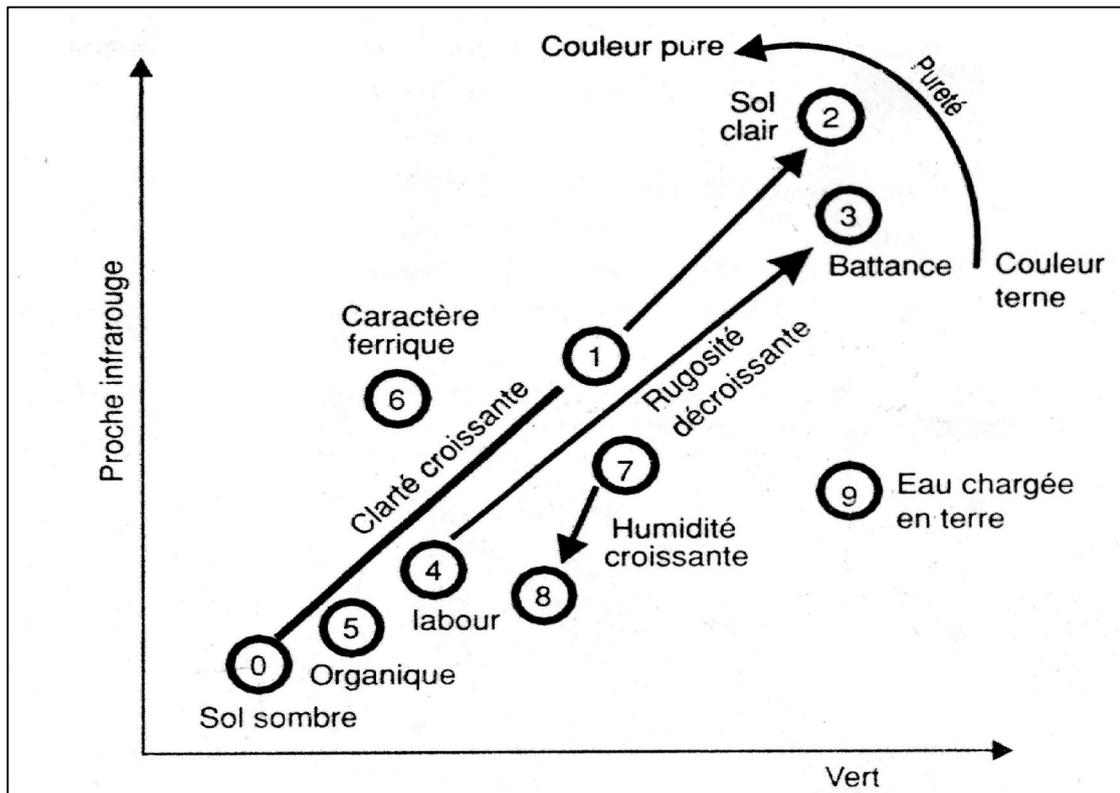


Fig. 5.9 : Model d'interprétation des sols sur l'image (GIRARD. M-C, GIRARD.C-M., 1999)

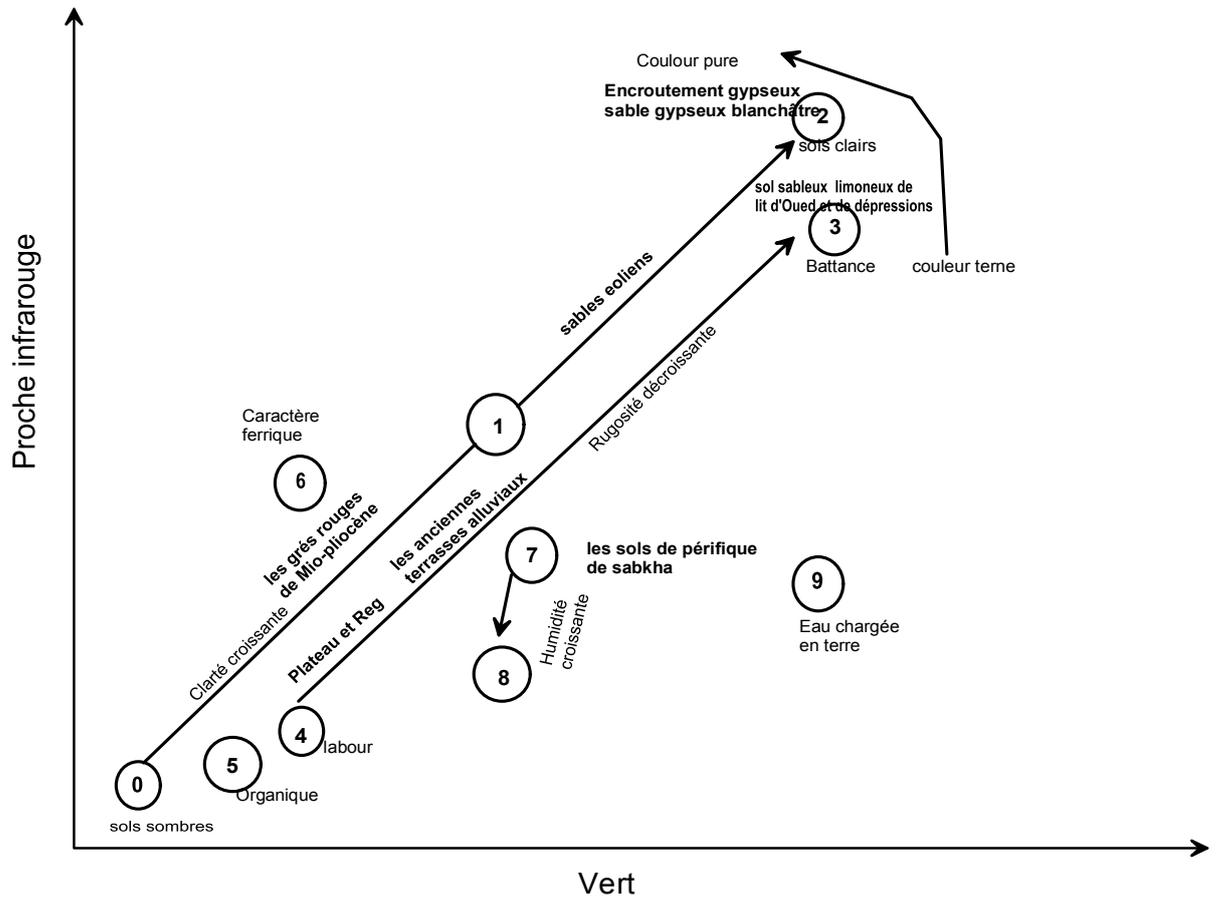


Fig.5.10 : Projection des états de surface de la région d'étude dans le model d'interprétation des sols de GIRARD. M- C et GIRARD. C- M, 1999.

CHAPITRE.6. Discussion des résultats géochimiques et minéralogiques :

Introduction :

Affin de compléter les analyses chimiques et minéralogiques, une partie d'analyses sont inspirés des travaux de Hamdi Aissa (2001) (tableau 6.5 ,6.6 et 6.7). Nous avons surtout appuyé sur l'aspect physico-chimique et minéralogique dans le but de mieux caractériser les différents états de surfaces.

6.1-Etat de surface à sable éolien moyen à grossier :

6.1.1/Localisation : sur les regs (placages sableux) et dans les endroits abritées (Planche.5.1).

6.1.2/Description visuelle : formés par des particules jaunâtre et jaune clair à transparents siliceuses de taille différentes (plus au moins grossiers) entraînées par le vent qui s'accumulent dans les zones abritées formant des dépôts de sable plus ou moins développés (Photos : 1-2).

6.1.3/Caractéristiques physico-chimiques, géochimiques et minéralogique :

La granulométrie montre une dominance des sables grossier (>50%). La salinité est très faible avec un faciès sulfaté-magnésien et un pH basique (Tableau. 6.1.). La minéralogie montre une quasi dominance du quartz (Fig. 6.1).

Tableau 6.1. : Caractéristiques physico-chimiques et géochimiques :

ECH	Prof. (cm)	Coordonnées géographiques		Analyses granulométriques				calc %	gypse %	M.O. %	CE ds.m ⁻¹	pH
		X	Y	SG %	SF %	Lim %	Argil %					
E1	0-05	5°18'56"E	32°33'31"N	54	16	18	5	2.0	0	0	0.23	7.38
E2	0-04			50	20	19	4	1.0	0	0	0.22	7.40

Ech.	Prof.	Coordonnées géographiques		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
E1	0.0-05	5°18'56"E	32°33'31"N	0.011	0.27	0.22	0.018	0.125	0.18	0.161
E2	0.0-05			0.009	0.25	0.23	0.014	0.122	0.19	0.180

6.1.4/- Résultats d'analyses en DRX :

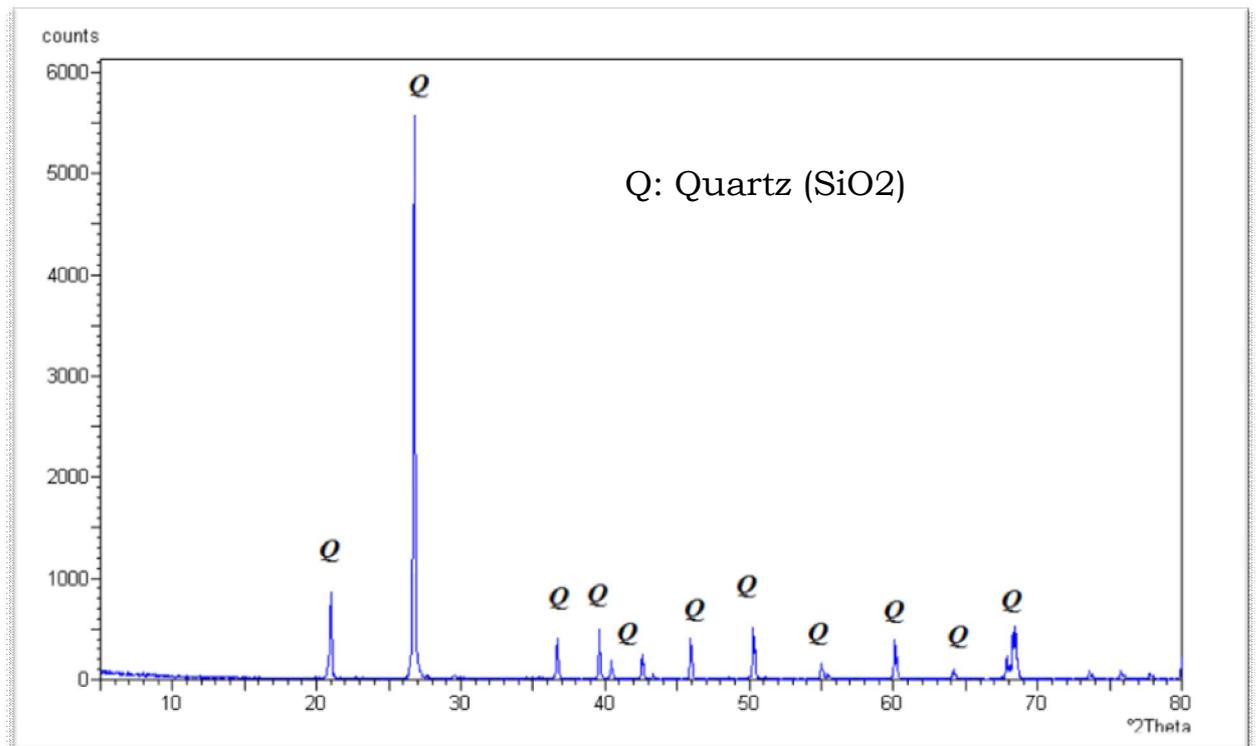


Fig. 6.1: Diffractogramme de rayon x d'état de surface sables éoliens moyens à grossiers qui ne montre que quartz.

6.2-Etat de surface à sables fins à moyens limoneux :

6.2.1/Localisation : sur le reg (placages sableux), dans les zones abritées et dans les lits de cours d'eau (Oued et petits ravins) (Planche.5.1).

6.2.2/Description visuelle : formés par des particules jaunâtres à jaune terne de taille différentes (plus au moins fines) entraînées par le vent qui s'accablent dans les zones abritées formant des dépôts de sable plus ou moins étendus (Photo :3-4).

6.2.3/Caractéristiques physico-chimiques, géochimiques et minéralogique :

La granulométrie montre une dominance des sables fins (>50%). La salinité est très faible avec un faciès sulfaté-magnésien et un pH basique (Tableau 6.2.). La minéralogie montre une quasi dominance du quartz et des traces d'Analcime (fig.6.2).

Tableau.6.2 : Caractéristiques physico-chimiques et géochimiques :

ECH	Prof. (cm)	Coordonnés géographiques		Analyses granulométriques				calc %	gypse %	M.O. %	CE ds.m ⁻¹	pH
				SG %	SF %	Lm %	Argl. %					
		X	Y									
E1	0-03	15°18'55"E	32°35'40"N	17	28	45	10	5.0	2	0.5	0.30	7.10
E2	0-05			15	27	47	10	4	3.0	0.23	0.35	7.15

Ech.	Prof.	Coordonnées géographiques		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
E1	0-03	15°18'55"E	32°35'40"N	0.013	0.22	0.19	0.017	0.17	0.02	0.07
E2	0-05			0.06	0.25	0.17	0.012	0.19	0.032	0.1

6.2.4/Résultats d'analyses en DRX :

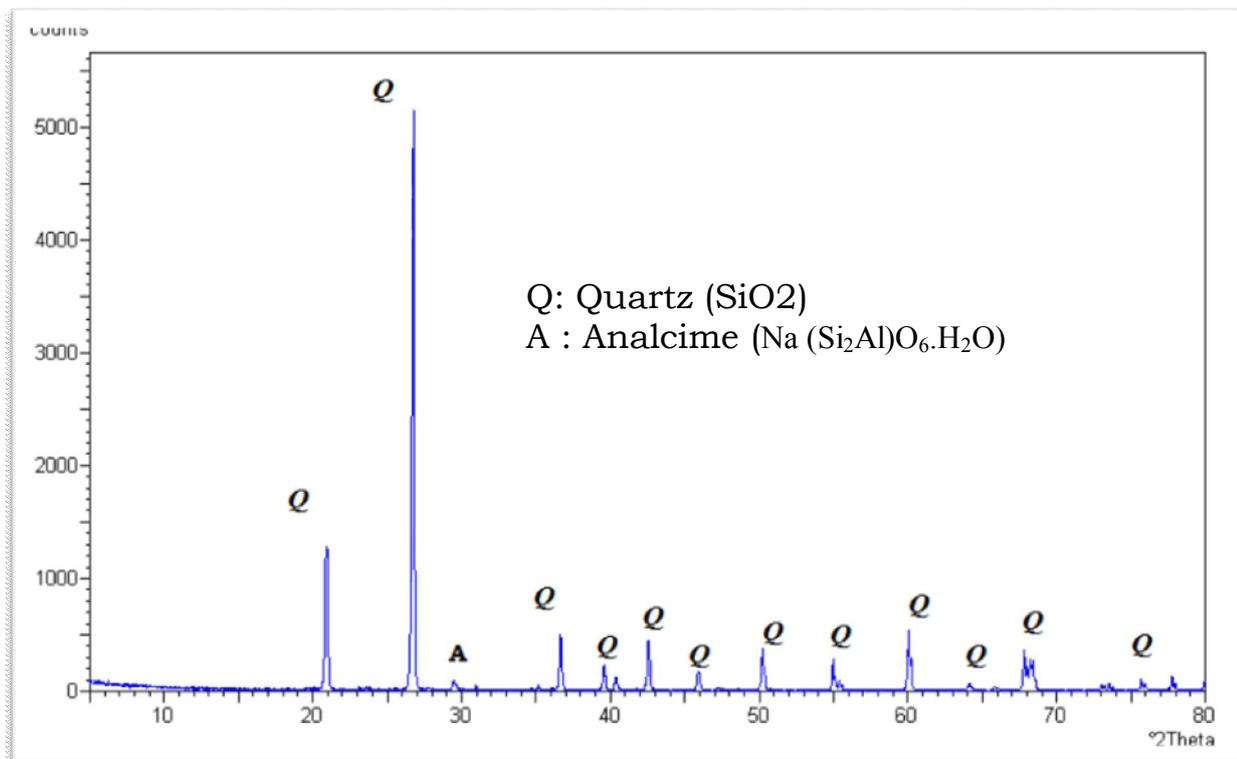


Fig. 6.2 : Diffractogramme de rayon x de l'état de surface Etat de surface sables fins à moyens limoneux.

6.3-Etat de surface à sables fins gypseux blanchâtres :

6.3.1/Localisation : coté Est du Sebka et voisinage des carrières et affleurements gypseux, dans la direction du vent (Planche.5.1).

6.3.2/Description visuelle : Texture sableuse, avec beaucoup de tâches blanchâtres et de cristaux de gypse, de couleur blanchâtre pas d'effervescence à l'HCl (photos : 5-6-7).

6.3.3/Caractéristiques physico-chimiques, géochimiques et minéralogique :

La granulométrie montre une des sables fins à grossier (>50% du sables fins). La salinité est faible à moyenne avec un faciès sulfaté-calcique et un pH basique (Tableau 6.3.). La minéralogie montre dominance du gypse, bassanite avec du quartz (Fig.6.3).

Tableau 6.3 : Caractéristiques physico-chimiques et géochimiques :

ECH	Prof. (cm)	Coordonnées géographiques		Analyses granulométriques				calc %	gypse %	M.O. %	CE ds.m ⁻¹	pH
				SG %	SF %	Lm%	Argl. %					
E1	0-05	5°28'29"E	32°20'44"N	25	55	17	03	0,78	25,51	0	4.82	7.8
E2	0-05			22	58	15.5	4.5	0.75	27.2	0	4.65	7.63

Ech.	Prof.	Coordonnées géographiques		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
E1	0-05	5°28'29"E	32°20'44"N	0.25	23.5	2	0.035	5.2	0.15	0.12
E2	0-05			0.15	20.35	2.70	0.024	2.70	0.13	0.10

6.3.4/Résultats d'analyses en DRX :

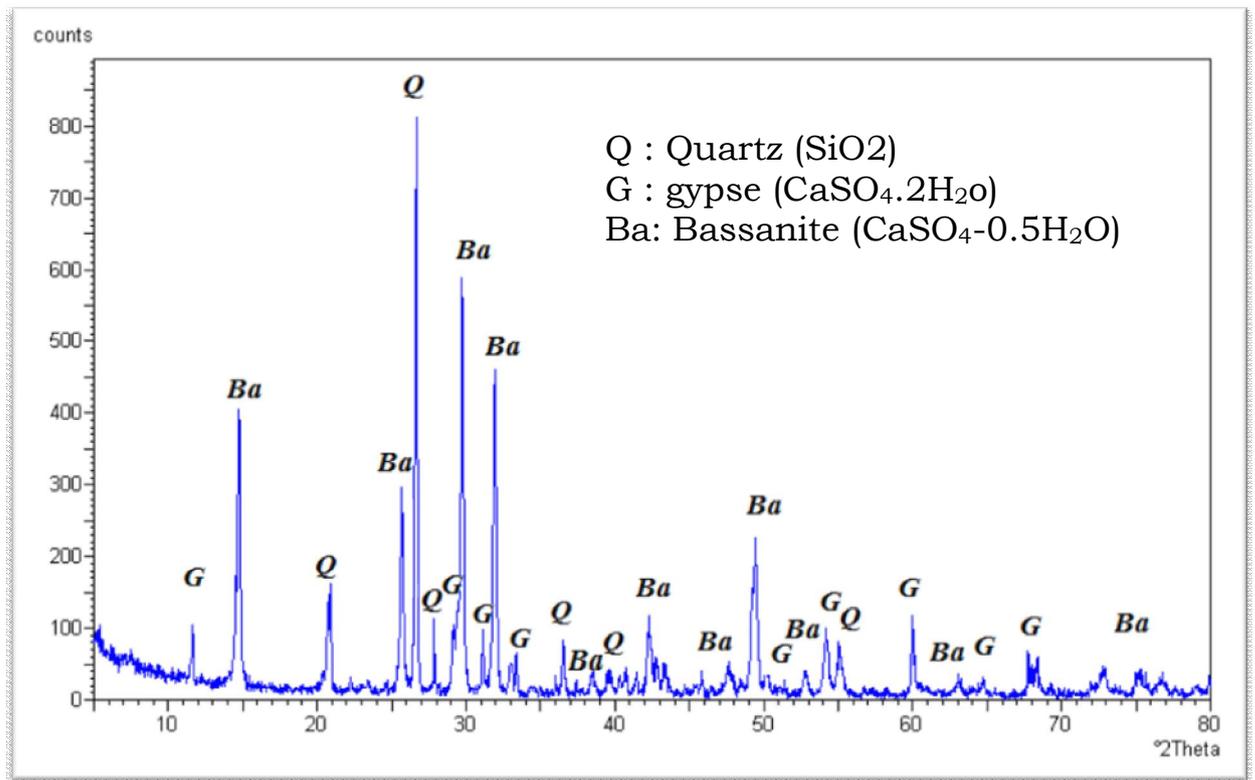


Fig. 6.3 : Diffractogramme de rayon x de l'état de surface à sable gypseux blanchâtre.

6.4-Etat de surface Terrasse alluviale :

6.4.1/Localisation : coté Est de la région d'étude (Planche.5.1).

6.4.2/Description visuelle : formée de plus de 30% d'éléments de tailles de 0.2 à 0.5cm, arrondi à sub-arrondi de nature siliceux et d'une fraction sableuse quartzique (transparente à translucide) généralement grossier (Photos : 8-9).

6.4.3/Caractéristiques physico-chimiques, géochimiques et minéralogique :

La granulométrie montre une dominance des sables grossier (>50%). La salinité est très faible avec un faciès sulfaté-magnésien et un pH basique (Tableau 6.4.). La minéralogie montre une quasi dominance du quartz (fig. 6.4).

Tableau.6.4 : Caractéristiques physico-chimiques et géochimiques :

ECH	Prof. (cm)	Coordonnés géographiques		Analyses granulométriques				calc %	gypse %	M.O. %	CE ds.m ⁻¹	pH
		X	Y	SG %	SF %	Lm %	Argl. %					
E1	0-05	5°29'46"E	32°26'36"N	61	25	12	2	0	0	0	0.15	7.72
E2	0-05			56	26	15	3	0	0	0	0.12	7.77

Ech.	Prof.	Coordonnées géographiques		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
E1		5°29'46"E	32°26'36"N	0.23	0.16	0.22	0.872	0.135	0.2	0.162
E2				0.20	0.22	0.25	0.77	0.14	0.17	0.131

6.4.4/Résultats d'analyses en DRX :

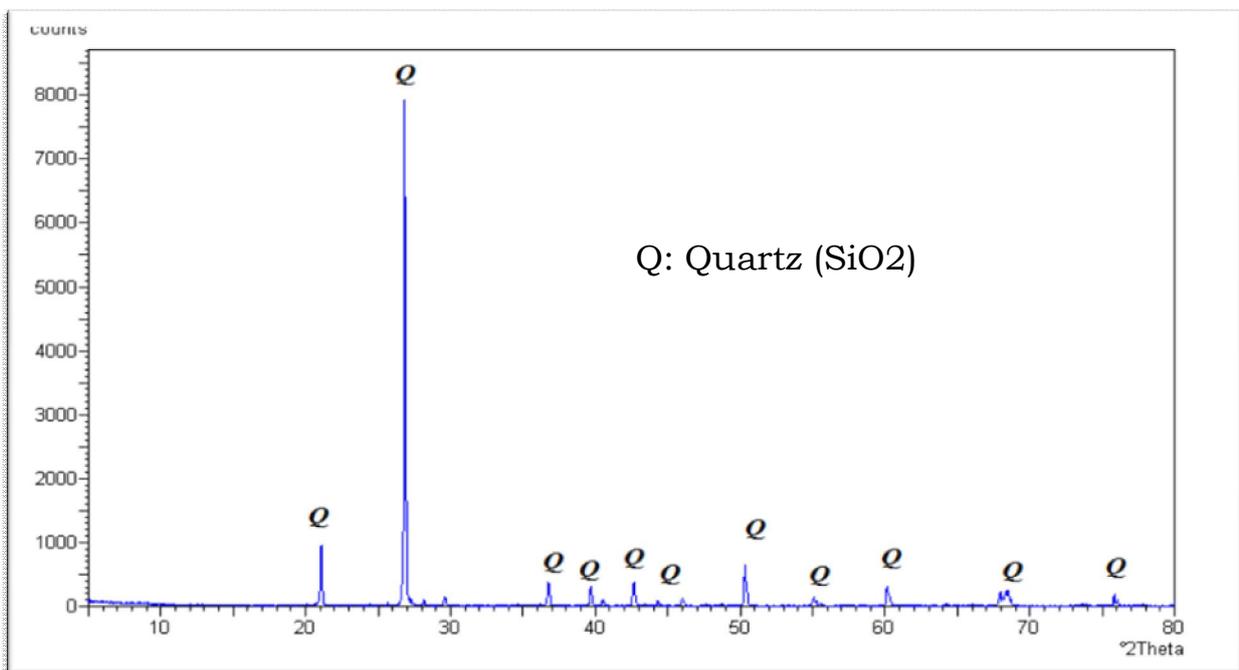


Fig. 6.4:Diffractogramme de rayon x d'état de surface terrasse alluviale.

6.5-Etat de surface Encroûtement gypseux :

6.5.1/Localisation : partout dans la région d'étude, Notons que les affleurements gypseux occupent les parties basses du relief (phénomène d'évaporation progressive) (Planche 5.1)

6.5.2/Description visuelle : Croûte gypseuse très dur de couleur blanche (10 YR 8/1) (état sec), faible effervescence à l'HCl, avec existence de cristaux de gypse, stratification lamellaire et fissure latérale, sèche (Photos : 10-11).

6.5.3/Caractéristiques physico-chimiques, géochimiques et minéralogique :

Le sol est caractérisé par une teneur très élevée en gypse, une très forte salinité (CE de 44 à 55 dS/m) avec un faciès géochimique chloruré-sodique (Tableau 6.5.). Sur le plan minéralogique, le diffractogramme (Fig. 6.5 et 6.6) montre une dominance de bassanite et gypse avec la présence de quartz.

Tableau.6.5 : Caractéristiques physico-chimiques et géochimiques :

ECH	Prof. (cm)	Coordonnées géographiques		Analyses granulométriques				calc %	gypse %	M.O. %	CE ds.m ⁻¹	pH
		X	Y	SG %	SF %	Lm %	Argl. %					
E1	0-00	5°25' 19"E	32°17'32"N	Roche				0.15	66.5	0	45.5	6.95
E2	0-00			Roche				0.17	52.23	0	51.40	7.2

Ech.	Prof.	Coordonnées géographiques		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
E1	0-00	5°25' 19"E	32°17'32"N	470.5	44.2	2.70	442.5	30.3	28.5	13.43
E2	0-00			550.2	56.5	3.50	575.6	22.4	29.02	17.10

N.B. résultats d'analyses de solution du sol (extraits de pâtes saturées) (Hamdi-Aissa, B. 2001)

6.5.4/Résultats d'analyses en DRX :

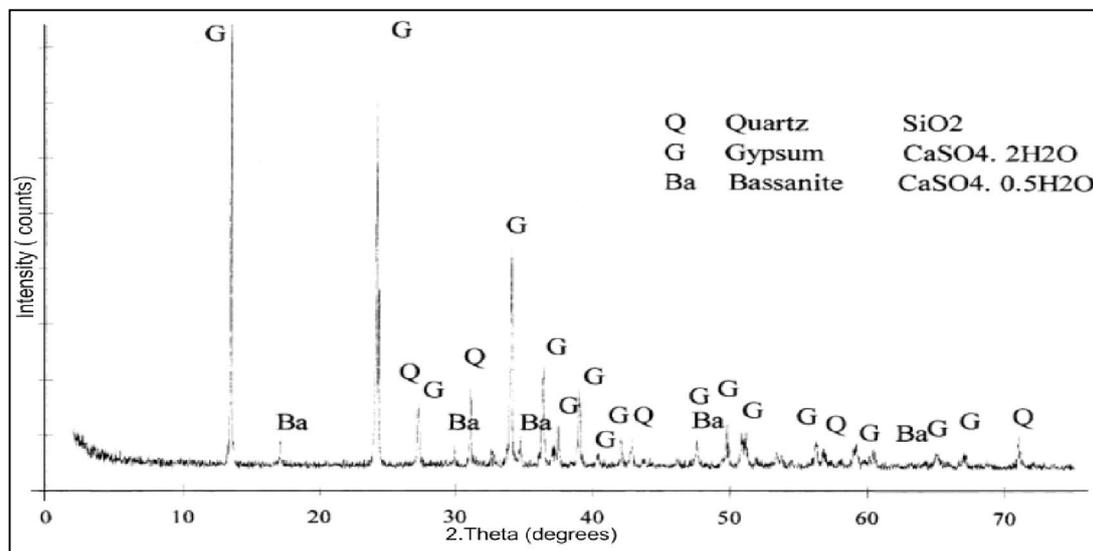


Fig. 6.5 :Diffractogramme de rayon X de surface croûte gypseuse polygonale.(Hamdi-Aissa et al. 2004)

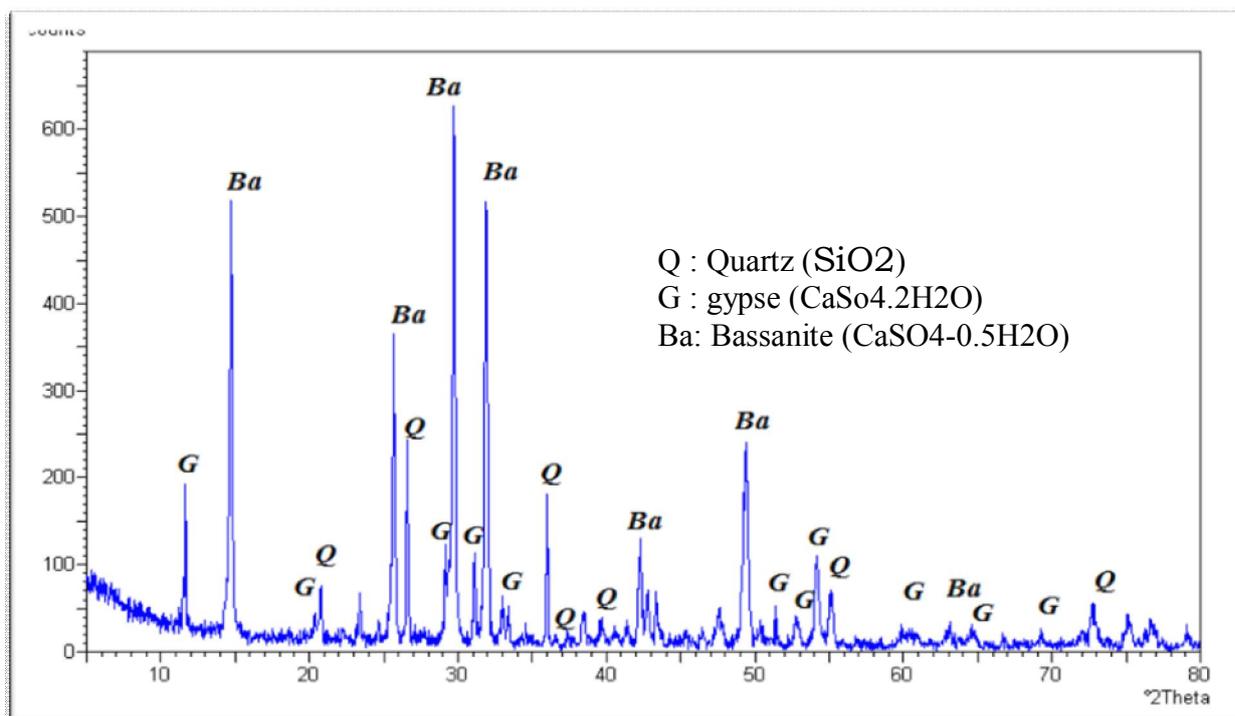


Fig. 6.6: Diffractogramme de rayon x d'un encroûtement gypseux polygonale.

6.6-Etat de surface : sols salins humides et efflorescences salines :

6.6.1/Localisation : à l'intérieur et aux alentours de la sebkha et des dépressions salines (Planche.5.1).

6.6.2/Description visuelle : Texture sableuse, présence de beaucoup de tâches blanches non effervescentes, humide, brun rougeâtre (7.5YR 7/6) ; jaune rosâtre (7.5YR 7/4) à l'état sec, structure encroûtant laminaire à micro-reliefs très fragiles, riche en gypse (Photos : 12-13).

6.6.3/Caractéristiques physico-chimiques, géochimiques et minéralogique :

Le sol est caractérisé par une teneur très élevée en gypse, une très forte salinité (CE de 44 à 55 dS/m) avec un faciès géochimique chloruré-sodique (Tableau. 6.6). Sur le plan minéralogique, le diffractogramme (Fig.6.7) montre une dominance de quartz, gypse et baloedite.

Tableau 6.6 : Caractéristiques physico-chimiques et géochimiques :

ECH	Prof. (cm)	Coordonnées Géographiques		Analyses granulométriques				calc %	gypse %	M.O. %	CE ds.m ⁻¹	pH
				X	Y	SG%	SF %					
E1	0-02	05°24'49"E	32°17'32"N	54	23	15	5	1.5	67.6	0	44.5	7.10
E2	0-05			46.5	40	5	6.5	0.05	48	0	55.5	7.72

Ech.	Prof. (cm)	Coordonnées géographiques		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
E1	0-02	05°24'49"E	32°17'32"N	470.5	45.6	3.1	475	27.5	26.9	13.5
E2	0-0.5			552.13	57.8	2.75	480.25	22.5	27.8	15.2

N.B. résultats d'analyses de solution du sol (extraits de pâtes saturées) (Hamdi-Aissa, B. 2001)

6.6.4/Résultats d'analyses en DRX :

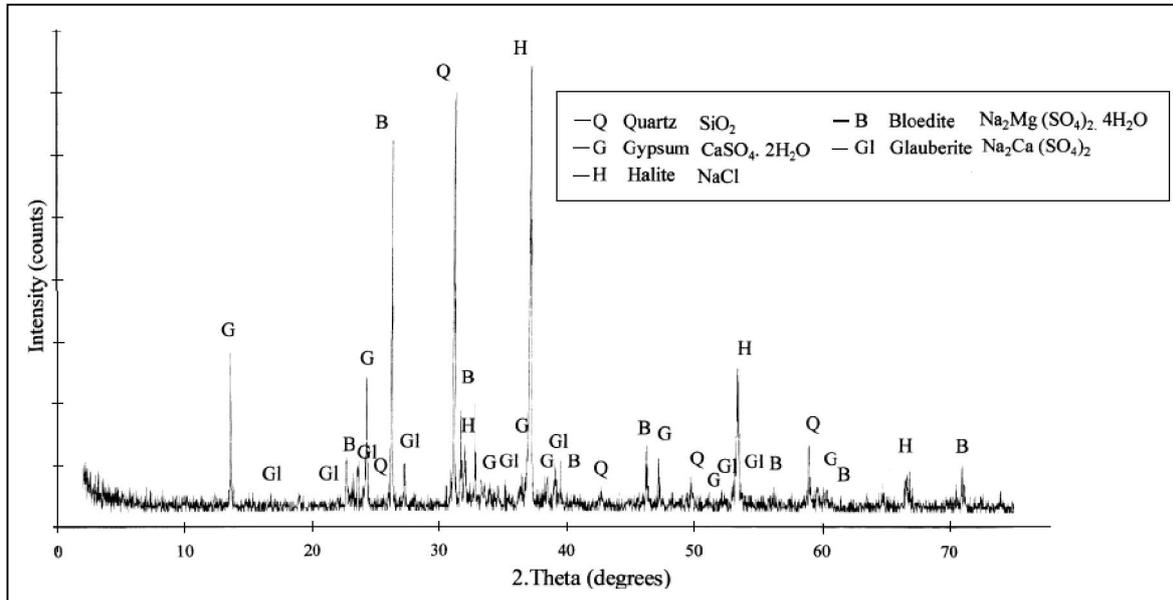


Fig. 6.7: Diffractogramme de rayon x des sols salins humides et efflorescences salines (Hamdi-Aissa, B. 2004).

6.7-Etat de surface plateau pliocène continental (Reg calcaire) :

6.7.1/Localisation : occupe la partie Ouest de la région d'étude (Planche.5.1).

6.7.2/Description visuelle : état de surface à cailloux et graviers de couleur gris à gris claire ou pierreux à grès calcaire-gypseux micro-conglomératique (Photos : 14-15).

6.7.3/Caractéristiques physico-chimiques, géochimiques et minéralogique :

La granulométrie montre une dominance des sables fins (>50%). La salinité est faible avec un faciès chloruré-sodique et un pH basique (Tableau.6.7.). La minéralogie montre une dominance du quartz et du gypse (fig.6.8).

Tableau.6.7 : Caractéristiques physico-chimiques et géochimiques :

ECH	Prof. (cm)	Coordonnées géographiques		Analyses granulométriques				calc %	gypse %	M.O. %	CE ds.m ⁻¹	pH
		X	Y	SG%	SF %	Lm%	Argl. %					
E1	0-00	05°18'03"E	32°32'16"N	Roche				45.3	0.25	0	2.25	7.75
E2	0-05			15	55	16	05	23.2	1.19	0	2.20	7.8

Ech.	Prof. (cm)	Coordonnées géographiques		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
E1	0-00	05°18'03"E	32°32'16"N	15.5	9.80	1.85	10.42	9.5	2.0	0.62
E2	0-05			55.10	16.5	0.65	20.2	30.2	5.50	1.65

N.B. résultats d'analyses de solution du sol (extraits de pâtes saturées) (Hamdi-Aissa, B. 2001)

6.7.4/Résultats d'analyses en DRX :

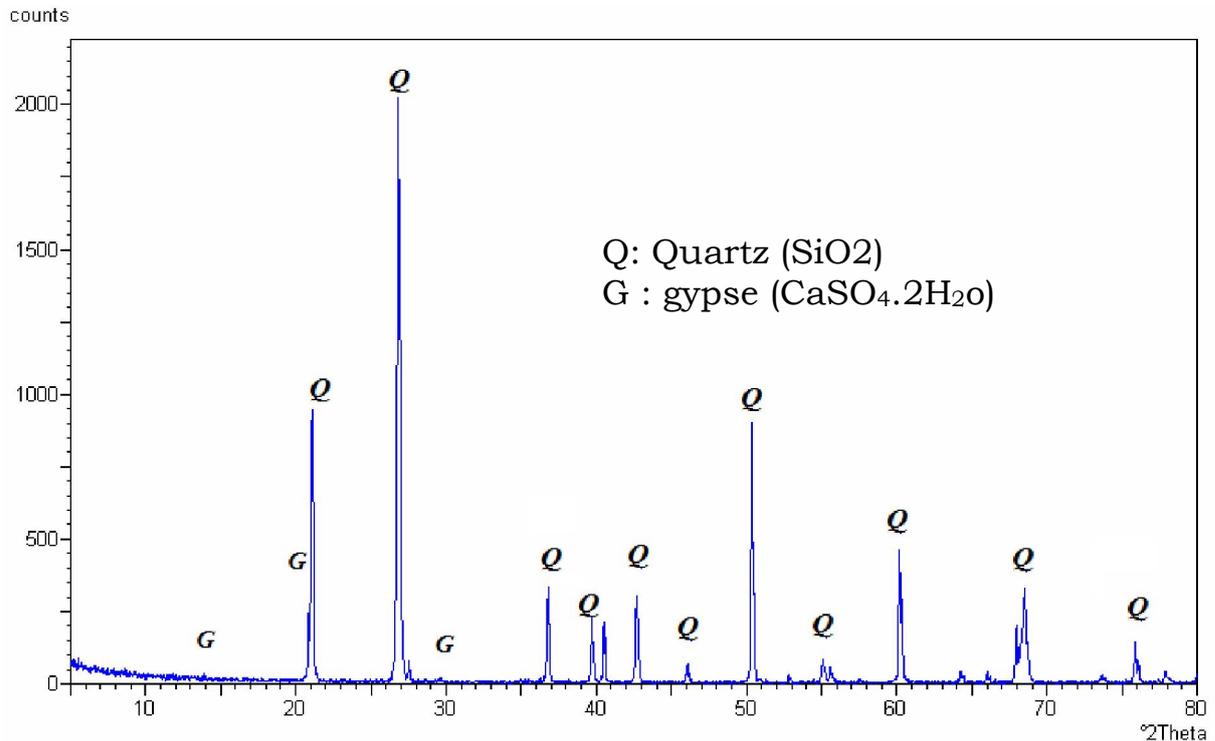


Fig. 6.8 : Diffractogramme de rayon x de l'état de surface plateau Pliocène.

6.8-Etat de surface grès rouges Mio_Pliocène:

6.8.1/Localisation : coté Ouest et Nord-Est du site (Planche.5.1).

6.8.2/Description visuelle : formé de la roche mère des grès rouges Mio-pliocène (collines de grès rouges à ciment argilo-carbonaté parfois gypseux) et de sable graveleux de glacis de couleur rougeâtre (7.5 YR 7/5) (Photos : 16-17).

6.8.3/Caractéristiques physico-chimiques, géochimiques et minéralogique :

Le sol est caractérisé par une teneur faible à moyenne en gypse et en calcite, une salinité moyenne (CE de 44 à 55 dS/m) avec un faciès géochimique chloruré-sodique (Tableau 5.8). Sur le plan minéralogique, le diffractogramme (Fig. 6.9) montre une dominance de quartz et de la calcite.

Tableau 6.8 : Caractéristiques physico-chimiques et géochimiques :

ECH	Prof. (cm)	Coordonnés géographiques		Analyses granulométriques				calc %	gypse %	M.O. %	CE ds.m ⁻¹	pH
				SG %	SF %	Lm %	Argl. %					
E1	0-05	5°18'26"E	32°24'11"N	Graviers (05-1cm)				3.5	2.15	0	5.62	7.85
E2	0-05			Graviers (0.5-1cm)				4.5	2.85	0	5.45	7.9

Ech	Prof.	Coordonnées géographiques		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
E1	0-00	5°18'26"E	32°24'11"N	35.4	10.2	5.2	23.5	12.5	3.5	0.12
E2	0-00			33.5	11.17	4.95	21.6	12.3	3.2	0.10

N.B. résultats d'analyses de solution du sol (extraits de pâtes saturées) (Hamdi-Aissa, B. 2001)

6.8.4/Résultats d'analyses en DRX :

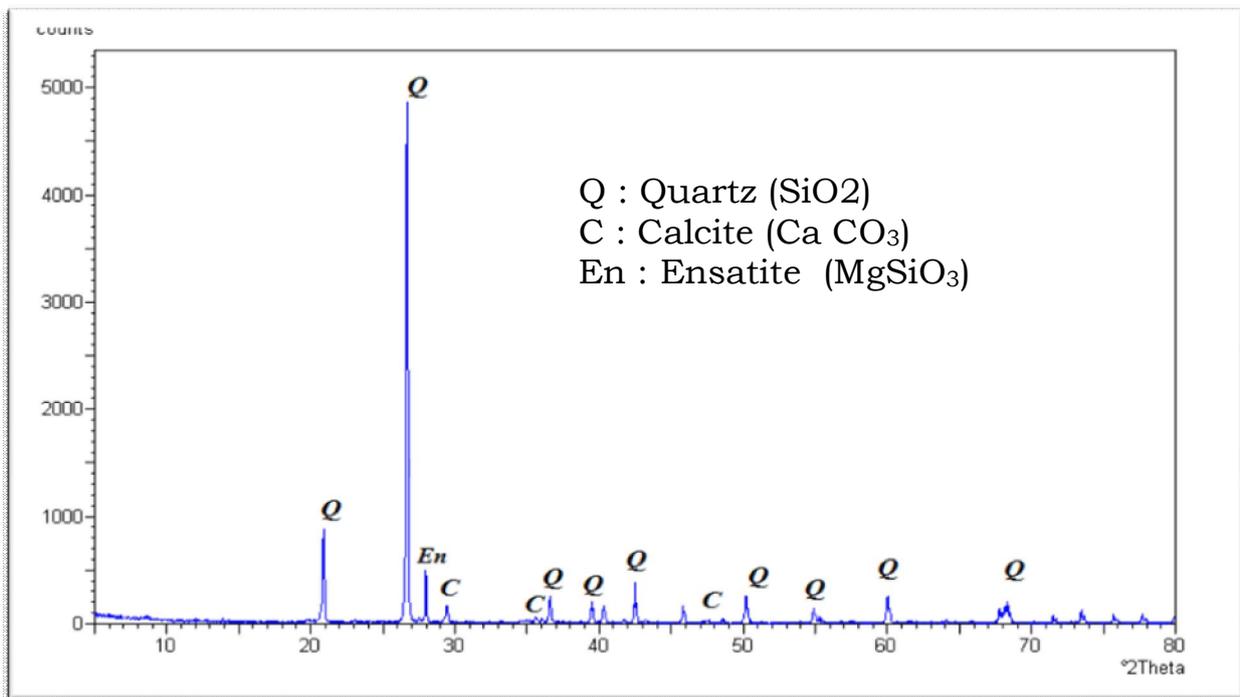


Fig. 6.9 : Diffractogramme de rayon x d'un grès rouge Mio-Plicène.

6.9-Etat de surface : Non sol (eau, végétation et ombre) :

6.9.1/Localisation : centre de la sebkha, dépressions et le lit des cours d'eau (photo : 18).

6.10-Relation entre les différents états de surfaces :

6.10.1-Relation génétique

Les états de surfaces calcaro-gréseux et gypseux sont à l'origine de la plupart des autres états surfaces par érosions éolienne où hydriques (Fig.6.10) :

Etats de surface sable éolien grossier, sable fin à moyen limoneux, sable fin gypseux blanchâtre et sols salins des dépressions et endroits fermés endoréiques.

Les états de surface caillouteux et pierreux, sablo - graveleux, limoneux présentent un tri mécanique donnant une distribution horizontale des sédiments qui se réalise d'une manière générale suivant une granulométrie décroissante. On observe ainsi le passage progressif de formations grossières aux accumulations fines de la classe des limons, cette répartition apparaît clairement de part et d'autre du lit d'oued.

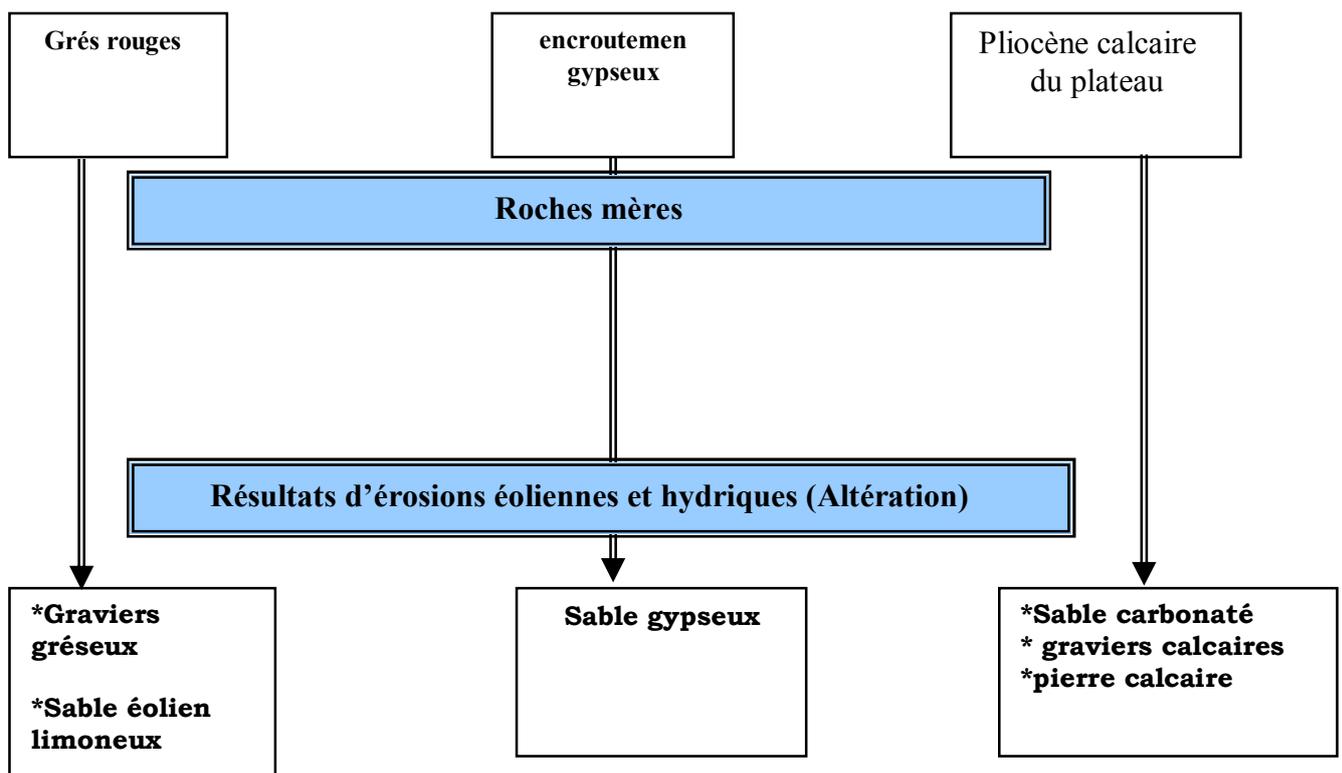


Fig. 6.10 : Représentation schématique de la relation génétique entre les états de surfaces.

6.10.2-Relation spatiale

L'état de surface de nature calcaro-gréseux correspond à toutes les formes d'affleurement du substratum géologique sur lequel se dépose les autres classes ;

L'état de surface gréseux détritique se localise généralement sur les piémonts des plateaux, résultant de l'érosion des affleurements rocheux de la classe précédente.

L'état de surface sableux correspond à toutes les formes d'accumulations éoliennes qui se trouvent généralement en position haute par apport aux autres classes.

Les états de surface gypseux correspondent à des accumulations secondaires de gypse sous forme de plaquettes et d'encroûtements et occupe généralement les parties basses du relief (roche d'origine évaporitique).

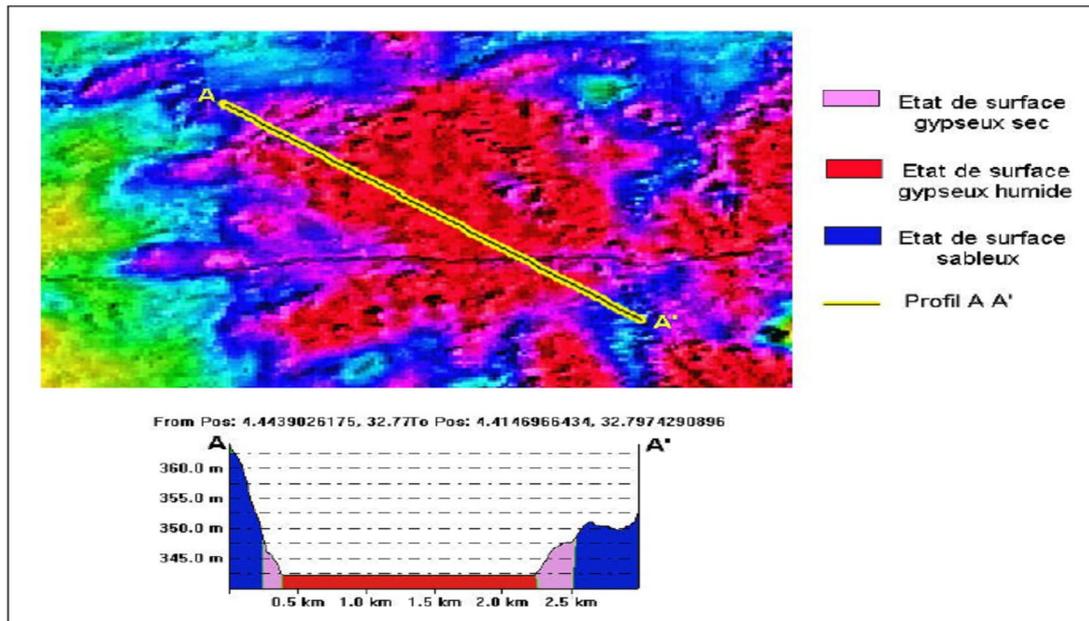


Fig. 6.11 : Profil montrant la relation spatiale entre l'état de surface gypseux sec et humide (BENDADA, 2009)

L'état de surface Limono sableux et l'état de surface à alluvions se localisent le plus souvent aux niveaux du lit d'oued et les dayas.

6.10.3-Relation chronologiques :

L'état de surface de nature calcaro-gréseux correspond à toutes les formes d'affleurement du substratum géologique sur lequel se dépose les autres classes et représente le plus ancien affleurement géologique dans la région d'étude (Mio-pliocène et pléistocène) ;

L'état de surface sableux correspond à toutes les formes d'accumulations éoliennes représente les états de surfaces les récent d'âge Quaternaire (actuel).

6.11-Conclusion :

Après toutes les opérations de généralisation cartographique, de prés traitement et traitement, de filtrage et de regroupement d'unités, on a abouti au final à neuf classes représentant les principaux états de surface de la région. Pour chacune de ces formations de surface de sol, on a alors déduit les associations minéralogiques qu'elle pouvait contenir, en s'aidant des observations de terrain, des analyses physico-chimique, géochimiques et des connaissances théoriques sur la genèse des sols en milieux arides.

L'évaluation de la classification révélée une indice Kappa de 0.9275 et une précision globale de 93,72% indique que 96,74% des pixels de l'image sont bien classés et les résultats de classification correspond presque réellement à la réalité de terrain.

En effet, la composition minéralogique des formations superficielles constitue un véritable critère de différenciation des sols, mesurable directement sur le terrain et observable par télédétection, ainsi que l'ont montré de nombreux auteurs tels que Escadafel (1998), Girard (1999), Hamdi aissa et Girard (2000), cités dans ses travaux.

A la fin nous avons abouti à une esquisse cartographique sur laquelle le géologue et le pédologue et d'autres spécialistes pourra s'appuyer pour localiser et délimiter les grands ensembles géologiques pédologiques de surface.

La précision des données dont on dispose ne permet pas sur certaines unités d'aller très loin dans la différenciation des types de sols susceptibles de s'y développer. Pour obtenir plus de détails, il reviendra aux chercheurs d'utiliser des images de forte résolution, d'effectuer des prospections de terrain plus détaillées et réaliser des analyses plus précises, pour mieux définir la nature minéralogique et géochimique de sol à l'intérieur de chacun des états de surfaces. Les informations provenant de l'image satellitale sont très intéressantes pour différencier les sols et de les visualiser sur de vastes unités géologiques, quoique, les images satellitales dont on dispose pour cette étude, ont une faible résolution (30*30m).

Enfin, la comparaison des résultats d'analyses de laboratoire et de la télédétection montre un accord très significatif et une forte corrélation entre les résultats obtenus de deux méthodes.

CONCLUSION GENERALE :

Les résultats acquis dans le cadre de cette étude proviennent non seulement de l'interprétation des images satellites mais aussi de tests et analyses effectués sur les différents états de surface retenus ce qui nous a permis de résulter une forte relation entre la réflectance et les caractéristiques physico-chimiques de sol nu telles que la composition minéralogique, la géochimie, la texture, la rugosité, la couleur et l'humidité.

Ce travail montre que la composition minéralogique et géochimique des sols est une information non négligeable pour caractériser et discriminer la nature des sols par télédétection ce qui apparaît clairement dans la différence entre les réponses spectrales des sols gypseux et sols sableux (états de surface salins et gypseux et états de surface sableux).

Notre choix s'est orienté directement vers l'utilisation des images satellitaires du capteur ETM+ de Landsat7, car il répond le mieux à nos besoins par ses qualités de perception, sa finesse de résolution spatiale et spectrale. Ce qui permet de bien couvrir notre région d'étude qui s'étend sur une superficie de 259872.5 Ha.

Le traitement numérique a permis de subdiviser notre région d'étude à partir de la classification non supervisée des trichromies (TM1 TM4 TM7) et (ACP1 4/7 1/7) en un certain nombre de classes radiométriques.

En effet nous avons opté pour un échantillonnage systématique de telle sorte que chaque classe radiométrique soit étudiée sur terrain dans les zones où paraissent la plus nettement et la plus représentative possible.

La localisation géographique précise par GPS de ces zones tests a facilité l'identification de chaque classe sur le terrain et la validation de la classification non supervisée et en fin la réalisation de la carte finale des sols et l'identification de neuf (09) états de surface de sol.

L'interprétation thématique des signatures spectrales des classes cartographiées a été basée sur l'influence de divers facteurs : couleur, rugosité, teneur en calcaire, humidité et texture et structure de surface.

Quelques traits se dégagent :

- La réflectance augmente pour les sols clairs.
- La réflectance augmente lorsque l'ombre diminue (la rugosité de surface) et vice versa :
- La réflectance augmente en fonction du taux de calcaire et minéraux claires.

En effet le comportement spectral des classes observées, résulte le plus souvent de l'interaction de ces divers facteurs (couleur, rugosité, humidité...etc.).

Ainsi, certaines longueurs d'onde étant liées plus spécifiquement aux constituants, ils ont pu mettre en évidence une relation directe entre la

CONCLUSION GENERALE

réflectance et la composition minéralogique des sols telle que le B1, B3, B7 et ratio B1/B7.

Dans l'infrarouge moyen réflectif, le comportement spectral des sols est fonction de leur humidité : les sols secs ont des valeurs de réflectance plus fortes que lorsque sont humides.

Dans le domaine du proche infrarouge, il est facile d'obtenir une discrimination des sols en raison de leurs propriétés physiques se qui se traduisent par des valeurs de réflectance différentes.

Grâce au choix des traitements réalisés, il n'existe pas de beaucoup de confusion radiométrique des thèmes ; le coefficient kappa montre une précision globale de l'ordre de 93,72% et indique que 96,74% des pixels de l'image sont bien classés.

La démarche de recherche utilisée dans cette étude et les résultats obtenus peut être extrapolés à d'autres régions similaires où les relations climat /composition de surface de sol sont équivalentes.

Cependant, il serait également intéressant, pour un futur travail de recherche :

1-de développer une relation teneur en sels-réflectance comme signe indirect de salinisation des terrains de région test.

2-de déterminer les spectres des sols sur le terrain au moyen d'un spectroradiomètre portable (0,4 - 2 pm) placé dans des conditions de mesure proches de celles des capteurs de la télédétection spatiale, comme le préconise Escadafal (1993).

En fin la carte finale des sols montre qu'il existe des forts risques d'érosion des zones hautes, d'ensablement des zones basses et salinisation des espaces proches de sabkha. A cet effet, il est important de prendre des décisions pour éviter les pertes continues des terres de la région.

Références bibliographiques

AUBERT G., 1978. Relation entre le sol et cinq d'éricacées dans le Sud Est de la France. *Oecol. Plant.* 13(3).

AUMASSIP., G., FERHAT., N. 2002. Le quaternaire dans le sahara algerien. *Mém. Serv.Géol.Alg.n°11* pp.195-206, 2002.

AUMASSIP., G., DAGORNE, A., ESTORGES, P., LEFEVRE-WITIER, PH., MAHROUR, M., MARMIER, F., NESSON, C., ROUVILLOIS-BRIGOL, M., & TRECALLE, G. 1972. Aperçu sur l'évolution dupaysage Quaternaire et le peuplement de la région d'Ouargla. *Lybica*, Tome xx, 206-256.

BALLAIS J.L. (2010) - Des oueds mythiques aux rivières artificielles : l'hydrographie du bas-sahara algérien – *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, 2010, volume IV., p. 118.

Baret., F., Jacquemoud, S., 1994. Modeling canopy spectral properties to retrieve biophysical and biochemical characteristics. In: *Imaging Spectrometry - a Tool for Environmental Observations*, 4. edited by Hill, J. and Mégier, J. Kluwer Academic Publishers, Brussels, pp. 145-167.

BASTOS., 1989. Inventaire du couvert végétalà l'aide des données satellitaires et exogène. *Memoire DEA*. Toulouse.

BEK, R. H., ROBINSON, B.F., MCFEE, W. H., & PETERSON, J.B., 1976. INFO NOTE 081176. Lab applic. Remote sensing. Purdue University, West Lafayette, Indiana; cite par Baumgardner et al. (1985): reflectance of soils .*Adv. in agronomy*, 38:1-44.

BENCHALLAL., A, OUKIL. , A, BELHADJ-AISSA., A (2009). Identification et détection, par imagerie satellite, de la dégradation des sols par la salinité dans la cuvette de Ouargla, sud Algérie. *JAS09 de l'AUF Alger* Novembre 2009.

BENDADA., M, 2010 : Cartographie des états de surface des sols par télédétection cas du bassin versant d'oued zegrir. *Mémoire de magister*, P.102.

BENDALI F., EL HOUMROUI A., 1986. Caractéristiques physico-chimiques des sols de déflation et d'accumulation, séminaire IRAT Tunis 24-29 novembre.

Big n°3. Initiation à la télédétection. *Bulletin de l'Information Géographique appliquée aux activités de Recherche-Développement*.
http://www.cnes.fr/automne_modules_files/standard/public/p7774_9f5e71f0025c698de2ef82085d1c0e20big_3.pdf.

BONNARD & GARDEL. (2004) : Etude d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation. Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. *Mission II, rapport final*, 110p.

BOWERS S. A. & HANKS R. J., 1965. Reflection of radiant energy from soils. *Soil Science*, 100 :130-138.

BUSSON., G ,1957-1965 : Carte géologique du bassin Mésozoïque du Sahara Algéro-Tunisien au 1/2000.000 (J.).

BUSSON., G. 1970 : Carte géologique du bassin mésozoïque du Sahara algéro-tunisien et de ses abords.

CAMPBELL., N.A., DE BOER, E.S., & HICK, P.T., 1987. Some observations on crop prol modelling. *International Journal of Remote Sensing*, 8(2):193-201.

CAPOT-REY R., (1952). Les limites du Sahara français. Ed: Inst. Rech. Sah., Alger.Tome VIII. pp. 23-47.

CASTANY, G. 1982. Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Ed : DUNOD, Paris, 233p.

CHEHMA A. (2002): Etude floristique et nutritive des parcours camelins du sahara septentrional algérien cas des régions d'Ouargla et Ghardaia. Thèse doctorat ; Uni. De Annaba, 04-23p.

CHOROWICZ, JEAN ET DEROIN, JEAN-PAUL, 2003. La télédétection et la cartographie géomorphologique et géologique. Éditions scientifiques GB (Contemporary Publishing International), Paris, xviii 141 p. *Revue Géographie physique et Quaternaire*, Volume 57, numéro 1, 2003, p.109-110.

CHRISTENSEN., P.R., BANDFIELD, J.L., HAMILTON, V.E., HOWARD, D.A., LANE, M.D., ET AL., 2000. A thermal emission spectral library of rock-forming minerals. *J. Geophys. Res.*, 105(E4):9735-9739.

COLEMAN, T. L., AGBU, P. A., MONTGOMERY, O. L., 1993. Spectral differentiation of surface soils and soil properties: is it possible from space platforms? *Soil Science*, 155 (4), 283-293.

CONRAD., 1969 : l'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien Paris : CNRS Sér. Géol., 10 1969.527 P.

COOKE, R.U., WARREN, A. & GOUDIE, S.A. 1993. Desert geomorphology. Ed. UCL, London, 526p.

CORBANE,C., 2006 :Reconnaissance des états de surface en milieu cultivé méditerranéen par télédétection optique à très haute résolution spatiale .. Thèse doctorat ; Uni. MONTPELLIER II, LAUGUEDOC.P 27-39.

COUDE-GAUSSEN., G.1991.les poussières sahariennes, cycle sédimentaire et place dans les environnements et pléoenvironnements désertiques .John libby, Paris, 485p.

COURAULT D., 1989. Etude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection. *Revue sols n° 17 INA Paris Grignon*.

COURAULT., D.1989. Etude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection. Analyses spectrales, spatiales et diachroniques. Thèse INA-PG, 239p.

CRESSWELL, H, P., PAINTER, D, J., & CAMERON, K.C., 1993. Tillage and water content effects on surface soil hydraulic properties and shortwave albedo. *Soil Sci soc Am J*.57:816-824.

DAOUD Y. ET HALITIM A., 1994. Irrigation et salinisation au Sahara Algérien. *Sécheresse*. 5(3). pp151-160.

DE JONG., S.M., 1992. The analysis of spectraloscopical data to map soil types and crusts of Mediterraneane eroded soils . *soils technology*, 5:199-211.

DELACOURT C., Télédétection et Rayonnement ElectroMagnétique. Cours en Ligne, Université de Brest. http://perso-sdt.univ-brest.fr/~delacour/COURS/M2-0.1/Cours1_Teldet_REM/index.html.

DERRUAU M., (1967) : Précis de géomorphologie. Ed : Masson, Paris. 415 pages.

DUBIEF .J, 1953 : Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Edition service des études scientifiques, Alger.

DUTIL. P, 1971 : Contribution a l'étude des sols et des paléosols du Sahara. Thèse de doctorat.

EL QAYEDY. J., TAJ-EDDINE. K., BONN. F., CHIKHAOUI. M., WITAM., O (2006). Caractérisation lithologique du haut atlas Marocain à l'aide des données d'aster et de Mesures spectrales de terrain. *Télédétection*, 2006, vol. 6, n° 2, p. 153-175.

Erdas Field Guide., fifth edition Erdas .ENC. 1999, Erdas Imagine tour guide leica geosystems., LLC. 2006) . P. 766.

ESCADAFAL R., POUGET M., 1986. Luminance spectrale et caractères de surface des sols en régions méditerranéenne (Sud Tunisien) *ITC Journal*, n°1P-19-23.

ESCADAFAL. R, 1989 : Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection, applications : Exemple de la région de TATAOUINE, TUNISIE. Etudes et thèses, éditions de l'ORSTOM. PARIS.

ESCADAFAL., R., 1994. Soil spectral properties and their relationships with envirommental parameters -exemples from arid regions. In *imaging Spectrometry- a Tool for Envirommental observations*, 1, Ed.Hill, J., & Mégier, J., Euro Courses, Remote sensing, Vol. 4, Brussels: Kluwer Academic Publishers, p. 71-87.

ESTIENNE P. et GODARD A.,(1970) : Climatologie. Ed : Armand colin. Paris.

FABRE. J, 1976 : Introduction a la géologie du Sahara Algérien. S.N.E.D, ALGER.

GADDAS. F, 2001 : Proposition d'une méthode de cartographie des pédopaysages. Application à la moyenne vallée du Rhône. Thèse de doctorat. INA PARIS. GRIGNON.

GERBERMANN (A.H.), NEHER (D.D.), 1979. Reflectance of varying mixtures of clay soil and Sand. *Photogramm. Eng. Rern Sens.*, 45 (8): 1145-1151.

GHRAM-MESSEDI., A, DELAITRE., E, (2007). Les états de surface en zone aride à partir d'indices radiométriques et de classifications multitemporelles d'images Landsat

TM prises sur la région de Menzel Habib (Tunisie méridionale). *Sécheresse* 2007; 18 (4): 305-13.

GIRARD., M- C, GIRARD. C- M, 1999: Traitement des données de télédétection. Dunod, PARIS.

GOLDSHLEGER, N., BEN-DOR, E., BENYAMINI, Y., AGASSI, M., & BLUMBERG, D.G., 2001. Cracterization of soil's structural crust by spectral reflectance in the SWIR region (1.5-2.5Um) .*Terra Nva*, 13(1): 12-17.

GOLDSHLEGER, N., BEN-DOR, E., BENYAMINI, Y., BLUMBERG, D.G., AGASSI, M., & 2002. Spectral properties and hydraulic conductance of soil crusts formation by raindrop impact. *International Journal of remote sensing* 23:3909-3920.

HAMDI-AISSA, B. 2001. Le fonctionnement actuel et passé des sols du Nord Sahara (cuvette d'Ouargla). Approche micromorphologique, géochimique et minéralogique et organisation spatiale. Ph .D dissertation, Institut National Agronomique, Paris Grignon, 307p.

HAMDI- AISSA. B, GIRARD. M-C, 2000 : Utilisation de la télédétection en régions sahariennes pour l'analyse et l'extrapolation spatiale des pédopaysages. *Science et changements planétaires \Sécheresse* .Vol 11, N°3.

HAMEL, A., 1988. Etude géologique des grès Triasiques du gisement pétrolier de Hassi R'mel (Algerie) caractérisation, extension et milieu de dépôt . L'U.F.R.des sciences et techniques de l'université de FRANCHE-ECOMTE.france. 243p.

HENDERSON., C. R. 1976. Signature extension using the masc algorithm .*IEEE Transaction oe Geosciences and électronique*, 14(1):34-37.
Images satellitaires du capteur ETM+ de landsat 7: Scène N° : P 194 r 037.

IRONS, J.R., CAMPBELL, G,S., NORMAN, J.M., GRAHAM, D.W., & KOVALICK, W. M., 1992. Prediction and measurement of soil bidirectional reflectance. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 30 :249-260.

KARMANOV (I.I.). 1970. Stud of soil from the spectral composition of reflected radiation. *Soviet SO P Science*, 4: 226-238.

KILLIAN., CH.1922.Essai de synthèse de la géologie du Sahara sud-costentinois et du Sahara central. C.R.XII cong. Intern. Bruxelles, fac. II,887-945.

KING C., 1985.Etude de sols et des formations superficielles par Télédétection. Thèse, INA, Paris Grignon.

KING, C., BAGDADI, N., LECOMTE, V., & CERDAN, O., 2005A. the application of remote sensing data to monitoring and modelling of soil erosion. *Catena*, 62(2-3) : 79-93.

KING, C., LEFEBVRE-D'HELLEN COURT, T., 1982. La réflectance de sols en place, étude de l'influence de certaines caractéristiques propres à la surface du sol nu. *International Symposium of the ISPRS, Commission 7 Symposium, Toulouse, France*, pp. 305.

KOUDA M., 1981. Analyse synchronique et diachronique de l'évolution de la végétation en zone semi-aride (Haute volta), par télédétection. Thèse de Doctorat troisième cycle. Toulouse, 1981. 143 p.

KRISHNAN (P.), ALEXANDER (J.D.), BUTLER (B.J.), HUMMEL (J.W.), 1980. Reflectance technique for predicting soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am J.* 44 (6):1282-1285.

LARGOUËT., C., & CORDIER, M.O., 2000. Timed automata model to improve the classification of a sequence of image. "ECAI'00". Berlin, Allemagne, p.156-160.

LATRECH, D. 1997. Eaux et sols d'Algérie. Ed.: A.N.R.H., Alger, 60p.

LEGER (R.G.), MILLE'ITE (G.J.F.). CHOMCHAN (S.), 1979. The effect of organic matter, iron oxides and moisture on the colour of two agricultural soils of Quebec. *Can. J. Soil Sci.* 59: 191-202.

LELIEVER., R.F. 1969. Assainissement de la cuvette d'Ouargla. Ministère des travaux publics et de construction, rapports géohydraulique n°2, 18p ;n° 3, 84p.

LEU (D.T.), 1977. Visible and near infrared reflectance of beach sands. A study on the spectral reflectance grain size relationship. *Remote Sens. Environ.* 6:169 18.

LILLESAND., T. M. & KIEFER R. W., 2000. Remote Sensing and Image Interpretation, New York, Wiley, Ghichester England,750 p.

Meddi, M., & Meddi, H. 1998. Etudes des pluies annuelles et journalières dans le Sahara algérien. *Sécheresse*, 9, 193-200.

MELVILLE (M.D.), ATKINSON (G.), 1985. Soil colour: its measurement and its Designation in models of uniform colour space. *J. Soil Sci.*, 36: 495-5 12.

MONOD, T. 1992. Du désert. *Sécheresse*, 3(1), 7-24.

MONOD., T. 1973. Les déserts. Ed.: Horizons de France, Paris, 247 p.

NEZLI., I.E, ACHOUR., S, DJABRI.,L. 2007. Approche géochimique des processus d'acquisition de la salinité des eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de l'oued M'ya (Ouargla). *Larhyss /Journal n°06*, Décembre 2007.

ONM., (1994-2004) : Bulletins climatologiques de la station d'Ouargla. Service archives. Ouargla, Algérie.

OSS., (2003) : Système Aquifère du Sahara Septentrional. Volume 4 : Modèle Mathématique. Projet SASS ; Rapport interne. Annexes. Tunis, Tunisie. 229p.

PEDRO., G., 1987. Géochimie, minéralogie et organisation des sols aspect coordonnés des problèmes pédogénétiques. *Cah. OSTROM, sér.Pédol.*, vol.XXIII,n°,1987 :P169-186.

PINTY., B., VERSTRAETE, M. M., DICKINSON, R. E., 1989. A physical model for predictingbidirectional reflectances over bare soils. *Remote Sensing of Environment*, 27, 273-288.

POTTER., K., HORTON, R., & CRUSE, R.M., 1987. Soil surface roughness effectes on radiation reflectance and soil heat flux. Soil sci Soc AmJ.51:855-860.

SASSI., S. 1969. Contribution à l'étude de sebkha Tegdimene et du Chott El-Guetter. Thèse Doc. 3ème cycle., Paris.

SCHWERTMANN (V.). TEOR (R.M.), 1977. Iron oxides. 'In: Minerals in soil environment, Dixon and Weed, ed., Soil Sci. Soc. Am., Madison (USA), p. 145-180.

SHIELDS (J.A.), PAUL (E.A.), St ARNAUD (R.J.). HEAD (W.K.), 1968. Spectrophotometric measurement of soil color and its relation to moisture and organic matter. Con J. Soil Sci. 48(3): 271-280.

SHIELDS (J.A.), St ARNAUD (R.J.), PAUL (E.A.), CLAYIGN (J.S.), 1966. Measurements of soil color. Con. J. Soil Sci, 46: 83-90.

SONATRACH-CRD., : Géologie de l'Algérie. Centre de Recherche et Développement et Division Petroleum Engineering et Développement, 93p.

SONATRACH., 1971 : Carte géologique du Sahara Septentrional.

STONER, E. R., BAUMGARDNER, M. F., 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. Soil Science Society of America Journal, 45 (6), 1161-1165.

TAYLOR (RM.), 1982. Color in soils and sediments. Review. In: Proc. Int. Clay Conf., Bolo 1981, Olphen H. and Vienale F. eds., Elsevier, Amsterdam, pp.705 961

THIERRIOT, C. & MATARI, A. 1998. Peut-on parler de sécheresse au Sahara., Ed.:C.R.S.T.R.A.

UNESCO., (1972) : Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional, Rapport sur les résultats du Projet REG-100, UNESCO, Paris (1972).

LISTE DES FIGURES

Fig. 1-1 Carte de situation géographique.....	03
Fig. 1-2 La situation géographique et géomorphologique de la zone d'étude	04
Fig. 1-3 : Les Oueds de la dorsale du M'Zab	05
Fig.1-4 Coupe hydrogéologique à travers le Sahara	06
Fig.1-5 les variations annuelles des moyennes mensuelles des précipitations.....	07
Fig. 1-6 Carte en isohyètes moyennes annuelles du Sahara algérien	07
Fig.1-7 Les variations des moyennes mensuelles de température	08
Fig.1-8 les variations des moyennes mensuelles d'évaporation	09
Fig.1-9 les variations des moyennes mensuelles de d'humidité	09
Fig.1-10 les variations des moyennes mensuelles d'insolation	10
Fig.1-11 Relief de la région d'Ouargla (MNT)	12
Fig.1-12 : Coupe géomorphologique schématique Ouest-Est de la cuvette d'Ouargla.....	13
Fig.1-13 : Carte de la géologie régionale.....	14
Fig.1-14: Colonne stratigraphique synthétique du Sahara Nord-Est Septentrional.	18
Fig.1-15: la carte 3D de la géologie locale	19
Fig.1-16 Colonne stratigraphique des sondages J.10-580 et J.10-816.....	21
Fig.1-17 carte géologique de la région d'étude.....	22
Fig.1.18 Colonne stratigraphique synthétique de la région de Ouargla.....	23
Fig.1.19 Carte des affleurements de la région d'Ouargla	26
Fig.2.1 Les trois processus qui ont lieux lorsque l'énergie solaire entre en interaction avec la surface terrestre.....	27
Fig.2.2 Signatures spectrales comparées de plusieurs cibles.....	28
Fig.2.3 Géométrie d'acquisition de fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle.....	29
Fig.2.4 Ratios des réflectances entre un substrat de sol et des couches croûtées pour trois types de sols différents.....	31
Fig.2.5 Evolution du spectre de réflectance d'un sol limoneux en fonction de son humidité.....	33
Fig.3.2 Interface générale d'Erdas imagine.....	37
Fig.3.3 les étapes de traitement et d'analyse spectrale avec Erdas imagine (composante principale).....	38
Fig.3.4 Organigramme de l'étude.....	42

Fig.3.5 les étapes de réalisation d'une composition colorée avec Erdas imagine.....	46
Fig.3.6 les étapes de réalisation d'une classification non-supervisée avec Erdas.....	47
Fig.3.7 : les étapes d'échantillonnage des zone-test pour la classification supervisée avec Erdas imagine (choix des AOI's).....	48
Fig. 3.8 : les étapes de réalisation d'un profil spectral avec Erdas imagine.....	49
Fig. 3.9 : les étapes de réalisation d'une classification supervisée avec Erdas imagine (Maximun Likelihood).....	50
Fig. 5-1 Les histogrammes bi-canaux (TM5-TM4).....	80
Fig.5-2 : Les histogrammes bi-canaux (TM7-TM1).....	81
Fig.5-3 : Les histogrammes bi-canaux (TM3-TM1 et TM4-TM3).....	82
Fig.5-4 :Les courbes des signatures spectrales des différents états de surfaces de sol.....	83
Fig.5-5 : Profil spectral à travers la zone d'étude.....	84
Fig.5-6 :Profil spectral à travers la zone d'étude corrélé aux états de surfaces.....	85
Fig. 5-7 : La droite des sols de la région d'étude.....	86
Fig.5-8 : Model d'interprétation des sols sur l'image de la région d'étude.....	86
Fig. 5-9 : Model d'interprétation des sols sur l'image (GIRARD. M- C, GIRARD.C-M (1999).....	87
Fig.5-10 :Projection des états de surface de la région d'étude dans le model d'interprétation des sols de GIRARD. M- C et GIRARD. C- M, 1999.....	88
Fig.6.1:Diffractogramme de rayon x d'état de surface sables éoliens moyens à grossiers.	90
Fig.6.2 : Diffractogramme de rayon x de l'état de surface Etat de surface sables fins à moyens limoneux	91
Fig.6.3 :Diffractogramme de rayon x de l'état de surface à sable gypseux blanchâtre	92
Fig.6.4 :Diffractogramme de rayon x d'état de surface terrasse alluviale	93
Fig.6.5 :Diffractogramme de rayon X de surface croûte gypseuse polygonale	94
Fig. 6.6 :Diffractogramme de rayon x d'un encroûtement gypseux polygonale, la surface.....	95
Fig.6.7 :Diffractogramme de rayon x d'une efflorescence saline de surface.....	96
Fig. 6.8 :Diffractogramme de rayon x de l'état de surface plateau Pliocène.....	97

Fig. 6.9 :Diffractogramme de rayon x d'un grès rouge Mio-Plicène.....	98
Fig. 6-10 :Représentation schématique de la relation génétique entre les états de surfaces.....	99
Fig. 6-11:Profil montrant la relation entre l'état de surface gypseux sec et humide.....	100
LISTE DES PHOTOS	
Photo.3.1 : Diffractomètre des Rayons X sur poudre (Philips X'Pert-MPD X-ray Diffraction System)...	36
Photo 1-2 :Etat de surface sables éoliens moyens à grossiers.....	69
Photos 3-4 :Etat de surface sables fins à moyens limoneux.....	70
Photos 5-6-7:Etat de surface sables fins gypseux blanchâtres.....	71
Photos 8-9:Etat de surface terrasse alluviale.....	72
Photos 10-11:Etat de surface encroûtement gypseux (polygonale et massif.....	73
Photos 12-13 :Etat de surface sols salins humides et efflorescences salines.....	74
Photos 14-15:Etat de surface Plateau pliocène continental (Reg calcaire).....	75
Photos 16-17 : Etat de surface grès rouges Mio_pliocène.....	76
Photo 18 : Etat de surface non sol (eau, végétations et ombre).....	77
LISTE DES PLANCHES	
Planche 3.1 : Plan de position des échantillons prélevés.....	55
Planche 3-2: Résultat de l'Analyse en Composante Principale (ACP1).....	56
Planche3-3: composition colorée (b5/b7, b5/b4 et b3/b1) les minéraux composites.....	57
Planche 3-4 : composition colorée (b3, b2, b1) en couleur naturelle	58
Planche 3-5 : Résultat du Ratio b5 /b7 (les minéraux argileux).....	59
Planche 3-6 : Résultat du Ratio b4 /b3 (index de la végétation).....	60
Planche 3-7 : Résultat du Ratio 1 /7.....	61
Planche 3-8 : Résultat du de composition colorée (ACP1-Ratio 7/4 et ratio 1/7)....	62
Planche 3-9: Résultat du Ratio IR / R (b4/b3).....	63
Planche 3-10 : Résultat du Ratio b5 /b 4 (les minéraux ferrifère).....	64
Planche 3-11 : Résultat du Ratio b4-b3 /b4+b3 (NVDI).....	65
Planche 3-12 : Résultat du Ratio b3 /b1 (les oxydes de fer).....	66
Planche5.1 :Carte finale des états de surface de sol de la région d'étude.....	78

LISTE DES TABLEAUX

Tableau. 1-1 : moyennes mensuelles des précipitations.....	7
Tableau. 1-2 : moyennes mensuelles de température	8
Tableau. 1-3 : moyennes mensuelles d'évaporation.....	9
Tableau. 1-4 : moyennes mensuelles de d'humidité.....	9
Tableau. 1-5 :moyennes mensuelles de d'insolation	10
Tableau. 2-1 :Exemple de recoupement de différents critères permettant l'identification des formations lithostartigarphiques sur image	32
Tableau.3-1 :caractéristiques de l'appareil DRX	36
Tableau. 3-2 :caractéristiques du capteur Landsat.....	43
Tableau.3 -3 : caractéristiques générales de l'image utilisée	43
Tableau-3.4 :évaluation de la classification (matrice de confusion).....	53
Tableau 6-1 : Caractéristiques physico-chimiques et géochimiques Etat de surface à sable éolien moyen à grossier.....	89
Tableau 6-2 : Résultats d'analyses physico-chimiques et géochimiques Etat de surface à sables fins à moyens limoneux	90
Tableau.6-3 : Résultats d'analyses physico-chimiques et géochimiques Etat de surface à sables fins gypseux blanchâtres.....	92
Tableau6-4 : Résultats d'analyses physico-chimiques et géochimiques Etat de surface Terrasse alluviale	93
Tableau.6.5 : Caractéristiques physico-chimiques et géochimiques Etat de surface encroûtement gypseux polygonale.....	94
Tableau.6-6 : Résultats d'analyses physico-chimiques et géochimiques Etat de surface sols salins humides et efflorescences salines.....	95
Tableau.6-7 : Résultats d'analyses physico-chimiques et géochimiques Etat de surface plateau pliocène continental (Reg calcaire).....	96
Tableau.6-9 : Résultats d'analyses physico-chimiques et géochimiques Etat de surface grés rouges Mio_Pliocène.....	98

DOCUMENTATION CARTOGRAPHIQUE :

Cartes topographiques :

- Feuille de Ghardaïa au 1/ 500.000
- NH 31-3 Hassi Zirara au 1/250.000
- NH 31-4 Ouargla au 1/250.000
- NI 31-16 N'Goussa au 1/250.000

Cartes géologiques :

- Carte géologique de l'Algérie au 1/500.000 (M. Bouillon, 1951-1952).
- Carte géologique du bassin Mésozoïque du Sahara Algéro-Tunisien au 1/2000.000 (J. Busson, 1957-1965).
- Carte géologique du Sahara Septentrional (Sonatrach, 1971).

Image satellitaire du capteur ETM+ de landsat 7:

- Scène N° : P 194 r 037,