

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE EL - HADJ LAKHDAR - BATNA –
INSTITUT DES SCIENCES VETERINAIRES
ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES



THESE

Pour l'Obtention Du Diplôme De

DOCTORAT EN SCIENCES

Option

Sciences Agronomiques

Présentée par:

Mostephaoui Tewfik

THEME

**Les sols Gypseux :
Localisation et relation avec le milieu physique**

JURY:

Président

Rapporteur

Examineurs

M. BOUDOUKHA

M. BENSALD R

M. BENAZZOUZ M. T

M. HAMDI AISSA B. E

M. ZOUAOUI A.

Pr Université de Batna

Pr Université de Skikda

Pr Université de Constantine

Pr Université d'Ouergla

M.A-A Université de Batna

ANNEE UNIVERSITAIRE: 2014/2015

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord remercier tout particulièrement mon directeur de thèse et encadrant le professeur Rabah BENSALD, d'avoir accepté de diriger ce travail pour ses riches conseils et enseignements scientifiques ces suggestions ont été très stimulants et fort utiles tout au long de ce travail, et aussi pour sa disponibilité permanente en particulier lors de la relecture fastidieuse de la thèse, pour sa franchise à toute épreuve et pour toutes les discussions enrichissantes que nous avons pu avoir.

J'exprime ma reconnaissance également envers les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail sous la présidence Mr. BOUDOUKHA Pr. A l'université Hadj Lakhdar de BATNA Remerciement spécial à Mr. BENZAOUZ MT Pr. à l'université Mentouri de CONSTANTINE et Mr. ZOUAOUI A. Maître de conférences à l'université de BATNA et Mr. HAMDI AISSA Bei el Hadj prof. A université de OUERGLA pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse et je leur en suis très reconnaissant.

Un merci particulier à Mr. HALITIM A. Pr. A l'université de BATNA et DJABRI L. Pr. A l'université D'ANNABA pour leurs conseils avisés.

Je remercie particulièrement Salim KHACHAA maître assistant au département d'agronomie de l'université de BISKRA pour m'avoir ainsi permis de travailler en collaboration sans lequel le terrain aurait été beaucoup plus difficile à réaliser.

Je remercie également, DIF Amar Chargé de recherche au CNT (Arzew ORAN) et Melle CHAIB W. A. de Recherche au CRSTRA (BISKRA) et Dr. BENMESSOUD de l'université de BATNA pour les données et les informations qu'ils ont pu me fournir.

Un grand merci à tout ce que j'ai côtoyé quotidiennement au sein du CRSTRA, SACI R. BABAHNINI, S. MENADI S. Hadj SALAM H. et KHARFALLAH N. et mes anciens amis et collègues du CNTS Arzew, en particulier, à Sid Ali HASSANI, H. KEBIR, Zizou ZEBBAR, HAMMIMED A pour leur constance lors des instants de décompression et tous les autres.

Un grand merci à mon ancien collègue du CNTS et ami BENSALD A. chercheur UFR de Géographie à l' Université de Caen Basse-Normandie France.

Un merci particulier à Melles BOUDEMAGH F., et HANAFI A. et CHEREDDINE Ch. et MAKHLOUF S.

Enfin, je termine ces remerciements par ma famille: mes très chers parents et mes frères et sœurs

Un grand Merci à ma femme pour son soutien et ces encouragements et à mes enfants si cher Nassime, Anouar, Imad et ma petite princesse Aridj.

RÉSUMÉ

Bien que les sols gypseux (Gypsids pour soil taxonomy) soient reconnus comme des bons potentiels pour les cultures pluviales et les cultures irriguées si le taux de gypse n'est pas excessif dans les régions arides, sa répartition spatiale n'est pas clairement définie. Cette thèse aborde le problème de l'étude de la localisation de ces sols et la relation entre ces derniers et le milieu physique. L'approche choisie repose sur l'analyse des images de télédétection à moyenne résolution spatiale ETM+ de Landsat 7, les SIG associé aux méthodes de géostatistique et la modélisation par réseaux de neurones artificiels (ANN). La région étudiée se situe sur le sous-bassin versant d'Oued Djedi de Biskra.

Dans la mesure où il n'existe pas de consensus quant aux méthodes à utiliser, les sols gypseux de la région aride de Biskra offrent un contexte particulier, en raison de la dégradation très prononcée des sols et du couvert végétal, pour tester les méthodes existantes et en proposer des nouvelles.

L'objectif principal de ce travail est d'identifier et de localiser les sols gypseux dans une région située entre el hadjeb et oumache dans le sous bassin versant d'Oued Djedi. Pour cela, une première méthode de cartographie des états de surfaces des sols a été développée : elle est fondée sur une étude de photo-interprétation d'images issues des traitements par calculs d'indices (I. Brillance, I. Humidité, I. Salinité, I. Gypse, NDVI) et des ratios ($ETM+1/ETM+7$ et $ETM+5/ETM+7$). Cette méthode a permis de choisir la meilleure combinaison qui servira pour la suite du travail.

En parallèle, deux approches ont été testées pour localiser et cartographier les sols gypseux. La première repose sur l'analyse des réflectances exo-atmosphérique à travers un profil spectral (de 300 pixels de longueur) tracé sur la trichromie allant des piémonts du Djebel Tenia vers la dépression de sebkha Oumache, afin de déterminer la réflectance des propriétés intrinsèques et extrinsèques de ces sols. Pour discrétiser efficacement les unités de sols, leurs validations dès lors, nécessitent des relevés in situ (sondages à la tarière et des profils) sur une toposéquence de 9000 m coïncident exactement avec le profil spectral tracé sur l'image. Les observations concordent exactement avec les pics de réflectance et d'absorption du profil spectral. La deuxième utilise les classifications automatiques par pixel et orientées objet sur des images originales et indicielles de 30 m de résolution et sur des images rééchantillonnées à 15 m. Dans les deux cas, les résultats ont permis d'identifier et de localiser les sols gypseux à travers deux classes les sols gypseux à croûte et à encroûtement gypseux. Ces résultats ont été évalués par comparaison entre les images à 30 et 15 m de résolution et par validation sur terrain.

Enfin, dans la dernière étape du travail, nous avons étudié les relations entre la localisation et la distribution des sols gypseux et le milieu physique en utilisant les SIG, la géostatistique et la modélisation par les réseaux de neurones artificiels. Une campagne de mesures de 107 échantillons des taux de sels (gypse, calcaire) a été effectuée sur quatre toposéquences orientées nord – sud, du djebel Boughzal (commune d'El Hadjeb) vers la dépression endoréique (sebkha d'Oumache). L'échantillonnage pratiqué est de type mixte, où on a déterminé sur le plan morphologique la couleur, la texture, la structure, la pierrosité, la profondeur, et sur le plan analytique (la texture, le pH eau, le % $CaCO_3$, le % $CaSO_4$, la CE). L'échantillonnage a été limité aux horizons de surface (0 - 20 cm) et de profondeur (20 – 50 cm) qui présentent la plus forte variabilité de composition chimique. Ces données nous ont

fourni une quantité considérable d'informations et dont le volume ne cesse de croître. L'organisation et le stockage de ces informations dans une Géodatabase, afin d'éviter leur déperdition éventuelle d'une part, leur traitement et leur exploitation rationnelle d'autre part, étaient derrière la réalisation d'une modélisation numérique de la répartition spatiale des % de gypse. L'objectif est de déterminer l'importance et le rôle du milieu physique (pente, géologie, morphologie, nappe, etc.) dans la distribution des sols gypseux et de déterminer la variable ou les variables caractéristiques et déterminantes dans la distribution spatiale de ces formations gypseuses. Les résultats ont mis en évidence la fiabilité de ces techniques pour la localisation et la délimitation des sols gypseux. Les résultats ont amené à trois conclusions : **a)** la répartition des sols gypseux n'est pas due au hasard. L'analyse des cartes d'iso valeurs ou factorielle de distribution des concentrations des formes de gypse, dans notre région, montre une structuration spatiale très anisotrope dépendant des propriétés topographiques et de l'influence de la nappe phréatique. Cette structuration est, d'autant plus nette que l'on observe les trois grandes unités physiographiques qui constituent la région (haut, moyen glacis, plaine et dépression endoréique) ; **b)** La superposition des cartes d'isoteneurs créées avec les couvertures "pente, géologie, piézométrie de la nappe phréatique" sous SIG a démontré que les différents types de sel ont un dépôt préférentiel selon la topographie. On peut dire enfin que la topographie est considérée comme un des éléments qui conditionnent le régime hydrique des sols et que la pente a une influence sur l'écoulement hydrique d'un sol selon sa géométrie ; **c)** l'application de la classification par les réseaux de neurones artificiels (ANN) sur cette Géodatabase a défini l'ordre des facteurs prépondérant dans la distribution spatiale des sols gypseux à savoir Altitude et la piézométrie.

Mots clés : sols gypseux, localisation, télédétection, milieu physique, SIG, Géostatistique, ANN.

ABSTRACT

Although gypsum soils (gypsid) are recognized as good potential for rainfed and irrigated crops when the rate of gypsum is not excessive and the gypsum has an influence on the dynamics of vegetation in arid regions, its spatial distribution is not clearly defined. This thesis addresses the problem of the study of the location of these soils and the relationship between them and the physical environment. The chosen approach based on the analysis of remote sensing images on medium spatial resolution Landsat 7 ETM +. The study area is located in the Oued Djedi watershed of Biskra.

Insofar as there is no consensus on the methods to be used, gypsum soils of the arid region of Biskra offer a particular context, because of the very pronounced degradation.

The main objective of this work is to identify and locate the gypsum soils in an area between el Hadjeb and Oumache in sub Oued Djedi basin. For this, a first method for mapping soil surface states has been developed: it is based on a study of photo-interpretation of images resulting from treatments by calculations of indices (BI, HI, SI, GYI, NDVI) and ratios (1/7, 5/7). This method helped to choose the best combination to be used for further work.

In parallel, two approaches have been tested to locate and map the gypsum soils. The first is based on the analysis of the exo-atmospheric through a spectral reflectance profile (300 pixels in length) traced on the trichromacy from the foothills of Jebel Tenia to Depression sebkha Oumache in order to determine the reflectance of intrinsic and extrinsic properties of these soils. Thus, to effectively discretize soil units, their validations henceforth, require in situ records (auger surveys and profiles) on a toposequence of 9000m correspond exactly to the spectral profile drawn on the image. The observations comply exactly with the peaks of reflectance and absorption of the spectral profile. The second uses the automatic classification by pixel and object-oriented on original and index images of 30m resolution and image resampled to 15m. In both cases, gypsum soils with crust and gypsum crust. These results were evaluated by comparing the images at 30 and 15 m of resolution and through field validation.

Finally, in the last stage of work, we have studied the relationship between the location and distribution of gypsum soils and the physical environment using GIS, geostatistics and modeling by artificial neural networks. A monitoring programme of 107 samples of the salts ratios (gypsum, limestone) was performed on four toposequences oriented to North-South, Jebel boughzal (municipality of El Hadjeb) to the endorheic depression (sebkha of Oumache). The practiced sampling is mixed type, which was identified analytically (texture, water pH, CaSO_4 , the EC). The sampling was limited to surface horizons (0-20 cm) and depth (20-50 cm), which have the highest variability in chemical composition. These data have provided a considerable amount of information and the volume continues to grow.

Organizing and storing this information in a geodatabase to avoid their possible loss on the one hand, their processing and rational exploitation on the other, were behind the realization of a numerical modeling of the spatial distribution of % gypsum. The objective is to determine the importance and role of the physical environment (slope, geology, morphology, water, etc) in the distribution of gypsum soils and identify the determining characteristics of variables and in the spatial distribution of gypsum formations. The results showed the reliability of these techniques for the location and boundaries of gypsum soils. The findings led to three conclusions: **a)** The distribution of gypsum soils was not taken for granted. The factor analysis of isovalues depicted on maps of the distribution of concentrations at gypsum forms in our region, shows a very anisotropic spatial structure depending on topographical properties and the influence of the water table. Such structuring is even more clear that we observe the three major physiographic units which constitute the region (high, medium glaze, plain and endorheic depression); **b)** Superimposing created with isotenor on maps "slope,

geology, piezometry , the water table " under GIS demonstrated that different types of salt have a preferential deposit according to topography. Finally we can say that the topography is considered one of the elements that affect the soil water regime and the slope has an influence on the water flow of a soil according to its geometry; c) The application of the classification by artificial neural networks (ANN) to this geodatabase which defined the order of an overriding factors in the spatial distribution of soil gypsum namely altitude and piezometry.

Keywords: gypsum soils, location, remote sensing, physical environment, GIS, geostatistics, ANN.

ملخص

رغم أن الأراضي الجبسية، معروفة بكونها أراض خصبة في الأراضي الماطرة، وفلاحة السقي، إذا لم يكن معدل الجبس عالياً، وامتلاك الجبس تأثيراً على ديناميكا نباتات المناطق الجافة، إلا أن فضاء توزيعه ليس معروفاً بعد. هذه الأطروحة تتعرض لموضوع تحديد مناطق انتشار الجبس، وعلاقة هذا الأخير بالوسط الفيزيائي. المقاربة التي اخترناها تتمحور حول تحليل الصور الفضائية ذات الإشعاع الفضائي المتوسط ETM+ LANDSAT 7 المنطقة المدروسة تقع في الحوض السفلي لمنطقة وادي الجدي. وبما أنه لا توجد مناهج دراسة متفق عليها، فإن الأراضي الجبسية لمنطقة بسكرة، تمنحنا مساراً مميزاً، بسبب التدهور المتقدم للأراضي والغطاء النباتي، من أجل اختبار الطرق المتوافرة، واقتراح طرق أخرى. الهدف الرئيس لهذا العمل هو التعرف على الطرق الجبسية وتحديداتها، في منطقة تقع بين الحاجب وأوماش، في الحوض السفلي لوادي الجدي. من أجل هذا، تطلب الأمر دراسة أولية للخرائط المتعلقة بالمساحات المعنية والتي تم تطويرها: تعتمد على دراسة للصور التوأيلية للأراضي، منبثقة من تحليل المؤشرات والعلاقات التالية (IBH هذه الطريقة ساعدتنا على انتقاء أفضل تركيبة لأجل إتمام العمل. (IH, IS, IGY, NVDI, 1/7, 5/7). بالمقابل، فقد افترضنا وجود مقاربتين لاختبارهما من أجل تحديد الأراضي الجبسية والتخطيط لها. الأولى تعتمد على تحليل العاكسات الخارجة عن الغطاء الجوي، عبر رسم واجهة طيفية (300 بيكسل طولاً) التي تم تعقبها على سفوح جبل أل تينيا، حتى انحدار سيخة أوماش لتحديد الانعكاس من الخصائص الداخلية والخارجية لهذه الأتربة. من أجل معرفة خصائص الأتربة بشكل ناجع، والمصادقة عليها فإن الأمر يتطلب دراسات استقصائية للموقع (الدراسات الاستقصائية للملامح) على إحداثيات طبوغرافية تبلغ 9000م تتطابق تماماً مع الملمح الطيفي المسطر سلفاً على الرسومات التخطيطية. الملاحظات تتفق تماماً مع انعكاس الذروة وامتصاص الملمح الطيفي. الثانية، تستعمل التصنيف التراتبي الموجّه بالبيكسل، على صور أصلية وذات مؤشر حلّ يصل إلى 30متراً وصورة الوصله إلى 15 م. في كلتا الحالتين، الأتربة الجبسية والقشور الجبسية. تم تقييم هذه النتائج من خلال مقارنة الصور في 30 و 15م. تم التحقق بعدها في المرحلة النهائية من العمل، عبر دراستنا للعلاقة بين المواقع المحددة وتوزيع الأتربة الجبسية عبر استخدام نظم المعلومات الجغرافية والجيولوجيا والنمذجة بواسطة الشبكات العصبية الاصطناعية. تم تنفيذ سلسلة من القياسات على عينة من 107 نموذجاً من مستويات الملمح (الجبس والحجر الجيري) على أربعة صور طبوغرافية موجهة من الشمال إلى جنوب جبل بوغزال (بلدية الحاجب) عبر انحدار (سيخة أوماش). العينة المنتقاة ذات طبيعة مزدوجة، تم تحديدها من الناحية التحليلية (النسيج، الرقم الهيدروجيني للمياه، الـ CaSO4، EC). تم تحديد العينة على مسافة بين (0 إلى 20 سم) وعمق (20-50 سم)، والتي تمثل أكبر تعدد للتغيرات الكيميائية. هذه المعطيات منحنتنا كمية معتبرة من المعلومات، والتي لم تكف عن التكاثر وتوزيع وتنظيم تلك المعلومات ضمن قاعدة بيانات جغرافية، حتى نتجنب احتمال ضياعها من جهة، معالجتها، واستغلالها بشكل راشد من جهة أخرى، كانت وراء تأسيس نموذج رقمي للتوزيع الفضائي لـ %، للجبس. الهدف هو التعريف بأهمية الوسط الفيزيائي (الانحدار، الجيولوجيا، المورفولوجيا، المنبع... إلخ)، ضمن توزيع الأراضي الجبسية، وتحديد المتغيرات المميزة والمحددة في التوزيع الفضائي لهذه المعلومات. المعلومات التي تحصلنا عليها أظهرت وثوقيتها تجاه الموقع وحدود التربة الجبس. وأدت النتائج إلى ثلاثة استنتاجات: أ) توزيع تربة الجبس لا يعود للصدفة، تحليل قيم الخرائط - المتساوية القيمية أو عامل توزيع تركيز أشكال الجبس، في هذه المنطقة، يظهر هيكلًا مكانيًا متباينًا خواص بالخصائص الطبوغرافية التابعة لتلك المنطقة وتأثير المياه الجوفية. هذا الهيكل يتجلى أكثر وضوحاً بحيث يسمح لنا برؤية الثلاث تشكلات للمنطقة (عالية، متوسطة الصقيل، والهضبة المنحدرة الخرائط المتساوية القيمة التي تم إنشاؤها باستخدام البانومات "المنحدر، الجيولوجيا، لبزومتري للمياه الجوفية تحت، والتي أوضحت أن لمختلف أنواع الأملاح ترسبات تفضيلية من تضاريس حسب الطبوغرافيا. يمكننا أن نقول أخيراً بأن الطبوغرافيا تعدّ أحد العناصر المهمة التي تحدّد الشروط الهيدروليكية للأتربة، وأن المنحدر له تأثير على السيلان الهيدروليكي للأرضية، حسب هندسياتها. ج)، تطبيق التصنيف حسب الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) على هذه القاعدة الجغرافية للمعلومات، أدى إلى التعريف بنظام العوامل المؤثرة المتعلقة بالتوزيع الفضائي للأراضي الجبسية، على مستوى الإرتفاع والبزومتريّة.

كلمات مفتاحية: أرضية جبسية، تحديد، الاستشعار عن بعد، وسط فيزيائي، نظم المعلومات الجغرافية، الإحصاء الجغرافي، العصبية الاصطناعية.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	i
RÉSUMÉ.....	ii
ABSTRACT.....	iii
RESUME EN ARABE.....	iv
TABLE DES MATIÈRES.....	v
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vii

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

1 LA REGION D'ETUDE.....	10
1.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	10
1.2 SITUATION TOPOGRAPHIQUE.....	10
1.3 CADRE CLIMATIQUE.....	11
1.3.1 Précipitations.....	11
1.3.2 Régime saisonnier.....	13
1.3.3 Températures.....	13
1.3.3.1 Indice de continentalité.....	15
1.3.4 Humidité relative.....	15
1.3.5 Le Vent.....	16
1.3.6 Diagramme pluviométrique.....	17
1.3.7 Climagramme d'EMBERGER.....	18
1.4 Géologie générale de la région.....	20
1.4.1 Les principales unités structurales des Ziban.....	20
1.4.2 Stratigraphie de la région d'étude.....	20
1.4.2.1 La géologie de la région.....	20
1.4.2.1.1 Coupes géologiques.....	22
1.4.2.1.2 Quaternaire.....	22
1.4.2.1.3 Miocène.....	22
1.4.2.1.4 Paléogène (nummulitique).....	23
1.4.2.1.5 Crétacé.....	23
1.5 Tectonique.....	24
1.6 Hydrologie de la région.....	24
1.7 Synthèse des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de la région.....	25
1.7.1 Nappe phréatique du quaternaire.....	26
1.7.2 Nappe profonde.....	26
1.7.2.1 Nappe des calcaires.....	27
1.7.2.2 Nappe des sables.....	27
1.8 Le drainage de la région d'étude.....	27
1.9 Géomorphologie de la région d'étude.....	28
1.9.1 Les formes d'érosion.....	28
1.9.1.1 La combe du Djebel Bou Rhezal.....	28
1.9.1.2 Les chevrons.....	28
1.9.1.3 Les cônes de déjection.....	28
1.9.1.4 Les glacis.....	28
1.9.1.5 Les escarpements d'érosion.....	28
1.9.1.6 Les accumulations de sable.....	28

1.10 Relief.....	29
1.11 Contexte pédologique des ziban.....	29
1.11.1 Classification des sols.....	30
1.12 Les formations végétales.....	30
1.13 CARACTERISTIQUES AGROS PEDOLOGIQUES.....	31
1.14 LA SALINITE DANS LE ZAB EL GHARBI.....	32
2. CONCLUSION PARTIELLE.....	33

PARTIE II SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I. LA NOTION DU GYPSE & DES SOLS GYPSEUX

1 LE GYPSE : ELEMENT ET MINERAL.....	34
1.1 MINERALOGIE DU GYPSE.....	35
1.2 PETROGRAPHIE DU GYPSE.....	35
1.3 PROPRIETES PHYSIQUES DU GYPSE.....	35
1.4 STRUCTURE CRISTALLINE DU GYPSE.....	35
1.5 CARACTERISTIQUES ET PROPRIETES DU GYPSE.....	38
1.6 STRUCTURE ET COMPOSITION.....	38
1.7 PROPRIETES CHIMIQUES.....	39
1.7.1 Solubilité et processus de dissolution du gypse.....	39
1.7.1.1 Solubilité dans l'eau pure.....	40
1.7.1.2 La solubilité du gypse dans les solutions salines.....	40
1.7.2 Processus de dissolution.....	42
1.7.3 Propriétés thermiques.....	43
1.7.3.1 Processus de déshydratation et réhydratation.....	43
1.7.4 Interaction gypse-carbonate de calcium.....	44
2 LES SOLS GYPSEUX.....	45
2.1 Genèse des sols gypseux.....	46
2.2 Le dépôt du gypse.....	47
2.2.1 Dépôts pédogénétique.....	47
2.2.2 Dépôts géogénétique.....	47
2.3 Origines des sols gypseux.....	48
2.3.1 Origine de nappes.....	48
2.3.2 Origine lagunaire.....	49
2.3.3 Origine éolienne.....	49
2.4 Caractéristiques.....	49
2.4.1 Propriétés physiques.....	49
2.4.1.1 Texture.....	49
2.4.1.2 Structure.....	50
2.4.1.3 Porosité.....	50
2.4.2 Propriétés chimiques des sols gypseux.....	50
2.4.2.1 Conductivité électrique.....	50
2.4.2.2 pH.....	51
2.4.2.3 Capacité d'échange cationique.....	51
2.4.2.4 Composition du complexe absorbant et de la solution du sol.....	51
2.5 Les formes d'accumulation du gypse dans le sol.....	51
2.6 Répartition spatiale des sols gypseux.....	53
2.6.1 Distribution des sols gypseux dans le monde.....	53
2.6.2 Distribution des sols gypseux en Algérie.....	55
2.7 Classification des sols gypseux.....	56
2.7.1 La classification Française.....	56

2.7.2	Classification Américaine.....	57
2.7.3	Classification FAO.....	57
2.8	Effet du gypse sur le sol et la végétation.....	57

CHAPITRE II. L'EVOLUTION DE LA CARTOGRAPHIE DES SOLS : DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION.

2.	INTRODUCTION.....	60
2.1	L'EVOLUTION DE LA CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION.....	60
2.2	LA GEOMATIQUE ET LES ATOUTS DE LA TELEDETECTION.....	61
2.2.1	La Géomatique.....	61
2.2.2	Les atouts de la télédétection.....	61
2.2.2.1	Le passage de la cartographie des sols des méthodes classiques a la télédétection ..	62
2.2.2.1.1	L'approche cartographique classique.....	63
2.2.2.1.2	L'approche par télédétection.....	64
	Facteurs de la variation de la réflectance.....	67
2.2.2.1.3	TELEDETECTION DES FORMATIONS SUPERFICIELLES ET CONCEPT D'ETATS DES SURFACES.....	77
2.2.2.1.4	L'approche par des méthodes géostatistiques.....	83

PARTIE III- CHAPITRE 1 : LOCALISATION DES SOLS GYPSEUX PAR TELEDETECTION ET DES MESURES IN SITU

1.	INTRODUCTION.....	85
1.1	LES OBJECTIFS.....	85
1.2	DESCRIPTION DE LA DEMARCHES ET DU CHOIX METHODOLOGIQUES.....	85
1.2.1	Choix des images et les échelles de cartographie.....	86
1.2.1.1	Choix des images.....	86
1.2.1.1.1	Les caractéristiques des capteurs 3 ^{es} série « LANDSAT 7 ».....	88
1.2.1.1.2	Spécifications du satellite LANDSAT ETM+.....	89
1.2.1.1.3	Caractéristiques des images satellitaires utilisées.....	90
1.2.1.2	Choix des échelles de cartographie.....	91
1.3	CHAINE DE TRAITEMENTS PERMETTANT LA CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACES DES FORMATIONS GYPSEUSES (EDSGY).....	92
1.3.1	Localisation de la région d'étude.....	94
1.3.2	Données satellitaires et cartographiques disponibles.....	95
1.3.2.1	Les données satellitaires ETM+ de LANDSAT 7.....	95
1.3.2.2	Un modèle numérique d'Élévation ou d'Altitude.....	95
1.3.2.3	Donnés cartographiques existantes.....	96
1.3.3	Extraction d'information des états de surface des sols des images Landsat 7.....	96
1.3.3.1	Les traitements des images.....	96
1.3.3.1.1	Extraction de la région d'étude des images satellites.....	96
1.3.3.2	Les prétraitements classiques des données images.....	98
1.3.3.2.1	Les corrections géométriques.....	98
1.3.3.2.2	Les corrections radiométriques.....	98
1.3.3.2.3	Transformation d'images de télédétection.....	100
1.3.3.2.4	Croisements des canaux et calculs divers.....	101
1.3.3.2.5	Choix des compositions des canaux (composition colorée).....	102

1.3.3.2.6	Création de Néocanaux.....	105
1.3.3.3	APPLICATIONS DES TAIEMENTS.....	113
1.3.3.3.1	Visualisation des différentes compositions colorées.....	113
1.3.3.3.2	Composition colorée à partir d'indices et ratios.....	114
1.4	Approche par photo-interprétation pour la localisation des sols gypseux.....	117
1.5	UTILISATION DES RELATIONS ETATS DE SURFACE DE SOL – REFLECTANCES EXO ATMOSPHERIQUES.....	118
1.5.1	Choix de la méthode d'investigation.....	118
1.5.2	Collecte de données de terrain.....	120
1.6	APPROCHE PAR CLASSIFICATION AUTOMATIQUE.....	120
1.6.1	CLASSIFICATION D'IMAGES.....	120
1.6.1.1	CLASSIFICATIONS AUTOMATIQUES SUPERVISEES PAR PIXEL ET ORIENTEES OBJET.....	121
1.6.1.1.1	Démarche méthodologique.....	121
1.6.1.1.2	Approche de classification par Pixels.....	123
1.6.1.1.2.1	Méthodologie.....	124
1.6.1.1.3	Application de la classification supervisée par pixels sur les trichromies indicielles.....	125
1.6.1.1.3.1	Zones de références.....	126
1.6.1.1.4	Application de la classification supervisée sur les trichromies ré échantillonnées et fusionnées à 15 m de résolution.....	126
1.6.1.1.4.1	Rééchantillonnage de l'image ETM+ de 30 m à 15 m de résolution.....	126
1.6.1.1.5	Approche de classification orientée objet.....	129
1.6.1.1.5.1	Explication de l'approche orientée-objet.....	130
1.6.1.1.5.2	Le processus d'analyse orientée objet.....	131
2	RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	134
2.1	RESULTAT DE L'APPROCHE PAR PHOTO-INTERPRETATION.....	134
2.1.1	Identification d'EDS des sols par photo-interprétation.....	135
2.1.2	Classes thématiques.....	136
2.1.3	Analyse des courbes spectrales.....	137
2.1.4	La droite des sols.....	140
2.2	RESULTAT DE LA RELATION SPATIALE ET SPECTRALE DES SOLS SELON LA TOPOSEQUENCE A-B.....	141
2.3	RESULTATS DES CLASSIFICATIONS AUTOMATIQUES.....	144
2.3.1	La comparaison entre les images ETM+ classes de 30 et 15 m de résolution par classification par pixel....	
2.3.1.1	Résultats de la comparaison entre classifications par pixel des images ETM+ originales et indicielles de 30 m de résolution.....	144
2.3.2	Discussion des traitements d'image par classification automatique des trichromies indicielles de 30 m.....	146
3	COMPARAISON ENTRE CLASSIFICATION PAR PIXEL DES IMAGES INDICIELLES DE 30 ET 15 M DE RESOLUTION.....	147
3.1	ÉVALUATION DES RESULTATS.....	147
3.1.1.1	Résultats de l'analyse thématique des classifications par pixels.....	149
4	COMPARAISON ENTRE CLASSIFICATION PAR PIXEL ET ORIENTE OBJET DES IMAGES DE 30 ET 15 M.....	150
4.1	ÉVALUATION DES RESULTATS POUR LA CLASSIFICATION ORIENTE OBJET.....	150
4.1.1	Segmentation multi résolution d'eCognition.....	150
4.1.1.1	La première segmentation a été réalisée avec les paramètres l'Échelle = 10, Forme = 0.1, compactness = 0.5 ; smoothness = 0.5.....	151
4.1.1.2	La deuxième segmentation a été réalisée avec les paramètres, l'Échelle = 15, Forme = 0.1 compactness = 0.5 ; smoothness = 0.5.....	151
5	DISCUSSION.....	152
5.1	CLASSIFICATION ORIENTEE OBJET.....	153
5.1.1	Classification supervisée basée sur le plus proche voisin.....	153

5.1.1.1 Comparaison entre la classification par pixels à 30 et à 15 m et orienté objet sur des images fusionnées de 15 m.....	153
I. Classification orientée objet sur des images de 15 m segmentées à 30 avec le facteur de forme = 0.1 smoothness/compactness = 0.5.....	153
II. Classification orientée objet des images à 15 m segmentation à 15 avec le facteur de forme = 0.1 smoothness/compactness = 0.5.....	154
5.1.1.2 Évaluation du taux de précision (le coefficient Kappa).....	154
5.1.2 Comparaison des résultats.....	155
5.1.2.1 Analyse de la matrice de confusion réalisé sur la base de la segmentation à 15 %.....	155
5.1.2.2 Comparaison des surfaces de sols en ha et en %.....	156
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE.....	157

PARTIE IV
SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL ET SA
RELATION AVEC LE MILIEU PHYSIQUE

CHAPITRE 1.
MODELISATION NUMERIQUE
DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATAILE DU GYPSE

1 INTRODUCTION.....	159
1.1 CONCEPT DE VARIABILITE SPATIALE.....	159
1.2 NOTION D'ECHELLES SPATIALES.....	160
1.3 MATERIELS ET METHODES.....	160
1.3.1 Les données utilisée.....	160
1.3.1.1 Le Modèle Numérique d'Altitude ou d'Élévation.....	160
1.3.1.1.1 L'image ASTER et un Modèle Numérique d'Élévation (MNE).....	161
1.4 DEMARCHE.....	161
B. Deuxième étape « exploitation de l'information cartographique sous SIG.....	162
1.5 LES COMPOSANTES DU MILIEU PHYSIQU.....	163
1.5.1 La carte d'occupation du sol.....	163
1.5.2 La géologie de la région d'étude.....	163
1.5.3 Carte hydrogéologique.....	164
1.5.3.1 La Lithologie.....	164
1.5.4 Les cartes issues par traitements du MNE.....	165
1.5.4.1 La topographie.....	165
1.5.4.2 Cartes d'Altitude, pente et orientation.....	166
1.5.4.2.1 Carte d'Altitude.....	166
1.5.5 La segmentation Géomorphologique	170
1.5.5.1 Drapping ou superposition de la trichromie ETM+ de LANDSAT 7 sur MNA (Aster).....	171
1.6 TYPE DE CARTOGRAPHIE RETENUE.....	171
1.6.1 Délimitation des unités morpho-pédologiques.....	171
1.6.2 Segmentation géomorphopédologique.....	173
1.7 L'ORGANISATION SPATIALE DES SOLS GYPSEUX.....	175
1.7.1 Description des profils.....	176
1.8 ORGANISATION SPATIALE DE LA VEGETATION SELON LA PEDOTOPOSEQUENCE.....	182
1.8.1 Associations sol - végétation.....	183
2 VARIABILITE SPATIALE DES PROPRIETES PEDOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES.....	184
2.1 Variabilité spatiale des teneurs en gypse des sols.....	185
2.2 Impact des nappes phréatiques et qualité des eaux souterraines sur la distribution des formes de gypse.....	186

2.2.1	Étude des faciès.....	186
2.2.1.1	Représentation sur le diagramme de piper.....	187
2.2.1.2	Évolution des minéraux des eaux souterraines.....	187
2.3	DISCUSSION.....	188
2.3.1	Impact de la topographie.....	189
2.3.2	Caractéristiques pédogénétiques des sols de la région d'étude.....	191
2.4	CONCLUSIONS PARTIELLE DE LA PARTIE.....	193

CHAPITRE 2: SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

1	LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE.....	194
1.1	VARIABILITE SPATIALE DES PROPRIETES PEDOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES.....	194
1.1.1	Choix des toposéquences.....	194
1.1.2	Plan d'échantillonnage.....	194
1.1.3	Acquisition de données de sol.....	195
1.1.3.1	Collecte et analyse préalable de l'information.....	195
1.1.3.1.1	Les mesures pédologiques.....	195
1.1.3.1.2	Acquisition de données hydrologique (point d'eau).....	196
1.2	ÉTUDE STATISTIQUE DES SONDAGES PEDOLOGI.....	196
1.2.1	Statistiques descriptives.....	197
1.2.1.1	Matrice des corrélations.....	197
2	LOCALISATION DE LA DISTRIBUTION SPATIALE DES SOLS GYPSEUX PAR LES METHODES GEOSTATISTIQUES.....	198
2.1	Analyse exploratoire des données spatiales.....	198
2.1.1	Évaluation des données statistiques.....	199
2.1.1.1	Matrice des corrélations.....	199
2.1.1.2	L'examen des distributions de données en utilisant l'histogramme.....	200
2.1.1.2.1	Le diagramme de probabilité Q-Qplot (Quantile-Quantile plot).....	201
2.2	ETABLISSEMENT DES CARTES PAR KRIGEAGE.....	202
2.2.1	Modélisation de la structuration spatiale.....	202
2.2.1.1	Modélisation (calcul et ajustement) du semi-variogramme.....	203
2.2.1.1.1	Propriétés du variogramme.....	203
2.2.1.1.2	Modèle d'ajustements des variogrammes.....	204
2.2.1.1.3	Validation croisée.....	205
2.2.1.1.4	Réalisation des cartes des % de gypse par estimation par krigeage.....	207
2.2.2	Auto corrélation spatiale et les influences directionnelles.....	209
2.2.3	Analyse thématique.....	211
2.3	Variabilité spatiale des teneurs en gypse des sols.....	214
2.4	CONCLUSION PARTIELLE.....	216
3	MODELISATION PAR RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS (ANN).....	217
3.1	CALAGE DU MODELE.....	219
3.2	CRITERE DE PERFORMANCE DU MODELE.....	220
3.2.1	Détermination des Entrées du Model.....	221
3.3	RESULTATS ET DISCUSSION.....	221
3.4	CONCLUSIONS DE LA QUATRIEME PARTIE.....	224
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	225
	BIBLIOGRAPHIES.....	229
	ANNEXES.....	241
	ANNEXE I.....	242
	ANNEXE II.....	247
	ANNEXE III.....	250
	ANNEXE IV.....	252

LISTES DES FIGURES

Figure 1- Situation géographique et administrative de la wilaya de Biskra.....	10
Figure 2- Le sous bassin versant 'oued Djedi.....	11
Figure 3 - Précipitations moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période (1998-2009).....	12
Figure 4 - Cumuls annuels des précipitations dura la période 1998 à 2009.....	12
Figure 5 Températures moyennes, minimales et maximales de la région de Biskra durant la période (1998-2009).....	14
Figure 6 Humidités relatives moyennes mensuelles (%) à Biskra.....	15
Figure 7 Vitesse moyenne du vent (dixième m/s) dans la région de Biskra durant la période (1991-2007).....	16
Figure 8 Diagramme pluviothermique de GAUSSEN de la région de Biskra durant la période (1988-2009).....	17
Figure 9 Localisations de la région de Biskra sur le climagramme d'EMBERGER.....	19
Figure 10- Les principales unités structurales de la région d'étude.....	20
Figure 11 Esquisse Géologique de la région d'étude « Extrait de la Carate Hydrogéologique de Biskra « Carton esquisse géologique et tectonique».....	21
Figure 12 Coupes géologiques schématique de la région de Biskra (Mauget, 1957).....	21
Figure 13 Réseau hydrographique de la wilaya de Biskra (SEDRAT, 2011).....	25
Figure 14 Spatiocarte des grands ensemble géomorphologique de la région d'étude avec une vue en 3 D.....	29
Figure 15 Carte des Sols de la région de Biskra numérisée.....	29
Figure 16- Cristaux de gypse pur (Marteau, 1993).....	34
Figure 17- Structure du cristal de gypse raffinée à l'aide de la diffraction tridimensionnelle des rayons X.....	35
Figure 18- Projection de la structure cristalline du gypse sur le plan (001).....	36
Figure 19 Schémas des couches de croissance du gypse sur les faces.....	37
Figure 20 Schémas structuraux d'un cristal de gypse aciculaire.....	37
Figure 21- Représentation schématique de la maille élémentaire du réseau cristallin monoclinique du gypse (les 3 faces référencées sont les plans des 3 principaux clivages).....	38
Figure 22- La structure du gypse (FISCHESSER, 1950).....	39
Figure 23- Squelettes atomiques d'une molécule de (CaSO ₄ , 2H ₂ O) mettant en évidence une molécule d'eau très faiblement liée au reste.....	39
Figure 24 Les sols gypseux dans le Nord et l'Est de l'Afrique, l'Europe centrale et dans le Sud Est de l'Asie.....	54
Figure 25 les interactions rayonnement atmosphère – cible (par la source (soleil ou radar).....	66
Figure 26 le système de télédétection.....	66
Figure 27 Illustrations des interactions entre le sol et la végétation, intégrées.....	67
Figure 28 - Interactions onde surface : Absorption, réflexion, transmissions:.....	67
Figure 29 l'effet directionnel.....	68
Figure 30 Perturbations atmosphériques.....	69
Figure 31 Le spectre électromagnétique.....	70
Figure 32 Signatures spectrales des surfaces naturelles dans le domaine du visible.....	70
Figure 33 Signatures spectrales pour différents types de sols.....	71
Figure 34 Réflectances, mesurées sur le terrain, de sols de différentes couleurs.....	72
Figure 35 Réflectances, mesurées sur le terrain, d'un même sol plus ou moins humide.....	72
Figure 36 Réflectances, mesurée sur le terrain, de différents états de surface d'un même sol.....	73
Figure 37 Relation entre le calcaire total et la réflectance en 400nm (δ/δ/...clartés Munsell).....	73
Figure 38 Réflectances, mesurée sur le terrain, de sols plus ou moins organiques.....	74
Figure 39 Exemples de réflectance, du % de limon sableux.....	74
Figure 40 Réflectances spectrales de différents sels, au laboratoire (A), sur le terrain (B).....	75

Figure 41 Comportements de la végétation-.....	76
Figure 42 Une image satellite est formée de composés élémentaires appelés «pixels».....	77
Figure 43 Les principales phases méthodologique de localisation des sols gypseux.....	87
Figure 44 Le programme LANDSAT (NASA / USGS).....	89
Figure 45 Le capteur ETM (Enhancement Thematic Mapper) couvre des domaines spectraux.....	89
Figure 46 Identifications rapides des scènes et leurs localisations, par son numéro de trace.....	90
Figure 47 scènes de LANDSAT 7 de la wilaya de Biskra 194-36 et 193-36.....	90
Figure 48 Résolution spatiale des images satellitaires et échelles de restitutions cartographiques.....	93
Figure 49 Organigramme expliquant la démarche pour obtenir une carte des sols gypseux.....	94
Figure 50 Localisation de la zone d'étude.....	95
Figure 51 Trichromie ETM + (7, 4, 1) de LANDSAT 7 du 09/10/2009 d'une fenêtre (L, C).....	96
Figure 52 MNA Aster de 30 m de résolution de la région d'étude.....	97
Figure 53 scène LANDSAT 7 complète N° 194-36 de 185 km sur 185 km.....	98
Figure 54 Extractions du sous-bassin versant d'oued Djedi à partir d'un masque « la limite du SBV ».....	99
Figure 55 bandes spectrales des images LANDSAT 7 de la région d'étude.....	103
Figure 56 combinaisons des bandes spectrales.....	104
Figure 57 Résultat de la composition colorée en couleur naturelle ETM+ Rouge (3), Vert (2) et le Bleu (1) de la région d'étude.....	105
Figure 58 Résultats de la composition colorée en fausse couleur ETM+, R (4), V (3) et B (2) de la région d'étude.....	105
Figure 59 Ellipsoïde de distribution des données dans un espace à deux dimensions.....	106
Figure 60 Rotation d'axes suivant les vecteurs propres des composantes principales.....	107
Figure 61 Résultats de l'Analyse en Composante Principale.....	108
Figure 62 Composition colorée (R, V, B) [ACP1, ACP2, ACP3] du sous bassin versant d'Oued Djedi.....	108
Figure 63 Indice de brillance du sous-bassin versant d'Oued Djedi.....	109
Figure 64 ISn du sous-bassin versant d'Oued Djedi.....	110
Figure 65 Indices de coloration du sous-bassin versant d'Oued Djedi.....	110
Figure 66 Indices de salinité du sous-bassin versant d'Oued Djedi.....	111
Figure 67 Indice de gypse du sous-bassin versant d'Oued Djedi.....	111
Figure 68 transformation Tasseled-Cap.....	112
Figure 69 Indices d'humidité du sous-bassin versant d'Oued Djedi.....	112
Figure 70 NDVI du sous-bassin versant d'Oued Djedi.....	113
Figure 71 Ratios 7/4 Du Sous-Bassin Versant D'oued Djedi.....	114
Figure 72 Compositions colorées indicielle (R, V, B) [ACP1, IB, IS] du sous-bassinversant d'Oued Djedi.....	116
Figure 73 Compositions colorées indicielle (R, V, B) [IB, NDVI, IH].....	116
Figure 74 Compositions colorées indicielle (R, V, B) [IB, IS, IH].....	117
Figure 75 Trichromies indicielles (R, V, B) [IS, IB, ISn].....	117
Figure 76 Trichromies indicielles (R, V, B) [IS, IH, IGy].....	118
Figure 77 transect A-B et profil spectral tracés sur l'image et sur le terrain.....	119
Figure 78 le modelé du versant (image satellite ETM+ drapée sur un MNA aster) avec un profil en long (toposéquence).....	120
Figure 79 Localisation et signature spectrale du profil spectral sur l'image ETM+ de Landsat 7.....	120
Figure 80 Organigramme général de l'approche de classification par pixel et orienté objet.....	124
Figure 81 démarche méthodologique de cartographie des sols par pixel.....	126
Figure 82 choix des zones de références.....	127
Figure 83 Schémas de fusion d'images par la transformée en IHS.....	129
Figure 84 Trichromie d'image ETM+(RVB) de 30m de LANDSAT 7 du 09/04/2009.....	129
Figure 85 Image Panchromatique de 15 m de LANDSAT 7du 09/04/2009.....	130
Figure 86 Résultats de la fusion IHS d'image ETM+ rééchantillonnées à 15 m avec le Panchromatique (15 m) de LANDSAT 7 du 09/04/2009.....	130

Figure 87 Processus d'analyse orientée-objet.....	132
Figure 88 Niveau des objets-image.....	133
Figure 89 Principe de la Segmentation Multi-résolution.....	134
Figure 90 présente le processus de segmentation multirésolution et classification de la végétation sous le logiciel eCognition.....	135
Figure 91 Photo-interprétation d'une trichromie TM 7, 4, 1 du 09 octobre 2009.....	136
Figure 92 méthode de visualisation nD des classes thématiques.....	137
Figure 93 Courbes de réflectance spectrale de chaque classe dans les bandes.....	138
Figure 94 Model d'interprétation des sols sur l'image.....	141
Figure 95 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.....	141
Figure 96 Relation spatial et spectral des sols avec implantation des fosses pédologiques sur une toposéquence de 9 km.....	143
Figure 97 Carte des états de surface par classification de la trichromie indicielle (IB, IS, IH) de 30 m de résolution.....	146
Figure 98 classifications par pixel des images rééchantillonnées et fusionnées à 15 m (ETM+ 7,4, P) de LANDSAT 7 par maximum de vraisemblance.....	149
Figure 100 Classification par pixel d'une image à 30 m de résolution.....	150
Figure 101 segmentations à l'échelle 10 avec le facteur de forme = 0.1 smoothness/compactness = 0.5.....	152
Figure 102 segmentations avec l'échelle de 15 avec le facteur de forme = 0.5 smoothness/compactness = 0.1.....	152
Figure 103 Classification par pixels des images segmentation à 30.....	154
Figure 104 Classification orienté objet des images segmentation à 15 m.....	155
Figure 105 Pourcentage des classes de sols par type de segmentation suivie de la classification.....	157
Figure 106 MNE (ASTER GDEM V1) du Monde.....	161
Figure 107 Les principales phases du travail.....	162
Figure 108 Carte d'occupation du sol de la région d'étude.....	163
Figure 108 carte géologique du sous bassin versant d'Oued Djedi.....	163
Figure 110 carte hydrogéologique du sous bassin versant d'oued Djedi (extraite de la carte hydrogéologique de Biskra à gauche et de la région d'étude à droite : établie par ANRH d'Alger, 1979).....	164
Figure 111 MNE (Aster) du sous bassin versant d'Oued Djedi.....	164
Figure 112 Représentations d'un MNE de la région d'étude.....	165
Figure 113- Carte d'Altitude du sous bassin d'Oued Djedi. Source du MNE (Aster).....	166
Figure 114 carte des pentes du sous bassin versant d'Oued Djedi à gauche et de la région d'étude à droite.....	167
Figure 115 carte d'expositions du sous bassin versant à gauche et de la région d'étude à droite.....	167
Figure 116 carte de concavités et de convexité du relief du sous bassin versant.....	168
Figure 117 Réseaux hydrographiques du sous bassin versant.....	169
Figure 118 niveau piézométrique du sous bassin versant.....	169
Figure 119 carte des paysages du sous bassin versant.....	170
Figure 120 Représentation en 3 D du sous-bassin versant d'oued Djedi.....	170
Figure 121 Délimitation des unités morphologiques avec localisation des toposéquences sur un MNA de la région d'étude.....	172
Figure 122 Bloc diagramme de reconnaissance morpho pédologique sur la région d'étude par croisement du MNA et les unités morphologiques du site d'étude.....	172
Figure 123 profil en long tracé sur le MNE (Aster) de la région d'étude.....	173
Figure 124 Profil en long A-B.....	173
Figure 125 localisation des EDS et des profils sur la pédoséquence.....	175
Figure 126 Organisation spatiale de la végétation selon la pédotoposéquence.....	182
Figure 127 Diagramme de piper des eaux souterraine.....	187

Figure 128 Variation de l'indice de saturation des minéraux.....	188
Figure 129 Localisation des transects et les sondages dans la région d'étude.....	195
Figure 130 histogramme de fréquence du gypse.....	200
Figure 131 le box plot QQles du gypse de l'horizon de surface à gauche ;.....	201
Figure 132 variogramme expérimentale.....	203
Figure 133 le variogramme du $[CaSO_4, H_2O]$ de l'horizon de surface (à gauche) et celui du $[CaSO_4, H_2O]$ de l'horizon de profondeur (à droite).....	204
Figure 134 Carte factorielle de la distribution du gypse de l'horizon de surface par krigeage en 2 D:.....	207
Figure 135 Cartes factorielles de la distribution du gypse de l'horizon de profondeur.....	208
Figure 136 Carte factorielle des altitudes en 3 D.....	209
Figure 137 Ellipse bleue ou l'ellipse anisotropique,.....	209
Figure 138 Ellipses bleues ou l'ellipse anisotropique,.....	210
Figure 139 Superpositions des cartes factorielles en 3D et les cartes factorielles en 2D.....	211
Figure 140 Superposition de trois cartes factorielles en 3D de haut en bas % de gypse en surface, en profondeur et l'altitude et la carte factorielle 2D des pentes.....	212
Figure 141- La superposition des cartes d'isoteneurs crée avec les cartes factorielles l'histogrammes, Q plots et variogrammes des" altitudes, pente, géologie, piézométrie de la nappe phréatique etc." sous SIG.....	214
Figure 142 schéma de l'organismes principaux d'un neurone artificiel.....	217
Figure 143 Calcul d'un état de neurone.....	218
Figure 144 L'Architecture d'un MLP à Trois Couches.....	219
Figure 145 La SOSE en fonction des nœuds cachés.....	222
Figure 146 Le $CaSO_4$ observé en fonction du $CaSO_4$ simulé.....	223
Figure 147 Graphique de l'Erreur à l'apprentissage et à la validation.....	223

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1 - Précipitations moyennes mensuelles (mm) de la région de Biskra durant la période 2006-2009	12
Tableau 2- Régimes saisonniers de la région de Biskra.....	13
Tableau 3 Température moyenne mensuelle (TM), température moyenne des minimas (TN), Température moyenne des maximas (TX) de la région de Biskra durant la période 2006-2009.....	14
Tableau 4 Vitesse moyenne mensuelle du vent (m/s) enregistrée dans la région de Biskra durant la période 2007-2008.....	16
Tableau 5 Quotient pluviométrique et étage bioclimatique de la région de Biskra.....	18
Tableau 6 Description géologique et hydrogéologique du site.....	25
Tableau 7 : influence de la température sur la solubilité du gypse (POUGET, 1968).....	40
Tableau 8 Classes caractéristiques des sols gypseux D'après Barzanji (1973), FAO (1990).....	46
Tableau 9- Distribution des sols gypseux, par pays et par continent.....	54
Tableau 10- Les sols gypseux dans la classification française (CPCS 1967).....	56
Tableau 11 Variables estimables par télédétection. Le niveau de précision et la robustesse de l'estimation sont indiqués par le nombre de + (« + + + + » précis et robuste ; «-» non estimable par télédétection (Baret, 1999).	80
Tableau 12 Image et paramètres disponibles sur images.	87
Tableau 13 Caractéristique des images LANDSAT et Aster (Bensaid A. 2006).....	90
Tableau 14 Caractéristiques des images LANDSAT ETM+(source : Landsat.org).....	91
Tableau 15- Application des différents canaux de LANDSAT ETM+.....	101
Tableau 16 les bandes spectrales des satellites LANDSAT.....	103
Tableau 17 Matrice De Corrélation Entre Trois Canaux Bruts Et Les Différents Indices (Néocanaux).	114
Tableau 18 Classe des sols avec les critères retenus pour leurs caractérisations.	136
Tableau 19 résultats d'une confrontation des classes avec les observations de terrain	143
Tableau 20 Coefficient Kappa pour les différentes classifications automatiques des images à 30 m.....	144
Tableau 21 Estimations du % de précision (Kappa) pour les différentes classifications appliquées pour la trichromie indicielle (IB, IS, IH) de 30m.....	144
Tableau 22 matrice de confusion et indices d'omission et commission des classes thématiques.....	146
Tableau 23 Estimation du % de précision (Kappa) pour les différentes classifications appliquées.....	147
Tableau 24 Matrice de confusion des états de surfaces de sols classés de l'image fusionnées P+ETM+ de 15 m par la méthode Pixel (maximum de vraisemblance) avec un Indice Kappa = 0.93.....	148
Tableau 25 Analyses thématiques des classes de sol par classifications par pixels des images de 30 m et des images rééchantillonnées et fusionnées de 15 m.	149
Tableau 26 Estimation du % de précision (Kappa) pour les différentes classifications appliquées.....	154
Tableau 27 Matrice de confusion des états de surfaces de sols classés de l'image ETM+ fusionnées à 15 m par la méthode Orienté objet (K Nearest Neighbor et segmenté à niveau 15) avec un indice Kappa = 0.93.....	155
Tableau 28 Analyses thématiques de la classification orienté objet des images fusionnées à 15 m et segmentées à 30, 15 et 10 %.	156
Tableau 28 caractéristiques physiographiques de la zone d'étude.	166
Tableau 29 Segmentation géomorphopédologique du site et principales caractéristiques des unités topographiques.....	174
Tableau 30 résultats d'analyse du profil N°1	177
Tableau 32 résultats d'analyse du profil N°2.....	179
Tableau 33 résultats d'analyse du profil N°3.....	181
Tableau 34 résultats des analyses.....	186
Tableau 35 évolution des indices de saturation des minéraux.....	188

Tableau 35 Statistiques descriptives des 107 échantillons.....	197
Tableau 36 Matrice de corrélation des 107 échantillons.....	197
Tableau 37 - Les principales statistiques relatives aux variables (CaSO ₄ - 2H ₂ O), CaCO ₃ , CE, pH et l'altitude pour les 107 échantillons.....	198
Tableau 38 paramètres de forme le coefficient d'aplatissement (la kurtose) et de symétrie (skewness) du gypse.....	198
Tableau 39 Matrice de corrélation des 107 échantillons.....	199
Tableau 40 caractéristiques et modèle d'ajustements des variogrammes.....	204
Tableau 41 validation croisée pour le modèle de krigeage	206
Tableau 42 Analyse du variogramme avec ces différentes caractéristiques et ces modèles	207
Tableau 43 SOSE pour les divers ANN.....	222
Tableau 44 Les Paramètres statistiques de Régression de la Sortie (CaSO ₄).....	222
Tableau 45 L'Analyse de la Sensibilité de l'ANN des variables.....	223

INTRODUCTION GENERALE

1 Introduction Générale

1.1 Problématique générale

La wilaya de Biskra compte 185 473 hectares de Surface Agricole Utile (SAU) sur 2 150 980 ha de la superficie totale dont 103 478 ha sont irrigués. Reine des Zibans et berceau de la datte " deglet Nour ", où anciennement survit une agriculture familiale qui malgré l'adversité se maintient à un niveau de productivité substantielle autour des oasis, elle est devenue depuis quelques années, avec la mise en œuvre des programmes de développement agricole du gouvernement, le bassin-clé pour plusieurs productions agricoles et joue un rôle incontournable dans l'approvisionnement du marché national en produits de large consommation. La Direction des Services Agricoles (DSA) de la wilaya de Biskra a recensé près de 100 000 serres à travers le territoire de la wilaya (2011) et d'après ANRH¹ de Biskra en compte 8328 forages et 3573 puits. En effet, la contrainte majeure dans ces régions est la pluviométrie qui est quasi nulle, d'où l'agriculture est exclusivement menée dans des périmètres irrigués où la plupart des sols sont des formations gypseuses et des sols peu évolués d'apport éolien. Néanmoins, à l'égard au taux de salinité relativement élevé qui caractérise les eaux souterraines dans ces régions, les agriculteurs sont confrontés à l'épineux problème de la remontée des sels qui accélère la baisse du rendement des terres mises en valeur qui, à long terme, risqueraient d'affaiblir les activités agricoles dans cette région à l'abondant et l'exode des populations de ces régions.

Il est important de nos jours pour faire une agriculture moderne et préservée nos sols des diverses dégradations, d'avoir une connaissance spatialisée des principales caractéristiques des sols pour relier les types de sols aux usages actuels, pour planifier l'évolution de ces usages et protéger certaines zones sensibles. Cette connaissance en Algérie est incomplète et autant dans la wilaya de Biskra. D'après **Zinc**, (1994) in (**Legros**, 1996), on estime que seulement 5 % des sols sont cartographiés, 0 % à petites échelles (1/500 000 à 1/100 000) sauf celle du **Duran J. H.** (1957), 5 % moyennes échelles (1/100000 à 1/50000) et 5 % grandes échelles 1/250000 et au-delà. Compte tenu du contexte économique d'une part, de l'immensité du territoire d'autre part l'état ne peut pas supporter les coûts des études de cartographie nécessaires pour combler ces manques. Dès lors, il convient d'utiliser de nouvelles solutions permettant d'assurer, à moindre coût, la cartographie de vastes régions dépourvues de toute cartographie. Surtout si ces derniers encours des menaces par la sécheresse, la salinité, la désertification et à long terme par un déséquilibre de leurs écosystèmes oasiens, surtout ceux qui sont limitrophes des dépressions salines (les chotts). Une identification des sols et la connaissance exhaustive de leur répartition spatiale sont souvent recherchées. Les techniques de géo informatiques la Télédétection associée aux SIG et aux GPS sont les seuls outils disponibles qui permettent, à des coûts relativement faibles et en peu de temps de produire une carte des états de surface d'un grand territoire et de suivre son évolution dans le temps surtout avec les développements technologiques que connaît le monde dans le domaine de l'informatique.

¹ ANRH : Agence National des ressources Hydriques

1.2 Problématique scientifique

À travers le monde, il existe un volume de travaux considérables sur les sols carbonatés et salsodiques. Mais, rares sont les travaux qui ont soucieux des sols gypseux.

Sols calcimagnésiques gypseux pour la classification française des sols CPCS² (1967), Gypsisols pour la FAO³ (1980) et Gypsidis pour la classification américaine (soil taxonomie, 2003). Les Gypsidis ont souvent un bon potentiel pour les cultures pluviales et les cultures irriguées si le taux de gypse n'est pas excessif. La présence des teneurs élevées en gypse affecte la teneur et la disponibilité des éléments nutritifs, et affecte la croissance des plantes et leur productivité. La présence des horizons gypsic et petrogypsic endurées limite la pénétration des racines des arbres. Les Gypsidis sont très sensibles aux changements environnementaux. Leur mauvaise gestion provoque une dégradation importante du milieu, et elle constitue une menace pour l'agriculture surtout en sols irrigués (FAO, 1990). Ce qui nous amène à s'intéresser aux caractéristiques des gypsidis et à leur distribution spatiale.

Les Gypsidis ont été étudiés par plusieurs auteurs (**Durand, 1953; Coque, 1962; Trichet, 1963; Pouget, 1968; Dekkiche, 1976; Eswaran et al., 1981; Porta & Herrero, 1990; Herrero, 1991; Halitim, & Robert 1992; Poch, 1992; Herrero et al., 1992; Djili, 2000; Kadri & Hatira, 1996; Khademi et al., 1997; Florea & Al-Joumaa, 1998; Herro & Porta, 2000**). Ces études montrent que la répartition spatiale de ces sols est commandée par l'aridité du climat local caractérisé par des faibles précipitations permet un faible lessivage du gypse et que les processus pédogénétiques sont très légèrement exprimés avec une légère migration de gypse et son accumulation en horizons gypsic ou petrogypsic, avec illuviation d'argile et le lessivage des sels solubles.

Similaires aux sols calcaires, les gypsidis sont beaucoup moins répandus, car une source de SO_4^{2-} ne peut pas toujours être disponible. Les gypsidis contiennent souvent aussi des sels solubles et les carbonates de calcium, mais l'accumulation $[CaSO_4 \cdot 2H_2O]$ dans le sol se produit presque exclusivement dans les zones arides et semi-arides avec moins de 400 mm de précipitations annuelles (**Boyadgiev et Verheye., 1996**). L'accumulation de gypse est un phénomène caractéristique des sols avec un régime d'humidité aridic ou xérique (**Bender, 1974; Watson, 1983; Doner et Warren, 1989; Herrero, and al., 1992, Toomanian, and al., 2001**).

À l'échelle du globe, on estime à 200 millions d'hectares de sols ayant des horizons gypsic ou pétrogypsic. En Algérie, selon la **FAO (1990)** et **Marshali (1995)**, les Gypsidis constituent 3.3 % de la surface totale du pays et 12.2 % de la superficie totale des sols gypseux au monde, soit une superficie de 7966.3 Km².

Jusqu'à ce jour, dans la région d'étude, il n'existait qu'une cartographie d'inventaire des sols au 1/500.000^{ème}, effectués, en 1954, par **Duran et Barbut** selon les méthodes classiques de cartographie. On estime que seulement 3 % des sols de la région sont cartographiés à

² Commission de Pédologie et de Cartographie des sols

³ Food and Agriculture Organisation.

grande ou à moyenne échelle (**ANRH, 2012**). Cette connaissance dans notre région d'étude est incomplète, encore moins les sols gypseux, ils ne sont ni totalement connus ni suivis de manière systématique. L'étude approfondie de ces sols se heurte à la rareté des recherches locales.

Ces dernières décennies, quelques études ponctuelles ont été réalisées pour le compte de l'ANAT⁴ et ANRH, BNEDER⁵ ASAL⁶ ou des recherches universitaires. Malheureusement, ces travaux sont restés jusqu'à présent que fort sporadiques et qui sont parfois obsolètes. À l'heure actuelle, aucune carte de sol n'a été éditée, probablement à cause du coût excessif et au long délai de réalisation de ce type de cartes.

Face à cette situation, établir une évaluation et assurer une gestion optimale des ressources en sols et en eaux dans ces zones est devenue indispensable, et afin d'y parvenir, les aménagistes et où les agriculteurs ont besoin d'informations très précises sur la localisation des différents types de sols et de leur distribution spatiale de leurs propriétés physico-chimiques.

1.3 Les points de vue disciplinaires divers

Pour obtenir l'information sur les sols, il existe un grand nombre de techniques qui peuvent être divisées en deux grands groupes (**Tourino 2005**) : échantillonnage (sampling) et détection (seing), ce dernier pouvant être à distance (télédétection).

Les techniques d'échantillonnage " terrain " sont considérées comme très précises, mais elles impliquent un coût de main-d'œuvre très élevé et un grand nombre de mesures à réaliser (**Basso, 2001**). Les techniques de détection, qui consistent, à la prise de mesures satellitaires, fournissent des données spatialisées en continu, sont moins gourmandes en temps de travail et plus économiques pour l'étendue d'un bassin versant. Les techniques d'observation, d'analyse et de cartographie sont donc en perpétuelle évolution au cours du temps, les concepts également, mais le principe est resté le même. La question qui se pose est comment réussir au mieux à projeter cet objet complexe à trois dimensions (le sol) sur un support n'en possédant que deux (la carte) ?. Dans le monde, rares sont les pays bénéficiant d'une couverture pédologique complète. Un pays comme la France, dans lequel la culture de l'utilisation des cartes est ancrée, seuls 14 % du territoire est couvert par des cartes pédologiques à moyenne échelle (1 : 100 000) (**Gaddas, 2001**).

Depuis les années 80, la cartographie des sols a été révolutionnée par l'apparition de la science géomatique et ces nouveaux outils : la télédétection, les SIG⁷ et les GPS⁸ ou encore les bases de données, les progrès informatiques et statistiques, permettant un meilleur stockage des données et des calculs performants. Ces outils ont permis de mieux traiter les nombreuses données nécessaires à l'étude de la variabilité spatiale des sols. Actuellement, la télédétection spatiale est devenue un outil performant, rapide et aussi une source

⁴ Agence Nationale d'Aménagement des Territoires

⁵ Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural

⁶ Agence Spatiale Algérienne

⁷ Système d'Information Géographique

⁸ Global Positioning System

d'information fiable pour ce type d'étude. Elle permet de diminuer la main-d'œuvre requise pour un projet ou encore d'augmenter la superficie couverte tout en diminuant le temps et les coûts d'acquisition nécessaire à la couverture d'un territoire d'étude. La cartographie des sols constitue à l'heure actuelle un objectif majeur de recherche en télédétection. Ce nouveau savoir-faire fait évidemment partie intégrante de cette thèse et permettra de mener à bien notre travail.

De très nombreux travaux se sont attachés à décrire les relations qui relient les caractéristiques et les propriétés de sols et la réflectance spectrale, que ce soit par interprétation directe des images satellite ou par des études expérimentales à travers des mesures radiométriques in situ. Les études portant sur les états de surface des sols au sens pédologique du terme sont le fait de quelques équipes parmi lesquelles, **Condit (1970)**, **Stoner et Baumgardner (1981) aux Etats-Unis**, **Bialousz (1978) et Cierniewski et Courault (1993) en Pologne**, **King et Delpont (1993)**, **Mougenot et al. (1993)**, **Cervelle et al. (1977)**, **Girard et Girard (1999)**, aussi, **Escadafal (1987)**, **Escadafal et Pouget (1987)** ; et **Casenave et Valentin (1989)**, **Escadafal et Huete (1991)**, **Hamdi-Aïssa et Girard (2000)**, **Girard et Girard (2004)**, **Schowengerdt (2007)**. Cependant, un premier problème consiste donc à savoir quelles sont à l'heure actuelle les meilleures combinaisons d'outils d'investigation pour une recherche objective du sol. Surtout, que la télédétection porte sur la couche de surface des sols, et non sur les couches de sol sous-jacentes.

1.4 Le choix de la région d'étude

Le choix du sous-bassin versant d'oued Djedi l'un des quatre (04) sous bassins versants de la wilaya de Biskra, s'appuie sur une conjoncture locale d'atouts. Tout d'abord, zone agricole, la taille réduite (119,847.997 Hectares), peut couvrir par la végétation naturelle, constitue le terrain privilégié où se succèdent les formations gypseuses, recèle de nombreux héritages pouvant influencer sur la distribution de formations gypseuses, le relief est marqué par la juxtaposition de plusieurs unités morphologiques : au nord, un aplanissement faiblement incliné que nous nommons glacis, un premier glacis (haut) s'étend depuis le pied du relief de djebel sidi ghazal jusqu'à la sebkha Chemora - d'Oumache ; au sud-est, passant par un autre aplanissement constitue la partie aval d'un bas glacis d'El Hadjeb et stah zemrir. Du côté technique, les images satellite sous échelle acceptable, les relevés pédologiques peuvent être nombreux. Malgré tous ces atouts, la région n'a fait l'objet que de rares études antérieures (**Durand 1954 et ANAT, 2003**). Signalons également que plusieurs thèses et mémoires ont été réalisés, mais dans des zones réduites. Au vu de la rareté des informations locales et les enjeux régionaux un certain nombre de questions demeurent sans réponses.

- ➔ Peut - ont détecté les formations gypseuses par télédétection ?
- ➔ Qu'en est-il des atouts de l'imagerie spatiale face aux études de terrain ?
- ➔ Peut-on à terme remplacer ses études de terrain par des recherches télédétection moins coûteuse ?
- ➔ Peut-on expliquer les causes potentielles de la variabilité spatiales des sols gypseux de la région par télédétection ?

Enfin, et pour synthétiser l'ensemble des résultats. Peut-on établir une relation spatiale entre les sols gypseux, et les paramètres du milieu physiques ?

Nous tenterons d'apporter des réponses aux interrogations que nous avons formulées précédemment, non seulement dans le choix des traitements qui s'impose et les démarches méthodologiques appropriées qui assurent la réalisation de l'objectif recherché mais aussi de choisir parmi ces méthodes les meilleures et de dégager des hypothèses sur les perspectives du travail.

Cette thèse s'intègre, en effet, dans le prolongement du programme du laboratoire LAPAPEZA⁹, (BATNA) qui a été dirigée par le professeur **Bensaid R.** sur les sols gypseux. Pour ne citer que les travaux de thèses de magistères, celle de **Rouahna**, (2007) avait pour finalité l'étude de l'aspect géochimique sur la base de l'étude de l'interaction eau de nappes-sols ; **Razi S.**, (2006) l'aspect chimique et biologique et **Abdesselam** (1999) sur l'aspect géochimique et minéralogique.

Cependant, les interrogations relatives sur les origines du gypse ne sont pas éludées dans notre travail. Toutefois, l'essentiel de la recherche est consacré à l'étude des organisations spatiales des sols gypseux, leurs identifications, localisations et la relation qui peut exister entre le milieu physique et la répartition spatiale de ces sols dans une démarche morphopédologique sous SIG.

En conséquence, le travail méthodologique constitue la base de cette recherche.

1.5 Contexte méthodologique

Notre étude vise dans un premier temps, à élaborer des cartes de deux dimensions (2 D) localisant les Gypsids pour la classification américaine (**Soils taxonomie, 2003**) de surface (à horizons gypsics) et de profondeur (à horizons petrogypsics) à l'ouest de la ville de Biskra du sous-bassin versant d'Oued Djedi. L'étude a été conduite sur une petite région référence, comprise entre El Hadjeb et Oumache par les techniques de la télédétection, partant du principe de la photo-interprétation aux différents traitements d'images (calculs d'indices spectraux, le rééchantillonnage des pixels, la fusion des images, la segmentation, la classification automatique supervisée par pixel et orientée objet des images). De même, depuis quelques années, les techniques géostatistiques ont été introduites comme outils de recherche en pédologie. Appartenant à la statistique spatiale, les méthodes de la géostatistique ont pour objectif d'identifier et de localiser les propriétés et les structures des sols à partir de l'information contenue dans un ensemble minimal de données géocodées par une modélisation de « l'espace ». La théorie géostatistique est fondée sur l'hypothèse que la variabilité spatiale d'une propriété possède une structure particulière. La valeur de cette propriété en un point de l'espace peut être corrélée avec une autre valeur de cette même propriété située ailleurs dans l'espace. Ainsi, on cherche à déterminer sur quelle distance l'autocorrélation entre deux mesures est valable. On peut alors connaître la structure de la

⁹ LAPAPEZA : Laboratoire d'Amélioration des Productions Agricoles et Protection des Ressources en Zones Arides

variabilité dans l'espace (**Langlois, 1991**). Ces techniques exigent le travail de terrain (in situ), traitent des relevés et des observations concernant les sols et ordonnent que données soient actualisées et structurées dans une base de données sous SIG. Les SIG traitent les données de télédétection et données géographiques, ils permettent de les comparer et les croiser pour les analyser et créer de nouvelles données en vue d'améliorer la localisation des Gypsids et leurs gestions.

Le milieu physique (le climat, le matériel parental, la topographie, la végétation et le temps) conditionnent le développement du sol, que ce soit sur le plan vertical que sur le plan latéral (**Gessler et al., 1996 ; Khakural et al., 1996, Moore et al., 1993a**). Le milieu physique a été identifié comme une cause potentielle de la variabilité spatiale des sols (**Girard et al., 1990**). Au cours des dernières années, une relation étroite a été établie entre les propriétés du sol et la morphologie du paysage (**Goddard et al., 1996 ; Bourennane et al., 1996**). En effet, des travaux de recherche de **Khakural et al., (1996)**, ont permis d'établir une corrélation entre la variabilité spatiale de plusieurs descripteurs physicochimiques du sol (l'épaisseur du solum, l'épaisseur de l'horizon A, le contenu en matière organique et en argile, le pH, la capacité d'échange cationique, la masse volumique apparente, le profil d'humidité du sol, et les contenus en éléments nutritifs) et la topographie. Modéliser la distribution spatiale des Gypsids, en plus de certaines caractéristiques physicochimiques, est nécessaire à la compréhension du phénomène de variabilité spatiale de ces sols.

Dans notre travail, la modélisation du % de gypse, dans la zone d'étude, permet d'établir une relation spatiale entre les formes de gypse, la morphologie, le type de végétation et les descripteurs de terrain. L'hypothèse secondaire à cette thèse est que le milieu physique a une influence directe sur la distribution des formes de gypse des sols. On combine plusieurs approches sous SIG, partons du MNA et ces dérivées, aux techniques de la géomatique à celles des techniques géostatistiques (artériographie et krigeage). On essaiera de comprendre la relation qui lie le milieu physique avec la répartition des différentes formes de gypse dans la région d'étude, et de déterminer les facteurs prépondérants qui déterminent cette relation par l'utilisation de la modélisation par les réseaux de neurones artificiels (ANN) couplée avec les paramètres physiques de sols et du milieu physique (pH, CE, % CaSO₄, 2H₂O, pente, etc..).

L'originalité de notre travail réside dans l'utilisation de données, de méthodologies et de concepts qui ont été rarement associés les uns aux autres. Par ce travail, nous allons contribuer à la réalisation des cartes de localisation des Gypsids à horizons gypsics et à horizons petrogypsics de la région d'étude et déterminer la relation qui lie la localisation des sols gypseux et le milieu physique d'où l'étude de la variabilité spatiale de la distribution de ces sols. Les investigations se fondent sur les techniques les plus avancées, comme la segmentation classification orientée objet et la géostatistique pour obtenir une qualité de résultats probants. Tout naturellement, les résultats tiennent une part importante dans cette thèse. Ainsi, il paraissait incontournable à aborder l'état de l'art de ces techniques en science de sol.

1.6 Structure de la thèse

Le plan de cette thèse est organisé en quatre parties après l'introduction générale.

La première partie présente la région d'étude sur laquelle des prospections pédologiques ont été menées dans le cadre de cette thèse. Elle replace le site étudié dans son contexte climatique, géologique, géomorphologique, hydrogéologique, et pédologique.

La partie suivante, à vocation bibliographique, décrira les sols gypseux, ainsi que le principe et la mise en œuvre de la télédétection spatiale en pédologie. Elle est composée de deux chapitres.

Dans un premier chapitre seront donc passées en revue les notions sur le gypse élément et minéral et les sols gypseux ayant fait l'objet d'études.

Dans le chapitre II, on essayera de montrer les progrès successifs que la télédétection a apportés au mode de raisonnement en pédologie. On définira la télédétection, on exposera ses atouts et on explicitera le passage de la cartographie par les méthodes classiques des sols à la télédétection ; et en termine par le concept d'états des surfaces en télédétection.

La troisième partie décrit les approches de classes d'informations thématiques et de classes spectrales. Cette partie va nous permettre de répondre finalement à deux questions ? Quelle est la meilleure classification automatique supervisée, entre la méthode par pixel et la méthode orientée objet appliquée sur des images ETM+ de 30 m de résolution et sur des images améliorées à 15 m de résolution par fusions des canaux ETM+ (ré échantillonnés à 15 m) et le canal Panchromatique (15 m) ? Est-ce que la fusion apporte une plus-value pour la caractérisation et la localisation des sols gypseux et leur cartographie ?

Le chapitre récapitule les matériels et les différentes approches méthodologiques et les différentes analyses et traitements effectuées pour identifier, caractériser, localiser et cartographier l'état de surface des formations gypseuses par télédétection, partant de l'acquisition aux différentes étapes de traitement des données et jusqu'à leur préparation à la classification par les deux méthodes par pixels et orienté objet. La cartographie de l'aspect de surface des formations gypseuses amène à faire le lien entre les mesures in situ et les observations spatiales, c'est-à-dire, entre les réflectances exoatmosphériques des propriétés extrinsèques (états des surfaces des couvertures pédologiques). Les résultats obtenus sont présentés et discutés par rapport aux objectifs, qui reprend point par point les différentes étapes de la méthodologie et répond aux deux questions posées en comparons les deux méthodes de classification et présente aussi les cartes produites.

La quatrième partie cherche à déterminer le rôle du milieu physique, en tant qu'élément structural et évolutif du paysage, sur la distribution des sols gypseux à l'échelle du paysage par l'utilisation des SIG et les méthodes géostatistiques (vaïographie et krigeage).

Cette partie compte deux chapitres.

Nous aborderons alors, dans le premier chapitre, par la modélisation numérique du milieu physique et la notion de la distribution spatiale du gypse. L'approche morphopédologique et géologique du sous-bassin versant est utilisé afin d'extraire les grandes unités géomorphopédologique à partir des images satellitaires combinées avec le modèle numérique de terrain, la géologie et l'hydrologie. Pour le sol, c'est d'abord et avant tout connaître son organisation morphologique à travers des transects transversaux de plus grandes pentes NO-SE en allant du piedmont de djebel Boughzel jusqu'à la dépression endoréique la sebka d'Oumache. C'est ce qui nous poussera à aborder, dans ce même chapitre, l'inventaire des ressources en sol (échantillonnage), pour lequel nous tenterons d'analyser la variabilité spatiale des composantes pédologiques, hydrologiques, et géomorphologiques par l'approche géostatistique dans le deuxième chapitre.

Le deuxième chapitre présente, l'inventaire des ressources en sol (dispositifs d'échantillonnage) dans l'aire de la zone d'étude, par une prospection conduite sur 4 transects de 107 sondages, que l'on rapporte à des coordonnées géographiques précises (latitude longitude) par GPS, suivi d'une analyse statistique descriptive des propriétés des sols à partir de descripteurs de position comme la médiane, moyenne, ceux de dispersion l'écart-type et le coefficient de variation (CV), ensuite ceux qui sont indicatrice d'asymétrie et de la kurtose (aplatissement) en va évaluer la normalité de la distribution. Suivi des fondements mathématiques de l'analyse spatiale, les méthodes de prédiction (la variographie) nécessaire à la compréhension de l'ajustement d'un modèle théorique de semi-variogramme et les concepts à la base du krigeage et du cokrigeage. Par la suite, une application des méthodes géostatistique pour la localisation des formes de gypses de surface et de profondeur, par interpolations opérées avec l'outil " spatial analyst" d'Arc Gis sur une Geodatabase, contenant les mesures de 107 échantillons des facteurs pédologiques et autres (piézométriques, altimétriques, etc.) en vue, d'une part, de définir une stratégie de prospection optimale, et, d'autre part, à travers les cartes d'isoteneurs ou factorielles 2D et 3D des différentes variables produites par interpolation par krigeage ordinaire après une modélisation par des variogrammes principalement des taux (%) de gypse et de déterminer la relation reliant le milieu physique (morphologie) sur cette répartition spatiale et sont influencés sur la direction de cette distribution par le calcul de l'autocorrélation spatiale et l'anisotropie par l'intermédiaire du SIG.

En termine le chapitre par la modélisation par les réseaux de neurones pour déterminer l'influence de et/ou des variable (s) analytique (s) des sols et où du milieu physique sur la répartition des formations gypseuses dans le quatrième chapitre.

Vient ensuite la conclusion générale qui devra naturellement exposer les résultats des différentes approches méthodologiques et les perspectives et les pistes de travail dégagées par l'étude dans un objectif d'extrapolation vers d'autres régions de dépourvue de toute cartographie des sols dans la cinquième partie et, finalement, la bibliographie et les annexes.

PARTIE I.

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

1 LA REGION D'ETUDE

La région étudiée dans le cadre de cette mise au point méthodologique se situe dans le sous-bassin versant d'Oued Djedi. Cette région, relativement restreinte pour une méthode qui a vocation à être opérante sur un territoire beaucoup plus vaste, est largement compensé par la très grande diversité géographique de la région d'étude. En effet, sur une transe Nord-sud, des piedmonts de djebel Boughzel à la dépression de sebkha d'Oumache, il est possible d'observer une grande diversité géologique, géomorphologique, pédologique et écologique. Nous insisterons ici surtout sur les corrélations entre la géomorphologique, la pédologique et l'écologique ou la végétation.

1.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE

La région d'étude se place sur la face nord de la plate-forme saharienne, à la sortie ouest de la ville de Biskra. Cette dernière se situe au Nord-Est algérien à environ 470 Km au Sud-Est d'Alger, se trouve à une altitude de 124m, sa latitude est de 34°48' N et sa longitude de 05°44' E et elle s'étend sur une superficie de 21671,2 Km².

Biskra est limitée au Nord par la wilaya de Batna, au Sud par les wilayas de Ouargla, d'El Oued, et de Laghouat, à l'Est par la wilaya de Khenchela et à l'Ouest les wilayas de Djelfa et M'sila (Figure N°1).

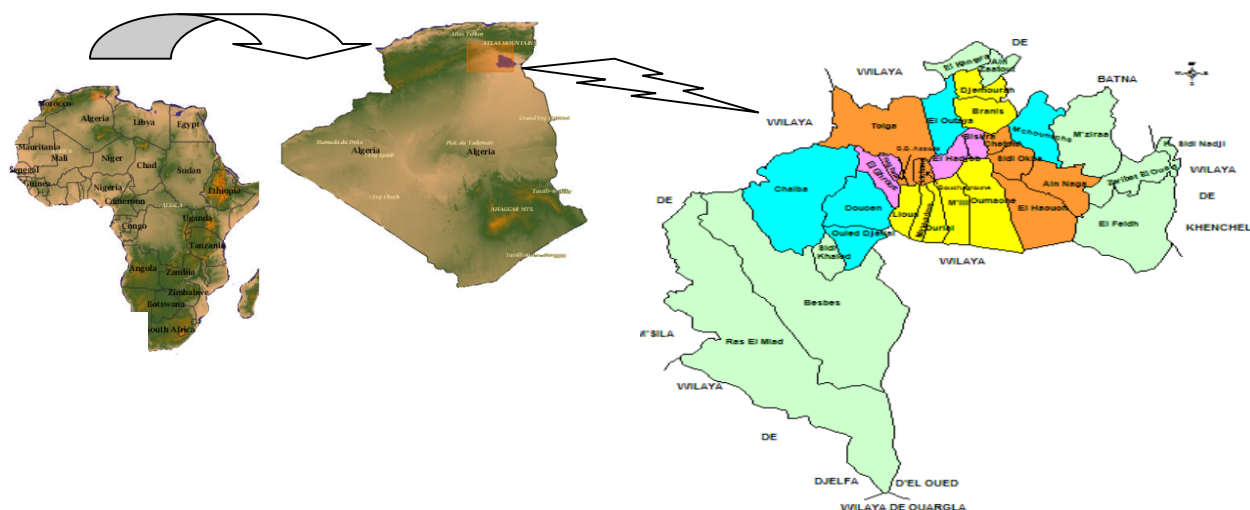


Figure 1- Situation géographique et administrative de la wilaya de Biskra.

1.2 SITUATION TOPOGRAPHIQUE

La région des Ziban, l'une des grandes oasis du Sahara algérien, est composée de deux entités distinctes. Celle située à l'ouest de Biskra est appelé le Zab Gherbi est connue comme étant la région des Oasis est représentée par le bassin versant d'Oued Djedi. Elle regroupe administrativement les communes de Tolga -El Ghrous -Bordj ben azouz - Lichana - Bouchegroune - Foughala et El Hadjeb, qui forment un premier groupement constituant l'axe

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

nord de l'oasis. Alors que l'axe sud de l'oasis est formé par l'ensemble des communes suivantes : Oumeche, Mili, Ourelal, Mekhadema, lioua.

Par contre, l'oasis du Zab chergui se situe à l'est de Biskra. Elle regroupe les communes de Sidi Okba et Chetma, avec les palmeraies de Thouda, seriana et Garta.

La région des Ziban est composée par plusieurs sous-bassins versants (Aidaoui, 1994) (Figure N°2).

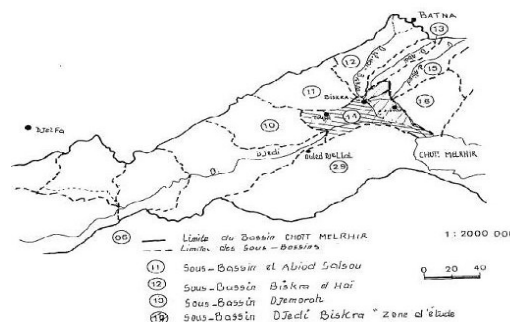


Figure 2- Le sous bassin versant 'oued Djedi

La région d'étude appartenant au sous bassin versant d'oued Djedi (Figure N°2) est localisée au pied de l'Atlas Saharien entre les coordonnées $34^{\circ} 51' - 34^{\circ} 32'$ N de latitude et de $5^{\circ} 11' 49 - 5^{\circ} 48'$ E de longitude avec une altitude de 124 m. Elle s'étend dans un secteur de piémont de 80 km de long d'Ouest en Est, et sur 40 km de large. Elle est limitée au Nord, par les monts du Zab Gherbi et au Sud, par la dépression du chott Melghir. La zone d'étude est limitée par l'Oued Biskra à l'Est et par le plateau de Doucen à l'Ouest.

1.3 CADRE CLIMATIQUE

Cette synthèse climatique et prise du rapport du projet FNR (2008-2011) du CRSTRA (2012) sur les indicateurs biophysiques de la désertification.

1.3.1 Précipitations

À la lecture des données des précipitations moyennes mensuelles recueillies durant la période (1998-2009) (Figure N°3). On note que le climat de la région de Biskra est caractérisé par la faiblesse et l'irrégularité de la pluviométrie mensuelle. Les précipitations moyennes enregistrées au niveau de Biskra durant la période 1998-2009 sont assez faibles, car le maximum est enregistré au mois de janvier avec 19,8 mm seulement. La moyenne des précipitations les plus faibles est notée durant le mois de juillet avec 0,9 mm.

Les données des précipitations mensuelles recueillies durant les années de notre étude (2006--2009) sont reprises dans le tableau N°1.

Le cumul des précipitations annuelles moyennes durant les 21 années (1998 à 2009) est de 133 mm/an. Mai se cumule variée d'une année à une autre (Figure N°4). Le maximum est noté durant l'année 2004 avec un cumul de 297 mm, et le minimum atteint péniblement 49 mm durant l'année 2004.

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

Tableau 1 - Précipitations moyennes mensuelles (mm) de la région de Biskra durant la période 2006-2009

Mois années	Jan.	Fev.	Mar.	avr.	mai	Jui.	Juil.	Aou.	Sep.	Oct.	nov.	Dec.	Total
2006	53,7	29,0	1,0	13,5	11,5	0,2	0,0	0,7	16,2	9,0	28,4	9,8	173
2007	0,0	3,0	11,0	22,0	2,0	0,0	0,0	0,0	36,0	3,0	0,0	2,0	79
2008	4,0	0,5	1,0	0,0	21,0	0,0	0,0	1,0	18,0	40,0	0,5	33,0	119
2009	43,0	11,0	16,0	12,0	16,0	0,0	4,0	0,0	48,0	0,0	1,0	14,0	165

Pour la période d'étude (2006-2009) les données mentionnées dans le tableau N°1, montrent bien l'irrégularité des précipitations durant la période d'étude. Le maximum des précipitations est noté en janvier 2006 avec 53,7 mm et septembre 2009 avec 48 mm. Le cumulent des précipitations annuelles distinctes d'une année à une autre avec un maximum de 173 mm, en 2006 et un minimum de 79 mm en 2007.

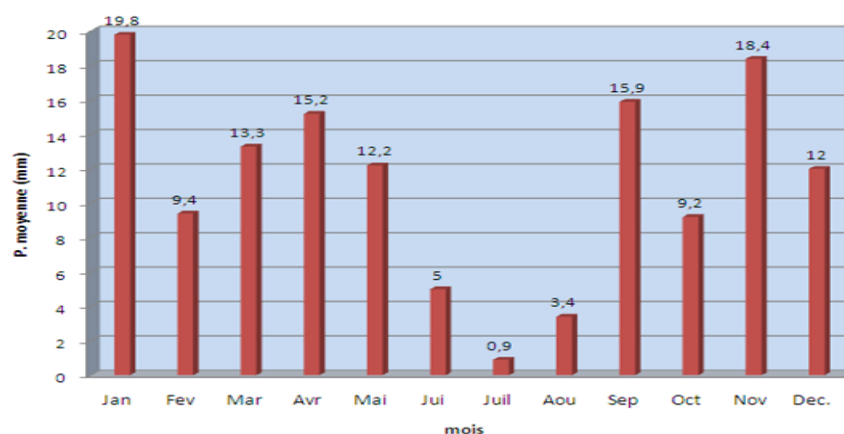


Figure 3 - Précipitations moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période (1998-2009)

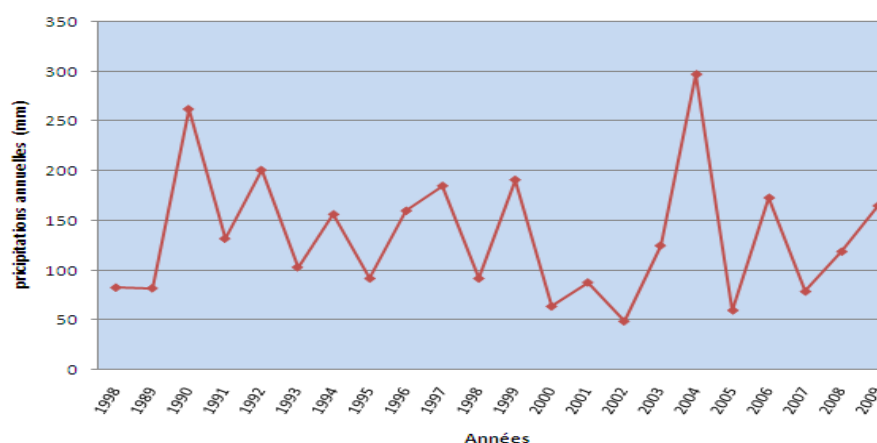


Figure 4 - Cumuls annuels des précipitations dura la période 1998 à 2009

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.**1.3.2 Régime saisonnier**

Pour la végétation, la répartition des pluies est plus importante que la quantité annuelle des précipitations. L'eau qui lui est utile est celle qui est disponible durant son cycle de développement (Aidoud, 1994).

La répartition saisonnière des pluies est notée dans le Tableau N°2.

Tableau 2- Régimes saisonniers de la région de Biskra

STATION \ SAISONS	H	P	E	A	TYPE
Biskra (1991-2007)	41,2	37,5	9,3	43,5	HAPE

Le régime saisonnier de la région de Biskra est de type "AHPE" avec des pluies automnales, hivernales, et même printanières. Selon Dubost (2002), la région de Biskra subit un régime de pluie de types méditerranéens avec un maximum de jours de pluie enregistré en automne et hiver et un minimum en été. Les pluies automnales sont très importantes sur le régime hydrique des sols en région arides, car elle permet des constitués des réserves hydriques par les plantes et dans le sol.

1.3.3 Températures

Dans la Figure N°5 sont représentées les données des températures moyennes des minima, des maxima et des moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période (1998--2009). Alors que dans le tableau N°3 sont reprises les données des températures moyennes des minima, des maxima et des moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période expérimentale (2006-2009). La température moyenne minimale mensuelle la plus basse est notée au mois de janvier (6,7 °C). Alors que la température moyenne maximale mensuelle la plus élevée est enregistrée durant le mois de juillet (40,6 °c). L'examen des températures moyennes mensuelles durant la période s'étalant de 1991 à 2007 montre que le mois le plus froid est janvier avec une température moyenne de 11,4 °C, alors que le plus chaud est le mois de juillet avec une température moyenne de 34,2 °C. Le mois le plus froid est celui de janvier pour les années 2006, 2007 et 2009 avec respectivement TM= 10, 12,2 et 11.9 alors qu'en 2008 le mois le plus froid et celui de décembre (Tm= 10,9). Le mois le plus chaud et celui de juillet pour les années 2006, 2008 et 2009 avec respectivement TM = 34,4 ; 36,2 et 35,9. En 2007 c'est durant c'est le mois d'août qui est le plus chaud (TM= 34,2).

Pour les années de réalisation de l'étude, la température moyenne minimale mensuelle la plus basse est notée au mois de janvier pour les années 2006, 2007, 2008. Tandis qu'en 2009 le mois le plus froid est celui de décembre (Tn= 8 °c).

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

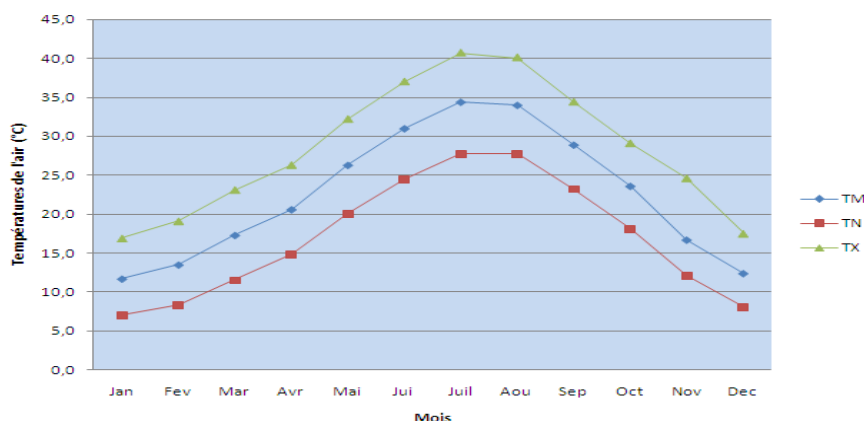


Figure 5 Températures moyennes, minimales et maximales de la région de Biskra durant la période (1998-2009).

Tableau 3 Température moyenne mensuelle (TM), température moyenne des minimas (TN), Température moyenne des maximas (TX) de la région de Biskra durant la période 2006-2009

2006	Jan.	Fev.	Mars.	Avr.	Mai.	Jui.	Juil.	Aou.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
TM	10,0	12,0	17,7	23,2	28,4	31,6	34,4	33,9	27,4	24,6	16,9	13,0
TN	5,7	7,4	11,7	17,0	22,2	24,8	27,9	27,7	21,3	18,2	12,1	9,3
TX	14,8	17,3	23,9	29,3	34,8	38,0	40,8	40,1	32,7	31,3	22,8	17,8
2007	Jan.	Fev.	Mars.	Avr.	Mai.	Jui.	Juil.	Aou.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
TM	12,2	15,4	16,4	20,4	26,6	33,1	33,7	34,2	29,2	24,0	15,9	13,1
TN	6,5	10,4	10,7	14,5	19,7	25,9	26,8	27,9	23,4	19,1	10,9	8,0
TX	19,0	20,8	22,3	25,8	32,7	39,5	40,0	40,3	34,9	28,9	21,8	18,1
2008	Jan.	Fev.	Mars.	Avr.	Mai.	Jui.	Juil.	Aou.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
TM	12,2	13,8	17,8	22,5	26,6	30,8	36,2	34,4	29,5	22,4	15,3	10,9
TN	6,4	7,9	11,8	15,6	20,8	24,1	29,7	28,1	23,9	18,0	10,6	6,8
TX	18,7	19,9	24,0	29,2	32,3	36,7	42,5	40,6	34,9	27,1	20,4	15,8
2009	Jan.	Fev.	Mars.	Avr.	Mai.	Jui.	Juil.	Aou.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
TM	11,9	12,1	16,0	18,5	26,2	32,0	35,9	34,8	27,1	22,9	16,8	13,1
TN	8,3	6,5	9,7	12,8	19,2	25,0	28,6	28,4	21,6	17,1	11,1	8,0
TX	16,5	17,6	22,6	24,3	32,8	38,4	42,7	40,9	32,6	28,9	23,6	19,1

1.3.3.1 Indice de continentalité

La continentalité du climat de la station de Biskra est déterminée par l'amplitude thermique moyenne (M-m) ; ainsi, **Debrach (1953)** a proposé une classification thermique du climat :

- $M-m < 15^{\circ}\text{C}$ climat insulaire ;
- $15^{\circ}\text{C} < M-m < 25^{\circ}\text{C}$ climat littoral ;
- $25^{\circ}\text{C} < M-m < 35^{\circ}\text{C}$ climat semi continental ;

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

- M-m > 35°C climat continental.

Où " M " représente la température maximale et " m " celle des minimums.

Les maxima " M " sont de 40,7 la période (1998-2009). Pour les minima " m ", elle est de 07 °C pour la même période. L'amplitude thermique est de 33.7 °C, ce qui classe Biskra dans la catégorie des régions à climat semi-continental.

1.3.4 Humidité relative

L'humidité relative au Sahara est faible, souvent inférieure à 20 % (**Monod, 1992**). 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**).

Les données recueillies (l'ONM) entre 2003 et 2010, sont représentées la Figure N°6.

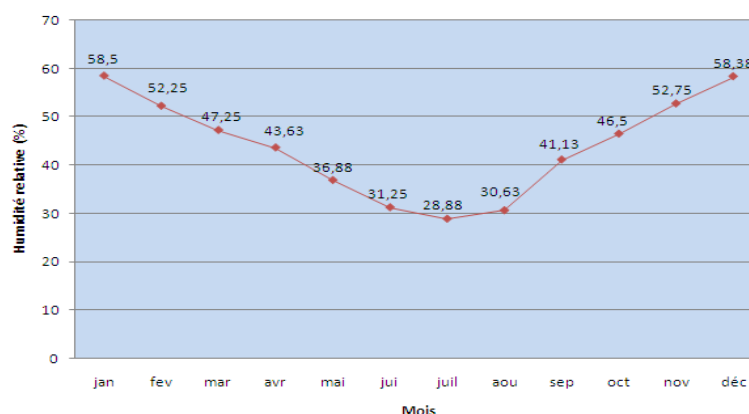


Figure 6 Humidités relatives moyennes mensuelles (%) à Biskra.

Le minimum de l'humidité relative est atteint en juillet (28,88 %) et correspond aux mois les plus chauds. Le maximum d'humidité relative est observé en janvier (58,5 %), suivi du mois de décembre de (58,38 %).

1.3.5 Le Vent

Le vent est un agent important de la désertification. En effet, il accentue l'évapotranspiration et contribue à abaisser l'humidité (**Ozenda, 1983**). Selon **Seltzer (1946)** le sirocco est le vent le plus redouté. D'après **Beniston et Beniston (1984)** c'est un vent extrêmement sec qui entraîne le sable en tourbillonnant.

Dans la région de Biskra, les vents sont fréquents durant toute l'année. En hiver, on enregistre la prédominance des vents froids et humides venant des hauts plateaux et du nord-ouest, les vents issus du sud sont les plus secs et froids (**Benbouza, 1994**).

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

Dans la figure (N°7) sont représentées les données de la vitesse du vent moyen mensuel de la région de Biskra durant la période (1989--2010). Alors que dans le tableau (N°4) sont reprises les données de la vitesse du vent moyen mensuel de la région de Biskra durant l'année expérimentale (2007-2008).

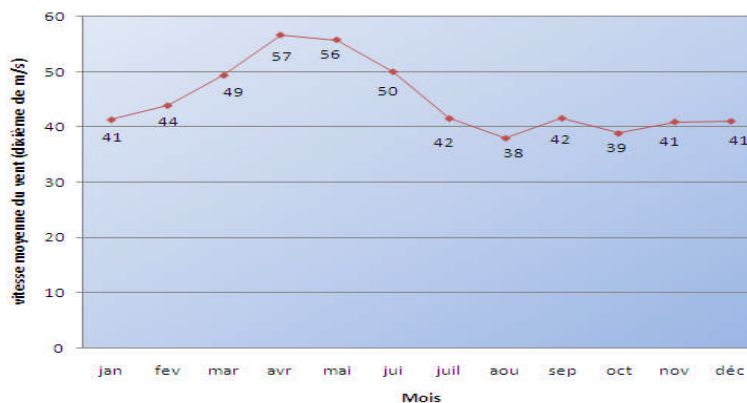


Figure 7 Vitesse moyenne du vent (dixième m/s) dans la région de Biskra durant la période (1991-2007).

Tableau 4 Vitesse moyenne mensuelle du vent (m/s) enregistrée dans la région de Biskra durant la période 2007-2008.

Mois Années	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Jui.	Juil.	Aou.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
2006	4,2	4,2	5,6	5,1	4,3	5,3	4,0	4,2	4,2	3,4	3,2	3,9
2007	2,8	5,5	6,1	5,0	6,1	5,1	3,6	3,9	4,3	4,8	4,5	5,1
2008	2,9	2,5	5,2	5,5	6,8	4,5	4,5	3,5	3,8	3,2	4,1	3,4
2009	4,5	4,6	5,0	5,4	4,0	3,7	3,0	3,4	3,3	3,6	3,4	3,5

Les vitesses moyennes mensuelles du vent au niveau de la station de Biskra montrent une répartition relativement régulière sur toute l'année comprise entre 3.8 et 5.7 m/s, ce qui les classe dans la catégorie des vents modérés. Les valeurs les plus fortes s'observent au printemps atteignant des pics de 5.7 m/s au mois d'avril. Selon **Chabour (2006)** à Biskra, les vents peuvent atteindre des pics de vitesse supérieure à 80 Km/h. et apportent l'humidité de l'Atlantique Nord. Cette région reste tributaire de la circulation des masses d'air propres à la Méditerranée Occidentale avec une ouverture des vents sahariens chauds. Les vents dominants soufflent du Nord-Ouest (32.08 %) avec un maximum secondaire de direction Nord (23.18). Ces vents sont porteurs de pluie. En revanche pendant la saison sèche (été), période où les basses pressions sahariennes sont plus développées et où les vents étiens connaissent également leur maximum de fréquence, les vents ont une direction Sud et secondairement Sud-Ouest. Ces derniers sont, généralement, secs et chargés de poussières et se manifestent par des siroccos qui augmentent l'évaporation. Synthèses climatiques. Nous nous sommes appuyées pour cette synthèse sur le diagramme pluviométrique et le climagramme d'EMBERGER.

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

1.3.6 Diagramme pluviothermique

De nombreux auteurs ont proposé, diverses formules pour caractériser la saison sèche, qui joue un rôle capital dans la distribution de la végétation, notamment par sa durée et son intensité. Selon **Bagnouls et Gaussen (1953)**, un mois est dit biologiquement sec si, « le total mensuel des précipitations exprimées en millimètres est égal ou inférieur au double de la température moyenne, exprimée en degrés centigrades » ; cette formule ($P \leq 2T$) permet de construire des "diagrammes pluviothermiques" traduisant la durée de la saison sèche d'après les intersections des deux courbes (**Dajoz, 1971 ; Mutins, 1977**). Ces diagrammes pluviothermiques ont été réalisés avec les données climatiques relevées durant de la période 1988-2009.

Pour notre région d'étude, les diagrammes ainsi élaborés montrent que, pendant les années 1991 jusqu'en 2007, la période sèche s'étale le long de l'année figure (N°8).

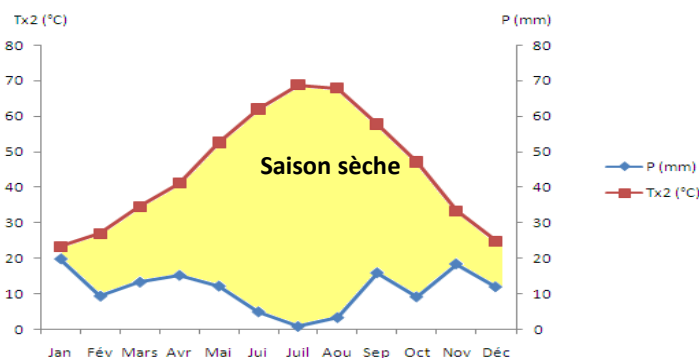


Figure 8 Diagramme pluviothermique de GAUSSEN de la région de Biskra durant la période (1988-2009).

1.3.7 Climagramme d'EMBERGER

Le quotient pluviométrique d'Emberger "Q2" spécifique au climat méditerranéen permet de situer l'étage bioclimatique de la zone d'étude. Ce quotient tient compte de pluviométrie annuelle et des températures moyennes minima du mois le plus froid et des températures moyennes des maxima du mois le plus chaud qui représente selon **Djebaili, (1984)** les deux extrêmes thermiques entre lesquels se déroule la vie végétale.

Emberger (1955) a considéré que le Quotient pluviométrique Q2 était insuffisant pour souligner à lui seul l'action des températures. De ce fait, il propose de combiner le Q2 et m sur un climagramme comme les abscisses représentent les valeurs de m et les ordonnées celles de Q2.

Les limites représentées sur le climagramme séparant Les différentes zones, c'est-à-dire là où un changement net de la végétation a été observé.

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

Pour définir les divers types de bioclimats de la région méditerranéenne, **EMBERGER** (1933 – 1955) propose la formule suivante :

$$Q_2 = (M+m)/2 (M-m) \quad \text{Équation 1}$$

Q₂ : Quotient pluviométrique.

P: Pluviosité moyenne annuelle (mm).

M: Moyenne des maxima du mois le plus chaud (°C)

m: moyenne des minima du mois le plus froid (°C).

M+m/2 : Température moyenne (°C)

M-m: Amplitude thermique (°C).

Pour l'Algérie, **STEWART**, (1969), en simplifiant la formule d'EMBERGER obtient :

$$Q_2 = 3.43 P/ M - m \quad \text{Équation 2}$$

P: pluviométrie moyenne annuelle (en mm).

(M-m): Amplitude thermique (M et m sont exprimé en degrés Celsius).

L'indice **Q₂** calculé par cette formule est égal à **13,38** (tableau N°5).

Le climagramme considère qu'une région est d'autant plus sèche lorsque le quotient est plus petit. L'emplacement de cet indice sur le climagramme d'EMBERGER, nous a permis de situer Biskra dans l'étage bioclimatique Saharien à hivers doux (Figure N°9).

Tableau 5 Quotient pluviométrique et étage bioclimatique de la région de Biskra

Station	Q ₂	m	Bioclimat	Variante
Biskra	13,38.	7	Saharienne	Hiver doux

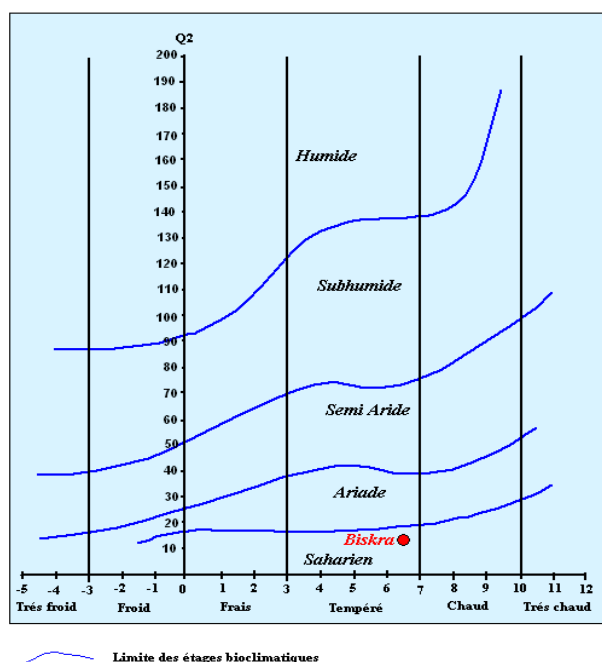


Figure 9 Localisations de la région de Biskra sur le climagramme d'EMBERGER

1.4 Géologie générale de la région

1.4.1 Les principales unités structurales des Ziban

La région de Biskra appartient aux deux grands ensembles structuraux (figure N°10):

- **L'atlas Saharien** : au nord formant une longue suite de reliefs orientés NE-SO, C'est le domaine de la berbérie (**Busson, 1989**) limité au sud par la flexure sud atlasique (**Chabour, 2006**).
 - L'Atlas saharien est né d'un long sillon subsident compris entre les hauts plateaux et la plate-forme saharienne. Au Mésozoïque, ce sillon fut comblé par une puissante série sédimentaire (7000 à 9000e). Durant le Tertiaire, une tectonique compressive réactive les structures extensives antérieures en failles et structures inverses aboutissant à la formation de cette chaîne montagneuse ;
 - Les monts des Aurès prolongent l'Atlas saharien vers le Nord-Est. Ils se présentent sous forme d'une série de synclinaux et anticlinaux de direction ENE (**Guiraud, 1990**). Sa jonction avec la plaine d'El Outaya et Biskra se fait par l'intermédiaire des djebels Metlili, El Azreg (dans sa partie méridionale) ;
- **La plate-forme saharienne** : relativement stable, où la tectonique est moins prononcée, appartient au craton africain. Elle est caractérisée, en général, par des régions plates (**Chabour, 2006**). Elle comprend un socle précambrien sur lequel repose en discordance une puissante couverture sédimentaire, structurée au

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

Paléozoïque en plusieurs bassins sédimentaires. Ces derniers sont délimités par différents éléments tectoniques et dans lesquels la lithostratigraphie est plus ou moins complète.

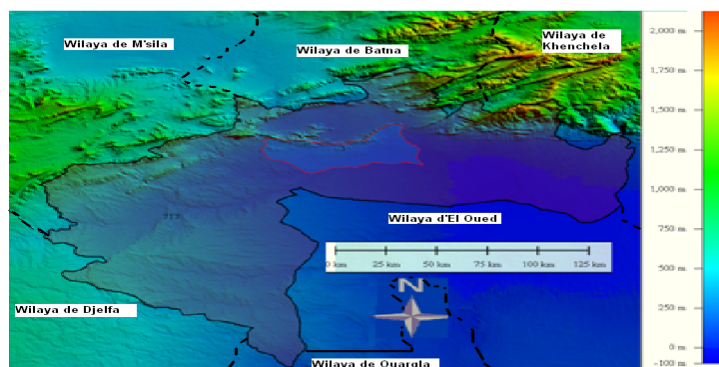


Figure 10- Les principales unités structurales de la région d'étude

1.4.2 Stratigraphie de la région d'étude

1.4.2.1 La géologie de la région

La Région de Biskra a fait l'objet de plusieurs études géologiques, dont celle de **Laffitte** (1939), **Gousskov** (1964), **Cornée** (1989), **Mauget** (1957) et les travaux de **Chebah**, (2007); qui constituent les références de base utilisées dans la synthèse géologique du Sahara Algérien.

Du point de vue stratigraphique la région de Biskra représente un paysage de transition structurale et sédimentaire. Une transition progressive entre le domaine atlasique et le domaine saharien septentrional, car la continuité géologique de part et d'autre de l'accident sud atlasique est vérifiée entre Branis et Chetma. C'est une région "synorogénique" liée principalement à la tectonique de l'orogène atlasique (alpine). À tout moment les phénomènes tectoniques synsédimentaires d'ampleurs diverses commandent la sédimentation, par conséquent, le devenir des bassins. La région de Biskra (esquisse géologique) se caractérise par des terrains sédimentaires, allant du Barrémien à la base jusqu'au Quaternaire (figure N°11). La région d'étude a vécu du Miocène au Quaternaire et en partie à l'actuel. Elle appartient à un ensemble d'aires sédimentaires diachrones plus ou moins indépendantes qui se sont surimposées à l'orogène tellien ou hercynien (**Guiraud, 1990**).

Dans toute la région, les parties centrales des bassins sont formées par une suite de vastes dépressions remplies de sédiments quaternaires (et mio-pliocènes par endroits), séparées par des reliefs montagneux limités ou recoupés par des accidents transverses : des seuils (paléo structures) sur lesquelles affleure le Néogène (Miocène et Pliocène). Les massifs bordiers, tant au Nord qu'au sud de l'accident sud atlasique, montrent des affleurements importants. Le type de l'érosion, l'absence ou la rareté de la végétation, ont permis de lever des coupes dans

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

les sédiments siliciclastiques ou confinés sur les marges des bassins, déposées tout le long du Néogène (Chebah, 2007).

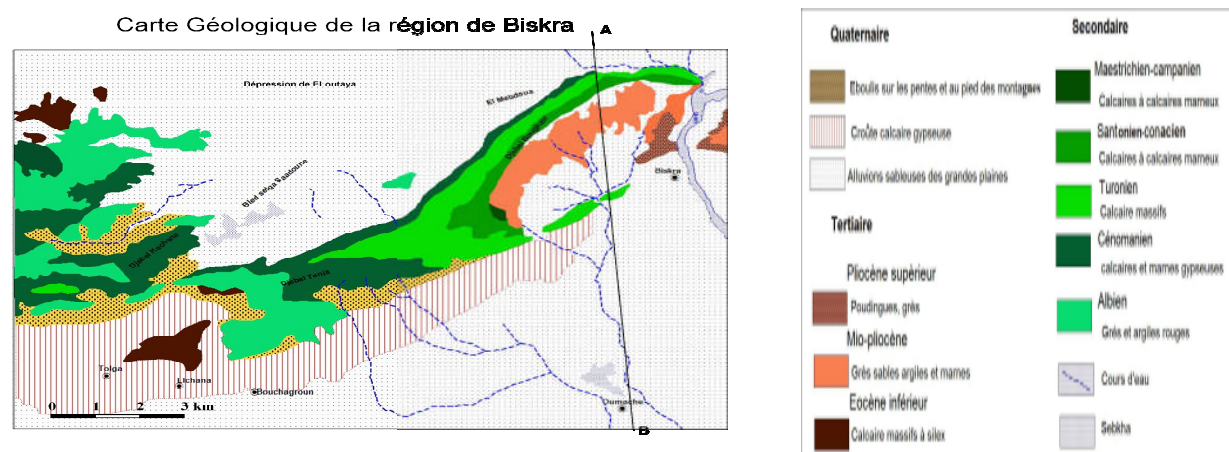


Figure 11 Esquisse Géologique de la région d'étude « Extrait de la Carte Hydrogéologique de Biskra » Carton esquisse géologique et tectonique»

1.4.2.1.1 Coupes géologiques

Plusieurs coupes géologiques ont été réalisées à partir des corrélations établies entre les différents forages et sondages existants dans la région exemple la figure N°12. Ces derniers, nous ont permis de déterminer l'extension des aquifères en profondeur ainsi que l'effet des failles et la flexure Sud atlasique sur la structure des réservoirs.

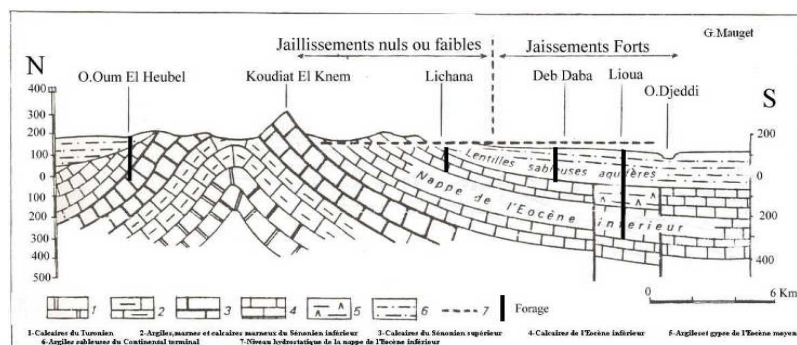


Figure 12 Coupes géologiques schématique de la région de Biskra (Mauget, 1957)

1.4.2.1.2 Quaternaire

1.4.2.1.2.1 Actuel

Ce sont principalement des éboulis et les cailloutis aux pieds des montagnes et sur les pentes, des dunes constamment en mouvement et des alluvions sableuses et caillouteuses dans les lits actuels des oueds.

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

1.4.2.1.2.2 Moyen

Il se présente sous forme de Croûte dite « deb-deb » dont le dépôt se poursuit sans doute encore de nos jours. C'est une formation calcaire- gypseuse atteignant jusqu'à deux mètres d'épaisseur, Elle occupe les contours des montagnes qui présentent des flancs calcaires (Tolga, Bouchagroun, Lichana, Ain Ben Noui), des travertins de sources anciennes qui datent aux environs des sources Oumach, Mlili et Megloub. Les sources actuelles sondent 4 à 5m au-dessous des anciens dépôts travertineux.

Des alluvions sablonneuses et argileuses dans toutes les grandes plaines sur la rive gauche de l'Oued Djeddi.

1.4.2.1.2.3 Terrasses anciennes

Cette terrasse est bien développées dans la partie Est de la région, vers l'Oued Biskra. Aux environs des régions montagneuses, elle est principalement formée de poudings remplacés progressivement par un dépôt sableux et argileux vers le sud de Biskra.

1.4.2.1.3 Miocène

1.4.2.1.3.1 Miocène Supérieur (Pontien)

Il affleure seulement dans la dépression (combe) de l'anticlinal du Djebel Bou Rhezal.

Il est représenté par des argiles et des marnes multicolores souvent très sableuses. C'est un dépôt continental détritique : argiles, sables, graviers et marnes.

1.4.2.1.3.2 Pliocène

Il est représenté par des poudings, des bancs de grès et d'argiles sableuses à proximités des massifs (Chetma, Chaïba et Oueled Djellal) passant à des couches rouges sableuses et gypseuses dans la plaine. Aussi il est représenté par la croûte calcaire- gypseuse englobant souvent des masses des poudings, des sables et des graviers dans le sud de l'Oued Djedi.

1.4.2.1.4 Paléogène (nummulitique)

1.4.2.1.4.1 Eocène moyen (Lutétien)

C'est un dépôt exclusivement lagunaire représenté par des argiles; du gypse en couches épaisses, anhydrites et des calcaires dolomitiques. Il affleure au Sud du djebel Kahila et au sud du djebel El Ksoum. Les couches gypseuses et calcaires sont très développées dans la région d'Ouled Djellel, ou elles forment des niveaux constants d'une extension considérable (rive gauche de l'Oued Djedi).

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

1.4.2.1.4.2 Eocène inférieur

Sa puissance varie entre 150 et 200 mètres représenté par des calcaires blancs riches en silex noirs, il affleure au nord de Tolga.

1.4.2.1.5 Crétacé

1.4.2.1.5.1 Le Crétacé supérieur

1.4.2.1.5.1.1 Le Cénomaniens supérieur

Il est représenté par des calcaires cristallins et dolomitiques en couches très épaisses, des intercalations lagunaires marneuses et gypseuses très nombreuses à l'Ouest (Djebel Gouara et sur le flanc nord du Djebel Bou Rhzal).

1.4.2.1.5.1.2 Le Cénomaniens inférieur

Il affleure sur le flanc nord de Djebel Bou Rhzal, sa puissance est de 300 à 400 m de calcaires gris ou blanc alternant régulièrement avec des marnes grisâtres, parfois gypseuses.

1.4.2.1.5.1.3 Turonien

Il est représenté uniformément dans toute la zone montagneuse par un niveau massif de 200 à 300m d'épaisseur composé de calcaires cristallins, de calcaires marneux et de calcaire dolomitique.

1.4.2.1.5.1.4 Cénomaniens

Ce terrain affleure aux deux extrémités de la région de Biskra; à la combe de l'anticlinal du Djebel Bou Rhzal et au Nord - Est du Bordj Chaïba. Sa puissance est de 500m de calcaire marneux avec intercalations marneuses et gypseuses,

1.4.2.1.5.2 Le Crétacé inférieur

1.4.2.1.5.2.1 Albien

Il affleure dans la combe de l'Anticlinal du Djebel Bou Rhzal et au Nord- Est de Chaïba, il est constitué en majeure partie par des grès rouges ou gris avec intercalation d'argiles rouges, sa puissance est d'environ 250m.

1.4.2.1.5.2.2 Aptien

Cette couche est visible seulement vers Chaïba; elle présente un faciès lagunaire avec intercalations marines, il est constitué par des argiles et des marnes multicolores, anhydrites, calcaire dolomitiques et dolomies. Sa puissance est d'environ 60 m.

1.4.2.1.5.2.3 Barrémien

Cette couche affleure uniquement vers Chaïba, elle est constituée par les grès rouges avec quelques intercalations argileuses, le Barrémien est le terme le plus anciens visible dans la région de Biskra.

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.**1.5 Tectonique**

En ce qui concerne la tectonique, le Nord de la wilaya est affecté par le grand accident tectonique, connu sous le nom de " la flexure Sud atlasique ", qui est une sorte de cassure séparant la partie Nord du pays (le Tell) de la zone effondrée désertique (le Sahara). Cet accident est caractérisé par la présence de multiples failles (tectonique cassante) et d'une structure souple et plissée (tectonique souple).

1.6 Hydrologie de la région

Toute la région de Biskra appartient au bassin versant du Chott Melghig.

D'après **Hannachi et Bekkari (1994)**, la région de Biskra est drainée par une série d'Oueds (figure 13) dont les plus importants sont :

- Oued Djedi : qui dans sa partie amont est l'Oued M'zi (Laghouat) ;
- Oued Biskra : dans sa partie amont est oued El Hai, aurait un débit annuel de 16 millions de m³ (**Dubost, 2002**) ;
- L'oued Biskra, son réseau hydrographique est constitué par un grand nombre d'affluents et sous affluents, qui collectent les eaux de ruissellement du Sud-Ouest de l'Aurès, au Nord de la ville de Biskra, qu'ils traversent avant de se déverser dans le Chott Melghir. L'oued Biskra résulte de la jonction de deux affluents : oued el hait et oued Djemoura, qui draine respectivement une superficie entre 1788 et 906 km², dont la confluence donne naissance à l'oued Biskra à une altitude de 200m (**Chabour, 2006**). L'oued El Hai prend son origine sur les flancs d'Atlas Saharien, qui à son tour prend sa naissance du confluent des deux oueds : oued Fedhala issu du djebel Ich Ali (1815m) et l'oued Tilatou qui descend des monts de Bellezma (2091m) et coule dans la direction SE-NO. L'oued Djemoura résulte aussi de la jonction de deux oueds : oued Abdi qui prend sa source du Djebel Lazreg (1937m) et Djebel Boutlarmine (2178m), il coule vers le Sud-ouest (**Chabour, 2006**). Oued El-Arab : sépare le massif des Aurès de celui des Nemencha ;
- Oued El-Abiod : qui alimente le barrage foug el khorza, le débit moyen annuel de l'oued el-Abiod est estimé à 18 millions de m³ (**Dubost, 2002**).

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

Le couplage des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des formations dans le secteur étudié montre que les formations susceptibles d'être aquifères et présentant un intérêt hydrogéologique sont représentées essentiellement par :

1. Nappe phréatique du quaternaire

La nappe du quaternaire, d'une profondeur comprise entre 20 et 150m, présente un débit entre 5 et 10 l/s et d'une qualité chimique moyenne et dans certains cas, elle peut être médiocre. Elle est connue au niveau des palmeraies de Tolga et se localise souvent sur des accumulations alluvionnaires. On classe dans cette catégorie, la nappe de l'Oued de Biskra et celle de l'Oued Djedi. Elles doivent leur alimentation normalement à partir des précipitations, d'infiltration des Oueds et des eaux d'irrigation. La plupart des eaux de cette nappe sont salées ou très salées. Elle est fortement exploitée dans les régions d'Ouled Djelal, Sidi Khaled et la ville de Biskra (**Khechai, 2001 ; ANAT, 2002**).

2. Nappe profonde

La nappe des grès de la Continental intercalaire où nappe albienne est un réservoir très important constitué essentiellement de grès et de marne d'âge Albien et Barrémien. Elle est caractérisée par une profondeur oscillant entre 1600 et 2500 m et d'un débit moyen de 80 l/s jaillissants. La qualité de l'eau est généralement bonne et ne dépasse pas les 2 g/l de Résidu Sec. La température de l'eau peut dépasser les 60°C. Son exploitation est très coûteuse en raison de sa profondeur (**ANAT, 2002 ; Rouahna, 2007**).

a. Nappe des calcaires

Cette nappe est constituée essentiellement de calcaire fissuré d'âge Éocène et Sénonien :

- **Nappe des calcaires du Sénonien**, d'une profondeur de 200 à 900m avec un débit moyen de 20 l/s et d'une qualité chimique bonne à moyenne (**ANAT, 2002**).
- **Nappe des calcaires de l'Eocène inférieur**, d'une profondeur qui varie de 100 à 500m, d'un débit moyen de 20 l/s et d'une qualité chimique moyenne (**ANAT, 2002**). Cette nappe est localisée dans la totalité de la région de Biskra. Elle est plus exploitée qu'à l'Est de Biskra à cause des faibles profondeurs relatives de captage. À l'Ouest, la profondeur de 150 à plus de 200m alors qu'à l'Est, la profondeur dépasse les 400ms (**Haouchine et al., 2010**). L'alimentation de cette nappe se fait par deux zones d'affleurement de l'éocène inférieur, la première à l'Ouest de Daoucèn et Ouled Djellal, la seconde au Nord de Tolga, entre Foughala et Bouchegroune et les versants de la plaine de l'Outaya. Cette nappe subit une baisse de niveau piézométrique suite à la surexploitation (**Khechai, 2001**).

b. Nappe des sables

On peut distinguer deux types de nappes :

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

- **Nappe des sables du Pontien**, sa profondeur est comprise entre 500 et 900 m, d'un débit jaillissant de 8 l/s et d'une qualité chimique moyenne.
- **Nappe des sables du Mio-pliocène**, elle est captée à une profondeur moyenne de 250m, d'un débit moyen de 15 l/s et d'une qualité chimique moyenne (ANAT, 2002)

Cette nappe a une extension considérable. Elle est captée par de nombreux forages dans les plaines. Son épaisseur reste faible sur les piedmonts et augmente au milieu de la plaine. Son alimentation est assurée par les pluies exceptionnelles dans les zones d'affleurements, les exutoires sont constitués par les sources (telle la source de Sebaa Mgataa) et par les vastes zones d'évaporation. L'écoulement de cette nappe se fait du Nord-Ouest vers le Sud-Est pour déboucher au chott Melghigh (Khechai, 2001).

1.8 Le drainage de la région d'étude

Sans insister sur le rôle primordial de l'eau dans le développement des sols gypseux, on peut signaler l'importance du régime hydrique sur le développement de types particuliers de sols, ainsi que des caractéristiques morphologiques et chimiques de certains sols arides. La répartition nord-sud de certains types de sols dans la région d'étude souligne l'importance du drainage comme facteur de différenciation des sols. Souvent d'ailleurs, l'action des cations alcalino-terreux et un drainage déficient se conjuguent pour donner naissance à différents types de sols.

Le modelé glaciaire, si fréquent dans les régions arides, limite les possibilités de drainage et provoque ainsi une tendance à l'engorgement dans la plupart des horizons de surface. Mais à cette action le modelé se superpose celles des conditions climatiques propres aux milieux arides. La concentration des précipitations en courte période renforce l'hydromorphie de surface qui peut naître même sur des sables apparemment bien drainés. Il en résulte que de nombreux sols de la région sont hydromorphes ou intergrades hydromorphes. Les engorgements temporaires ont un rôle fondamental sur la mobilisation du fer et, d'une façon générale sur tous les éléments dont la solubilité varie avec le potentiel d'oxydoréduction. Le régime hydrique marque également l'individualisation et l'évolution des sols gypseux.

1.9 Géomorphologie de la région d'étude

La région de Biskra constitue la transition entre les domaines atlasiques plissés du Nord et les étendues plates et désertiques du Sahara au Sud (Chebah, 2007). Elle se présente, en général, comme un piedmont sans relief marqué, qui relie par une pente douce ; Les chaînes atlasiques aux étendues Sahariennes du Sud (Gousskov, 1964). Une seule structure est perceptible, c'est celle de l'anticlinal du Dj. Bou Rhezal.

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

1.9.1 Les formes d'érosion

1.9.1.1 La combe du Djebel Bou Rhezal

L'anticlinal du Dj. Bou Rhezal a subi une érosion énergique aboutissant à une inversion totale du relief. Cette combe a été formée lors de l'érosion oligocène très active qui a affecté le relief montagneux.

1.9.1.2 Les chevrons

Ils sont visibles surtout sur le contour de la combe.

1.9.1.3 Les cônes de déjection

La combe constitue un bassin de réception des eaux déversées. Ces derniers se concentrent au noyau pour former des cônes de déjections.

1.9.1.4 Les glacis

Ce sont des formations du quaternaire moyen, dites « Deb-Deb » qui représentent une formation calcaro-gypseuses. Ils s'étendent aux pieds des reliefs et se terminent dans les sebkhas, dans l'arrière pays.

1.9.1.5 Les escarpements d'érosion

Ils se localisent dans la combe du djebel Bou Rhezal, dans les Oueds. Ils sont réalisés par l'action des eaux, les plus importantes se localisent dans l'Oued Zemor et Oued Ain Oumach.

1.9.1.6 Les accumulations de sable

Ce sont les édifices éoliens les plus représentés. Ils sont encroûtés et constituent des étendues le long des glacis. Leur présence rend la mise en valeur des sols difficile.

1.10 Relief

Le relief (figure 14) du sous-bassin versant d'Oued Djedi est constitué de quatre grands ensembles géographiques (CRSTRA, 2008) :

- ✓ **Les montagnes** situées au nord de la région presque découverte de toutes végétations naturelles (dj. Sidi Ghzal et Dj. Thenia);
- ✓ **Les plateaux** : Ils s'étendent du Nord au Sud englobant presque la totalité des daïrates d'El Hadjeb, Oumache et une grande partie de Tolga et Doucene ;
- ✓ **Les plaines** se développent vers l'est et couvrent la quasi-totalité des daïrates ourlel, MA Lili et m'khadma ;
- ✓ **Les dépressions** : dans la partie Sud-ouest de la wilaya de Biskra, (sebkha Oumache).

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

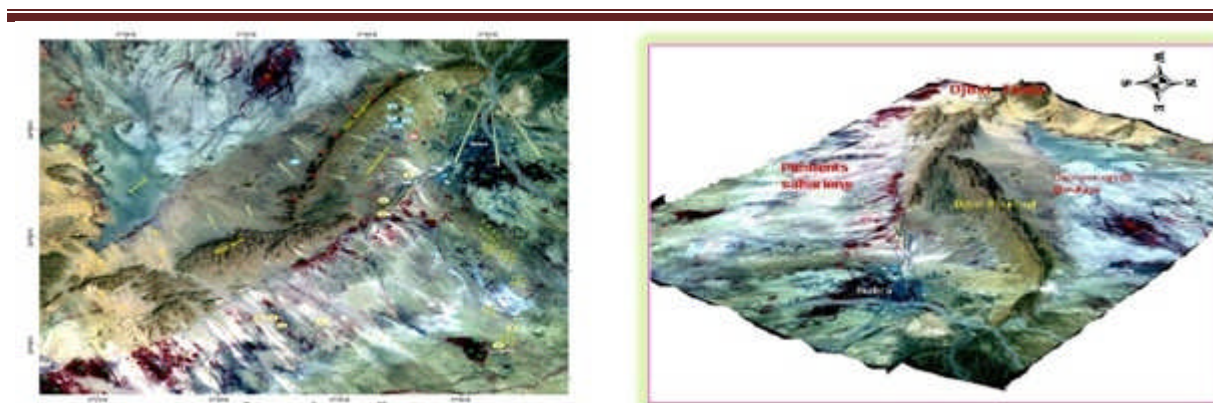


Figure 14 Spatiocarte des grands ensemble géomorphologique de la région d'étude avec une vue en 3 D.

1.11 Contexte pédologique des ziban

L'inventaire des sols reconnus dans la région montre l'existence de plusieurs types de sols dont les traits pédologiques sont : la salinisation, les apports évolués, les remontées capillaires et les apports alluvionnaires et colluvionnaires, qui sont regroupés en 06 classes (**Aubert, 1964**) (figure 15).

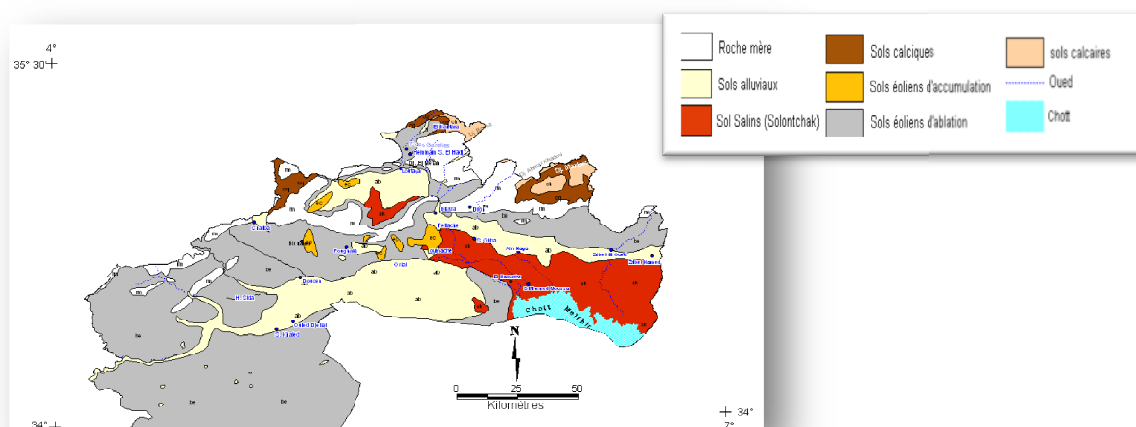


Figure 15 Carte des Sols de la région de Biskra numérisée
(Source carte des sols d'Algérie feuilles Biskra et Tébessa par Duran et Barbut (1954))

L'étude de la répartition des sols illustre parfaitement l'action primordiale du climat, de la morphologie et de la végétation sur le développement de ces sols ; à cela, il faut ajouter que certains autres facteurs comme la nature du matériau originel, le drainage et les influences anthropiques anciennes ou récentes ont un rôle important sur l'évolution et la répartition des sols.

On peut y reconnaître 3 types de régions :

- Les régions sud sont surtout caractérisées par les accumulations salées, gypseuses

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

et calcaires ;

- Les régions sont, sont définies par les sols alluvionnaires et les sols colluvionnaires ;
- Les zones du nord (ou zone de montagne) dont le siège de la formation des lithosols et des sols peu évoluent peu fertiles ;
- Enfin, la plaine située au nord-est de Biskra où les sols argileux sodiques irrigués par les eaux fortement minéralisées constituent le caractère de la pédogenèse de cette région.

1.11.1 Classification des sols

Celle-ci est fondée sur la classification des sols utilisés par les pédologues français en zone tropicale aride (**Aubert, 1964**).

On distingue 7 classes :

- I. Sols minéraux bruts ;
- II. Sols peu évolués ;
- III. Sols calcimagnésiques ou calcimorphes ;
- IV. Sols halomorphes.

Parmi ces classes énoncées ci-dessus, les sols calcimorphes, peu évolués d'apport éolien et halomorphe, sont plus largement représentés dans le sous-bassin versant.

Selon **Barbut (1954)**, Au Nord les Monts des Nementcha sont calcico-basiques. Les sols calcaires s'étendent à l'Est des Monts de Tebe. À l'Ouest, la ceinture du Djebel Bou Rhezal repose sur la roche-mère nue. La zone du Chott Melrhir, au Sud, est formée par des sols éoliens d'ablation et d'accumulation.

1.12 Les formations végétales

La région des Ziban (Biskra) constitue un exemple-type où les formations pédologiques semblées exercent une influence sélective sur la végétation. Les espèces végétales se groupent dans des aires, suivant leurs exigences édaphiques précisément, en des ensembles structurés appelés phytocénose (**Laadjel, 2005**).

Le couvert végétal naturel rencontré à travers la wilaya est de type dégradé, il est constitué de touffes de plantes clairsemées adaptées au sol et au climat. Dans la zone sud, la végétation devient plus rare et plus dégradée du fait de la surexploitation des quelques nappes vertes. La zone nord montagneuse est assez dénudée, exception faite pour quelques rares zones forestières, comme la région de Mezbala, où se trouve le point culminant de la wilaya, le djebel Taktiout (1931m) (**ANAT, 2003**).

Selon **Guezoul, (2005)**, L'exploitation agricole est fortement influencée par les conditions physiques locales, la géomorphologie, la topographie, la circulation de l'eau. L'une des

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

meilleures cultures arboricoles, qui s'adapte le mieux au sol et au climat de la région, est celle du palmier dattier qui constitue la richesse principale de la population locale comme Tolga, oumache et Biskra. Les cultures maraîchères sont pratiquées dans les Oasis. Parmi les espèces herbacées et arbustives que l'on peut rencontrer dans la zone d'étude, on peut citer : Salsola vermiculata; Tamarix articulata ; Atriplex halimu ; Helianthemum (Helianthème)

1.13 CARACTERISTIQUES AGROS PEDOLOGIQUES

La plupart des sols du sous-bassin versant sont exploités depuis fort longtemps par les paysans et de façon traditionnelle. L'exploitation intensive de ces sols ne sera pas une chose aisée, car ces sols n'ont pas été bien étudiés. Ce type d'exploitation non raisonnée risquerait d'aboutir à l'épuisement et de causer un appauvrissement très marqué de ces sols par salinisation voire même par la désertification. D'autre part, l'exploitation excessive de certains sols, particulièrement les sols sableux et l'apport d'engrais organiques (fumier de poule), se concrétise souvent par des remaniements des horizons de surfaces qui affectent leur texture sableuse et qui ont conduit à une action immédiate positive sur le rendement et la fertilité des sols dégradés. Il résulte de ces diverses données que les sols de la région représentent une certaine originalité qui les différencie sensiblement des sols de régions sahariennes comparables.

1.14 LA SALINITE DANS LE ZAB EL GHARBI

La plupart des sols des Oasis contiennent des quantités de sels importantes qui sont considérées ailleurs comme prohibitive pour presque toutes les cultures (**Dubost, 2002**). Les sols salés présentent vis-à-vis de leur environnement naturel ou anthropisé des contraintes variées dans leur intensité et leur extension. La salinité des sols est un véritable handicap pour le développement agricole, elle est accentuée dans les zones arides et semi-arides (telles que les Zibans) où certains facteurs sont plus présentés. La température élevée, ce qui conduit à une augmentation de l'évapotranspiration, les précipitations faibles, la durée de la sécheresse et les nappes jouent un rôle dominant dans la salinisation des sols, les qu'elles ont des effets néfastes sur le sol et les plantes (**Bensaid R. et al., 2006**).

Les sols sont considérés salins dès que la conductivité électrique dépasse 4ds.m⁻¹ à 25°C (**Richard, et al., 1954**). Cette concentration est dépassée largement dans notre région d'étude.

D'après **Djili et Daoud (1999)**, **Legros, (2009)** il y a quatre principales causes de la salinisation des terres cultivées. La qualité médiocre des eaux d'irrigation, l'insuffisance d'eau pour lessiver les sels, mauvais drainage des sols et la faible profondeur de la nappe phréatique (photo 01).

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.



Photo n°01 : la salinité de sol dans la région d'étude

2 CONCLUSION PARTIELLE

À travers la présentation du milieu physique de la zone d'étude, on ne peut conclure que :

- ✓ *Localisation géographique de la wilaya de Biskra est un véritable espace tampon entre le Nord et le Sud, à environ 400 km au sud-est de la capitale ;*
- ✓ *Par sa position géographique, la région des Ziban est une région de contraste structural, entre deux domaines géologiques et morphologiques distincts : le domaine atlasique du nord et le domaine saharien du sud ;*
- ✓ *La région de Biskra constitue une partie de la transition entre le domaine atlasique plissé du Nord (Atlas Saharien) et les étendues plates et désertiques du Sahara.*
- ✓ *La région d'étude appartient à l'étage bioclimatique aride inférieur (P entre 200 et 100 mms) à hivers doux (Pouget, 1980). Les précipitations s'abattent presque toujours sous forme d'averses violentes. Les eaux déversées se concentrent dans les vallées des oueds et sont charriées vers les chotts (chott Melrhir). La température moyenne sur toute l'année est de 22,39°C avec une forte variation saisonnière. La température maximale est de l'ordre de 36,4°C pour le mois de juillet avec une évapotranspiration de 420,8 mm et la température minimale est de l'ordre de 9,3°C pour le mois de janvier avec 110,8 mm.*
- ✓ *Le réseau hydrographique, assez marqué à proximité des reliefs, devient endoréique et s'achève le plus souvent dans la plaine au niveau de dépression fermée sebkha d'Oumache pouvant être en eau durant quelques mois, au cours des années les plus arrosées.*
- ✓ *Le relief de la wilaya de Biskra peut être schématiquement décomposé en quatre grands ensembles géographiques homogènes : les montagnes, glaciais, les plaines, et les dépressions ;*
- ✓ *Les sols sont étroitement liés à la géomorphologie et la géologie du substratum ;*

CHAPITRE I. ELEMENTS DE PRESENTATION GENERALE DU MILIEU NATUREL.

-
- ✓ *Le caractère lithologique général du site est occupé d'après Laffite (1939) in Aidaoui (1994), Kouskov (1964), par une formation dite « Deb deb » que l'on peut rapporter au quaternaire moyen, représenté par plusieurs niveaux de glacis encroûtés (gypse et calcaire), mais dont le dépôt se poursuit sans doute encore de nos jours (Pouget, 1989).*
 - ✓ *Il y a plusieurs types de sols dans la région sont : les sols salés, calcaires, gypseux, gypseux calcaires, sols à formation éolienne, sols argileux sodiques, sols peu évolués d'apport alluvial, sols alluvionnaires.*
 - ✓ *Le paysage végétal du territoire de la région de Biskra est constitué par des formations steppiques naturelles et des oasis de palmier-dattier. Le couvert végétal naturel est conditionné par la disposition morphopédologique. En effet, il est de type xérophyte structuré en plusieurs groupements : les gypsophytes (*Limoniastrum guyonianum*) sur les substrats gypseux et calcaires ; les halophytes (*Salsola vermiculata*), les hyperhalophiles (*Halocnemum strobilaceum*) sur les faciès salins et les psamophytes (*Aristida pungens*) sur les formations éoliennes.*

PARTIE II

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I. LA NOTION DU GYPSE & DES SOLS GYPSEUX

CHAPITRE II. L'EVOLUTION DE LA CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION.

Chapitre I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

Chapitre I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

1 LE GYPSE : ELEMENT ET MINERAL

Dérivé du mot latin « gypsum » et du mot grec γύψος « gypsos », le gypse est le sulfate de calcium hydraté, de formule chimique ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$). Il est de la classe chimique des sulfates, de la sous-classe des hydratés sans anions étrangers et de la famille des évaporites (**Yuzer, 1982 ; Auvray, 2003 ; Marmezy, 2004**).

Selon **Eswaran et al. (1981)**, le gypse constitue la forme de sulfate de calcium la plus répandue dans les sols. On le rencontre soit en masse granulaire, soit en cristaux limpides et tabulaires minces à épais, parfois allongés, ou bien maclés en fer-de-lance (**O'Donoghue, 1997**). **D'après Lameyer (1975) et Barriand et al. (1978)**, il est possible d'observer d'autres types de macles :

- **Macles simples** : en pied d'alouette, en queues d'aronde, et en queue d'hirondelle ;
- **Macles complexent** : les roses de sable.

Il peut aussi se présenter sous forme d'agrégats fibreux de cristaux allongés et enchevêtrés (Spath satiné), en masse grenue grossière (gypse Saccharoïde), ou très fine (albâtre) (**O'Donoghue, 1977 ; Gautier, 2004**).

Le gypse existe rarement à l'état pur (figure 16), il peut présenter des inclusions de quartz, de sable, et d'argile (**Barriand et al, 1978**), ou bien des inclusions d'oxyde de fer (**Benmati, 1993**).

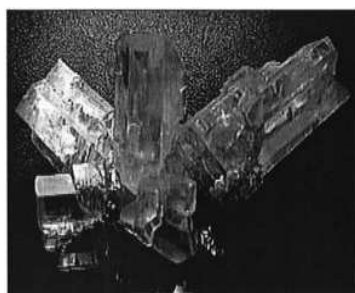


Figure 16- Cristaux de gypse pur (Marteau. 1993)

Le sulfate de calcium se rencontre dans la nature principalement sous deux formes : le gypse et l'anhydrite. Le gypse est une variété de sulfate de calcium pour laquelle une molécule de ce composé est accompagnée de deux molécules d'eau. Sa formule chimique est $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (CaO : 32,6%, SO_3 : 46,5%, H_2O : 20,9 %). L'anhydrite est, comme son nom l'indique, la variété anhydre du sulfate de calcium. Sa formule chimique est CaSO_4 (CaO : 41,2%, SO_3 : 58,8 %).

On peut également rencontrer, dans certaines situations géologiques particulières, une variété appelée basanite, laquelle se trouve être hydratée de sorte que l'on y retrouve une molécule d'eau

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

pour deux molécules de sulfate de calcium. Sa formule chimique est donc $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$. Ce minéral étant métastable dans les conditions normales, il ne se trouve qu'en faible quantité dans le gypse (moins de 1 % en masse).

1.1 MINÉRALOGIE DU GYPSE

1. **Famille** : sulfate.
2. **Formule Chimique** : $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$.
3. **Couleur** : est très variable, incolore, blanc, beige, jaune, rouge ou de teintes claires, selon les impuretés.
4. **Origine** : minéral typiquement sédimentaire ; Il se forme entre autres, lors de l'évaporation par précipitation d'eau de mer.

1.2 PETROGRAPHIE DU GYPSE

1. **Type** : Sédimentaire chimique.
2. **Classe** : évaporite saline.
3. **Aspect** : couleur blanche, grise, rouge verte ou brune.
4. **Texture** : massive ; Grains fins à grossiers et même terreux.
5. **Composant** : Essentiellement du gypse en association avec l'anhydrite, du sel de gemme et d'autres sels marins, de la calcite, des argiles et de la limonite.
6. **Milieu géologique** : Bancs, loupes ou poches alternant avec des argiles, des calcaires et divers sels, dans des séries d'évaporites.

1.3 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DU GYPSE

D'après FISCHESSE (1950)

- A. **Clivage** : Parmi les 4 Possibilités, g 1 est très facile et parfait. Les lamelles obtenues sont flexibles et élastiques ;
- B. **Dureté** dans l'échelle de Mohs, qui compte 10 degrés : tendre (1,5 à 2 selon la face cristalline) ;
- C. **Densité** : 2,32g/cm³ (2,30 calculée par les rayons X).

1.4 STRUCTURE CRISTALLINE DU GYPSE

Le gypse, de formule chimique : $(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$, présente une microstructure de mailles monocliniques (Ogniben, 1955 ; Jang et Bournan, 1959). Décrit aussi par (Cole et Lancucki ; 1973), qui compte 4 molécules de gypse. Le groupe d'espace I2-a était utilisé, avec les paramètres de mailles suivants (Cole et Lancucki, 1974 ; Heijnen et Hartman, 1991 ; Sipple, 1999) : a = 5,670 Å ; b = 15,201 Å ; c = 6,533 Å ; $\beta = 118^\circ 36'$; volume de cellule = 494,37 Å³ (figure 17).

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

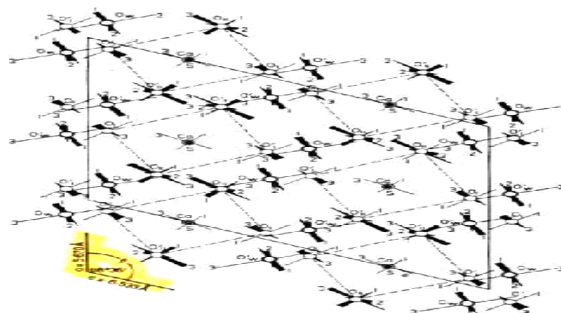


Figure 17- Structure du cristal de gypse raffinée à l'aide de la diffraction tridimensionnelle des rayons X. Vue du plan cristallographique du gypse (W.F. COLE et al ; 1973) in Rachon rodriguez, (2011).

La structure consiste en l'empilement de couches d'ions de calcium Ca^{2+} et sulfate.

La projection de la structure sur le plan (001) (Figure 18) donne une représentation assez nette de la microstructure.

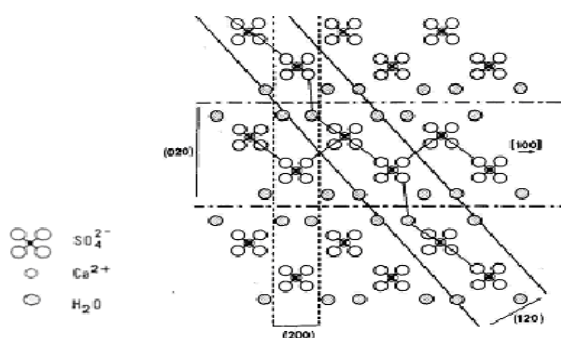


Figure 18- Projection de la structure cristalline du gypse sur le plan (001) (Amathieu, 1973) In Rachon rodriguez, (2011).

Dans la structure du gypse, on retrouve deux types de liaisons chimiques :

- Des liaisons ioniques (fortes) dans les feuillets $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ due aux différences de charges électriques ;
- des liaisons hydrogène entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène des ions de sulfate. L'atome d'oxygène de la molécule d'eau étant relié à un ion de calcium, celles-ci sont beaucoup moins fortes que les liaisons ioniques $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ (Meille S. 2001).

L'aspect global extérieur du cristal est donné par sa morphologie et le faciès. Les faces les plus rencontrées dans le faciès sont celles dont la croissance est la plus lente. La théorie des PBC (Periodic Bond Chains) d'Hartman et Perdok (1955) permet, à partir de considérations cristallographiques et énergétiques, de déduire les formes de croissance dont les faces croissent

Chapitre I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

couche par couche à partir de la connaissance des chaînes périodiques de liaisons entre atomes selon une direction donnée (figure 19). À partir de cette théorie, (**Simon et Bienfait, 1965**), et puis **Weijnen et Al. ; (1987)** Ainsi que **Van der Voort et Hartman (1991)** ont montré que les faces (010), (120), (011) et (111) possèdent des chaînes de liaison fortes. Elles vont croître le plus lentement et auront une extension maximale dans le faciès final. Ces couches sont limitées par des lisières (001), (100), (110), (211). Selon les calculs, la séquence d'importance morphologique relative des faces est : (010) > (120) > (011) > (111).

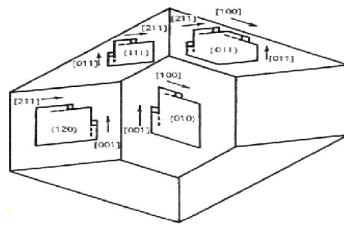


Figure 19 Schémas des couches de croissance du gypse sur les faces. (*Simon et Bienfait, 1965*)

(111) : Étant la face la moins stable donc, celle de croissance la plus rapide ;

La forme d'équilibre théorique ne présente que des faces (010), (120) et (011) uniquement. Cependant, en pratique, le cristal de gypse dans une solution aqueuse pure a un faciès majoritairement aciculaire (figure 20) (**Bosbach et al., in Auvray 2003**), et présente les faces (010), (120) et (111). Ce désaccord entre la théorie et la pratique a été attribué par **Simon et Bienfait (1965)** au fait d'une différence d'interaction des molécules d'eau avec les faces (011) et (111). Cette interprétation a été mise en question, mais n'a jamais eu d'autre interprétation (**Weijnen et al. ; 1987**).

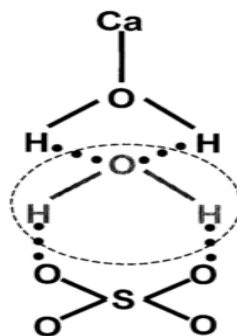


Figure 20 Schémas structuraux d'un cristal de gypse aciculaire (**BOSBACH et al., in AUVRAY, 2003**)

Les liaisons hydrogène développées par les molécules d'eau en surface sont moins fortes que les liaisons ioniques. Cela rend le plan (010) un plan de clivage facile. Des mesures de contrainte de clivage en cisaillement sur un monocristal de gypse confirment une cohésion moins forte selon le plan (010). Des valeurs entre 0,2 et 0,5 MPa pour (010) sont relevées,

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

selon la direction d'application de la charge, tandis que pour (120) et (011) les contraintes sont supérieures à plus d'un ordre de grandeur entre 10 et 14 MPa (Meille, 2001).

1.5 CARACTERISTIQUES ET PROPRIÉTÉS DU GYPSE

Le gypse cristallise dans le système cristallin monoclinique (A2/a) (Auvray, 2003 ; Barriand et al., 1978). Les paramètres de la maille élémentaire du système monoclinique sont les suivants (Heijnen et Hartman, 1991 ; O'Donoghue, 1997 ; Sipple, 1999) :

- $a = 5.6 \text{ \AA}$;
- $b = 15.2 \text{ \AA}$;
- $c = 6.5 \text{ \AA}$;
- $\beta = 118 \text{ \AA}$.

La représentation schématique de la maille élémentaire du système monoclinique est sur la figure N°21. Le cristal de gypse présente un clivage parfait (010) où les fractures obtenues sont lisses, et deux autres clivages secondaires (100) et (011) où les fractures sont respectivement fibreuses et conchoïdales (Barriand et al., 1978 ; Williams, 1988 ; Sipple, 1999).

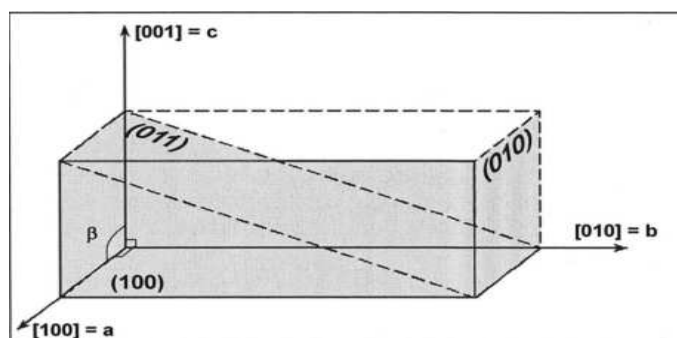


Figure 21- Représentation schématique de la maille élémentaire du réseau cristallin monoclinique du gypse (les 3 faces référencées sont les plans des 3 principaux clivages) (AUVRAY, 2003).

Le gypse est souvent incolore à blanc, il peut présenter des teintes qui varient du jaune au brun (Ansan et Arbey, 2003). Il est transparent à translucide, opaque pour certaines variétés grenues. Il est très tendre, sa dureté est de 2 sur l'échelle de Mohs, il présente une densité de 2.32 (O'Donoghue, 1997).

1.6 STRUCTURE ET COMPOSITION

En général, la structure du gypse est définie comme étant une structure réticulaire simple (Figure 22), constituée par des feuillets de tétraèdres de forme anionique SO_4^- (le soufre au centre et les oxygènes aux sommets), étroitement liés entre eux par des cations Ca^{++} , et des molécules d'eau qui assurent la liaison et la cohésion entre les feuillets (Gautier, 2004).

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

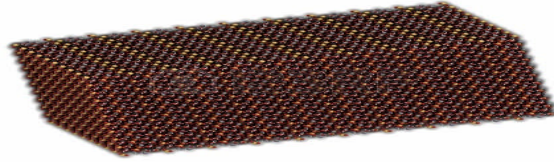


Figure 22- La structure du gypse (FISCHESSER, 1950)

Il se présente sous forme de doubles feuillets de CaSO_4 parallèles au plan [010], unis par des molécules d'eau (Braitsch, 1971 ; Bosbach et Rammensee, 1994). Selon Mandal et Mandal (2002), une des deux molécules d'eau constitutives est sous la forme d'un anion qui a la possibilité de se séparer très facilement (Figure 23). Une disposition qui explique en grande partie le clivage facile et parfait du minéral (Jauzein, 1974).

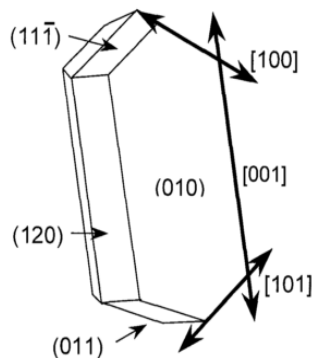


Figure 23- Squelettes atomiques d'une molécule de $(\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O})$ mettant en évidence une molécule d'eau très faiblement liée au reste (Mandal et Mandal, 2002)

Selon Finot et al., (2001), la migration des molécules d'eau peut être introduite par des variations de l'hygrométrie. L'adhésion de plusieurs monocristaux de gypse dans l'air dépend de trois types de force :

- Les forces de Van der Waals : assurées par les molécules d'eau, elles permettent le contact entre les faces [010] (Auvray, 2003) ;
- Les forces électrostatiques ; il résulte de l'attraction des ions calcium et des ions sulfates entre les différentes couches (Auvray, 2003) ;
- Les forces capillaires : elles sont couplées avec les deux autres forces et mesurées avec une hygrométrie supérieure à 35 % (Finot et al., 2001).

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

1.7 PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

1.7.1 Solubilité et processus de dissolution du gypse

La compréhension du processus de solubilité et de ces facteurs de contrôle permet une meilleure assimilabilité des aspects réactionnels liés aux processus de dissolution du minéral et à la détermination du taux de dissolution (**Gutierrez et Gutierrez, 1996**).

1.7.1.1 Solubilité dans l'eau pure

Le gypse est un minéral soluble. Sa solubilité est exprimée en gramme de sulfate de calcium (CaSO_4) dans 1000 g d'eau pure (**Marnezy, 2004**). La solubilité du gypse dans l'eau pure varie selon la température. Elle est maximale entre 35 et 40°C en restant environs 2.1g/l (**Pouget, 1968**) (tableau 7).

Tableau 7 : influence de la température sur la solubilité du gypse (POUGET, 1968)

T°C	5	10	18	25	30	35	40	55	75	100	107
CaSO ₄	0.1756	0.1926	0.2016	0.2085	0.2095	0.2105	0.2108	0.2083	0.1880	0.1690	0.1630

1.7.1.2 La solubilité du gypse dans les solutions salines

La solubilité du gypse augmente dans l'eau salée (**Marteau, 1993 ; Pouget, 1968 ; Auvray, 2003**). Elle est égale à 1.75 g/l à température 0°C, 2,1 g/l à 38°C et 1.69 g/l à 100°C, elle augmente jusqu'à 7 g/l dans les sols contenant 120 à 130 g/l de chlorure de sodium et de magnésium (**Brusq et Loyer, 1982**). Par contre, elle diminue pour les solutions plus concentrées. Cela à pour cause effet de l'ion commun. La solubilité du gypse dans les solutions salines se trouve modifier lorsqu'il y a dans la solution des électrolytes forts ayant ou non des ions communs avec le gypse.

Le degré de solubilité du minéral est différemment caractérisé :

- Peu soluble (**Quelet, 1964 ; Nakayama, 1971 ; Marnezy, 2004**) ;
- Faiblement soluble (**Pouget, 1968**) ;
- Semi-soluble (**F.A.O., 1990 ; Poch, 1996 ; Herrero et Porta, 2000**).

Le gypse est parfois présenté comme un minéral ayant une solubilité limitée (**Keren et al., 1980 ; Vieillefon, 1979 ; Stoops et Illaiwi, 1981**).

Il ressort ainsi une différence appréciative assez nette et surprenante. Une différence issue globalement de l'approche évaluative choisie ; soit par comparaison au carbonate de calcium (CaCO_3), qui est le moins soluble (0.0013 g/l à 16°C) (**Pouget, 1968**), ou par comparaison à d'autres sels présents en solution (**Porta, 1996 ; Gutierrez et Gutierrez, 1996**) et ayant une plus

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

grande solubilité (Généralement, il est cité le NaCl).

Les différents travaux menés sur les lois qui régissent la solubilité du minéral ont souligné « l'effet contrôle » des paramètres suivants :

1. **La température** : la température est un paramètre qui influe fortement sur la solubilité du minéral (Durand, 1963).

Sur la base de valeurs extrêmes enregistrées lors de différentes expériences, il a été observé que la solubilité passe d'un minimum de 1.75 g/l à 0°C (Fischesser, 1950), à un maximum de 2.6 g/l à 25°C (Herrero, 2000 ; Buck et al., 2002), pour retomber par la suite à 1.69 g/l à 100°C (Pouget, 1968). Elle devient très faible à nulle à la température supérieure 107°C par suite de la formation de l'hémihydrate (EGI-712, 2003).

D'après Fischesser (1950) et White (1988), le maximum de solubilité du gypse est généralement atteint entre 35°C -40°C, et il est égal à 2,1 g/l.

2. **La taille des particules de gypse** : généralement, il est observé une augmentation de la solubilité du milieu avec l'affinement des cristaux de gypse (Kemper et al., 1975 ; FAO, 1990). À l'inverse, la présence de gros cristaux provoque une diminution du processus (Porta, 1998), et la dissolution du minéral pourrait ne pas être totale.
3. **Le pH** : le pH est un paramètre important, qui influence la solubilité des espèces ioniques et la précipitation des minéraux (Quelet, 1964). En général, il est considéré que l'effet pH n'est déterminant sur la solubilité du gypse qu'avec l'attachement des ions H^+ sur les anions SO_4^- (Artieda et Herrero, 1996). Cela correspond à des conditions où la précipitation est moins complète en comparaison à un pH neutre ou alcalin (Pouget, 1968). Ce cas de figure reste très difficile à observer au niveau des sols gypseux, car leur pH est toujours supérieur à 7.
4. **Bicarbonates de calcium** : dans une solution saturée en gypse et en calcaire, une élévation de la tension CO_2 permettent une nouvelle dissolution du $CaCO_3$ augmente le nombre d'ions Ca^{2+} et précipite ainsi une certaine quantité de gypse dont la solubilité diminue (Scoeller, 1962 in Pouget, 1969).
5. **Le type et la concentration des ions présents en solution** : ils sont représentés par :
 - a. **L'effet salure** : il se traduit par une augmentation de la solubilité du minéral due à la présence en solution de sels ne comportant pas d'ions communs (Ca^{++} , SO_4^{--}) - (Lagrewerff et al., Vieillefon, 1979 ; Frenkel et al., 1986). Ces sels favorisent d'un côté une augmentation de la concentration ionique ou « la force ionique » de la solution, et de l'autre une réduction de l'activité des ions communs (McNeal et al., 1970 ; Gutierrez et Guetierrez, 1996) ;

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

- b. L'effet ions communs** : l'effet ions communs se traduit par une diminution de la solubilité du minéral due à la présence en solution d'ions « Ca^{++} et/ou SO_4^{--} », issus d'une source autre que le gypse (Mc fe dden et al., 1991 ; Artieda et Herrero, 1996 ; Porta, 1998). Selon Kemper et al., (1975), ces ions influent directement sur le taux de dissolution du minéral. En leur présence, le produit de l'activité ionique (Q) est égal au produit de solubilité (K_{ps})¹ du minéral à un très faible taux de dissolution (**Gutiérrez et Gutiérrez, 1996**). **Nakayama (1971)** a illustré l'effet salure ions communs sur la solubilité par la formule suivante :

$$K_{ips} = [\text{Ca}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}] \gamma_{\text{Ca}} \gamma_{\text{SO}_4} = \text{constant} \quad \text{Equation 3}$$

Avec :

K_{ips} : constante de solubilité « caractéristique du produit de l'activité ionique » ;

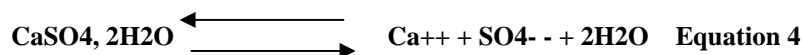
$[\text{Ca}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}]$: concentration de la solution en ions issus de la dissolution ;

$\gamma_{\text{Ca}} \gamma_{\text{SO}_4}$: coefficient d'activité des ions communs. S'il y avait une diminution de l'activité des ions communs (CaSO_4) suite à une augmentation de la concentration en sels en solution (caractérisée par l'augmentation de la concentration ionique ou de force ionique). La concentration en ions ($[\text{Ca}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}]$) résultant de la dissolution tend à augmenter, afin de maintenir le produit d'activité à un niveau constant, ou l'augmentation de la solubilité.

1.7.2 Processus de dissolution

Le processus de dissolution s'active et se met en place dès l'entrée en contact de la surface du minéral avec l'eau (**Artieda et Herrero, 1996**).

La réaction de dissolution du gypse s'écrit comme suite :



Le produit de solubilité du gypse est égal à $10^{-4.85}$ à 25°C. Lors de l'étude du processus et de ses conditions, c'est la détermination du taux de dissolution du gypse qui est le point le plus important. Ce taux dépend grandement des composants chimiques et des conditions hydrodynamiques de la solution (**White, 1984, in Gutiérrez et Gutiérrez, 1996**), de la cinétique de dissolution (**Valles et Bourgeat, 1988**) et des conditions caractéristiques dans la phase aqueuse (**Kemper et al., 1975 ; Berner, 1978**).

¹ Le produit de solubilité du gypse : $K_{ps} = \frac{[\text{Ca}^{++}][\text{SO}_4^{--}][\text{H}_2\text{O}]^2}{[\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]}$

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

Les travaux réalisés par **Liu et Nacollas (1971)**, **Kemper et al, (1975)** ; **Keren and O'Connor (1982)** ont permis de caractériser le taux de dissolution sous la formule mathématique suivante :

$$dc/dt=KA (Cs-Ct) \qquad \text{Équation 5}$$

Avec :

dc/dt : taux net de dissolution ;

dc : variation des concentrations ;

dt : variation du temps ;

K : coefficient de dissolution, qui est fonction de la taille de particules et de la vitesse du flux de la solution ;

A : surface cristalline en contact avec la phase aqueuse ;

Cs : concentration de la solution à saturation ;

Ct : concentration du sulfate de calcium en solution à temps t.

Des tests ont été effectués dans des conditions de simulation de mouvement d'eau (flux d'écoulement), et en présence d'une couche membranaire de diffusion. Selon **Kemper et al., (1975)**, **Ahmed et al., (1975)**, les résultats obtenus soulignent que le taux de dissolution du gypse est proportionnel à la racine carrée du flux d'écoulement.

Trudgill (1986) et **Auvray (2003)** estiment qu'en absence de mouvement d'eau, la dissolution du gypse est gouvernée par le phénomène de la diffusion moléculaire sous l'effet de l'écart entre la concentration à saturation et la concentration de l'eau au contact de l'échantillon. Celui-ci étant très important au départ, la dissolution apparaît relativement rapide. Mais, sous le seul effet de la diffusion moléculaire, les particules se propagent très lentement dans le liquide de manière à ce que la concentration dans la couche en contact avec le gypse approche de la valeur de la solution saturée. La dissolution devient alors très lente, et tend vers une valeur minimale. Cette situation est parfaitement illustrée par **Robinet (1990)** et **Deletie et al., (1990)** qui a montré qu'après des essais de dissolution de longue durée, la dissolution est passée de 7.10^{-6} à $1.10^{-6} \text{ Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ en 200 heures.

1.7.3 Propriétés thermiques

1.7.3.1 Processus de déshydratation et réhydratation

Le gypse est présenté comme un élément qui ne se déshydrate qu'en partie (**Quelet, 1964**). Il est capable de résorber l'eau et, se dissolvant partiellement en elle et ensuite de recristalliser en un dense enchevêtrement de cristaux aciculaires, donnant lieu au phénomène de la « prise » (**Gautier, 2004**).

En réalité, le phénomène de déshydratation du gypse en fonction de la température est assez complexe et dépend non seulement de cette température, mais aussi de la pression de vapeur

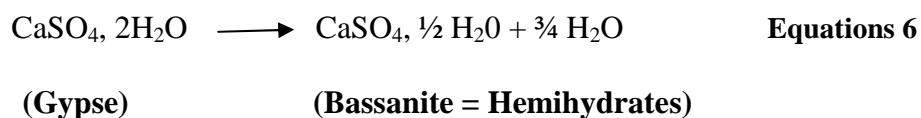
Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

d'eau au contact de la matière, de la finesse du gypse et de la présence d'impuretés en faible proportion (EGI-712, 2003).

Les différentes phases et les réactions caractéristiques (MacDonald, 1953 ; Conley et BUNDY, 1958 ; EGI-712, 2003 ; Gautier, 2004) du système $\text{CaSO}_4, x\text{H}_2\text{O}$ sont les suivantes :

- Entre 110°C et 180°C, apparaissent deux variétés d'hémi hydrates ($\text{CaSO}_4, \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$). **Variété a** : Obtenue par chauffage en atmosphère humide. Son corps est compact et cristallin et possède des résistances mécaniques élevées.
- **Variété b** : Métastable, obtenue par chauffage en atmosphère sèche. Son corps est floconneux et présente des fissures. Elle demande beaucoup d'eau de gâche (70 % au lieu de 35 % pour la **Variété a**, à finesse égale) et possède des résistances mécaniques assez faibles.

Les deux variétés « a et b » se distinguent par des différences de structure en surface. La réaction caractéristique de cette phase est la suivante :



- Entre 120°C et 250°C (selon l'atmosphère de caisson), apparaît l'anhydrite soluble (CaSO_4 AIII), instable à la température ordinaire. La réaction caractéristique de cette phase est la suivante :



- 2) Entre 400°C et 600°C, apparaît l'anhydrite très peu soluble (CaSO_4 AII) à prise lente (plâtre hydraulique). L'anhydrite naturel se présente également sous cette forme. La réaction caractéristique de cette phase est la suivante :



La réaction (équation 7) endothermique et la réaction (équation 9) exothermique sont irréversibles, la réaction (équation 8) est réversible (Auvray, 2003).

Il existe plusieurs autres phases sous hydratées intermédiaires très rarement citées, ayant d'autres stœchiométries, avec un nombre de molécules d'eau qui varie entre 0.5 et 0.8 (BEZOU et al., 1995). L'exemple d'une réaction caractéristique d'une phase sous hydraté (réaction réversible) est la suivante (Auvray, 2003) :



Avec **SH**: Code pour le semi-hydrate. D'après Artieda et Herrero (1996), le gypse, la

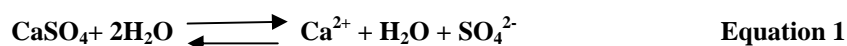
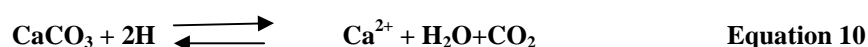
Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

basanite et l'anhydrite apparaissent en nature sous différents environnements. Cependant, seuls la basanite et le gypse ont été observés dans le sol. L'hémi hydrate est produit au niveau des croûtes de surface (**Pouget, 1968**), et est observé dans les formations gypsifères sous climats chauds et secs (**Jauzein, 1974**).

1.7.4 Interaction gypse-carbonate de calcium

La plupart des sols gypseux contiennent des carbonates de calcium à teneurs différentes. En effet, les teneurs en carbonates de calcium diminuent quand celles du gypse augmentent (**FAO, 1990**). Le gypse s'accumule en profondeur et forme des horizons gypseux suite à un lessivage puisque sa solubilité est importante, le calcaire reste dans la partie médiane du profil, car il est très peu soluble, formant des individualisations visuelles, le gypse est toujours postérieur à la calcite (**Halitim, 1985**). Le gypse envahit détruit et bloque l'évolution des accumulations calcaires. La pression de cristallisation du gypse détruit les individualisations calcaires par suite de l'arrivée continue de solution sulfo-calcique, ce qui conduit à leurs précipitations.

Dans le système gypse-calcaire avec les ion Ca^{2+} en commun, la solubilité des deux minéraux et la composition ionique de la solution en équilibre sont dominés par le produit de la solubilité simultanée des deux réactions suivantes :



La solubilité du CaCO_3 est plus faible en présence de gypse, cela est due à la présence de l'ion en commun.

2 LES SOLS GYPSEUX

L'appellation de « sols gypseux » mentionnée en tant que tels dans la plupart des classifications est un terme d'usage courant désignant les sols contenant du gypse à des teneurs variables (**FAO ; 1995 ; Pouget, 1995**). **Van Alphen et Rios Romero (1971)** désignent sous-sols gypseux, les sols à teneur supérieure à 2 % de gypse. Alors que la classification **FAO (1998)** nomme Gypsisols, les sols à teneur supérieure à 5 % de gypse.

Le gypse, de par sa présence dans le profil tout entier ou bien sa localisation dans un horizon particulier, conditionne le comportement et l'aspect de ces sols (**Boyadgiev et Verheye, 1996 ; Herrero et Boixadera, 2002**).

D'après **Barzanji (1973), FAO (1990)**, il est possible de souligner les cinq (05) classes caractéristiques des sols gypseux en tenant compte de l'aspect d'interaction « sols – Plante » (tableau 8).

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

Tableau 8 Classes caractéristiques des sols gypseux D'après Barzanji (1973), FAO (1990).

Taux de gypse %	Classe caractéristique
< 0.3	Sols non gypsifères
0.3 - 10	Faiblement gypsifère
10 – 15	Modérément gypsifère
15 – 25	Fortement gypsifère
25 - 50	Sol gypsifère

La présence du gypse dans le sol ne doit pas être confondue avec l'effet osmotique de la salinité (**Herrero et Boixadera, 2002**), puisque les sols gypseux peuvent être salins, comme c'est le cas des sols de chotts, de sebkhas et de quelques plaines alluviales où le drainage est déficient.

2.1 Genèse des sols gypseux

Les processus de formation des gisements sédimentaires de gypse et d'anhydrite sont complexes et il n'existe pas de théorie globale de leur genèse, car chaque cas est particulier, tout phénomène naturel dépendant de conditions locales et variables. L'hypothèse génétique la plus fréquemment admise est celle d'une précipitation directe à base de saumures saturées, par évaporation en climat chaud et sec, dans des bassins étendus et peu profonds de type lagune, en communication temporaire avec la mer. Ce modèle explique aussi la présence dans de nombreux gisements d'autres minéraux évaporitiques comme les chlorures (NaCl, KCl, MgCl₂), ainsi que de carbonates (aragonite, calcite, dolomite), et d'autres sulfates (célestite). En plus peuvent aussi se déposer avec le gypse du sable, des argiles, de la silice, des oxydes etc. (**Marteau, 1993**). Toujours d'après **Marteau, (1993)**, selon la température et la concentration des autres sels contenus dans la saumure, le sulfate de calcium précipite généralement, d'abord sous forme de dihydrate (gypse), puis sous forme anhydre (anhydrite). Après leurs dépôts, les sulfates initialement accumulés peuvent subir diverses modifications diagénétiques, telles que :

- Déshydratation du gypse, avec forte réduction du volume,
- Réhydratation de l'anhydrite, ce qui provoque une forte augmentation de volume, et des perturbations importantes des couches de roches sédimentaires encaissantes;
- Échanges cationiques et pseudomorphoses ou remplacements minéralogiques.

La solubilité du gypse étant élevée, il peut être dissous, lors de variations hydrologiques dans la formation qui renferme ou par lessivage, et recristallise ou se déposer dans une zone de

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

sédimentation parfois éloignée. C'est ainsi que certains gisements d'âge tertiaire, notamment ceux de Biskra, se sont formés par remobilisation de couches plus anciennes des niveaux du trias.

D'autres gisements sont aussi le résultat de l'érosion et du démantèlement de couches de gypse, produisant un sable gypseux qui peut s'accumuler pour former des dunes, comme dans certaines régions désertiques.

2.2 Le dépôt du gypse

Le dépôt du gypse peut être donc soit pédogénétique ou géogénétique.

2.2.1 Dépôts pédogénétique

L'accumulation du gypse et l'un des processus pédogénétiques les plus marquants qui peut se produire dans les régions arides du monde (**Khadami et al., 1997**). Un phénomène qui peut se faire de manière uniforme, isolé dans la matrice, ou bien localisé par horizons sous différents traits pédologiques (**Porta, 1998**).

Le gypse se forme dans un environnement soumis à une très forte évaporation, par précipitation directe, comme c'est le cas des lacs asséchés (**Durand, 1963 ; Bourgue, 1997**) ou des lagunes et étangs salés (**Marnezy, 2004**). Il peut aussi résulter de l'altération des roches sédimentaires (**Dekkiche, 2004 ; Pouget, 1995**), de la cristallisation de solution aqueuse (**FAO, 1990 ; Watson, 1983 ; Gutierrez et Gutierrez, 1996**). Aussi, de l'hydratation de l'anhydrite (**Boyadgiev et Sayegh, 1992 ; McLaren et Cameron, 1996**), du mélange ou de la rencontre de deux solutions (une eau chargée en calcium et une eau salée riche en sulfates) (**GSC, 2003 ; Warren, 1982**) et enfin des dépôts volcaniques ou de l'oxydation des gisements métallifères (**O-Donoghue, 1997**).

D'après M. le Professeur **Kovda, (1958)**, le mécanisme qui permet la précipitation du sulfate de calcium à partir de la solution du sol réside dans les variations de concentration de cette solution (précipitant les sels les moins solubles), et la variation saisonnière des hauteurs de la nappe.

Le **Coque R. (1964)** considère que la croûte gypseuse résulterait de la formation in situ, de matériaux variés (alluviaux et fluviatiles) riche en gypses et où la transformation s'accomplit progressivement depuis la surface par l'eau et que les mécanismes de l'encroûtement sembleraient liés principalement aux oscillations climatiques quaternaires. Les conditions optimales de la genèse et de la formation des croûtes gypseuses se trouvent réunies au moment du passage d'une phase humide à une phase sèche.

2.2.2 Dépôts géogénétique

L'affleurement de gypse mixte d'argile ou de marne, ainsi que du gypse compact ou

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

l'anhydrite, est commun en Espagne, la Tunisie et l'Irak. Ils sont de Trias, Jurassique et Crétacé. Au cours de l'Eocène et Oligocène, mais surtout au cours du Miocène, les dépôts de gypse en croûtes gypseuses et du dépôt de gypses intercalés dans les marnes où des argiles, limons et grès étaient formés en Espagne et en Afrique du Nord, au Moyen - Orient et le sud-ouest de la Sibérie. Au Miocène inférieur, les gisements de gypse sont formés dans l'est de la Syrie, à l'ouest et centre de l'Irak et dans le sud-ouest de l'Iran. En Espagne, dans la vallée de l'Èbre, les gisements de gypses solides et intercalés sont formés en Miocène supérieur. Dépôts de gypse probablement datant du Miocène inférieur se trouvent dans la vallée du Tage, au sud-ouest de Madrid.

Les études des formations gypseuses dans le sud tunisien attribuent la période de formation de ces croûtes au quaternaire récent (**Robaux et Choubert, in Bureau et Roederer, 1960**). Ils ont interprété les accumulations de gypse de cette période par évaporation à partir des nappes phréatiques plus riches à cette époque.

Dépôts de gypse d'origine éolienne peuvent être trouvés en Tunisie (**Trichet, 1963**), tandis que ceux de plusieurs terrasses de l'Euphrate et du Tigre en Syrie et en Irak est très probablement aussi, de cette origine (**Buringh, 1960 ; Mulder, 1969**). Dépôts gypsifères éoliens, provenant de sédiments lacustres, se trouvent dans le sud-est de l'Australie (**Jessup, 1960**). Le gypse est transporté sur des longues distances de son origine par les eaux de rivière dans laquelle il est dissous ou décomposé en particules, et est précipité avec de l'argile, de limon et de sable. Certains gypses précipitent lorsque l'eau de la rivière est détournée à des fins d'irrigation. En pente des terrains, des fragments de roches de gypse sont transportés des inondations torrentielles et déposés près de leur origine (**Mulders, 1969**). Lorsque la frange capillaire de gypse portant la nappe phréatique se situe à proximité de la surface, le gypse peut précipiter si l'évaporation est élevée. Ce processus explique la formation des incrustations de gypse recouvrant les sables aquifères dans le Oued Souf et R'hir dans Oasis algérienne (**Durand, 1959**), et représenterait également une partie des gisements de gypse secondaire en Irak (**Buringh, 1960**). Les dépôts de sel du Pléistocène et de gypse Holocène d'origine lacustre se trouvent le long des parties des chotts en Algérie (**Durand, 1959**) et dans les anciens lacs intérieurs de l'ouest des USA.

2.3 Origines des sols gypseux

2.3.1 Origine de nappes

Par mouvement « per ascensum », cette théorie implique des mouvements par ascension capillaire à partir d'une nappe superficielle (**Watson, 1979**). Selon **Halitim (1988)**. Ce processus peut jouer pour trois raisons :

- Une ETP > P, la plus grande partie de l'année ;
- Un niveau de la nappe proche de la surface ;

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

- Plus généralement, une nappe saturée ou proche de la saturation vis-à-vis du gypse.

2.3.2 Origine lagunaire

Le dépôt de sulfate de calcium est dû à la concentration sur place de l'eau sous l'influence de l'évaporation en présence du chlorure de sodium provoquant sa précipitation sous des formes plus ou moins hydratées (**Durand, 1953**).

2.3.3 Origine éolienne

Plusieurs auteurs (**Coque, 1962 ; Trichet, 1963**) ont démontré la contribution du vent dans la formation des accumulations gypseuses. Dans ce cas, les croûtes résultent d'un poudrage intermittent de poussières surtout salines, diffusées dans l'atmosphère par le vent. La cimentation de ces dernières serait le résultat de l'infiltration des eaux pluviales dans les recouvrements éoliens. **Watson (1979)** qualifie ce processus de mouvement « per ascensum ».

2.4 Caractéristiques

La morphologie et les caractéristiques chimiques et physiques des sols gypsifères dépendent dans une large mesure, de l'origine des dépôts de gypse, mais aussi de la profondeur à laquelle une couche de gypse appropriée se produit dans le profil du sol. Lorsque cette couche est située à 30 cm ou plus en dessous de la surface, la couche supérieure du sol a souvent des caractéristiques morphologiques et physico-chimiques semblables à celles des sols non gypseux par exemple : les sols siérozem (**Rozanov, 1961, Kurmangaliev, 1966**).

Les caractéristiques des sols gypsifères sont également déterminées par le fait que le gypse est facilement redistribué à l'intérieur du profil du sol à la suite de l'influence alternée des précipitations et de l'évapotranspiration. Quand une couche gypseuse est située à proximité ou à la surface du sol, la formation de rosée peut également jouer un rôle important dans la migration de gypse (**Bureau et Roeder, 1960**).

La redistribution de gypse dans le sol peut entraîner une grande variation dans la morphologie du profil du sol.

2.4.1 Propriétés physiques.

2.4.1.1 Texture

La texture des sols gypseux influencée par la présence de teneurs élevées en cristaux de gypse, elle dépend du matériau parental (**Van Alphen et Rios Remero, 1971**), l'élimination du gypse, n'est possible que si la teneur en gypse est inférieure à 10%.

Selon **F.A.O (1990)** grandes variétés de textures ont été observées dans les sols gypseux des régions méditerranéennes, où les teneurs en argile sont estimés de 2 à 50 %, il est étroitement lié

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

à la genèse du sol. Les teneurs en argiles observées varient entre 2 à 50%. D'après **Djili (2000)**, l'augmentation du taux d'argile est accompagnée d'une diminution des taux de gypse, mais le gypse peut se rencontrer en Algérie dans les sols argileux (marnes, alluvion ; des chotts et sebkha), qu'au sein des sols sableux des régions arides (**F.A.O, 1990**).

En Syrie, **Stoops et Allaiwi (1981)** cité in **Abedssalam (1999)**, rapportent que la plupart des sols gypseux présentent une texture sableuse à sablo- limoneuse. **Poch (1992)**, indique dans une étude sur les sols gypseux d'Espagne que la texture est étroitement liée à la teneur en gypse. Cependant, l'augmentation des teneurs en gypse engendre, d'une part, la formation d'une texture à dominance de limons et de sables.

2.4.1.2 Structure

La plupart des sols gypseux ont une structure peu favorable, l'horizon de surface est dominé par une couche massive ou fine, peut être fortement cimenté, avec la formation de croûtes dures, s'opposant par fois à la circulation de l'eau et au développement des racines (**F.A.O, 1990**).

Cependant **Halitim (1988)** a montré que parfois le gypse pourrait jouer un rôle dans la structuration du matériau pédologique. **Sidi et Pansu (1990)** ont montré l'effet favorable d'une teneur de 1 % de gypse sur la stabilité structurale d'un sol salé et non carbonaté. Les teneurs, entre 3 et 10 % de gypse, n'interfèrent pas significativement avec les caractéristiques du sol telle la structure, alors que les teneurs entre 10 à 25 % de gypse, tendent à briser la continuité de la masse du sol par l'effet des cristaux de gypse (**FAO, 1990**).

2.4.1.3 Porosité

Poch (1996) a montré que l'augmentation de l'accumulation du gypse dans le sol influence l'espace poral par le remplacement des larges pores, par des pores d'entassement dont le diamètre équivalent maximum est de 20 μm . Ceci est dû au colmatage par les cristaux lorsque le gypse est présent sous forme poudreuse, la porosité est élevée, alors que les croûtes gypseuses sont dures et présentent une faible porosité.

2.4.2 Propriétés chimiques des sols gypseux

2.4.2.1 Conductivité électrique

Dans les sols bien drainés (à faible salinité), la conductivité électrique est faible, elle varie entre 1,3 et 4 mmhos/ cm dans les horizons de surface et augmente avec la profondeur à plus de 8 mmhos/ cm.

La conductivité électrique est par contre élevée dans les sols peu profonds avec en dessous un horizon gypsique imperméable, elle peut atteindre plus de 12 mmhos/ cm.

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

2.4.2.2 pH

Les gypsisols riches en sable grossier ont des valeurs faibles avec un pH de 7,6 à 7,8 et les sols affectés par les sels avec une CE de 16 à 18 dS/ m ont des valeurs élevées de pH (8,3- 8,6) (Florea et Al Joumaa, 1998).

Tous les sols gypseux du Nord de l'Algérie, quelle que soit leur teneur en gypse, ont des pH supérieures à 7 (Djili, 2000).

2.4.2.3 Capacité d'échange cationique

La CEC est inversement proportionnelle à la teneur en gypse ; quant la teneur en gypse augmente, la teneur en composés non gypseux diminue (Van Alphen et Rios Remero, 1971). La CEC dépend de la présence de la matière organique, de la texture du sol, alors que la plupart des sols gypseux sont pauvres en matières organiques, et les teneurs en argile ne dépassent pas les 20 % (FAO, 1990). Le gypse est un sel neutre.

Il existe une corrélation négative entre la CEC et la teneur en gypse, l'équation de régression est :

$$\text{CEC meq/ 100g} = 16,46 - 2,16 \text{ gypses avec } R^2 = 0,708 \text{ (DJILLI, 2000)} \quad \text{Équation 2}$$

Les valeurs de la CEC dans les sols gypseux varient entre 7 et 14 meq/ 100 g de sol (FAO, 1990).

2.4.2.4 Composition du complexe absorbant et de la solution du sol

Le complexe absorbant et la solution du sol sont saturés en ion Ca^{+2} et SO_4^{-2} , la teneur de Mg^{++} et K^+ échangeable, dépend de la CEC. Dans les sols gypseux, les rapports Mg/ Ca et K/ Ca sont faibles, le cation échangeable dominant est le calcium, suivit par le Mg, K et parfois le Na (Van Alphen et Rios Romero, 1971).

2.5 Les formes d'accumulation du gypse dans le sol

Accumulations de gypse sont rarement composées de gypse pur, mais sont généralement un mélange de gypses, de CaCO_3 et /ou les particules de sol. Cristaux de gypse sont parfois recouverts d'un précipité de CaCO_3 .

Les différents travaux jusqu'à présent (Durand, 1963 ; Bureau et Roeder, 1961 ; Pouget, 1968 ; Dutil, 1971 ; Boyadgiev, 1974 ; Dekkiche, 1974 ; Stoops et Ilawi, 1981 ; Nettelton et al., 1982 ; FAO, 1990 ; Halitim, 1988 ; Watson, 1979, 1985, 1988 ; Boyadgiev et Sayegh, 1992 ; Buck et Van Hoesen, 2002) ont caractérisé des formes suivantes :

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

- 1) **Diffuses** : une forme non visible à l'œil nu ;
- 2) **Pulvérulentes** : elles peuvent être considérées comme des formations récentes ou reliques, issues de la précipitation de très fines particules de gypse secondaire ;
- 3) **Pseudo mycéliums** : ce sont néoformations récentes dans les horizons à texture fine à moyenne. Ils se présentent sous formes de filaments blanchâtres. Ceux-ci résultent de la concentration du gypse dans les pores ou au niveau des racines ;
- 4) **Amas** : c'est un assemblage lâche d'une multitude de très fins cristaux plus moins aciculaires et à angles vifs. Ils sont friables, de taille identique ou plus petite que les nodules ;
- 5) **Nodules** : ce sont des amas de dimensions variables, pouvant atteindre la taille d'une petite pomme. Elles prennent généralement la forme de petites poupées de loess ;
- 6) **Encroûtements** : Généralement, ce sont des formes qui affleurent, formés sur un matériau déjà en place. Ils se caractérisent par une superposition de couches gypseuse non dur et non massive. La quantité de gypse présente varie habituellement entre 10 à 40 % (**Durand, 1968**) ;
- 7) **Croûtes** : Elles se présentent sous forme de couches dures et massives, d'une couleur allant du blanc au saumon. Elles sont impénétrables par les racines. La teneur en gypse varie entre 40 et 80 % (**Durand, 1968**).

Suivant les régions et les conditions de milieux dans lesquelles elles se sont développées, il ressort les formations suivantes :

- **Croûtes gypseuses** : elle apparait comme une patine plus durcie, pellicule de quelques millimètres à peine en général, et située à la partie superficielle de l'encroûtement. Elles résultent de la remontée à la surface ou bien du dépôt entre les fissures de fines particules gypseuses ;
- **Croûtes de nappes** : elles résultent du dépôt de gypse suite à la fluctuation du niveau d'une nappe active saturée ;
- **Couches polygonale de surface** : ce sont des formations apparentes, qui résultent du phénomène de dessiccation de surface (photo 02). Elles se caractérisent par des bords recourbés (**Halitim, 1988**). Ces formations ont été observées en Algérie (**Durand, 1954 ; Pouget, 1971 ; Dekkiche, 1974 ; Halitim, 1988 ; Hamdi Aissa, 2001**).

Appelée aussi, macrostructure polygonale par **Bureau et Rqederer, (1960)**, elle affecte souvent l'encroûtement et la croûte qui la surmonte lorsqu'ils sont exposés à l'air libre sur une grande surface. Les polygones ont de 10 à 40 cm de côté, et sont séparés par des fentes jusqu'à la partie inférieure de l'encroûtement.

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX



Photo 02- Couches polygonale de surface dans la région d'étude

Les formes diffuses, pulvérulentes, pseudo mycéliums, amas, nodules, croûtes correspondent à l'horizon gypsic (B. R. M., 1998 ; 2006 ; USDA, 1999). Les encroûtements correspondent à l'horizon pétrogypsic (B. R. M., 1998, 2006 ; U. S. D. A., 1999).

Il est possible de trouver dans certains écrits d'autres formes d'accumulations du gypse, comme les roses de sable (Durand, 1954 ; Dekkiche, 1974 ; Kulke, 1974 ; Halitim, 1988 ; Watson, 1985, 1988 ; Boyadgiev et Sayegh, 1992) ; les rosettes de sables (Kadri et Satori, 1990 ; Abdesselam, 1999), le sable gypseux, (Stoops et Ilaiwi, 1981 ; Taimah, 1992 ; Drake, 1997), et les roches gypseuses (Boyadgiev et Sayegh, 1992 ; Boyadgiev et Verheye, 1996).

2.6 Répartition spatiale des sols gypseux

Les sols gypseux caractérisent généralement les zones arides et semi-arides du monde (Watson, 1985 ; Stengel et Gelin, 1998). Des zones où les roches-mères ou les sédiments gypseux sont fréquents, et où les précipitations faibles et occasionnelles (<300 – 400 mm) induisent un drainage climatique déficitaire pour évacuer le gypse du sol (Herrero et Boixadera, 2002). Toutefois, ils peuvent être observés occasionnellement dans les régions à fortes précipitations (Boyadgiev et Verheye, 1996). L'accumulation de gypse est un phénomène caractéristique d'un régime d'humidité aridic ou xeric (Khedemi et Mermut, 2003) similaire aux sols calcaires, mais les sols gypseux sont beaucoup moins répandus car une source de SO_4^{2-} ne peut pas toujours être disponible. Les sols gypseux contiennent souvent aussi des sels solubles et les carbonates de calcium, mais l'accumulation ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dans le sol se produit presque exclusivement dans les zones arides et semi-arides avec moins de 400 mm de précipitations annuelles.

2.6.1 Distribution des sols gypseux dans le monde

L'espace occupé par les sols gypseux englobe pratiquement l'ensemble des continents (figure 24). L'étendue des sols contenant du gypse dans le monde est difficile à établir, mais (FAO, 1984 et 1990) ont estimé à environ 200 millions d'hectares de sols ayant des horizons gypsic ou pétrogypsic. Herrero et Boixadera (2002) estiment par contre que la superficie réelle des sols gypseux dans le monde est de 207 millions d'hectares. La superficie caractéristique de ces sols

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

correspondrait à 85 millions d'hectares (FAO, 1990). Les sols gypseux sont signalés dans le sud-ouest de la Sibérie (Géographie soviétique, 1964 ; Momotov, 1965), dans l'est de la Syrie (Van Liere, 1965), dans le nord et le centre de l'Irak (Buringh, 1960) et dans le sud-est de la Somalie (Le Heroue, 1964). Sols gypsifères peuvent également être trouvés en Espagne (Arteriu et Vilar, 1962), l'Algérie (Durand, 1959 ; Le Heroue, 1964), Tunisie (Bureau, 1960 ; Le Heroue, 1964), l'Iran (Dewan et Famouri, 1964), les républiques soviétiques de la Géorgie et la Transcaucasie (Minashina 1956 ; Akhvlediani, 1962, 1965) et dans le sud de l'Australie centrale (Jackson, 1958 ; Jessup, 1960) (Tableau 9).

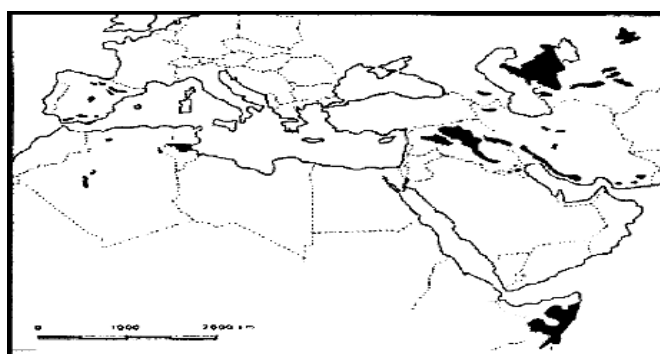


Figure 24 Les sols gypseux dans le Nord et l'Est de l'Afrique, l'Europe centrale et dans le Sud Est de l'Asie (Van ALPHAN et ROMERO, 1971).

Tableau 9- Distribution des sols gypseux, par pays et par continent

	Pays	Superficie (Km ²)	% par rapport à la superficie du pays	% par rapport à la superficie des sols gypseux dans le monde
	Maroc	1114,3	2,5	1,7
	Algérie	7966,3	3,3	12,2
	Tunisie	1439,8	9,3	2,2
Afrique	Lybie	3956,8	2,2	6,0
	Egypte	382,2	0,4	0,6
	Soudan	785,0	0,3	1,2
	Somalie	10161,2	16,2	15,5
	Ethiopie	1423,4	1,3	2,2
	Mali	2818,3	2,3	4,3
	Mauritanie	396,0	0,4	0,6

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

	Namibie	5327,7	6,5	8,2
	Syrie	3966,6	21,6	6,0
	Jordanie	80,5	0,8	0,1
	Arabie Saoudite	82,5	0,04	0,1
	Oman	471,6	/	0,7
	Yémen	2931,0	8,8	4,5
	Koweït	354,6	/	0,5
Sud Asiatique	Irak	4779,2	11,0	7,3
	Iran	4,2	/	/
	Pakistan	9,5	0,01	/
	Inde	182,0	0,06	0,3
	Ex-U.R.S.S	5074,1	0,2	7,7
	Mongolie	60,9	0,04	0,1
Asie Centrale				
	Chine	11484,9	1,2	17,5
	Turquie	64,2	0,08	0,1
Europe				
	Espagne	165,5	0,3	0,3
Amérique-N	Mexique	78,0	/	0,1

NB : d'après le tableau ci-dessous plus de 45% de ces sols sont concentrés en Chine, en Somalie et en Algérie. Les sols gypseux d'Algérie occupent 12,2 % de la surface totale des sols gypseux du monde, ils sont estimés à 7966,3 Km² (représentant 3,3 % de la surface du pays) (FAO, 1990).

2.6.2 Distribution des sols gypseux en Algérie

Les sols gypseux sont cités en Algérie depuis fort longtemps, mais ils n'ont pas fait l'objet d'études poussées. Les études réalisées jusqu'à présent restent soit localisées (SOGREAH, 1996 ; Pouget, 1971 ; Abdesselam, 1999) ou bien descriptives des accumulations gypseuses (Durand, 1963 ; Dutil ; 1971 ; Kulke, 1974 ; Halitim, 1988 ; Djeli, 2000 ; Saheb, 2006 ; Rouahna, 2007).

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

Selon **FAO (1990) et Marshali (1995)**, les sols gypseux de l'Algérie constituent 3.3 % de la surface totale du pays et 12.2 % de la superficie totale des sols gypseux du monde, soit une superficie de 7966.3 Km².

Ces sols sont peu abondants dans les régions du nord et se localisent seulement dans les zones des dépressions et autour des formations géologiques gypsifères de l'étage bioclimatique aride (**Djeli, 2000**). Dans les régions de l'intérieur où l'aridité devient plus importante, ils présentent une superficie importante principalement au niveau des oasis (**Durand, 1954 ; Mediouni, 1997 ; Abdesselam, 1999**).

Globalement, la présence des sols gypseux est signalée dans les régions suivantes : Oran, Mostaganem, Saida, Tiaret, ksar Echellala, Djelfa, M'sila, les bordures des chotts et des Zahrez, Boussaâda, Hodna, Mechria, El-Bayadh Bayadh, Khenchela, Batna, Adrar, Ouargla, Ain sefra, Laghouat, Biskra, El oued, Touggourt (Oued Righ).

2.7 Classification des sols gypseux

2.7.1 La classification Française

(**C.P.C.S, 1967**) divise les sols à des classes, sous classes, groupes, et sous groupes, les sols gypseux sont répartis dans trois classes (tableau 10).

Tableau 10- Les sols gypseux dans la classification française (CPCS 1967)

Classes	Sous classes	Groupes
Sols calcimagnésiques	Sols gypseux	- Sols gypseux rendziniiformes. - Sols brun gypseux
Sols iso humiques	Pédoclimat frais	Sierozems
Sols hydromorphes	Minéraux peu humifères	À redistribution de calcaire et de gypse

Ils sont ensuite divisés au niveau du sous-groupe en :

- Nodule ;
- Encroûtement ou encroûté (à croûte gypseuse).

Cette classification ne fournit pas d'informations supplémentaires sur la classification de certains sols qui peut contenir une forte teneur en gypse tel que : Les sols châtaîns, sols marron, vertisols sodiques, sols minéraux bruts des déserts chauds et sols gris subdésertiques (**F.A.O, 1990**).

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

2.7.2 Classification Américaine

Soil taxonomy (**S.S.S. 2003**) : Pour identifier, les sols gypseux, la Soil taxonomy exige la présence de l'un des horizons diagnostiques suivants : La présence d'un horizon gypsic ou pétrogypsic à moins de 100 cm de la surface et ne possède pas d'horizon pétrocalcic placé au-dessus de ces horizons.

Les gypsids comportent 04 grands groupes qui sont :

- Petrogypsids ;
- Natrigypsids ;
- Argigypsids ;
- Calcigypsid.

2.7.3 Classification FAO

La légende révisée de la carte des sols du monde (**F.A.O, 1988**) ont introduit, deux groupes majeurs : Les calcisols et les gypsisols.

Les gypsisols se distinguent par la présence d'un horizon gypsic ou pétrogypsic, les unités des sols gypseux sont comme suite :

- Pétric gypsisols ;
- Calcic gypsisols ;
- Luvic gypsisols ;
- Haplic gypsisols.

D'autre part, la présence d'un horizon gypsic ou une couche gypsifère a permis d'identifier d'autres sous unités de sols tels que : gypsic régosols, gypsic vertisols, gypsic solonetz, gypsic Solontchaks et gypsic Kastanozems.

2.8 Effet du gypse sur le sol et la végétation

L'effet de gypse sur la récolte dépend de plusieurs facteurs incluant la nature, la solubilité, la forme, la quantité, la distribution horizontale et verticale et la profondeur d'accumulation de gypse dans les sols (**Mashali, 1996**).

Il est généralement admis qu'en petites quantités, le gypse a un effet favorable sur les propriétés fonctionnelles des sols et la croissance des plantes.

En sols très argileux et très dispersés, le gypse améliore l'infiltration, diminue l'érosion, et augmente la floculation (**Ventura et al, 2001**).

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

En sols sodiques, le gypse améliore la structure en déplaçant les ions Na^+ du complexe absorbant et les remplacer par les ions Ca^{2+} , il s'agit de la désalinisation du sol (**Zahow et Amerhein, 1992 ; Batra et al, 1997**).

En sols acides, le gypse change les propriétés de ces sols en déplaçant les ions Al et diminuant la toxicité par cet élément (**Sumner, 1993 ; Farina et al, 2000**).

L'azote, le phosphore et des oligoéléments, sont pratiquement toujours nécessaires pour optimiser l'agriculture, ensemble avec le potassium et le magnésium dans quelques cas. Dans des sols avec gypse, presque toutes les récoltes montrent une carence de la plupart des substances nutritives de la plante, particulièrement le phosphore. **Barzanji** et d'autres (1981) ont montré que, lorsque le taux de gypse est excessif (>50 %) est présent à des faibles profondeurs, il peut être un facteur limitant pour l'agriculture. Selon **Mashali (1996)**, la présence des teneurs élevées en gypse dans la rhizosphère affecte la teneur et la disponibilité des éléments nutritifs par :

- Changement de la forme de l'élément nutritif dans le sol ; l'élément se trouvant sous forme disponible devient indisponible, cas du phosphore qui se transforme en forme inassimilable en présence de gypse (**RAZI, 2006**) ;
- Perte d'élément nutritif (cation et anion) ; la solution du sol a une grande concentration en Ca^{2+} ce qui conduit à une libération successive du K et Mg du complexe absorbant ;
- Les teneurs élevées en gypse peuvent conduire à un déséquilibre des rapports ioniques particulièrement K/Ca et Mg/Ca qui deviennent faible dans les sols gypseux ;
- La compétition ionique des ions supplémentaires affectant la nutrition ; la présence en concentration élevée d'un élément diminue les prélèvements par la plante d'autre élément telques : K , Mg , Fe , Cu , Zn , phosphate et nitrate.

En considérant l'influence de contenu de gypse sur la structure, l'aération, la conservation d'humidité, la solubilité de gypse comme une fonction de conditions d'humidité de sol saisonnier et le niveau de tolérance de récolte, **Boyadgiev et Verheye (1996)** a distingué cinq classes de contenu de gypse dans la zone de racine et le solum : 0-3 % bas, moyens de 3-10 %, moyen à haut de 10-25 %, haut de 25-40 % et très élevés > 40 %.

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA NOTION DU GYPSE ET LES SOLS GYPSEUX

CONCLUSION PARTIELLE

Le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) est un élément essentiel à la croissance des plantes et la stabilité des sols, mais son excès contribue à la chlorose des plantes et réduit des rendements. La présence dans le profil d'une couche de gypse dure (croûte et encroûtement) due aux mouvements de dissolution, et recristallisation en sols cultivés et irrigués, crée un obstacle mécanique pour l'extension racinaire, générant un problème d'exploration du sol par les racines et les mouvements de l'eau sont ralentis (Marshali, 1996).

La présence de gypses, en grande quantité, dans le sol affecte les qualités physicochimiques de ce dernier, baisse la fertilité et, par conséquent, la biomasse et la production végétale. En effet, dans les sols gypseux, l'activité de calcium est plus élevée que celle des sols calcaires en raison de la solubilité considérable du gypse. La présence de l'ion calcium affecte énormément la solubilité des autres éléments tels quels : P, K, Mg, Fe, Mn, Zn, etc. (FAO, 1990).

La gestion de sols gypseux exige une prudence quant au choix des cultures et aussi du travail du sol. Cela devrait être fondé sur l'enquête de topographie (position du sol), des caractéristiques de sol (la structure, la texture, la capacité d'eau, la salinité, drainage et les formes de gypse, la profondeur, le climat, des conditions environnementales, économiques, sociales, politiques et culturelles du pays (Marshali, 1996).

CHAPITRE II-

**RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA CARTOGRAPHIE DES
SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION**

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

2 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on envisage la problématique, c'est-à-dire que l'on discute les principaux concepts servant, à l'heure actuelle, de base à l'exercice de la cartographie des sols. Ensuite, on passe rapidement en revue les applications principales dans la cartographie des sols de façon à montrer l'intérêt du sujet. En troisième lieu, on définit ce qu'est la télédétection et l'on en présente ses principes de bases physiques. Nous développerons également l'approche par télédétection et la notion d'état de surface des sols. Plus loin, on expose les aspects historiques pour examiner les méthodes et les idées avec le temps. Nous aborderons plus en détail les points forts qui font de la Géomatique (télédétection, les SIG et GPS) et les méthodes de géostatistique des outils et de méthodes utiles à cette approche de cartographie.

2.1 L'EVOLUTION DE LA CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

La cartographie des sols et son utilisation font partie des efforts de l'état, pour la gestion et la planification des différents aménagements du territoire. La connaissance et la cartographie des sols sont importantes à plus d'un titre pour divers utilisateurs : les pédologues, les forestiers, les agriculteurs, les planificateurs, ... Pour tous ces utilisateurs, une carte est un document en deux dimensions. Une carte est une image simplifiée de l'organisation spatiale des sols dans un milieu naturel. Elle est la transposition d'une réalité naturelle relative à la géographie des sols (**Legros, 1996**). Il importe que les cartes soient le plus à jour et les plus exactes possible ; Or, la carte n'est pas une représentation fidèle de la réalité, elle est, en fait, un modèle réduit au sens scientifique du terme, sinon elle devrait être aussi complexe que le sol (**Legros, 1996**). La carte des sols représente une réalité simplifiée d'une manière qui dépend des objectifs poursuivis.

La cartographie des sols en Algérie est peu développée surtout à grande échelle, compte tenu du contexte économique d'une part, les collectivités locales des wilayas ne peuvent pas supporter les coûts des études de cartographie nécessaires pour combler leurs manques, et de l'immensité du territoire d'autre part. Les milieux arides représentent 85 % du territoire. L'étude de ces vastes territoires très diversifiés et très complexes représente un véritable défi qui nécessite l'intégration de nouvelles méthodes et l'utilisation d'outils complémentaires aux méthodes conventionnelles de terrain. Pour ces fins, nous avons constaté la nécessité de rechercher une approche qui permettra d'acquérir rapidement une connaissance des sols par des approches pédologiques autres que les méthodes classiques de cartographie. C'est pourquoi on a été amené à chercher des méthodes à la fois fiables et transposables à moindres coûts la télédétection et la géostatistique. Ces méthodes furent mises au point dans une zone agricole, le sous-bassin versant d'Oued Djedi de 119,550.307 hectares, caractérisés par un relief très peu marqué et par des dépôts de gypse sous différentes formes. L'accès à ces couches ne peut se faire pour la télédétection que par corrélation avec les éléments révélateurs, en surface, de la nature du sol et/ou du sous-sol.

*CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA
CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION*

2.2 LA GEOMATIQUE ET LES ATOUS DE LA TELEDETECTION

2.2.1 La Géomatique

Le progrès des techniques en informatique a aidé à l'évolution et à l'accessibilité de plusieurs sciences, dont la géomatique, la pédologie, et les statistiques spatiales. La géomatique est la science et la technique de la collecte, de l'analyse, de l'interprétation, de la distribution et de l'utilisation de l'information géographique. Elle renferme une multitude de disciplines qui contribuent à concevoir une représentation détaillée mais compréhensive du monde physique et de l'espace nous entourant. Ces disciplines sont : les levés et la cartographie, la télédétection, les systèmes d'information géographiques (S.I.G) et le système de positionnement global par satellite (GPS). À plusieurs égards, cette science a influencé l'orientation des recherches portant sur la pédologie, et l'agriculture d'une manière générale depuis une vingtaine d'années. De plus, des méthodes statistiques appartenant à la statistique spatiale (géostatistique) sont actuellement intégrées sous SIG, ont favorisé le développement de concepts spatiaux fondamentaux, l'analyse des informations géoréférencée, de même que la modélisation de l'espace qui identifie les propriétés et les structures de l'information contenue dans l'ensemble des données. L'ensemble de ces développements a facilité le travail de bien des chercheurs et a permis une plus grande disponibilité de l'information et un rapprochement entre les disciplines qui sont en interaction. La modélisation des données numériques de diverses disciplines permet l'étude des interrelations existant entre les propriétés des écosystèmes terrestres. Ces simulations contribuent à déterminer la distribution spatiale de divers facteurs généralement à la base du processus significatif (Gessler et al., 2000).

2.2.2 Les atouts de la télédétection

Depuis le début des années 80, une attention particulière est accordée à la cartographie des sols par télédétection. Nombreux sont les chercheurs qui tentent de déterminer les facteurs prédominants, directs ou indirects, des différents patrons spatiaux observés. Pour identifier correctement l'aspect de surface des sols.

Plusieurs études ont révélé des corrélations entre des images aéroportées multispectrales de sols nus et des propriétés du sol reliées à la couleur, à la teneur en eau, à la matière organique et à la texture du sol (Michaud et al., 2003 ; Chang et al., 2003 ; Islam et al., 2003 ; Pozdnyakova, 2002 ; Barnes et al., 2000 ; Escadafal et al., 1989).

2.2.2.1 Le passage de la cartographie des sols des méthodes classiques a la télédétection

Loin d'abolir les techniques cartographiques traditionnelles, où l'étude de l'analyse spatiale des sols est généralement limitée aux seules approches descriptives fondées sur des observations directes ponctuelles (fosses, sondages, ...). La délimitation rapide et aussi précise que possible

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

des limites des unités pédologiques cartographiables est la compréhension des règles de distribution des sols dans le paysage (**Merzouk**, 1994). Depuis que des satellites d'observation de la terre sont en orbite l'importance de l'utilisation des images satellitaires ne sont plus à démontrer. Les images satellite procurent une vue synoptique du paysage. Ils ont largement été utilisés dans la reconnaissance et la cartographie des sols par l'observation indirecte des propriétés des sols par les mesures des rayonnements réfléchis par la surface des sols (états de surface des sols calcaires, gypseuse, salée, ...). D'après **Merzouk** et al., (1990) ; **Kristof** et **Zachary** (1971) ont démontré, par une analyse numérique de reconnaissance des formes, que les données MSS aéroportées pouvaient servir à la cartographie des sols de petites régions avec un degré satisfaisant de précision.

Weismiller et **Karmonsky** (1978) rapportent que les résultats d'analyse de données satellitaires peuvent aider grandement les spécialistes en sciences du sol dans la préparation des cartes d'associations des sols, la délimitation du matériau parental, le raffinement des limites entre les unités de sols ainsi que dans la préparation des cartes de drainage et de teneurs en. **Horvath** et al., (1984), dans une étude sur les relations entre des données numériques LANDSAT et les propriétés de certains sols en Arizona, concluent que les données de réflectance du satellite apportent une information très riche en ce qui concerne la définition et la distribution des unités de sol ".

Escadafal et Pouget (1987) ont dressé, en Tunisie, des cartes des états de surface du sol, à 1/100000, à partir des images satellitaires. La légende explique bien tous les paramètres pédologiques pris en compte : Les surfaces à dominance gypseuse ;

- Les surfaces à dominance calcaire ;
- Les surfaces à dominance des sables ; et
- des surfaces à dominance de végétation.

Les images satellitaires donnent la possibilité d'interpréter, d'une manière synthétique, divers facteurs de pédogenèse, surtout celles qui sont acquises lorsque les sols sont nus et laissent voir la couleur des horizons de surface (**Girard et Girard, 2004**). On distingue bien ainsi les sols de teinte sombre (les sols argileux) des sols calcaires et gypseux de teinte claire, etc. (**Hamdi Aissa et Girard., 2000**). On peut aussi estimer l'impact du réseau hydrographique sur les roches et donc interpréter leur résistance à la dégradation et l'altération pédologique. Ce qui permet d'émettre des hypothèses sur l'épaisseur des sols ainsi que sur les types de pédogenèse. On peut aussi distinguer les zones humides des autres zones, ce qui permet d'interpréter les différences de régime hydrique des sols (**Girard et Girard, 2004**).

Omran El-Sayed E. (2012), travaillons, en Egypte sur des images ETM+ de LANDSAT à permet de localiser les sols gypseux à 96.80 % par classification par le modèle de réseaux de neurones.

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

On peut construire ainsi, la carte pédopaysage d'une région à partir d'une image satellite, si l'on dispose en effet sur un même document, de la structure générale d'une région du point de vue du milieu physique : morphologie, hydrologie, occupation des sols (**Gaddas**, 2001 ; **Girard** et **Girard**, 2004). L'interprétation sous-système d'informations géographique est facilitée, car on dispose d'une information prise au même moment, d'une manière homogène, sur une vaste région. On peut s'aider, pour enrichir le contenu sémantique de chaque unité délimitée sur l'image, des cartes thématiques existantes, telles que carte topographique, carte géologique et carte de végétation même s'ils ne sont pas aux mêmes échelles et qui n'a pas été élaborée aux mêmes dates.

Actuellement, en France les images satellites sont utilisées pour le programme d'inventaire de gestion et de conservation des sols.

2.2.2.1.1 L'approche cartographique classique

Dans ce paragraphe sont décrites les approches classiques, de telles approches sont résumées sous forme synthétique, en renvoyant aux descriptions amples et approfondies présentes dans le travail d'HDR de **Walter C.**, (2002).

« L'analyse spatiale des sols a reposé pendant plusieurs décennies sur une méthode de cartographie standard, formalisée de façon détaillée par les cartographes américains (Soil survey Staff, 1951) et adaptée en France par Jamagne (1967 ; 1994). Celle-ci vise à donner une image simplifiée de l'organisation spatiale des sols (Boulaine, 1980 ; Legros, 1996) fondés sur la délimitation dans l'espace de plages cartographiques où le sol est considéré comme homogène (en acceptant un taux standard d'impuretés) et en décrivant le contenu par un profil de sol jugé représentatif et choisi par le cartographe. L'ensemble de cette démarche repose sur un échantillonnage de la couverture pédologique dont la densité est définie en fonction de l'échelle finale du document (Jamagne, 1967 ; Legros, 1996) et suppose de la part du cartographe une compréhension des relations entre la variabilité des propriétés du sol est celle d'autres caractéristiques du milieu plus faciles à appréhender (topographie, végétation, substrat, ...). Le cartographe construit ce modèle « sol paysage » au fur et à mesure de son levé de terrain en mobilisant, non seulement ses observations direct de terrain, mais également le corpus de connaissances en matière de pédogenèse et son expérience antérieure de terrain (Girard, 1983 ; King, 1986). In fine, il établit des lois de distribution des sols dans le paysage qu'il exprime de façon implicite par le tracé des limites des plages cartographiques et, hélas, plus rarement de façon explicite dans la notice associée à la carte. Cette approche cartographique présente de ce fait les caractéristiques suivantes : Elle est déterministe, propose un découpage discret de l'espace avec des limites abruptes entre les unités cartographiques, décrit des propriétés pérennes du sol et repose sur un échantillonnage dit « libre », i e dont l'emplacement des observations est décidé sur le terrain sans plan d'échantillonnage préétabli.

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

Cette conception a régi de façon quasi exclusive les levés cartographiques d'inventaire des sols menés depuis les années 1950 dans le monde, avec des variantes liées à l'utilisation de typologies des sols différents d'un pays à l'autre (Zinck, 1992) ».

Cette conception du sol, vue à travers son aptitude agronomique des années 1980, s'est transformée actuellement d'une manière rapide suite à l'émergence de la problématique environnementale telles les risques de pollution par les nitrates et autres...et l'agriculture de précision, etc. « Désormais, la connaissance des sols doit être quantitative et intégrée dans des systèmes complexes d'aide à la décision permettant de simuler les conséquences des diverses actions de production, d'aménagement et d'usage des sols en général » (Boiffin et Stengel, 2000).

Les nouvelles approches utilisées actuellement en sciences du sol, résident dans l'utilisation des images satellitales qui offrent une vue synoptique du paysage et l'utilisation des données multispectrales de la nouvelle génération de satellites et qui offrent la possibilité de combiner de multiples données complémentaires surtout avec le développement des systèmes d'information géographiques et les approches (Géo) statistiques qui décrivent les corrélations spatiales des propriétés des sols et en prédire, avec une précision connue, la valeur en des sites non reconnus.

2.2.2.1.2 L'approche par télédétection

Il ne sera pas fait référence ici à l'historique et l'origine de la télédétection pour laquelle nous renvoyons les lecteurs intéressés aux ouvrages récents cités en bibliographie. Quant aux définitions et principes des bases physiques de la télédétection, nous renvoyons le lecteur à l'annexe 1.

2.2.2.1.2.1 Définition et principes des bases physiques de la télédétection

Le terme « **télédétection** » a été officialisé en 1973, comme : « *Détection à distance (en anglais, remote sensing)* » (Paul et al., 1991).

La télédétection : *C'est la science de la technique qui consiste à collecter des informations au sujet d'un objet - ici le sol - avec un dispositif d'enregistrement n'ayant aucun contact physique avec cet objet* (figure N°25). Elle est principalement limitée aux méthodes enregistrant l'énergie électromagnétique réfléchie par le sol.

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

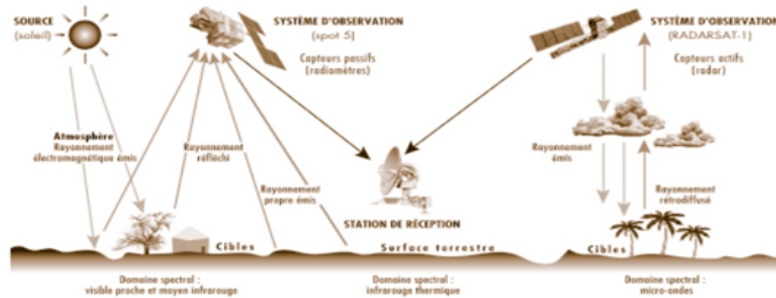


Figure 25 : les interactions rayonnement atmosphère – cible (par la source (soleil ou radar).
Source : CSFD Comité Scientifique Français de la Désertification 2012

D'après ZULUAGA, 1994 « La télédétection, désigne l'ensemble des méthodes de mesure d'information à distance par l'intermédiaire du rayonnement électromagnétique émis, réfléchi ou diffracté par les objets observés ».

Selon BONN (1996), la télédétection est « la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes.. Comme son nom l'indique, elle suppose l'acquisition d'informations à distance, sans contact direct avec l'objet détecté ».

Elle réunit donc tous les moyens utilisés pour l'observation de la terre à distance : photos aériennes, images multispectrales et radar (Lozet et Mathieu, 1990).

Le système télédétection se compose en plusieurs éléments. Son processus se divise en sept grandes étapes (Cf. Figure N°26).

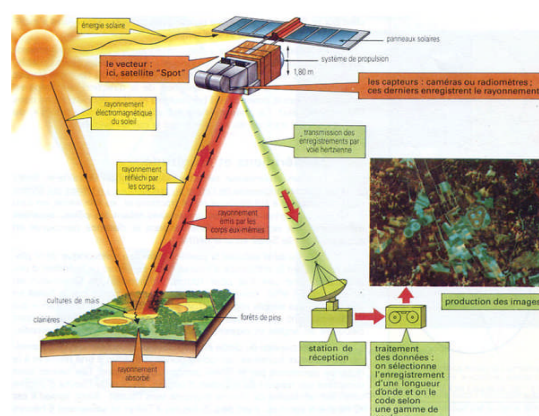


Figure 26- le système de télédétection.

Source : <http://www.alertes-meteo.com/geographie/teledetection.php>

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA
CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

2.2.2.1.2.2 Bases physiques de la télédétection

La télédétection est donc fondamentalement axée sur la notion de spectre électromagnétique.

2.2.2.1.2.2.1 Interaction Rayonnement – cible

Le rayonnement traversant l'atmosphère peut atteindre et interagir avec la surface de la Terre. Lorsque l'énergie atteint la cible, la surface peut absorber l'énergie (A), la transmettre (T) ou réfléchir (R) l'énergie incidente (Figure N°27). L'énergie incidente totale interagira avec la surface selon l'une ou l'autre de ces trois modes d'interaction. La proportion de chaque interaction dépendra de la longueur d'onde de l'énergie, ainsi que de la nature et des conditions de la surface (surfaces lisses ou rugueuses, période humide ou sèche).

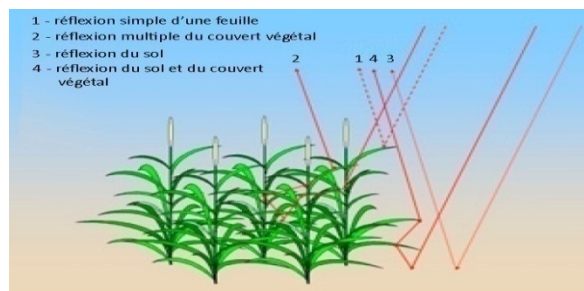


Figure 27- Illustrations des interactions entre le sol et la végétation, intégrées au niveau de la mesure satellitaire. Source : (FENSHOLT, 2003)

Chaque élément de la surface de la terre peut d'une part absorber, transmettre ou réfléchir les rayonnements envoyés par une source électromagnétique (Figure N°28).

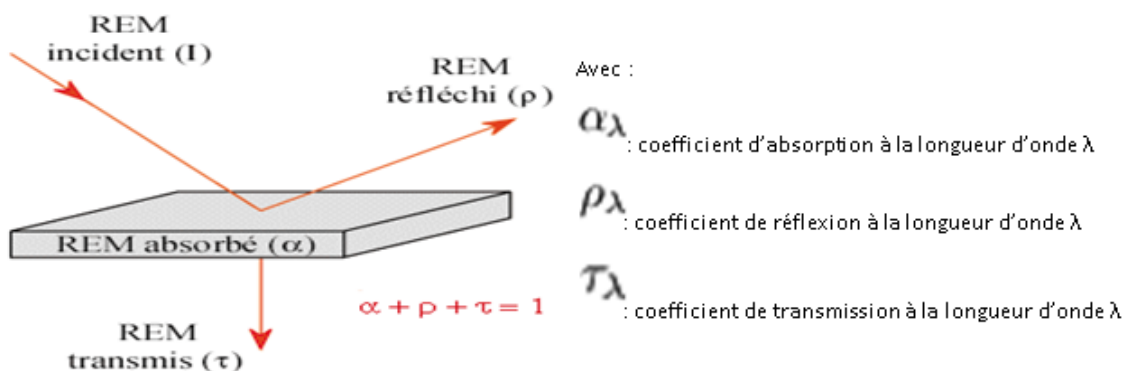


Figure 28- Interactions onde surface : Absorption, réflexion, transmissions:
source : BONN et ROCHON, 1992.

L'absorptance, la réflectance et la transmittance, ont des valeurs comprises entre 0 et 1, dont la somme est toujours égale à 1.

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA
CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

2.2.2.1.2.2.1.1 Définition de la réflectance

La réflectance est le quotient de l'intensité du rayonnement réfléchi sur l'intensité du rayonnement incident.

$$\rho = RR / RI \quad \text{Équation 13}$$

RR : Rayon réfléchi ;

RI : Rayon Incident ;

Facteurs de la variation de la réflectance

La réflectance est soumise à certaines variations dues aux effets suivants :

❖ Effet directionnel

C'est une relation triple « soleil - sol - capteur » qui conduit à une variation de la réflectance. La position du capteur qui diffère de celle du soleil fait la différence des mesures de la réflectance (Figure N°29).

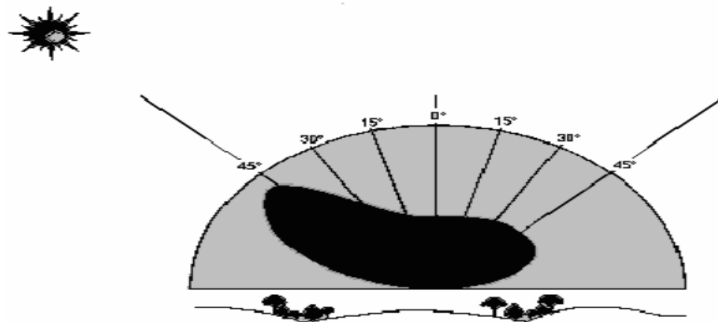


Figure 29- l'effet directionnel (Julien 2006)

❖ Effet atmosphérique

Ce sont les perturbations atmosphériques qui affectent le rayonnement réfléchi lors de son passage à travers l'atmosphère vers le capteur : absorption et diffusion.

Les vapeurs aqueuses et les gazes carboniques sont des gazes à effet de serre qui absorbent très efficacement les rayons de différentes longueurs d'onde (Figure N°30).

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA
CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

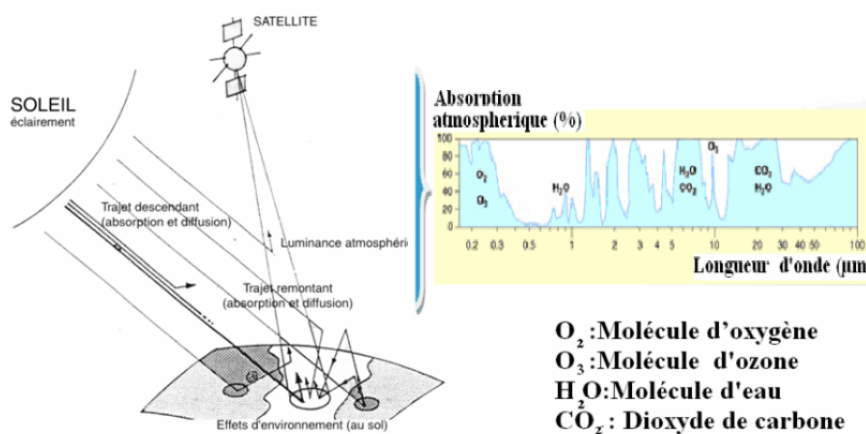


Figure 30- Perturbations atmosphériques (Adapté de LILLESAND & KIEFER, 1994)

❖ **Effet du taux de recouvrement par la végétation et l'effet géométrique ou effet topographique**

La détection des sols s'effectue le plus souvent dans les régions où le taux de recouvrement par la végétation est inférieur à 30 % (YONGCHALERMCHAI, 1993). Sinon certaines zones ne seront pas détectées par le satellite.

La réflectance dans certaines régions sera influencée par la topographie, telle que les reliefs escarpés peuvent cacher certaines zones et alors elles ne seront pas détectées aussi par le satellite. Par conséquent, on aura des réflectances tachées d'erreurs. D'autre part, les zones soumises au soleil auront une réflectance maximale car ils seront bien éclairés, tandis que celles qui sont ombragées auront une réflectance faible voire même nulle.

2.2.2.1.2.2.1.2 Le spectre électromagnétique

Les principales zones du spectre dans lesquelles des mesures sont possibles en télédétection sont (figure N°31) :

- l'ultraviolet (quoique rarement) ;
- le visible, de 0,4 à 0,7 m, souvent décomposé en bandes spectrales plus étroites ; - L'infrarouge proche, c'est-à-dire proche du visible, de 0,7 à 1,5 m ;
- l'infrarouge moyen, de 1,5 à 3 m ;
- l'infrarouge thermique, de 3 à 15 m ;
- les hyperfréquences appelées aussi micro-ondes, de 1 millimètre à 1 mètre.

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA
CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

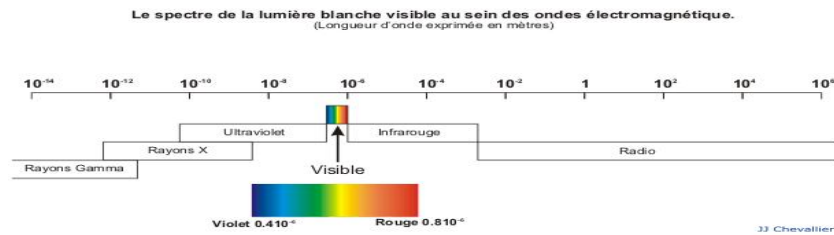


Figure 31- Le spectre électromagnétique (source. http://www.saga-geol.asso.fr/Mineralogie_page_exposes_couleur_mineraux.html).

Juste une partie du spectre électromagnétique revêt une importance toute particulière pour nous ; C'est la partie optique (dans ce travail seul, la télédétection passive est concernée). Pratiquement, les capteurs utilisés en télédétection optique couvrent le domaine visible (de 0,4 à 0,7 m) et celui de l'infrarouge (de 0,7 à 15 m). Ces capteurs se contentent généralement de mesurer et d'analyser le rayonnement réfléchi par les objets éclairés par le soleil " systèmes passifs ".

2.2.2.1.2.1 Les comportements spectraux ou signatures spectrales

Les différents objets n'absorbent pas tous la même partie du rayonnement solaire, et qu'en conséquence, le spectre du rayonnement réfléchi est différent. L'allure du spectre électromagnétique réfléchi par un objet est appelée sa « *signature spectrale* » ou « *comportement spectral* ». La télédétection exploite cette propriété.

L'analyse des caractéristiques du spectre électromagnétique réfléchi par les objets « *signature spectrale* » permet dans une certaine mesure de déterminer certaines propriétés de ces objets. C'est le cas des sols, des végétaux et de l'eau. À chacun de ces objets correspond un groupe de comportements spectraux, très différents entre eux (Figure N°32). Un comportement spectral correspond à la fonction définissant la valeur de la réflectance dans les diverses bandes spectrales étudiées (courbe de réflectance).

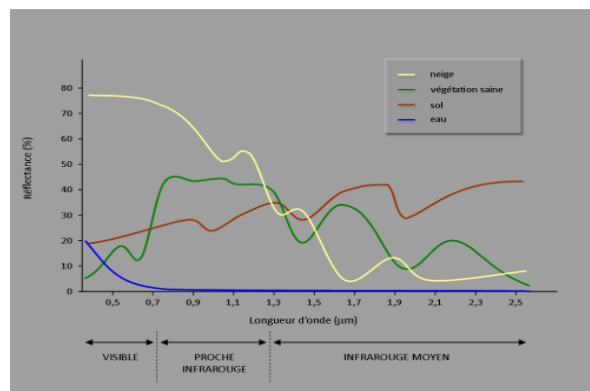


Figure 32- Signatures spectrales des surfaces naturelles dans le domaine du visible, du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen. <http://e-cours.univ-paris1.fr>

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

a. Comportements spectraux des sols

La réflectance des sols varie selon les principaux paramètres de surface des sols : la rugosité, la matière organique, le taux en carbonate de calcium, les sulfates, les oxydes de fer, la distribution de taille des particules, la structure des sols, la battance des sols, l'humidité du sol, la minéralogie des sols (salure) (**ORLOV**, 1966 ; **CIPRA** et al., 1971 ; **LARMANOV** et **ROZHKOVA**, 1972 ; **MATHEWS** et al., 1973 ; **SCHREIER** et **LAVKULICH**, 1980 ; **KRISTOF** et al., 1980 ; **STINNER** et **BAUMGARDNER**, 1981 ; **KATHLEEN** et al., 1981 ; **LEFEBVRE D'HELLEN COURT**, 1981 ; **GIRARD**, 1983a ; **KING C**, 1983 ; **TRAUBE**, 1985 ; **KING c**, 1985 ; **COURAULT** et al., 1987 ; **COURAULT** et **GIRARD**, 1988b ; **GIRARD M-C** et **GIRARD C-M**, 1989 ; **COURAULT**, 1989 ; **GUYOT**, 1989).

Les comportements spectraux des sols se caractérisent par des valeurs de réflectance régulièrement croissantes dans le visible et le proche infrarouge, tandis qu'elles sont généralement faibles dans le moyen infrarouge réflectif (figure N°33).

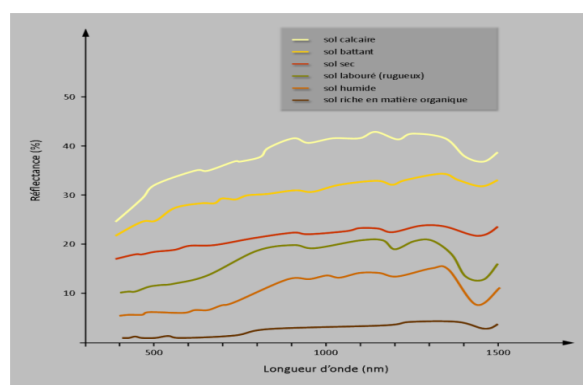


Figure 33- Signatures spectrales pour différents types de sols.
Source : (Girard M.C. et Girard C.M., 1989)

La réflectance des sols est due à :

a.1 La couleur

Les travaux de **COURAULT** et al., (1987) montrent que la clarté de surface du sol est corrélée positivement avec le calcaire et négativement avec la matière organique et le fer, la pureté et la teinte a une influence relativement faible avec la matière organique. La teneur en calcaire, en matière organique, ou en fer modifie la réflectance des sols, plus le sol est clair, plus la réflectance est forte (**GIRARD C-M**, 1975 ; **CIPRA** et al., 1980). Les mesures radiométriques de la surface du sol par **TRAUBE** (1985) montrent qu'il y a des relations très étroites entre la réflectance et certains paramètres des sols comme l'humidité, la rugosité et la couleur. Par exemple, une surface grise donne la réflectance la plus forte, une surface brune

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA
CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

donne une réflectance moins forte et une surface rouge donne la réflectance la plus faible (Figure N°34).

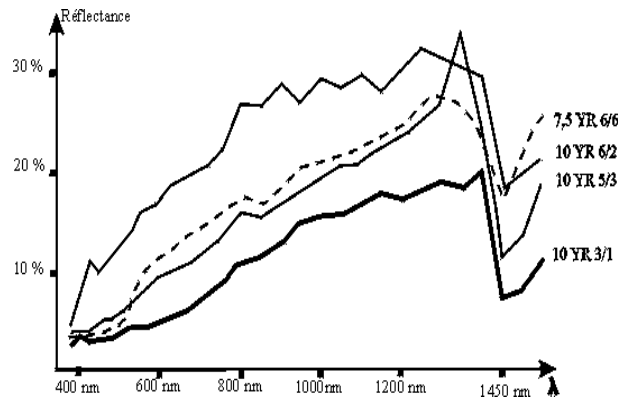


Figure 34- Réflectances, mesurées sur le terrain, de sols de différentes couleurs.
Source : (Girard M.C. et Girard C.M., 1989).

a.2 L'humidité

BLANCHARD et al., (1974) montre une relation inverse entre la réflectance et l'humidité des sols. À texture constante, les sols humides ont une réflectance moindre que les sols secs. Par contre, pour les sols argileux, même secs, il y a toujours un minimum pour les bandes de l'eau (1,45, 1,95 et 2,45 μm), car il y a toujours de l'eau liée dans une argile sèche (GIRARD M-C et GIRARD C-M, 1977) (figure N°35).

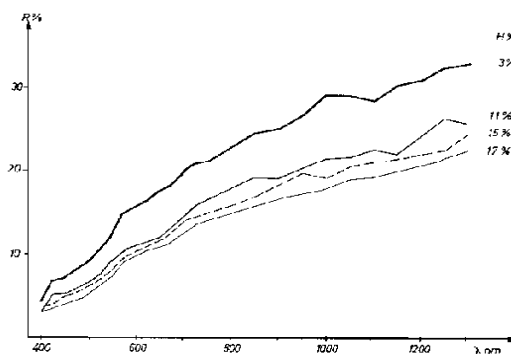


Figure 35- Réflectances, mesurées sur le terrain, d'un même sol plus ou moins humide.
Source : (Girard M.C. et Girard C.M., 1989)

La teneur en eau n'est pas le seul facteur modifiant les valeurs de réflectance. Parmi les autres facteurs :

a.3 La rugosité de surface du sol

La rugosité du sol a un effet sur la réflectance sur la réponse spectrale dans les différentes longueurs d'onde, et la réponse propre du sol est fonction des ombres pour un sol rugueux

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA
CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

(GAUSMAN et al., 1977). Les travaux de CIPRA et al., (1971) montrent une diminution de réflectance spectrale plus forte pour une surface rugueuse que pour une surface lisse, ce qui due à la réflexion diffuse et l'effet de l'ombre. Une surface lisse (rouleau) est plus réfléchissante qu'une surface rugueuse (labour) (figure N°36).

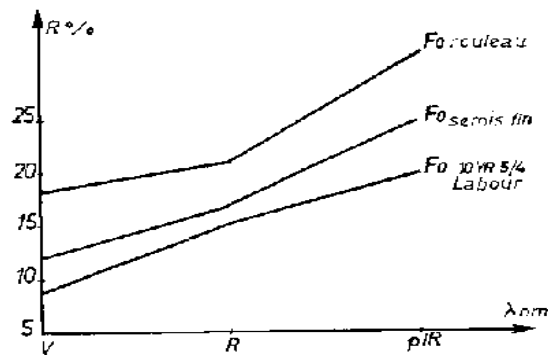


Figure 36- Réflectances, mesurée sur le terrain, de différents états de surface d'un même sol.
Source : (Girard M.C. et Girard C.M., 1989).

L'étude réalisée par GIRARD et BIALOUSZ (1989) sur les sols polonais, montre l'intervention d'autres facteurs sur la relation : matière organique et humidité. Lorsque les sols sont peu organiques (moins de 2 % MO), la rugosité du sol joue sur la réflectance. Quel que soit l'état d'humidité du sol, la réflectance diminue avec l'augmentation de la rugosité. Par contre, lorsque les sols sont organiques (plus de 3 à 4 % de MO), la réflectance diminue, quelles que soient l'humidité et la rugosité.

a.4 La teneur en calcaire

Le taux de calcaire intervient sur la réflectance, des sols en donnent des valeurs très fortes dans la bande bleue TM1 de LANDSAT. La courbe de réflectance est convexe, les valeurs sont très fortes, mais moins que pour les sols comportant des efflorescences salines. La réflectance augmente avec le pourcentage de calcaire (figure N°37).

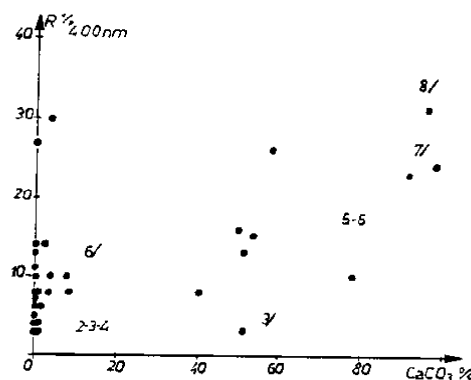


Figure 37- Relation entre le calcaire total et la réflectance en 400nm (6/,8/ ...clartés Munsell), d'après D. COURAULT (1989).

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA
CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

D'après **GIRARD M-C** et **GIRARD C-M** (2004), dans les régions sédimentaires, les régions très calcaires correspondent fréquemment à des affleurements de calcaire, de craie ou de marne claire. Souvent aussi, les labours remontent ces matériaux en surface. En conséquence, une manière de les identifier consiste à analyser le contraste entre la zone calcaire et ses voisines. Le contraste étant généralement fort pour les zones calcaires, la limite se trace facilement.

a.5 La teneur en matière organique

La matière organique a tendance à diminuer la réflectance dans toutes les bandes spectrales du visible (figure N°38). La courbe de la réflectance du matière organique reste concave pour l'ensemble du visible.

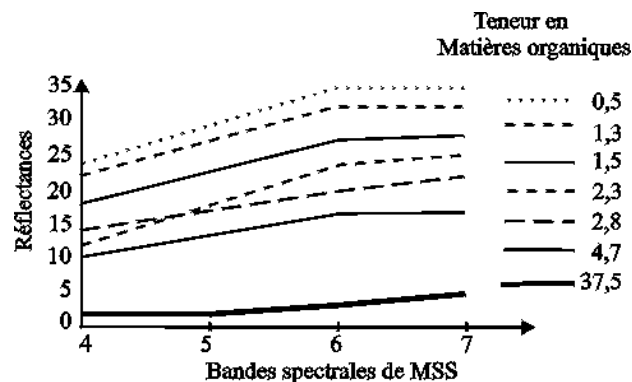


Figure 38- Réflectances, mesurée sur le terrain, de sols plus ou moins organiques.
Source **GIRARD M-C** et **GIRARD C-M** (2004),

a.6 La granulométrie

La réflectance varie dans le visible ou l'infrarouge en fonction de la teneur en eau des différents éléments texturaux (argiles, limons, sables, graviers, cailloux, pierres, blocs). Il s'agit donc d'un effet indirect (figure N°39).

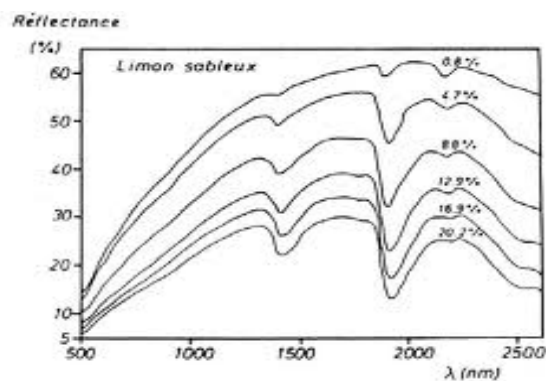


Figure 39- Exemples de réflectance, du % de limon sableux.

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

Les argiles contiennent plus d'eau que les sables. Ils sont souvent liés à la matière organique d'où la réflectance d'un sol argileux, elle est relativement faible. Parcontre, les sables sont souvent beaucoup plus secs, car ils ne contiennent pas d'eau, leur porosité est souvent grossière. Les sables sont donc d'une grande clarté d'où, ils ont une réflectance relativement forte. Les limons, s'ils sont pauvres en matières organiques et non calcaires, ils voient leurs structures de surface se modifier par les pluies et de rugueux devenir lisse. C'est le phénomène de battance. Sur des images satellite, ils apparaissent très clairs. Cette forte réflectance est attribuée à la faible rugosité due aux limons qui est la cause de la battance et non à la nature des particules. Si le sol est couvert d'éléments grossiers est très abondant en surface, on parle de pierrosité. Le plus souvent la réflectance augmente avec la pierrosité. L'extraction des matériaux dans les carrières provoque un recouvrement de l'ensemble de la zone par de fines poussières qui sont le plus souvent blanches ; Les carrières ont presque toujours une réflectance très forte.

b. Les comportements spectraux des sels

Les bandes d'absorption des sels sont détectables particulièrement dans l'infrarouge proche et moyen réflectif sauf pour le NaCl (figure N°40).

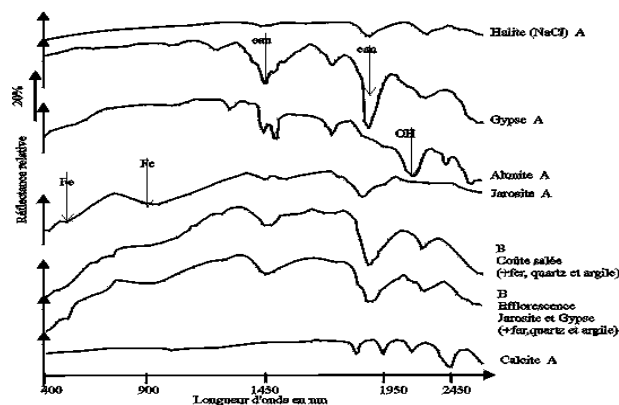


Figure 40- Réflectances spectrales de différents sels, au laboratoire (A), sur le terrain (B), d'après MOUGENOT, (1989).

Le gypse, qui, est très sensible à l'eau, présente trois pics d'absorption à 1450, 1950 et 2350 nm. Il faudra donc utiliser les bandes 5 et 7 de Thematic Mapper pour détecter les sels par satellite.

NB : Sur les données de télédétection, le comportement spectral observé, résulte le plus souvent de l'interaction de ces divers facteurs mais aussi selon la végétation qui la couvre (GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999).

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA
CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

c. Le comportement spectral de la végétation

Il est souvent possible de détecter les sols d'une manière indirecte. Par exemple pour les sols salés ou gypseux par la végétation (les plantes halophytes et gypsophiles) sont communément indicatrices de ces milieux. De nombreux modèles existent pour modéliser la réflectance de la végétation (**HOWARD, 1991**) (figure N°41).

Les comportements spectraux enregistrés au-dessus des couverts végétaux représentent une association complexe de l'ensemble des comportements : Sols, végétations et ombres (**COLWELL, 1974 ; RICHARDSON et al., 1975 ; RAO et al., 1979 ; KOLLENKARK et al., 1982 ; HUETE et al., 1985 ; HUETE, 1987**).

Les facteurs influencent la réflectivité de la végétation sont :

- ✓ la structure de la feuille (structure interne, surface de la feuille, contenu eau et chlorophylle) ;
- ✓ la géométrie de la feuille (orientation, inclinaison) ;
- ✓ l'assemblage des feuilles (recouvrement, disposition) ;
- ✓ la structure canopée (lisse rugueuse, ouverte, fermée) ;
- ✓ L'angle de prise de vues (ombre) ;
- ✓ L'influence du sol.

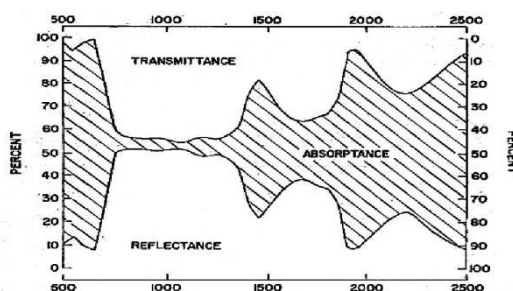


Figure 41- Comportements de la végétation- source COLWELL 1983

- Dans le domaine visible (0,4 0,7 mm) le rayonnement est en majeure partie absorbé par les pigments foliaires (chlorophylle a et b avec 2 bandes d'absorption dans le bleu et le rouge) pour la photosynthèse. Ce qui explique que les végétaux nous apparaissent verts. La réflectance est d'autant plus faible que la photosynthèse est importante.
- Dans le domaine de l'IR c'est la teneur en eau qui affecte la réflectance. On reconnaît les pics d'absorption déjà observés dans l'atmosphère.

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA
CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

2.2.2.1.2.3 L'image satellitale ou satellitaire

2.2.2.1.2.3.1 Définition

« Une image satellite est formée de composés élémentaires appelés « pixels » dont la valeur est définie par la mesure de la radiance moyenne (figure N°42) ».

La plupart des logiciels de télédétection traitent les pixels un par un sur la base de leurs propriétés spectrales (BONTEMPS, 2004). Pour LANDSAT, chaque pixel représente 0,5 ha.

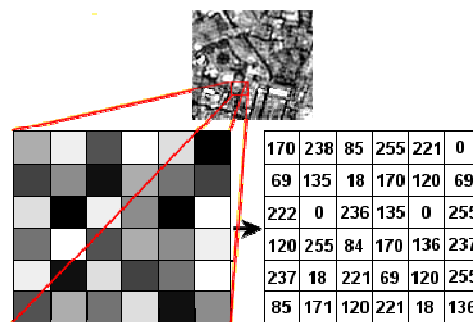


Figure 42- Une image satellite est formée de composés élémentaires appelés « pixels »

Source : <http://espace-svt.ac-rennes.fr/index.html>

Certainement, la télédétection ne peut donner que des informations sur la partie la plus superficielle du sol. Parce que, le pouvoir de pénétration d'une onde électromagnétique est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde soit de l'ordre du micromètre dans le domaine du visible, jusqu'à de l'ordre du centimètre pour les hyperfréquences (radar). Lorsque les nuages ou la végétation ne cachent pas le sol, seuls les états de surface du sol permettent de détecter directement certains paramètres pédologiques. Mais il suffit d'une pluie qui humidifiait la surface, d'un vent qui l'assèche, d'une croûte de battance ou d'efflorescence saline de quelques millimètres d'épaisseur, pour que le comportement spectral soit complètement modifié (Girard et Girard., 2004).

2.2.2.1.3 TELEDETECTION DES FORMATIONS SUPERFICIELLES ET CONCEPT D'ETATS DES SURFACES

2.2.2.1.3.1 Télédétection des formations superficielles

Dans les milieux arides, les sols sur formations superficielles (alluvions, limons éoliens, dépôts de pente) représentent des surfaces considérables. Ils sont souvent très différents des sols voisins sur roche en place (notion d'allochtonie). Les sols superficiels et les sols peu évolués ont beaucoup de caractères qui dérivent directement des roches sous-jacentes (Legros., 1996). Les satellites mesurent l'ensemble des caractéristiques de la surface du sol, incluant les plantes, le sol et les matériaux superficiels. Ils peuvent nous renseigner non pas tant sur la végétation seule, mais sur l'état de la surface dans son ensemble (Escadafal, 2007).

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA
CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

Le développement des images satellite a permis la création de produits thématiques sur le sol, sur l'occupation des sols, sur la végétation, etc. La cartographie des sols constitue à l'heure actuelle un objectif majeur de recherche en télédétection. Pour le pédologue, il est indispensable de connaître les propriétés spectrales des sols pour tirer des informations de nature pédologique des images spatiales. Mais le télédéteur devra aussi connaître ses mêmes propriétés pour pouvoir modéliser le comportement spectral des cibles, en particulier des ensembles sols végétation, très largement dominants à la surface du Globe (**Escadafal**, 1989). De très nombreux travaux se sont attachés à décrire des relations qui relient les caractéristiques et les propriétés de sols et la réflectance spectrale, que ce soit par interprétation directe des images satellite ou par des études expérimentales à travers des mesures radiométriques in situ. Les études portant sur les états de surface des sols (EDS) au sens pédologique du terme sont réalisées par quelques équipes citées in Girard M-C et Girard C-M (2004), parmi lesquelles **Condit** (1970), **Goetz**, **Huete** (1991), **Baumgardner** (1981) aux ETATS-UNIS, en POLOGNE avec **Bialousz** (1978) et **Cierniewski** (1993) ; Aux pays bas avec **Epema** et **Mulders** (1987) ; **Mulders** (1988), en France avec **Girard M-C** (1995), **King** (1993), **Courault** et **Baret** (1992), **Escadafal R.**, **Pouget M.**, (1987) ; **Escadafal R.** (1987), **Mougenot** et **Pouget** (1998), **Cervelle** (1977) et **Casenave, A.** et **Valentin, C.**, (1989) ; **Guyot**, (1989).

Résumé : la détection est limitée aux couches superficielles de la surface du sol en l'absence de nuages. L'accès aux couches inférieures ne peut se faire que par corrélation avec des éléments révélateurs en surface, de la texture et de la structure du sol. L'utilisation de la télédétection pour la cartographie des états de surface nécessite donc la réalisation d'observation au sol permettant de préciser, aux échelles d'observation de l'appareil embarqué à bord du satellite, les principales caractéristiques des états de surface.

Pour réaliser notre travail, nous proposons dans ce chapitre une revue sur les états de surface des propriétés des sols et leur comportement spectral basé sur les travaux de **Escadafal** et **M-C Girard** (1989).

S'il n'est pas possible de reconnaître et de délimiter des classes taxonomiques directement par télédétection, en revanche on peut les estimer à travers les différences de comportement engendrées par les différences composition détectable des États de Surfaces de Sols (EDS), i.e. de séparer les paysages en segments ayant des paramètres similaires.

Quelle information utiliser pour définir l'EDS ?

L'EDS s'est longtemps focalisée sur deux types de propriétés : d'une part, des propriétés jugées stables dans le temps, considérées comme intrinsèques des sols (texture, minéralogie, ambiance chimique générale), d'autre part, des propriétés susceptibles d'influencer la croissance des cultures (profondeur du sol, hydromorphie, éléments fertilisants).

La délimitation des classes EDS de paysage sur une spatiocarte fournit suffisamment

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA
CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

d'information pour la caractérisation des sols, mais des investigations localement plus poussées sont nécessaires pour bien les identifier, les caractériser et les cartographier.

2.2.2.1.3.2 CONCEPT D'ETATS DE SURFACES DES SOLS (EDS)

Le concept " état de surface de sol " (EDS) a été proposé, en 1978, par **Aubert** et **Girard** et développé par **Escadafal**, en 1981 puis, en 1989, sous le terme d'état de surface du sol " et **Boiffin**, (1984) et **Auzet**, (2000) après les études sur la formation du ruissellement des sols agricoles. L'EDS est défini comme la couverture et l'état des premiers centimètres du sol. Il a été défini aussi par **Aubert** et **Girard**, (1978) ; **Escadafal**, (1981, 1989) comme étant " la composition et l'organisation de la surface du sol à un moment donné ". Selon **Lamachere** et **Puech** (1989) " le terme état de surface désigne un système de surfaces élémentaires à un instant donné, système qui constitue un ensemble homogène au sein duquel les différentes composantes entretiennent des relations fonctionnelles quant au ruissellement et à l'infiltration ". **Armand et al.**, (2009) ont proposé la définition suivante " l'état de surface du sol désigne l'état structural, hydrique et microtopographique de la surface du sol agricole et regroupe les éléments suivants : système poral (caillou, composition granulométrique, structure de battance), couverture du sol (culture ou résidu), microrelief (rugosité), et état hydrique (humidité)". Les mesures qui sont faites pour définir cet état de surface ne concernent que les éléments qui se trouvent en surface, et vus de dessus. Cela s'adapte donc bien à la vision aérospatiale de la télédétection, bien que cette notion se soit développée indépendamment de celle-ci.

Un état de surface du sol est un ensemble complexe constitué de divers éléments du sol qui sont exposés au soleil ou à l'ombre et plus ou moins couverts par la végétation. Les principaux facteurs élémentaires du comportement spectral des sols sont ceux qui interviennent sur les états de surface du sol : la couleur, la rugosité (type de surface : battants, croûtes, efflorescences, éléments grossiers, texture - structure, ombres), le calcaire, la matière organique, le fer, l'humidité, la composition chimique.

De nombreuses études ont déjà exploité le potentiel des images satellitaires pour estimer les états de surfaces des sols (EDS). Différentes approches ont été appliquées de la photo-interprétation à la modélisation en passant par les différentes classifications, mais peu d'études ont produit des cartes des formations gypseuses. De ces études on peut citer celles de **Escadafal et al.**, (1981, 1989) sur la couleur et la rugosité de surface des sols (surfaces battantes, croûtes, efflorescences, éléments grossiers, ombre, texture), de **Boiffin**, (1984) ; **Van Dijk et al.**, (1996) sur la structure des sols **Asseline et al.**, (1987) ; **Auzet et al.**, (1990) ; **Boiffin**, (1984) ; **Casenave and Valentin**, (1990) sur les teneurs en calcaire, en matière organique, en fer, l'humidité et la composition chimique. **Mougenot**, (1993) et **Mougenot et al.**, (1993) ont étudié la réflectance des sols selon leur degré de salinité. **Viscarra-Rossel et Mc Bartney**, (1998) ont réalisé une étude pour les sols d'Australie, dans laquelle la région spectrale étudiée allait de 1300 à 2500 nm, mettaient en relation la texture argileuse des sols et la matière organique avec l'humidité du sol. **Dematte et Garcia**, (1999) dans une étude similaire ont mis en relation les réflectances

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

spectrales entre 400 et 2500 nm, mesurées au laboratoire et les échantillons de sols au Brésil, pour estimer la teneur du sol en éléments comme l'argile et le fer. **Thomasson et al (2000)** ont aussi trouvé des relations entre les réflectances allant de 250 à 2500 nm et certaines propriétés des sols du Mississippi. **Chang et al. (2001)** aux États-Unis ont utilisé un NIR (Near Infrared Reflectance) pour établir, d'une façon rapide et non destructive, des relations entre la réflectance et un certain nombre de propriétés du sol (argile, CaCO₃, Ca, Fe, Mg, CEC), etc. et enfin, **Martin, (1999) et Roth, (2004)** sur la végétation.

Divers auteurs (**Courault, 1989 ; Escadafal, 1989 ; Girard et Isavwa, 1990, Alaily et Pohlmann, 1995 ; Goossens et Van Ranst, 1998 ; Girard. M.C et Girard. C.M, 1999 ; Hamdi Aïssa et Girard, 2000 ; Martinez-Montoyaa and al., (2010) ; Omran, 2012**;) Ont montré aussi, qu'il existe des relations étroites entre les comptes numériques des images satellitaires et les états de surface du sol, en particulier en milieu aride. L'accès facile par les satellites à la surface du sol est dû à un taux de recouvrement de végétation faible.

Mais, malgré ces relations entre la mesure de réflectance, les propriétés du sol (**Scull et al., 2003**) et malgré le fait que la télédétection soit une source de données importantes dans la cartographie des sols par la continuité de données télé détectés, les images satellites ne sont pas utilisés couramment pour cartographier les propriétés des sols parce que la réflectance du sol est gouvernée par nombreux facteurs intrinsèques (**Baret et al., 1993**) : l'humidité, rugosité, conditions climatiques, et extrinsèques angles de prise de vues, etc. (**Barnes et al., 2003 ; Thomasson et al., 2001**). En plus la télédétection ne peut donner que des informations sur la partie la plus superficielle du sol : le pouvoir de pénétration d'une onde électromagnétique est de l'ordre de grandeur de sa longueur d'onde, soit de l'ordre du micromètre dans le domaine du visible, alors qu'il est de l'ordre du centimètre pour les hyperfréquences (**Girard et Girard, 1999**).

2.2.2.1.3.2.1 Les facteurs intrinsèques des sols permettant l'identification des EDS des sols par télédétection

L'interprétation thématique, en matière d'états de surface des valeurs radiométriques, est basée essentiellement sur l'influence des composantes de couleur et rugosité, tout en prenant en compte les autres paramètres notamment la texture et la porosité, les croûtes de surface (la teneur en gypse, calcaire, halite), l'humidité, la présence de la végétation, les formations géologiques, la lithologie et le microrelief. La réflectance d'un sol nu, par exemple, est de manière générale peu influencée par la longueur d'onde, par contre le taux d'humidité, la concentration en matières organiques, le pourcentage de calcaire, gypse et la texture à une importance prépondérante. Si certaines variables (Tableau 7.2-1), comme la composition du sol, sont des paramètres quasi permanents (**Michot, 2003**), d'autres comme l'humidité, la rugosité, et la structure du sol est des paramètres conjoncturels (**Houles, 2004 ; Launay, 2002**), nécessitant une réactualisation fréquente des cartes. L'humidité du sol est un paramètre particulièrement variable dans le temps et dans les 3 dimensions de l'espace (**Engman, 1991**).

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA
CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

Tableau 2.2-1 Variables estimables par télédétection. Le niveau de précision et la robustesse de l'estimation sont indiqués par le nombre de + (« + + + + » précis et robuste ; « - » non estimable par télédétection (Baret, 1999).

Variables Biophysiques		Visible Proche Infrarouge	Proche Moyen Infrarouge	Infra-rouge thermique
Sol	Humidité	-	+	+
	Rugosité	+	+	-
	Résidus de récolte	+++	++	-
	Matière organique	++	++	-

En vérité, il n'y a pas d'accord unanime entre les auteurs quant aux bandes spectrales les plus appropriées pour l'identification des sols. Selon **Shockley et al (1962)**, une mesure de la réflectance à 1,4 – 1,75 – 1,94 – 2,25 – 4,0 – 4,5 μm devraient permettre une identification de la plupart des types de sols avec une probabilité supérieure à 95%. Pour d'autres (**Condit, 1970**) les longueurs d'onde les plus appropriées sont 0,45 – 0,54 – 0,64 – 0,74 – 0,86 μm . Ces dernières se rapprochent plus des canaux utilisés sur LANDSAT, bien que les bandes de LANDSAT soient beaucoup plus grossières, chaque bande couvrant environ 0,1 μm . C'est pourquoi nous essayerons de nous en référer chaque fois pour décrire l'un de ces paramètres (couleur, rugosité..., etc.) aux travaux des prédécesseurs.

Si pour autant certains paramètres, comme la composition du sol, sont des paramètres quasi permanents, d'autres comme l'humidité, la rugosité, et la structure du sol est des paramètres conjoncturels, nécessitant une réactualisation fréquente des cartes. L'humidité du sol est un paramètre particulièrement variable dans le temps et dans les 3 dimensions de l'espace (**Engman, 1991**).

1. La rugosité

La rugosité de surface est un paramètre physique caractérisant l'état géométrique de la surface du sol. Elle dépend de facteurs extrinsèques comme la microtopographie ou les travaux culturaux et de facteurs intrinsèques comme les fentes, les croûtes ferrugineuses, la structure du sol, la battance. Quelle qu'en soit l'origine, la rugosité modifie la réflectance en fonction de la quantité d'ombre saisie par le capteur. Ainsi, plus une surface est rugueuse, plus sa réflectance est faible.

Dans le cas d'un sol nu, la rugosité du sol dépend des pratiques agricoles (labour ou semi) et des précipitations (destruction des mottes).

La rugosité détermine la répartition des pluies entre infiltrations, rétention superficielle et ruissellement (**Auzet et al, 2005 ; Cerdan et al, 2002**). La composition granulométrique du sol, (en matière d'argile, limon, sable) contrôle la capacité d'infiltration du sol (**Boiffin et al, 1988 ; Brun et al, 1990 ; Le Bissonais, 1990 ; Zobeck and Onstad, 1987**). La structure du sol

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

conditionne le potentiel d'infiltrabilité de l'eau précipitée, et dont la détérioration conduit à la genèse d'encroûtement sur les sols limoneux (**Le Bissonnais and Singer, 1992 ; Gover s et al, 2000 ; King and Le Bissonnai s, 1992**). La structure de battance (formation d'une pellicule superficielle après une) diminue l'infiltration et augmente la cohésion des sols..

2. L'humidité

L'humidité est un paramètre particulièrement dynamique dans le temps et dans l'espace. L'humidité donne un aperçu sur la profondeur du sol, la texture, la structure et conditionne la répartition des pluies entre infiltrations, rétention superficielle, ruissellement et évapotranspiration (**Auzet et al., 2005 ; Cerdan et al., 2002**).

3. La couleur et composition des sols

La couleur des sols a été retenue comme critères de classement dans de très nombreux systèmes de classification des sols (**Segalen, 1977**). Comme est-elle un élément très important de description et de discrimination des sols sur terrain (**Girard M. C. (1983)**).

Les couleurs sont estimées et codifiées grâce à la charte de couleurs « Munsell Soil Color Chart », cela afin d'éliminer toute dénomination trop personnelle ou subjective. On indique pour chaque couleur les caractéristiques suivantes :

- la teinte dominante (hue) : couleur spectrale dominante
- la pureté (value) : paramètre quantifiable qui correspond à la proportion de balance ou de noir entrant dans la composition de la teinte.
- l'intensité (chroma) : force de la couleur spectrale.

Divers travaux sur l'effet des principaux constituants sur la couleur des sols ont été réalisés à la fin des années 80 et au début des années 90 (**Escadafal, 1993 ; Escadafal et al., 1988a ; Escadafal et al., 1988b ; Huete et Escadafal, 1991**), on peut retenir les points suivants :

- les sols humides sont plus sombres que les sols secs, et une augmentation de l'humidité de surface des sols s'accompagne d'une diminution de leur réflectance ;
- La présence de matières organiques en quantité notable (plus de 2 %) se traduit par une couleur foncée (clarté faible Munsell), correspondant à une faible réflectance dans toutes les longueurs d'onde (**Shields et al., 1968 ; Girard, 1977 ; Leger et al., 1979 ; Krishnan et al., 1980**) in (**Escadafal, 1989**).
- les carbonates ont une couleur claire, liée à une réflectance élevée dans le domaine visible, qui varie sensiblement avec la taille des particules (**Leu, 1977**) in (**Escadafal, 1989**).

CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION

4. La granulométrie

La granulométrie s'exprime par la répartition relative de différentes particules de sol, définies par leurs diamètres extrêmes.

- ✓ **Eléments grossiers (la pierrosité)** : la réflectance des sols augmente avec la pierrosité de la surface du sol : l'énergie réfléchiée par les éléments grossiers est généralement plus importante que les ombres qu'ils occasionnent. Ces éléments peuvent être cachés par le travail du sol, par le labour, puis se montrer au fur et à mesure qu'ils sont lavés par l'eau.
- ✓ **Eléments fins (la texture)** : Il existe une relation indirecte entre la réflectance et les éléments fins :
 - Les argiles souvent solidement liées à la matière organique ont une faible clarté, donc, une réflectance généralement faible.
 - Les sables, généralement caractérisés par une forte clarté et une faible teneur en eau, présentent une réflectance relativement élevée.
 - Les limons, de fait de leurs propriétés physiques, tendent à l'imperméabilisation du sol et son asphyxie. Leur abondance constitue un facteur d'instabilité de la structure. Ainsi, sous l'action de la pluie, la structure de surface des sols limoneux se modifie : de rugueuse elle devient lisse (croûte de battance) et se caractérise par une forte réflectance spectrale.

5. Le calcaire

Pour des taux de calcaires totaux inférieurs à 10-20%, il n'y a pas d'influence du calcaire sur la réflectance. Par contre, au-delà de cette limite, plus la réflectance est grande, plus il y a de calcaire si les autres facteurs sont les mêmes. Pour les valeurs dépassant 60 - 70 % de calcaire, il y a peu de différences de réflectance, et sur les images et photographies aériennes, il y a saturation dans les valeurs très fortes. D'après **Escadafal, (1989)**, la mise en évidence de relations quantitatives entre réflectance et composition d'un sol n'est pas simple. En effet, les sols sont des mélanges complexes de particules de nature, de taille, de formes et d'arrangements très variées. La réflectance des sols est donc un intégrateur d'un grand nombre de facteurs-intrinsèques et extrinsèques difficilement séparables ; Il est en effet difficile d'imputer à un seul élément ces variations de la réflectance, car il s'agit d'une combinaison d'effets présents à l'instant de la mesure par le capteur (**Michot, 2003**). En conséquence, notre travail consiste à la mise en relation de la valeur de la réflectance observée par télédétection avec les facteurs du sol in situ. Une image satellite du sol nu est un excellent moyen d'étudier les variations de couleur au sein d'une région : une image ne permet pas de dire quel type de sol est observé, mais il est possible d'établir les limites d'un changement de sol en regardant les variations de sa couleur

**CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'ÉVOLUTION DE LA
CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES MÉTHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION**

(sans prendre en compte les problèmes liés aux pixels mixtes).

2.2.2.1.4 L'approche par des méthodes géostatistiques**2.2.2.1.4.1 Notion de géostatistique**

Le mot géostatistique est un néologisme forgé à l'École des Mines. C'est pour pallier les insuffisances des statistiques «classiques» constatées dans l'étude des gisements très disséminés, que sont élaborées, au début des années 50, des méthodes d'estimation nouvelles. La géostatistique est née des problèmes rencontrés dans le secteur de la mine : contrôle des teneurs, optimisation de mailles, cartographie des ressources, prévision des réserves récupérables, étude de scénarios d'exploitation...

Daniel Krieger, géologue dans les mines d'or, proposa dans les années 60 une méthode statistique pour estimer la teneur d'un bloc de minerai à partir d'échantillons pris autour du bloc à exploiter. Dix ans plus tard, Georges Matheron développa un outil pour analyser la continuité spatiale des teneurs appelées le " variogramme " et une méthode d'estimation par modélisation prédictive fondée sur le " variogramme " appelé le " krigeage ". Depuis, cet ensemble de méthodes n'a pas cessé de s'enrichir, et a été particulièrement favorisé par le développement " en parallèle " de la géostatistique, des techniques de positionnement (GPS) et des systèmes d'informations géographiques (SIG). La géostatistique intégrée dans un SIG constitue l'outil principal de cette partie. Nous approfondirons ces deux approches dans la troisième partie application.

Une des richesses de la Géostatistique est de ne pas être tributaire d'un champ d'application particulier. Aujourd'hui, la géostatistique s'exprime dans des champs d'application comme l'océanographie, la météorologie, le génie civil, l'environnement, la géologie, la qualité de l'air et des sols, la santé, etc. La géostatistique permet de mettre en évidence les caractéristiques des variables étudiées (% de gypse, pH, CE, etc.) et les décrit mathématiquement, pour mettre en œuvre un estimateur (krigeage) qui les prend en compte. Le travail d'interrogation des données, puis de modélisation de leurs propriétés structurales, constitue, sous le nom d'Analyse Variographique, la phase initiale incontournable de toute étude concrète de géostatistique. Techniquement, la géostatistique excipe aussi une combinaison linéaire des données observées, mais à la différence des méthodes classiques d'interpolation, elle tient compte à la fois de l'information relative à leur position et du caractère aléatoire du phénomène étudié. De plus, elle autorise l'intégration des informations auxiliaires dans l'estimation. Ces avantages font notablement améliorer les estimations dans le contexte spatial.

La mise en œuvre de la méthode de krigeage passe par une étape d'analyse des données. Elle est destinée à décrire la structure spatiale de la variable régionalisée. La carte de l'interpolation est alors accompagnée d'indicateurs de crédibilité des résultats.

*CHAPITRE II-RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'EVOLUTION DE LA
CARTOGRAPHIE DES SOLS, DES METHODES CLASSIQUES A LA TELEDETECTION*

2.2.2.1.4.2 La géostatistique en pédologie

Faisons partie des statistiques spatiales, les méthodes de la géostatistique ont été introduites ces dernières années par les pédologues, (**Burgess et Webster, 1980a ; 1980b ; Webster et Burgess, 1980 ; Burgess et al., 1981 ; Webster et Oliver, 1990 ; Bradaï et al., 2009**). Les domaines d'application sont principalement : (1) l'échantillonnage, par le calcul d'un écart-type d'estimation (**Viera et al., 1981 ; Mc Bratney et Webster, 1983 ; Webster et Burgess, 1984 ; Wopereis et al., 1988**) ; (2) la description des variations spatiales d'une ou de plusieurs propriétés du sol analysées successivement (**Gascuel-Oudoux et Merot, 1986 ; Voltz, 1986 ; Boivin, 1990**) ; (3) l'étude des relations spatiales, entre différentes propriétés du sol (**Byers et Stephens, 1983 ; Vauclin et al., 1983 ; Voltz, 1986**). Ces techniques ont aidé le pédologue ont minimisé la durée d'investigation sur terrain, ainsi que les coûts d'analyse et de cartographie. L'utilisation du krigeage, méthode d'interpolation linéaire et optimale au sens statistique, permet en particulier de cartographier les variations spatiales de propriétés du sol et de décrire les limites progressives entre unités pédologiques (**Gascuel-Odoux, 1984**). Ainsi, la géostatistique, méthode d'analyse quantitative de données spatialisées, a montré son intérêt et sa robustesse (les notions et les hypothèses de bases de la géostatistique **voire références bibliographiques**).

1. INTRODUCTION

La localisation des sols gypseux à partir des données images de télédétection requiert des connaissances approfondies sur les états de surface observée. Ainsi, ces connaissances permettraient de mieux interpréter les facteurs qui peuvent affecter la réflectance. Dans ce chapitre, nous décrirons les méthodologies mis au point pour la localisation des sols gypseux, selon les états des surfaces des sols et des végétations. Nous présenterons aussi, le site d'étude et les données utilisées.

1.1 LES OBJECTIFS

L'objectif principal de ce travail était d'exploiter les données issues des images satellitales ETM+ de LANDSAT 7 de l'année 2009, afin de pouvoir différencier les états de surfaces des différentes formations gypseuses (dépôt de gypse en surface et de profondeur) par leurs seules réflectances exo atmosphériques, se fondant sur des facteurs stables : La couleur, la texture et la rugosité des sols, en vue de les localiser, caractériser puis les délimiter par photo-interprétation et par classification automatique. On cherche à répondre aux objectifs secondaires suivants :

1. Quelles sont les propriétés (intrinsèques et extrinsèques) des sols les plus déterminants pour l'identification et la caractérisation des sols gypseux ?
2. Quelle est l'échelle spatiale de travail approprié à l'étude, i.e. quelle sont où quelles sont les résolutions d'images les plus appropriées pour l'identification et la caractérisation des sols gypseux ?
3. Quelles sont les méthodes appropriées pour réaliser notre étude ? Évaluer les performances et limites de ces méthodes ?
4. Quelles méthodes choisirent pour atteindre nos objectifs ?

La réponse à ses objectifs doit nous permettre de comparer les méthodes en matière de convergence ou de complémentarité et de dégager des hypothèses sur les perspectives du travail.

1.2 DESCRIPTION DE LA DEMARCHES ET DU CHOIX METHODOLOGIQUES

Afin d'atteindre les objectifs définis auparavant, nous avons développé une méthodologie représentée par la figure N°43. Le diagramme compte trois phases principales de la recherche qui sont fondées sur le choix préalable de l'échelle spatiale qui lui-même est en fonction de la résolution spatiale de l'image: Une phase de traitement des images de Landsat, une deuxième phase de description des états de surface des sols par photo-interprétation, profil spatial, spectral et des mesures in situ , et une dernière phase, la cartographie des états de surface des sols gypseux par classification supervisée par pixel et orientée objet suivant deux échelles (30 et 15m) du site d'étude d'El Hadjeb – sous bassin versant d'oued Djed.

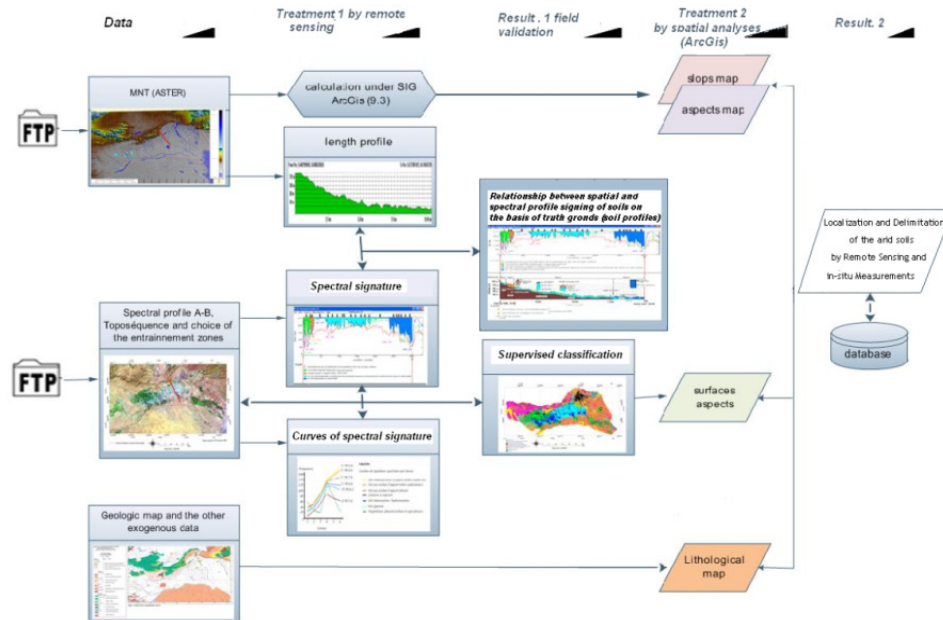


Figure 43 : les principales phases méthodologiques de la localisation des sols gypseux par télédétection et mesure in situ

1.2.1 Choix des images et les échelles de cartographie

1.2.1.1 Choix des images

Pour faire un choix parmi les données de télédétection, il faut avant tout savoir quels sont les objets recherchés, quelles sont leurs propriétés sur les images, et tenir compte du contexte géographique de l'étude. Il faut aussi posséder une bonne connaissance des différents types de données disponibles et en connaître les caractéristiques techniques. Les possibilités et les limites des divers types de données doivent être connues avant d'entreprendre les phases de traitement et d'analyse. Le choix du capteur satellitaire doit donc dans un premier temps correspondre aux critères généraux de la scène balayée par le capteur, géographiques, climatiques, géologiques, géomorphologiques, etc.....

Le second critère de sélection est entièrement lié à la nature même de l'objet observé : il dépend de sa taille au sol, et des fenêtres spectrales à couvrir en vue de la meilleure caractérisation possible de ses objets. Ainsi, lorsque la surface à couvrir est assez restreinte, pour tenir sur des cartes au 1/100.000^{ième}, 1/50.000^{ième}, et 1/25000^{ième}, des images LANDSAT TM ou ETM+ à 30 m et SPOT XS à 20 m de résolution serait souhaitable (Scanvic, 1992).

D'après l'étude de Bardinnet, (1994), le choix d'un système de télédétection est crucial, il dépend :


CHAPITRE 1 : LOCALISATION DES SOLS GYPSEUX PAR TELEDETECTION ET DES MESURES IN SITU

- de la résolution au sol du pixel;
- du nombre et de l'intervalle des bandes spectrales ;
- du cycle d'enregistrement de données disponibles diurnes, nocturnes, multi saisons ;
- de la superficie couverte par une seule image.

Nous avons choisi les images à moyenne résolution spatiale de LANDSAT, pour plusieurs raisons :

1. Elles sont disponibles gratuitement sur le net et en grand nombre (archives) sur les régions arides et aussi à des dates plus récentes ; Le satellite LANDSAT donne des informations détaillées sur l'état de la végétation et sur les sols ;
2. Elles couvrent un vaste domaine spectral. LANDSAT semble être le seul capteur spatial à pouvoir associer une résolution adaptée aux objets de la région, et une large palette de canaux permettant de multiples croisements ;
3. La cartographie des états de surface du sous-bassin versant d'oued Djedi présentant une grande superficie sera plus facilement réalisée avec des images LANDSAT (scène couvrant 185 x 185 Km) qu'avec des données Spot (scène de 60 x 60 Km) utilisées pour des études plus détaillées sur un petit territoire ;
4. Les états de surface des sols sont des paramètres fixes et qui ne nécessitent pas donc l'utilisation d'un satellite à forte répétitivité (**Caloz**, 1997) (Tableau 12).

Tableau 12 Image et paramètres disponibles sur images.

Types d'images		Paramètres Image
Optique <ul style="list-style-type: none"> ▪ SPOT, LANDSAT • Pixel fin • Faible répétitivité 		Paramètres fixes <ul style="list-style-type: none"> • États de surface • Occupation du sol • Morphologie (limites, pentes, réseau hydrographique, surfaces drainéesPrésence de fossés et drains • Structuration du paysage
Radar (Radarsat) <ul style="list-style-type: none"> • Pixel fin • Répétitivité moyenne 		Paramètres lentement variables <ul style="list-style-type: none"> • Végétation (par strates) • LAI (indice foliaire) • Rugosité de surface • Traces d'érosion
Météorologie (NOAA) <ul style="list-style-type: none"> • Pixel grossier • Forte répétitivité 		Paramètres variables <ul style="list-style-type: none"> • Température de surface • Saturations • Humidité • Étendues en eau • Turbidité

Des travaux récents ont souligné l'intérêt de la nouvelle génération d'images produites par les satellites LANDSAT, pour la cartographie des sols et des formations superficielles (Thompson et al, 1984 ; Thompson et Henderson, 1984), tous particulièrement dans les régions arides (Jones, 1986 ; Mulders et Epema, 1986 ; David et Berlin, 1987).

1.2.1.1.1 Les caractéristiques des capteurs 3^{es} série « LANDSAT 7 »

Issu du programme américain de satellites d'observation terrestres, LANDSAT 7 ETM+ a été lancé en 1999 (figure 44). Il évolue sur une orbite circulaire héliosynchrone à 700 km d'altitude moyenne. Le capteur ETM (*Enhancement Thematic Mapper*) couvre des domaines spectraux allant du bleu du visible, à l'infrarouge thermique (figure 45). Les surfaces terrestres sont couvertes en bandes suivant le nadir satellitaire. Ce n'est qu'ensuite, qu'elles sont découpées en scènes de 185 X 170 km. Chaque scène est référencée par le système de coordonnées mondial WRS. Dans ce dernier, chaque orbite de satellite correspond à une trace (path). La couverture totale de la planète se faisant en 18 jours, on dénombre 251 traces. Elles sont numérotées de 1 à 251 d'est en ouest. Chacune d'elles est ensuite découpée en 119 rangées (row). Ce système permet l'identification rapide d'une scène et sa localisation, par son numéro de trace et de rangée (Courel, 1984). (Figure46).

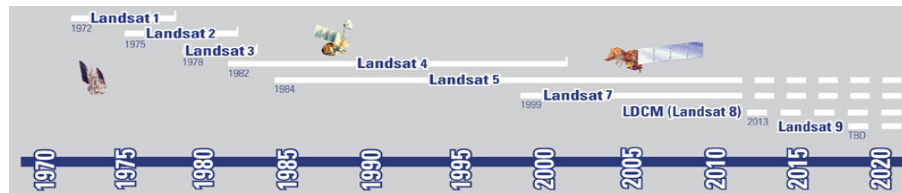


Figure 44 Le programme LANDSAT (NASA / USGS)

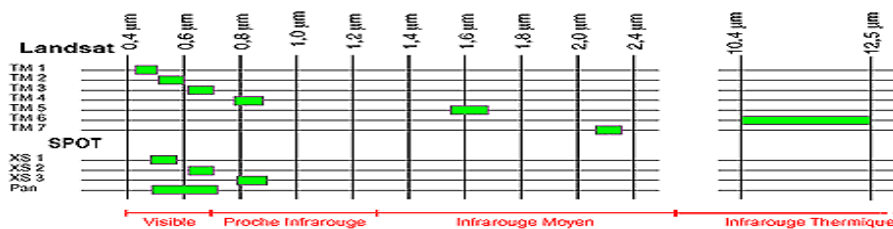


Figure 45 Le capteur ETM (Enhancement Thematic Mapper) couvre des domaines spectraux allant du bleu du visible, à l'infrarouge thermique.

CHAPITRE 1 : LOCALISATION DES SOLS GYPSEUX PAR TELEDETECTION ET DES MESURES IN SITU

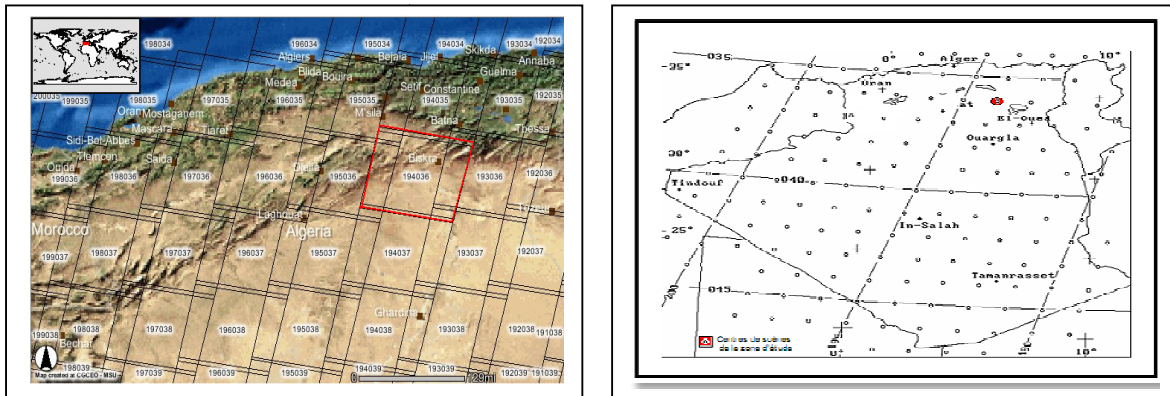


Figure 46 Identifications rapides des scènes et leurs localisations, par son numéro de trace et de rangée. Source : <http://eoeu.belspo.be/fr/guide>.

Les images LANDSAT 7 ayant servi dans cette étude sont toutes de la période sèche, c'est-à-dire de novembre à avril. Leur résolution précise est de 28,5 mètres et leur référence est Path 194, Row 036 (figure 47). Nous avons utilisé aussi des images de la période humide compte tenu du fait qu'elles permettent de faire la différence entre les zones humides et sèches. L'image retenue est celle de 2009. Leur résolution est de trente mètres.

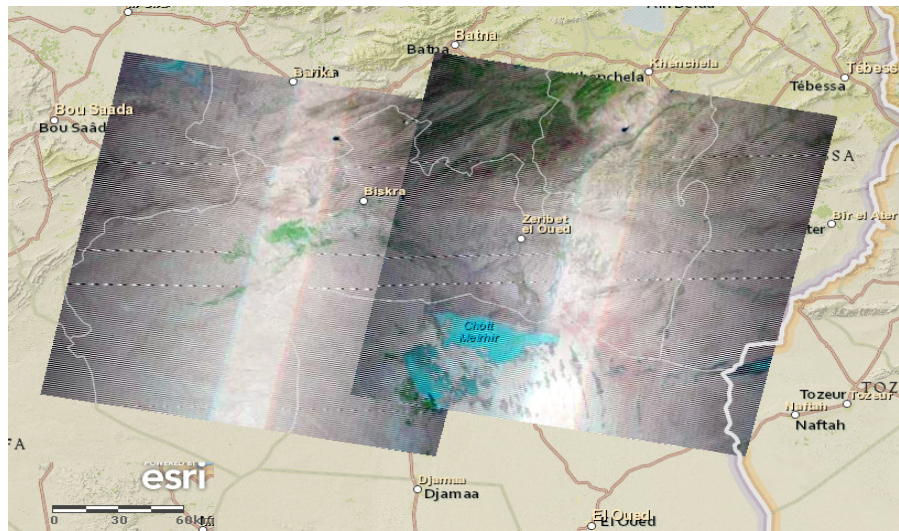


Figure 47 scènes de LANDSAT 7 de la wilaya de Biskra 194-36 et 193-36 (source : Esri)

1.2.1.1.2 Spécifications du satellite LANDSAT ETM+

Les spécifications du satellite sont énumérées dans le tableau 13 ci-après :

Tableau 13 Caractéristique des images LANDSAT et Aster (Bensaid A. 2006)

PAYS DATE DE LANCEMENT ALTITUDE CAPTEURS	Landsat (MSS)	Landsat (TM)	Landsat 7 (ETM+)	ASTER		
	USA	USA	USA	USA	NASA + MITI	
1972		1984	15 Avril 1999	Décembre 1999		
		705 km	705 km	705 km		
	MSS	TM	ETM+	(VNIR, SWIR, TIR).		
TYPE	Radiomètre à balayage	Radiomètre à balayage	Radiomètre à balayage	Radiomètre imageur multi-spectrale		
BANDES SPECTRALES	MSS-1 [0.5 – 0.6 µm]	1.[0.45-0.52 µm]	1.[0.45-0.52 µm]	VNIR	1 [0.52-0.60 µm]	
		2.[0.52-0.60 µm]	2.[0.52-0.60 µm]		2 [0.63-0.69 µm]	
		3.[0.63-0.69 µm]	3.[0.63-0.69 µm]		3N [0.78-0.86µm]	
		4.[0.76-0.90 µm]	4.[0.76-0.90 µm]		3B [0.78-0.86µm]	
	MSS-2 [0.6 – 0.7 µm]	5.[1.55-1.75 µm]	5.[1.55-1.75 µm]	SWIR	4 [1.60-1.70µm]	
	MSS-3 [0.7– 0.8 µm]	6.[10.4-12.5 µm]	6.[10.4-12.5 µm]		5 [2.145-2.185µm]	
	MSS-4 [0.8–0.11 µm]	7.[2.08-2.35 µm]	7.[2.08-2.35 µm]		6 [2.185-2.225µm]	
		Pan [0.52-0.90 µm]	Pan [0.52-0.90 µm]		7 [2.235-2.285µm]	
				TIR	8 [2.295-2.365µm]	
					9 [2.360-2.340µm]	
					10 [8.125-8.475µm]	
					11 [8.475-8.825µm]	
	RESOLUTION SPATIALE	80x80 m	30 x30 m Bande 6 : 120 x 120 m	30 x 30 m Bande 6 : 120 x 120 m Panchro : 15 x 15 m	VNIR : 15 x 15 m SWIR : 30 x 30 m TIR : 90 x 90 m	
	DIMENSION D'UNE SCENE STEREOSCOPIE	185 x 172 km	185 x 172 km	185 x 172 km	60 x 60 km	
FREQUENCE DE PASSAGE	NON	Non	Oui	Oui		
VOCATION	16 jours	16 jours	16 jours	16 jours		
PARTICULARITE	Végétation et occupation du sol.	Végétation et occupation du sol.	Végétation, occupation du sol et cartographie.	Végétation, occupation du sol et cartographie.		
		Grande variété spectrale.	Grande variété spectrale.	Acquisition de ≈ 650scène /jour, observation en arrière et au nadir.		

- Inclinaison : 98.2 degrés, ± 0.15 degrés par rapport à l'équateur ;
- Nœud descendant : 10 :00 du matin heure locale, ± 15 mn (heure de passage à l'équateur) ;

1.2.1.1.3 Caractéristiques des images satellitaires utilisées

La sélection appropriée des dates d'acquisition des images pour la détection des sols ou de changement est une partie intégrante de la réussite de notre travail. Il faut choisir les dates qui minimisent les divergences de réflectance provoquées par des flux de végétations saisonnières et angle du soleil différences (Coppin et Bauer, 1996). Les critères suivants ont été considérés lors de la sélection de scènes disponibles ETM + (tableau 14):

- 1: La couverture phoenicicole présente une stabilité phénologique associée à des caractéristiques temporelles similaires ;
- 2: le plus bas possible la teneur en humidité de saison ;
- 3: Effets de l'angle du soleil minimal, variation minimale dans l'angle zénithal solaire, entre les dates de cette fenêtre
- 4 : Le plus bas pour cent de la couverture nuageuse mensuel, fondé sur l'examen de l'imagerie LANDSAT ETM+ disponible pour la zone d'étude depuis 1987.

Les dates d'acquisition des scènes ETM+ employés dans le processus de localisation des sols gypseux tombent dans une date acceptable : 09 Avril 2009.

Tableau 14 Caractéristiques des images LANDSAT ETM+(source : Landsat.org)

LANDSAT	7, ETM+
N° de la scène	P194 r 036
Date de prise de vue	06.04.2009
Heure de prise de vue	09:42.54.23
Dimension	8632x7711x1 [BSQ]
Taille	66.623,522 bytes
Élévation solaire	51.75
Azimut solaire	127.09

1.2.1.2 Choix des échelles de cartographie

D'après l'étude faite dans la région de Mechria et Naama par **Bensaid A., (2006)**, il rapporte que l'échelle est importante dans les études géographiques. Son choix oriente et influence les résultats escomptés. Toutefois, certaines contraintes peuvent limiter ce choix dans un travail de recherche. Ces contraintes concernent : La disponibilité des données thématiques, la résolution spatiale des images satellitaires et la limite méthodologique (dimension spatiale). Or d'après toujours **Bensaid (2006)**, le milieu aride et présaharien dans son ensemble peut se concevoir comme un paysage composé de grandes unités géographiques : Accumulation sableuse, massifs montagneux, glaciers, dépression, etc. À l'échelle de ces unités géomorphologiques les images à moyenne résolution spatiale (figure 48) MSS, TM et ETM+ de LANDSAT, trouvent une place privilégiée comme outil d'observation. Avec ce type d'image le niveau perceptible des objets cartographiques est compris du 1 : 1 000 000 au 1 : 50 000. Par contre, le niveau de base constituant les paysages ne peut être perçu qu'avec les photographies aériennes ou des images à très hautes résolutions spatiales (<10 m). Théoriquement si la localisation des objets est parfaite (utilisation d'un GPS différentiel), il suffit simplement d'augmenter la résolution des images afin d'identifier n'importe quel objet en fonction des critères structuraux et spectraux. Pour l'instant, les images de très haute résolution restent très coûteuses comparativement aux images de LANDSAT pour la couverture totale.

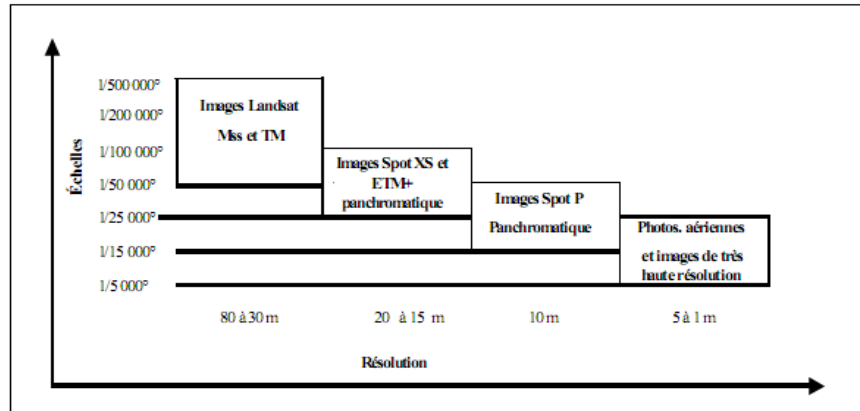


Figure 48 : Résolution spatiale des images satellitaires et échelles de restitutions cartographiques (Bensaid A. 2006)

Les images ETM+ du satellite LANDSAT 7 du 09 octobre 2009, enregistrées dans le spectre du visible et du proche infrarouge, ont une résolution de 30 m accordent une échelle large- celui du 1/50 000 et pour l'échelle locale, il faut travailler sur des images à hautes résolutions (1/25000^{ème}). Pour obtenir la haute résolution spatiale dans notre cas 15 m et la richesse spectrale, un rééchantillonnage à 15 m a été réalisé sur les images originelles (30 m), puis ces images sont fusionnées avec le canal panchromatique initialement à 15 m du même capteur.

1.3 CHAÎNE DE TRAITEMENTS PERMETTANT LA CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACES DES FORMATIONS GYPSEUSES (EDSGY).

Dans les conditions d'aridité, le lien entre télédétection et la pédologie va se faire selon le constat que les états de surface sont primordiaux pour la connaissance des sols. Dans cette zone géographique, toute méthodologie efficace de localisation des sols gypseux utilisant la télédétection passera donc par une cartographie des états de surface. Les classes d'informations thématiques, qui nous intéressent directement, s'articuleront autour des sols gypseux, et de leurs répartitions spatiales dans le paysage. Ces classes séparent les informations thématiques que l'on voudrait faire apparaître à l'image, à travers ses valeurs pixellaires. Le diagramme présenté en figure N°43 reprend les grandes étapes complémentaires du travail depuis la préparation des données jusqu'aux résultats. Etape 1 : La préparation des classes d'informations a besoin de des documents collatéraux (carte topographique, MNT, lithologie, etc.). L'étude de ces documents existants et la première prospection de terrain constituent l'étape préliminaire pour se familiariser avec les caractéristiques, physiques et géomorphologiques du milieu.

On sait que ces objets (croûtes et encroûtement gypseux, efflorescence saline, sable, dunes, végétations gypsophytes, halophytes, psammophytes, etc.) existent. Le rôle du photo-interprète consistera à les retrouver à l'image, pour les définir et les cartographier clairement. Pour cela, il doit comprendre les interactions (signal - cible) c'est-à-dire, la signature spectrale

(réflectance) de l'objet et les caractéristiques de chaque surface du sol (EDS) (étape 2). D'un autre côté par visualisation et traitement de l'image, le photo-interprète regroupe les pixels ayant des réflectances homogènes dans les différents canaux. Ces ensembles sont connus sous l'appellation « classes spectrales ». Le photo-interprète en compare les signatures spectrales en estimant que des comportements spectraux voisins signifient une forte probabilité d'objets de nature similaire. La 3^e étape est la classification qui est une procédure dans laquelle les pixels similaires d'une image sont identifiés et regroupés dans une même classe (**Girard et Girard., 2004**).

On obtient ainsi deux documents différents dans leur conception (figure 49) :

- 1°) Une carte thématique de classes d'information, basée sur la connaissance du terrain et l'interprétation qu'en fait le photo-interprète aidé de divers autres documents (relevés pédologiques, végétation, géologie ...) ;
- 2°) Une carte des classes spectrales fondée sur des classifications automatiques soit sur des images en trichromies originales ou des trichromies indicielles.

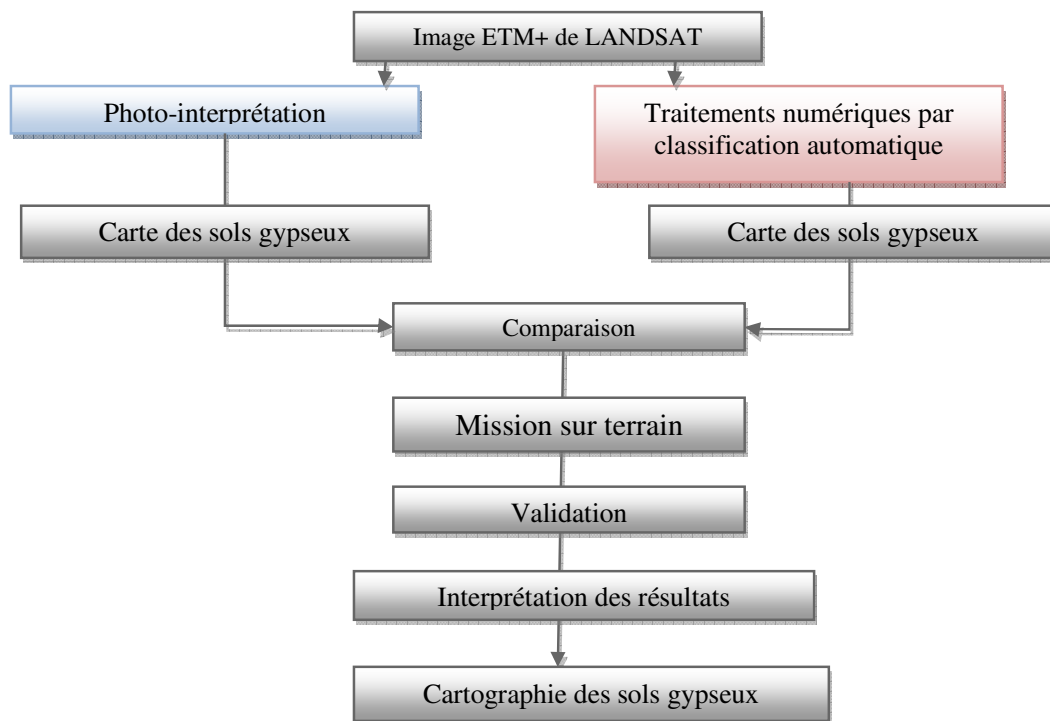


Figure 49 Organigramme expliquant la démarche pour obtenir une carte des sols gypseux

Le rôle du photo-interprète consistera principalement à tisser des liens entre ces deux types d'approches.

1.3.1 Localisation de la région d'étude

Le site d'étude est localisé à 10 Km à l'ouest de la ville de Biskra. Il se situe dans la partie amont du sous-bassin versant d'oued Djedi faiblement entaillé de 2.500 hectares, entre les coordonnées 5°35'E - 5°40' E et 34°40'N - 34°50'N (figure 50).

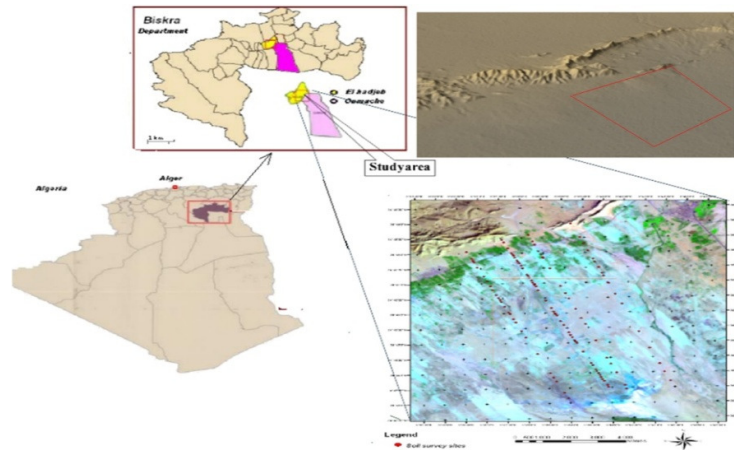


Figure 50- Localisation de la zone d'étude

La physiographie est fortement contrastée, avec un faible relief, les pentes y sont douces (de 1 à 3 %), où l'on a la présence de cinq principaux ensembles, les monts, les piedmonts, les glacis, une plaine et une dépression. La présence d'une nappe phréatique sulfato chlorurée est un matériau gypso calcaires. Au cours des dernières décennies, avec les périodes de forte sécheresse, le débit des rivières et le comportement des nappes phréatiques ont été soumis à d'importantes variations. Toutefois, ses caractéristiques montrent que cette variabilité peut s'appréhender à l'échelle d'un pédopaysage représentatif. Le caractère lithologique général du site est occupé d'après **Laffite (1939)**, **Kouskov (1964)**, par une formation dite « Deb deb » (photo 03) que l'on peut rapporter au quaternaire moyen, représenté par plusieurs niveaux de glacis encroûtés (gypse et calcaire), mais dont le dépôt se poursuit sans doute encore de nos jours (**Pouget, 1989**).

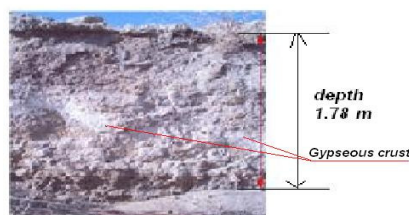


Photo 03- Croûte gypseuse « deb-deb » (CRSTRA, 2009).

Le couvert végétal naturel est conditionné par la disposition morphopédologique. En effet, il est de type xérophyte structuré en plusieurs groupements : Les gypsophytes (*Limoniastrum guyonianum*) sur les substrats gypseux et calcaires ; les halophytes (*Salsola vermiculata*), les hyperhalophiles (*Halocnemum strobilaceum*) sur les faciès salins et les psammophytes (*Aristida pungens*) sur les formations éoliennes.

1.3.2 Données satellitaires et cartographiques disponibles

1.3.2.1 Les données satellitaires ETM+ de LANDSAT 7

Les données satellitaires utilisées sont celles qui proviennent du capteur ETM+ de LANDSAT 7 de 30 x 30 m de résolution spatiale (figure 51), acquises le 09 Avril 2009, recouvrant la période sèche où les sols sont nus, et présentés par une fenêtre (L, C) de 3847 * 2385 pixels sur les bandes 1 (bleu), 4 (rouge) et 7 (proche infrarouge) centré sur le sous bassin versant d'oued Djedi et corrigé géométriquement.

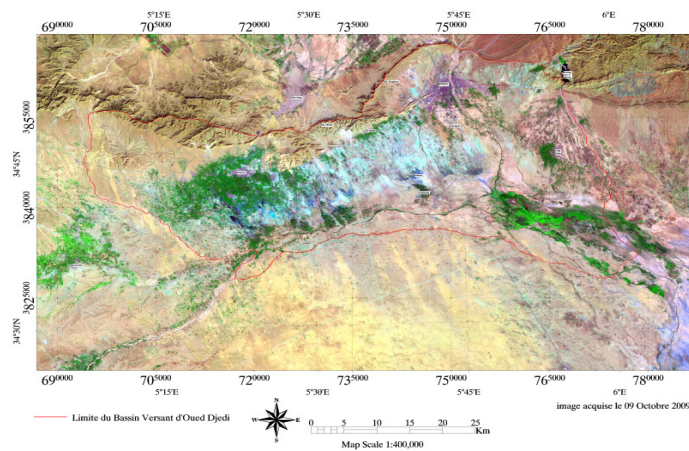


Figure 51 Trichromie ETM + (7, 4, 1) de LANDSAT 7 du 09/10/2009 d'une fenêtre (L, C) de 3847 * 2385 pixels de la région d'étude

1.3.2.2 Un modèle numérique d'Élévation ou d'Altitude

Un modèle numérique d'Élévation (DEM) de 7,5 minutes a également été obtenu à partir des archives de données ASTER¹. Un modèle numérique d'élévation est constitué d'un réseau échantillonné de valeurs d'élévation régulièrement espacées référencées horizontalement à un système de coordonnées géographiques (USGS, 1998). La résolution spatiale de 30 mètres était essentielle pour coïncider avec celle de l'imagerie ETM+ LANDSAT 7 (figure 52). Le MNA a été intégré au système d'informations géographique, pour servir dans l'analyse de la répartition spatiale des sols.

¹ [Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.](#)

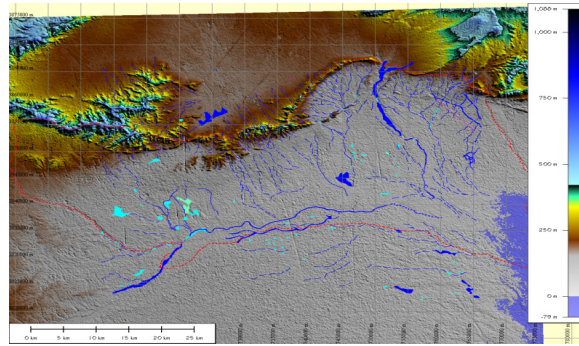


Figure 52 MNA Aster de 30 m de résolution de la région d'étude

1.3.2.3 Donnés cartographiques existantes

Dans la majorité des études d'identification des objets par traitements d'images, des données auxiliaires sont utilisées car elles favorisent l'extraction des objets (Allenbach *et al.* 2010 ; Renaud *et al.* 2010 ; Lucas *et al.* 2011) et permettent de discriminer celles dont les signatures spectrales sont proches (Allenbach *et al.* 2010). Les données existantes comprennent les cartes, les photographies aériennes, les données bibliographiques, les communications personnelles d'autres ayant travaillé sur le même terrain ou un terrain proche, les connaissances des utilisateurs du sol. Ainsi, nous avons utilisé, pour l'analyse des états de surfaces :

- La carte topographique au 1/50 000, INCT : feuille Biskra), qui a servi pour l'implantation de la région d'étude, le calage des relevés topographiques, et l'analyse morphologique d'ensemble de la région.
- La carte géologique au 1/200000, feuille de Biskra (1950-1955), ainsi que les renseignements donnés par Gousskov N. et Dutil P. (1950-1955).
- Une carte pédologique de reconnaissance au 1/500000 feuille N.I.31-NE. établie par Duran, M. J-H, Barbut, M. M... (1938).
- Des données bibliographiques sur les sols de Biskra, les travaux les plus utilisés pour cette étude sont les thèses récentes présentées à l'université de Batna Abdesselam S., (1999); Hiouani F. (2007); Rouahna (2007); Madani D. (2008); Ouamer A. K. (2008).

1.3.3 Extraction d'information des états de surface des sols des images Landsat 7

1.3.3.1 Les traitements des images

1.3.3.1.1 Extraction de la région d'étude des images satellites

Nous disposons donc d'une scène LANDSAT intégrale N° 194-36 de 185 km sur 185 km, composées de 06 canaux qui sont ETM+ 1 (Bleu) ETM+ 2 (Vert), ETM+ 3 (Rouge) et ETM+ 4, 5, 7 (Proche-Infra-rouge) (figure 53). Dans certains cas, des scènes LANDSAT sont

beaucoup plus grandes qu'une zone d'étude. Dans ces cas, il est avantageux de réduire la taille du fichier d'image afin d'inclure seulement la zone d'intérêt. Ce n'est pas seulement éliminé les données superflues dans le fichier, mais il accélère le traitement en raison de la plus petite quantité de données à traiter. Cela est important lors de l'utilisation des données multibandes comme l'imagerie LANDSAT ETM+. Cette réduction de données est connue sous le nom de sous-ensembles. Ce processus coupe la zone d'étude préférée de la scène de l'image dans un fichier plus petit gérable.

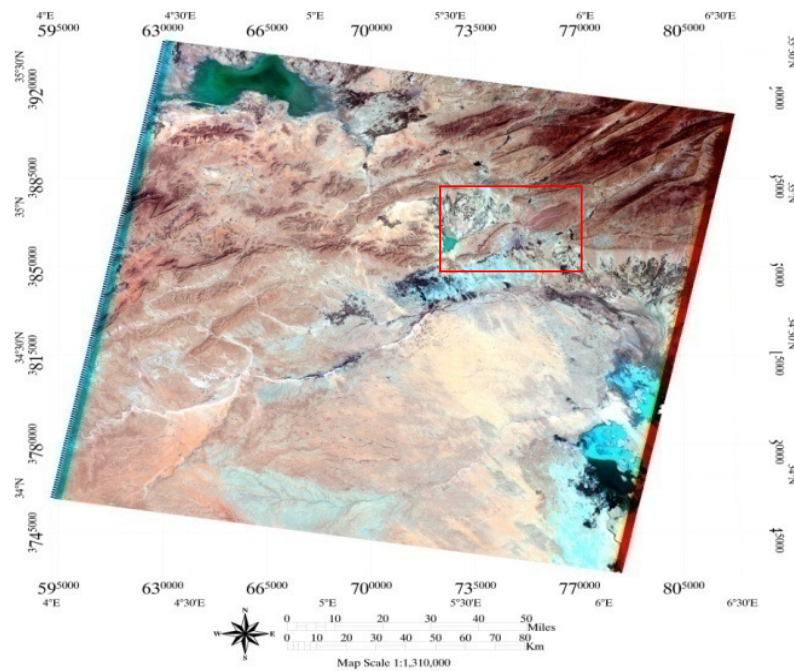


Figure 53 scène LANDSAT 72 complète N° 194-36 de 185 km sur 185 km.

1.3.3.1.1.1 Création de masque

Le masquage consiste à cacher une partie de l'image et à conserver intacte l'autre partie. Dans notre cas, nous ne nous intéressons que sur le bassin versant d'oued Djedi, et, en conséquence, on préfère supprimer l'espace géographique non traité. Pour réaliser cette étude, on effectue un découpage du type géométrique sur l'image mosaïquée. On trace donc les limites du bassin versant que l'on veut garder, et l'on élimine le reste (figure 54). Le bassin-versant représenté par une fenêtre (L, C) de 3847 * 2385 pixels sur les bandes 1 (bleues), 4 (rouge) et 7 (proche infrarouge). La résolution spatiale est de 30 x 30 m. L'analyse par photo-interprétation de la trichromie brute révèle la diversité des thèmes existants.

² Téléchargée de la base de données de la GLCF (Global Land Cover Facility) de l'Université du Maryland.

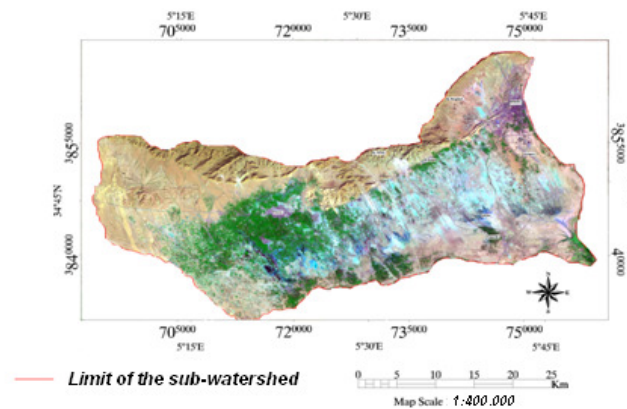


Figure 54 Extractions du sous-bassin versant d'oued Djedi à partir d'un masque « la limite du SBV ».

Afin qu'elles soient potentiellement utiles est pour arriver à notre objectif. Les données-images nécessitent donc une série d'étapes de traitement.

Les différentes étapes nécessaires sont :

- Correction géométrique et radiométrique
- Une mise en valeur visuelle des objets d'intérêt (surfaces, lignes, points) ; Rehaussement, filtrage etc....
- Une visualisation des signatures spectrale et spatiale ;
- Calcul d'indices, segmentation, classification,...

1.3.3.2 Les prétraitements classiques des données images

On appelle fonction de prétraitement les opérations qui sont normalement requises avant l'analyse principale et l'extraction de l'information. Les opérations de prétraitement se divisent en corrections radiométriques et géométriques.

1.3.3.2.1 Les corrections géométriques

Les corrections géométriques étaient déjà réalisées par les auteurs de la base de données de la GLCF qui a aussi ortho rectifié les images ETM+. Nous avons vérifié sur le terrain avec un récepteur GPS Garmin la précision réelle de ces corrections.

1.3.3.2.2 Les corrections radiométriques

Les corrections radiométriques consistent en la transformation des données numériques (DN) des bandes LANDSAT ETM+ en valeurs physiques significatives se font par la transformation des valeurs de luminance apparente (L_a) en valeur de luminances vraies (équation 13). Finalement en passe de la luminance vraie à la réflectance exoatmosphérique. Le calcul de la transformation se fonde sur les caractéristiques et les conditions de l'acquisition (Begni, 1988).

$$\rho = \frac{\pi \times d^2 \times DN}{E_{sun} \times \cos(\theta_s) \times K}$$

Équation 13

Avec, ρ : Réflectance pour la bande spectrale (b1, b2) considérée.

d : Distance Terre - Soleil.

DN : Mesure enregistrée par le capteur dans la bande spectrale (b1, b2).

E_{sun} : Constante solaire équivalente dans cette même bande spectrale, indiquée dans l'en-tête du fichier Landsat ETM+.

θ_s : Angle zénithal solaire.

K : Coefficient d'égalisation (gain). Les valeurs enregistrées par le satellite se présentent sous forme de valeurs numériques (DN) codées sur 10 bits. Les DN correspondent à la numérisation du signal électrique à la sortie du capteur. Elles sont converties en radiance par une transformation du type (équation 14):

$$L = (* (DN - DN0)) \quad \text{Équation 14}$$

où

L = radiance dans le canal considéré en $mWcm^{-2}sr^{-1}m^{-1}$,

DN = Digital number enregistré,

$DN0$ = Digital number correspondant à une radiance nulle,

(* = Coefficient d'étalonnage).

Les images LANDSAT fournies par l'USGS³ (niveau L1) ne sont pas calibrées en réflectance, ni même en valeurs de luminance "absolue" (i.e. en grandeur physique avec son unité spécifique). Il est spécifié, dans les informations fournies par l'USGS, qu'elles ont subi une correction radiométrique car elles sont passées des données "brutes" fournies directement par le satellite (niveau 0) au niveau 1 (correction de certains artefacts radiométriques, application de gains spécifiques...) et conversion en tant que comptes numériques (les DN - Digital Numbers) codés sur 8 bits pour les capteurs ETM+ de LANDSAT (valeurs allant de 0-255). Ces comptes numériques (CN) sont en fait une mesure de luminance "relative". D'ailleurs, le satellite ne mesure que la luminance i.e. « le signal partant de l'objet étudié en direction du capteur du satellite ». À partir de ces CN, on peut retrouver les luminances physiques avec l'application des équations de calibration (équation 15):

$$L = a*CN + b \quad \text{Équation 15}$$

³ USGS : United States Geological Survey

Où

a est le gain et

b est le biais,

On également par la suite réalisait une correction atmosphérique pour obtenir des valeurs de réflectance au sol.

Schématiquement, La réflectance étant le rapport entre la luminance et l'irradiance (éclairage incident qui arrive au sol), quand on travaille en réflectance, on normalise le signal par rapport à l'irradiance (qui va varier selon la date d'acquisition) ce qui permet d'obtenir un signal plus proche de la réalité. De plus, dans la mesure du possible, on corrige également le signal des perturbations atmosphériques.

Des calculs plus simples, exposés dans (**Bonn et Rochon, 1993**), utilisent des coefficients issus de mesures simultanées au passage du satellite et les coefficients de calibration.

1.3.3.2.3 Transformation d'images de télédétection

Contrairement aux opérations de rehaussement de l'image qui s'applique à une seule bande de donnée à la fois, la transformation d'images est un procédé qui implique la manipulation de plusieurs canaux :

- ❖ pour transformer une image provenant d'un capteur multispectral ;
- ❖ pour transformer plusieurs images de la même région prises à des moments différents (données multitemporelles).

La transformation d'images génère une "nouvelle" image = néocanal en combinant les différentes sources d'information de manière à rehausser, synthétiser, extraire certaines caractéristiques ou certaines propriétés des données peu visibles sur les canaux d'origine.

L'objectif des transformations multispectrales est triple :

- convertir des luminances mesurées par le satellite en variables thématiques ayant une signification dans les domaines de l'environnement, comme la biomasse, la couverture foliaire, l'humidité d'un sol, etc.
- construire des indicateurs synthétiques permettant de décrire l'état d'un phénomène. L'indice de végétation (NDVI) rend compte par exemple de l'état, du stade de croissance de la végétation à un moment donné.
- réduire le nombre des données par la sélection des données les plus utiles. Les canaux (7 pour LANDSAT TM) d'une même scène sont souvent corrélés entre eux ce qui entraîne une redondance de l'information. La transformation permet de synthétiser l'information.

CHAPITRE 1 : LOCALISATION DES SOLS GYPSEUX PAR TELEDETECTION ET DES MESURES IN SITU

Le calcul de ces nouvelles couches d'information synthétiques s'appuie sur des méthodes d'analyse statistique et des combinaisons arithmétiques de canaux (appelés aussi rapports spectraux) aboutissant à la création de nouveaux canaux (néocanaux).

Un grand nombre de ces transformations multispectrales se fondent sur les bandes rouges et infrarouges.

Plusieurs raisons à cela :

- c'est entre les bandes rouges et infrarouges que l'on observe les plus grands écarts de réflectance entre la végétation et les sols,
- le canal infrarouge possède la plus grande richesse d'information (variance élevée),
- l'interprétation des bandes rouges et infrarouges en matière d'occupation des sols est assez aisée,
- ces bandes sont présentes sur pratiquement tous les capteurs (SPOT, LANDSAT, NOAA, IKONOS, ...) permettant certaines comparaisons entre différentes sources d'images.

1.3.3.2.4 Croisements des canaux et calculs divers

Nous avons vu dans le précédent chapitre (caractéristiques techniques) que nous disposons d'une image à sept canaux. Chacun d'entre eux couvre un domaine spectral original, mettant en évidence des groupes d'objets, selon leur signature. Leur analyse individuelle, quoiqu'intéressante, oblitère inévitablement le reste de l'information contenue dans les autres canaux (tableau 15).

Tableau 15 Application des différents canaux de LANDSAT ETM+

Bande	Longueur d'onde (µm)	Rayonnement Electromagnétique	Intérêts et applications
1	0.45 - 0.52	Visible (Bleu)	Cartographie des eaux côtières, différenciation du sol et de la végétation
2	0.52 - 0.60	Visible (Vert)	Estimation de la vigueur de la végétation
3	0.63 - 0.69	Visible (Rouge)	Zone d'absorption de la chlorophylle donnant l'état de différenciation de la végétation
4	0.76 - 0.90	Infrarouge proche	Surveillance de la Biomasse et délimitation de zones immergées
5	1.55 - 1.75	Infrarouge moyen	Mesures de l'humidité du sol et de la végétation; différenciation entre la neige et les nuages
6	10.40- 12.50	Infrarouge Thermique	Cartographie thermique, études de l'humidité du sol et mesures des contraintes engendrés par la chaleur sur les plantes
7	2.08 - 2.35	Infrarouge moyen	Cartographie hydrothermale
8	0.52 - 0.90 (panchromatique)	Visible (Vert et Rouge), Infrarouge proche	Cartographie de larges zones, évolution de l'urbanisation

La fusion d'une partie de ces fenêtres spectrales en une scène unique peut faire par diverses

méthodes :

1. la composition colorée des canaux, généralement sous forme de trichromie (les trois canaux spectraux sont respectivement renvoyés en bleu, vert et rouge) ;
2. les combinaisons arithmétiques entre canaux, qui accentuent les divers comportements spectraux au travers de calculs d'indices et de ratios. Ces derniers peuvent ensuite être réunis en compositions trichromes ;
3. la transformée en Hotelling où analyse en composante principale (ACP) qui réduit les n canaux introduits au nombre de trois, pour une représentation trichrome.

1.3.3.2.5 Choix des compositions des canaux (composition colorée)

L'information apportée par un seul canal ne permet pas toujours de donner un détail satisfaisant pouvant refléter de près ce que l'on espère ressortir à partir des données télédétections. Pour réaliser cette étude, on a souvent recours, et pour l'exploitation de plusieurs bandes spectrales (figure 55) à la combinaison de trois canaux en affectant à chacun l'une des trois couleurs fondamentales (Rouge, Vert et Bleu). Le résultat final correspond à une image trichrome appelée composition colorée dans laquelle les thèmes se distinguent par les différentes nuances dans ces trois couleurs de base.

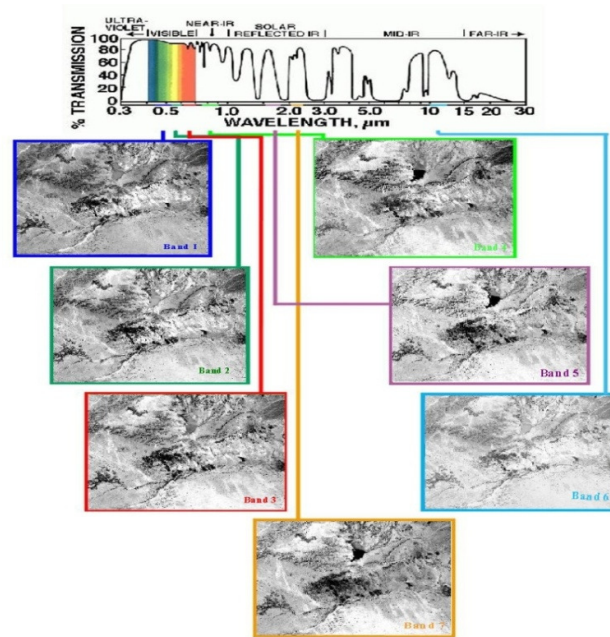


Figure 55- bandes spectrales des images LANDSAT 7 de la région d'étude

Après plusieurs essais sur les canaux 1, 2, 3, 4, 5, et 7 à l'exception du canal de l'infrarouge thermique 6 et du canal panchromatique, vu que leurs résolutions spatiales sont différentes des autres (60 m pour canal 6) et 15 m pour le panchromatique (voir tableau 16),

Tableau 16- les bandes spectrales des satellites LANDSAT

Satellite	Capteur	Bandes spectrales (visible et ir proche ou moyen)							Bandé de l'ir thermique (10,4 - 12,6 μm)	Fauchée
		1	2	3	4	5	6	7		
Landsat 1 et 2	RBV	1	2	3						185 km
	MSS	4	5	6	7					185 km
Landsat 3	RBV	1	2	3						185 km
	MSS	4	5	6	7			8 (240 m)		185 km
Landsat 4 et 5	MSS	1	2	3	4			8 (240 m)		185 km
	TM	1	2	3	4	5	7	6 (120 m)		185 km
Landsat 7	ETM +	Panchro (résolution spatiale : 15 m)								185 km
		1	2	3	4	5	7	6 (60 m)		185 km

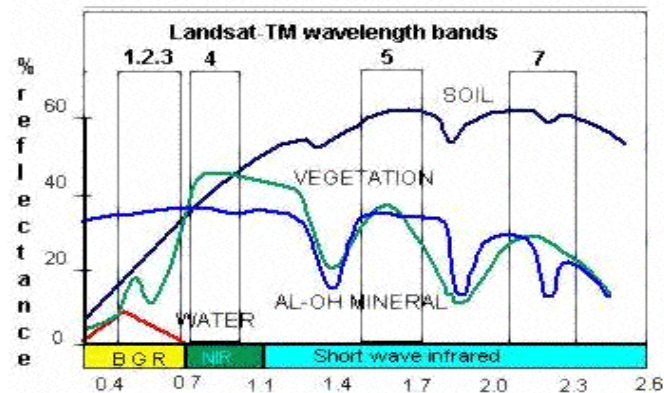
0,4 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4
Longueur d'onde (en μm)

1.3.3.2.5.1 La composition colorée en couleurs naturelles et fausse couleur

1.3.3.2.5.1.1 La composition colorée en couleurs naturelles

Appelée aussi composition en vraies couleurs car l'image affichée en pleine résolution est comparable à une photographie aérienne en couleurs (figure 56). On utilise habituellement cette combinaison comme première image pour permettre la visualisation des différents aspects du paysage : falaises, collines, ravines, oueds, et cultures, en affectant (figure 57) :

- la couleur rouge au canal 3 ;
- la couleur verte au canal 2 ;
- la couleur bleu au canal 1.

Figure 56 combinaisons des bandes spectrales (source : GDSC⁴)

⁴ Geospatial Data Service Centre

CHAPITRE 1 : LOCALISATION DES SOLS GYPSEUX PAR TELEDETECTION ET DES MESURES IN SITU

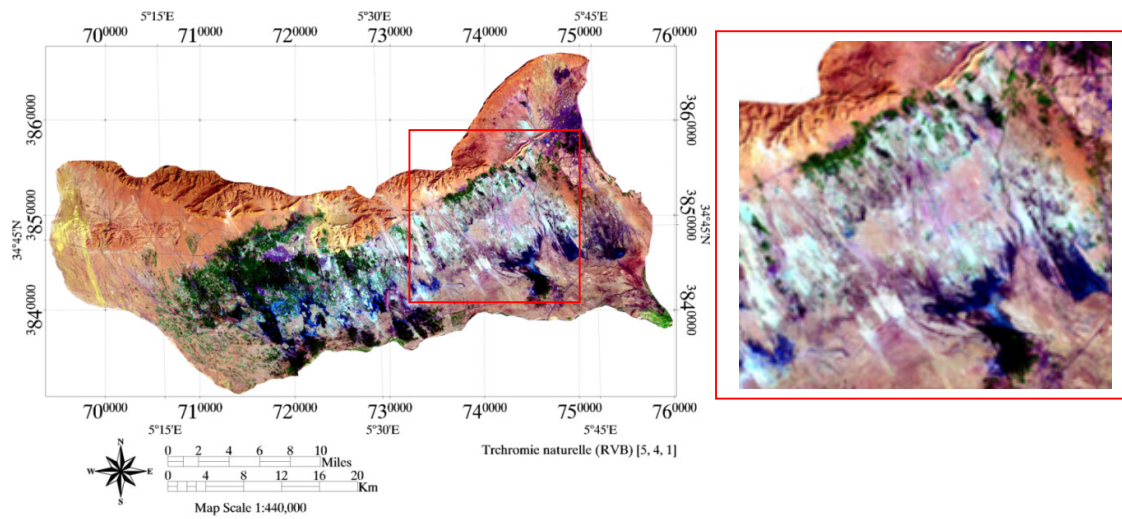


Figure 57 Résultat de la composition colorée en couleur naturelle ETM+ Rouge (3), Vert (2) et le Bleu (1) de la région d'étude.

1.3.3.2.5.1.2 La composition colorée en fausse couleur

Pour obtenir une image en fausse couleur il faut combiner le Proche Infra Rouge (4) le rouge (3) et le vert (2) (figure 58).

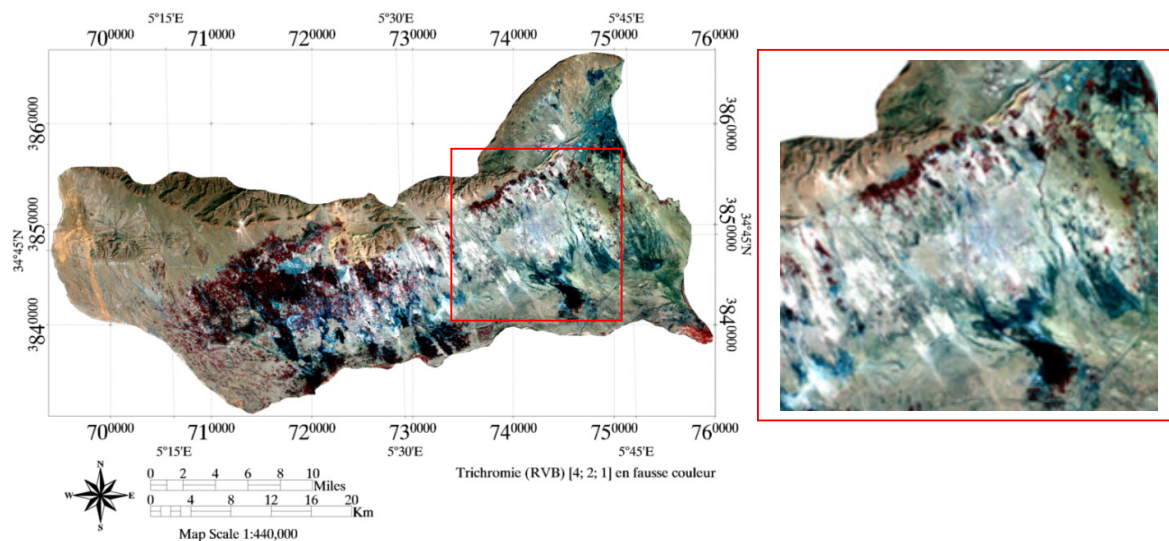


Figure 58 Résultats de la composition colorée en fausse couleur ETM+, R (4), V (3) et B (2) de la région d'étude

1.3.3.2.6 Création de Néocanaux

1.3.3.2.6.1 Calcul de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) sur les images LANDSAT 7 ETM+

1.3.3.2.6.1.1 Principes

Comme nous l'avons présenté dans les précédents paragraphes, les images LANDSAT constituent une nouvelle forme d'information (spectrale et radiométrique), que ce soit à partir d'un canal unique, d'une trichromie, soit d'un canal d'indice. Malheureusement, toute représentation classique d'imagerie reste techniquement limitée à la trichromie, et donc on est souvent contraint de ne pouvoir visionner simultanément plus de trois « canaux » ou « bandes ».

L'analyse en composantes principales, appelée aussi transformée de Hotelling pallie ce handicap. Elle vise donc, à partir de n canaux en présence, de réduire leur nombre à trois tout en perdant le minimal possible de l'information originelle. Sa représentation trichromique reste cependant des plus classiques. En termes plus simples, elle consiste à définir, dans l'espace multispectral, de nouveaux canaux résumant l'information contenue dans l'image. Ce procédé vise donc à maximiser (statistiquement) la quantité d'information (ou variance) des données originales dans un nombre restreint de composantes. De plus, les données de bandes multispectrales différentes ont souvent une corrélation très élevée et contiennent de l'information similaire. Les nouveaux canaux découplés apportent ainsi une information nouvelle. Ainsi, si l'on représente dans un espace euclidien à m dimensions les valeurs associées à chaque composante image, on observera que les points se regroupent en un nuage très voisin d'un ellipsoïde. (Figure 59). En somme, il existe le plus souvent une corrélation importante entre la différente composante image, ce qui se traduit aussi par des compositions colorées de faible contraste.

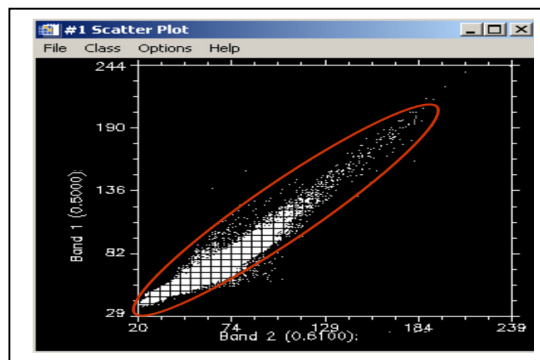


Figure 59 Ellipsoïde de distribution des données dans un espace à deux dimensions de l'image LANDSAT ETM+

La transformée de Hotelling vise justement à réduire au minimum la corrélation entre les canaux de sortie en opérant une rotation des axes dans l'espace à m dimensions. Les

nouveaux axes, ou composantes principales, sont définis par les vecteurs propres des composantes images d'entrée, comme l'illustre la figure 60.

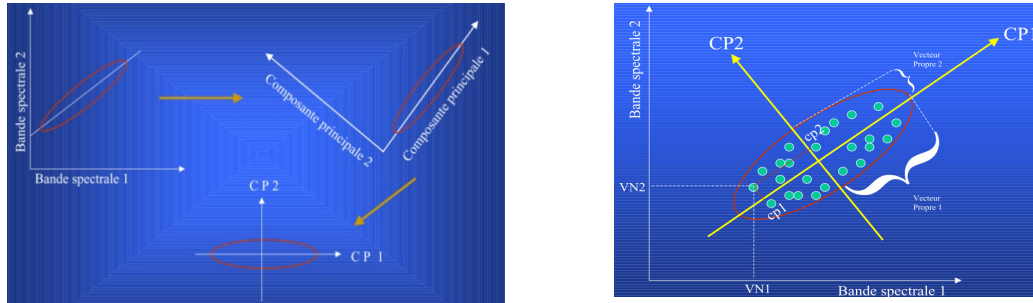


Figure 60- Rotation d'axes suivant les vecteurs propres des composantes principales (Serradj A. 2007)

La composante principale **ACP1** correspond à la composante image qui contient le maximum de variance des données d'entrée, la composante principale **ACP2**, à celle dont la variance est la plus grande après les précédentes, et ainsi de suite. De la sorte, statistiquement les trois premières composantes expliquent respectivement 70 %, 22 % et 5 % de la variance totale et constituent un choix optimal pour une visualisation en compositions colorées. Les autres composantes contiennent habituellement les effets nuisibles à l'interprétation (le bruit).

L'application de l'analyse en composantes principales ACP a pu transformer nos données provenant de plusieurs bandes du capteur ETM+ de LANDSAT (ETM 1, ETM 2, ETM 3, ETM 4, ETM 5, ETM 7) de façon que les trois principales composantes de la transformation contiennent plus de 95 % de l'information contenue dans les bandes initiales.

Une fois que l'on a compris ce que les axes de l'Analyse en Composantes Principales comportent, nous allons maintenant visualiser l'information de ces axes sous sa forme spatiale, en créant un néocanal pour chaque axe de l'ACP (figures 61) et une composition colorée (RVB) en ACP1, ACP2 et ACP3 (figure 62).

- L'ACP1 c'est un axe assez proche de la somme des valeurs de comptes numériques pour un même pixel. Cela ressemble à un canal panchromatique. En simplifiant, ce néocanal contient plus des 2/3 de l'information multispectrale d'origine,
- La deuxième composante ACP2 met généralement en valeur l'opposition entre le visible et l'infra- rouge. Cela ressemble à un indice de végétation dont la formule brute serait du type : $IR - R$. C'est donc sur ce canal que l'on détectera le mieux des divers types de végétation,
- L'ACP3 met plutôt en valeur les différences entre les deux canaux du visible.

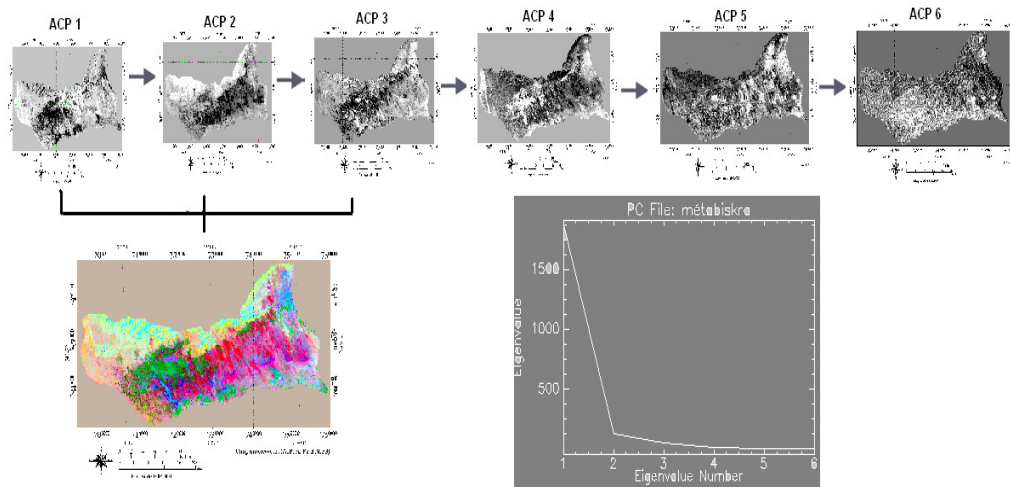


Figure 61 Résultats de l'Analyse en Composante Principale

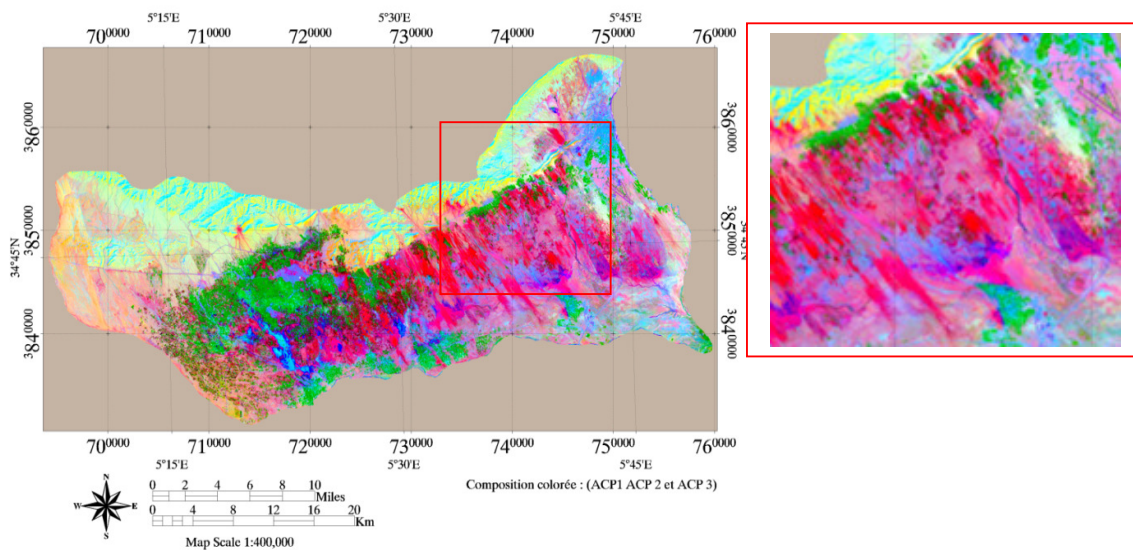


Figure 62 Composition colorée (R, V, B) [ACP1, ACP2, ACP3] du sous bassin versant d'Oued Djedi

1.3.3.2.6.2 Calcul des ratios et d'Indices spectraux

Les indices sont des rapports plus complexes entre des sommes et des différences de bandes spectrales. Il existe une très grande variété de ces indices qui s'appliquent à des études sur la végétation, les sols, le milieu urbain,...

1.3.3.2.6.2.1 Calculs d'indices spectraux

En pédologie, de nombreux indices ont été créés pour mettre en évidence diverses composantes du sol. Escadafal et al. (1994) ont montré la possibilité de caractériser dans le plan Indice de Brillance et Indice de couleur les différents états de surface intervenant lors

d'une séquence de dégradation d'un sol sableux sous steppe. En effet, la plupart du temps la couleur des sols varie essentiellement en clarté et en saturation, éléments qui peuvent être respectivement estimés par des indices simples. Le calcul d'indices spectraux consiste donc à la conversion de la réflectance en indice, c'est-à-dire de passer de trois variables (les bandes spectrales) à une seule variable (un indice).

1.3.3.2.6.2.1.1 Indice de Brillance (I.B)

L'équation de l'indice de brillance s'écrit :

$$IB = \sqrt{[(ETM3)]^2 + [(ETM4)]^2} \quad \text{Équation 16}$$

Comme son nom l'indique, il traduit la brillance de l'objet (figure 63).

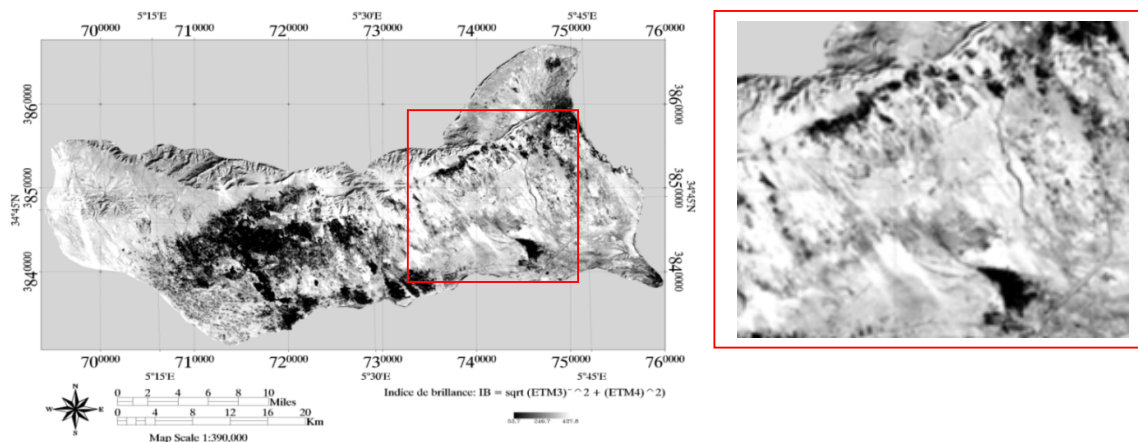


Figure 63 Indice de brillance du sous-bassin versant d'Oued Djedi

L'ensemble des objets végétaux, y est peu brillant. À l'inverse, l'indice de sol nu (Sn) s'obtient par :

1.3.3.2.6.2.1.2 Indice de sol nu (Sn)

L'équation de l'indice de sol nu s'écrit

$$Sn = (1/3 * TM3 - (2/3 * TM4) - 127) \quad \text{Equation 17}$$

C'est un indicateur des zones sans végétation, mettant en évidence les surfaces naturelles dunaires ou rocheuses (figure 64)

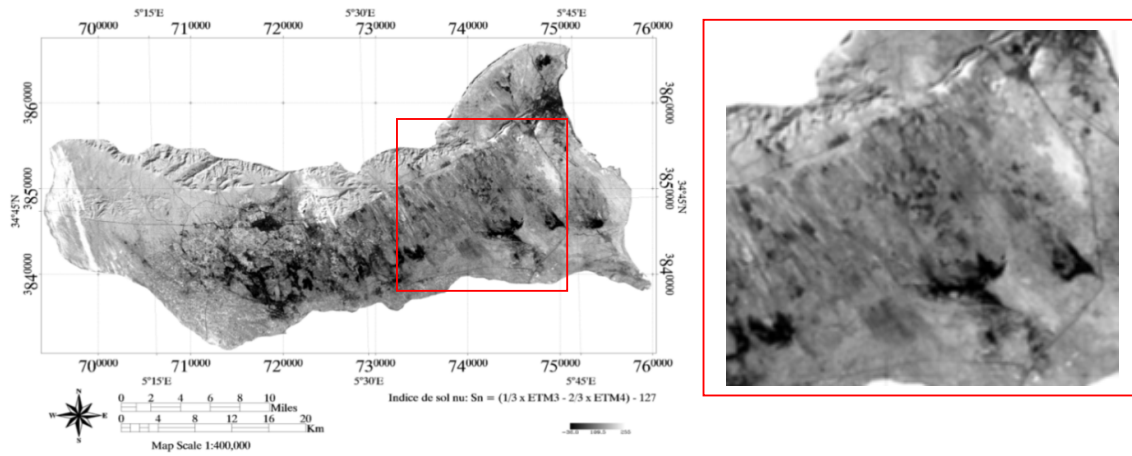


Figure 64 ISn du sous-bassin versant d’Oued Djedi

1.3.3.2.6.2.1.3 Indices de coloration (ou saturation)

Image (Figure 8.3-18) obtenue d’après l’équation 18 proposée par Escadafal et al. (1993)

$$IC = (ETM3 - ETM1)/ETM3$$

Équation 18

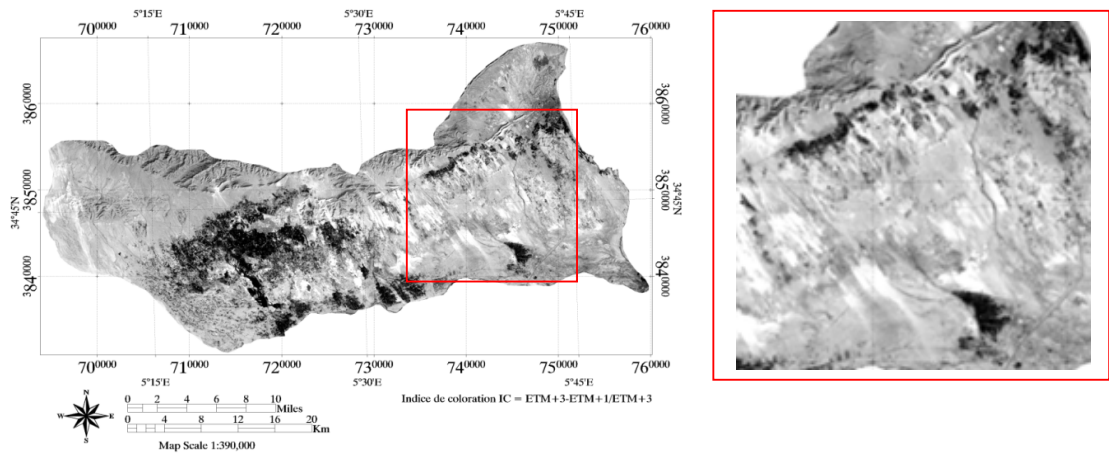


Figure 65 Indices de coloration du sous-bassin versant d’Oued Djedi

1.3.3.2.6.2.1.4 Indice de Salinité (SI)

Image (Figure 66) obtenue d’après l’équation 18 proposée par Khan et al., (2001).

$$SI = \sqrt{(ETM1 * ETM3)}$$

Équation 19

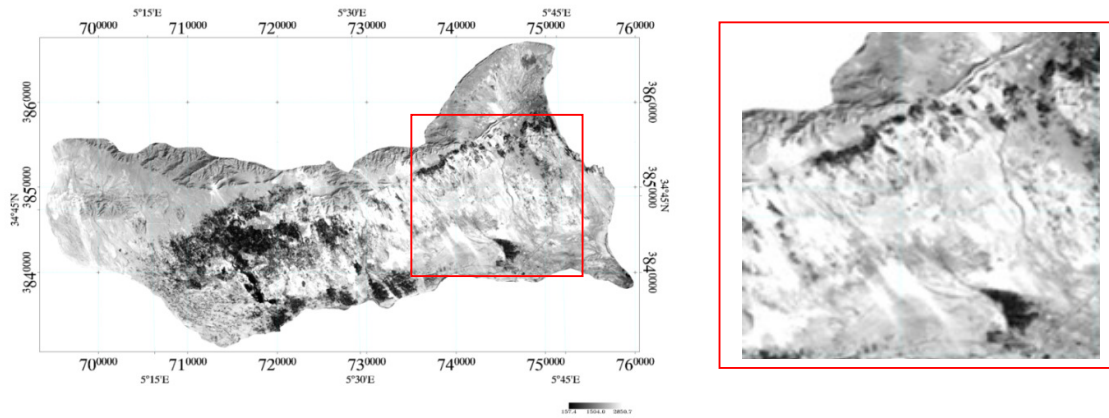


Figure 66 Indices de salinité du sous-bassin versant d'Oued Djedi

1.3.3.2.6.2.1.5 Indice de gypse (IGy)

L'équation 19 qui génère l'image de gypse (Figure 68) dérivé de l'indice de gypse (IGy) d'après Neville and al., (2000) à savoir :

$$GI = (0.147*TM1) - (0.163*TM4) + (0.536*TM5) - (0.815*TM7) \quad \text{Équation 20}$$

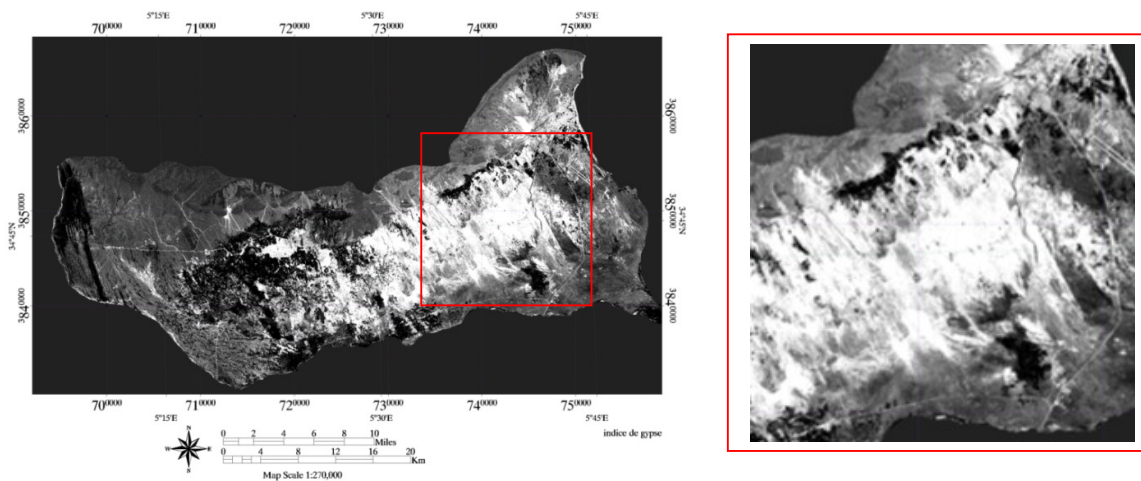


Figure 68 Indice de gypse du sous-bassin versant d'Oued Djedi

Les bandes TM 1,4,5, et 7 de LANDSAT ont été choisies parce qu'ils mettent l'accent sur les caractéristiques d'absorption de gypse et les pics de réflectance (Bowker et al., 1985). La matrice de corrélation entre les 6 canaux de LANDSAT indique qu'il y a une corrélation positive entre TM1 et TM 5 est négatif entre TM7 et TM4. Les premiers correspondent aux réponses spectrales du gypse, avec des charges positives sur TMI et TM 5 correspondants aux pics de réflectance du gypse, tandis que la charge négative pour TM 7 et 4 correspond à

l'absorption de l'énergie dans l'infrarouge moyen par les molécules hydroxyle.

1.3.3.2.6.2.1.6 Indice d'humidité (IH)

Calculé par Transformation TASSELED - CAP (**Kauth and Thomas, 1976**). L'espace de Kauth-Thomas est un espace indiciel orthonormé à trois indices (figure 69):

- ❖ l'indice de verdure (en anglais : Greenness Vegetation Index GVI)
- ❖ l'indice de brillance du sol (en anglais : Soil Brightness Index SBI)
- ❖ **l'indice d'humidité** (en anglais : Soil Moisture Index SMI) (Figure 70).

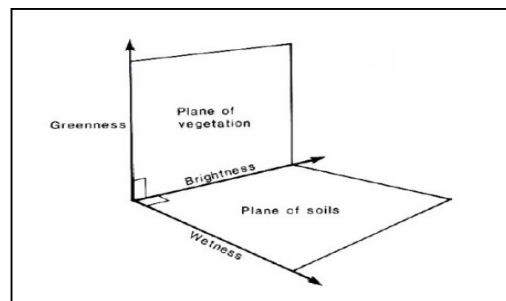


Figure 69 transformation Tasseled-Cap (Kauth and Thomas, 1976)

Les 3 néo - canaux se calculent par une combinaison linéaire des canaux LANDSAT TM ou ETM+.

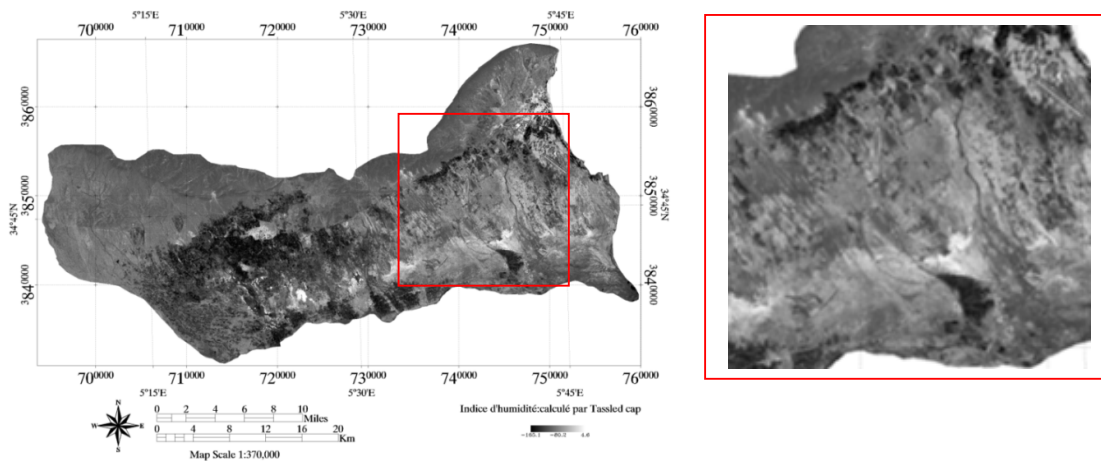


Figure 70 Indices d'humidité du sous-bassin versant d'Oued Djedi

1.3.3.2.6.2.1.7 Indice de végétation Normalisé (NDVI)

L'indice de végétation (figure 71), permet une meilleure discrimination entre le milieu végétal et le minéral. Il peut même aider à discriminer les différentes essences d'une

formation, séparer les espèces forestières des herbacées. L'activité chlorophyllienne influence la réflectivité dans l'infrarouge proche, l'indice de végétation se calculera à partir de cette fenêtre spectrale par l'équation 21 :

$$\text{NDVI} = (\text{canal infrarouge} - \text{canal rouge visible}) / (\text{canal infrarouge} + \text{canal rouge visible})$$

$$\text{soit } \text{NDVI} = (\text{TM4} - \text{TM3}) / (\text{TM4} + \text{TM3})$$

Équation 21

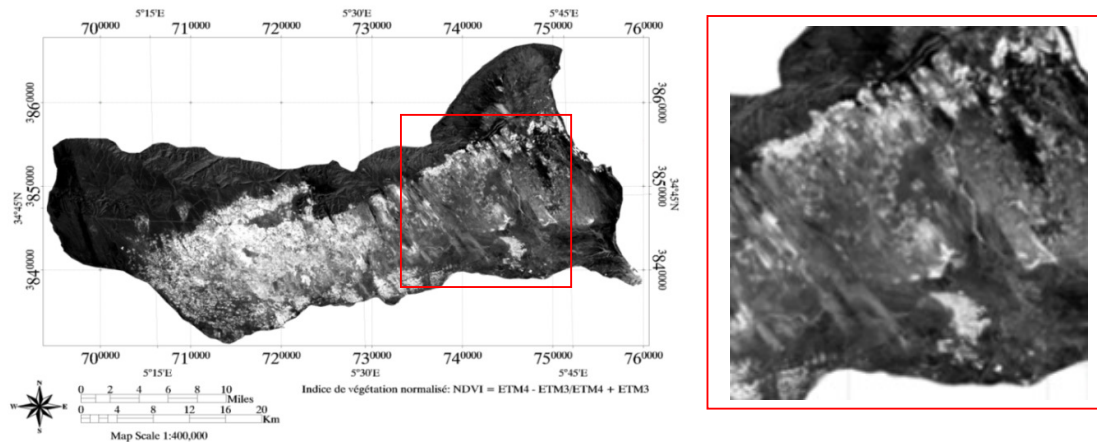


Figure 71 NDVI du sous-bassin versant d'Oued Djedi

Il existe divers autres indices ayant chacun leur originalité. Parmi les plus fréquemment utilisés, citons l'indice de brillance et celui du sol nu, ainsi que d'autres spécifiques indices de salinité, indice de gypse, indice de coloration et d'humidité.

1.3.3.2.6.2.1.8 Calcul des Ratios (rapport de bandes)

L'utilisation du rapport de bandes permet de relever les différences spectrales subtiles d'objets en cible sur une image. D'après Lillesand et Kiefer (2004), plusieurs rapports sont possibles. Bien que certains soient bien connus (bande infrarouge / bande rouge pour la végétation, bande rouge / bande bleu pour la reconnaissance des formations, pédologiques géologiques).

Les rapports (7/4) et (7- 4 / 7+4) des images de LANDSAT (Epima, 1989 in Escadafal 1993).

En effet, plus la corrélation est faible, plus il est possible d'extraire de l'information.

En se basant sur les travaux des prédécesseurs et en fonction de notre objectif, nous allons présenter comment certains rapports de bandes peuvent nous aider à extraire des informations pertinentes, parfois difficilement détectables à partir d'une seule bande. Lyon (1977) préconise l'utilisation de ce ratio 7/4 pour montrer les détails significatifs de changements lithologiques (figure 72).

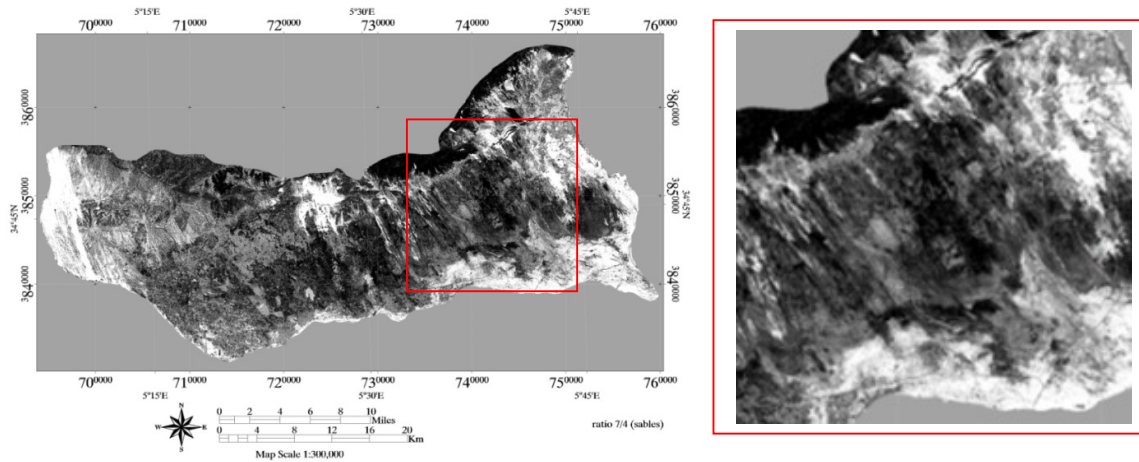


Figure 72 Ratios 7/4 Du Sous-Bassin Versant D'oued Djedi

L'examen de chaque image indicielle montre que chaque indice spectral a son propre comportement vis-à-vis de l'aspect de surface de sol. On constate que l'indice de brillance varie en fonction de la rugosité de la surface de sol, les sols gypseux et salés ont un IB relativement élevé, car ils sont plus réfléchissants en raison de l'affleurement de la croûte gypseuse (deb-deb) et les efflorescences salinent. Par contre, les autres aspects de surface de sol ont des comportements différents qui se traduisent par une croissance de l'IC⁵ pour les formations éoliennes et une diminution de l'IH pour les sols salés en bordure de la sebkha. Dans une seconde étape, plusieurs tests de combinaison d'indices et des ratios ont été réalisés et des trichromies indicielles ont été choisies sur la base de richesse informationnelle (thème). Pour des raisons pratiques, on n'expose ici que les combinaisons les plus significatives pour ne pas encombrer les résultats.

1.3.3.3 APPLICATIONS DES TAITEMENTS

1.3.3.3.1 Visualisation des différentes compositions colorées

La recherche de la meilleure combinaison des canaux originaux et des néocanaux les plus pertinents et les mieux adaptées constitue par ailleurs de toute évidence une étape nécessaire. Une matrice de corrélation entre les canaux classiques et d'indices est calculée (tableau 17).

⁵ Indice de couleur

Tableau 17 Matrice De Corrélation Entre Trois Canaux Bruts Et Les Différents Indices (Néocanaux).

	ETM+1	ETM+4	ETM+7	IB	IS	IH	IC	NDVI
ETM+1	1	0.54	0.36	0.94	0.92	0.17	0.42	0.48
ETM+4		1	0.71	0.59	0.72	0.46	0.56	0.75
ETM+7			1	0.24	0.63	0.85	0.69	0.76
IB				1	0.11	0.09	0.19	0.38
IS					1	0.46	0.39	0.52
IH						1	0.08	0.69
IC							1	0.78
NDVI								1

Le tableau 17 indique :

- ✓ une forte corrélation entre l'indice de brillance et le canal du PIR (ETM+1);
- ✓ l'indice de salinité est fortement corrélé avec le canal du bleu du visible et du proche infrarouge (ETM+ 1 et 4) ;
- ✓ l'indice d'humidité, est corrélé avec le canal du PIR (ETM+ 7) ;
- ✓ L'NDVI est corrélé avec (ETM4).

Certains canaux et néocanaux présentent une forte corrélation entre eux, leurs combinaisons ne présentent que peu d'intérêt : Cas du canal ETM+ 1 et IB, ETM1 et IS, ETM4 et IS, ETM4 et NDVI etc. Par contre l'utilisation des néocanaux IB, IS et IH sont fort intéressés, puisqu'ils sont les moins corrélées avec les autres canaux.

1.3.3.2 Composition colorée à partir d'indices et ratios

Chaque indice ou ratio représente un, voire deux domaines particuliers (minéral, essences végétales, sols nus),... à l'exclusion des autres. Il y met en lumière les principales caractéristiques spectrales, par des exagérations de luminance pixellaire. Le croisement d'indices et de ratios, en compositions colorées, s'est voulu fédérateur des diverses catégories d'objets (minérales et végétales) qu'il avait été possible de caractériser séparément. Ainsi, plusieurs compositions colorées ont été réalisées. Ainsi, notre première composition colorée associera l'ACP1, IB et IS.

1.3.3.2.1 Visualisation de la composition (ACP1, IB, IS)

La recherche de la combinaison de néocanaux la plus pertinente et la mieux adaptée constitue par ailleurs de toute évidence une étape nécessaire.

La composition colorée (R, V, B) des trois néocanaux (ACP1, IB, IS) nous semble la plus convenable à réaliser, cette combinaison se montre en effet d'une qualité visuelle particulièrement intéressante ; Elle permet notamment de discriminer de façon très nette les

CHAPITRE 1 : LOCALISATION DES SOLS GYPSEUX PAR TELEDETECTION ET DES MESURES IN SITU

différents types d'EDS (figure 73).

Le choix des couleurs est aussi important pour la visualisation, puisque dans chaque néocanal la quantité de l'information est très différente.

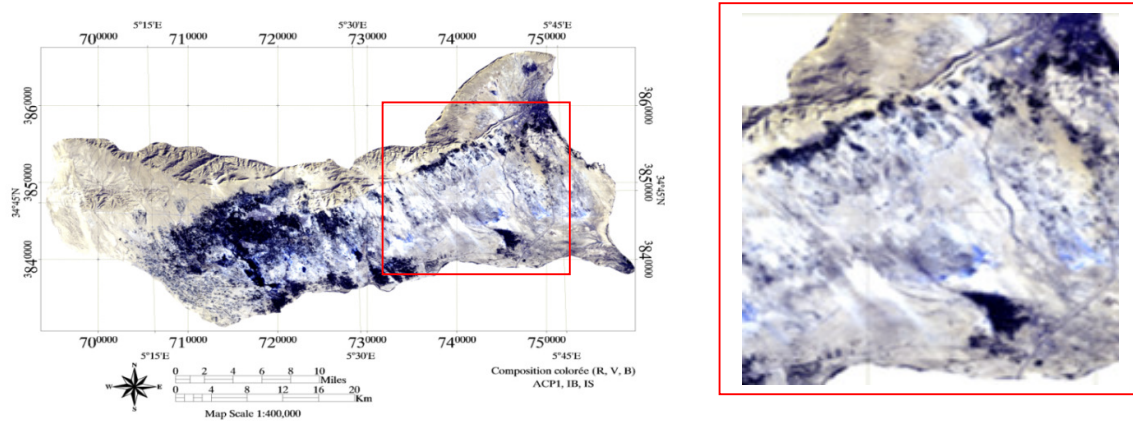


Figure 73 Compositions colorées indicielle (R, V, B) [ACP1, IB, IS] du sous-bassinversant d'Oued Djedi

D'autres trichromies indicielles sont tentées nous représentons que les plus pertinents.

1.3.3.3.2 Visualisation de la composition (IB, IDVI, IH)

La figure 74, présente une composition colorée indicielle (R, V, B) [IB, NDVI, IH] du sous-bassin versant d'Oued Djedi.

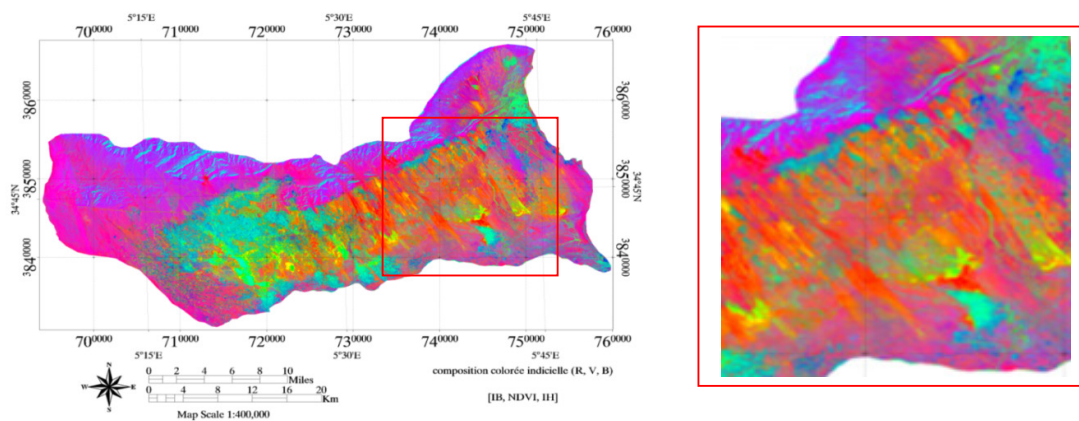


Figure 74 Compositions colorées indicielle (R, V, B) [IB, NDVI, IH] du sous-bassin versant d'Oued Djedi

1.3.3.2.3 Visualisation de la composition (IB, IS, IH)

La figure 75, présente une composition colorée indicielle (R, V, B) [IB, IS, IH] du sous-bassin versant d'Oued Djedi.

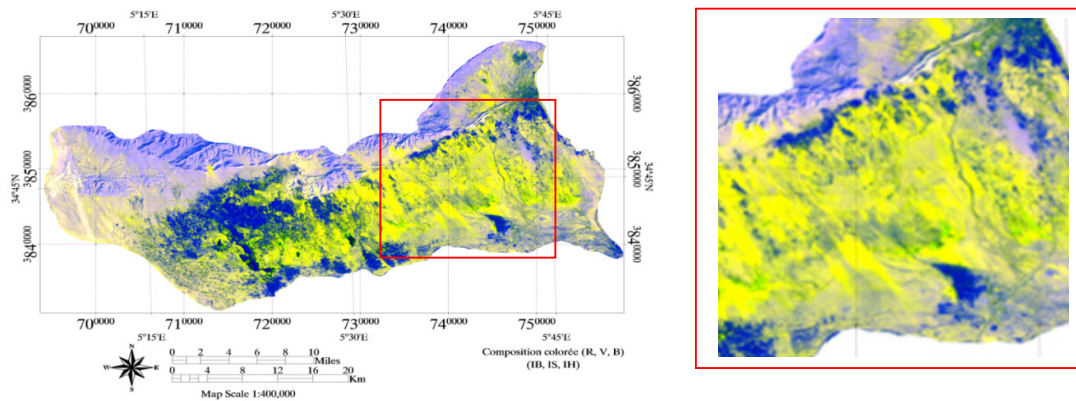


Figure 75 Compositions colorées indicielle (R, V, B) [IB, IS, IH] du sous-bassin versant d'Oued Djedi

1.3.3.2.4 Visualisation de la composition (IS, IB, ISn)

La figure 76, présente une composition colorée indicielle (R, V, B) [IS, IB, ISn] du sous-bassin versant d'Oued Djedi.

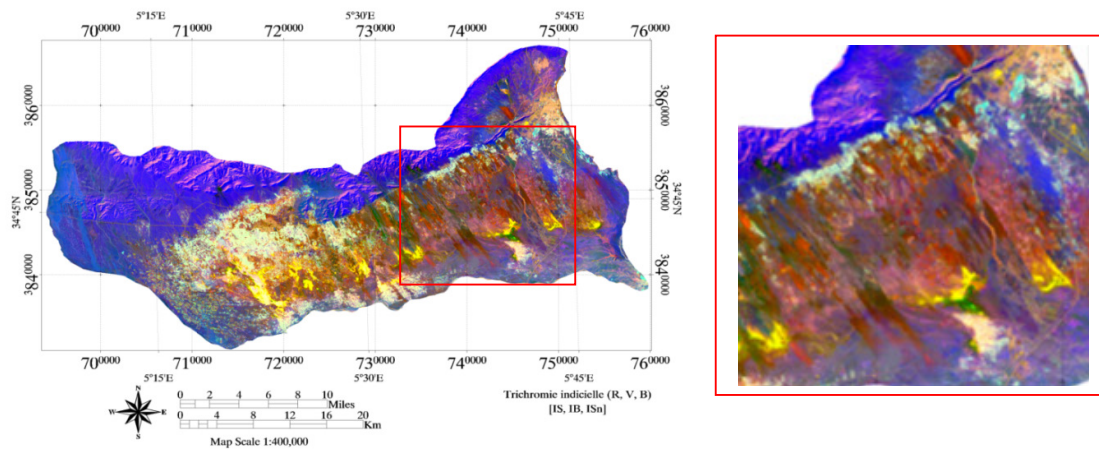


Figure 76 Trichromies indicielles (R, V, B) [IS, IB, ISn] du sous-bassin versant d'Oued Djedi.

1.3.3.2.5 Visualisation de la composition (IS, IH, IGy)

La figure 77, présente une composition colorée indicielle (R, V, B) [IS, IH, IGy] du sous-bassin versant d'Oued Djedi.

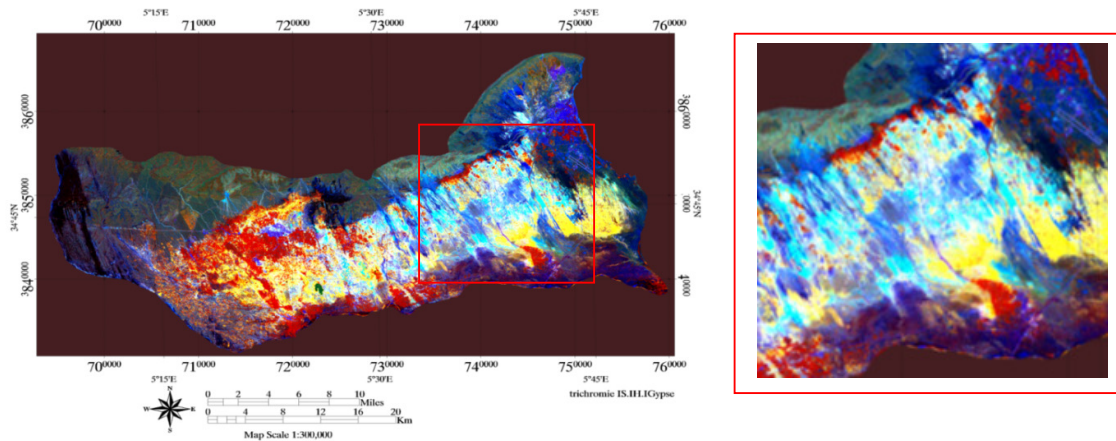


Figure 77 Trichromies indicelles (R, V, B) [IS, IH, IGy] du sous-bassin versant d'Oued Djedi

1.4 Approche par photo-interprétation pour la localisation des sols gypseux

La photo- interprétation a été utilisée comme support aux images satellitaires dès leur apparition dans les années 1970. Cette technique est encore utilisée aujourd'hui, pour cartographier les grandes classes de sols à partir d'images satellitaires (**Gourmelon et al. 2005**), seule ou en appui aux méthodes de classification automatique.

La photo-interprétation est une approche logique et raisonnée fondée sur un examen visuel d'images par un opérateur appelé photo-interprète. Cette approche logique est fondée sur la reconnaissance d'objets grâce à un raisonnement par lequel on repère des zones homologues à partir de la couleur, de la texture et de la structure. L'identification d'unités géographiques consiste donc en la caractérisation des zones homogènes, l'examen de leur environnement et la recherche de zones analogues afin de confirmer ou d'infirmier une hypothèse d'identification. Une interprétation correcte induit donc la nécessité pour le photo-interprète de disposer de bonnes connaissances de base en matière de contexte géographique de la zone étudiée. Les images à photo interprétée peuvent être analysées soit sur un tirage papier (photographies aériennes ou images satellite) soit directement à l'écran (photographies aériennes scannées et des images satellite numériques) (**IFEN, 2005**).

1.5 UTILISATION DES RELATIONS ETATS DE SURFACE DE SOL – REFLECTANCES EXO ATMOSPHERIQUES

1.5.1 Choix de la méthode d'investigation

Conformément à l'objectif de l'étude, ce chapitre vise à contribuer à l'enrichissement de l'information sur la couverture des sols gypseux à partir de l'espace à travers un profil spectral qui sont en relation directe avec les propriétés spectrales intrinsèques des matériaux pédologiques (minéraux, matières organiques, eaux), de la taille des agrégats et de la géométrie de mesure (angles solaires et de visée), qui sont susceptibles de varier très rapidement dans l'espace et dans le temps pour certaines d'entre elles et indirectement à travers les propriétés de la végétation (Jacquemoud, et al., 1993).

La méthodologie (figure 78) a consisté à tracer sur l'image d'un profil spectral passant presque par toutes les classes radiométriques identifiées sur l'image en (RVB-7, 4,1), de 300 pixels coïncident exactement avec une toposéquence⁶ de 9000 m de longueur tracée sur le terrain, allant des piedmonts du Djebel Tenia en amont vers la dépression de sebka Oumache en aval du sous-bassin versants d'Oued Djedi. La méthode consiste à établir un itinéraire linéaire en passant par le maximum d'unité de surface. Ensuite, le même transect (profil en long) est tracé sur un MNA (Aster) (figure 79) passant par toutes les altitudes. Pour discrétiser efficacement les sols gypseux, leurs validations nécessitent donc des enquêtes in situ (sondages à la tarière et profils) le long de la toposéquence. Les échantillons prélevés et analysés en laboratoire ont été identifiés et localisés avec précision par GPS sur les pics de réflexion et d'absorption du profil spectral tracé sur l'image.

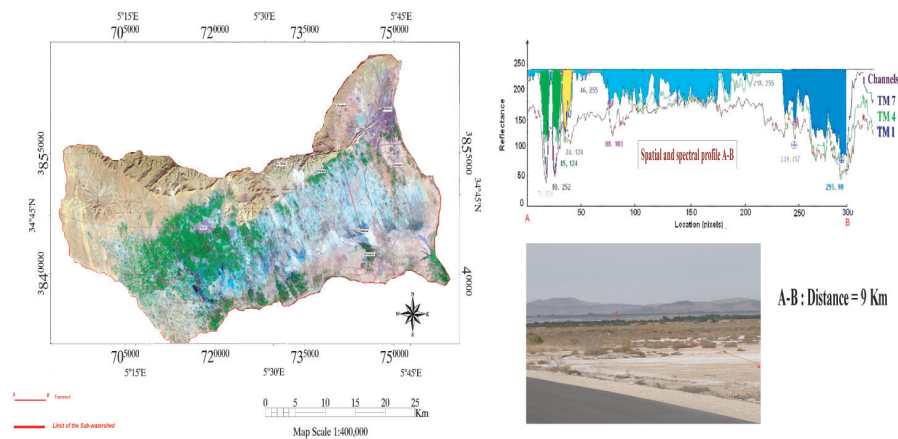


Figure 78 transect A-B et profil spectral tracés sur l'image et sur le terrain

⁶ catena (Milne, 1936), chaîne de sols organisés sur la pente dans un ordre strict. C'est un ensemble topographiquement ordonné des sols et parfois de la végétation naturelle et cultures, caractérise souvent un type de paysage (legros1996).

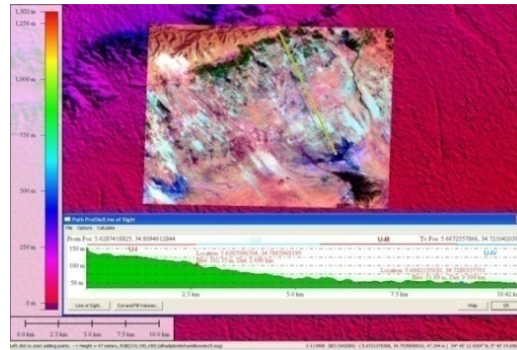


Figure 79 le modelé du versant (image satellite ETM+ drapée sur un MNA aster) avec un profil en long (toposéquence).

Le choix de la toposéquence est guidé par le souci de visiter les endroits des pics de forts et de faible réflectance sur le profil spectral (figure 80) et explorer le maximum d'unité pour discerner les changements. Le long des cheminements sont marquées des fosses d'observation et d'échantillonnage. Si le nombre de stations semble numériquement faible (09 fosses et profils), 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 derniers seront comparés aux documents d'interprétation afin de vérifier la corrélation entre les signatures spectrales des sols issus de l'image et les observations de terrain afin d'améliorer les procédures de classification et de tenter une identification aussi précise que possible des éléments des états de surface sur image classifié.

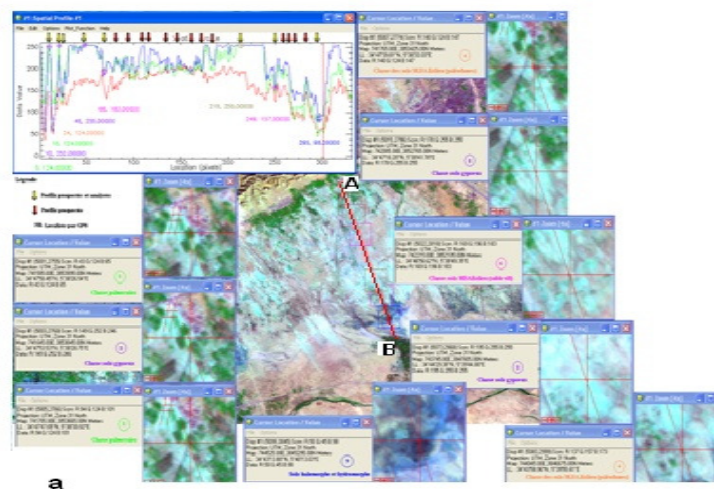


Figure 80 Localisation et signature spectrale du profil spectral sur l'image ETM+ de Landsat 7

1.5.2 Collecte de données de terrain

La caractérisation des sols du sous-bassin versant d'oued Djedi s'est appuyée sur une première phase prospective au cours de laquelle nous nous sommes attachées à sonder tous les points présentant un pic de réflectance repérés géographiquement par GPS au moyen d'une tarière à main puis à décrire en détail le profil pédologique des micro-fosses représentatives des principaux types de sols. Dans une seconde phase analytique, les horizons de surface (0 à 20 cm et de plus de 20 cm) des profils référant ont été échantillonnés afin de déterminer leurs propriétés physicochimiques.

Des missions de terrain effectuées, en 2007-2008 et 2009 ont permis d'identifier les limites du bassin versant et d'établir une typologie fondée sur la morphostructure du bassin, le type de sol et la végétation. Les critères utilisés pour identifier les sols sont :

- sur le plan morphologique : l'aspect de surface à savoir, la présence et/ou absence de croûtes (Deb deb) et encroûtement gypseux, ainsi que les efflorescences gypseuses et salines, la couleur, la texture, structure, pierrosité, la rugosité, ...etc. ;
- Sur le plan analytique : la granulométrie, la matière organique (MO), le pH de l'eau, le pourcentage de CaCO₃, le pourcentage de CaSO₄, etc....

Les observations et les relevés de terrains (fosses, sondages à la tarière, échantillonnages) ont été localisés par GPS et cela correspond exactement aux pics de réflectance observés sur l'image (courbes spectrales), vont servir à la classification des sols (Soil Taxonomy 2003) et à la classification automatique par télédétection (échantillons de références).

1.6 APPROCHE PAR CLASSIFICATION AUTOMATIQUE

1.6.1 CLASSIFICATION D'IMAGES

Le terme de « classification d'images » englobe l'ensemble des processus d'analyse visant à faire de l'imagerie satellitaire une image aux pixels ordonnés en classes thématiques par un traitement automatique. Cela consiste en fait à simplifier la radiométrie de l'image, qui représente le paysage, par la formation de classe. Le but est de simplifier la réalité d'un paysage pour pouvoir l'interpréter plus facilement. Il s'agit en fait de modéliser le lien qui peut exister entre la vérité-terrain et sa réponse spectrale traduite par la valeur radiométrique du pixel.

On peut définir une classification comme une procédure dans laquelle les pixels similaires d'une image sont identifiés et regroupés dans une classe (**Girard et Girard., 2004**).

Il existe deux grandes familles de classification automatique (*le lecteur est renvoyé vers l'annexe I*) :

- Classification supervisée ; et
- Classification non supervisée.

1.6.1.1 CLASSIFICATIONS AUTOMATIQUES SUPERVISEES PAR PIXEL ET ORIENTEES OBJET

L'objectif de cette partie consiste donc à répondre à deux questions :

- 1) Quel est parmi les classifications automatiques supervisées par pixel et orientées objet appliquées sur des images ETM+ de 30 m de résolution et sur des images améliorées à 15 m de résolution par fusions des canaux ETM+ (rééchantillonnées à 15 m) et le canal panchromatique (15 m), qui permet d'obtenir la meilleure extraction des sols gypseux de surface et de profondeur ?
- 2) Est-ce que la haute résolution 15 m apporte une plus-value pour la caractérisation des sols et leur cartographie ?

Pour cela, nous travaillons sur des techniques fondées sur la télédétection nécessitant l'utilisation de deux logiciels ayant chacun une approche de classification différente :

- Classification basée sur les pixels pour ENVI 4.6
- classification basée sur les objets pour eCognition

Pour la première méthode, nous allons réaliser une classification par pixel sur des images de 30 m de résolution avec le logiciel ENVI. Pour la deuxième, nous allons mettre en place une méthode de classification orientée objet avec le logiciel eCognition. Nous pourrons ensuite comparer ces deux méthodes. Ce travail se terminera par l'élaboration d'une carte thématique montrant les unités de sols gypseux.

1.6.1.1.1 Démarche méthodologique

Conformément à l'objectif de l'étude, la démarche méthodologique mise en place, repose sur deux types de traitements ou d'approches :

1. Une caractérisation de ces sols selon une approche par pixel, basée exclusivement sur les comptes numériques des pixels, où seule l'information spectrale est utilisée pour la classification (**Wong T. H. et al., 2003**) et reposant sur des classifications supervisées à partir d'échantillons d'entraînements, provenant de relevés de terrain localisés par GPS ;
2. Une caractérisation des sols selon une approche orientée objet, ou l'unité de base et l'objet et non le pixel. Le processus de segmentation de l'objet ou du segment par groupement des pixels avoisinants qui ont des valeurs similaires de la brillance, la texture, la couleur, etc.. Cette segmentation peut intégrer des informations ou des attributs additionnels tel l'indice spectral, spatial et textural. Ensuite, une classification

par maximum de vraisemblance est réalisée sur l'image.

Les traitements envisagés afin d'évaluer l'apport des images originales, indicielles et des images fusionnées pour la détection des sols suivent un protocole méthodologique (figure 81) en trois étapes :

- **Une étape préliminaire** de prétraitements classique (correction géométrique, rehaussement, etc.) sur les images multispectrales ETM+ de 30 m de résolution et un traitement spécifique comprenant, le ré-échantillonnage de ces images multispectrales ETM+ à 15 m et leur fusion avec le canal panchromatique initialement de résolution de 15 m ;
- **Une deuxième étape** de caractérisation et cartographie des sols selon une approche par pixel, à travers une classification supervisée de l'image LANDSAT ETM+ à 30 m, où les classes seront labellisées à partir des zones d'entraînements localisées par GPS sur terrain.

Dans cette étape, plusieurs classifications supervisées ont été sélectionnées, celles de maximum de vraisemblance, minimum de distance et la méthode SAM (Spectral Angle Mapper), afin de rendre compte de leur fiabilité. Ces classifications sont effectuées à partir d'échantillons d'entraînements dont la valeur moyenne est calculée individuellement, et ce pour chaque image utilisée.

- **Une troisième étape** de caractérisation et de cartographie des sols selon une approche orientée objet, où les objets « sols », issus d'une segmentation de l'image fusionnée à 15 m, sont aussi labellisés à partir des mêmes zones d'entraînements que ceux par l'approche pixellaire.

L'objectif des classifications orientées objet est de mettre en place une chaîne de traitement souple mais efficace afin de détecter au mieux les sols inventoriés. En appliquant un traitement similaire sur chacune de nos images ETM+ fusionnée avec le canal Panchromatique. Au terme de ces traitements, les méthodes et les résultats seront comparés. Les résultats issus des classifications vont subir un premier test de validation. Des indices Kappa de précisions rendra compte de la qualité des classifications. Pour chacune de ces deux méthodes de classification, les meilleurs résultats seront par la suite validés sur le terrain. Cette validation permettra de juger de l'importance de l'apport de la résolution spatiale pour la délimitation des petites plages de sols en matière de pourcentage des sols correctement détectés. À l'issue de cette étape, il sera alors possible d'évaluer la plus-value de la fusion pour la caractérisation des sols mais également là/les méthodes de classifications les plus satisfaisantes.

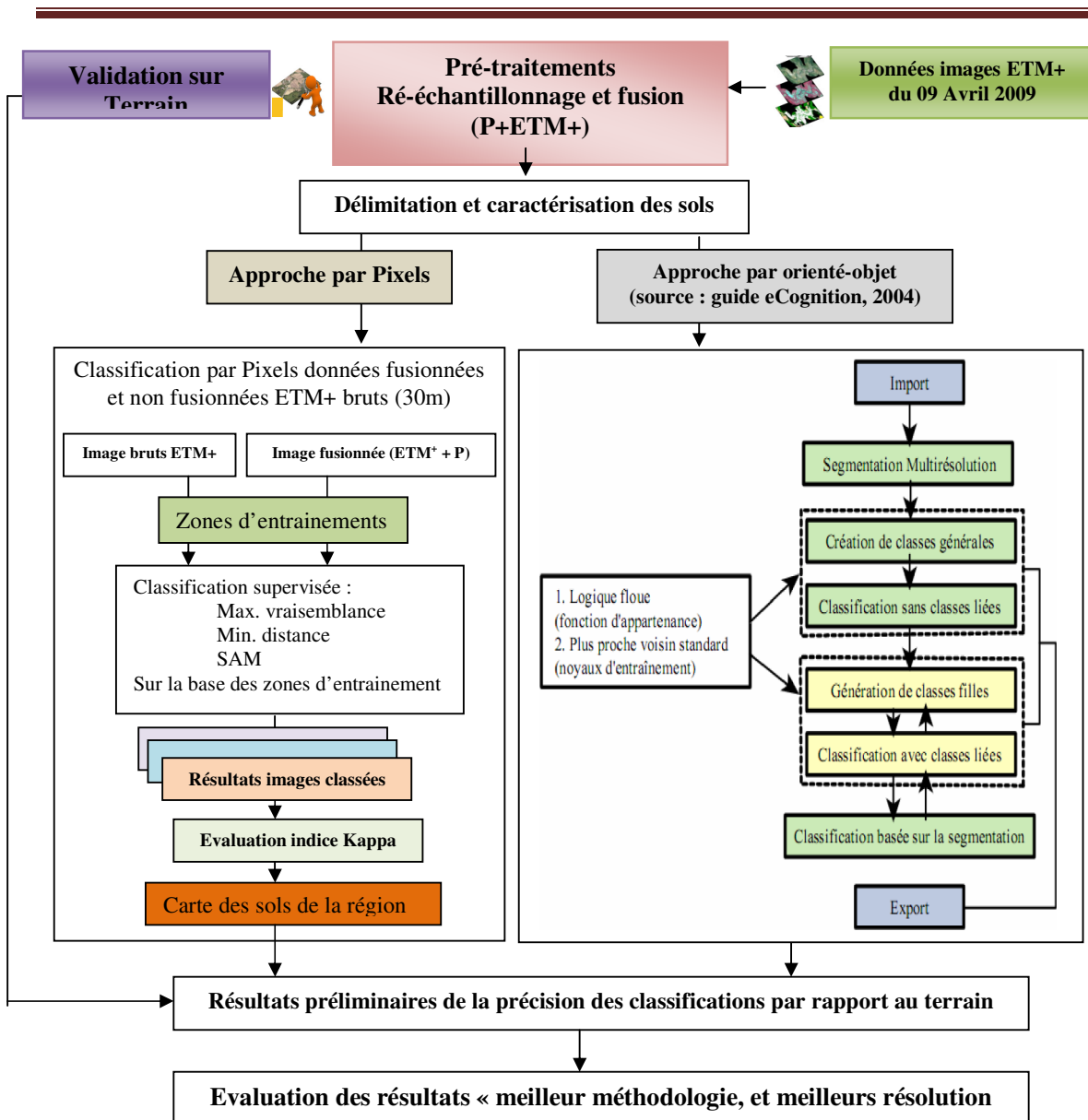


Figure 81 Organigramme général de l'approche de classification par pixel et orienté objet

1.6.1.1.1 Approches de classifications par pixel et orienté objet

1.6.1.2 Approche de classification par Pixels

Connues comme des méthodes faciles à mettre en place (Caloz et Collet 2001). Les méthodes traditionnelles sont toutes basées sur le pixel et n'utilisent pas l'information spatiale d'un objet (Bokhary, 2008). En effet, l'information spectrale de chaque pixel est utilisée comme base numérique pour la catégorisation (Alban, 2005). Elles s'appuient sur des échantillons d'entraînement servant de référence pour la labellisation des pixels. Ces échantillons définissent les caractéristiques spectrales de chaque classe de sol et ils sont

définis à partir des données terrain. Le traitement automatique de l'image consiste ensuite à attribuer à chaque pixel le label de la classe lui étant la plus proche (**Bouffier 2010**).

L'objectif final des procédures habituelles de classification par la méthode de pixel est de catégoriser automatiquement tous les pixels d'une image dans des classes de sol ou des thèmes. En effet, le pattern spectral de chaque pixel est utilisé comme base numérique pour la catégorisation. Cela signifie que chaque classe d'entités manifeste une certaine combinaison de valeurs spectrales (ou pattern), dû à leurs propriétés inhérentes de réflectance spectrale et d'émittance. Ainsi, un pattern spectral est indépendant des caractéristiques géométriques de l'entité où est présent le pixel considéré. La reconnaissance de pattern spectral est le fondement de l'approche fondée sur les pixels. Elle se fonde sur cette information spectrale, pixel par pixel, pour réaliser une classification automatisée de sol ou occupation de sol (**Baatz et al., user guide eCognition ; 2004**).

1.6.1.2.1 Méthodologie

Bien que plusieurs études concernent la détection des sols et occupation des sols utilise les classifications par pixels, ces travaux ont conclu que ces méthodes sont peu concluantes pour la détection de petites entités ou objets. Les méthodes testées ici (figure 82) regroupent l'algorithme de classification par maximum de vraisemblance une des méthodes les plus efficaces et les plus couramment utilisées. Elle repose sur l'hypothèse que les pixels d'une classe sont répartis selon une distribution connue (**Bouffier, 2010**) et attribue alors chaque pixel à une classe selon une probabilité d'appartenance à cette dernière. La classification par distance Minimum se fonde sur des centres de gravité des réponses spectrales des zones d'entraînements. Elle associe à une classe les pixels présentant la distance la plus faible (ou distance minimale) avec les points de gravité précédemment établis. Concernant la classification SAM, elle calcule un angle spectral selon lequel vont être référencé chaque pixel. L'algorithme détermine ainsi un angle de similarité entre un pixel et l'espace spectral et l'affecte à la classe la plus proche (**Kruse et al., 1993**) et SVM le classifieur SVM fonctionne selon le principe de séparation de données. En effet, on recherche un séparateur dont la marge est la plus grande possible (**Lafarge & al, 2004**). Des travaux de recherche tendent à montrer qu'avec l'algorithme SVM, on obtient de bien meilleurs résultats par rapport au maximum de vraisemblance. Mais certains résultats indiquent que la qualité de la classification basée sur ces méthodes dépend largement des classes utilisées (**Auda & al, 2008**).

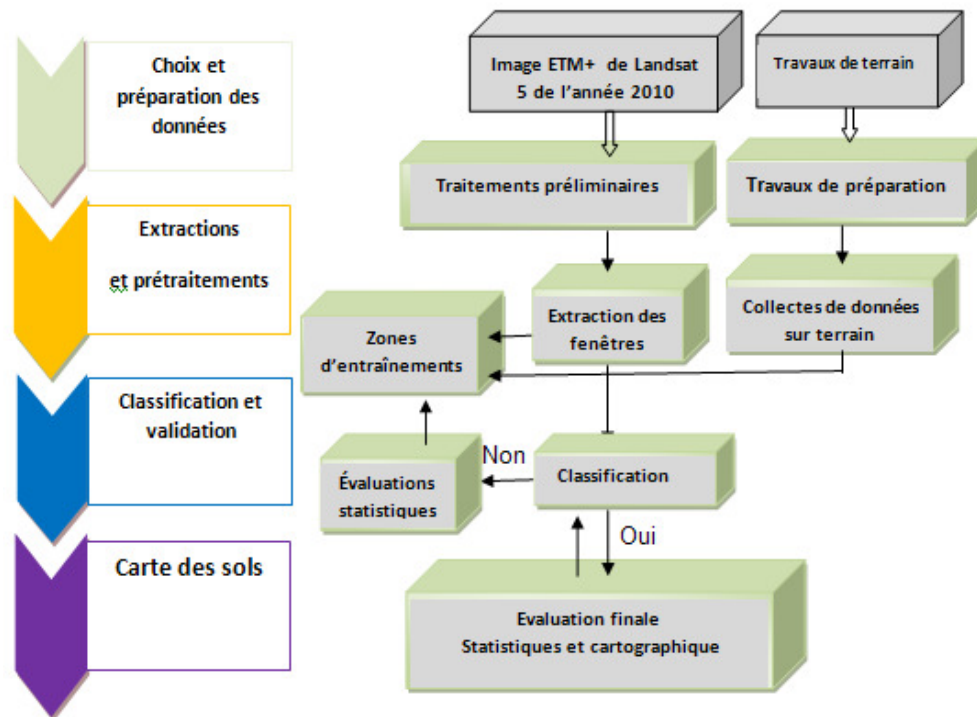


Figure 82 démarche méthodologique de cartographie des sols par pixel

1.6.1.3 Application de la classification supervisée par pixels sur les trichromies indicielles

Les classifications par pixel ont été effectuées sur les trichromies (30 m de résolution) combinées⁷ à partir des néocanaux (ACPI, IB et IS), (IB, NDVI et IH) et (IB, IS et IH), ainsi que celle (IS, IH, IGy).

L'analyse de l'image résultante a permis de dégager des bandes fortes intéressantes : la bande de salinité (IS) et indice d'humidité (IH) et indice du gypse (IGy). La composition colorée de ces trois canaux nous permet ainsi une meilleure identification visuelle des sols gypseux, cependant, il aurait été très avantageux pour notre étude d'utiliser le canal IH (Indice d'humidité), tout aussi important que les autres canaux pour extraire les zones humides (indicateur indirect de la profondeur du sol).

Nous avons ainsi réalisé plusieurs combinaisons de composition colorée rassemblant les différents indices calculés, on ne va présenter que les meilleures combinaisons qui ont permis d'extraire les sols gypseux et le meilleur résultat de classification en indice kappa.

⁷ Toutes les combinaisons des canaux et néocanaux ont été utilisés

1.6.1.3.1 Zones de références

Un total de 454 points de données a été obtenu à partir de l'enquête de terrain dont 271 points de réalité de terrain ont été utilisés comme vérité-terrain pour l'évaluation de la précision des sols: 51 segments pour les gypsid à horizon gypsic, 54 gypsid à horizon petrogypsic, 34 xeropsamments, et 25 efflorescence saline et 52 Haligypsid. 25 pour la couverture végétale (palmeraies et végétations locales). Ces derniers points ont été recueillis en raison de la difficulté de localiser les sites d'au moins 30 mètres carrés de terrain homogènes pour la végétation locale (figure 83).

Afin de comparer nos classifications aux réalités de terrain, nous avons travaillé sur trois (03) zones teste. Ces trois zones serviront donc de zone de référence pour la comparaison des différentes classifications et pour leur validation grâce aux matrices de confusion.

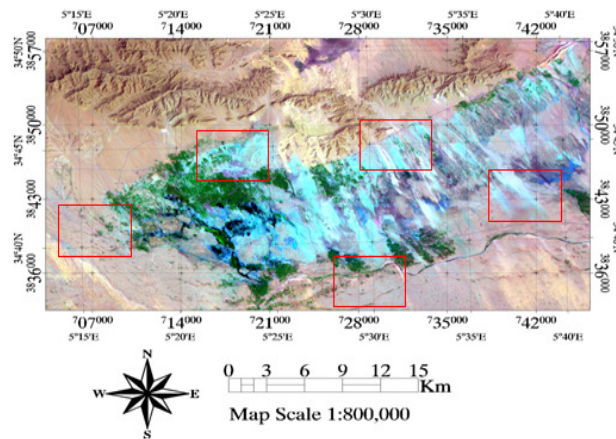


Figure 83- choix des zones de références

1.6.1.4 Application de la classification supervisée sur les trichromies ré échantillonnées et fusionnées à 15 m de résolution

1.6.1.4.1 Rééchantillonnage de l'image ETM+ de 30 m à 15 m de résolution

Le ré-échantillonnage des pixels permis de rapporter les pixels ETM+ (30 m de résolution) à la résolution des pixels du canal panchromatique (15 m), pour que les superpositions et les comparaisons soient correctes. Tous ces traitements préliminaires ont été effectués à l'aide du logiciel ENVI 4.7. Nous avons projeté les images dans le référentiel Universal Transverse Mercator (UTM-31 WGS-84 Nord), déjà appliqué à l'ensemble des documents cartographiques utilisés. Après le ré-échantillonnage des pixels, et avant la fusion des images avec le canal panchromatique (15m), nous avons créé des compositions colorées en associant les canaux 4 pour l'infrarouge [0,75-0,90 μm], 3 pour le rouge [0,63-0,69 μm] et 2 pour le vert [0,52-0,60 μm] dans l'ordre colorimétrique Rouge, Vert, Bleu. Cependant, l'opération du ré-échantillonnage de la résolution spatiale de l'image LANDSAT ETM+ est la plus délicate. En effet, le passage de la résolution de l'image ETM+ de 30 m à 15 m, induit des transformations

sur la qualité de l'information numérique. Ces modifications doivent être prises en compte lors des opérations de classification.

1.6.1.4.1.1 Fusion

La fusion d'images est définie généralement, comme la combinaison de deux ou de plusieurs images différentes pour former à l'aide d'un algorithme une nouvelle image (**Pohl et Van Genderen, 1998**). Les objectifs de la fusion d'images sont multiples, une revue globale en est faite par **Wald (1999) et Pohl et Van Genderen (1998), Teggi (2001)**.

1.6.1.4.1.1.1 Techniques de fusion d'images

Afin d'utiliser au mieux les images de télédétection, on a fait appel à la fusion d'images issues du même capteur ETM+ de LANDSAT 7. L'intérêt de cette combinaison ou fusion des images à haute résolution spatiale et celles qui sont à haute résolution spectrale est afin d'obtenir une image qui a, d'une part, la résolution spatiale d'une image panchromatique (15 m) et, d'autre part, les caractéristiques d'une image multispectrales (6 canaux) ; Aussi, d'avoir une description plus complète et plus précise des différentes classes de sols la zone observée. D'après Fauvel, (2007), l'utilisation conjointe de l'information spatiale et spectrale permet une meilleure classification des petites surfaces.

Dans la littérature, trois méthodes sont généralement utilisées : La transformée de BROVEY, la méthode IHS (Intensity, Hue, Saturation), la méthode ACP (analyse en composantes principales) (**Pohl and Genderen, 1998**) et la transformation d'ondelettes (wavelet). Dans cet article, nous présentons les techniques de fusion d'images en exploitant l'outil suivant : la transformation en IHS (intensité, hue/teinte et saturation).

1.6.1.4.1.1.1.1 Transformée en IHS

Elle permet le passage de l'espace de couleur RVB (Rouge, Vert, Bleu) vers l'espace IHS (Intensité, teinte et saturation). Elle donne la possibilité de séparer l'information spatiale dans l'image intensité et l'information spectrale dans l'image teinte et saturation.

1.6.1.4.1.1.2 Méthodes de fusion d'images

Les méthodes de fusion consistent à améliorer la résolution spatiale d'une image multispectrale afin de faire se dégager des informations qu'une image panchromatique seule ne pourrait fournir. Le principe consiste à fusionner une image multispectrale présentant une plus faible résolution spatiale de 30m (figure 85) avec une image panchromatique plus précise spatialement 15 m (figure 86) afin d'obtenir une nouvelle image ayant une résolution spatiale et spectrale plus élevée (figure 87), tout en conservant au maximum les données spectrales de chaque pixel (**Thomas, 2006**). Plusieurs méthodes ont ainsi été développées.

Les méthodes IHS (Intensité, Hue où teinte et Saturation) ou CN-Brovey font partie des techniques de fusion par combinaison des radiométries offrant une qualité spatiale plus riche mais dégradant le plus les informations spectrales des pixels (**Houet, 2002**).

Sur la figure 84, nous présentons le schéma de fusion d'images par la transformée en IHS. Le processus de fusion par cette méthode est résumé dans les quatre étapes suivantes (**Chavez, 1991**):

1. Ré-échantillonnage des images multispectrales ETM+ à la taille de l'image haute résolution ici canal 8 (Panchromatique) du même capteur ;
2. Application de la transformée RVB vers IHS sur les images multispectrales ;
3. spécification de l'histogramme (stretching avec Min=0 et Max=1) de l'image haute résolution par rapport à celui de l'image d'intensité et remplacement de l'image d'intensité par l'image de haute résolution ;
4. application de la transformée en IHS vers RVB.

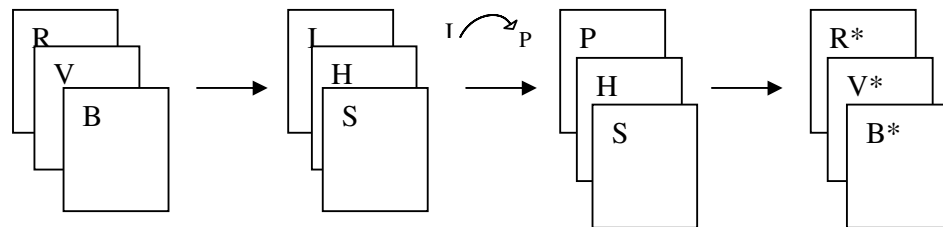


Figure 84 Schémas de fusion d'images par la transformée en IHS

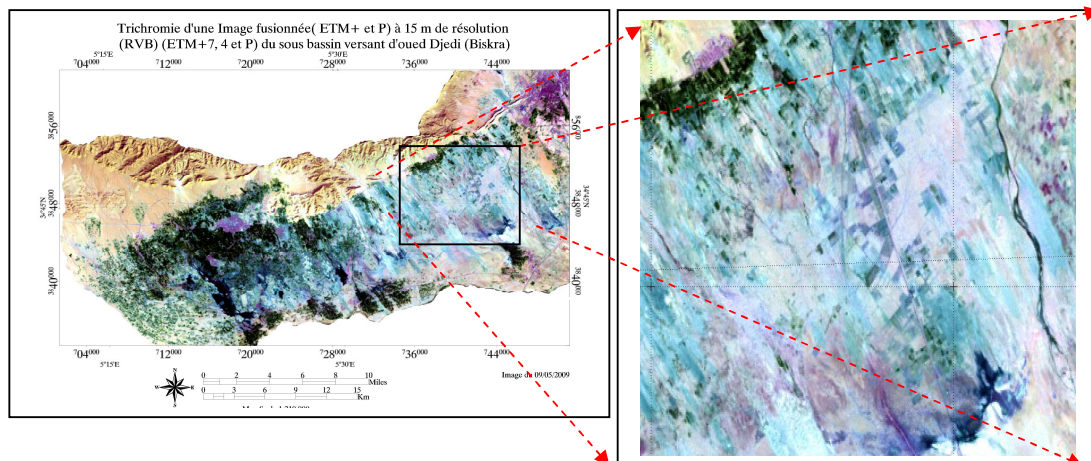


Figure 85 Trichromie d'image ETM+(RVB) de 30m de LANDSAT 7 du 09/04/2009

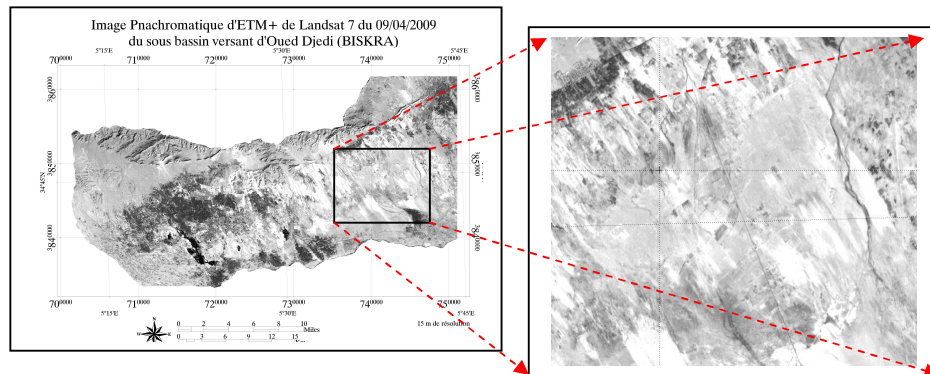


Figure 86 Image Panchromatique de 15 m de LANDSAT 7 du 09/04/2009

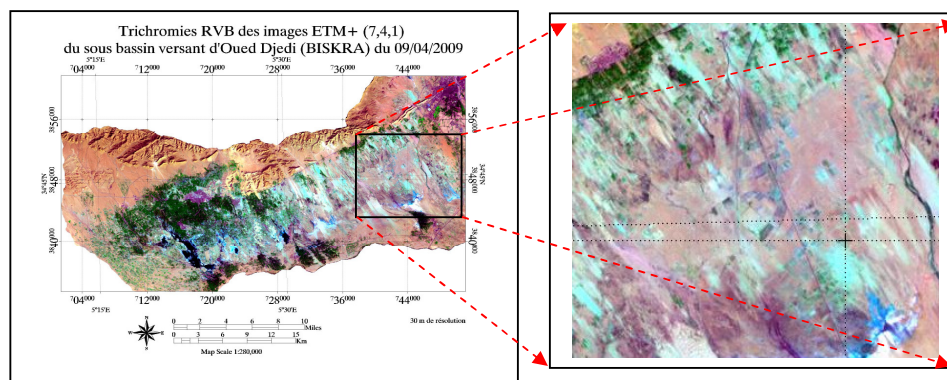


Figure 87 Résultats de la fusion IHS d'image ETM+ rééchantillonnées à 15 m avec le Panchromatique (15 m) de LANDSAT 7 du 09/04/2009.

1.6.1.5 Approche de classification orientée objet

L'arrivée des images de télédétection à très haute résolution spatiale (THRS) va engendrer de nouvelles perspectives dans l'extraction d'objets. En effet, de nouveaux objets jusque-là non observables (petites tailles) sont perceptibles et cela perturbe les méthodes de détections classiques ou spectrales adaptées à l'analyse des images à résolution décimétrique (**Puissant, 2006**). Les images THRS produisent des signatures spectrales trop peu disjointes pour jouer leur rôle discriminant (**Caloz et Pointet, 2003**). Cela à imposer de définir de nouvelles méthodes afin de traiter efficacement les images THRS. On a ainsi observé l'arrivée des algorithmes dits contextuels (**Caloz et Pointet, 2003**). Ici on parle de la notion d'objet (ou classe) qui est un agrégat de plusieurs pixels. En effet au lieu de travailler sur un pixel de manière isolée comme les méthodes traditionnelles, ces algorithmes travaillent sur un ensemble de pixels regroupés (**Oruc, Marangoz, Buyuksalih ; 2004**). Ces méthodes prennent en compte les informations spectrales (comme les techniques classiques d'objet

téledétection) mais aussi la forme, la texture et la topologie doivent correspondre aux entités géographiques à classer (**Rajosarimalala, 2010**).

Les recherches bibliographiques ont montré que cette approche développée ces dernières années, offrent la possibilité de détecter des entités de petites tailles au sein de milieux complexes et diversifiés allant de l'Urbain à la végétation (**Flanders et al. 2003 ; Hubert-Moy et al., 2003 ; Meinel et al., 2004 ; Hajek 2005 ; Chubey et al. 2006 ; Karsenty ; et al., 2007**) ; également cette approche est utilisée pour mettre en évidence des changements spatiaux (**Desclee et al. 2006 ; McDermid et al. 2003**) comme la croissance urbaine (**Aguejdad et al. 2006; Puissant et Weber 2004**) ; l'occupation des sols (**Sparfel, et al. 2010 ; Corbane et al. 2004 ; Lewinski 2005; Lucas et al. 2003 ; Vandersande et al. 2003**) et aussi, pour inventorier les petites zones humides (**Hubert-Moy et al. 2006**). Rares sont les études qui ont utilisé la méthode de classification orientée objet visant à produire une information exhaustive concernant les sols. L'utilisation de cette méthode dans notre travail va donc nous permettre de rendre compte de son efficacité quant à la détection des petites plages des états de surfaces de sols gypseux. Avec cette méthode, on ne parle plus des pixels, mais d'objets comme éléments constitutifs de l'image. Classifier une image revient donc à affecter chaque objet de l'image à une classe prédéfinie d'objets.

Avant de présenter notre méthode de segmentation puis de classification sous eCognition, nous allons présenter le concept de ce logiciel, ce qu'il propose et les avantages d'une approche orientée objet.

1.6.1.5.1 Explication de l'approche orientée-objet

1.6.1.5.1.1 Du pixel vers l'objet

Le principe de ce nouveau concept est d'utiliser l'ensemble des informations présentes dans l'image objet pour la réalisation d'une classification.

Les objets représentent un format de données intermédiaires entre le raster et le vecteur :

- ❖ Leurs caractéristiques (informations) proviennent en grande partie des pixels qu'ils renferment
- ❖ Ils possèdent une topologie et des caractéristiques vectorielles (surface, périmètre...) (**Thomas, 2005**).

Grâce à cette méthode, l'information sémantique qui n'est pas représentée dans un pixel est devenue accessible. Alors que la topologie des pixels est indiquée implicitement par le raster, l'association d'objets images adjacents doit être explicitée pour définir le voisinage entre les objets. En conséquence, le réseau topologique disposera de nombreuses informations relationnelles (**Baatz et al.; user guide eCognition ; 2004**).

En effet, ces objets qui possèdent des relations topologiques permettent une classification plus fine, mieux orientée et une extraction d'informations supplémentaires d'une valeur précieuse. Il est donc possible de réaliser des analyses sur les plus proches voisins et ainsi de permettre la multiplication efficace de nombreuses catégories différentes (**user guide eCognition**).

Cette approche objet doit ainsi logiquement amener à de meilleurs résultats que celles qui sont fondées sur les pixels.

Deux notions sont prises en compte pour déterminer la similarité de pixels :

- ❖ Similarité par rapport à la signature spectrale ; on parle alors de classification ou segmentation spectrale ;
- ❖ similarité par rapport à la proximité spatiale ; on parle alors de classification ou segmentation spatiale.

1.6.1.5.2 Le processus d'analyse orientée objet

Le processus d'analyse orientée objet (figure 88) commence donc toujours par la segmentation processus de regroupement des pixels au sein d'objets (ou segments) avant la phase de classification. Mais avant tout cela, dans un processus classique de traitement d'une image de télédétection, il est important de ne pas ignorer les étapes de prétraitement des données telles que les corrections géométriques et le géoréférencement.

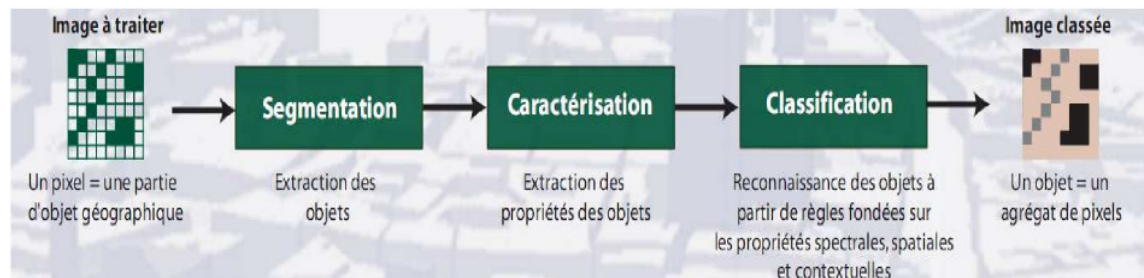


Figure 88 Processus d'analyse orientée-objet (O. Boussaid & al, 2006)

1.6.1.5.2.1 Segmentation

La segmentation de l'image consiste à diviser l'image en région homogène, de manière à souligner les objets réels du terrain (**Darwish, A. K. Leukert, W. Reinhardt ; 2003**). Les objets sont créés par croissance de régions, c'est-à-dire, par fusion de pixels adjacents (**Cabral, 2006**). La segmentation est fondée sur des critères d'échelle ou critère d'hétérogénéité est fixée par l'utilisateur, pour arrêter le processus : il intègre la couleur et la forme des objets ainsi que le paramètre compacité et lissage (smoothness/compactness). Ce critère est en fait une valeur abstraite qui permet d'influencer la taille et la forme de l'objet suivant la pondération accordée à chaque paramètre. Comme les classifications seront

appliquées à ces segments et non aux pixels, la qualité de cette segmentation doit être optimale. De plus, la segmentation peut être effectuée à des résolutions multiples, permettant de différencier plusieurs niveaux d'objets. Il est donc possible de représenter l'information d'une image à différentes échelles simultanément, par différents niveaux d'objets. Ces objets sont organisés en un réseau hiérarchisé qui constitue la base de la classification (Figure 89).

ECognition propose donc une segmentation multirésolution (différentes échelles de segmentation). (Figure 90). Dans un premier temps, le logiciel analyse les propriétés de chaque pixel de l'image et les compare avec les pixels avoisinants. Là où les ressemblances sont les plus grandes, les pixels sont agrégés en segments d'images. La décision de regrouper est basée sur le critère d'homogénéité locale, décrivant la similarité des objets image adjacents (Darwish et al., 2003). La procédure d'optimisation sous-jacente minimise l'hétérogénéité pondérée des objets résultants, où n'est pas la taille du segment et h une définition arbitraire de l'hétérogénéité (Baatz et al., user guide cognition ; 2004). La paire d'objets image qui provoquerait la plus faible augmentation de ce critère est effectivement unie. Le processus s'arrête lorsque le plus petit accroissement de l'homogénéité excède un seuil défini par l'utilisateur le paramètre d'échelle (Darwish, et al., 2003).

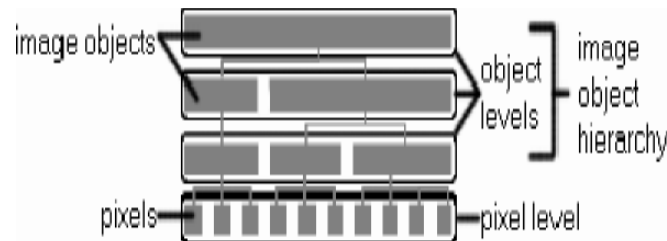


Figure 89 Niveau des objets-image (Source Manuel de référence d'eCognition)

Cette segmentation de l'image en objets vise donc à créer une homogénéité maximale. Le critère d'homogénéité est une combinaison entre la couleur (valeur spectrale) et la forme (« smoothness and compactness ») des objets. Sous eCognition, on choisit d'attribuer des indices à la couleur et à la forme, à la compacité et à l'irrégularité, et au paramètre d'échelle pour créer différents niveaux de segmentation. En général, l'utilisateur doit définir les paramètres suivants : (i) les poids relatifs aux canaux dans le processus de segmentation; (ii) le paramètre échelle; (iii) les paramètres forme; (iv) les paramètres lissage et compacité ; et le nombre de niveaux hiérarchiques de la segmentation (Cabral, 2006).

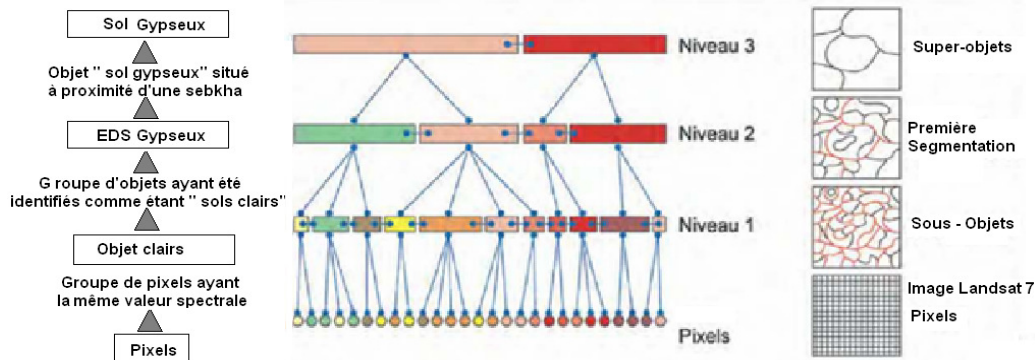


Figure 90 Principe de la Segmentation Multi-résolution

Il existe différents types de segmentation : Multi résolution, Quadtree, Chessboard. Dans le cadre de cette étude, nous utiliserons la segmentation multirésolution dont le principe est donné à la figure ci-dessus (Sparfel et al, 2008), car elle permet d'obtenir les objets sous forme « fractale », optimale pour la présente étude. Elle minimise l'hétérogénéité moyenne des objets imagés, tout en maximisant leurs homogénéités (Manuel Utilisateur d'eCognition 8.64.0). L'homogénéité d'une région va se calculer à partir des critères spatiaux et spectraux. La segmentation est un pas important dans l'analyse des données en télédétection (Kartikeyan et al, 1998).

1.6.1.5.2.2 Classification

La classification est la seconde phase de l'approche orientée objet. En effet, la segmentation multirésolution produit seulement les primitives des objets, c'est-à-dire des objets de taille approximativement équivalente et sans signification thématique (Alban, 2005). Le processus de classification se base sur les règles fondées sur les propriétés spectrales, spatiales et contextuelles pour la reconnaissance des objets dans l'image. Ainsi, les objets dans l'image sont regroupés au sein des groupes de structure appelés Classes. Une classe était un ensemble d'objets image ayant la même structure au sein de l'image. La figure 91 ci-dessous, présente ce processus de classification sous le logiciel eCognition.

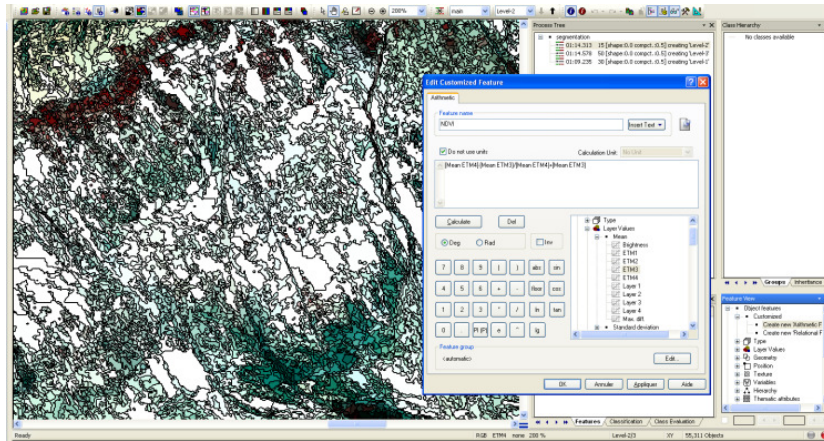


Figure 91 présente le processus de segmentation multirésolution et classification de la végétation sous le logiciel eCognition.

2 RESULTATS ET DISCUSSIONS

2.1 RESULTAT DE L'APPROCHE PAR PHOTO-INTERPRETATION

Notre étude de cartographie par télédétection des EDS a commencé par une prospection préliminaire de toute la zone d'étude, s'appuyant sur l'analyse des images satellitales par photo-interprétation et sur un MNA, ainsi que sur l'observation sur le terrain. À cette étape, on essaie de reconnaître les sols et les paysages du territoire à prospecter et établir les classes d'EDS préliminaire obtenues à l'aide des réflectances exoatmosphériques.

Tout au long du processus de prospection cartographique, on observe à chaque classe (la position géographique à l'aide d'un système de positionnement par satellites) : la pente, le modelé du paysage, l'état général du régime d'humidité des sols (i.e. classe de drainage), la profondeur de la roche- mère et la piérosité rencontrée à la surface du sol. (caractéristiques morphologiques, l'état humidité (sec, humide) la couleur de la matrice du sol, puis la texture, la grosseur et la forme des agrégats, l'abondance et la forme des fragments grossiers, la présence ou l'absence de carbonates, les formes de dépôt de gypse (figure 92).

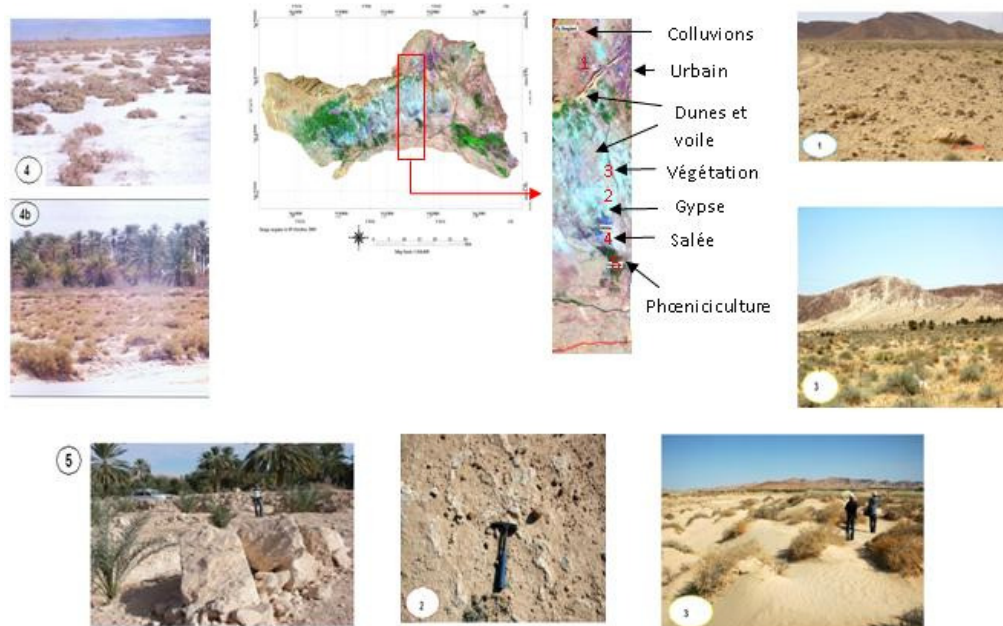
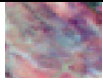



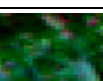


Figure 92 Photo-interprétation d'une trichromie TM 7, 4, 1 du 09 octobre 2009 du bassin versant d'oued Djedi

2.1.1 Identification d'EDS des sols par photo-interprétation

Elle repose sur la caractérisation des sols suivants (tableau 18). Il s'agit des classes les plus aisément classifiables : i) Sols gypseux à horizon gypsic ; ii) sols gypseux à horizon petrogypsic ; iii) sols sableux et iv) sols halomorphe à encroutement gypseux de nappe sous efflorescence saline ; et l'occupation du sol v) le palmier dattiers "phœnix dactylifera ". On a retenu différents critères pour les identifier à partir de la nomenclature suivante : a) teinte ; b) texture ; c) structure ; d) forme géométrique ; e) situation géographique.

Tableau 18 Classe des sols avec les critères retenus pour leurs caractérisations.

Classe des sols	Teinte	Texture	Structure	Forme géométrique	Situation géographique	Illustration
Typic calcigypsis	Claire 7.5 YR 8/2	rugueuse	Non spécifique	Non spécifique	Non spécifique	
Typic petrogypsis	Très claire 7.5 YR 8/2	rugueuse	Non spécifique	Non spécifique	Non spécifique	
Xeropsammets	Très claire 7.5 YR 7/4	Lisse	Homogène	Non spécifique	Non spécifique	
Petrogypsic Aquisalids à encroûtement gypseux en nappe	Très claire, 7.5 YR 8/6	rugueuse	Homogène	Non spécifique	Non spécifique	
palmier dattiers "Phoenix dactylifera "	Foncée, Très foncée	Granuleuse	Hétérogène	Non spécifique	Non spécifique	

2.1.2 Classes thématiques

Le choix des zones d'apprentissage pour la classification supervisée constitue une étape importante dans le processus de classification. Ces zones doivent être représentatives pour chacune des classes. La séparabilité des signatures spectrales des échantillons représente un moyen adéquat de sélection des zones d'apprentissage. Une méthode qui est couramment utilisée, c'est la méthode de visualisation nD des échantillons (Figure 93).

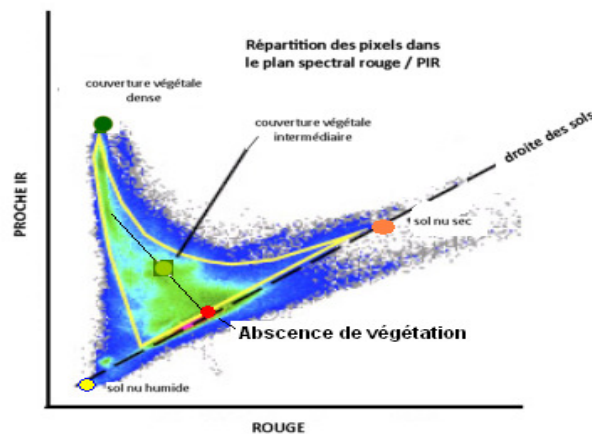


Figure 93 méthode de visualisation nD des classes thématiques

Cette méthode permet de visualiser les échantillons (outil nD-Visualizer, ENVI 4.3) et de vérifier si les pixels choisis correspondent bien à la classe que l'on veut établir. En utilisant la visualisation et en effectuant la rotation de l'image, les pixels isolés ont pu être identifiés et éliminés.

2.1.3 Analyse des courbes spectrales

L'analyse des réponses spectrales combinées avec les résultats par photo-interprétations et le contrôle sur terrain nous, ont permis de retenir huit thèmes susceptibles d'être cartographiés. Ces thèmes constituent aspects des surfaces, des sols testent, supports de la classification dirigée. Un état de surface du sol est un ensemble complexe constitué de divers éléments du sol qui sont exposés au soleil ou à l'ombre et plus ou moins couvert par la végétation (**Girard et Girard (2004)**).

Les signatures spectrales des principales classes sont présentées sur la figure 94; les principaux facteurs élémentaires du comportement spectral des sols sont ceux qui interviennent sur les états de surface du sol : la couleur, la rugosité (croûtes, encroûtements, efflorescence saline, éléments grossiers et textures), le calcaire, le gypse (**Hunt et al., 1971; Hunt, 1977, 1979 ; Goossens and Van Ranst (1998) ; Goossens et al. (1999)**), l'humidité et la composition chimique (**Courault et al., 1988 ; Metternicht and Zinck (2003) et Girard M-C et Girard C-M., 2004**).

Dans la suite du texte le terme « sol » devra être compris comme « état de surface de sol ».

Les courbes de réflectance des sols sont uniformes, continues et croissantes ; elles varient peu d'un canal à l'autre. Plus les sols sont clairs, plus les valeurs sont élevées. Pour les sols blancs (gypseux et salés) la couleur est due principalement aux sels, on note une convexité dans le canal 2 dus à leur teneur en eau. Selon **Courault et al., (1988)**, la réflectance des sols résulte directement de leurs compositions et de leurs couleurs (tableau 18). On peut donc relier la couleur Mansell, pour les sols mesurés sur terrain, à leur réflectance et aux valeurs des comptes numériques des images satellite (figure 94).

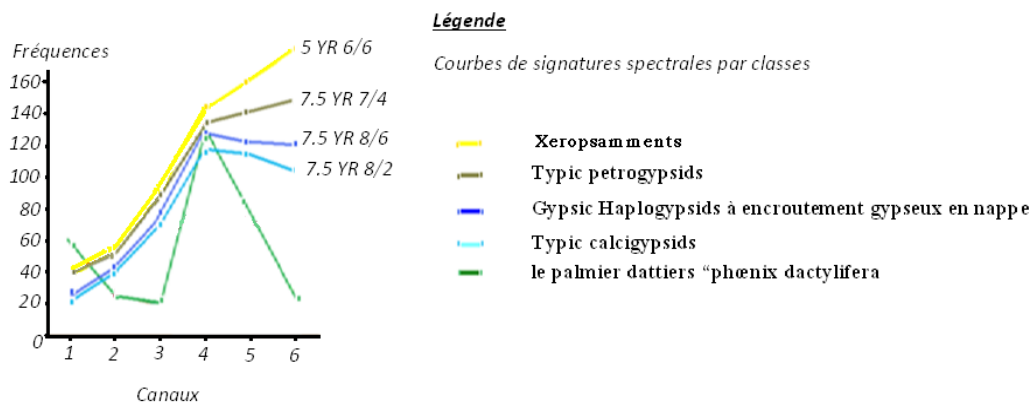


Figure 2.1-1 Courbes de réflectance spectrale de chaque classe dans les bandes du visible, proche infrarouge et le moyen infrarouge

À première vue, nous remarquons que certains thèmes se dégagent nettement ; ainsi la discrimination de la végétation et des sols s'avère très aisée puisque :

- ❖ Primo, les sols de cette région ont des valeurs de réflectance plus élevées que celles de la végétation ;
- ❖ Secundo, la signature spectrale de la végétation est très particulière, elle montre un pic très marqué dans le proche infrarouge et une réflectance moindre dans le rouge ;

Dans la présente étude, nous n'allons nous intéresser qu'au comportement spectral du « sol gypseux » qui devra être compris ici comme « état de surface » (abstraction faite de la végétation).

L'examen de la figure (10.1-3) montre que :

- Le comportement spectral des 04 classes des sols se caractérise en général par des courbes de réflectance régulièrement croissantes dans le visible ETM+ (1, 2, 3) et le moyen infrarouge (ETM5), Tandis qu'elles sont généralement faibles dans le proche infrarouge (ETM4) et le moyen infrarouge (ETM7).

Ces 04 classes présentent des valeurs de réflectance proches pour causes :

1. La couleur

On peut déduire de cette figure que la réflectance augmente pour les sols clairs :

- Plus la clarté est forte, plus les réflectances sont fortes ;
- Plus la clarté est faible, plus les réflectances sont faibles.

Entre autres, c'est la raison pour laquelle les sols gypseux se distinguent des autres et se traduisent par des valeurs élevées dans les bandes du visible : Ils sont particulièrement clairs, blanchâtres présentant une forte clarté (7,5 YR 8/4). Relativement, la courbe de réflectance du sol sableux succède à celle des sols gypseux car cette classe présente une clarté inférieure à ces deux dernières (7,5 YR 7/6). De même on expliquera la succession du reste des courbes ; le sol sableux est plus réfléchissant que les autres classes qui lui succèdent puisque sa clarté est plus forte de ces derniers et ainsi de suite jusqu'à la classe 6 qui présente la clarté la plus faible (5YR 5/6).

Nos résultats corroborent avec l'hypothèse mise par **Escadafal (1989)** qui a démontré dans sa thèse que les coefficients chromatiques (x,y,z) sont très fortement corrélés à la réflectance dans les bandes spectrales Rouge, Verte et Bleu du satellite LANDSAT ETM+. Il conclut que les canaux ETM1 et ETM3 sont les plus importants pour discriminer les surfaces d'après leur couleur. Donc juste une petite partie du spectre électromagnétique revêt une importance toute particulière pour nous : Celle qui correspond aux longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 0,7 μm . La figure 94 reflète la relation entre la couleur Mansell et la réflectance pour chaque classe illustrée seulement dans le visible.

2. La rugosité

C'est la caractéristique la plus importante pour interpréter la diminution en matière de réflectance. La rugosité diminue dans les bandes du visible, proche infrarouge et moyen infrarouge depuis les sols gypseux à horizon gypsic; jusqu'aux sols argilic sous efflorescence saline passant par les sols gypseux à horizon petrogypsic et les sols sableux d'où on constate que plus la taille des particules augmente, plus la surface d'ombre augmente et plus la réflectance diminue. D'une façon générale quand la proportion d'ombre augmente, la réflectance diminue (Yongchalerchai, 1993). D'après Gausman et al 1977, la rugosité a un rôle dans la diminution de la réflectance dans toutes les longueurs d'onde. Aussi, la répartition spatiale de la rugosité pourrait être associée à l'humidité. En effet, la variation de l'humidité est fonction de la topographie qui est elle-même reliée à la profondeur et la nature du sol.

Rugosité dépendant d'un facteur extrinsèque, lié aux microreliefs provoqués par les sables, graviers, cailloux ou blocs. La rugosité est déterminée principalement par les ombres portées des éléments grossiers au niveau de la surface du sol. Il y a un lien étroit entre la hauteur du soleil sur l'horizon, la saison, l'heure de prise de vues et la latitude de la zone étudiée. En effet, les capteurs sont le plus souvent à la verticale, alors que le soleil est le plus souvent oblique. Le capteur saisit donc une certaine surface éclairée, et une certaine surface à l'ombre.

3. L'humidité

Bien que les deux classes et présentent le même sol ; c'est-à-dire gypseux ; et la même couleur, ils montrent cependant deux réflectances différentes. Cela s'explique impérativement par l'intervention de la composante d'humidité (étant donné que les autres facteurs sont fixes). L'humidité donne un aperçu sur la profondeur du sol, la texture, la structure et conditionne la répartition des pluies entre infiltrations, rétention superficielle, ruissellement et évapotranspiration (Auzet et al., 2005 ; Cerdan et al., 2002). Les réponses spectrales de ces deux classes dans cette bande révèlent que la réflectance de la classe gypsids à horizon petrogypsic est moindre que la réflectance de la classe gypsids à horizon gypsic (figure 94) ce qui explique qu'elle est liée à l'état humide contrairement à la classe gypsids à horizon petrogypsic qui se trouve à l'état sec.

4. La teneur en gypse

Les sols gypseux à croûte (gypsids à horizon gypsic) et à encroûtement gypseux (gypsids à horizon petrogypsic) (classe I, II), présentent des valeurs de réflectance fortes proches de celles sols sableux (classe III) due principalement à la présence de gypses, car le taux en gypse intervient sur la réflectance des sols en donnant des valeurs très fortes dès la bande bleue.

La réflectance des sols gypseux à croûte gypseuse (classe I) est supérieure à celle de la réflectance des sols gypseux à encroûtement gypseux (classe II), ce qui explique que la teneur en gypse de ce dernier est moins importante.

On constate aussi une variation très nette de la réflectance entre les zones encroûtées et les zones non croûtées. Dues à la différence d'humidités intra parcellaires et aussi à présence de végétations.

2.1.4 La droite des sols

A partir de l'étude d'histogramme bi-canaux (figure 95), on remarque que toutes les valeurs de réflectances des sols se situent sur une direction suivant globalement la première diagonale. Cette dernière peut être qualifiée de "droite des sols nus" (figure 96) (Girard. M-C, Girard. C- M, 1999), puisque les réflectances R et PIR sont proches. 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.

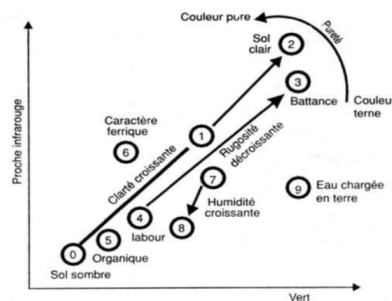


Figure 95 Model d'interprétation des sols sur l'image (Girard. M- C, Girard.CM.,1999)

La projection des états de surfaces des sols de la région d'étude sur le modèle d'interprétation des sols donnés par Girard et al., (1999) sont illustrées sur la figure (7.1-5) .

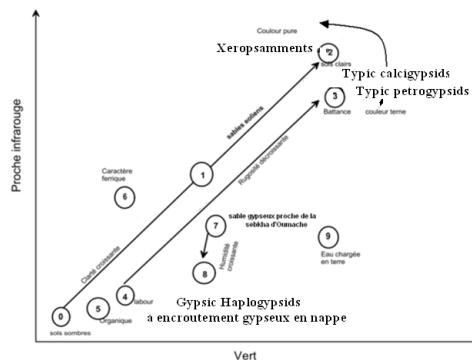


Figure 96 Projection des états de surface de la région d'étude dans le modèle d'interprétation des sols de Girard. M- C et Girard. C- M, 1999.

2.2 RESULTAT DE LA RELATION SPATIALE ET SPECTRALE DES SOLS SELON LA TOPOSEQUENCE A-B.

La figure 97 et le tableau 19 se propose de présenter l'ensemble des unités d'organisation des sols et de végétations reconnues. Elle fournit les éléments nécessaires à la compréhension de la répartition spectrale et spatiale de ces formations superficielles et présente aussi les profils sur une toposéquence de 9 km.

Les unités de sols et de végétations reconnues grâce à la télédétection et les observations sur terrain sont replacées sur la toposéquence, où sont distinguées 04 unités ou classes des sols :

- les sols minéraux bute d'apport éolien modaux où Xeropsamments sur les haut et moyens glacis ;
- les sols gypseux à croûte gypseuse (horizon gypsic) sur les moyens et bas glacis ;
- les sols à encroûtements gypseux (horizon petrogypsic) sur les plaines et ;
- enfin au niveau de la sebkha dépression les Petrogypsic Aquisalids à encroûtement gypseux en nappe.

Pour la végétation en distingue :

- Les *Limoniastrum guyonianum* et *Atriplex* sur les glacis et la plaine là où il y a présence de gypses et où la nappe est plus ou moins salée proche de la surface;
- *Aristida pungens* sur les voiles sableux et les nebkhas et ;
- *Salsola vermiculata* au niveau de la depression d'Oumache.

CHAPITRE 1 : LOCALISATION DES SOLS GYPSEUX PAR TELEDETECTION ET DES MESURES IN SITU

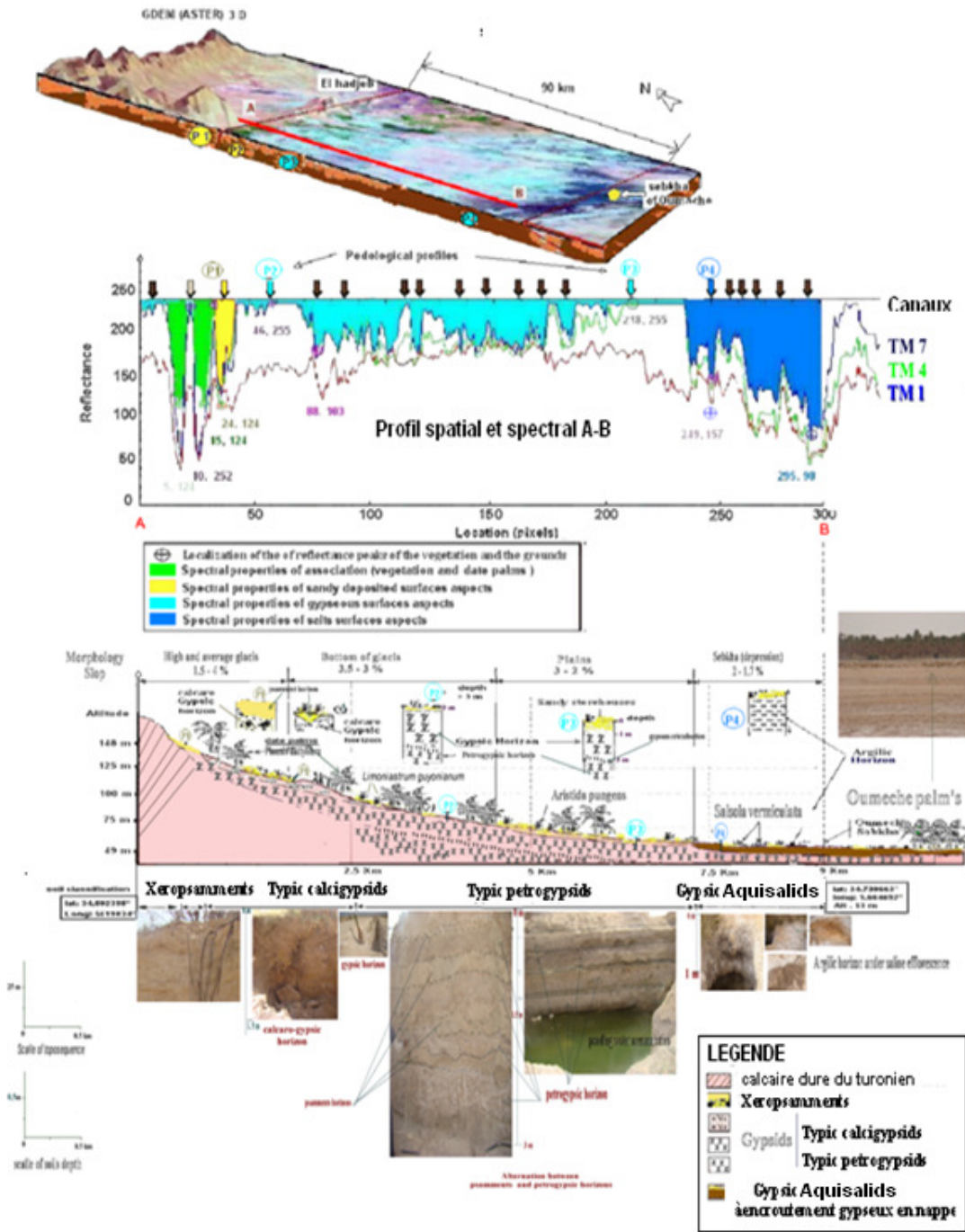


Figure 97 Relation spatiale et spectrale des sols avec implantation des fosses pédologiques sur une toposéquence de 9 km.

Tableau 19 résultats d'une confrontation des classes avec les observations de terrain

Classe de sols	couleur	formations
Typic calcigypsis	Blanc rosé 7.5 YR 8/2	Amas gypseux blanchâtre et friable, nodules blancs de formes variable, cristaux de gypse bruns lenticulaire, Croûtes gypseux dure (deb deb)
Typic petrogypsis	Claire 7.5 YR 7/4	Blanchâtre à rose massive et très dure et encroûtement gypseux de nappe blanchâtre formés d'amas consolidés et un encroûtement gypseux avec un réseau polygoné typique en surface.
Petrogypsic Aquisalids à encroûtement gypseux en nappes sous efflorescence saline	rougeâtre. 7.5 YR 8/6	Efflorescence, de couleur blanche due à l'accumulation de sels solubles (chlorures), dont les constituants sont issus d'une nappe phréatique salée située à faible profondeur (1 ou 2 m) et présence aussi des rides en relief constituée de gypse à partir de la nappe phréatique salée il remonte par capillarité et précipite dans les fentes de dessiccation de la plaine d'inondation.
Xeropsamments	5 YR 6/6	Sol climatique (aride et désertique), sur matériau non consolidé, résultant d'un apport sableux.

2.3 RESULTATS DES CLASSIFICATIONS AUTOMATIQUES

2.3.1 La comparaison entre les images ETM+ classes de 30 et 15 m de résolution par classification par pixel

2.3.1.1 Résultats de la comparaison entre classifications par pixel des images ETM+ originales et indicielles de 30 m de résolution

Nous ne présentons ici que les cartes et les matrices de confusion ayant montré le meilleur indice kappa. Les autres cartes et matrices sont présentées en annexe. Les coefficients kappa diminuent (0.90 à 0.74) mais restent cependant de bonne qualité (tableau 20). Un certain nombre d'erreurs ont été identifiées (confusion entre les sols gypseux à croûte et encroûtement, entre les sols gypseux et salés ; sols gypseux et sableux, sableux et salés) (figure 98). Une vérification systématique de cette classification est menée sur l'ensemble de l'image pour corriger ses erreurs et attribuer manuellement aux classes douteuses leurs véritables attributs (classes) par vérification sur le terrain.

Tableau 20 Coefficient Kappa pour les différentes classifications automatiques des images à 30 m

Trichromies	Coefficient Kappa
ETM+ (7, 4, 1)	0.7428
IB, IS, IH	0.9034
ACP1, NDVI et ACP2	0.6932
IB, NDVI et IH	0.8548
IB, IS, IC	0.7858

La classification à partir des trichromies indicielles donne des résultats satisfaisants. La matrice de confusion donne une précision globale de 90%, ce qui est supérieure à l'ensemble des autres méthodes de classification testées, mais reste encore insuffisante par rapport à la réalité (tableau 21).

Tableau 21 Estimations du % de précision (Kappa) pour les différentes classifications appliquées pour la trichromie indicielle (IB, IS, IH) de 30m.

Classification d'images (IB, IS, IH) par	Indice Kappa (%)
	ETM+ à 30 m
Pixel (maximum de vraisemblance)	0.90
Pixel (Minimum de distance)	0.57
Pixel (Spectral Angle Mapper (SAM))	0.64

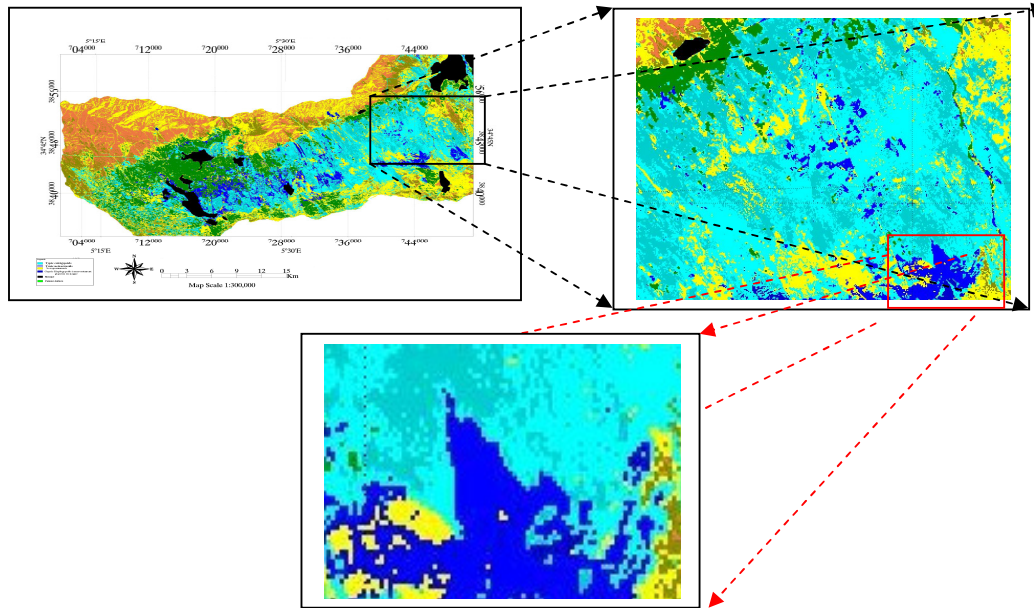


Figure 89 Carte des états de surface par classification de la trichromie indicielle (IB, IS, IH) de 30 m de résolution

Le coefficient kappa = 0.9034, il dépasse les 68 % requis pour qu'une classification puisse être acceptée (**Girard MC. 1989**) donc, la classification est considérée comme bonne.

L'examen de la matrice de confusion (tableau 22) de la classification de la trichromie indicielle (IB, IS et IH) (figure), attribut pour chacune des cinq classes définit un taux de : 99.27 % de pixels bien identifiés pour la classe de palmeraies ; et de 58.80 % pour les Typic calcigypsids; 64.33 % pour les Typic petrogypsids; 77.87 % pour les Petrogypsic Aquisalids à encroustement gypseux en nappe sous efflorescence saline assez bien identifiés (sur détection). En revanche, nous observons un résultat de 76.84 % pour les Xeropsamments bien identifiés sur les replats mais présente 23.51 % de sous détection. Ce résultat s'explique par la forte confusion entre les Xeropsamments et les Gypsids. Nous expliquerons ces différences de résultats et ces confusions au niveau suivant.

Une confusion subsiste entre les deux classes gypseuses dues principalement aux valeurs radiométriques proches. Ces deux classes se confondent largement avec les Petrogypsic Aquisalids d'où sa sur estimation (22. 12%). Une autre confusion est observée entre les Gypsids et les Xeropsamments sous estimation, cette confusion est due aux remaniements des cristaux de gypses et de sels transportés par les vents et déposés sur les dunes et les voiles sableux qui confèrent à ces derniers une couleur blanche provoquant un IB et un IS élevé proche des sols gypseux et salés. Les palmiers dattiers sont très bien identifiés (99.27 %).

Tableau 22 matrice de confusion et indices d'omission et de commission des classes thématiques.

		Classification							
Référence	Classes	I	II	III	IV	V	Total	Précision %	Erreur d'omission %
	Typic calcigypsids	17790	9635	1041	1151	0	30251	58.80	41.2
	Typic petrogypsids	1561	4404	344	536	0	6845	64.33	35.67
	Xeropsamments	825	469	10554	1951	0	13799	76.48	23.51
	Petrogypsic Aquisalids	691	788	1241	9871	85	12676	77.87	22.12
	palmier dattiers "Phoenix dactylifera "	0	0	0	150	20523	20673	99.27	0.72
	Total	20867	15296	13180	13659	20608	144244		

2.3.2 Discussion des traitements d'image par classification automatique des trichromies indicelles de 30 m.

L'apprentissage fondé sur une bonne connaissance de la zone d'étude n'a pas permis d'obtenir des résultats superposables à la réalité de terrain. Par contre, les classifications issues des différentes trichromies indicelles donnent le meilleur résultat par rapport à ceux qui sont donnés par la trichromie classique ou originale des canaux bruts (7, 4, 1) d'ETM+. L'image classée résultante de la combinaison des indices (IB, IS, IH) montre que le degré de distinction de différentes classes est satisfaisant. Cependant, en examinant le tableau 3, nous remarquons que l'évaluation statistique d'une classification à elle seule est insuffisante pour apprécier son exactitude, c'est-à-dire sa conformité avec la réalité de terrain d'où les confusions. La confusion, entre les classes, trouve son origine dans le recoupement des signatures spectrales (figure 94) que le traitement statistique ne distingue pas. Cela s'explique aussi par le fait que les contrastes spectraux perceptibles sur l'image du mois d'avril sont ceux qui opposent les sols gypseux aux Xeropsamments, contrastes élevés à la date d'acquisition de l'image d'où le choix des indices (IB et IS).

La végétation claire semée de la région soulève le problème de la discrimination des classes de végétation (IB, NDVI, IH). Il y a aussi une homogénéisation du signal de cette dernière en raison d'une résolution spatiale trop limitée, (pixels =30 m). Toutefois, l'application de l'indice de couleur permet de mieux grouper et de faire la distinction entre les deux classes gypseuses et éoliennes (IB, IS, IC). Ce contraste est moins prononcé en utilisant l'indice de brillance. Cette tendance pourrait s'expliquer par le fait que cet indice est très sensible aux variations de l'état de surface associé à la rugosité (parcelle labourée), à l'existence des chaumes (Djérid) et à l'humidité du sol.

Les résultats de l'étude montrent que :

- D'une manière générale, l'utilisation des indices permet d'affiner la discrimination entre les sols gypseux ou gypsids, Xeropsamments d'une part et les Xeropsamments et Petrogypsic Aquisalids d'autre part, par rapport à la trichromie classique obtenue à partir des canaux dans le visible (bleu), et le proche infrarouge (I.R).

- La séparation entre les formations gypseuses et Petrogypsic Aquisalids a été affinée, mais la confusion demeure difficile à séparer due à la présence des sels remanier, transportés et déposés par les vents sur les dunettes (nebkas) et les voiles sableux qui restent difficiles classés ;

On peut dire que la meilleure combinaison des trichromies indicielles qui a donné une bonne discrimination des classes identifiées, c'est celle de la trichromie indicielle (IB, IH et IS).

3 COMPARAISON ENTRE CLASSIFICATION PAR PIXEL DES IMAGES INDICIELLES DE 30 ET 15 M DE RESOLUTION

3.1 ÉVALUATION DES RESULTATS

Du fait du nombre important de résultats attendus au terme des classifications par pixels, une première validation consiste à déterminer les traitements les plus satisfaisants selon le type de données utilisées. Pour ce faire, Nous ne présentons ici que les indices ayant montré le meilleur potentiel de discrimination. Les coefficients de précision Kappa (tableau 23) sont calculés par l'intermédiaire des matrices de confusion (exemple celle du tableau 24).

Tableau 23 Estimation du % de précision (Kappa) pour les différentes classifications appliquées.

Classification d'images par	Indice Kappa (%)	
	ETM ⁺ à 30 m	(ETM ⁺ + Pan) à 15 m
Pixel (maximum de vraisemblance)	0.90	0.93
Pixel (Minimum de distance)	0.57	0.65
Pixel (Spectral Angle Mapper (SAM))	0.64	0.71

À l'issue de cette première validation, sont retenues les classifications ayant le mieux classées les images fusionnées à 15 m " La classification par pixel de maximum de vraisemblance ".

Tableau 24 Matrice de confusion des états de surfaces de sols classés de l'image fusionnées P+ETM+ de 15 m par la méthode Pixel (maximum de vraisemblance) avec un Indice Kappa = 0.93.

		CLASSIFICATION							
		Classes	I	II	III	IV	V	Total	Précision %
REFERENCE	Typic calcigypsid	93386	523	687	89	0	94685	98.62	1.37
	Typic petrogypsid	1056	14523	1924	789	0	18292	79.39	20.60
	Xeropsammets	1081	1036	21156	1236	0	24509	86.31	13.68
	Petrogypsic Aquisalids	452	2036	5266	11681	0	19435	60.10	39.89
	palmier dattiers "Phoenix dactylifera "	0	0	0	150	51023	51173	99.70	0.29
	Total	95975	18118	29033	13659	51023	208094		

La confrontation des résultats issus de la classification par pixel montre que la classification par maximum de vraisemblance sur des images fusionnées à 15 m (figure 99) se positionne comme étant la plus efficace pour l'identification des classes des états de surfaces de sols avec 89 % de précision contre 63 % pour les images à 30 m de résolution (figure 100).

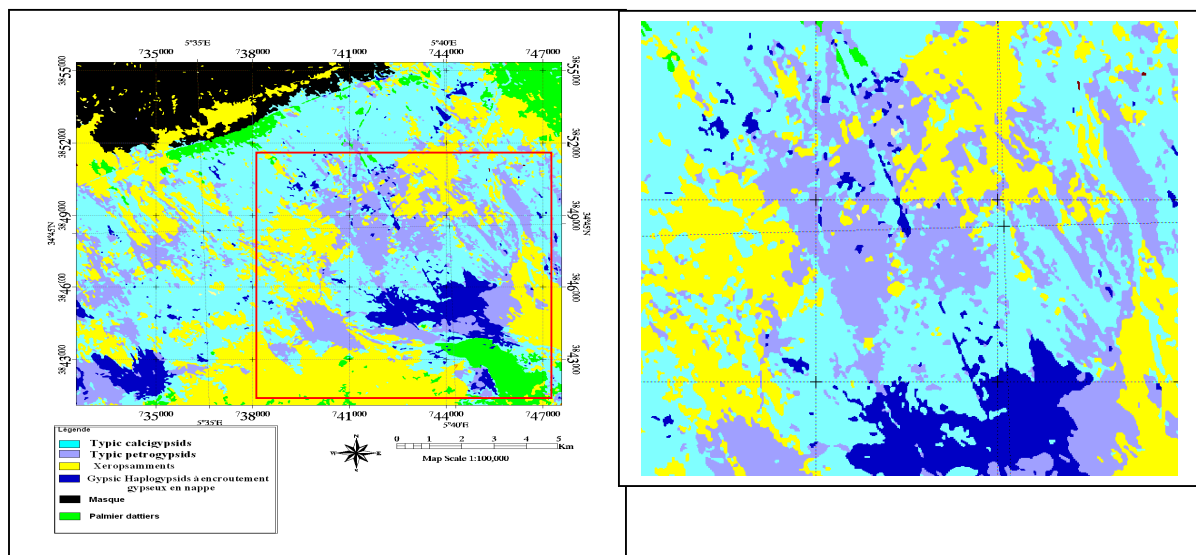


Figure 99- Classification par pixel des images rééchantillonnées et fusionnées à 15 m (ETM 7,4, P) de Landsat 7 par maximum de vraisemblance

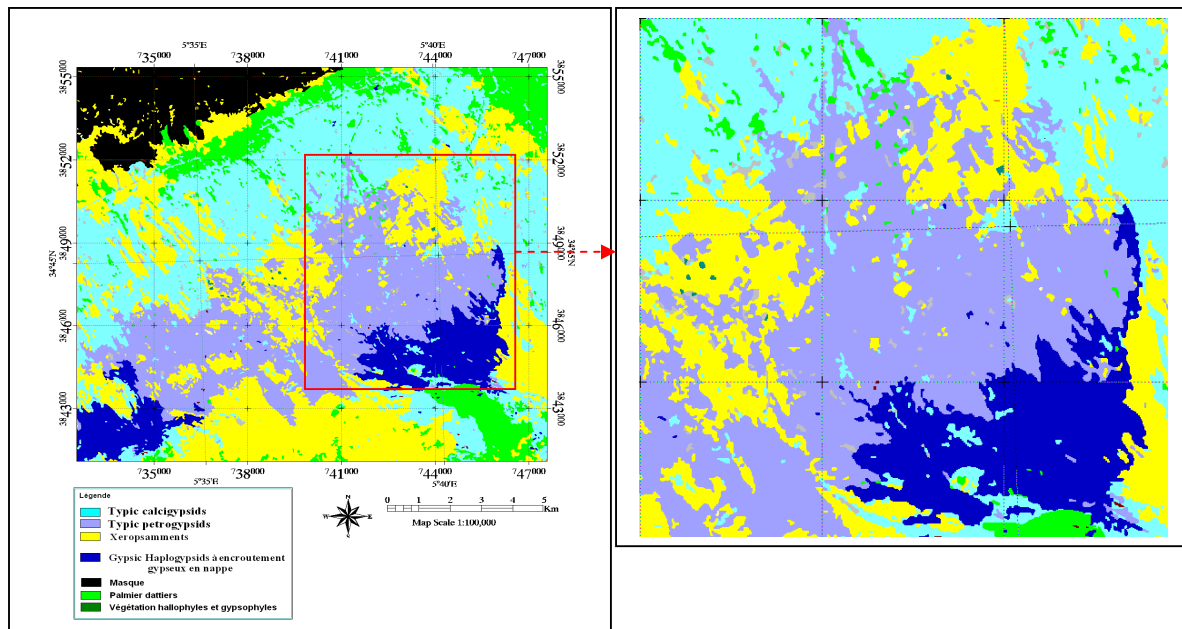


Figure 3.1-1 classifications par pixel des images rééchantillonnées à 30 m résolution.

3.1.1.1 Résultats de l'analyse thématique des classifications par pixels

Les classifications énumérées précédemment ont fait l'objet d'une seconde validation afin de quantifier la proportion des sols par classes correctement identifiées ou classées, et implicitement sous-estimées ainsi que le taux des surestimées (tableau 25).

Tableau 25- Analyses thématiques des classes de sol par classifications par pixels des images de 30 m et des images rééchantillonnées et fusionnées de 15 m.

Classes	Nombre de pixels de 30 m	Surfaces (Ha) des images ETM+ de 30 m	%	Nombre de pixels de 15 m	Surfaces (Ha) des images ETM+ de 15 m	%
Typic calcigypsis	17790	8895	12.33	93386	23346.5	44.87
Typic petrogypsis	4404	2202	3.05	14523	3630.75	6.97
Xeropsamments	10554	5277	7.31	21156	5289	10.16
Petrogypsic Aquisalids	9871	4935.5	6.84	11681	2920.25	5.61
palmier dattiers "Phoenix dactylifera" "	20523	10261.5	14.22	51023	12755.75	24.51
Total	144244	72122	100	208094	52023.5	100

Les images ETM+ rééchantillonnées et fusionnées à 15 m affichent les meilleurs résultats.

La résolution spectrale de 30 m a posé de réels problèmes dans la différenciation des signatures pour tous les sols, sauf pour la classe Xeropsamments, elle présente une bonne identification, car occupe de grandes surfaces. Les végétations steppiques, malgré une répartition assez nette sur terrain, ont été difficiles à extraire. Il est vrai que ces types de végétations présentaient des aspects très variables, un recouvrement faible et une réflectance différente. Mais ils n'ont pas été identifiés, car ils s'étendent sur de petites surfaces et il est donc difficile même par photo-interprétation de les identifier due probablement à la résolution de 30 m.

4 COMPARAISON ENTRE CLASSIFICATION PAR PIXEL ET ORIENTE OBJET DES IMAGES DE 30 ET 15 M

Cette partie d'étude vise à comparer les résultats issus de l'approche orientée objet aux méthodes fondées sur les pixels. Rappelons que l'objectif majeur de notre étude est d'améliorer la cartographie des sols gypseux, obtenue par des techniques de classification fondées sur les pixels. En particulier, nous souhaitons mieux cerner les limites des Typic calcigypsid et de profondeur Typic petrogypsid. De ce fait, nous allons nous attarder pour cette partie, uniquement sur ces deux classes de sol. La carte thématique produite pourra être utilisée en tant que document de référence pour la mise en valeur des sols de la région. Nous appliquerons dans ce but l'approche orientée objet. Ce travail sera réalisé sous le logiciel eCognition-4.0 (trial version).

4.1 ÉVALUATION DES RESULTATS POUR LA CLASSIFICATION ORIENTE OBJET

4.1.1 Segmentation multi résolution d'eCognition

Nous avons ainsi testé de nombreuses segmentations dans une zone réduite (pour réduire les temps de calcul). Après une estimation visuelle, nous avons sélectionné trois paramétrages et reproduisons ces segmentations sur tout le sous-bassin versant. Les paramètres ont été déterminés empiriquement afin de préserver au maximum les zones de taille réduite. Cela nous semblait en effet primordial pour obtenir ensuite des cartographies de qualité, en particulier pour les petites surfaces de sol. Pour chaque segmentation, les objets ont été ensuite classés en utilisant les mêmes zones d'entraînement des classifications précédentes. La classification utilisée est la méthode du plus proche voisin standard.

La qualité thématique des classifications des sols surtout les sols gypseux a été testée, en comparons, sous ArcGis, de la classification avec la zone de référence où les sols gypseux ont été localisés par GPS d'après les images satellites).

4.1.1.1 La première segmentation a été réalisée avec les paramètres l'Échelle = 10, Forme = 0.1, compactness = 0.5 ; smoothness = 0.5

Une première segmentation a été réalisée avec les paramètres d'Échelle = 10, Forme = 0.1, compactness = 0.5 ; smoothness = 0.5 (figure 101).

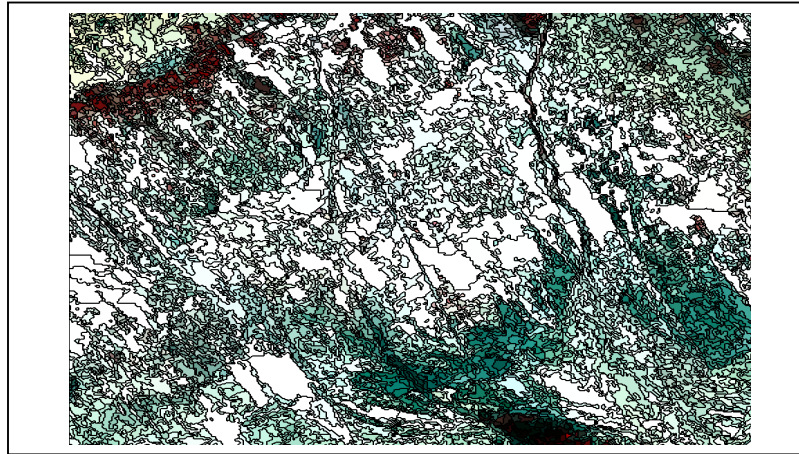


Figure 101 segmentations à l'échelle 10 avec le facteur de forme = 0.1 smoothness/compactness = 0.5

La première segmentation a permis de discriminer les zones urbaines et agricoles (occupation des sols) qui se présentent en petites surfaces.

4.1.1.2 La deuxième segmentation a été réalisée avec les paramètres, l'Échelle = 15, Forme = 0.1 compactness = 0.5 ; smoothness = 0.5

Une deuxième segmentation a été réalisée avec les paramètres d'Échelle = 15, Forme = 0.1 compactness = 0.5 ; smoothness = 0.5 (figure 102).

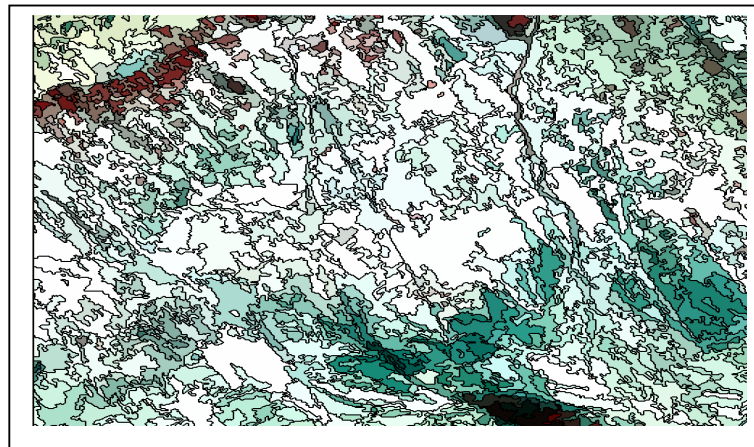


Figure 102 segmentations avec l'échelle de 15 avec le facteur de forme = 0.5 smoothness/compactness = 0.1

Le second niveau, c'est le niveau fondamental qui forme les objets qui ont été classifiés et qui nous intéressent " les sols " et surtout les sols gypseux ou gypsids. Cette segmentation a été ensuite testée grâce à la comparaison avec la zone de référence (observation sur terrain). Le troisième niveau, fondé sur une segmentation à 30, a permis de séparer le plateau des zones plaines. L'objectif de cette segmentation qui a intégré le facteur de forme = 0.5 et smoothness/compactness = 0.1, pour séparer les classes de sols différents mais spectralement proches comme les xeropsamments et gypseux ; Gypsids et Petrogypsic Aquisalids et xeropsamments. Ces paramètres doivent être déterminés le plus précisément possibles, le problème est qu'il n'existe pas réellement de méthodes pour estimer la qualité des segmentations. Plusieurs dizaines de segmentations ont été ainsi réalisées dans une zone testée entre El Hadjeb et Oumache. Nous en avons généré quelques-unes dans la zone d'étude. Les critères de validation ont été dans un premier temps uniquement expérimentaux :

- Qualité visuelle des objets : respect de la forme des objets d'intérêt ;
- adéquation avec les objectifs de l'étude ;
- nombre d'objets les plus réduits possibles.

5 DISCUSSION

La segmentation avec l'échelle de 15, le facteur de forme 0.5 et smoothness-compactness-0.1 correspondent parfaitement aux objets spécifiques recherchés (sols gypseux) et confirmés par l'analyse visuelle de l'image utilisée et les observations in situ. Cela s'explique par la très haute résolution spatiale (15m) de l'image fusionnée par rapport aux structures du paysage à différencier et par la bonne adéquation entre le niveau de précision de la segmentation et les différents types d'objets à classer. L'utilisation du MNT lors de la segmentation a permis de faire une première séparation satisfaisante entre les zones bien distinctes : les piedmonts, les glacis, les plaines, la dépression endoréique (sebka d'Oumache) et les plateaux. L'utilisation des indices (IB, IS) lors de la segmentation a permis aussi de faire une deuxième séparation entre les gypsids et les Xeropsamments, entre les gypsids entre eux, et entre les gypsids et les Aquisalids et les Xeropsamments. Le NDVI a permis d'établir une séparation entre les sols nus des surfaces recouvertes de végétation, comme il a permis aussi une gradation de la densité de végétation. L'indice d'humidité (IH) a permis d'isoler les surfaces d'eau.

L'analyse de la matrice de confusion, dans la suite du travail, nous permettra de discuter de la pertinence de l'opération et de voir si elle simplifie le travail, en permettant de séparer, sur un critère simple, des types de sols très différents (Typic calcigypsids et à typic petrogypsids – Aquisalids à encroutement gypseux de nappe et les Xeropsamments) mais très proche spectralement.

La segmentation a formé des classes objets dont la superficie est en concordance avec les éléments à classer tout en y maintenant un haut degré d'homogénéité, elle a donc entièrement

rempli son rôle en facilitant vigoureusement la classification. Cela confirme la possibilité de réaliser une segmentation d'objets pertinente et de qualité à partir d'une image fusionnée, issue d'images ETM+ et du canal Panchromatique (P) de LANDSAT 7 d'une région Aride.

5.1 CLASSIFICATION ORIENTEE OBJET

Dans l'approche orientée objet, la phase de segmentation est suivie de la classification des segments générés.

Le logiciel eCognition offre deux méthodes fondamentales de classification : Une méthode fondée sur le plus proche voisin (Nearest Neighbor ou NN) et les fonctions d'appartenance floue (Oruc, Marangoz, Buyuksalih ; 2004).

5.1.1 Classification supervisée basée sur le plus proche voisin

Pour chaque classification, les objets ont été classés en utilisant les mêmes zones d'entraînement (figure 103 ; et 104).

5.1.1.1 Comparaison entre la classification par pixels à 30 et à 15 m et orienté objet sur des images fusionnées de 15 m

I. Classification orientée objet sur des images de 15 m segmentées à 30 avec le facteur de forme = 0.1 smoothness/compactness = 0.5

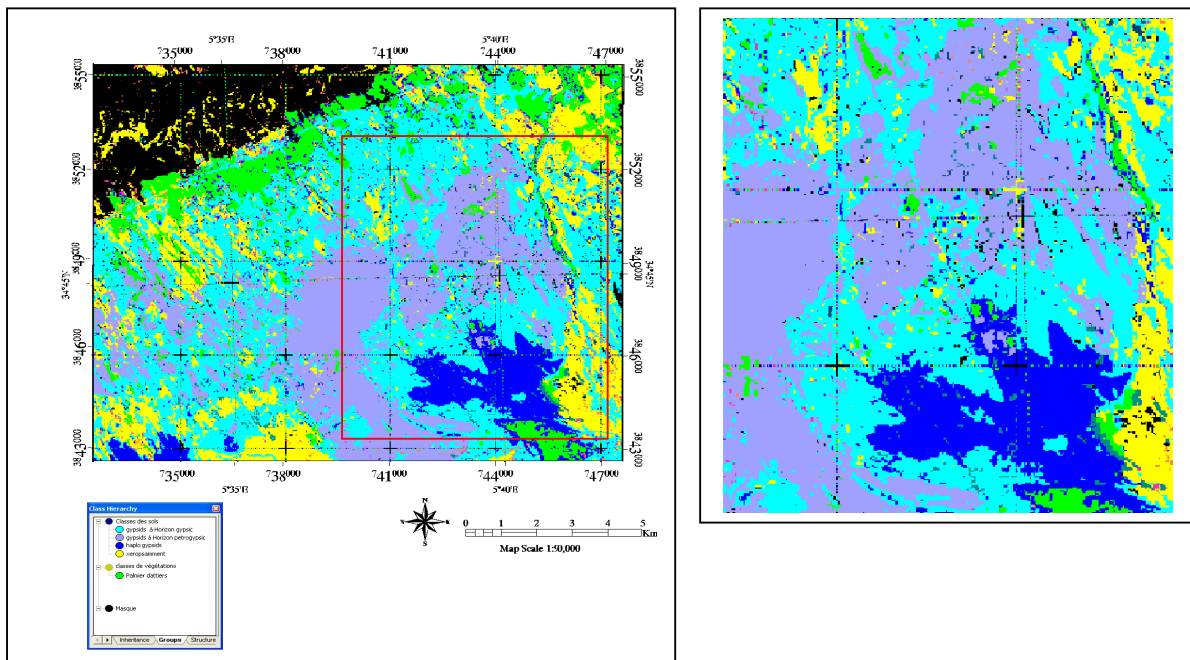


Figure 103 Classification par pixels des images segmentation à 30

II. Classification orientée objet des images à 15 m segmentation à 15 avec le facteur de forme = 0.1 smoothness/compactness = 0.5

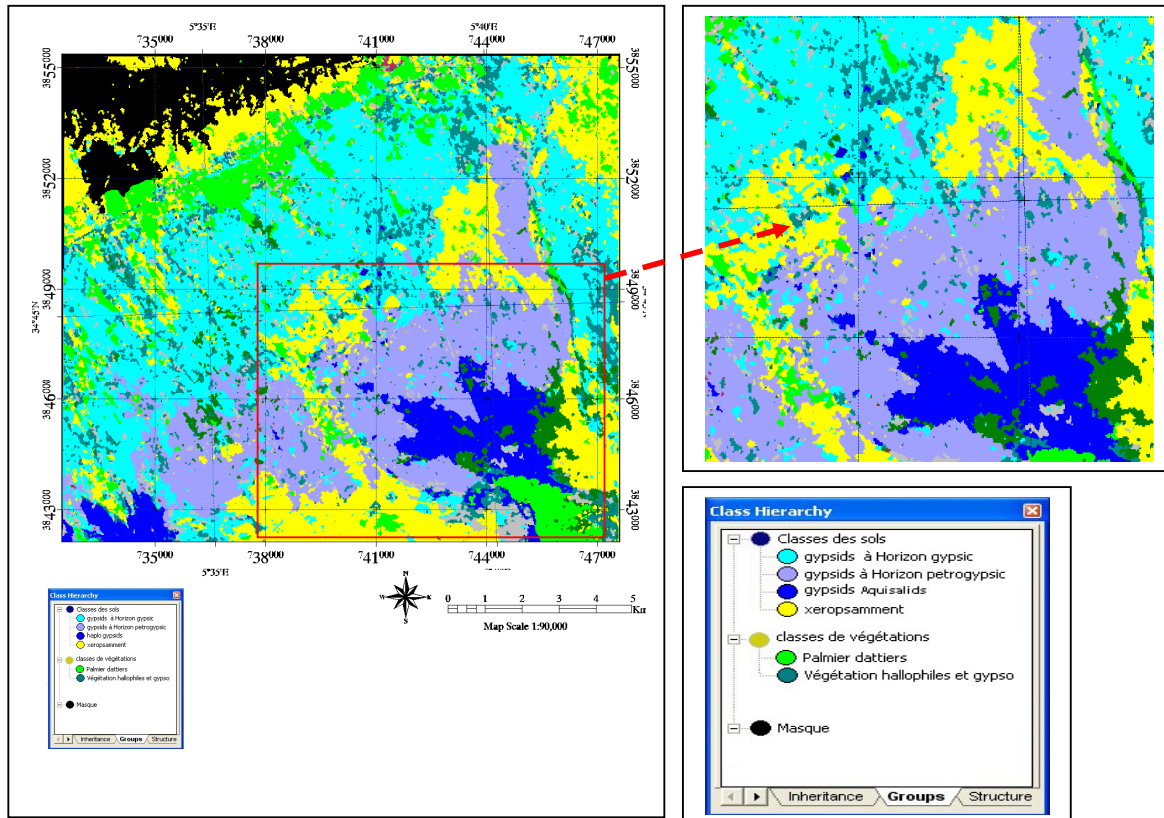


Figure 104 Classification orienté objet des images segmentation à 15 m

5.1.1.2 Évaluation du taux de précision (le coefficient Kappa)

Les cartes issues des classifications de cette partie ainsi que les matrices de confusion sont disponibles en annexe. Les coefficients de précision Kappa (tableau) sont calculés par l'intermédiaire des matrices de confusion (tableau 25). Les coefficients kappa 93 %, 86.71 % et 85 % sont corrects.

Tableau 25 Estimation du % de précision (Kappa) pour les différentes classifications appliquées.

Classification d'images par	(ETM ⁺ + Pan) à 15 m
Orienté objet (K Nearest Neighbor et segmenté à 10 %)	86.71
Orienté objet (K Nearest Neighbor et segmenté à 15 %)	93
Orienté objet (K Nearest Neighbor et segmenté à 30%)	85

Si l'on s'attarde sur les résultats présentés dans le tableau 26, on s'aperçoit cependant qu'il serait opportun, pour ce type d'image fusionnée et segmentée de se limiter au niveau 15 %.

Tableau 26 Matrice de confusion des états de surfaces de sols classés de l'image ETM+ fusionnées à 15 m par la méthode Orienté objet (K Nearest Neighbor et segmenté à niveau 15) avec un indice Kappa = 0.93

Vraies catégories de terrain classes	Classificateurs					Total
	1	2	3	4	5	
1. Typic calcigypsids	3386	227	368	0	0	3981
2. Typic petrogypsids	444	1958	0	187	0	2589
3. Xeropsamments	173	16	2523	0	0	2712
4. Petrogypsic Aquisalids	253	285	51	1356	123	2068
5. palmier dattiers "Phoenix dactylifera "	0	36	0	342	907	1285
Total	4256	2522	2942	1885	1030	12635

La matrice de confusion (tableau 26) montre également qu'il y a eu des confusions pour l'ensemble des classes définies. Les sols gypseux se confondent majoritairement avec les xeropsamment et les Petrogypsic Aquisalids.

5.1.2 Comparaison des résultats

La comparaison visuelle des deux cartes permet d'ores et déjà de rendre compte des similitudes et des différences entre les résultats des deux classifications. Concernant les classes de sols, la classification sur des images segmentées à 10 % permet de très bien délimiter des éléments fins du paysage (comme le réseau hydrographique, routes, palmeraies), mais cela crée un grand nombre de segments, ce qui crée beaucoup de classes et ainsi des confusions. Aussi, la classification sur des images segmentées à 30 % présentait des dissimilarités des segments très grands. Cette dernière présente quelques difficultés pour l'identification des Petrogypsic Aquisalids avec dépôt en surface d'efflorescences salines localisées au niveau des Typic calcigypsids, qui est due probablement à leurs réflectances proches. Par contre, d'autres classes de Typic petrogypsids sont difficilement observables et délicates dues aussi à leurs extensions qui longent l'oasis.

Les résultats des deux matrices de confusion des images segmentées à 10 et de 30 % sont de qualité moindre que celles qui sont obtenus par la segmentation à 15%.

5.1.2.1 Analyse de la matrice de confusion réalisé sur la base de la segmentation à 15 %

Cette matrice montre que la classification est de très bonne qualité (kappa = 0.93). Cela s'explique par les bons résultats que la validation se fait sur la base des mêmes critères de photo-interprétation que ceux qui ont servi à la classification. En analysant les résultats de la matrice de confusion classent par classes, on remarque que les plus fortes imprécisions ont lieu entre la classe " sols gypseux à horizon gypsic ou Typic calcigypsids, " et la classe "sols gypseux à horizon petrogypsic ou Typic petrogypsids ". Cela s'explique par le fait que l'attribution de certaines surfaces à une des deux classes n'est pas vraie, que ce soit spectralement que par photo-interprétation, ses erreurs peuvent être dues, en partie, à la

segmentation qui a formé quelques objets mixtes de ces classes de sol très proches.

5.1.2.2 Comparaison des surfaces de sols en ha et en %

Le diagramme de la figure 105, réalisée à partir du tableau 27, montre qu'en matière de surfaces, la classification des sols réalisés sur des images segmentées à 15 % est satisfaisante comparée à celle de 30 %. Les classes de sol présentant le plus de différences sont les sols gypseux à horizons gypsic avec un écart de 7.01 % soit 7.752 ha, ensuite les sols gypseux avec horizons petrogypsic (2,71 % soit 7.18 ha), et dans une moindre mesure les sols Xeropsammets (6.03 % soit 13.161 ha) et petrogypsic Aquisalids avec 0.357 ha soit 2.12 %.

Tableau 27 Analyses thématiques de la classification orienté objet des images fusionnées à 15 m et segmentées à 30, 15 et 10 %.

THEMES	SURFACES (HA) Des images fusionnées à 15 m et segmentés à 30 %	En %	SURFACES (HA) des images fusionnées à 15 m et segmenté à 15 %	En %	SURFACES (HA) des images fusionnées à 15 m et segmenté à 10 %	En %
1	78.591	19.78	86.343	26.79	80.8095	22.78
2	33.048	8.31	49.929	15.49	44.625	12.58
3	33.1755	8.35	46.3365	14.38	35.037	9.87
4	34.221	8.61	34.578	10.73	33.762	9.51
5	18.207	4.58	23.1285	7.17	24.429	6.88
Total	397.2425	100	322.1925	100	354.6625	100

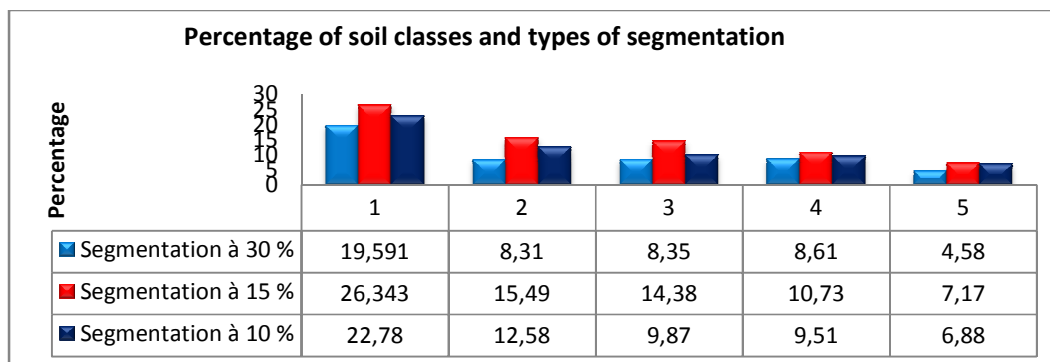


Figure 105 Pourcentage des classes de sols par type de segmentation suivie de la classification

Conclusion de la 1ère partie

Notre travail montre combien il est important, avant d'utiliser les données de la télédétection, d'en bien connaître les possibilités qu'offre cette dernière d'une part, et les limites difficiles à surmonter d'autre part, et de bien assimiler les notions de base sur le rayonnement électromagnétique avant d'envisager les applications.

Le choix d'images s'est guidé vers l'utilisation celles du satellite LANDSAT 7. En effet, ce dernier répond le mieux à l'étude par leurs qualités de perceptions, leur finesse de résolution spatiale et spectrale. Les images de LANDSAT 7 couvrent de vastes zones comme c'est le cas du bassin versant d'oued Djedi. Une scène de LANDSAT est l'équivalent de 18 images Spot et des centaines de photographies aériennes classiques de l'INCT⁸.

La télédétection est une source d'information précieuse puisqu'elle est l'une des rares qui puissent procurer actuellement des informations exhaustives et diachroniques, permettant ainsi :

- *De donner une vue d'ensemble, mise à jour régulièrement, au moyen des unités de paysage sur de vastes étendues (ce qui prend tout son intérêt quand les accès sont difficiles) ;*
- *De minimiser le coût des investigations de terrain (meilleur choix des sites a observé, réduction du nombre de campagnes de sondage au sol, gain en temps et en moyen, ...etc.) ;*
- *De s'affranchir du problème de disponibilité et d'homogénéité de l'information ; Elaborer différents types de cartes.*
- *Pour cette raison, les informations collectées par télédétection sont de plus en plus souvent prises en compte dans les systèmes d'information géographiques.*
-

Rappelons que l'objectif majeur de cette partie de notre étude est de localiser les sols gypseux par télédétection spatiale des images ETM+ de Landsat 7 et mesures sur terrain, on utilisant plusieurs traitements d'images. Le résultat nous a permis de faire l'inventaire des grands ensembles des sols et voir leur répartition spatiale.

Les images sont comparées les unes aux autres sur le site d'étude. Nous comparerons les résultats des classifications par pixel et orienté objet issu des images multi spectrales de 30 m et fusionnées à 15 m. Quelle que soit l'image, on obtient des classifications très satisfaisantes pour l'ensemble des classes. Nous avons rencontré, des difficultés à distinguer les sols gypseux entre eux, dues aux similarités spectrales et texturale entre certains gypsids et les Xeropsamments ont entraîné des erreurs de classification.

Les gypsids sont très bien identifiés avec les deux images (30 m et 15), mais, sont cependant largement surreprésentés à partir des images classées par pixels de 30 m et 15. Elles sont satisfaisantes concernant gypsids, à partir des images fusionnées à 15 m. En revanche les résultats issus des images de 30 m sont médiocres. Comme nous l'avons expliqué précédemment, les sols gypseux se confondent avec les autres classes de sols. Si maintenant

⁸ Institut National de cartographie et de télédétection

nous nous penchons sur les résultats des classifications orientées objet des images fusionnées à 15 m de niveau 15 %. Les résultats obtenus pour les gypsids à horizon gypsic et à horizon petrogypsic sont satisfaits. Les deux classes sont bien mieux classées qu'avec les images (de niveau 10 et 30 %). Avec les images fusionnées et classées par classifications orientées objet au niveau de 15 % on remarque que les taux de confusion diminuent. Les sols gypsids à horizon pétrogypsic sont mieux identifiés. Il serait opportun pour ces classes de rester au niveau 15 %. Les résultats semblent meilleurs.

***Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA
DISTRIBUTION SPATAILE DU GYPSE***

***SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE
SOL ET SA RELATION AVEC LE MILIEU PHYSIQUE***

***Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA
DISTRIBUTION SPATAILE DU GYPSE***

Chapitre 1.

***MODELISATION NUMERIQUE
DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATAILE DU GYPSE***

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

1 INTRODUCTION

Etre en mesure de localiser les variations des différentes formes de gypse (croûte et encroûtement) dans le sol revêt une grande importance afin de mieux comprendre et de prévoir les programmes de mise en valeur des terres, dont les impacts sont importants en agriculture et en environnement surtout en régions arides. Pour ce faire, il faut organiser la meilleure stratégie de prospection et d'échantillonnages des sols pour optimiser les coûts, le temps de travail et la qualité des données acquises, afin d'obtenir une bonne représentation de la variabilité spatiale des différentes formes du gypse dans la zone étudiée. Les développements technologiques ont conduit au développement de systèmes d'information géographiques (SIG) permettant de réaliser à base de bases de données pédologiques et autres (piézométriques,..) des cartes de haute précision. Raccordés aux logiciels de statistique et de géostatistique, ces SIG permettent à l'utilisateur de modéliser les structures d'organisation spatiale par l'analyse variographique et de prédire par interpolation spatiale par krigeage la distribution des formes de gypses et ainsi affiné et augmenté la précision des cartes issues par télédétection (partie I). Afin d'avoir une vision globale de la distribution du gypse et son comportement dans la zone d'étude, une analyse statistique descriptive suivie d'une analyse en composantes principales et d'une classification par réseaux de neurones artificiels (ANN) a été effectuée.

Les méthodes statistiques et géostatistiques combinées aux outils SIG constituent des moyens rapides, fiables et quantitatifs pour l'étude et l'interprétation de la relation qui peuvent exister entre la répartition du gypse et le milieu physique. Plusieurs travaux (**Cassel et Bauer, 1975; Delhomme, 1979; Viera et al., 1981; Gremingeret al., 1985**) démontrent qu'en réalité les propriétés des sols varient selon leur position dans l'espace et aucune propriété pédologique ne puisse prendre qu'une seule valeur à travers toute une unité de sol. Ces remarques sont à l'origine du développement du concept de variabilité spatiale.

1.1 CONCEPT DE VARIABILITE SPATIALE

Si l'approche de la statistique classique considère que chaque mesure d'un paramètre est indépendante de celles qui l'entourent. On présume alors qu'il n'y a pas dans le sol, de structure pouvant permettre de corrélérer les mesures, entre elles, sur certaines distances. En revanche, l'approche géostatistique se fonde sur le principe que la variabilité d'une série d'observations est structurée (**Journel et Huijbregts, 1978**). La valeur de la propriété est alors définie par sa position dans l'espace par rapport à la structure de la variabilité. Cette hypothèse, de la variabilité structurée, est la différence fondamentale entre la géostatistique et l'approche de la statistique classique, où l'on considère l'arrangement d'une, propriété, dans le sol comme étant tout à fait aléatoire.

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

1.2 NOTION D'ECHELLES SPATIALES

La répartition spatiale des sols d'une manière générale est conçue par les variables dominantes, c'est-à-dire le climat, le substrat géologique, le matériau parental, les paysages, l'occupation des sols et la topographie (**Legros, 2007**). Cette répartition s'articule autour de deux échelles spatiales : l'échelle locale et l'échelle régionale. L'approche des processus locaux permet de souligner les mécanismes de distribution et de déterminer les facteurs de contrôle à savoir la morphologie qui peut fournir déjà des quantités de renseignements concernant les constituants, l'état de ses constituantes et certaines propriétés physicochimiques du sol.

L'approche des processus régionale permet de définir le concept de pédopaysage (**Girard, 1972 ; Robbez-Masson et al., 1991 ; Jamagne et al., 1993 ; Robbez-Masson, 1994 ; Gaddas, 2001, CCTG, 2005**). Un pédopaysage¹ est des portions de paysages dans lesquelles les facteurs de pédogenèse paraissent homogènes, est qui est prédéfinis à partir des caractéristiques géologiques, topographiques et d'occupation des sols (**Beaudet et al., 1967 ; Stengel et Gelin, 1998; Badraoui et al., 2000 ; INRA, 2005**). D'après **Duchaufour, (2001)**, la pédogenèse est contrôlée en partie par des facteurs bioclimatiques, c'est-à-dire le climat général d'une région et la végétation qui lui est étroitement liée mais aussi par des facteurs de stations conditionnée par le relief, le matériau d'origine et le drainage local. À notre échelle, les facteurs de stations sont les plus intéressants à prendre en compte.

1.3 MATERIELS ET METHODES

1.3.1 Les données utilisées

Notre travail s'est fondé essentiellement sur les images satellite ETM+ de LANDSAT 7 (partie I), de la carte topographique (E=1/ 50000), un Modèle Numérique d'Altitude (Aster), la carte géologique et hydrogéologique (E=1/200 000), ensuite sur les données des différents sondages et profils pédologiques réalisés dans la région d'étude.

1.3.1.1 Le Modèle Numérique d'Altitude ou d'Élévation

Le Modèle Numérique d'Élévation (MNÉ) se définit comme une représentation tridimensionnelle (3D) du territoire. Il fait référence aux valeurs d'élévations, il peut s'agir de valeurs discrètes (points/pixels) ou des valeurs prédites par interpolation (**Moore et al., 1991**). Le MNÉ est un sous-ensemble du modèle numérique de terrain (MNT) qui, lui, est une représentation spatiale des attributs du terrain (pente, orientation, etc.) (**Bell et al., 1995 ; Moore et al., 1991**). Le relief est une élément-clé dans les études liées à l'environnement

¹ **pédopaysage** : ensemble de plages cartographiques semblables par les caractéristiques de la couverture pédologique et des éléments paysagiques. Un pédopaysage est ainsi constitué d'unités typologiques de sol (UTS) regroupées sur des éléments paysagiques tels que la géomorphologie, l'hydrologie, le matériau parental, le substrat et éventuellement l'occupation du sol (**Legros, 1996**).

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

(Gunie, 2002). Les caractéristiques du relief et la géomorphologie, représentées par les MNE, permettent de déterminer des paramètres descriptifs de l'environnement, pouvant être utilisées dans les analyses des états de surface. En effet, « les MNE sont porteurs de la géomorphologie du terrain et peuvent donc renseigner l'espace hydrographique » (Puech, 2000) sur ces grandes structures (crêtes, limites de bassin, cheminement de l'eau), mais aussi sur les éléments locaux du relief (convexité et courbure de la pente, etc.).

1.3.1.1.1 L'image ASTER et un Modèle Numérique d'Élévation (MNE)

Partie intégrante du programme ASTER ("Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer"), le GDEM (Global Digital Elevation Model) ASTER est un Modèle Numérique d'Élévation (*MNE*²) qui couvre le monde entier (entre 83° Nord et 83° Sud) (figure N°106). Il est coproduit par le MITI (ministère de la recherche japonais) et la NASA (Cornet., 2011).

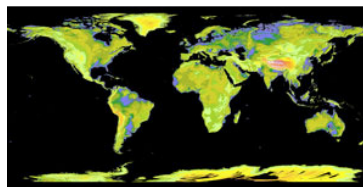


Figure 106 - MNE (ASTER GDEM V1) du Monde.

1.4 DEMARCHE

La modélisation numérique des données relatives au milieu physique (à la topographie, à la géologie et aux niveaux piézométriques, ainsi que, les données de sondages disponibles) a été réalisée à travers la mise en place d'une base de données cartographiques et attributaires sous un SIG.

La démarche suivie consiste en la conversion des différents types de cartes (papier) disponibles en format numérique par scénarisation puis par digitalisation.

La démarche méthodologique globale (figure N°107) comporte les étapes suivantes:

A. Première étape « gestion des données »

- a. la collecte des informations concernant le site d'étude (données images, topographiques, géologiques, physicochimiques, etc.) ;
- b. la numérisation des différents types de cartes scannées recueillies et l'élaboration des différentes couches d'information;
- c. le géoréférencement des cartes au moyen du logiciel ArcGIS ;

² Ce *MNE* gratuit à une résolution de 1 seconde d'arc soit environ 30 mètres à l'équateur. Il a donc une résolution 3 fois plus fine que celle du SRTM. Sa distribution est faite en GeoTiff de 1° x 1° en WGS84.

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

- d. l'intégration des données alphanumériques ;
- e. l'élaboration d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et les différentes cartes connexes pente, exposition, concavité-convexité, etc.

B. Deuxième étape « exploitation de l'information cartographique sous SIG »

Pour rechercher les caractéristiques pédologiques en un point sous SIG, nous pouvons procéder de nombreuses façons (Dersigny, 1988) : i) Extraire les caractéristiques de l'unité cartographique contenant ce point par des requêtes spatiales ; ii) demander les caractères du sondage ou profil le plus proche par des requêtes attributaires ; iii) ou effectuer des croisements par calcul sur la base des points d'observation appartenant à l'unité ; iv) ou bien procéder par interpolation spatiale au moyen de l'analyse géostatistique du champ d'observations (krigeage).

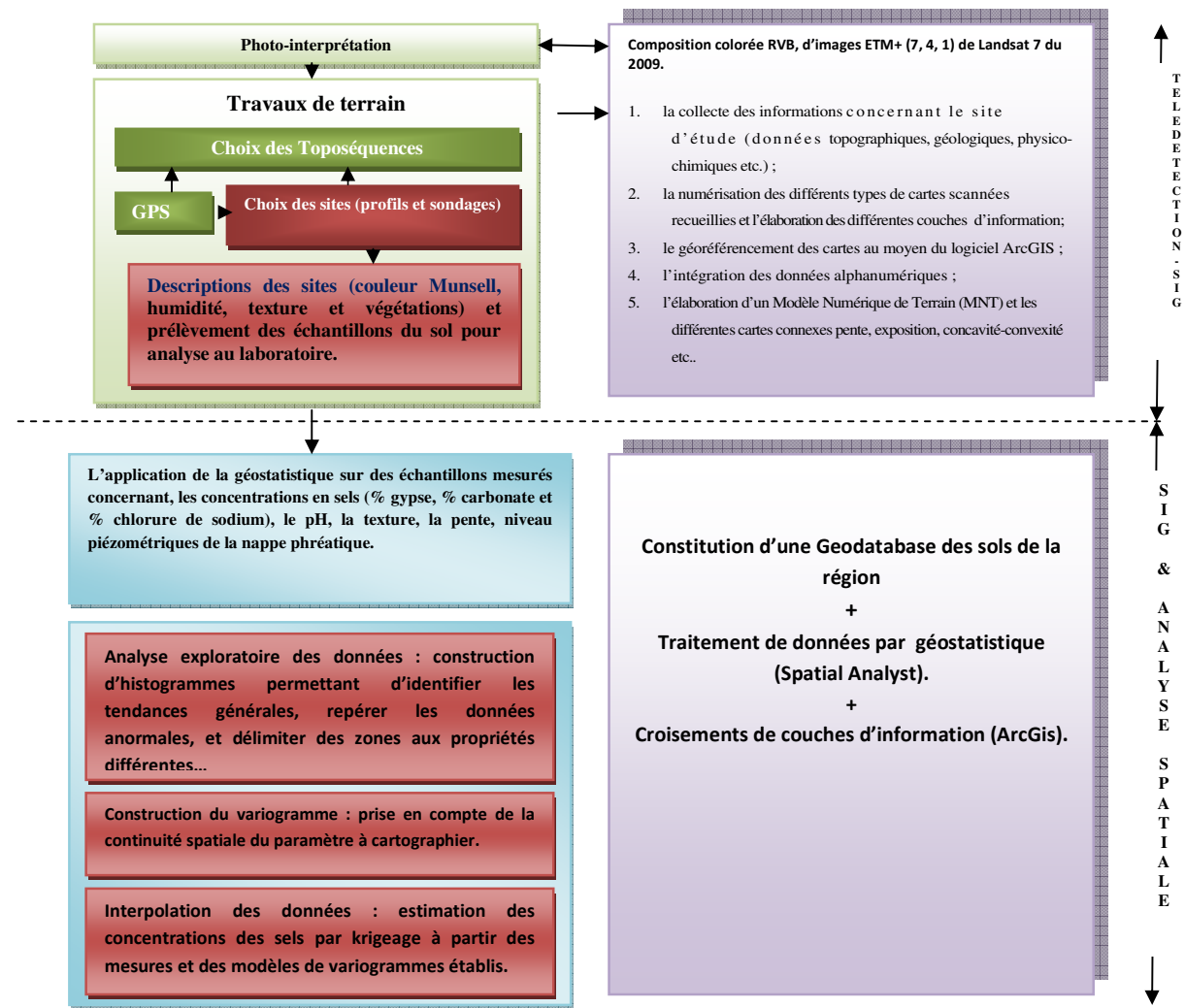


Figure 107 Les principales phases du travail

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

1.5 LES COMPOSANTES DU MILIEU PHYSIQUE

1.5.1 La carte d'occupation du sol

Les images satellitaires offrent la possibilité de mesurer et de suivre de manière systématique à différentes échelles spatiale et temporelle l'état de couverts végétaux et l'activité des travaux agricoles. Parmi les différentes informations que l'on peut extraire des images satellitaires, les indices de végétation, construits par combinaison des valeurs de réflectance dans les longueurs d'ondes liées aux caractéristiques spectrales de la végétation, sont les plus utilisés, suivis par des classifications supervisées des observations in situ (figure N°108).

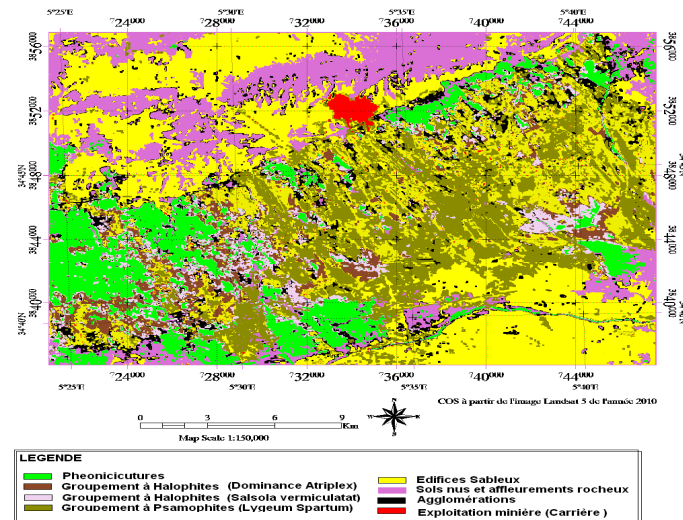


Figure 108- Carte d'occupation du sol de la région d'étude

1.5.2 La géologie de la région d'étude

D'après les études faites par **Laffite, (1939), Kouskov, (1962) et Chabbah, (2007)**, la géologie de la région est occupée par une formation dite « deb deb » qu'on peut rapporter au quaternaire moyen, représenté par plusieurs niveaux de glacis encroûtés (gypse et calcaire) mais dont le dépôt se poursuit sans doute encore de nos jours (**Pouget, 1989**). Le « deb deb » représente une formation calcaréo gypseuse atteignant jusqu'à deux mètres d'épaisseur. Il est localisé tout au tour de l'oasis de TOLGA et des oasis limitrophes, au-dessus des affleurements calcaires blancs de l'Éocène inférieur (figure N°109). Au sud de TOLGA, BOUCHAGROUN, LICHANA et jusqu'à AIN BENELOUI, le « deb deb » repose sur un dépôt sablo-argileux atteignant parfois 50 m d'épaisseur. Ce dépôt doit son origine en grande partie à la fixation des sables éoliens et dunaires par les eaux exsudantes des fissures dans le substratum Eocène et Crétacé.

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

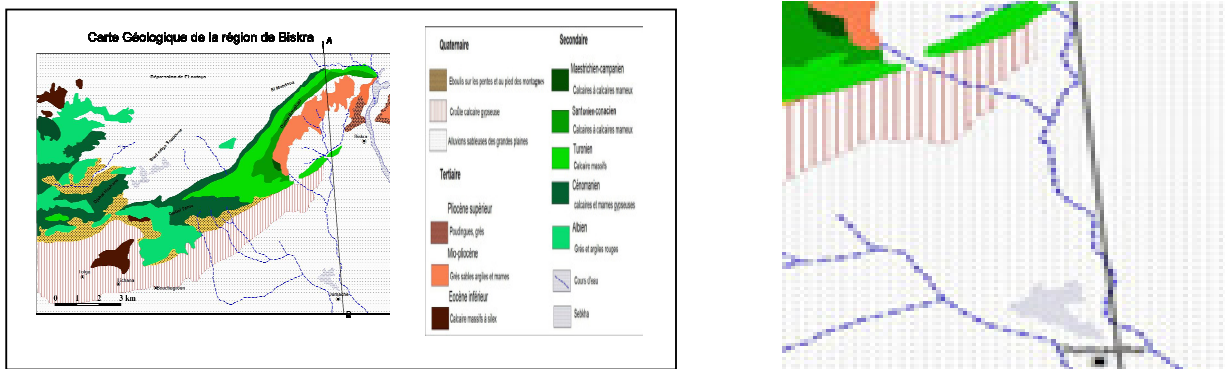


Figure 109- carte géologique du sous bassin versant d'Oued Djedi à Gauche et de la région d'étude à droite (EMRH 1979)

1.5.3 Carte hydrogéologique

1.5.3.1 La Lithologie

La connaissance de la géologie de notre sous-bassin versant s'avère importante pour cerner l'influence des caractéristiques physiographiques. La géologie du substratum influe non seulement sur l'écoulement de l'eau souterraine mais également sur le ruissellement de surface. Dans ce dernier cas, les caractères géologiques principaux à considérer sont la lithologie (nature de la roche-mère) et la structure tectonique du substratum. L'étude géologique du sous-bassin versant dans le contexte hydrologique a surtout pour objet de déterminer la perméabilité du substratum (figure N°110). Celle-ci intervient sur la vitesse de montée des eaux et sur leur volume des nappes souterraines. Notre sous-bassin versant a par endroits un substratum imperméable (au centre) et a substratum perméable dans le reste du périmètre. Néanmoins, le substratum imperméable peut absorber une certaine quantité d'eau à travers les fissures des formations rocheuses altérées. Pour ces dernières, après la dissolution de certains éléments aide à la leur migration dans les parties souterraines.

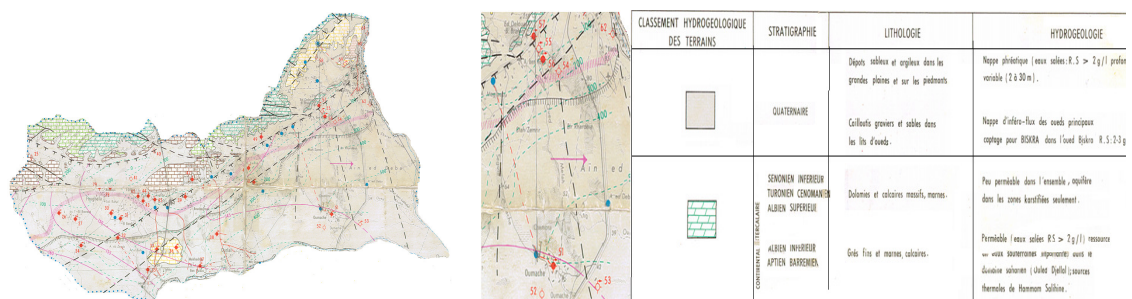


Figure 110- carte hydrogéologique du sous bassin versant d'oued Djedi (extraite de la carte hydrogéologique de Biskra à gauche et de la région d'étude à droite : établie par ANRH d'Alger, 1979)

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

1.5.4 Les cartes issues par traitements du MNE

Le MNE ou DEM Aster (*Digital Elevation Model*) est gratuit a une résolution de 1 seconde d'arc soit environ 30 mètres à l'équateur. Sa distribution est faite en GeoTiff de 1° x 1° en WGS84. Il prend en compte le relief (figure N°111).

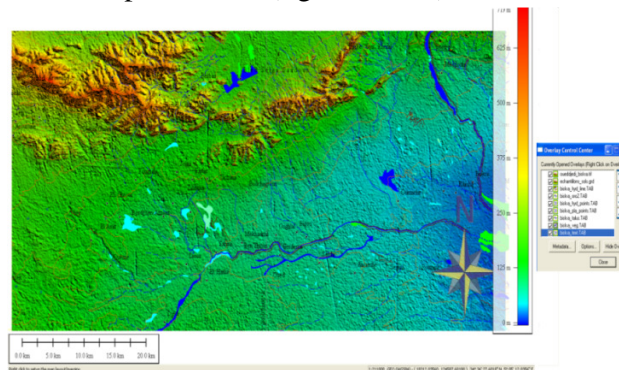


Figure 111- MNE (Aster) du sous bassin versant d'Oued Djedi

1.5.4.1 La topographie

La topographie fait référence aux caractéristiques géomorphologiques de surface du relief (**Aronoff, 1995**). D'un point de vue géomorphologique, la topographie (le paysage) est une association de reliefs individuellement transformés au cours de son processus d'évolution (**Ovalles et Collins, 1986**).

L'étude de la variable topographie expliquerait une bonne partie de la variabilité spatiale des propriétés de sols, en raison de son influence sur le régime hydrique des sols (**Timlin et al., 1999 ; Deguise et Mcnairn, 2000 ; Wang et al., 1996**), transport des intrants (sels) et sur la dynamique des processus érosifs.

La variabilité spatiale de la topographie peut être représentée en 3D par un MNÉ obtenu à partir d'une matrice présentant les élévations (**Bell et al., 1995**) (figure N°112).

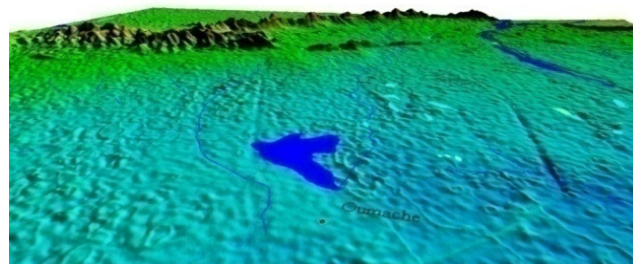


Figure 112- Représentations d'un MNE de la région d'étude en 3 D sous différents angles d'observation.

Le tableau ci-dessous (Tableau N°28) résume les caractéristiques physiographiques de la zone d'étude.

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

Tableau 28- caractéristiques physiographiques de la zone d'étude.

Zone d'étude	Surface en (Km ²)	Périmètre en (Km)	Altitude max et Min en (m)	Exposition dominante
	1,195.503 Km ²	17551638.	1085 (m) – (-5 m)	S-E

1.5.4.2 Cartes d'Altitude, pente et orientation

Quatre variables quantitatives caractérisant l'altimétrie des zones d'étude ont été extraites des MNE (Aster) grâce au logiciel Global Mapper et ArcGis: l'altitude, la pente, l'orientation et la courbure. Ces variables ont été choisies pour leur influence potentielle sur la distribution spatiale des sols gypseux. L'altitude est la variable de base, elle influe fortement sur la distribution des sols gypseux, car le climat (pluviométrie moyenne et la température) conditionne le dépôt de ces formations.

L'inclinaison de la pente ainsi que son orientation ont un impact significatif sur les facteurs affectant la formation du sol et le développement du réseau hydrographique (**Bourenane et al., 1996, Khakural et al., 1996**) et l'orientation détermine la direction de l'écoulement. En ce qui a trait à la courbure, elle permet, d'une part, d'identifier les zones d'accumulation ou de pertes en eau et en sédiments, lesquelles affectent directement les propriétés physicochimiques du sol (**Gessler et al., 2000**).

1.5.4.2.1 Carte d'Altitude

1.5.4.2.1.1 L'élément majeur de l'altitude et le relief

Le relief est l'élément qui modifie le plus sensiblement la distribution du gypse, car il est en relation avec le climat. À l'échelle d'une toposéquence, cet effet paraît évident, piedmont, glacis, plateaux, ou encore cuvette possède un comportement particulier (figure N°113).

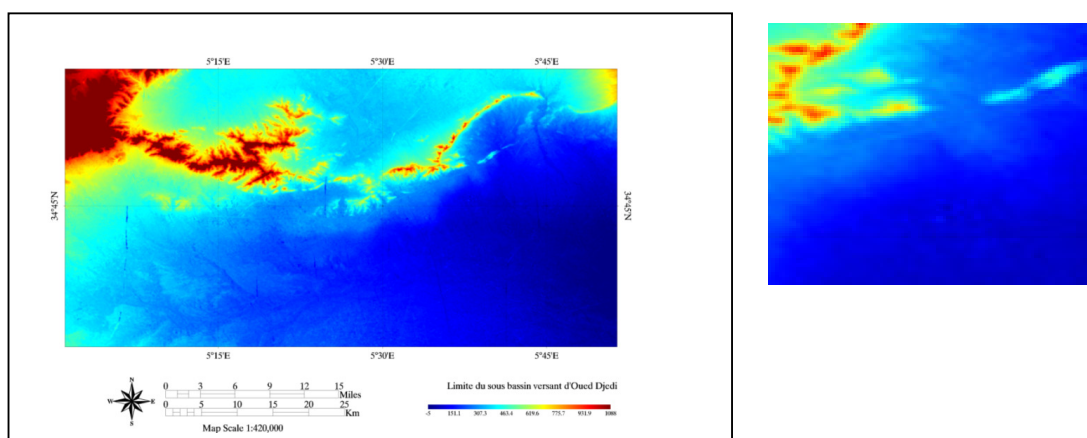


Figure 113- Carte d'Altitude du sous bassin d'Oued Djedi. Source du MNE (Aster).

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

L'altitude pour la zone d'étude est comprise entre 0 et 670 m.

1.5.4.2.1.2 Cartes des pentes et des expositions

La pente a été calculée pour chaque maille du MNE (30 m). Les pentes de ce bassin versant sont très peu marquées : Elles atteignent fréquemment 5 % entre les piedmonts et la sebkha (figure N°114).

On constate que la pente s'accroît légèrement en milieu de versant, puis diminue à nouveau vers l'aval. Ces variations entraînent une rupture de pente qui sépare des formes convexes dans la partie supérieure du versant (pentes s'accroissant vers l'aval) et des formes concaves dans sa partie inférieure (pentes diminuant vers l'aval).

La pente pourrait être un indicateur à la fois de la température et /ou l'évaporation (car liée à l'altitude) et de l'humidité (car elle influe sur l'écoulement des eaux de pluie). L'orientation traduit l'exposition au soleil et aux vents (figure N°115). Comme l'exposition au soleil reflète également les conditions de températures d'évaporation et d'humidité.

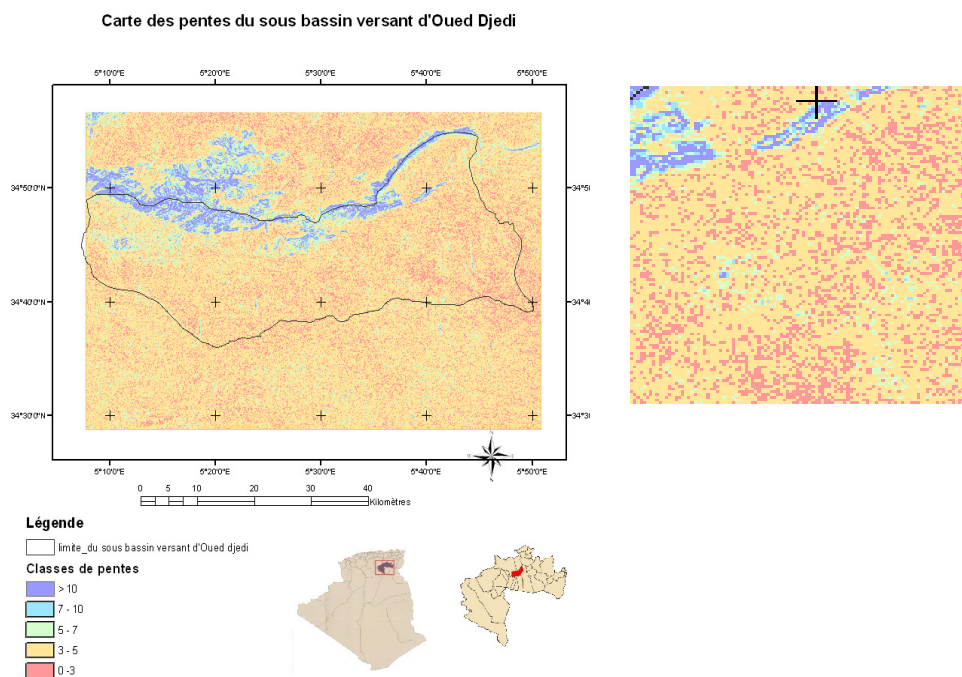


Figure 114- carte des pentes du sous bassin versant d'Oued Djedi à gauche et de la région d'étude à droite

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

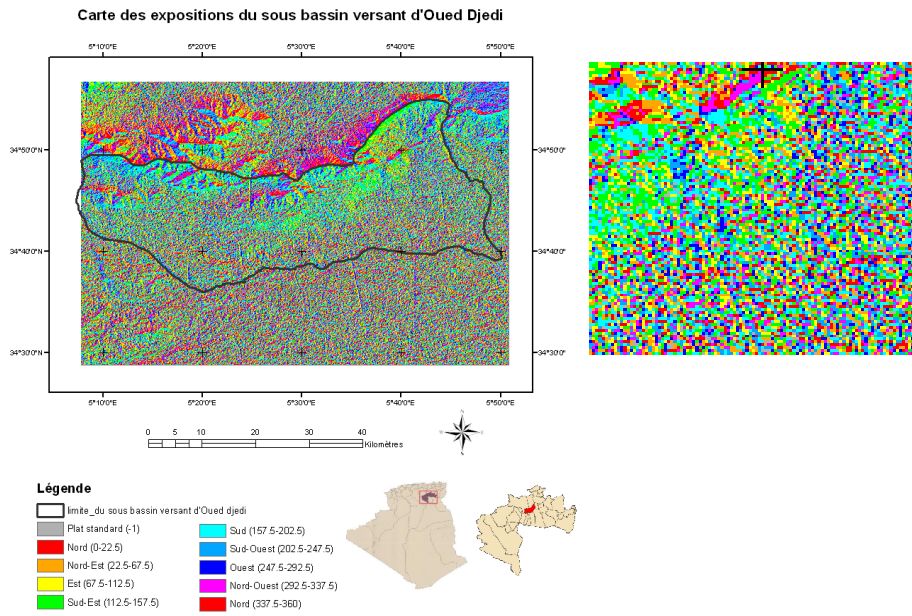
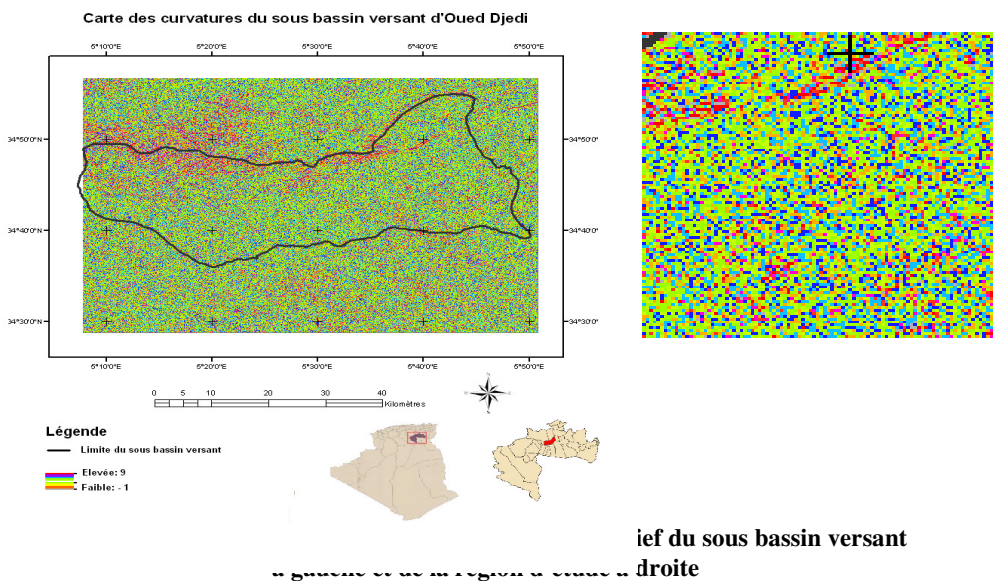


Figure 115- carte d'expositions du sous bassin versant à gauche et de la région d'étude à droite

1.5.4.2.1.3 Carte de Concavité et la convexité du relief

La figure N°116, montre d'abord un passage de formes convexes-planes à la forme concave en milieu du versant, ce qui permet de retrouver la première rupture de pente identifiée sur le profil en long. Il révèle également l'existence d'une étroite bande convexo-plane qui se situe au sein de la zone concave aval. Cette bande, qui ceinture l'axe de drainage sur l'ensemble du bas de versant, correspond à la deuxième rupture de pente identifiée sur le profil en long



Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATAILE DU GYPSE

1.5.4.2.1.4 Carte du réseau hydrographique

L'écoulement général des eaux superficielles se produit d'est en ouest à travers un réseau hydrographique peu ramifié, ménageant de vastes interfluves mal drainés (figure N°117).

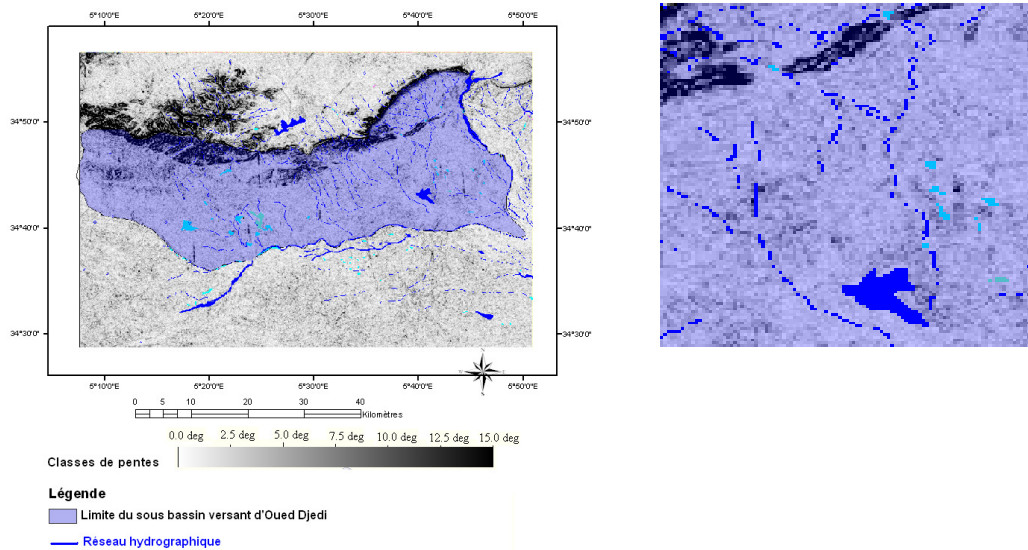


Figure 117- Réseaux hydrographiques du sous bassin versant à gauche et de la région d'étude à droite

1.5.4.2.1.5 Carte du niveau piézométrique

La carte piézométrique (figure N°118) montre un sens générale d'écoulement se dirige du Nord-ouest vers le Sud-est (région du Chott Melghir).

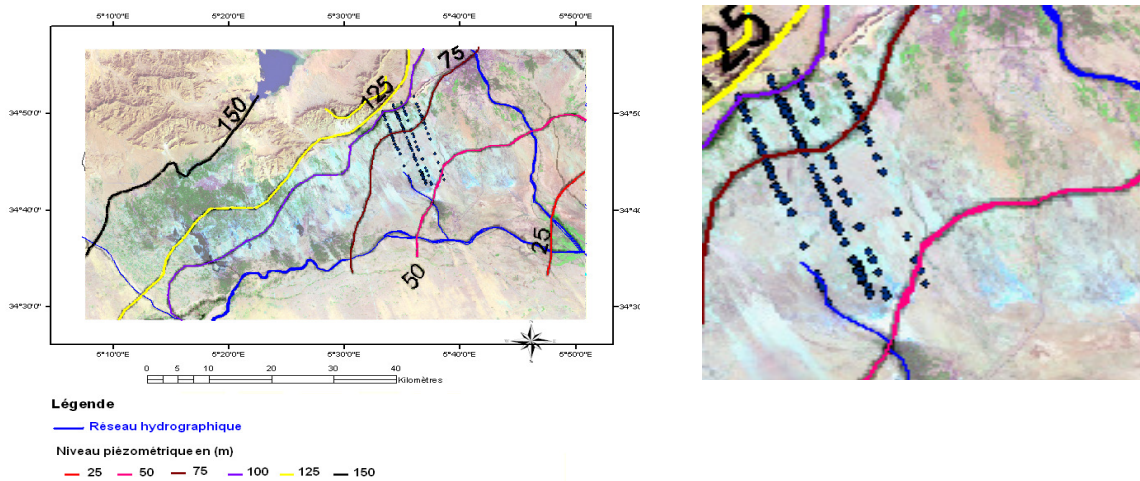


Figure 118- niveau piézométrique du sous bassin versant à gauche et de la région d'étude à droite l'ANRH de Biskra (inventaire 2008)

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

1.5.5 La segmentation Géomorphologique

La morphologie d'une région est la résultante de l'action des différents facteurs climatiques, géologiques, biologiques (végétation) et anthropiques (**Goddard et al., 1996, Bourennane et al., 1996**). Sur le plan géomorphologique, la région d'étude est un exemple caractéristique de relief du quaternaire. Il se définit géologiquement par une prédominance d'épaisse couches de marnes et de gypses. Ces actions se sont déroulées tout au long du quaternaire, provoquant l'érosion en amont, le transport des matériaux arrachés et leur dépôt à l'aval. Ainsi, le modelé créé du paysage est étroitement lié à la nature des sols et leurs répartitions.

L'étude géomorphologique a été réalisée comme appui à la cartographie des sols. À l'échelle régionale. Le croisement sous SIG (ArcGis) du MNA (Aster), de la carte géologique et topographique, avait conduit à identifier 4 unités géomorphologiques étagées sous formes de 2 glacis emboîtés et une plaine mollement ondulée et une dépression endoréique (Figure N°119).

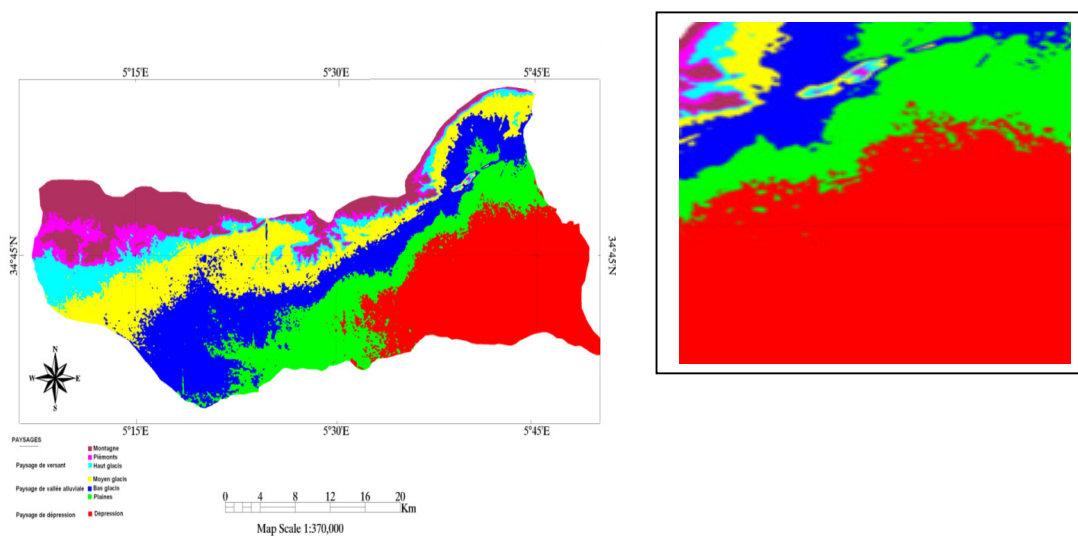


Figure 119 - carte des paysages du sous bassin versant à gauche et de la région d'étude à droite

La géomorphologie est caractérisée par des reliefs sous formes des crêtes du crétacé, au nord de la combe du djebel Boughzel. Au sud, s'étendent les glacis polygéniques qui constituent la transition entre les ensembles telliens et le plateau du désert.

Dans notre zone d'étude, on observe des glacis emboîter en amont, se superpose rapidement vers l'aval avant d'être envoyé dans la dépression.

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

1.5.5.1 Drapping ou superposition de la trichromie ETM + de LANDSAT 7 sur MNA (Aster)

Généré une scène tridimensionnelles en 3 D par superposition de l'image ETM+ de LANDSAT avec le MNA (aster) (figure N°120)

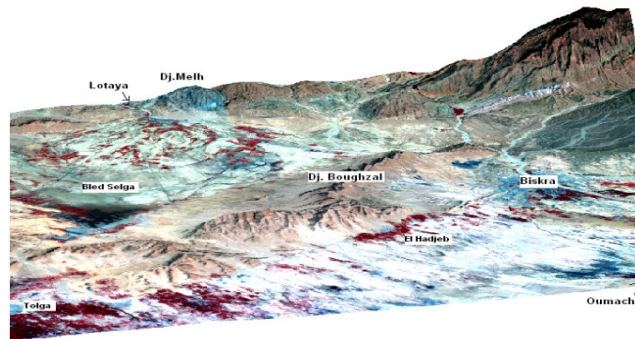


Figure 120- Représentation en 3 D du sous-bassin versant d'oued Djedi

1.6 TYPE DE CARTOGRAPHIE RETENUE

Différentes sortes de cartes thématiques sont susceptibles d'être produites par SIG.

Comme le but de notre travail sera essentiellement axé sur les sols gypseux, les cartes qui seront produites sont donc les cartes factorielles ou mono factorielles. En procédant à une extraction de variables à partir de la définition sémantique des unités pédologiques (exemples : carte du substrat géologique, carte de la classe d'hydromorphie, pH, CE, carte de profondeur du sol... cf. exemple, carte % du gypse de surface et/ où de profondeur).

Les cartes seront établies par des méthodes d'interpolation spatiales « la géostatistique » (variographie et krigeage) sous-systèmes d'information géographique (ArcGis) sur les 107 sondages afin de localiser les formes et le taux de gypse de surface et de profondeur. Les cartes factorielles seront d'un apport considérable pour étudier les relations qui peuvent exister entre les formes et le taux de gypse et les paramètres du milieu physique par compilation de toutes les données sous ArcGis.

1.6.1 Délimitation des unités morpho-pédologiques

La démarche consiste dans un premier temps à observer les paysages (télédétection), à en reconnaître les diverses formes (les modelés) par combinaison des images satellite LANDSAT et le MNA (Aster) sous SIG, suite à ça, on a identifié les grandes unités de modelé (U.M) sur la base des propriétés des sols stables dans le temps (**Doerge, 2000**) comme la couleur du sol, et la topographie. Par la suite, les diverses unités naturelles formées d'une même succession d'horizon dans un contexte pédologique semblable (lithologie, végétation, éléments du modelé) seront délimitées. Les unités naturelles constituent "système sol" selon **Brabant (1989)**, définissent comme étant la succession des sols qui s'étend du sommet d'un

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

versant jusqu'à un bas-fond et faisant apparaître à la fois une variabilité longitudinale, latérale et verticale des sols pour une roche-mère donnée. Ce type de variabilité apparaît souvent dans le paysage comme un motif répétitif qui servira de modèle. Pour déterminer les unités naturelles de sols (le contenu pédologique) et leurs limites (contenant), nous allons réaliser des observations ponctuelles localisables par leurs coordonnées géographiques (longitude, latitude, et altitude) sur terrain. Ces observations vont être effectuées sous forme de sondages à la tarière. Nous proposons par la suite une exploitation de la dimension topographique le transect ou la toposéquence de direction N-S, allant du djebel Bou ghazal à la sebkha d'Oumache. Les observations ponctuelles (sondages et profils) permettront de caractériser des UTS (unités typologiques de sol) quelles sont des « portions de la couverture pédologique qui présentent les caractères diagnostics d'une pédogenèse identique » (**Gaddas, 2001 ; Girard et Girard., 2004 ; INRA, 2005**). La combinaison des attributs de chaque plan d'information sous SIG permet de proposer une qualification des morphopédologie.

Une description détaillée des horizons (limites, paramètres physiques, etc.), ainsi que les résultats d'analyses des échantillons prélevés dans ces horizons vont permettre de définir les processus de formation du sol (lessivage, illuviation, etc.), souvent utilisés ensuite pour les classer suivant les différentes classifications. Pour notre travail, on a retenu la classification américaine (**Soil Taxonomy, 2003**).

À l'issue de ces observations quatre (04) formes morphologiques ont été délimitées et décrites (figure N°121), et à l'intérieur de ces dernières, ont été classés les sols gypseux de surfaces et de profondeur.

L'utilisation des outils de visualisation en trois 3 D dimensions permet d'approcher des notions d'organisation relative des différents éléments de ce paysage dans l'espace sous forme de bloc-diagramme (figure N°122).

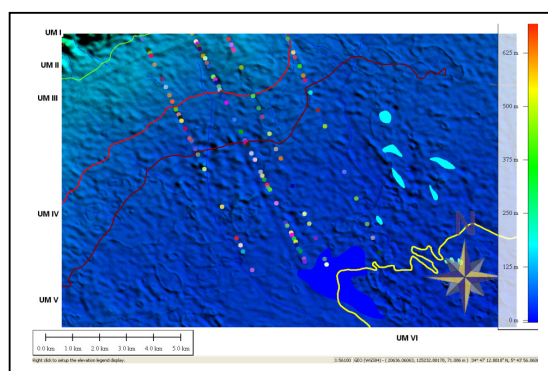


Figure 121- Délimitation des unités morphologiques avec localisation des toposéquences sur un MNA de la région d'étude

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATAILE DU GYPSE

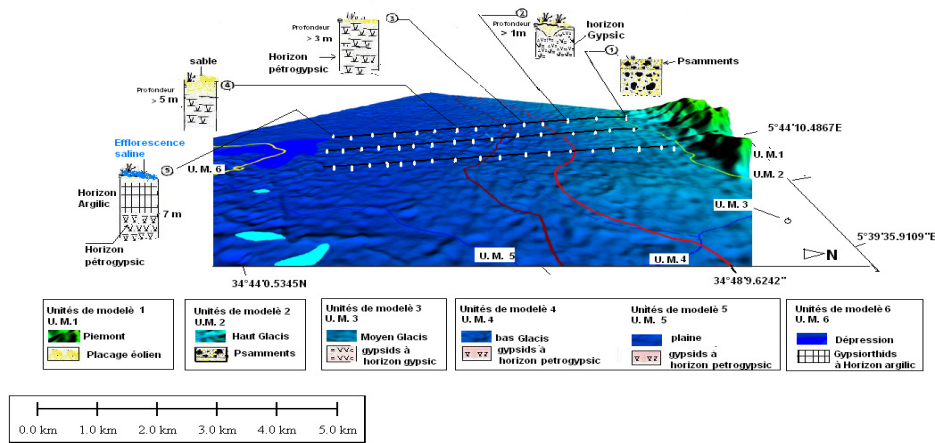


Figure 122- Bloc diagramme de reconnaissance morpho pédologique sur la région d'étude par croisement du MNA et les unités morphologiques du site d'étude.

1.6.2 Segmentation géomorphopédologique

Étude du profil en long d'une toposéquence de 9 Km tracé sur un MNE (Aster) figure N°123 et 124, à l'aide de logiciels Global Mapper.

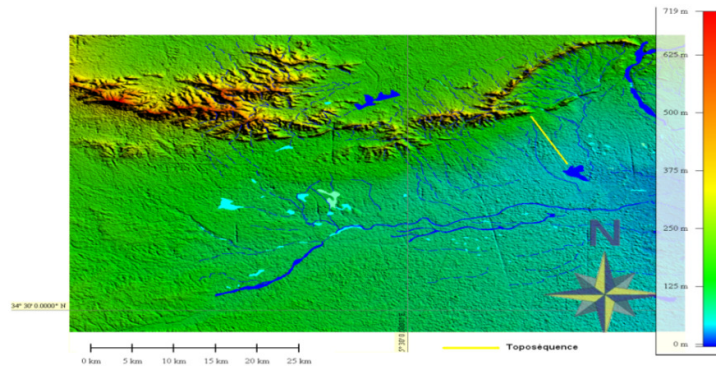


Figure 123 - profil en long tracé sur le MNE (Aster) de la région d'étude

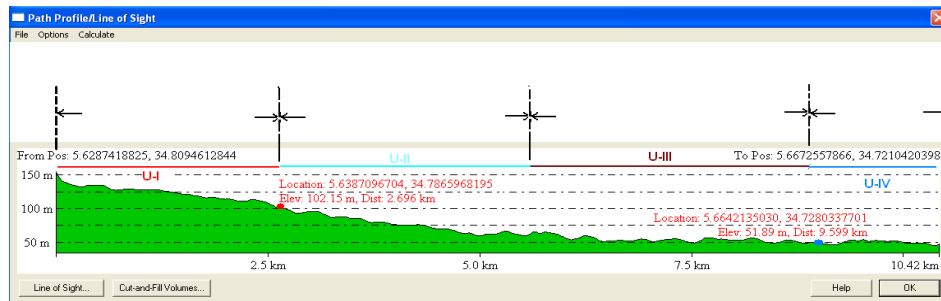


Figure 124- Profil en long A-B

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATAILE DU GYPSE

Sur le profil en long réalisé, on visualise bien deux ruptures de pentes obtenues, à partir du MNA, en reliant les altitudes à la distance à l'exutoire (figure N°124 et tableau N°29).

Tableau 29- Segmentation géomorphopédologique du site et principales caractéristiques des unités topographiques.

<i>Unité géologique</i>	<i>Quaternaire</i>			
<i>Unité de Modelé</i>	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>
<i>Altitude moyenne (m)</i>	<i>550</i>	<i>350</i>	<i>300</i>	<i>150</i>
<i>Modelé-Type</i>	<i>Haut glacis</i>	<i>Moyen glacis</i>	<i>Bas glacis - plaine</i>	<i>dépression</i>

Comme dans toute région, le facteur géomorphologique est d'une grande importance dans l'évolution des sols (Aubert G. 1962). Il est possible de constater une étroite relation entre les sols et la topographie. Généralement, cette relation s'exprime au travers de l'épaississement et de la simplification des profils pédologiques à mesure que l'on se rapproche des talwegs et inversement par l'amincissement et la diversification des profils de sols à proximité des lignes de crête.

Unité 1(U-I): le haut glacis ou glacis de piedmont du quaternaire ou glacis d'accumulation ou glacis d'érosion, généralement recouverte d'une puissante croûte, qui forme l'armature, qui est attribuée au quaternaire ancien et moyen. Cette dernière est recouverte par des dépôts sableux anciens (paléo dunes) alignés en longues collines, perméables bien développés.

Unité 2 (U-II): le profil du versant prend l'aspect d'un glacis convexo plane. Ce niveau de glacis pourrait être le "moyen glacis" du quaternaire moyen et récent, recouvert aussi d'une croûte dure et d'encroûtement auquel sont associés des sols calcimorphes. Le façonnement de ce glacis serait lié à une phase érosive provoquée à la fois par un climat aride et un enfoncement général du niveau de base. Ces glacis du quaternaire ancien supportent des sols calcimorphes à croûtes gypseuses.

Unité 3 (U-III): le profil en long du versant se modifie à la faveur d'une rupture de pente. Pour expliquer l'origine de cette rupture, deux hypothèses différentes sont proposées : Selon une première hypothèse, cette rupture de pente pourrait être associée à une nouvelle phase érosive. Selon une autre hypothèse, il s'agirait plutôt d'un affaissement progressif de la surface topographique par érosion interne (Fritsch et al, 1990 b; Fritsch, 1993). Cette unité porte des sols calcimorphes à encroûtement gypseux.

Unité 4 (U-IV): Elle apparaît à la faveur d'une nouvelle rupture de pente et se localise à proximité de l'axe de drainage qui correspond à une dépression (la sebkha). Cette dépression sert de niveau de base à un réseau hydrographique endoréique ; Sous l'effet du climat aride qui y règne, elles constituent un véritable bassin d'évaporation, un véritable lacs en hiver, qui s'assèche et se couvre d'une couche d'argile pulvérulente en été. À cette dépression, est

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

associé un système de bourrelets éolien qui sont en réalité des dunes en forme de croissant, constituée par des matériaux fins riches en gypses, arrachés pendant la période sèche aux dépressions.

En résumé, le relief de ce versant se serait façonné au cours du quaternaire, à l'occasion d'une série de phases d'érosion successives et de dépôts en aval.

1.7 L'ORGANISATION SPATIALE DES SOLS GYPSEUX

Cette partie du travail consiste donc en une étude de la répartition spatiale de la couverture de sol gypseux, du point de vue de ses relations avec le milieu physique (végétation, modelé, géologie, etc.). Pour définir les limites spatiales des unités reconnues dans la région d'étude, il faut confronter les informations acquises sur le terrain avec l'information fournie par l'outil télédétection. Il existe, en effet, un lien étroit entre les sols, l'origine géologique des matériaux et leur position dans les modelés du paysage (**Gaddas, 1994**). D'après **Aubert, (1962)** l'influence de la position topographique et des conditions géomorphologiques peut encore se faire sentir sur les caractères des sols des zones arides. En effet, l'énergie pédogénétique du climat actuel y est faible. Les caractères hérités de conditions climatiques anciennes ont donc plus de chance de se maintenir; le climat actuel ne peut que difficilement les effacer, sauf certains caractères de répartition ou de qualité de la matière organique, ou, à un moindre degré, certains types de structure. L'ancienne répartition d'éléments solubles, calcaire, gypse, sels alcalins, peut aussi se modifier en fonction des conditions actuelles de pluviométrie et d'évaporation. Elle ne le peut, cependant, que lentement et partiellement. Comme, le sol ne reste humide que peu de temps et son évolution biologique est donc très limitée. Seuls les climats passés ont joué dans l'évolution des sols en Algérie, et que le climat actuel n'y a pas d'influence pédogénétique (**Gaucher, 1947**).

La couverture pédologique du versant s'organise donc selon une séquence topographique, elle constitue ce que nous appelons une pédoséquence (figure N°125). La pédoséquence dépasse 9 km de longueur, sur cet espace, des profils sont allés implanter sur la base des relations intuitives entre le sol et le modelé, et le sol et la végétation ; les fosses ont été creusées dans des unités physiographiques différentes. Ainsi, depuis l'amont jusqu'à l'aval, il est possible de rencontrer 4 types de sols se succède:

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

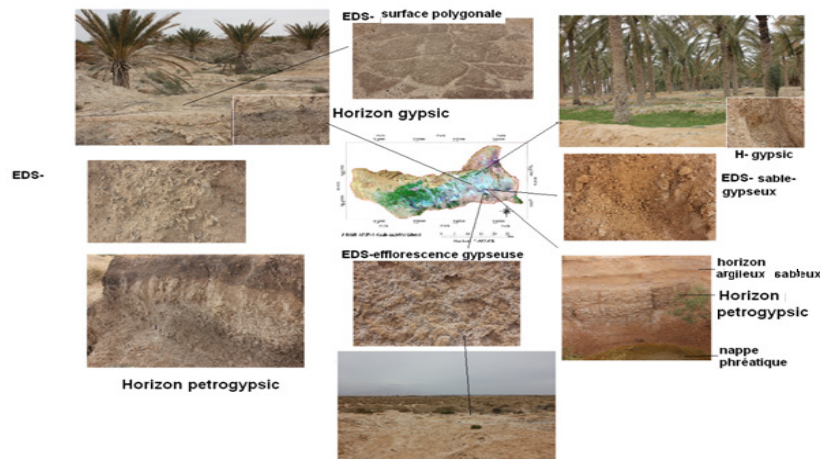


Figure 125- localisation des EDS et des profils sur la pédoséquence.

1. Les calcigypsids à horizon gypsic

Sur les hauts glacis de la région, ainsi qu'en bordure des affluents, l'enfoncement rapide des axes de drainage vers leurs niveaux de base provoque un rabattement important (>3 m) de la nappe phréatique. Avec la présence des matériaux sableux d'origine éolienne très riches en gypses issus des évaporites de la sebkha d'Oumache ou chott Melrhir. Ces matériaux sont capables d'évoluer sous forme d'accumulations calcaro gypseuses de surfaces, d'où on observe sur des versants des étendues de sols calcigypsids avec un horizon très épaisse (photo 04). Dans ses différentes situations, les sols développés dans ces zones les plus élevées sont bien drainées, ils ne subissent jamais l'influence de la nappe phréatique, les sols ont une texture sableuses, caractérisée par une bonne infiltration et une faible capacité de rétention hydrique.

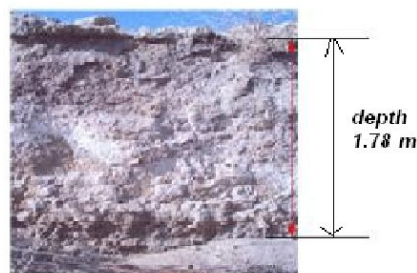


Photo 04: Profil d'un sol calcigypsids (croûte calcigypseuse-deb-deb)

Description des profils

A. Caractères morphologiques

- **Description du profil :** N° 1
- **Situation morphologique :** moyen et bas glacis
- **Localisation coordonnées :** x = 741915 m Y = 3853095 m Z =

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

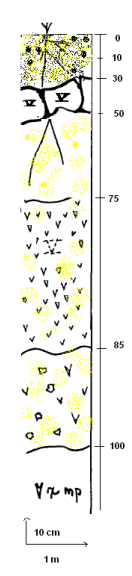
104 m

- **Topographie** : pente de 0-2%
- **Drainage** : modéré
- **Végétation** : *Limoniastrum guyonianum* et *Atriplex* et *phoenix dactylifera*

a. Classification USDA (Soil Taxonomy 2010)

Ordre	sous ordre	grand groupe	sous groupe
Aridisols	Gypsisds	Calcigypsisds	Xeric

En surface un réseau polygonal très caractéristique découpant des plaques de croûte gypseuse (faiblement indurée) de couleur blanc-rougeâtre. Par endroit aussi, présence des plages plus humides avec efflorescences salines.



Profondeur H1 : 0 – 10 cm : sable de transition (nebkhat)
Profondeur H1 : 10 - 30 cm. Forte effervescence. Frais 10 YR 7/6. MO directement décelable < à 1 %. Texture limono-sableuse à sable fin. Croûte gypseuse en surface, puis un encroûtement gypseux dur; structure massive à éclats polyédriques, peu poreux, pH 8, CE 7.7 mmhos/cm. Transition net.
De 30 à 50 cm : frais 10 YR7/2, humide brun, encroûtement gypseux très friable, meuble, pas d'effervescence, structure massive très nette, fente de 0.3 cm, sans pores visible ; pas de racines ; transition nette et interrompue.
De 50 à 75 cm : frais, 7.5 R 7/3 peu d'effervescence ; amas gypseux, texture sableuse (sables fins), sans MO, ni racines.
De 75 à 85 cm : sec 7.5 YR 7/2, non organique, cristaux de gypse et encroûtement, structure massive, cimenté, friable, pas d'effervescence, pas de racines, transition distincte.
De 85 à 100 cm : sec 10 YR 7/6, non organique, structure massive, pas d'effervescence, peu friable avec présence de graviers et pierres.
Plus de 1 m : sec ; Blanc 10 YR 6/4, pas d'effervescence, activité nulle, encroûtement sulfaté, structure massives, cimenté peu friable, compactes, non calcaire.

b. Résultats d'analyses (tableau N°30)

Tableau 30-résultats d'analyse du profil N°1.

Profondeur en cm	Granulométrie			CaCO3 %	Gypse %	pH	CE
	Argile	Limon	Sable				
H1 0-20	2	6	86	12	13.41	7.75	4.90
H2 20 à 30	15	8	74	14.41	19.56	7.5	5.48

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

2. Les gypsidés à horizon petrogypsic

Surmonté par un horizon superficiel d'apport éolien. L'horizon à encroûtement gypseux (petrogypsic). Cette classe occupe les moyens et bas glacis ou ce produit une forte amplitude de fluctuation de la nappe phréatique (de 1 jusqu'à 2 mètres) créant des alternances de périodes de dissolution et de dépôt favorisant la consolidation des horizons permettant l'individualisation d'un horizon pétrogypsic (photo 05).



Photo 05: profil d'un sol petrogypsic avec fluctuation de la nappe phréatique

Les sols développés dans ces conditions sont qualifiés de petrogypsic de profondeur ou de nappe. La végétation caractéristique est dominée par *Zygophyllum album* et tamarix et introduction du palmier dattiers (photo 06).



Photo 06 : défoncement de l'encroûtement pour l'implantation du palmier dattier

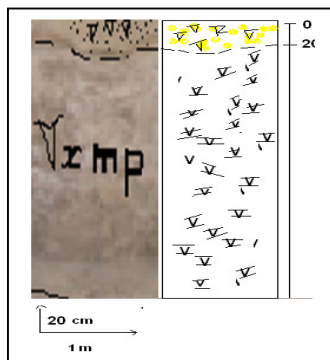
B. Caractères morphologiques

- **Description du profil : N°2**
- **Situation morphologique :**
 - **Coordonnées : X= 743595 Y = 3848655 Z = 54 m**
- **Topographie : moyen et bas glacis**
- **Drainage : modéré**
- **Végétation : *Limoniastrum guyonianum* et *Atriplex* et *phoenix dactylifera***

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

a. Classification USDA (Soil Taxonomy)

Ordre	sous ordre	grand groupe	sous groupe
Aridisols	gypsiqs	Petrogypsiqs	Typic Petrogypsiqs



0-20 cm. Sec 2.5 YR 8. Non organique- pas d'effervescence. Gypse en croûte. Peu d'éléments grossiers. Structure massive très nette polyédrique avec fente de 0.1 cm. Transition très nette, interrompus.

>20 cm. Sec. Non organique- pas d'effervescence. Encroûtement gypseux très dure. Structure massive très cimenté.

b. Résultats d'analyses (tableau N°31)

Tableau 31-résultats d'analyse du profil N°2.

Profondeur en cm	Granulométrie			CaCO ₃ %	Gypse %	pH	CE
	Argile	Limon	Sable				
H1 0-20	34	10	75	4.9	72.03	7.74	9.9
H2 20 à 30	-	-	-	-	-	-	-

3. Les Petrogypsic Aquisalids

Cette classe est liée à la présence très localisée d'une sebkha associée à une dépression hypo-éolienne assurant une dynamique éolienne comportant à la fois des apports et des départs de poussières de sable. La dépression constitue un réceptacle (zones puits) des poussières à une surface argilo-limoneuse, riche en sels et en gypse, dénudées et asséchés une grande partie de l'année, elle est soumise à une intense déflation matérialisée souvent par un bourrelet de pseudo-sables (zones sources). En période de crues épisodiques parlantes de brèves inondations de la cuvette en plus de son alimentation de l'apport de nappes souterraines. Cette situation permet de définir une unité de sol unique dans la région les Petrogypsic Aquisalids à encroûtement gypseux de nappe (>2 m) (photo 07).

Dans cette partie, le niveau de la nappe fluctue lentement et elle affleure à la surface lors des périodes de forte pluviosité printanière et automnale. Elle atteint son niveau bas assez

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

souvent entre 1 et 2 mètres sous la surface. Cette unité pédopaysagère est caractérisée par une végétation dominée par espèces *Salsola* et par des associations de sols hydromorphes « *Limoniastrum guyonianum* ».



Photo 07: profil d'un sol petrogypsic Aquisalids

C. Caractères morphologiques

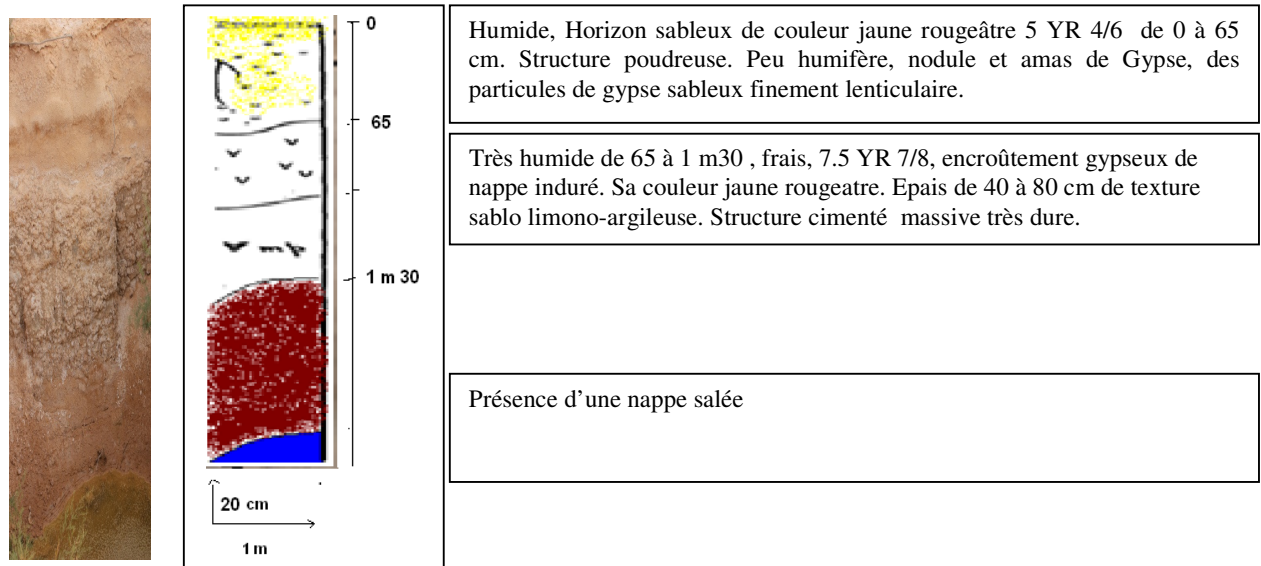
- **Description du profil : N°2**
- **Situation morphologique :**
 - **Coordonnées : x = 744705 Y = 3845715 Z = 47 m**
- **Topographie : depression**
- **Drainage : modéré**
- **Végétation : *Limoniastrum guyonianum* et *Atriplex* et *phoenix dactylifera***

a. Classification USDA (Soil Survey staff 2010)

Ordre	Sous ordre	grand groups	sous groupe
Aridisols	Salids « équivalent au solonchak »	Aquisalids	Petrogypsic Aquisalids

En surface de ces sols en, remarque une plaquette argileuse avec efflorescences salines blanches, recouverte d'une poudre argileuse. Texture fine argileuse à argilo-limoneuse, couleur jaunâtre. Structure battante et glacée en hiver et craquelée en été.

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE



b. Résultats d'analyses (tableau N°32)

Tableau 32-résultats d'analyse du profil N°3.

Profondeur en cm	Granulométrie			CaCO3 %	Gypse %	pH	CE
	Argile	Limon	Sable				
H1 0-20	14	2	93	2.8	17	8.38	17
H2 20 à 30	-	-	-	2	44	8.0	13.3

Dans une sebkha fonctionnelle à inondation saisonnière, la proportion de sels est assez faible et l'argile connaît une décohésion maximum avec formation de pseudo-sables, propice à la déflation. En revanche, si les sels augmentent, il y a formation d'une croûte et diminution progressive de la déflation.

Parmi les sels simples, le gypse de faible solubilité précipite le premier. D'une part, les concentrations gypseuses développent des pressions mécaniques suite aux nucléations et croissances cristallines du gypse. Ceci expliquerait la destruction de la cohésion du matériel sous l'effet d'un «labourage». A terme, l'accolement par simple interpénétration, sans ciment, des cristaux de gypse serait à la base du durcissement des encroûtements gypseux (Halitim et Robert., 1987).

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

Résumé : L'analyse fine des sols de la région étudiée montre que ces toposéquences se traduisaient spatialement par une forte variabilité longitudinale et latérale que l'on pouvait schématiser ainsi :

- *Viennent s'accumuler, dans les bas-fonds et les dépressions, les chlorures de calcium, de magnésium et sodium; puis, en auréoles tout autour, sur les premiers replats, homologues des diverses terrasses, les sulfates des mêmes éléments ; et, plus haut encore, en bordure glacis, les carbonates, surtout de calcium.*

Comme la plupart des profils observés des sols de la pédo-séquence, les sulfates sont contrairement aux bicarbonates sont en assez forte quantité.

1.8 ORGANISATION SPATIALE DE LA VEGETATION SELON LA PEDOTOPOSEQUENCE

Barry et al., (1952) a montré le rôle déterminant du relief et du réseau hydrographique dans la répartition des associations végétales et leur individualisation en différents types de landes en fonction de nuances de drainage.

La région d'étude constitue un large étendu de glacis emboîtés, légèrement inclinée du nord au sud, d'une altitude moyenne de 150 m avec une pente moyenne de l'ordre de 1, 25 % (figure N°126). Cette unité géographique est relativement diversifiée en raison de l'action anthropique. Elle est peuplée du palmier-dattier, et de quelques espèces arboricoles (abricotiers, vignes, olives, etc.). En réalité, la faiblesse des altitudes et des dénivellations, on fait une plaine au sens géographique du terme. La topographie d'ensemble est très plane et ne présente pas de relief saillant. Cependant, dans le détail, la surface du sol est parcourue de formes éoliennes d'accumulation et des espèces endémiques.

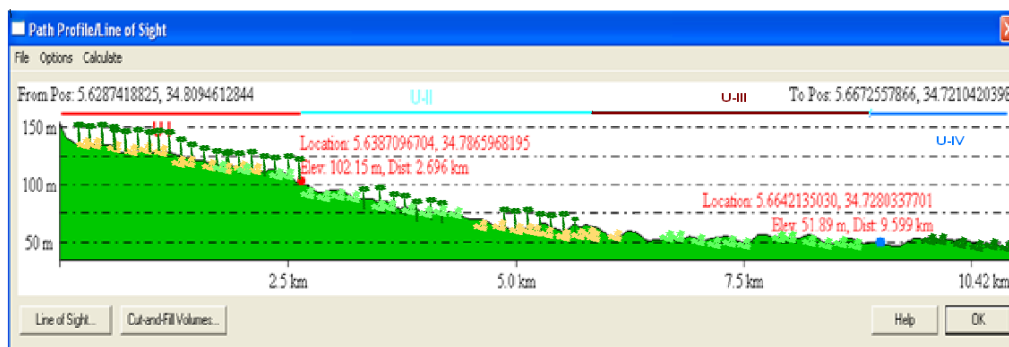


Figure 126- Organisation spatiale de la végétation selon la pédotoposequence

Il y a présence des dunes paraboliques de déflation dont la convexité est orientée sous le vent, vers le Nord, est. Elles ne dépassent pas généralement plus de 2 m et s'étendent sur quelques décimètres à plusieurs kilomètres de longueur. Ces dunes sont principalement

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

localisées à proximité des obstacles (jardins) et les bordures de sebkha, et masquées en grande partie la végétation et trouvent leur origine dans la reprise et l'accumulation par le vent du sable issu du creusement des vallées et aussi d'origines allochton.

1.8.1 Associations sol - végétation

Bien que ces associations sol végétation soient relativement bien caractérisées, et sous une apparente uniformité, liée à la dominance dans le paysage des espèces steppiques spécifiques, les paysages de la région d'étude présentent une forte variabilité spatiale à l'échelle de petites régions. Cette variabilité, qui s'observe particulièrement entre la partie humide la sebkha et les glacis, est liée au microrelief. Dans la sebkha " humide ", la dépression endoréique crée localement des conditions d'engorgement contrastées (liées à la présence plus ou moins longue de la nappe phréatique au sein des profils), responsables d'une évolution pédogénétique différenciée " un horizon argileux de plus de 2 m de profondeur " et des efflorescences salines (18 mhos/cm). Ces conditions permettent de distinguer au sein de cette dépression quatre types d'espèces *Salsola*.

Dans la partie haute du glacis depuis les piedmonts de djebel Boughzel sommet relativement bien drainé jusqu'aux dépressions humides. Sur cette toposéquence, les sols évoluent du psamments, au Gypsiorthids (Argilic) passant par les gypsids à horizon gypsics suivi par les gypsids à horizon petrogypsic.

Les espèces végétales indicatrices sont du pôle le plus au sec au pôle le plus humide *Anabasis articulatum* (photo 08), *Aristida pungence* (photo 09) et *Zygophyllum album* (photo 10) au *Salsola vermiculata* (photo 11) et *Limoniastrum guyonianum* (photo 12) passant par le *Tamarix gallica* (photo 13).



Photo 088 : *Anabasis articulata*



Photo09 : *Aristida pungens*



Photo 10: *Zygophyllum album*

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

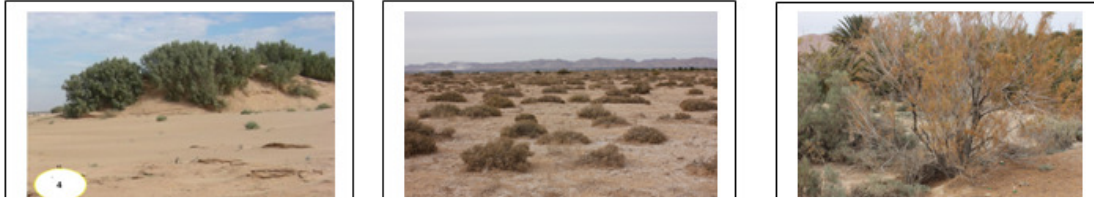


Photo 11: *Limoniastrum guyonianum* Photo 12 : *Salsola vermiculata* Photo 13: *Tamarix gallica*

De cette étude en observant au sein des toposéquences de nombreuses classes de sols et des associations de plantes expriment une certaine tendance (**Pouget, 1986**). De plus, la faiblesse de la relation entre le type de sol et le type de végétation sont probablement liés au fait que la végétation est très réactive à un changement de régime hydrique engendré par les pratiques de phoenicultures alors que le sol peut conserver un faciès hérité de conditions hydriques anciennes (observation de terrain). De la même manière, la relation entre le type de sol et la topographie est entachée d'une très forte variabilité. Cela s'explique par le fait que les pratiques phoenicoles ont largement modifié le modelé du microrelief du fait du sous-solage et le labour profond. Ainsi, les faibles variations d'altitude qui avaient permis la différenciation des sols sont aujourd'hui invisibles dans la plupart des parcelles agricoles. Aussi, la zone de transition entre la partie cultivée et le chott est de plus en plus exploitée pour augmenter la surface des exploitations et bénéficier de l'eau d'irrigation. Dans de nombreux cas, les faibles dénivelées entre les zones cultivées et les chotts limitent la bonne évacuation des eaux et des sels. En conséquence, une majorité de ces parcelles agricoles créées récemment PNDA, FNDRA, etc., sont sujets à des manifestations d'engorgement et de salinité, souvent accentuée par une gestion de l'irrigation peu efficace et des systèmes de drainage peu performants. Par contre, les anciennes oasis comme celle d'Oumache sont généralement disposées en bordure de " chotts ", dépressions topographiques salées qui constituent l'exutoire naturel des eaux de drainage.

2 VARIABILITE SPATIALE DES PROPRIETES PEDOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES

Les variations spatiales des propriétés pédologiques sont complexes. Ils peuvent avoir d'importantes conséquences pour ceux qui veulent décrire un sol dans un endroit donné. L'obtention de l'information sur des sols dans une région est donc essentielle, surtout dans une démarche d'identification de la variabilité spatiale d'une propriété du sol par exemple le % et forme du gypse à un endroit précis. Cette variabilité du sol détermine le potentiel du sol, qui est caractérisé par les principales constantes du milieu qui sont lié au sol, comme la profondeur, la topographie, etc. (**Baret, 1999**). Plusieurs travaux (**Cassel et Bauer, 1975 ; Delhomme, 1979 ; Viera et al., 1981 ; Germinger et al., 1985**) démontre qu'en réalité les propriétés des sols varient selon leur position dans l'espace.

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

2.1 Variabilité spatiale des teneurs en gypse des sols

En effet, des travaux de recherche ont permis d'établir une corrélation entre la variabilité spatiale de plusieurs descripteurs physicochimiques du sol (l'épaisseur de l'horizon de surface, l'épaisseur de l'horizon de profondeur, le contenu en matière organique et en argile, le pH, la capacité d'échange cationique, et le profil d'humidité du sol, et la topographie (**Khakural et al., 1996**). Cette modélisation aide à comprendre le pattern de distribution spatiale du sol et de ses propriétés.

La variabilité spatiale des sols se traduit par une forte variabilité spatiale des teneurs en gypse. Cette variabilité s'exprime à différentes échelles.

Les gypsids à horizon petrogypsic sont globalement les plus riches en gypses mesuré aux gypsids à horizon gypsic (**Pouget, 1989**). Car ils sont bien alimentés en eau et cela est essentiellement dû à une différence importante de dépôt par ruissellement et par la nappe phréatique (par ascensum).

Pour les gypsids à horizons gypsic présentant un taux élevé de gypse (entre 25 et 65 %), du fait du gypse dissous dans la nappe phréatique et la remonte par ascensum dans les périodes sèches (fluctuation de la nappe phréatique chargée en ions Ca^{2+} et SO_4^{2-}) et aussi par le gypse transporté par le vent.

Au sein de la dépression, l'interaction entre le microrelief et la nappe phréatique détermine le régime hydrique des sols, et conditionne l'évolution pédogénétique et la dynamique des gypses. À l'échelle de la toposéquence, l'organisation de la teneur en gypse des horizons superficiels des sols est en relation avec l'organisation du relief, spécifique à chaque pédopaysage. Cette organisation se retrouve d'un point de vue spatial à l'échelle de la petite région (parcelle). La distribution des teneurs en gypse est affectée aussi, d'une forte variabilité spatiale aléatoire qui se manifeste sur de faibles distances, pour une même occupation des sols et un même type de sol. Cette variabilité se traduit par de très fortes variations de teneurs sur de faibles distances, qui peuvent ainsi passer de 10 à 50 % de gypse en l'espace de quelques mètres.

La variabilité des teneurs en gypse peut être aussi, accentuée ou modifiée par un changement d'occupation des sols ou par une intensification des pratiques agricoles. L'action de l'agriculteur contribue, elle aussi, à accentuer la variabilité spatiale des sols aux échelles intra et inter parcellaire.

Lors de l'échantillonnage, on a constaté qu'à l'échelle de la même parcelle agricole située dans la même zone et de même classe du sol, présent de fortes différences de taux de gypse. Cela peut s'expliquer par le fait que, lors de l'implantation du palmier dattier, le sol est travaillé sur une profondeur qui dépasse les 2 m (la potée), ce qui crée une hétérogénéité spatiale

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

périodique dans les horizons de surface. L'intensification des pratiques agricoles (augmente la fréquence de travail du sol surtout de surface) se traduit également par une augmentation importante de la variabilité à courte distance des teneurs en gypse croûte (Deb-deb) de surface et encroûtement. D'une manière générale, il existe donc des différences significatives des propriétés du sol au sein d'une même zone. Ces différences concernent, la partie supérieure du profil pédologique, la teneur en gypse, l'humidité, et la teneur en matières organiques.

2.2 Impact des nappes phréatiques et qualité des eaux souterraines sur la distribution des formes de gypse

Cinq (05) échantillons d'eau ont été analysés, quatre (04) échantillons prises entre 1 m et 2 m 50 de profondeur de la nappe phréatique de surface et un (01) échantillon d'eau prise d'un forage à 300 m de profondeur (tableau N°33).

Tableau 33- résultats des analyses

Echantillon	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
1	7.97	8.05	360	168	786.186	9.789	1011.75	1001.376	225.7	19.468
2	7.9	8.41	404	231.6	836.441	18.837	1171.5	1137.936	163.48	15.624
3	7.5	14.63	568	463.2	1439.455	39.351	1970.25	2875.872	223.26	4.03
4	7.7	16.01	528	511.2	1464.571	42.354	1988	2958.624	126.88	1.24
Forage à 300	8.06	4.25	356	204	142.163	4.797	603.5	852.432	183	6.572

Les résultats du tableau ci dessous, montrent que :

- le potentiel d'Hydrogène (pH)

C'est un paramètre physique qui détermine l'acidité ou l'alcalinité. Pour l'ensemble, les valeurs de pH mesurées se situent entre 7.5 et 8.06.

- La conductivité électrique (CE)

La conductivité est un paramètre important dans la mesure où elle reflète la minéralisation globale de l'eau. Les valeurs de la conductivité mesurées sont très variables. Elles varient entre 4.250 et 16.010 $\mu\text{S/cm}$. Ces fortes valeurs rencontrées seraient liées à une mise en solution des chlorures et de sulfates.

2.2.1 Étude des faciès

Afin de bien identifier les faciès hydrochimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyses s'avère un outil inévitable.

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

2.2.1.1 Représentation sur le diagramme de piper

Le diagramme de piper (figure N° 127) permet de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément, il est composé de deux triangles, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global.

Les nuages de points concentrés dans un pôle représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques.

La représentation de la composition des eaux sur le diagramme de piper, appelle les commentaires suivants :

- Dans le triangle des cations, la plupart des eaux se rapprochent du pôle sodi-potassique. On constate toutefois que l'échantillon (300) évolue vers le pôle calcique. On notera la dominance dans l'eau des alcalins.
- Dans le triangle des anions, les eaux se répartissent entre le pôle sulfaté et le pôle chloruré.
 - Dans le losange, les eaux se répartissent en trois faciès :
 - Chloruré sodique, sulfaté sodique et sulfaté calcique.

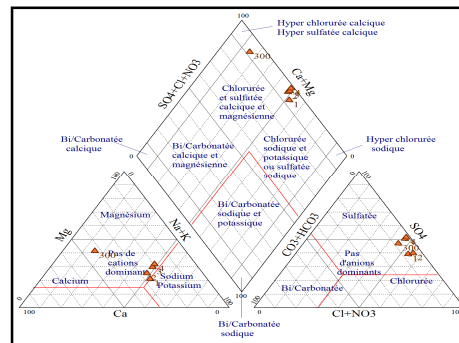


Figure 127: Diagramme de piper des eaux souterraine

2.2.1.2 Évolution des minéraux des eaux souterraines

L'étude thermodynamique permet d'étudier l'évolution chimique de l'eau en fonction de son état d'équilibre vis-à-vis des minéraux. Dans le but d'expliquer les mécanismes d'acquisition de la minéralisation, on a utilisé le programme Wateq pour déterminer les indices de saturation.

- Les minéraux carbonatés présentent des degrés de saturation différents (tableau N°34) et figure N°128. En effet, celui de la Dolomite varie de + 0.46 à - 0.03, suivi par celui de la Calcite qui varie de + 0.10 à - 0.18 et enfin celui de l'Aragnonite qui varie de - 0.04 à - 0.32, si l'on admet que l'état d'équilibre se fait dans l'intervalle de - 0.5 à + 0.5, on peut dire que les trois minéraux ont atteint leur état d'équilibre.
- Les minéraux évaporitiques montrent des degrés de saturation plus faibles que les minéraux carbonatés. Le Gypse enregistre des indices qui varient de - 0.5 à - 0.10,

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

suivi de l'anhydrite dont l'indice varie de -0.72 jusqu'à -0.32 et enfin l'Halite dont les indices varient de -5.74 à -4.29 (donc très sous saturés).

Tableau 34 évolution des indices de saturation des minéraux

Nom	Minéraux Carbonatés			Minéraux évaporitiques		
	Calcite CaCO ₃	Dolomite CaMg (CO ₃) ₂	Aragonite CaCO ₃	Anhydrite CaSO ₄	Gypse CaSO ₄ : 2H ₂ O	Halite NaCl
1	0.08	0.18	-0.06	-0.7	-0.48	-4.8
2	-0.03	0.04	-0.18	-0.65	-0.43	-4.71
3	0.1	0.046	-0.04	-0.32	-0.1	-4.3
4	-0.18	-0.03	-0.32	-0.34	-0.13	-4.29
5	0.04	0.18	-0.11	-0.72	-0.5	-5.74

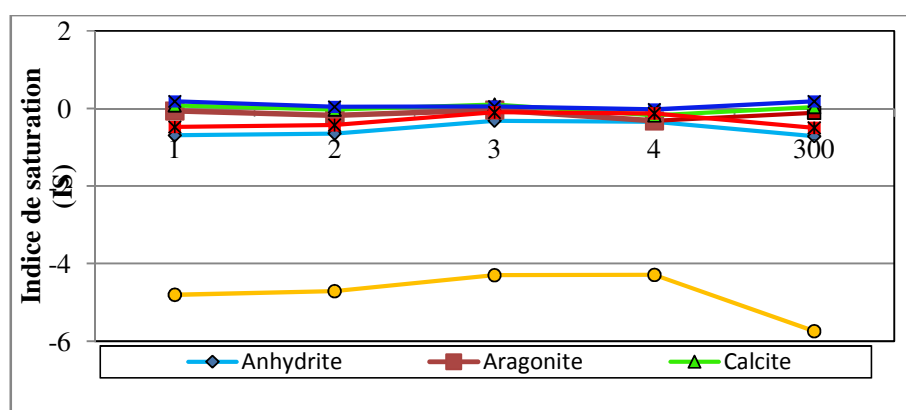


Figure 128 Variation de l'indice de saturation des minéraux

2.3 DISCUSSION

Nous allons tenter, à travers une toposéquence-type, et des observations localisées d'expliquer la nature des sols gypseuse dans la région d'étude, d'établir les limites entre les différentes classes reconnues puis extrapoler pour l'ensemble de la région. Le sol est un continuum en trois dimensions, dont on ne perçoit souvent que la surface.

Le sol étant organisé et afin, de l'appréhender on creuse des fosses (profils types), et ont regroupé les profils du mêmes types et en les rattacher à une classes. Pour le tracé de la limite entre deux classes de sols, on se base souvent sur des relations supposées entre le sol et la végétation ou entre le sol et le modelé et la géologie. C'est à ce niveau que la télédétection joue sont rôle très important de permettre le tracé d'une limite avec une bonne vision spatiale, ce qui n'est pas toujours le cas sur le terrain.

Si d'une manière générale la géologie joue un rôle indispensable dans la différenciation des

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

sols (**Finke et al. 1998**), ce n'est pas le cas dans notre région d'étude. La morphologie par contre a une part importante dans l'organisation des sols gypseux. Dans une même région l'accumulation du gypse varie en intensité d'un niveau morphologique à l'autre. Il est directement possible de remarquer que les sols du profil 2 et 3 ont une profondeur très variable, et leur nature et forme changent rapidement d'un profil gypsic à profil petrogypsic pour un même contexte géologique « le Quaternaire » à faciès carbonaté et sulfaté, soumise à un climat relativement peu actif au moins une partie de l'année a entraîné une évolution de caractère relativement limitée. Donc, la géologie n'est pas le seul facteur à prendre en compte pour comprendre la répartition des sols gypseux de notre région. La nature des sols et leur localisation dépendent en effet fortement aussi de la topographie, et de la profondeur de la nappe phréatique et sa qualité d'eau. Selon **Pouget (1968)**, la nappe phréatique suffisamment proche de la surface permet une remontée capillaire des solutions salines et entraîne un dépôt de gypse dans les horizons supérieurs du sol. L'irrigation avec une eau très salée et riche en sulfates entraîne aussi, une précipitation de gypse en amas fins dans les pores, immédiatement au-dessous de l'horizon de labour. Lorsque le flux hydrique des eaux, sous saturer en gypse, circule d'amont en aval (cas des eaux phréatiques perchées) ou par ascension (cartésianisme, pour le cas des eaux du continental intercalaire ou encore sous forme d'eaux d'irrigation cas de complexe terminal et de continental intercalaire), ces eaux peuvent dissoudre à des degrés différents le gypse préexistant dans les horizons gypsic de subsurface pour le redéposer ailleurs dans la partie aval (**Hamdi Aissa, 2001**). Ce cycle de dissolution peut engendrer les figures de dissolution des cristaux de gypse et de néo cristallisation. Stimulé par la présence non excessive du sodium, le gypse néoformé, cristallise généralement sous forme lenticulaire dans les horizons de surface (**Watson, 1985**).

2.3.1 Impact de la topographie

Les principaux facteurs de la pédogenèse sont la lithologie, la morphologie et le type de végétation.. De plus, **Chaplot et al., (2003)** a mis en évidence le rôle joué par le substrat géologique et la pente du versant dans la distribution spatiale des sols. La plupart des études utilisent des caractéristiques morphologiques locales dérivées du MNT comme gradient de pente ou d'orientation de la pente (**Thompson et al., 2006**) pour expliquer la variation spatiale des sols.

Les principaux changements dans la nature des sols ici ne sont pas donnés une impulsion par les variations lithologiques puisque entre les gypsids et les petrogypsic Aquivalids, il n'y a pas de sols aux propriétés différentes qui se développent mise de part les psamments. Toutefois, il est d'ores et déjà possible de constater une influence de la topographie : Pour un même substrat géologique des sols différents apparaissent suivant l'inclinaison de la pente et la position sur le versant. Ces différences se matérialisent :

- Soit par des différences significatives de profondeur, qui est très visible pour tous les sols développés sur les marnes,

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

- Soit par des modifications des propriétés physiques (travail du sol), remarquables notamment pour les sols développés sur deb-deb.
- Soit par les deux à la fois.

Ainsi, si la géologie dans notre cas n'influence pas la nature des sols, il semble que la topographie joue un rôle mais limité. Elle n'est pas un facteur essentiel de la différenciation entre les unités de sols rencontrés puisqu'elle a un faible rôle, elle entraîne des tonalités qui résultent des dynamiques hydriques et érosives qu'elle souscrit.

Nous allons tenter de mettre cela en évidence sur le transect en nous appuyant sur les profils 1, 2 et 3. Ces trois profils s'inscrivent dans des modelés différents moyens, bas glacis et plaine délimités à l'amont par le piedmont et le haut glacis et à l'aval par une dépression. Les figures montrent les types de sols présents, en coupe.

Le premier profil correspond à la section amont de la toposéquence et les deux derniers profils 2 et 3 s'inscrivent dans un même système de pente. Trois remarques sont alors possibles :

1. La première est que les sections amont de ces deux profils 1 et 2 présentent des sols identiques sur une distance de 400 mètres environ alors qu'il n'en va pas de même dès que l'on dépasse ce seuil. D'ailleurs, en amont de ce seuil, les sols sont globalement identiques avec ceux qui sont observés dans le moyen glacis du profil 2. Les contextes géologiques, topographiques et hydriques sont en effet globalement les mêmes pour ces trois espaces distincts.
2. La seconde est que le profil 3 présente plus de contrastes pédologiques que le profil 2, traduisant ainsi une complexité plus grande du milieu naturel.
3. La troisième est que les sols sont plus épais et plus réguliers le long du profil. Cela témoin, des phénomènes d'accumulation et de dépôts éoliens existant dans les sections avale des versants.

La première des remarques permet déjà de comprendre l'importance de la topographie dans la nature et la répartition des sols : la partie amont présente des sols très peu développés alors que partout ailleurs dans ce paysage, les sols sont profonds. Cette distinction est essentiellement liée à la composante de pente. Les hauts glacis affichent en effet des pentes plus marquées que les autres modelés. Cela implique alors une circulation plus rapide de l'eau. Cela induit également une érosion très locale, en fonction de la microtopographie particulièrement des sables fins et les limons, et donc un dégagement rapide des sols établis en ces lieux. Les parties amont et nettement moins développées, les croûtes apparaissent directement à la surface du sol. Dans la partie avale, il y a des accumulations et des dépôts de sable d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur. Ces facteurs combinés aboutissent ainsi à la

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

première différenciation indépendante de la lithologie puisqu'un même support géologique peut donner naissance à deux types de sols très différents.

La seconde remarque, s'il semble que ce soit véritablement la topographie qui entraîne les principales différences pédologiques. Il y a aussi, la nappe phréatique qui entraîne les principaux changements dans la nature des sols de ce paysage : Les rabattements rapides entraînent des distinctions significatives dans les sols. En effet sur les profils 2 et 3, ce phénomène s'explique partiellement par la nappe. Ces secteurs se localisent en effet sur des nappes perchées dues aux différentes irrigations et aussi à la nappe phréatique peu profonde. À l'échelle du sous-bassin versant dans son ensemble, cela explique la faible épaisseur des sols en haut et moyen glacis et la présence des gypsid à horizon gypsic et les horizons petrogypsic dans les bas glacis et la plaine. Par contre, dans la partie avale de la dépression il y a présence d'un horizon petrogypsic en profondeur.

2.3.2 Caractéristiques pédogénétiques des sols de la région d'étude

La présence du gypse dans les sols dépend de la combinaison de nombreux facteurs comme le climat, une source de cet élément (roches gypsifères, nappes peu profondes), des apports externes (éoliens et hydriques) et de la topographie. Cela explique pourquoi les sols gypseux sont relativement localisés et se confinent généralement dans les zones dépressionnaires (chotts) et autour des formations géologiques gypsifères de l'étage bioclimatique aride du Nord de l'Algérie (**Djili, 2000**).

Une des particularités de la région est la présence d'une nappe phréatique superficielle dont les rabattements influencent l'évolution pédogénétique des sols (**Dubost, 2002**). L'interaction entre cette nappe phréatique superficielle et la géomorphologie régionale ou locale (relief et microrelief) influence le fonctionnement hydrique des sols, conditionnant leur évolution pédogénétique et le développement des horizons gypsic et petrogypsic. Ainsi, selon la situation des sols vis-à-vis du relief ou du microrelief, les horizons gypsic sont plus ou moins différenciés et les horizons petrogypsic sont plus ou moins compacts.

Les variations du niveau de la nappe (< 3 m) génèrent des alternances saisonnières de conditions dissolution et précipitation (précipitation du gypse) au sein du profil, les constituants cimentent les grains de sable et forment des horizons indurés, qualifiés "de croûte et encroûtement de gypse" dans la région. Ces sols sont qualifiés de gypsic (lorsque l'horizon E est présent) ou pétrogypsic (lorsque l'horizon E est absent ou peu différencié). Il existe de grandes variations du degré d'induration de l'épaisseur et de la teneur en gypse. La perméabilité est plus faible dans l'horizon pétrogypsic que gypsic. Par ailleurs, l'horizon gypsic est le plus souvent discontinu sous forme de granules, nodules plus ou moins durcis, pseudo-mycéliums et amas friables, etc.... et donc incapable de former une barrière imperméable efficace.

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

Malgré des différences morphologiques, ces différents types de sols partagent un certain nombre de caractéristiques communes :

- Dans les horizons de surface la structure des sols est particulière. La texture varie peu avec la profondeur et se décompose en moyenne de la façon suivante 2,4 % d'argile (<2 μ m) ; 2,9 % de limons (2-50 μ m) ; 94,8 % de sable (50-2000 μ m). Il s'agit ici de valeurs moyennes ce qui implique une certaine variabilité des valeurs selon le profil étudié. Ces propriétés confèrent à ce matériau un caractère meuble et très filtrant. Il faut souligner la très faible teneur en argile des sols gypseux, ce qui a des incidences sur leur comportement physicochimique, d'autant que ces 2,4 % d'argiles granulométriques ne contiennent que d'une forte proportion de petit quartz. Ainsi, l'extrême pauvreté de ces sols en éléments fins particulièrement en colloïdes argileux est à l'origine d'un complexe argilo-humique presque inexistant ;
- La capacité d'échange cationique (CEC) est faible. Elle est essentiellement liée à la matière organique ;
- Ces sols présentent un pH de l'ordre de 8,20 dans les horizons supérieurs. Il diminue légèrement dans les horizons profonds où il atteint des valeurs de l'ordre de 7.70.

À côté des Gypsids qui représentent la grande majorité des sols du sous-bassin versant, on rencontre d'autres types de sols, dans des situations particulières.

Sur les piedmonts se sont développés psamments ou Xeropsamments. Ce sont des sols très sableux et pauvres en argile. Ils se caractérisent par une structure uniformément particulière et par l'absence totale à la fois d'horizon typique (soil taxonomy, 2010). Ils ont une réserve maximale utile en eau extrêmement faible et un drainage vertical qui expose la végétation à des stress hydriques estivaux prononcés. Les réserves en minéraux altérables sont extrêmement faibles ainsi que la capacité d'échange, ce qui leur confère une fertilité chimique très faible. Les Xeropsamments se caractérisent par une texture particulièrement grossière (98-99 % de sable). Ces conditions expliquent la faible vitesse de croissance de la végétation (Pouget, 1979 ; Le Houerou, 1969). Malgré ces conditions défavorables, la végétation naturelle des dunes peut être particulièrement diversifiée.

Dans les zones les plus mal drainer du sous-bassin versant, notamment à proximité de la sebkha d'Oumache, les sols peuvent être contrariés et l'on observe des sédiments fins de sables gypseux qui couvrent de grandes étendues. Ce sont des apports alluviaux et éoliens. D'une façon générale, la texture de ces sols varie du sableux à sableux limoneux vers argileux limoneux dans la dépression. On ne retrouve pratiquement pas de charge (pierre) dans les profils de ces sols. On y observe majoritairement, des sols imparfaitement drainés ont mal drainé. Ils sont caractérisés en surface par un horizon A ocre. En fonction de la durée d'engorgement du profil, lié au battement de la nappe phréatique, on observe en profondeur un

Chapitre 1. MODELISATION NUMERIQUE DU MILIEU PHYSIQUE ET LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

horizon clair avec des traces d'hydromorphie.

On peut dire enfin, que les sols gypseux de notre zone d'étude doivent une part de leur originalité à la nappe de sable qui les recouvre entièrement. Malgré l'apparente homogénéité de ce substrat, les sols développés sur ces sables possèdent des caractéristiques et des degrés d'évolution variés dont la distribution géographique n'est pas aléatoire. Le réseau hydrographique et les variations topographiques liées à la géomorphologie régionale et locale font varier la profondeur de la nappe phréatique et l'importance de ses oscillations saisonnières. Ces variations de relief et d'amplitude de battement de la nappe phréatique déterminent l'évolution pédogénétique des sols (**Duchaufour, 1949**), les cortèges floristiques (**Pouget, 1979 ; Duchaufour, 1949**) et d'une manière générale les caractéristiques et la répartition des pédopaysages du Sou bassin versant d'oued Djedi.

La couverture morphopédologique du sous-bassin versant est constituée d'une juxtaposition de terroir présentant des caractéristiques relativement bien individualisées. Actuellement, il est d'usage de distinguer trois grands types de sols, en fonction du relief général et de l'intensité du drainage : Gypsids à horizon gypsic, Gypsids à horizon pétrogypsic et les pétrogypsic Aquisalids. Ces trois principaux types de sols ont défini par des associations végétales caractéristiques, un type de sol dominant ou des associations de sols organisés en toposéquences.

2.4 CONCLUSIONS PARTIELLE DE LA PARTIE

*La région d'étude est sous l'influence de l'effet conjugué de l'aridité du climat, la géomorphologie (pente), la géologie du substratum, la nappe phréatique, l'irrigation par les eaux chargées et les vents de sable. Ces facteurs de pédogenèses font apparaître les grands traits de la pédogenèse des sols, gypseux, salés et à accumulations sableuses (**Pouget, 1989**). Ces formations favorisent l'apparition d'une végétation xérophyte structurée en plusieurs groupements de types : gypsophytes (*Limoniastrum guyonianum*); halophyte (*Salsola vermiculata*), et psamophytes (*Aristida pungens*).*

Le sous-bassin versant étudié forme une grande plaine qui tire son originalité et son identité de quatre caractéristiques essentielles. La première caractéristique tient en grande partie à la nature géologique. La seconde à l'influence de la nappe phréatique, les sols se différencient nettement tant au niveau du développement morphologique des profils qu'à celui des processus d'altération de la roche-mère. La troisième caractéristique majeure de cette région lui vient de la topographie qui est responsable de la répartition des paysages et de la différenciation des sols. La quatrième aux modes agricoles.

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

1 LA DISTRIBUTION SPATIALE DU GYPSE

1.1 VARIABILITE SPATIALE DES PROPRIETES PEDOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES

Les variations spatiales des propriétés pédologiques sont complexes. Ils peuvent avoir d'importantes conséquences pour ceux qui veulent décrire un sol dans un endroit donné. L'obtention de l'information sur des sols dans une région est donc essentielle, surtout dans une démarche d'identification de la variabilité spatiale d'une propriété du sol par exemple le % et forme du gypse à un endroit précis. Cette variabilité du sol détermine le potentiel du sol, qui est caractérisé par les principales constantes du milieu qui sont lié au sol, comme la profondeur, la topographie, etc. (Baret, 1999). Plusieurs travaux (Cassel et Bauer, 1975 ; Delhomme, 1979 ; Viera et al., 1981 ; Germinger et al., 1985) démontre qu'en réalité les propriétés des sols varient selon leur position dans l'espace.

1.1.1 Choix des toposéquences

La position des sondages est placée au préalable de façon à caractériser un maximum de situations dans chaque unité morphopédologique. Le relief, même peu prononcé, agit sur la pédogenèse en modifiant la circulation de l'eau. Les sols varient le long des pentes alors qu'ils restent identiques le long des courbes de niveau. Ces successions des sols constituent les chaînes de sols, appelées aussi toposéquence (Duchaufour, 2005). Le plus souvent, pour apprécier cette variabilité spatiale du sol, les sondages sont situés le long d'un transect orienté qui part du sommet du versant vers le cours d'eau. Dans notre présente étude, quatre (04) toposéquences selon un axe transversal de plus grandes pentes NO-SE en allant du piedmont de djebel Boughzel jusqu'à la dépression endoréique (sebkha d'Oumache) ont été effectuée. Les sondages sont situés à partir d'une carte topographique au 1/50 000 (INCT) et l'image satellite (LANDSAT 7) qui permet une vision plus précise du relief (courbes de niveau), des réseaux hydrologiques, l'urbain et, la palmeraie. L'élaboration d'une bonne stratégie d'échantillonnage est importante puisqu'elle détermine le degré de précision des valeurs estimées. La précision obtenue croît généralement avec le nombre d'échantillons. Cependant, le coût d'obtention en temps et en argent croît également. Il faut donc établir un compromis entre la précision désirée à un coût minimum tout en tentant d'atteindre la meilleure précision possible.

1.1.2 Plan d'échantillonnage

Il existe plusieurs dispositifs d'échantillonnage des sols comme l'échantillonnage complètement aléatoire, l'échantillonnage systématique à l'aide d'une grille de référence et l'échantillonnage stratifié. L'échantillonnage complètement aléatoire, bien qu'il s'agisse du dispositif d'échantillonnage le plus conforme aux règles qui gouvernent la théorie d'échantillonnage, n'est pas le plus efficace. Il présente le désavantage de sûr échantillonner certaines zones du champ et d'en négliger d'autres, ce qui diminue la qualité de l'interpolation.

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

L'échantillonnage systématique avec grille de référence permet, quant à lui, de remédier à cette problématique puisque la grille permet une distribution uniforme des points d'échantillonnage (**Legros**, 1996). La cartographie par grille qui suit un procédé d'échantillonnage systématique demande un nombre important d'observations. De plus, elle n'intègre pas la notion de toposéquence qui permet au pédologue de mieux comprendre la pédogenèse et le fonctionnement des sols.

L'échantillonnage stratifié permet d'établir une densité d'échantillonnage proportionnel à la variabilité des descripteurs à l'étude. Cette stratification doit cependant reposer sur des variables auxiliaires qui présentent une certaine relation spatiale ou causale avec la propriété étudiée.

1.1.3 Acquisition de données de sol

1.1.3.1 Collecte et analyse préalable de l'information

Les données qui seront observées, collectées puis analysées constituent la matière première des méthodes d'interpolation. En géostatistique, elles ont la particularité d'être géoréférencées, c'est-à-dire localisées par GPS.

1.1.3.1.1 Les mesures pédologiques

107 Sondages pédologiques ont été opérés entre 2007 et 2008 sur le site au moyen d'une tarière à main le long de quatre transects orientés du nord vers le sud sur une longueur de 10 Km, formant un quadrillage irrégulier d'environ 500 m, établis avec un échantillonnage mixte (aléatoire et systématique) (figure N°129) dont 27 profils. Les relevés ont été effectués en fonction de l'homogénéité topographique. Les sondages sont identifiés spatialement à l'aide d'un système GPS (Garmin). Outre les coordonnées des sondages et des fosses ouvertes, une étude des propriétés morphostructurales de la couche de surface (0-10 cm) a d'abord été effectuée (couleur Munsell, rugosité)... sur terrain, puis des prélèvements d'échantillons ont été réalisés et analysés au laboratoire. Le calcaire total a été déterminé par la méthode de calcimètre de Bernard, là CE avec un rapport 1/5, le ph eau avec un rapport 1/2.5, la granulométrie par la méthode internationale de la pipette de Robinson et le dosage du gypse sont effectués par l'utilisation de l'acétone avec un rapport sol-eau de 1/500 d'après la méthode de **Richard (1954)**. Une base de données intégrant toutes les données des sondages disponibles a été construite sous SIG (ArcGIS 9.3).

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

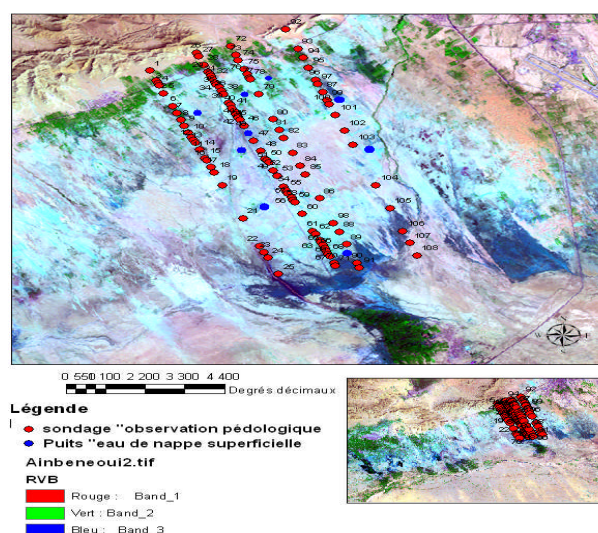


Figure 129- Localisation des transects et les sondages dans la région d'étude

1.1.3.1.2 Acquisition de données hydrologique (point d'eau)

La composante hydrologique et aussi étudiée, neuf (09) point d'eau ont été localisés (GPS) et analysés (figure N°129).

Les données de terrain sont saisies selon le modèle STIPA¹ (INRA, 2003) directement dans une Geodatabase sous SIG où une modélisation par réseaux de neurones artificiels (ANN) du tableau sondages (variables chimiques) et topographiques ont été réalisées.

1.2 ÉTUDE STATISTIQUE DES SONDRAGES PEDOLOGIQUES

Les échantillons de sols et des points d'eau observés et analysés au laboratoire (des deux horizons) vont d'abord être étudiés d'un point de vue strictement statistique (liaisons entre variables, proximité géographique ...).

Les principales méthodes statistiques utilisées pour analyser ces données :

- ✓ les méthodes descriptives ou la statistique descriptive,
- ✓ classification par les réseaux de neurones artificiels (ANN) pour déterminer ou de classer les facteurs par ordre d'influences sur la répartition des variables.

Au total on dispose de 107 sondages réalisés sous la forme de 4 toposéquences perpendiculaires aux courbes de niveau. La distance entre les sondages et les lignes est variable. Elle est de 500 à 900 m. Chaque toposéquence comportait de 10 à 15 sondages de

¹ Système de Transfert de l'Information Pédologique et Agronomique. Ce système comprend un manuel précisant les variables et les codes pour la description des sols. Il comprend également des programmes de gestion informatique des données. STIPA a fait l'objet de nombreuses collaborations internationales et est utilisé dans les pays francophones d'Afrique.

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

mesures. Compte tenu des variations topographiques et aussi l'accès quelquefois difficile aux parcelles (habitation et oasis), les distances non pas étaient respectées. Nous avons utilisé la plate-forme du logiciel Statistica 8.

1.2.1 Statistiques descriptives

Les méthodes de la « statistique descriptive » sont les premières étapes indispensables à l'analyse d'un bloc de données. Elles consistent à décrire une réalité difficile à définir, car comportent une grande part d'aléatoire. Elle est considérée comme un travail de simplification par le calcul des paramètres définie, à l'issue de cette étude, nous aurons calculé:

- ❖ les paramètres de position tels : la moyenne, la médiane ; les quartiles et percentiles ;
- ❖ les paramètres de dispersion, telle l'étendue, la variance, et l'écart-type ;
- ❖ le coefficient de variation rapport de l'écart-type à la moyenne.

Le tableau N°35 synthétise, pour chacune des (09) variables étudiées, les principaux paramètres statistiques concernant l'ensemble des données des sondages pédologiques (paramètres physicochimiques des sols), et les paramètres du milieu physique (altitude).

Tableau 35- Statistiques descriptives des 107 échnatillons

Variable	Descriptive Statistics (echensolessai3mars.sta)											
	Valid N	Mean	Median	Mode	Frequency of Mode	Sum	Minimum	Maximum	Variance	Std.Dev.	Coef.Var.	Standard Error
CaSO4,2H2O	107	49,11215	47,40000	55,00000	4	5255,000	10,50000	89,4000	287,5699	16,95789	34,52890	1,639381
CaCO3	107	9,64486	11,00000	12,00000	13	1032,000	2,00000	19,0000	21,8727	4,67682	48,49033	0,452126
CE	107	7,34860	7,50000	7,500000	7	786,300	0,20000	19,8000	15,1240	3,88896	52,92115	0,375960
pH	107	7,79720	7,80000	7,800000	32	834,300	7,10000	8,4000	0,0474	0,21782	2,79355	0,021057
Sable	107	80,85981	88,00000	95,00000	17	8652,000	31,00000	99,0000	317,4990	17,81850	22,03629	1,722580
Limon	107	9,45794	6,00000	2,000000	31	1012,000	1,00000	36,0000	71,8543	8,47669	89,62513	0,819473
Argile	107	9,94393	6,00000	4,000000	36	1064,000	2,00000	38,0000	64,3553	8,02218	80,67414	0,775533
Altitude	107	79,06542	78,00000	63,00000	6	8460,000	43,00000	146,0000	575,5523	23,99067	30,34281	2,319266
CEC	107	7,75187	8,10000	8,100000	12	829,450	3,96000	11,0000	1,9880	1,40998	18,18885	0,136308

Les moyennes des % de gypses obtenus sont supérieures aux médianes, ce qui met en évidence l'influence de valeurs extrêmes élevées. Les écarts relatifs " l'écart relatif étant défini comme le rapport : (moyenne - médiane) -moyenne" présente en effet des valeurs positives faibles notamment pour les % de gypse obtenu entre deux sondages. On notera cependant que les écarts entre la valeur de la moyenne et de la médiane pour le gypse sont de 1.71%, cette observation associée à la valeur d'écart-type relativement élevée qui est de 16.95 %.

1.2.1.1 Matrice des corrélations

Le coefficient de corrélation linéaire indique la force de la liaison linéaire entre deux variables continues. Ce coefficient prend des valeurs comprises entre -1 et 1 (tableau N°36).

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

Tableau 36- Matrice de corrélation des 107 échantillons.

Correlations (echensolessai3mars.sta)											
Marked correlations are significant at $p < .05000$											
N=107 (Casewise deletion of missing data) CumulativePe											
Variable	Means	Std.Dev.	CaSO4,2H2O	CaCO3	CE	pH	Sable	Limon	Argile	Altitude	CEC
CaSO4,2H2O	49,11215	16,95789	1,000000								
CaCO3	9,64486	4,67682	0,006823	1,000000							
CE	7,34860	3,88896	0,112883	-0,081981	1,000000						
pH	7,79720	0,21782	0,292115	0,031426	0,576833	1,000000					
Sable	80,85981	17,81850	-0,046667	0,317281	0,135396	0,272134	1,000000				
Limon	9,45794	8,47669	0,132919	-0,316162	0,061905	-0,054991	-0,465329	1,000000			
Argile	9,94393	8,02218	-0,120895	-0,392043	0,112517	-0,178255	-0,353013	0,206398	1,000000		
Altitude	79,06542	23,99067	-0,336016	0,235301	-0,499201	-0,242060	0,176771	-0,454493	-0,223750	1,000000	
CEC	7,75187	1,40998	0,303425	-0,218286	0,340736	0,103874	-0,008048	0,264754	0,190314	-0,528880	1,000000

Plus le coefficient prend, en valeur absolue, une valeur proche de 1, plus la liaison linéaire entre les deux variables est forte (corrélation positive (1) ou négative (-1) selon que le coefficient est positif ou négatif). En valeur absolue, à une valeur élevée de l'une des variables, on associe une valeur élevée de la deuxième.

Si le coefficient prend une valeur proche de 0, cela indique qu'il n'y a pas de liaison linéaire entre les variables. La relation peut être d'un autre ordre, mais en tout cas, elle n'est pas linéaire.

2 LOCALISATION DE LA DISTRIBUTION SPATIALE DES SOLS GYPSEUX PAR LES METHODES GEOSTATISTIQUES

2.1 Analyse exploratoire des données spatiales

L'analyse exploratoire des données est la clé de voûte de la démarche géostatistique. En effet, c'est au cours de cette phase que se fait l'essentiel du travail. À travers le calcul et la visualisation d'outils de statistiques élémentaires (tableau N°37). Pour l'étude des distributions des variables, on s'intéresse aux paramètres de position (moyenne et médiane), ceux de dispersion (la variance, l'écart-type et le coefficient de variation) et enfin aux paramètres de forme le coefficient d'aplatissement (la kurtose) et de symétrie (skewness) (tableau N°38). Le but est de vérifier l'homogénéité des données ou la normalité des données. Si ce n'est pas le cas, une transformation logarithmique est envisagée dans les cas appropriés pour rendre la distribution normale, cette dernière condition étant recommandée pour effectuer le krigeage.

Tableau 37- Les principales statistiques relatives aux variables (Caso4- 2H2O), CaCo3, CE, pH et l'altitude pour les 107 échantillons

Descriptive Statistics (echensolessai3mars.sta)												
Variable	Valid N	Mean	Median	Mode	Frequency of Mode	Sum	Minimum	Maximum	Variance	Std.Dev.	Coef.Var.	Standard Error
CaSO4,2H2O	107	49,11215	47,40000	55,00000	4	5255,000	10,50000	89,4000	287,5699	16,95789	34,52890	1,639381
CaCO3	107	9,64486	11,00000	12,00000	13	1032,000	2,00000	19,0000	21,8727	4,67682	48,49033	0,452126
CE	107	7,34860	7,50000	7,500000	7	786,300	0,20000	19,8000	15,1240	3,88896	52,92115	0,375960
pH	107	7,79720	7,80000	7,800000	32	834,300	7,10000	8,4000	0,0474	0,21782	2,79355	0,021057
Sable	107	80,85981	88,00000	95,00000	17	8652,000	31,00000	99,0000	317,4990	17,81850	22,03629	1,722580
Limon	107	9,45794	6,00000	2,000000	31	1012,000	1,00000	36,0000	71,8543	8,47669	89,62513	0,819473
Argile	107	9,94393	6,00000	4,000000	36	1064,000	2,00000	38,0000	64,3553	8,02218	80,67414	0,775533
Altitude	107	79,06542	78,00000	63,00000	6	8460,000	43,00000	146,0000	575,5523	23,99067	30,34281	2,319266

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

Tableau 38- paramètres de forme le coefficient d'aplatissement (la kurtose) et de symétrie (skewness) du gypse.

Count	: 107	Skewness	: -0,171
Min	: 10,5	Kurtosis	: 2,6764
Max	: 89,4	1-st Quartile	: 40,775
Mean	: 49,112	Median	: 47,4
Std. Dev.	: 16,958	3-rd Quartile	: 61,075

2.1.1 Évaluation des données statistiques

Le tableau N°37 synthétise, pour chacune des (09) variables étudiées, les principaux paramètres statistiques concernant l'ensemble des données des sondages pédologiques (paramètres physicochimiques des sols), et la variable supplémentaire du milieu physique (Altitude).

Les moyennes des % de gypses obtenus sont supérieures aux médianes, ce qui met en évidence l'influence de valeurs extrêmes élevées. Les écarts relatifs " l'écart relatif étant défini comme le rapport : (moyenne - médiane) / moyenne, présente en effet des valeurs positives faibles notamment pour les % de gypse obtenu entre deux sondages. On notera cependant que les écarts entre la valeur de la moyenne et de la médiane pour le gypse sont de 1.71%, cette observation associée à la valeur d'écart-type relativement élevée qui est 16.95 %.

2.1.1.1 Matrice des corrélations

Le coefficient de corrélation linéaire indique la force de la liaison linéaire entre deux variables continues. Ce coefficient prend des valeurs comprises entre -1 et 1 (tableau N°39).

Tableau N°39- Matrice de corrélation des 107 échantillons.

Variable	Correlations (echensolessai3mars.sta)									
	Means	Std.Dev.	CaSO4,2H2O	CaCO3	CE	pH	Sable	Limon	Argile	Altitude
CaSO4,2H2O	49,1121	16,9578	1,00000							
CaCO3	9,6448	4,6768	0,00682	1,00000						
CE	7,3486	3,8889	0,11288	-0,08198	1,00000					
pH	7,7972	0,2178	0,29211	0,03142	0,57683	1,00000				
Sable	80,8598	17,8185	-0,04666	0,31728	0,13539	0,27213	1,00000			
Limon	9,4579	8,4766	0,13291	-0,31616	0,06190	-0,05499	-0,46532	1,00000		
Argile	9,9439	8,0221	-0,12089	-0,39204	0,11251	-0,17825	-0,35301	0,20639	1,00000	
Altitude	79,0654	23,9906	-0,33601	0,23530	-0,49920	-0,24206	0,17677	-0,45449	-0,22375	1,00000

Plus le coefficient prend, en valeur absolue, une valeur proche de 1, plus la liaison linéaire entre les deux variables est forte (corrélation positive (1) ou négative (-1) selon que le coefficient est positif ou négatif). En valeur absolue, à une valeur élevée de l'une des variables, on associe une valeur élevée de la deuxième.

Si le coefficient prend une valeur proche de 0, cela indique qu'il n'y a pas de liaison

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

linéaire entre les variables. La relation peut être d'un autre ordre, mais en tout cas, elle n'est pas linéaire.

2.1.1.2 L'examen des distributions de données en utilisant l'histogramme

L'histogramme est un moyen simple et rapide de représenter la distribution d'une variable i.e la répartition des fréquences d'apparition de celle-ci. Il peut permettre de détecter d'éventuelles anomalies et d'étudier la dispersion de la variable : Valeurs extrêmes misent en évidence de sous population distincte, etc.

L'étude de l'histogramme permet :

- d'apprécier la variabilité des données
- de détecter d'éventuelles valeurs aberrantes.

Afin de réaliser cet histogramme (Figure N°130), La première opération est de déterminer le nombre de classes de l'histogramme². Généralement, dans le cadre d'une analyse de ce type, on utilise des classes de largeur identique.

Le nombre de classes dépend du nombre de valeurs N dont on dispose.

Le nombre de classes K peut être déterminé par la formule suivante :

$$K = 1 + \frac{10 \log(N)}{3} \quad \text{Équation 22}$$

Ou plus simplement

$$K = \sqrt{N} \quad \text{Équation 23}$$

Avec : K= nombre de classes

N= nombre d'échantillons.

Étant donné que nous disposons de 107 échantillons, le nombre de classes trouvé est donc égal à 10.34. Cependant, l'histogramme étant un outil visuel, il est possible de faire varier K. Cela permet de voir l'histogramme avec un nombre différent de classes et ainsi de trouver le meilleur compromis qui facilitera l'interprétation. On a donc choisi de répartir nos valeurs en six classes, afin d'obtenir une courbe plus ou moins symétrique.

² Source: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=72369145>

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

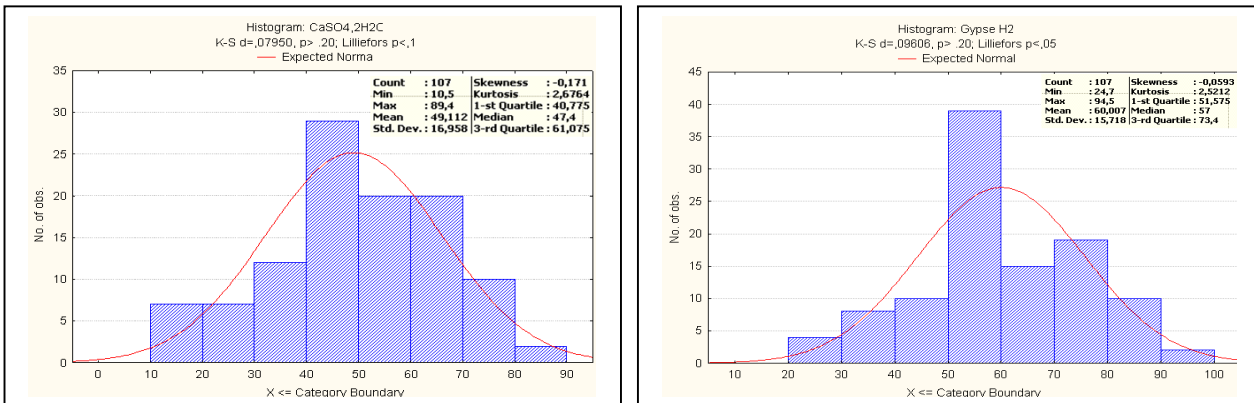


Figure 130- histogramme de fréquence du gypse de l'horizon de surface à gauche ; l'horizon de profondeur à droite

2.1.1.2.1 Le diagramme de probabilité Q-Qplot (Quantile-Quantile plot)

Le diagramme Q-Qplot met en relation les données de la variable en ordonnée, avec les valeurs de la loi normale en abscisse. L'objectif est là aussi de voir si la distribution de la variable se rapproche d'une distribution normale centrée réduite.

La distribution est considérée comme normale lorsque les points de ses quantiles s'alignent parfaitement sur une droite (qui peut dans certains cas être la bissectrice) ou sont très rapprochés de celle-ci. Des tests de normalité peuvent être réalisés pour la vérification.

D'après le graphe obtenu (Figure N°131), on peut dire que notre série statistique suit une loi normale, car la plupart des observations sont alignées sur la droite à l'exception de deux points qui sont relativement éloignés.

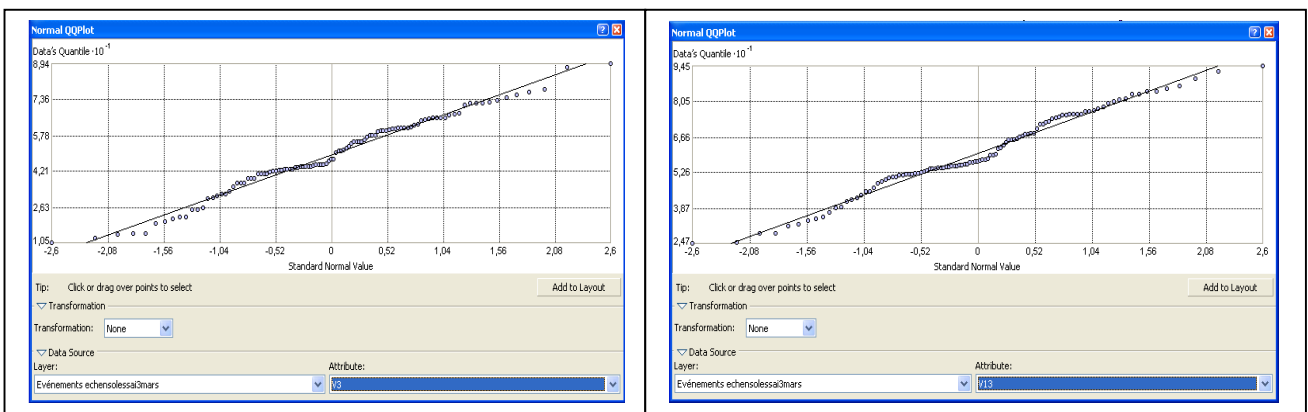


Figure 131- le box plot QQles du gypse de l'horizon de surface à gauche ; l'horizon de profondeur à droite.

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

2.1.1.2.1.1 Le coefficient d'asymétrie et la kurtose

Le coefficient d'asymétrie et la kurtose sont deux indices centrés à zéro, permettant d'accepter ou de rejeter l'hypothèse de normalité des données. Le coefficient d'asymétrie permet de déterminer les déviations de la symétrie de la distribution étudiée, tandis que la kurtose fait référence à la similarité existant entre la courbe en forme de cloche de la loi normale et la courbe de la distribution étudiée. L'erreur standard de chacun des indices permet de déterminer si la valeur des indicateurs est extrême. Une valeur est considérée comme extrême, si l'intervalle produit par plus ou moins deux fois l'erreur associée à ces paramètres, n'inclut pas zéro [SYSTAT, 1992].

Les résultats des indices, coefficient d'asymétrie et kurtose, ainsi que l'analyse visuelle des distributions de fréquences, de chacune des variables obtenues, indiquent un non-respect de la normalité de la distribution, i.e. Tous les histogrammes ont montré une allure très asymétrique. Une transformation logarithmique a été appliquée à des données biaisées, et dans ce cas, les transformations obtenues ont une distribution proche à la normale. L'examen des valeurs des moyennes et des médianes des données du gypse et du calcaire, là CE et le pH (figures ci-dessous) montre qu'ils sont très proches. Néanmoins, on remarque des valeurs extrêmes dans les extrémités des histogrammes (figure N°130) à gauche des % faibles à droite des % forts.

2.2 ETABLISSEMENT DES CARTES PAR KRIGEAGE

2.2.1 Modélisation de la structuration spatiale

L'utilitaire de la géostatistique dans ArcMap (Geostatistical Analyst) va servir à générer la plupart des cartes factorielles produites à partir de données ponctuelles (analyses physico-chimiques des sols), autant des différentes autres variables. Les cartes générées vont être interpolées par krigeage ordinaire en tenant compte des paramètres des modèles variographiques obtenus préalablement avec le module geostatistical Analyst. Les semi-variogrammes ou variogrammes des observations ont été modélisés en tenant compte de l'anisotropie et de la stationnarité des données (transformation des données et réduction des tendances au besoin). Parmi les différents modèles variographiques essayés, le modèle sphérique, suivi du modèle gaussien et exponentiel, était les plus fréquemment retenus. La validation croisée (valeur prédite à l'endroit d'une valeur observée lorsque cette dernière est retirée du jeu d'observation) a servi de critère pour optimiser les modèles en termes des paramètres du modèle (portée, effet de pépité, pallier), de même qu'en matière de la sphère d'influence des données ont avoisinants.

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

2.2.1.1 Modélisation (calcul et ajustement) du semi-variogramme

Un semi-variogramme compare les distances entre des paires de points en entrée (axe des abscisses) et la variabilité (axe des ordonnées). Le semi-variogramme a été modélisé en tenant compte des points expérimentaux.

La semivariance est obtenue par calcul de la moyenne arithmétique des carrés des différences entre les points d'observation $Z(x)$ et $Z(x+h)$ séparés par la distance $h = x_i - x_j$:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Équation 24

$\gamma(h)$ est appelée la semivariance.

À partir de l'estimation du variogramme, on poursuit deux objectifs :

1. Déterminer les caractéristiques de la structure spatiale (le palier, la portée, et l'effet pépite) ;
2. Ajuster un modèle au variogramme expérimental (sphérique, exponentiel, gaussien..).

2.2.1.1.1 Propriétés du variogramme

Le variogramme est une fonction de h , croissante et souvent caractérisé par quatre paramètres (figure N°126):

- l'effet pépite : C_0 ;
- le palier : $C+C_0$;
- la portée : a .

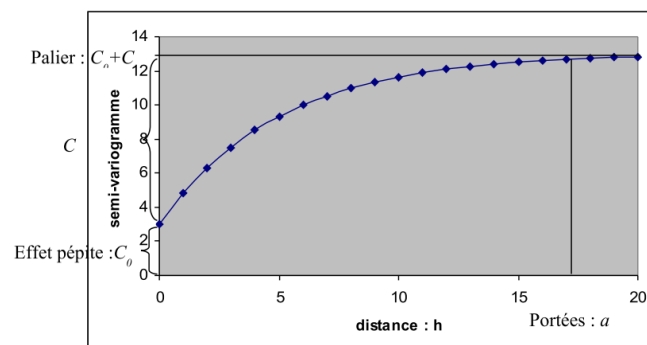


Figure 132- variogramme expérimentale

Remarque : plus la fonction croît, moins les observations se ressemblent.

- **L'effet de pépite :** Le comportement à l'origine du variogramme reflète le

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

degré de régularité spatiale de la variable régionalisée. Si le variogramme présente un saut abrupt à l'origine (effet de pépité), cela indique une absence partielle de corrélation entre les valeurs prises en deux sites très proches. C'est-à-dire qu'il y a une faible ressemblance entre les valeurs régionalisées très voisines.

- **Le palier** : Valeur du variogramme pour la distance égale à la portée.
- **La portée** : Distance où deux observations ne se ressemblent plus du tout. Leur covariance est nulle.

2.2.1.1.2 Modèle d'ajustements des variogrammes

Une fois le variogramme expérimental établi, il faut lui caler un modèle qui lui convient le mieux. Il n'est pas toujours facile de trouver le modèle théorique qui lui correspond. De ce fait, à partir de l'estimation du variogramme, deux objectifs sont en général assignés :

- la détermination des caractéristiques de la structure spatiale (tableau N°40)

Tableau 40- caractéristiques et modèle d'ajustements des variogrammes

	Effet de pépité	La portée_min	La portée_max	Le palier	Modèle d'ajustement
H1 (CaSO ₄ , 2H ₂ O)	149.4	1027.273	3068.2	123.24	Sphérique
H2 (CaSO ₄ , 2H ₂ O)	124.38	6169.02	2524.36	128.53	Sphérique

- l'ajustement d'un modèle au variogramme expérimental.

L'interprétation rigoureuse des variogrammes repose sur l'ajustement de ceux-ci aux modèles théoriques existants (sphérique, gaussien, exponentiel, puissance, linéaire, etc.) (figure N°133).

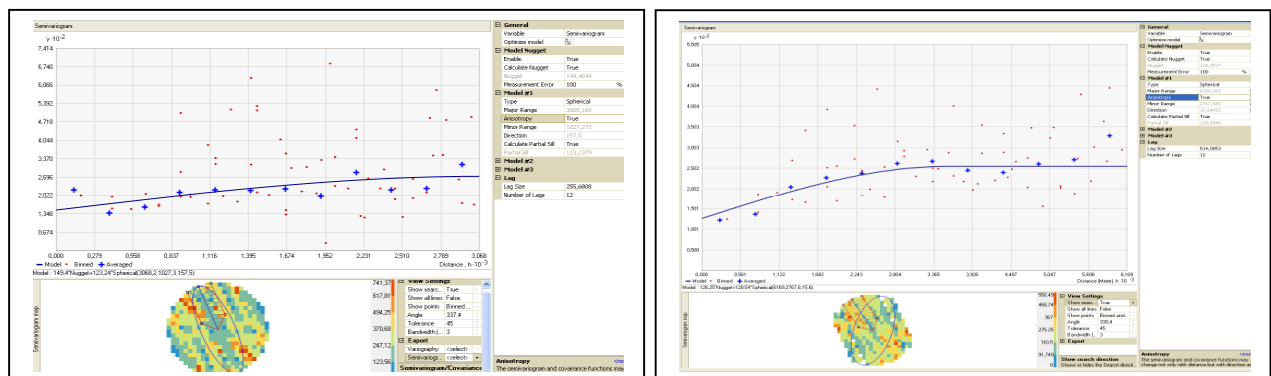


Figure 133- le variogramme du [CaSO₄, H₂O] de l'horizon de surface (à gauche) et celui du [CaSO₄, H₂O] de l'horizon de profondeur (à droite)

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

La semi-variance dépend de la distance et de la direction dont les caractéristiques sont les suivantes :

- ✓ la portée pour H1 ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) est de 3068.2 et de 2524.36 pour H2 ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$);
- ✓ le palier pour H1 ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) est de 123.24 et 128.53 pour H2 ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$);
- ✓ effet de pépite pour H1 ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) est de 149.4 et 124.38 pour H2 ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$);
- ✓ la Distance (lag) : 255 m pour H1 ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) et 514 m pour H2 ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$);
- ✓ Nombre of lags : 12
- ✓ Direction : 157.5 H1 et 104.41 H2

L'effet de pépites obtenu correspond à un écart-type, de l'ordre de 149.4 pour H1 ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) et 124.38 pour ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) H2, il faut alors rechercher son origine :

- soit dans l'erreur de mesure due au protocole expérimental. L'effort expérimental nécessaire pour déterminer l'origine de cet effet étant trop important, il n'a pas été entrepris dans le cadre de cette étude ;
- soit dans une variation à faible distance des caractéristiques physicochimiques du sol ;
- soit dans le nombre insuffisant de couples de mesures à faible distance, introduisant éventuellement une incertitude sur la détermination de l'effet de pépite.

Le palier observé correspond à un écart-type à grande distance de l'ordre de 123.24 pour H1 ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) et 128.54 H2 ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$).

La portée_max observée, d'environ 3068.2 m pour H1 ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) et de 6169.27 m pour H2 ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), signifie qu'au-delà de ces distances, et à cette échelle d'observation, deux mesures de % de gypse sont indépendantes statistiquement.

La corrélation entre deux mesures augmente ensuite rapidement en-deçà de 3068.2 mètres pour H1 ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), elle est d'autant plus forte que deux points de mesure sont proches.

La connaissance de cette portée peut également être utilisée par la suite lors d'une caractérisation de la distribution des sols dans les sites ayant les mêmes propriétés. Il devient inutile de réaliser des mesures de ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) en surface à moins de 3068.2 mètres de distance. En effet, ces mesures seraient auto-corrélées, et un effort expérimental serait donc gaspillé pour obtenir une information redondante.

2.2.1.1.3 Validation croisée

Elle permet de choisir le modèle de krigeage qui donne l'erreur la plus faible possible entre la valeur observée et la valeur estimée (tableau N°41). La validation croisée écarte chaque

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

valeur observée $z(x_i)$ et l'estime par krigeage ($Z^*(x_i)$) à partir des points voisins en utilisant le modèle que l'on veut tester. Cette opération est répétée pour tous les points observés.

Les erreurs de la validation croisée sont déterminées par la différence $e(x_i) = Z^*(x_i) - z(x_i)$. A partir de ces erreurs d'interpolation, des indices sont calculés et permettent de juger de la qualité de l'estimation. Elle est définie par l'équation 25 :

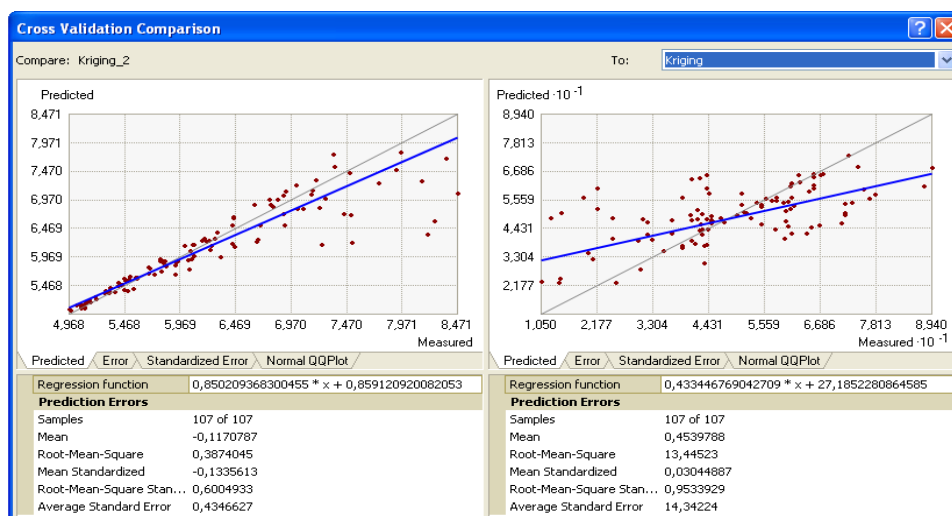
$$\sigma_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - z(x_i)) \quad \text{Équation 25}$$

Le but de cette étape est de minimiser cette moyenne et le modèle qui en donne la valeur la plus faible c'est-à-dire la plus proche de zéro est celui qui est retenu. Comme autre critère retenu pour la validation, l'on a le rapport moyen (qualifié aussi d'erreur réduite ou erreur standardisée) défini par le rapport de " l'erreur d'estimation- écart-type d'estimation " (**Boivin** et **Touma**, 1988). Nous avons aussi utilisé l'écart-type de l'erreur standardisée qui doit également être proche de 1 pour que l'interpolation soit meilleure.

Cette dernière étape sert à valider le choix du modèle qui s'ajuste le mieux à la structure du variogramme expérimental. Dans cette étude, on a retenu le modèle sphérique vu qu'il nous donne des paramètres satisfaisants :

- Moyenne de l'erreur : -0,0848.
- Ecart type de l'erreur : 0.2903
- Moyenne de l'écart type de krigeage : -0.1423.
- Moyenne de l'erreur réduite : 0.701
- Ecart type de l'erreur réduite : 0.43.

Tableau 41- validation croisée pour le modèle de krigeage



CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

Les paramètres obtenus avec le modèle exponentiel sont les suivants :

- Moyenne de l'erreur : 0.4539
- Ecart type de l'erreur : 13.734
- Moyenne de l'écart type de krigeage : 0.0304
- Moyenne de l'erreur réduite : 0.9533
- Ecart type de l'erreur réduite : 0.89.

On voit donc globalement que l'écart-type de l'erreur réduite se rapproche bien de 1, la précision de l'estimateur est donc assez bonne. Notre estimateur est également peu biaisé, car les moyennes de l'erreur réduite et de l'erreur sont faibles.

On présente ci-dessous le rapport des étapes et des choix de paramètres que nous avons faits tout au long de cette partie. Rappelons-nous que la carte finale est une carte des valeurs estimées, ces données ont la variance de l'erreur d'estimation minimale. On pense donc, compte tenu du bon résultat du test de validation croisée, que le modèle ajusté est une estimation raisonnable de la structure spatiale de la grandeur étudiée. Ce modèle a été utilisé pour calculer une carte de distribution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) de surface et de profondeur par krigeage.

Pour l'ensemble des modèles d'ajustement, la variation de la courbe des données observées est très proche de la courbe ajustée. Parmi les deux modèles testés, le sphérique s'est mieux ajusté au semi-variogramme que l'exponentiel. Les différentes valeurs obtenues de l'effet de pépite, la portée et le palier sont listés dans le tableau ci-dessous (Tableau N°42).

Tableau 42- Analyse du variogramme avec ces différentes caractéristiques et ces modèles

Parameter	Value
Input datasets	
Dataset	echensolessai3mars_Features
Location	C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau
Type	Feature Class
Data field	V3
Records	107
Method	Kriging
Type	Ordinary
Output type	Prediction
Dataset #	1
Trend type	None
Searching neighborhood	Standard
Type	Standard
Neighbors to include	5
Include at least	2
Sector type	Four and 45 degree
Angle	157,5
Major semiaxis	3068,1694575328656
Minor semiaxis	1027,2730447541815
Variogram	Semivariogram
Number of lags	12
Lag size	255,68078812773882
Nugget	149,404385636207
Measurement error %	100
ShiftON	No
Model type	Spherical
Range	3068,1694575328656
Anisotropy	Yes
Minor range	1027,2730447541815
Direction	157,5
Partial sill	123,23786654295802

2.2.1.1.4 Réalisation des cartes des % de gypse par estimation par krigeage

L'interpolation par krigeage génère des cartes d'isoteneurs des paramètres intrinsèque et extrinsèque des sols mesurés (figure 134 et 135). Elle présente la répartition spatiale du paramètre étudié.

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

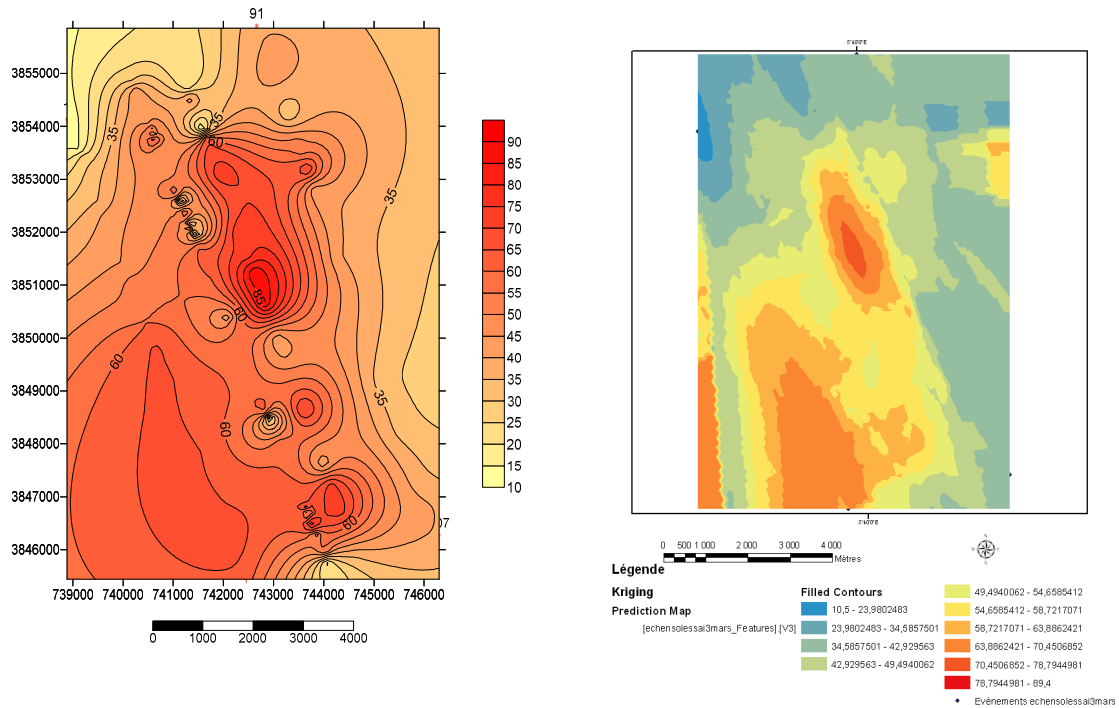


Figure 134- Carte factorielle de la distribution du gypse de l'horizon de surface par krigeage en 2 D: sous forme de courbes d'isoteneurs et b) en plages.

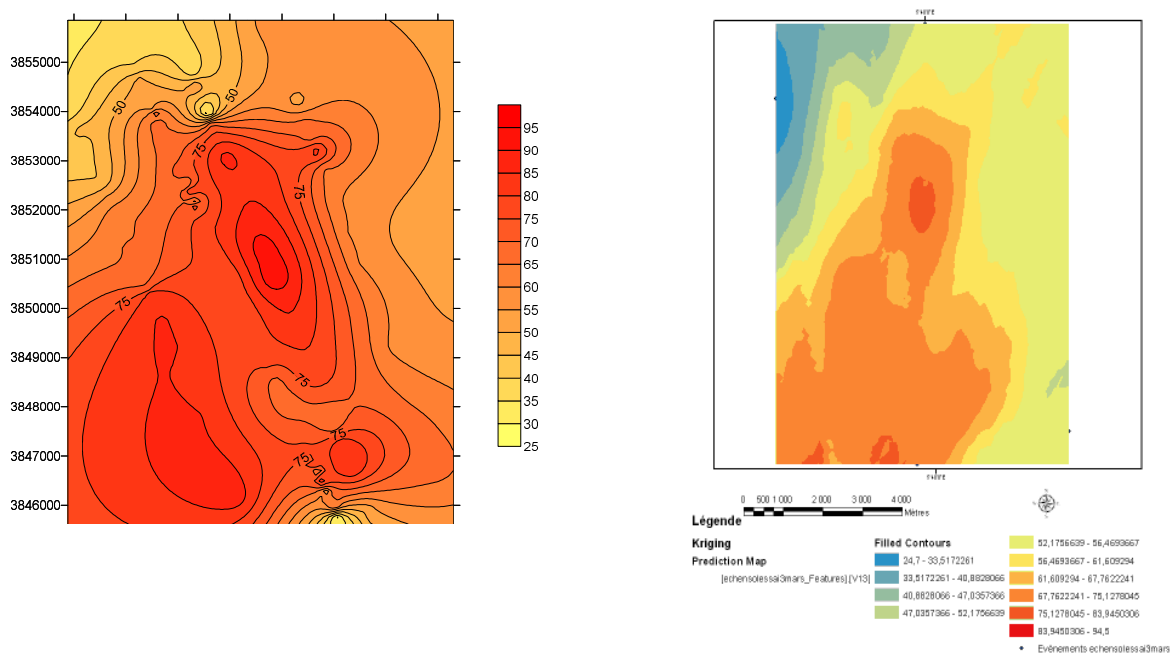


Figure 135- Cartes factorielles de la distribution du gypse de l'horizon de profondeur par krigeage en 2 D : a) sous forme de courbes d'isoteneurs et b) en plages.

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

Pour le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), les concentrations cartographiées reflètent bien un certain logique terrain, tant dans la répartition spatiale du gypse en surface (H1) que celle en profondeur. Les concentrations les plus fortes se retrouvent localisées au centre de la région et vont décroissant à mesure que l'on s'en éloigne. Il est à noter que le taux de concentration se différencie selon la position (microtopographie). Il ressort notamment une diminution du % de gypse du côté Nord-ouest de la région comparativement au côté nord-est. Cette configuration est liée à la nature du sol par le contexte topographique (figure N°136). On remarquera également une décroissance plus rapide de la concentration % de gypse à mesure que l'on s'éloigne du centre de la région qui confirme les schémas spécifiques de corrélation spatiale établie par l'analyse variographique du gypse.

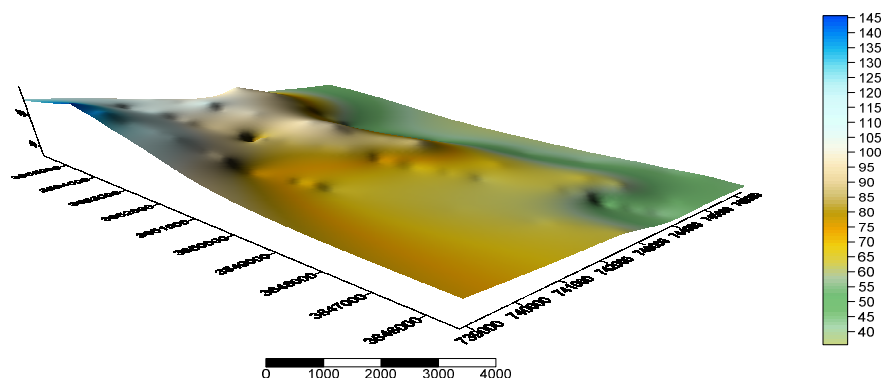


Figure 136 - Carte factorielle des altitudes en 3 D.

2.2.2 Auto corrélation spatiale et les influences directionnelles

Les semi-variogrammes sont ajustés par un modèle sphérique. Il présente un accroissement plus progressivement ensuite, il s'aplatit. L'autocorrélation spatiale des concentrations du gypse est assez bien représentée, surtout sur de courtes distances (quels sont les plus importants pour l'interpolation), le semi-variogramme est faible au début à de courtes distances et augmente avec la distance (plus on s'éloigne, plus les valeurs de concentration du gypse sont plus dissemblables). Cette dissemblance dans les valeurs du gypse augmente plus rapidement dans le sens nord-est sud-ouest ainsi que dans le sens nord-sud. Plus tôt, il semble qu'il existe une composante directionnelle à l'autocorrélation ou une anisotropie. Cette dernière est observée sur les cartes de distribution des concentrations des gypses. Les cartes montrent une structuration spatiale très anisotropique et dépendante des propriétés topographiques et de l'influence de la nappe phréatique. Cette structuration est d'autant plus nette que l'on observe les trois grandes unités physiographiques qui constituent la région. La topographie est l'un des principaux facteurs permettant de déterminer le niveau et la distribution spatiale des sels des sols (Florinsky et al. 2000), on constate également, qu'il y a une relation étroite entre les propriétés du sol (% du gypse, % calcaire, la CE et le pH) et la morphologie du paysage (Altitude). Ces derniers sont tous liés au régime hydrique du sol (ruissellement en surface et la fluctuation de la nappe phréatique). Donc, les caractéristiques

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

géomorphologiques influencent directement le mouvement de l'eau (**Goddard** et al., 1996, et **Bourenane** et al., 1996).

La figure N°137, indique une tendance dans la direction nord-ouest sud-est avec un angle de 147 et une évolution plus progressive dans le sens nord-sud (ce qui provoque la forme d'ellipse).

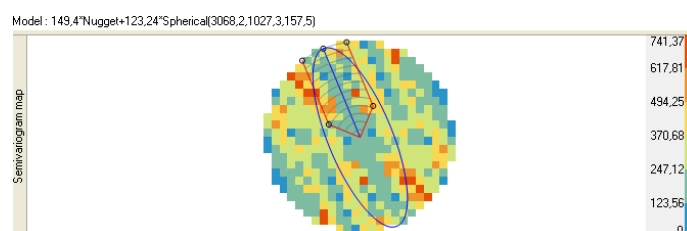


Figure 137- Ellipse bleue ou l'ellipse anisotropique, elle indique la direction de changement d'autocorrélation

La tendance nord-ouest -sud-est de la teneur en gypse peut, être attribuée à une accumulation du gypse dans la partie centre de la région entre le piedmont et la dépression. L'altitude et la profondeur de la nappe phréatique sont des facteurs qui contribuent aux valeurs relativement fortes dans la partie centrale de la région d'étude et faible sur les piedmonts des montagnes et au niveau de la surface de la sebkha.

Pour les taux (%) de gypse de profondeur, le semi-variogramme est faible au début à de courtes distances (gypse valeurs mesurées à des endroits qui sont proches les uns sont semblables) et augmentent avec la distance. Cette dissemblance dans les valeurs du gypse augmente plus rapidement dans le sens est-ouest que dans le sens nord - sud avec un angle de 45°. Plus tôt, il semble qu'il existe une composante directionnelle latérale (figure N°138).

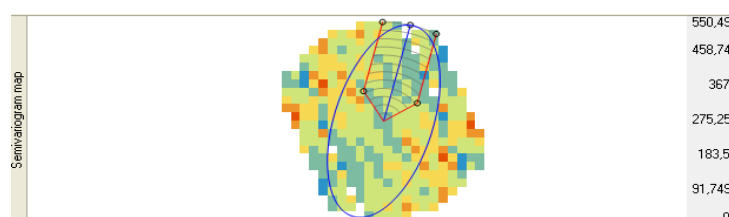


Figure 138- Ellipses bleues ou l'ellipse anisotropique, elle indique la direction de changement d'autocorrélation

Anisotropie peut être causée par le vent, ou le ruissellement, ou bien à une grande variété d'autres processus. L'influence de direction ne peut être quantifié et statistiquement représenté sur la carte.

Une analyse d'anisotropie a été réalisée sur les différents autres paramètres pour tenir compte de l'influence directionnelle d'autocorrélation dans la surface de sortie.

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

2.2.3 Analyse thématique

La superposition des cartes factorielles (figure N°139) où couches thématiques nous ont permis de tirer des informations très utiles et de décrire les relations qui existent entre les formes de gypse de surface et certains paramètres du sol et d'altitude (figure N°140).

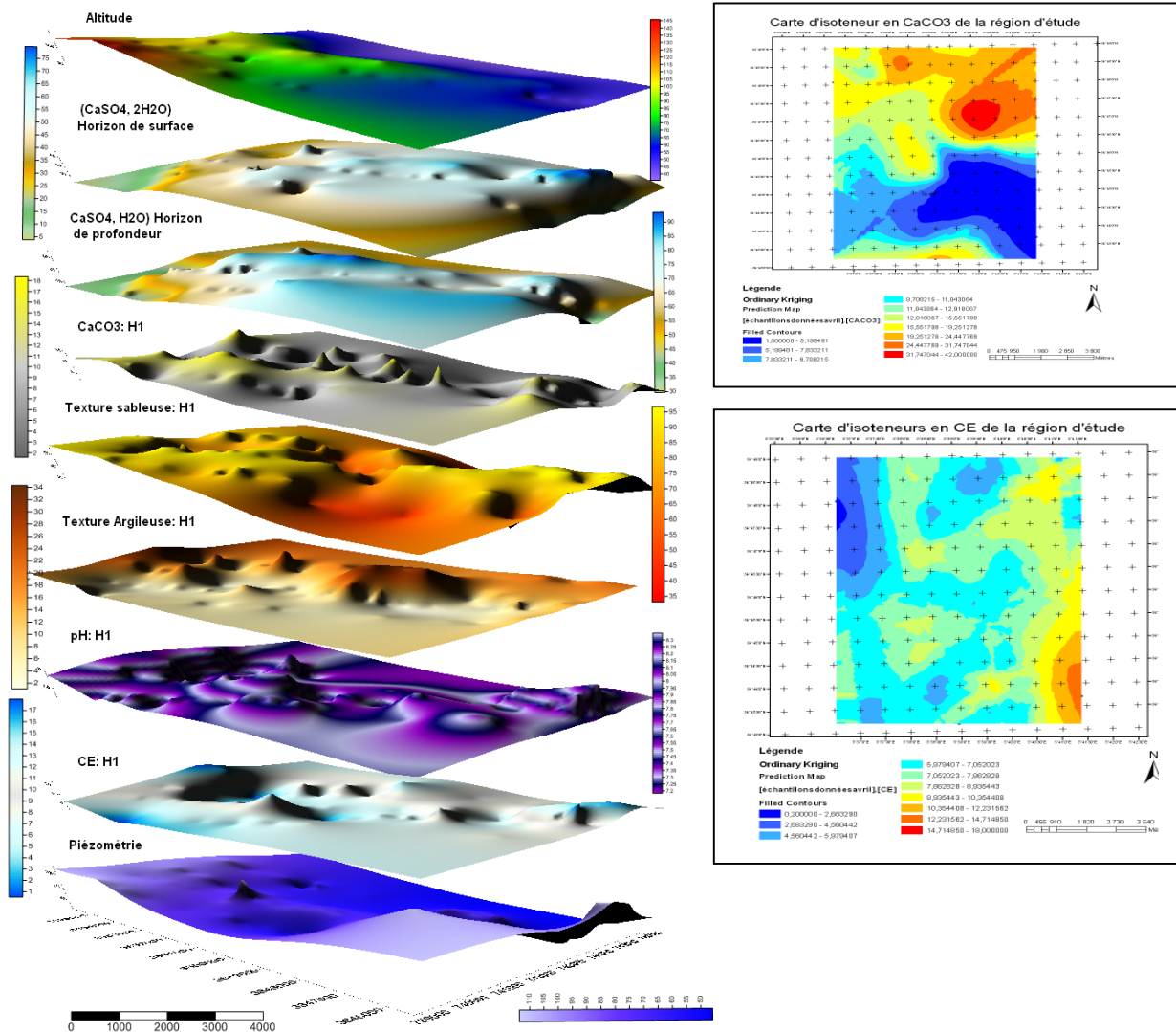


Figure 139- Superpositions des cartes factorielles en 3D et les cartes factorielles en 2D.

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

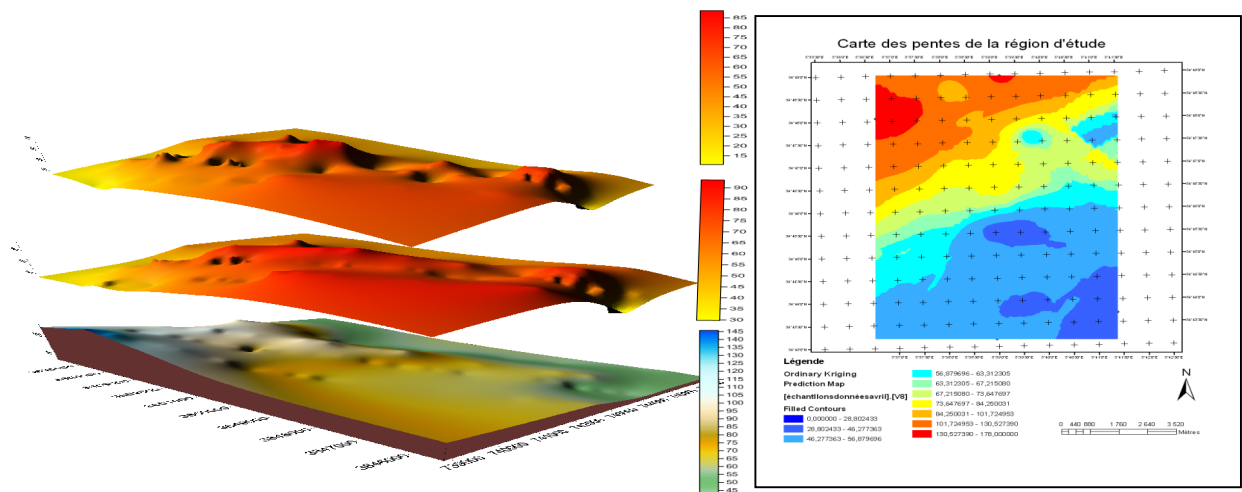


Figure 140- Superposition de trois cartes factorielles en 3D de haut en bas % de gypse en surface, en profondeur et l'altitude et la carte factorielle 2D des pentes.

Les concentrations du gypse dans l'horizon de surface (0-20 cm) vont en croissant graduellement à l'inverse de la teneur en calcaire total à mesure que l'on s'éloigne des piedmonts vers les zones avec endoréisme, la sebkhia d'Oumache (figure N°140). Il ressort singulièrement une diminution des teneurs en gypse du côté nord-est de la région comparativement au côté nord-ouest. Par contre, la partie centrale de la région présente des concentrations en gypses les plus importants. On observe par ailleurs que la CE augmente graduellement en direction de la sebkhia. Également, on remarque une croissance plus rapide de la concentration pour les carbonates à mesure que l'on s'éloigne du centre de la région qui confirme les schémas spécifiques de corrélation spatiale établie par l'analyse variographique des deux sels le gypse et le calcaire.

On enregistre aussi, que là où le sol présente une texture sableuse, là CE reste faible (le centre de la région et les piedmonts des djebels) et là où la CE est élevé, la texture du sol présente un taux élevé en argile, le cas de la bordure de la cuvette de la sebkhia d'Oumache où là CE mesurée était la plus élevée. Donc, on peut dire que la CE est en étroite relation avec la texture du sol (**Jacobs et Dunn, 1998**). La CE est non seulement influencé par les propriétés physiques du sol, mais elle est aussi fonction de certaines propriétés chimiques de celle-ci, entre autres, le pH et la capacité d'échange cationique (**Jacobs et Dunn, 1998**). De plus, la CE est influencée par le contenu en eau du sol (**Jacobs et Dun, 1998**), la salinité et le matériel parental (**Fritz et al, 1999**).

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

Les sulfates et les carbonates ont un effet important sur le pH de sol. Le pH des sols gypseux et calcaires est principalement contrôlé par la quantité de carbonates de calcium dans le profil de sol qui fluctue souvent entre 7.5 à 8.5.

La superposition des cartes d'isoteneurs créée avec les cartes factorielles " altitude, pente, géologie, piézométrie de la nappe phréatique" sous SIG (figure N°141) a démontré que les différents types de sels ont un dépôt préférentiel selon la topographie, la géologie et la fluctuation de la nappe phréatique.

Sur les glacis, dominés par les formations gypsides à texture sableuse (placage éolien sur les versants d'exposition sud), la teneur en gypse est moyenne à forte. Le profil présente une croûte gypseuse, le calcaire et sous forme des nodules et pseudo-mycélium avec une teneur en calcaire total qui varie de 9 % à 19 %.

Sur les bas glacis, la teneur en gypse en surface est très forte (60 %), ce qui correspond aux formations d'encroûtement de gypseuse, attribuée au quaternaire récent (**Gouscov**, 1964). Ces formations sont caractérisées par une forte accumulation dès la surface et dans la partie moyenne et profonde du profil, de couleur blanchâtre poudreuse (7.5 YR 8/2), l'horizon de surface (0-4 cm) très minces, humifères de texture limono-sableuse, reposant sur l'horizon petrogypsic, la teneur en calcaire et faible. Les plus fortes concentrations (90 %) se trouvent localisées au centre de la région, au niveau de la plaine alluviale où sont situées les principales plantations de palmiers dattiers d'El Hadjeb et de Bouchagroun, correspondant à la classe des sols à horizons petrogypsic très compacts avec une texture sableuse à sablo-limoneuse avec des teneurs en calcaire très faible. Les concentrations de gypse vont par la suite en décadence à mesure que l'on se rapproche des zones avec endoréisme (la sebkha d'Oumache), en même temps que l'existence des sols à croûtes et encroûtement de nappe profonde légèrement hydromorphe à texture essentiellement composée d'argile, du limon et du sable (7.5 YR 5/3).

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

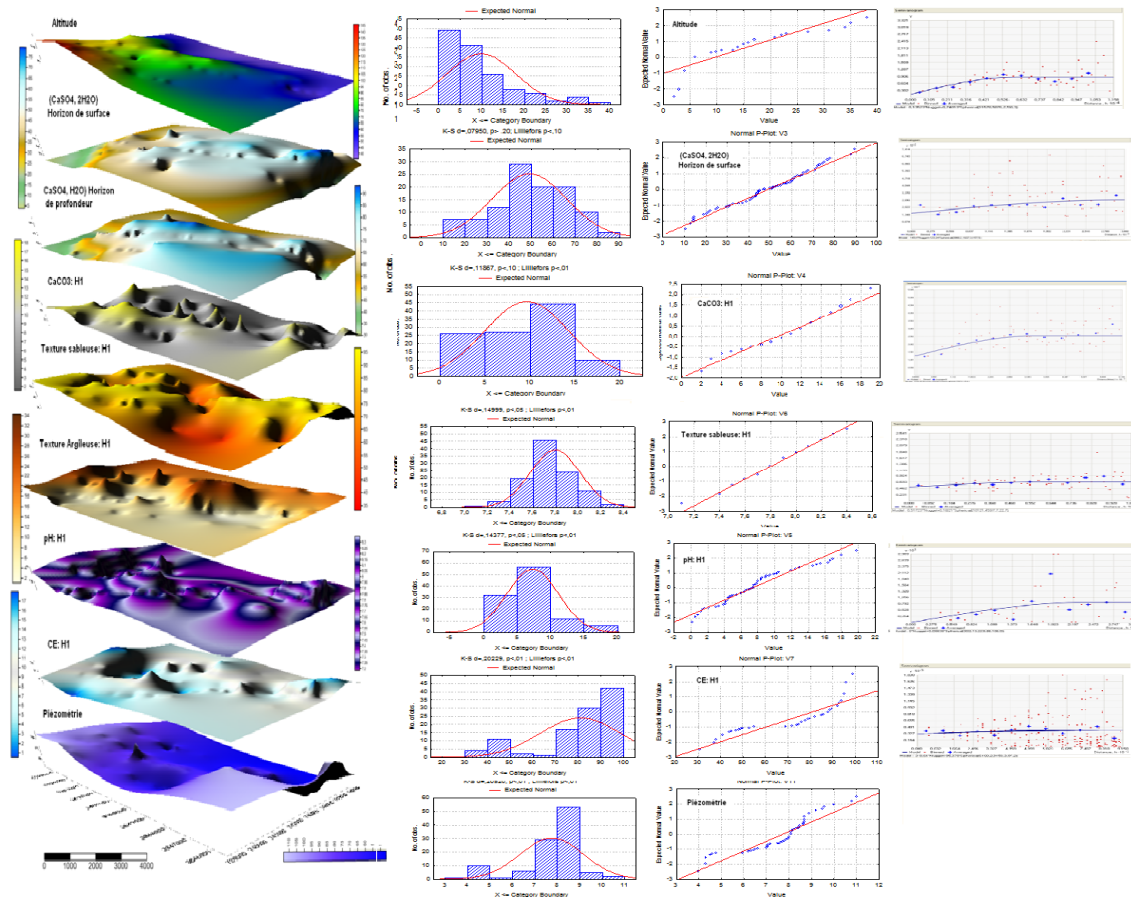


Figure 141- La superposition des cartes d'isoteneurs crée avec les cartes factorielles l'histogrammes, Q plots et variogrammes des " altitudes, pente, géologie, piézométrie de la nappe phréatique etc." sous SIG

On peut dire enfin que cette étude a montré que la source de gypse dans les sols étudiés correspondre aux affleurements tertiaires et du matériel du quaternaire avec un climat chaud et régime hydrique aridic. Le dépôt de gypse semble être influencé par la nappe phréatique minéralisée de faible profondeur et par remontée capillaire (par ascensum) ou par déplacement vers le bas (par ascensum) des eaux d'irrigation et de ruissellement et par la physiographie.

2.3 Variabilité spatiale des teneurs en gypse des sols

En effet, des travaux de recherche ont permis d'établir une corrélation entre la variabilité spatiale de plusieurs descripteurs physicochimiques du sol (l'épaisseur de l'horizon de surface, l'épaisseur de l'horizon de profondeur, le contenu en matière organique et en argile, le pH, la capacité d'échange cationique, et le profil d'humidité du sol, et la topographie (**Khakural et al., 1996**). Cette modélisation aide à comprendre le pattern de distribution spatiale du sol et de ses propriétés.

La variabilité spatiale des sols se traduit par une forte variabilité spatiale des teneurs en

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

gypse. Cette variabilité s'exprime à différentes échelles.

Les gypsidés à horizon petrogypsic sont globalement les plus riches en gypses mesuré aux gypsidés à horizon gypsic (**Pouget, 1989**). Car ils sont bien alimentés en eau et cela est essentiellement dû à une différence importante de dépôt par ruissellement et par la nappe phréatique (par ascensus).

Pour les gypsidés à horizons gypsic présentant un taux élevé de gypse (entre 25 et 65 %), du fait du gypse dissous dans la nappe phréatique et la remonte par ascensus dans les périodes sèches (fluctuation de la nappe phréatique chargée en ions Ca^{2+} et SO_4^{2-}) et aussi par le gypse transporté par le vent.

Au sein de la dépression, l'interaction entre le microrelief et la nappe phréatique détermine le régime hydrique des sols, et conditionne l'évolution pédogénétique et la dynamique des gypses. À l'échelle de la toposéquence, l'organisation de la teneur en gypse des horizons superficiels des sols est en relation avec l'organisation du relief, spécifique à chaque pédopaysage. Cette organisation se retrouve d'un point de vue spatial à l'échelle de la petite région (parcelle). La distribution des teneurs en gypse est affectée aussi, d'une forte variabilité spatiale aléatoire qui se manifeste sur de faibles distances, pour une même occupation des sols et un même type de sol. Cette variabilité se traduit par de très fortes variations de teneurs sur de faibles distances, qui peuvent ainsi passer de 10 à 50 % de gypse en l'espace de quelques mètres.

La variabilité des teneurs en gypse peut être aussi, accentuée ou modifiée par un changement d'occupation des sols ou par une intensification des pratiques agricoles. L'action de l'agriculteur contribue, elle aussi, à accentuer la variabilité spatiale des sols aux échelles intra et inter parcellaire.

Lors de l'échantillonnage, on a constaté qu'à l'échelle de la même parcelle agricole située dans la même zone et de même classe du sol, présent de fortes différences de taux de gypse. Cela peut s'expliquer par le fait que, lors de l'implantation du palmier dattier, le sol est travaillé sur une profondeur qui dépasse les 2 m (la potée), ce qui crée une hétérogénéité spatiale périodique dans les horizons de surface. L'intensification des pratiques agricoles (augmente la fréquence de travail du sol surtout de surface) se traduit également par une augmentation importante de la variabilité à courte distance des teneurs en gypse croûte (Deb) de surface et encroûtement. D'une manière générale, il existe donc des différences significatives des propriétés du sol au sein d'une même zone. Ces différences concernent, la partie supérieure du profil pédologique, la teneur en gypse, l'humidité, et la teneur en matières organiques.

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

2.4 CONCLUSION PARTIELLE

L'objectif de ce chapitre était de démontrer que le dépôt de gypse dans les régions arides présente une distribution spatiale séquentielle. À partir de 107 sondages et observations, des mesures de taux de gypse, calcaire, ph, là CE etc., ont été réalisées sur le terrain et au laboratoire, des outils de géostatistique (semi-variogramme et krigeage) ont été utilisés. Ainsi, que le logiciel système d'information géographique ArcGis (9.3).

Il se dégage de notre travail que :

- *l'analyse variographique a permis en effet de modéliser la structure spatiale de la variable régionalisée (anisotropie, dépendance et corrélation spatiales entre les sondages et les observations).*
- *l'interpolation par krigeage a permis de dresser des cartes d'isoteneurs des sels et aussi de prédire la distribution spatiale des concentrations de ces sels en des sites non échantillonnés.*

L'intégration des cartes d'isoteneurs issues par krigeage et d'autres cartes exogènes, la géologie ainsi que des informations apportées par le modèle numérique de terrain (pente, exposition) dans Arcgis, nous ont permis de déterminer la localisation du gypse et les facteurs physiques influençant cette distribution.

Toutefois, les estimations produites auraient pu être encore améliorées par d'autres variables auxiliaires comme l'hydrologie (régime d'écoulement etc.) ou la végétation.

Enfin, il est important de noter que cette étude nous a permis de comprendre la distribution des sels entre autres le gypse en fonction des facteurs topographiques, climatiques et par remontée capillaire (par ascensum) de la nappe phréatique minéralisée.

Les cartes de distribution spatiale des sels, surtout le gypse, constituent un élément d'appui indispensable pour les décideurs quant aux choix des zones de mise en valeur des terres dans ces zones hostiles surtout en irriguer. Les cartes générées au cours de ce travail montrent des résultats remarquables.

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

3 MODELISATION PAR RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS (ANN)

Afin de déterminer la variable ou les variables caractéristiques et déterminantes dans la distribution spatiale des formations gypseuses, une étude de modélisation par les réseaux de neurones (ANN) a été faite.

Par définition, un modèle de réseau neuronal est un modèle connexionniste qui simule le traitement de l'information ayant lieu dans le système nerveux. Cependant, ce réseau est composé par un ensemble de nœuds (les unités) connectées par des liens orientés, ou connexions. Les modèles connexionnistes utilisent une information numérique qui est des systèmes dynamiques qui affectent des calculs analogues à ceux d'un neurone. En effet, un réseau connexionniste est constitué d'éléments extrêmement simples qui interagissent pour donner au réseau son comportement global. Ces unités de base reçoivent des signaux provenant de l'extérieur ou d'autres neurones du réseau. Ils calculent une fonction, simple en général, de ces signaux et envoient à leur tour des signaux vers un ou plusieurs autres neurones ou vers l'extérieur. La figure N°142 montre un schéma comportant les organismes principaux d'un neurone artificiel.

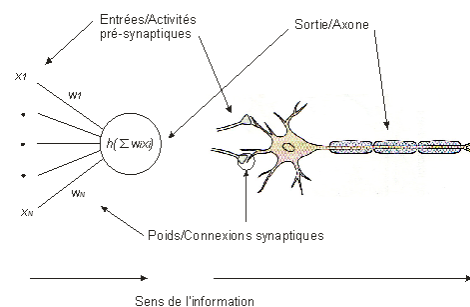


Figure 142- schéma de l'organismes principaux d'un neurone artificiel. Source : <http://tpe-intelligence-artificielle.e-monsite.com/pages/ii-3-neurones-artificiels.html>

Un neurone est caractérisé par trois concepts :

- ✓ son état ;
- ✓ ses connexions avec d'autres neurones et ;
- ✓ sa fonction de transition.

Il possède un état interne, et reçoit des signaux qui lui permettent de changer l'état, l'ensemble des états possibles d'un neurone pourra être par exemple :

- ✓ 0 ou 1 ;
- ✓ où 0 sera interprété comme l'état inactif et ;
- ✓ 1 l'état actif.

Pour calculer un tel état, il faut donc considérer les connexions entre ce neurone et ceux qui l'entourent. Cependant, dans le modèle connexionniste, chaque nœud i du réseau a un

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

niveau (seuil) d'activation numérique $\mathbf{a}_i(t)$ qui lui est associé au temps (t) :

$\mathbf{a}_i(t) = [a_1(t), a_2(t), a_3(t), a_4(t), \dots]$ qui représente l'état courant du neurone au temps (t) .

Équation 26

À chaque instant, le niveau d'activation de chaque nœud, où chaque sortie qui en dépend fonctionnellement, et communiquée aux nœuds voisins (\mathbf{n}) .

La quantité totale d'activation en entrée $\mathbf{e}_j(t)$ que le nœud \mathbf{j} reçoit de ses voisins à chaque instant (t) . Une connexion entre deux neurones a une valeur numérique associée appelée poids de connexion, ces poids sont utilisés pendant les calculs qui mettent à jour les liens entre chaque nœud. Dans la sortie, les poids des liens reliant le nœud \mathbf{i} au nœud \mathbf{j} sont notés w_{ji} . La matrice \mathbf{W} des poids de connexions est choisie pour représenter la mémoire à long terme et peut-être une fonction du temps, donc la sortie \mathbf{A}_j est donnée comme :

$$A_j = W_0 + \sum_j W_{ij} X_j, \quad \text{Équation 27}$$

L'état \mathbf{X}_i du neurone \mathbf{i} est une fonction en activité \mathbf{A}_i : $\mathbf{X}_i = \mathbf{f}(\mathbf{A}_i)$

La fonction \mathbf{f} est appelée fonction de transition ou de transfert et peut avoir plusieurs formes différentes, les plus utilisées sont : la fonction identique, la fonction à seuil et la fonction sigmoïdale. Cette dernière est continue, différentiable et bornée sur l'intervalle $[0,1]$. Elle peut être définie par l'une des deux formes suivantes :

$$F(x) = A \frac{e^{kx} - 1}{e^{kx} + 1} \quad \text{Ou bien} \quad F(x) = A \frac{e^{-kx}}{e^{-kx} + 1} \quad \text{Équation 28}$$

Ces deux fonctions sont bornées, cependant quand x tend vers à l'infinie la fonction :

$$F(x) = A \quad \lim_{x \rightarrow \infty} \left[A \frac{e^{kx} - 1}{e^{kx} + 1} \right] = A \quad \text{Équation 29}$$

L'état \mathbf{x}_i d'un neurone \mathbf{i} est une fonction des états des neurones \mathbf{j} , de son voisinage, et des poids des connexions \mathbf{w}_{ij} . (Figure N°143).

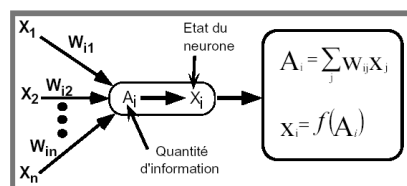


Figure 143- Calcul d'un état de neurone.

La fonction exponentielle est utilisée au niveau de la couche de sortie afin d'assurer des

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

valeurs de sorties positives et non bornées, le paramètre A régule la valeur de saturation et le paramètre k , réel et positif sert à réguler la pente de la courbe en un point hors saturation.

Les Perceptrons Multicouches (MLP) selon (Bishop, 1995 ; Riad et al, 2004) sont des réseaux neuronaux pour lesquels les neurones sont organisés en couches successives, les connexions sont toujours dirigées des couches inférieures vers les couches supérieures. Choisir l'Architecture d'un Perceptron Multicouche (MLP) consiste à fixer le nombre des couches, le nombre des cellules par couches, la nature des différentes connexions entre les neurones et la nature des neurones sur chaque couche (figure N°142).

Les modèles ANN sont des outils mathématiques, capables de modéliser des fonctions extrêmement complexes (Najjar et al, 1997). Ces modèles ont une approche informatique inspirée par le système nerveux humain. Le modèle de réseau neuronal le plus populaire est le réseau MLP avec deux algorithmes de rétropropagation : le Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS Quasi-Newton) et le gradient conjugué (SCG). Le nombre de neurones dans la couche cachée est décidé après l'apprentissage et le test (Rumelhart et al, 1986). Actuellement, le MLP est le modèle le plus populaire (Hagan et al, 1996). Le MLP est capable de rapprocher toute fonction mesurable d'un espace de dimension finie à l'autre d'un degré souhaité de précision (Hornik et al, 1989).

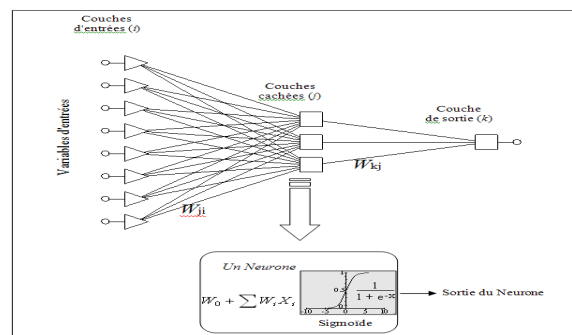


Figure 142- L'Architecture d'un MLP à Trois Couches.

3.1 CALAGE DU MODELE

Après que le nombre des neurones dans les trois couches eut été arrangé de façon que les résultats statistiquement soient plus plausibles, trois partitions différentes de la base de données sont alors utilisées pour les simulations. La base de données a été divisée en trois phases afin d'éviter le sur-apprentissage (Xiao et Chadarasekar, 1997) :

- ✓ une phase d'apprentissage (*Training*) (50 % de données) ;
- ✓ une phase de validation (*Verification*) (25 % de données) ; et
- ✓ une phase de test (*Testing*) (25%).

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

La validation est une technique utilisée couramment dans les modèles ANN, et a un impact significatif sur la répartition des données (**Burdon et al, 1997**).

Pour détecter la perturbation du modèle, on n'utilise qu'une partie de données par l'apprentissage et une autre partie sera réservée pour tester la performance du modèle afin de décider l'arrêt l'apprentissage avec des nœuds cachés optimaux (**Braddock et al, 1997**). Cet arrêt est fait lorsque l'erreur de la validation du modèle commence à augmenter (**Lallahem et Mania, 2003a, b ; Hani et al, 2006**).

3.2 CRITERE DE PERFORMANCE DU MODELE

Il existe de nombreux critères pour l'évaluation des modèles conceptuels, ces critères sont proposés par l'organisation mondiale de la météorologie (**Wmo, 1975**), et utilisés dans le domaine de simulation. Les critères sont classés dans deux groupes : un groupe des indicateurs graphiques et un autre groupe des mesures numériques. La Somme de l'Erreur Carré (SOSE) et le coefficient de détermination R^2 peuvent être comme des indicateurs numériques pour définir un réseau (MLP) optimal (**Lallahem et Mania, 2003 ; Riad et al, 2003 ; Najjar et al, 1996**). D'ailleurs, la SOSE peut être utilisé pour comparer la performance du (MLP) avec d'autres types communs de l'ANN (**Legates et McCabe, 1999**).

$$SOSE = \sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)^2 \quad \text{Équation 30}$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q}_i)(\hat{Q}_i - \bar{\hat{Q}}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{Q}_i - \bar{\hat{Q}}_i)^2}} \right]^2 \quad \text{Équation 31}$$

Où :

Q_i : est la valeur de la sortie observée;

\hat{Q}_i : est la valeur de la sortie prévue;

\bar{Q}_i : est la valeur de la moyenne des valeurs des \hat{Q}_i ;

N : est le nombre total des données.

La SOSE donne une indication quantitative de l'erreur du réseau, elle mesure l'écart entre la valeur prévue et celle observée correspondante. Le coefficient de détermination R^2 représente la proportion de variation des valeurs des sorties. Des valeurs de sortie de 90 % indiquent que la performance du modèle est très bonne, la performance du modèle est bonne lorsque $80\% < R^2 < 90\%$, le modèle est non performant si : $60\% < R^2 < 80\%$ (**Lallahem et Mania, 2003a, b**). La valeur idéale pour la SOSE est zéro.

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

3.2.1 Détermination des Entrées du Model

Modèles RNA ont la capacité de déterminer quels intrants sont essentiels. Ils sont surtout utiles pour des problèmes complexes où le nombre d'entrées possibles est grand et où la connaissance a priori n'est pas disponible pour déterminer les apports appropriés (**Lachtermacher et Fuller, 1994**). Une analyse de sensibilité peut être réalisée afin d'identifier l'importance des variables d'entrée. Ceci indique quelles variables sont considérées comme les plus utiles pour être retenues par le modèle ANN. Les modèles ANN supprime les variables d'entrée avec une faible sensibilité. La sensibilité est présentée par le Ratio et Rang. La figure sensibilité de base est l'erreur. Cela indique la performance du réseau si cette variable est "indisponible". Les variables importantes ont une grande erreur, ce qui indique que les performances du réseau se détériorent gravement s'ils ne sont pas présents. Le ratio indique le rapport entre l'erreur et l'erreur de base (c'est-à-dire l'erreur du réseau si toutes les variables sont "disponibles"). Le Rang énumère simplement les variables dans l'ordre de leur importance.

Le module Data Mining (Automated Neural Networks) du logiciel STATISTICA, version 8.0 a été utilisée dans ce travail de recherche pour caractériser les variables d'efficacité et d'établir des relations par simulation entre la variable de Sortie (dépendante) et les variables entrées indépendantes.

3.3 RESULTATS ET DISCUSSION

Les données de la variable dépendante du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et celles des variables indépendantes ont été utilisées dans la création du modèle neuronal. Les variables indépendantes sont : le calcaire (CaCO_3), le pH, le sable, les argiles, les limons, l'altitude (Alt), et la conductivité électrique (CE). Les variables indépendantes ont été considérées comme variables d'entrées, alors que la sortie est la variable dépendante le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Le réseau MLP (Multilayer Perceptron) peut-être représenté par la formule suivante :

$$\{\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}\} = \text{ANN}[\text{CaCO}_3, \text{pH}, \text{CE}, \text{sable}, \text{argiles}, \text{limons}, \text{Alt}, \text{piez},]$$

Équation 32

Les types des réseaux neuronaux utilisés sont les suivants : le perceptron multicouche MLP avec deux algorithmes de rétropropagation (broyden fletcher goldfarb shano : BFGS quasi-newton et le gradient conjugué SGC) et le RBF (l'ANN à fonctions radiales de base). Au cours de l'analyse, plusieurs réseaux ont été testés. Le meilleur ANN trouvé est le MLP à trois (3) couches et à quinze (15) nœuds cachés et un minimum de SOSE (Sum Of Square Error) de 0.012807 par rapport aux autres types d'ANN (Tableau N°42 et figure N°143). Le modèle a une très bonne performance dans la phase d'apprentissage avec un écart-type de 26.13 %, et la SOSE des trois phases (l'apprentissage, la validation et le test) est petit et indique que les données des variables appartenant à la même population (Tableau N°43). En

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

outre, le coefficient de corrélation est supérieur à 87 % pour la phase d'apprentissage, de validation et de test, ce qui montre un excellent accord entre le CaSO_4 observé en fonction du CaSO_4 simulé (Figure N°144). La figure (145) montre la SOSE en fonction du nombre de pas de simulation indique que la gamme de l'Erreur lors de l'apprentissage et de la validation est très petite.

Tableau 42- SOSE pour les divers ANN

ANN	Architecture	SOSE
RBF	12-16-1	0,024655
MLP (CG 95)	12-15-1	0,018750
MLP (BFGS 130)	12-15-1	0.012807

Tableau 43- Les Paramètres statistiques de Régression de la Sortie (CaSO_4)

	Apprentissage	Validation	Testing
Moyenne	52.150	48.63	52.05
Écart-type	22.975	26.13	23.62
SOSE	0.002263	0.012807	0.002713
Corrélation	0.973775	0.876594	0.969221

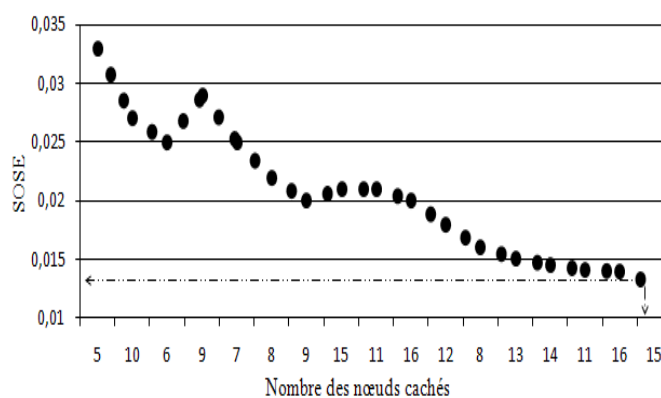


Figure 143- La SOSE en fonction des nœuds cachés

L'analyse de la sensibilité de l'ANN pour les variables indépendantes dans les deux phases d'apprentissage et de validation (Tableau N°44) indique que l'altitude (Alt) est la variable la plus effective dans la distribution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Le reste des variables effectives en fonction de leurs rangs dans la phase de vérification sont les suivantes : le sable, les limons, les argiles, le pH et la conductivité électrique (CE).

CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE DANS LE SOL

Tableau 44- L'Analyse de la Sensibilité de l'ANN des variables

	Gypse	Sable	Argile	CE	pH	Limon	Alt
Rang	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>5</u>	<u>7</u>	<u>6</u>	<u>4</u>	<u>1</u>
Ratio	2.285	2.097	1.083	1.092	1.012	1.264	25.736

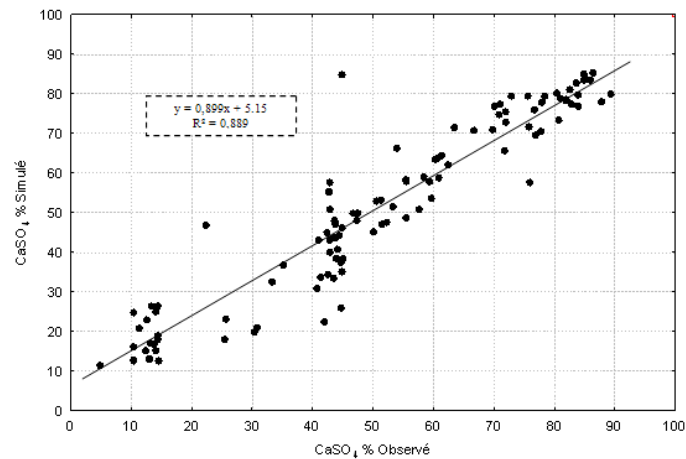


Figure 144- Le CaSO4 observé en fonction du CaSO4 simulé

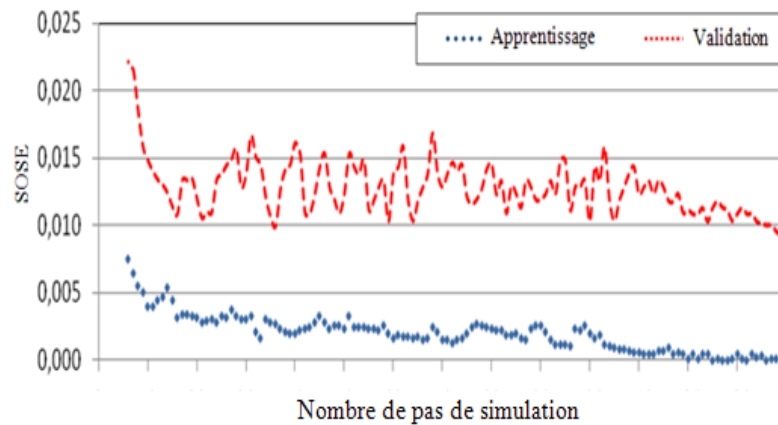


Figure 145- Graphique de l'Erreur à l'apprentissage et à la validation

**CHAPITRE 2 : SIG ET GEOSTATISTIQUE POUR LA MODELISATION DU GYPSE
DANS LE SOL**

3.4 CONCLUSIONS DE LA QUATRIEME PARTIE

Le sous-bassin versant étudié forme une grande plaine qui tire son originalité et son identité de quatre caractéristiques essentielles. La première caractéristique tient en grande partie à la nature géologique. La seconde à l'influence de la nappe phréatique, les sols se différencient nettement tant au niveau du développement morphologique des profils qu'à celui des processus d'altération de la roche-mère. La troisième caractéristique majeure de cette région lui vient de la topographie qui est responsable de la répartition des paysages et de la différenciation des sols. La quatrième aux modes agricoles.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de l'étude était de proposer des approches cartographiques pour la localisation des sols gypseux dans une région aride, puis à mettre en relation avec le milieu physique pour étudier le rôle des facteurs du milieu physique (géologie, lithologie, altitude, morphologie, etc.) dans la distribution spatiale des sols gypseux. Pour cela, nous avons développé plusieurs approches fondées sur : a) les images de télédétection à moyenne résolution spatiale en utilisant des données acquises par LANDSAT 7, b) associé les SIG et la géostatistique (variographie et krigeage) pour la réalisation des cartes factorielles et enfin la modélisation par réseaux de neurones artificiels pour classer les facteurs du milieu physique par ordre d'influence sur la répartition du gypse dans le sol.

Les apports de ce travail de thèse sont de deux ordres.

I. Apports d'ordre méthodologique tout d'abord, car nos résultats contribuent à montrer le potentiel des images de télédétection à localiser les sols gypseux dans une région aride.

A. La localisation des sols gypseux

a. L'apport de la télédétection à l'identification et la localisation des sols gypseux.

L'objectif de cette partie de thèse était de localiser les sols gypseux par télédétection. pour cela, une méthodologie en deux étapes a été mise en place: la première a pour objet l'élaboration d'esquisse cartographique des sols gypseux par photo-interprétation des images satellite et des mesures de terrain, à travers une étude corrélative entre la réflectance des sols et les formations superficielles (étude d'un profil spectral tracé sur l'image coïncide exactement avec une toposéquence étudié sur le terrain de 9 km orienté S de DJ sidi ghezal en amont vers la sebkha d'Ouma che en l'aval). La deuxième utilise les méthodes de classification par pixel et orienté objet des images LANDSAT ETM+ pour l'année 2009 dans une étude comparative. L'étude s'appuie sur l'identification des états de surface des sols par télédétection à savoir les propriétés intrinsèques et extrinsèques des sols dans notre cas essentiellement la couleur, l'humidité, et la rugosité. Pour ce faire, plusieurs traitements ont été testés sur les images, partant des classifications par pixel et orientée objet des trichromies originales aux images segmentées passant par les trichromies indicielles de 30 et 15 m de résolution, ce choix de la résolution n'est pas indifférent. Le résultat issu de la première étape démontre que la télédétection permet de localiser et de délimiter les classes des sols gypseux sur la base de leurs seules réflectances exoatmosphériques soutenues par des observations in situ. Néanmoins, cette approche a permis d'étoffer la discrimination des formes de gypse à partir de la télédétection, en identifiant et en localisant les sols à croûtes et à encroûtements gypseux. La deuxième étape démontre que les méthodes de classification par pixels sur des images multi résolutions (30 et 15 m) permettent une bonne discrimination des sols gypseux, mais, restent mitigées, certaines classes restent confondues sur le plan des réflectances. Par contre, les méthodes de classification orientée objet réalisé sur les mêmes images, permettant de réaliser des classifications des sols gypseux très encourageants surtout la segmentation.

b. L'apport du traitement des images pour l'identification et la localisation des sols gypseux

L'image obtenue après combinaison des traitements (calculs d'indices et ACP) met en évidence les limites reflétant la nature de sol (la profondeur des sols) à travers les états des formations superficielles, alors que ses limites n'avaient pas été reconnues par photo-interprétation des images satellites. Cette absence de reconnaissance était due au fait que ses limites sont peu marquées sur les images brutes. En effet, lors de l'interprétation, les changements de couleur sont ceux qui sont les mieux perçus. Ce n'est qu'après traitements numériques spécifiques que les différences des classes des sols sont perçues. Le choix des traitements qui a été fait à répondre à cette nécessité, il a mis en évidence les différences d'états de surfaces des sols (différentes réflectances) sur la base de leur couleur, humidité qui est en relation avec les composantes du sol (texture, MO, etc.) et sa position (relief) dans le paysage.

c. L'apport de la multi-résolution pour l'identification et la localisation des sols gypseux

L'analyse aux différentes échelles spatiales qui a été réalisée, avec LANDSAT ETM+, a permis de renseigner les sols gypseux à l'échelle du paysage. Cette analyse est fondée sur une passerelle méthodologique permettant de passer de la moyenne (30 m) à la haute (15 m) résolution spatiale par rééchantillonnage et fusion avec le panchromatique. Les résultats cartographiques sont encourageants en ce qui concerne la méthodologie appliquée. L'étude comparative entre les deux méthodes de classification par pixel et orienté objet appliquées sur les différentes résolutions montre que la méthode de classification orientée objet avec ETM+ de 15 m propose un meilleur résultat de cartes des états de surface des sols gypseux et elle permet de générer de nouvelles classes thématiques. La fusion multiéchelle nous a permis de montrer l'apport de l'information à différentes résolutions dans l'identification thématique des unités surfaciques.

La qualité des résultats réside surtout dans le nombre de classes identifiées qui se traduit dans la légende des cartes réalisées. Cependant, le changement d'échelles entraîne une richesse d'information spatiale. La discrimination des sols gypseux aux différentes échelles spatiales a été améliorée, notamment par l'introduction du MNT, et les indices spectraux (Indice de brillance, d'humidité, etc.). Les limites portées sur la carte des sols apparaissent de façon nette, en particulier la limite entre les sols gypseux à croûte et à encroûtement et entre ces derniers et les sols gypseux à horizon argileux et les sols d'apport éolien. Ces limites de sol coïncident par leur forme avec les limites morphologiques. Ces limites sont donc les plus importantes du point de vue de la différenciation des formations superficielles.

Cette partie de l'étude nous a permis d'arriver aux conclusions suivantes :

- ✓ *la région d'étude se caractérise par une hétérogénéité du point de vue caractéristique des sols, ce qui rend le procédé des classifications très complexes ; la classe palmier dattiers et les formations éoliennes rendent cela encore plus difficile par les effets du taux de recouvrement et les apports éoliens qui masquent les sols et perturbent leur détection en particulier dans le visible. Nous avons rencontré, comme pour les précédentes images, des difficultés à distinguer les sols gypseux entre eux. De plus la similarité spectrale et texturale entre certains sols gypseux et les Xeropsammets a*

entraîné des erreurs de classification.

- ✓ les classifications orientées objets, combinant une segmentation d'images à 15 % et un algorithme de classification, ont détecté en moyenne 61.27 % de l'unité sols gypseux contre 60.62 % pour les images fusionnées sont segmentés à 30 % avec 133.47 ha de surestimation ; ces traitements sont d'une grande utilité, car ils permettent d'apporter une prévalue sur la cartographie des sols;
- ✓ *La nécessité d'associer d'autres informations (pente, couleur, humidité ...), pour résoudre les confusions entre les classes ayant une signature spectrale proche ;*
- ✓ *la classification orientée objets reste également reproductible à d'autres zones géographiques plus vastes. Elle a aussi, un potentiel de fournir des cartes très riches des objets classifiés pour les systèmes d'information géographiques.*

B. relation sols gypseux milieu physique

Dans notre travail, il s'agit non pas d'explicitier le rôle de chacun des facteurs du milieu physique dans la répartition des sols gypseux, mais de mettre en exergue leurs influences vis-à-vis de la distribution. On a fait appel aux SIG, à la géostatistique et la modélisation par réseaux de neurones artificiels (ANN) dans une démarche complémentaire pour déterminer le rôle du milieu physique dans la répartition spatiale des sols gypseux en superposant plusieurs couches d'informations tirées des documents existants et l'analyse et la description de 107 échantillons collectés dans la région d'étude d'el hadjeb suivant 04 toposéquences orientées N-S nous ont fourni une quantité considérable d'informations et de données dont le volume ne cesse de croître. L'organisation et le stockage de ces informations afin d'éviter leur déperdition éventuelle d'une part, leur traitement et leur exploitation rationnelle d'autre part, étaient derrière la réalisation d'une modélisation numérique de la répartition spatiale des % de gypse. Cette modélisation a été entreprise en utilisant les potentialités offertes par les SIG en matière de collecte, d'analyse, de traitement et de diffusion de l'information en vue d'aider les techniciens et agriculteurs à prendre les décisions qui conviennent pour la mise en valeur de ces sols. L'analyse des cartes (krigeage) d'isovaleurs ou factorielles de distribution des concentrations des formes de gypse dans notre région, montre une structuration spatiale très anisotropique et dépendante des propriétés topographiques et de l'influence de la nappe phréatique. Cette structuration est, d'autant plus nette que l'on observe les trois grandes unités physiographiques qui constituent la région (haut, moyen glacis, plaines et dépressions endoréiques). La topographie est l'un des principaux facteurs permettant de déterminer le niveau et la distribution spatiale des % de gypse des sols.

Apport d'ordre pratique, dans un deuxième temps, car les développements méthodologiques proposés sur les images de télédétection ont permis d'extrapoler notre travail à l'échelle de l'ensemble du sous-bassin versant d'Oued Djedi.

L'application des méthodes proposées par SIG, Géostatistique et ANN sur le site d'étude ont permis de produire des documents cartographiques utiles pour les techniciens de l'agriculture

et leur permettre d'accéder à l'information spatialisée et d'estimer l'importance et le rôle du milieu physique dans la répartition spatiale des sols gypseux. Les cartes factorielles répondent précisément au besoin de disposer d'informations sur la localisation des sols gypseux surtout Petrogypsic à l'échelle du sous bassin versant qui peut aider à mieux définir les sites de mise en valeur dans le cadre du programme PNDA et FNDRA, etc.

Limites des résultats obtenus et perspectives futures

Cette thèse est essentiellement fondée sur l'intégration des renseignements accumulés sur le terrain et l'analyse par télédétection, SIG et la géostatistique. Ces approches ont souligné deux limites principales concernant les échelles/résolutions et les méthodes utilisées, ainsi que différentes pistes d'amélioration. Le passage des données in situ aux données télédéteectées est rendu complexe par les travaux de mise en valeur (anthropisation) et l'hétérogénéité de ces régions. Les résultats cartographiques présentés dans cette thèse témoignent des difficultés rencontrées, la discrimination entre les sols gypseux à croûte et à encroûtement et leur transition présente des résultats mitigés exprimés sous forme de matrices de confusion, malgré des campagnes de terrain bien renseignées. Puisque à ce stade d'étude, seuls sont reconnus sur l'image les états de surface identifiés sur terrain.

Pour une meilleure identification et localisation de ces sols, il faudrait utiliser des images satellite à plus hautes résolution spatiale, afin d'améliorer leur précision radiométrique, telle que celles qui sont issues d'Alsat 2. Ces images satellitaires, à 2,5 ou à 5 mètres de résolution, n'ont pas pu être acquises, faute de temps et de moyens. À ces difficultés méthodologiques et techniques s'ajoutent le décalage entre les dates d'obtention des images (2009) et celles des campagnes de terrain jusqu'au (2011).

Cette thèse a confirmé que les campagnes de terrain sont indispensables et irremplaçables. Elles permettent la collecte de données nécessaires dans de nombreuses étapes de la cartographie. La discrimination des sols gypseux ne peut se faire sans une étape de terrain préalable. La fiabilité des classifications, donc, des cartes de localisation des sols gypseux, ne peut être estimée sans une analyse des paysages in situ fondés sur la lithologie, la végétation et le relief des unités morphologiques. Sans ce travail, une analyse par télédétection peut être réalisée, mais au risque de nombreuses confusions de classifications.

Il faut noter que la cartographie des sols par classification orientée objet pratiquée sur des images multi résolution ou multi échelle est un axe très prometteur et trouve beaucoup d'applications particulièrement dans les systèmes les systèmes d'informations géographiques pour la constitution des bases de données.

BIBLIOGRAPHIES

BIBLIOGRAPHIES

- ABDESSELAM S., (1999):** Contribution à l'étude des sols gypseux au Nord-Est du Sahara Algérien, caractérisation et genèse, cas des oasis de tolga (région des Ziban). *Mem. Mag. INA*, 174p.
- AIDAOU S. (1994) :** Ressource en eau et aménagement hydro-agricole dans la région de Biskra "Ziban" (Algérie). *Thèse de doctorat « eau et aménagement », Laboratoire de Géographie physique.* Université de Nancy II. 353 pages.
- AIDOU A. (1994) :** Fonctionnement Des Ecosystèmes méditerranéens. Laboratoire d'Écologie Végétale, Université de Rennes 1 ; 50 pages.
- ALLENBACH K., BURNIER J., LEHMANN A., MARTIN P., RAY N., WYLER N., (2010) :** Cartographie des milieux naturels dans le périmètre Vuache-Sion-Laïre : Rapport technique. DGAT-Projet d'Agglo. 98 p., 4 annexes.
- ANAT, Agence Nationale d'Aménagement de territoire, (2002) :** Schéma directeur des ressources en eau. Wilaya de Biskra. Rapport de synthèse. 100 pages.
- ANAT, Agence Nationale d'Aménagement de territoire, (2003) :** Schéma directeur des ressources en eau. Wilaya de Biskra, Dossier agro pédologique, 114 pages.
- ANRH (2012) :** Utilisation des technologies spatiales au service des ressources en eau. Atelier technique. Projet de cartographie des ressources en sols du nord de l'Algérie par télédétection. Page 61-71.
- AUBERT G., (1960):** les sols de la zone aride, étude de leur formation, de leurs caractères, de leur conservation. *Actes coll. Unesco de Paris sur les problèmes de la zone aride*, pp:127-150.
- BADRAOUI M., CHOURAICHI M., ESSAFI B., SOUDI B., BELLOUTI A., CHERKAOUI F., BOUAZZAMA B., BOUYAHYAOUI A. (2000) :** Impact de l'irrigation sur la qualité des sols et des eaux dans le Tadla : Salinisation, Rapport de synthèse des travaux antérieurs sur la qualité des sols et des eaux et méthodologie. Projet PGRE, IAV Hassan II/ORMVAT/SEEN, Rabat, Maroc.
- BAGNOULS F. et GAUSSEN H., (1953) :** Saison sèche et indice xéothermique. *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse*, pp193-239.
- BARZANJI A.F., (1973):** Gypsiferous soil of Irak : *These de doctorat. Genet.* 1999 p.
- BASSO, B., (2001):** Perspectives of precision agriculture in conservation agriculture, I World Congress on Conservation Agriculture, Madrid.
- BERTRAND R., FALLPOU P., LEGROS J.-p., (1979) :** Notice pour l'entrée des descriptions et analyses de sols en banque de données. Document SES Montpellier, INRA, IRAT, na 487, 119 p.
- BENBOUZA., (1994) :** contribution a l'étude des comportements de 24 variétés de coton G. Hirsutum et G. barbadense et essai d'amélioration de la production de semences hybride (F1) dans la région de Biskra, thèse Ing. Innst Nat Ens Sup Batna, 96p.
- BENDER, F., (1974):** Geology of Jordan.- Bornträger, pp. 196, Berlin, Stuttgart.
- BENISTON, N. T et BENISTON W. S., (1984) :** Flore d'Algérie. Entreprise nationale du livre. Alger, 99 P.
- BENMATI A., (1993) :** Contribution à l'étude de l'altération des roches carbonatées tendres en milieu semi-aride de Souaghi (Béni-Slimane). Relation avec la pédogenèse fersiallitique et la formation des croûtes et encroûtements calcaires. Thèse de magister, I.N.A. El Harrach, 255p.
- BENSAID A., (2006) :** SIG et Télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride : le cas de la Wilaya de NAAMA (Algérie). Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier-Grenoble 1 Discipline : Géographie. 319 pages.
- BIALOUSZ, S., GIRARD, M.-C. (1978) :** Les coefficients de réflexion spectrale des sols

- dans les bandes de travail de Landsat. *Fotointerpretacija w Geograffi, Kaowice*, III (13): 96109.
- BISHOP C., (1995)**: Neural Networks for Pattern Recognition, Oxford University Press,
- BONN, F. (1996)** : Précis de télédétection, Volume 2 - Applications thématiques. *Presses de l'Université du Québec/AUPELF*, Sainte-Foy, 642 p.
- BONN, F. (1998)** : Précis de télédétection. Volume 2, *applications thématiques, presse de l'université du Québec/AUPELF*.
- BONN F., CHARBONNEAU L., BROCHU R., (1989)** : Analyse de l'utilisation du sol à partir des données SPOT et TM : aspects méthodologiques. Télédétection en francophonie. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris. p. 83-92.
- BONIERIC P., (1978)** : Conception et réalisation d'un système cartographique_cappliqué à la pédologie. *Memoir CNAM, Montpellier*, 108 p.
- BORNAND M., BARTHES J.-P. ET BONFILS P., (1990)** : Carte des pédopaysages du Languedoc-Roussillon au 1/250 000, INRA, Montpellier.
- BOULAHOUAT, N. ET NAERT, B. (1996)** : Télédétection des ressources en sols des zones arides « Une méthode d'inventaire adaptée au travail sur le terrain, expérimentée dans la région de Djelfa (Algérie). *Étude et Gestion des Sols*, 3(1): 7-26.
- BOUMA J. and VAN LANEN H.A.J., (1987)**: Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities. In: K.J. BECK, P.A.
- BOURENNANE, H., KING, D., CHÉRY, P. ET BRUAND, A. (1996)**: Improving of soil variable using slope gradient as external drift. *European J. So/ Scr.* 47:473-483
- BOWKER, D.E., R.E. DAVIS, D.L. MYRICK, K. STACY, AND W.T. JONES, (1985)**: Spectral Reflectances of Natural Targets for Use in Remote Sensing Studies, NASA Reference Publication 1139, National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Branch, Washington, D.C., the National Technical Information Service, Springfield, Virginia, 181p.
- BOYADGIEV T.G., (1974)**: Contribution to the Know ledge of gypsiferous soils. *Agron / SF/ Syr / 67/ FAO*, Rome, p 522.
- BOYADGIEV, T.G. and W.H. VERHEYE. (1996)**: Contribution to a utilitarian classification of gypsiferous soils. *Geoderma*, 74: 321-338.
- BRADAÏ A., DOUAOUI A., et MARLET S., (2009)** : Qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols dans la plaine du Bas-Cheliff, Algérie. Actes du quatrième atelier régional du projet Sirma, Mostaganem, Algérie, 26-28 mai 2008.
- BRADDOCK, R.D., KREMMER, M.L. AND SANZOGNI, L (1997)**: Feed-forward artificial neural network model for forecasting rainfall run-off. Proceedings international congress on modelling and simulation (Modsim). The modelling and simulation society of Australia Inc., Hobart, Australia, pp1653-1658.
- BROSSARD T. et WIEBER J. C., (1984)** : Le paysage : trois définitions, un mode d'analyse et de cartographie. *L'Espace Géographique*, 13(1), 5-12.
- BURDEN, F.R., R.G. BRERETON, P.T. WALSH, (1997)**: Crossvalidatory selection of test and validation sets in multivariate calibration and neural networks as applied to spectroscopy. *Analyst* 122. Vol. 10.. pp.1015-1022.
- BUREAU P., et ROEDERER P., (1960)** : "Contribution à l'étude des sols gypseux du sud tunisien : croûtes et encroutements gypseux de la partie sud du Golfe de Gabes (Tunisie)", *ORSTOM collection de référence n° 10512*.
- BURROUGH P.A., (1987)**: Principles of geographical information systems for land resources assessment. Monographs on soil and resources survey na 12, *Oll ford. Science publications*, 193 p.
- CALOZ, R. ET COLLET, C. (2001)** : Précis de télédétection, Volume 3 - Système d'information géographique et de traitement numérique d'image. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy, 386 p.

- CASENAVE, A. ET VALENTIN, C. (1989)** : Les états de surface de la zone sahélienne. Éd. ORSTOM, *Collection Didactiques*, 227 p.
- CCTG (2005)** : Cahier des Clauses Techniques Générales- Référentiel Régional Pédologique - De la réalisation à la labellisation des bases de données sols au 1/250 000. Document rédigé par : INRA, Unité Infosol, Orléans. 22p.
- CERVELLE, B., MALEZIEUX, J., CAYE, R. (1977)**. Expression qualitative de la couleur liée à la réflectance diffuse de quelques roches et minéraux. Université de Paris, Bull. Soc. Fr. Mineral. Cristall., 100: 185-195.
- CHEBBAH, M. (2007)**: Caractérisation sédimentologique et géochimique du Néogène, de part et d'autre de l'accident sud-atlasique, région de Biskra. *Thèse de doctorat* .410 p.
- CIERNIEWSKI, J., COURAULT, D. (1993)**: Bidirectional reflectance of bare soil surfaces in the visible and near-infrared range. *Remote Sensing Reviews*, 17: 321-339.
- CIPRA J-E., FRANZMEIER D-P., BAUER M-E., BOYD R-K., (1980)**: Comparison o multispectral measurements from some nonvegetated soils using Landsat digital data and a spectroradiometer. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, vol 44, pp 80-84.
- CHERY P. O. L., BOURNANE H., KING D., BRUAND A., (1999)** : Variabilité vertical de la composition granulométrique des limons de petite Beauce (France) ", *Étude et gestion des sols*, 6, 4, 1999-pp. 185-196.
- COLE W.F. et C.J. LANCUCKI. A (1973)** : Refinement of the crystal structure of gypsum $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. *Acta Crystallographica*, 30B, pp. 921-929,.
- COLLET, C., CALOZ, R., ROCHON, G. (2001)**. Précis de télédétection. Volume 3, *traitements numériques d'images de télédétection*, AUF, presse de l'université du Québec.
- COLLINS, C.D., HOLT, R.D. ET FOSTER, B.L. (2009)**. Patch size effects on plant species decline in an experimentally fragmented landscape. *Ecology*, 90(9): 2577-2588.
- CONDIT, H.R. (1970)**: The spectral reflectance of American soils. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 34: 955-960.
- CONGALTON R., (1991)**: A review of assessing the accuracy of classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing Environment*, 37 : 35-46
- CORBANE C., BAGHDADI N., HOSFORD S., SOMMA J., CHEVREL S. (2004)** : Application d'une méthode de classification orientée Objet pour la cartographie de l'occupation du sol : Résultats sur aster et LANDSAT ETM. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n°175 (2004-3
- COQUE R., (1955)** : "Les croûtes gypseuses du sud tunisien", *Bulletin de la société des sciences naturelles de la Tunisie-tome VII*.
- COQUE R., (1962)** : La Tunisie présaharienne : étude géomorphologique. *Armand Colin. Ed.* Paris. *These d'état*, 488 p.
- COURAULT D., (1986)** : Modélisation du comportement spectral de la surface du sol. Etude intraparcellaire. D.E.A. de pédologie. INA-PG, Grignon, 102 p
- COURAULT, D., GIRARD, M.C., ESCADAFAL, R. (1988)**: Proceedings of the 4th international colloquium on spectral signatures of objects in remote sensing held at Aussois, France. 18-22 January (1988), pp. 357 -362.
- COURAULT D., (1989)** : Etude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection. Thèse Université, Paris VI, 214 p.
- C.P.C.S., (1967)**: Classification des sols. Laboratoire de géologie, pédologie de l'E.N.S.A, Paris. Grignon, 87 p.
- CRAVE A., et GASCUEL-ODOUX C., (1997)**: "The influence of topography on time and space distribution of soil surface water content", *Hydrological processes*, 11, pp. 203-210.
- CRSTRA (2007)**: Atlas de la faune et la flore des zibans. Éd. 2007.
- CRSTRA (2012)** : Synthèse climatique de la région des ziban. Projet FNR (2008-2011) du sur les indicateurs biophysiques de la désertification. 185 pages.

- DEBRACH J. (1953)** : Note sur les climats du Maroc Occidental, Maroc Méridional. 1134 pages.
- DELHOMME J. P. (1979)**: Spatial variability and uncertainty in groundwater flow parameters: A geostatistical approach. *Water Ressources research*. Volume 15. Issue 2, pages 269-280, April 1989.
- DJEBAILI S., (1984)** : Steppe algérienne, physiologie et écologie. O. P. U. Alger, 127 pages.
- DEKKICHE B., (1976)** : "Sur quelques sols a accumulation de gypse dans le Hodna", *Annales de l'INA (el Harrach) volume.VI N0 1 (1976)*.
- DELCROS Ph., (1989)** : Elaboration d'une carte de re-structuration des zones agricoles sur une commune de l'Hérault par le logiciel ARC-INFO. Vérification du résultat. Etude de la précision du logiciel. *DEA ENSAM-USTL*, 95 p +annexes.
- DEMRRH, (1980)**: Notice explicative de la carte hydrogéologique de Biskra, Direction des études de milieu et de la recherche hydraulique, service hydrogéologique.
- DERSIG. I Y C., (1988)** : Collection, organisation et mise à disposition de données agro-pédologiques au sein d'un référentiel pour l'Ille-et-Vilaine, SDS 403, ENSA Rennes, 63 p.
- DJILI K., (2000)**: Contribution à la connaissance des sols du Nord de l'Algérie. *Thèse doctorat. INA*, Alger, 243 p.
- DJILI, K. DAOUY. ET AYACHE N. ; (1999)** : Analyse de la distribution verticale et spatiale du calcaire dans les sols de l'Algérie septentrionale. *Étude et Gestion des Sols*, 6, 3, 1999 - pages 201 à 213.
- DONER, H. E. and WARREN C. L.; (1989)**: Carbonate, Halide, Sulfate and Sulfide Minerals. In: "*Minerals the in Soil Environment. Second Edition*". (Eds.): Dioxion, J. B. and Weed, S. B. SSSA Pub., Madison, Wisconsin, pp. 279-330.
- DUBOST D. (2002)** : Ecologi, aménagement et développement agricole des oasis Algériennes. Ed. 2002. CRSTRA.423 pages.
- DUCHAUFOR Ph., (2004)** : Introduction à la science du sol Sol, végétation, environnement. *Collection: Sciences Sup, Dunod 2004 - 6ème édition – 352. EAN13 : 9782100483907*
- DURAND, J.H. (1953)** : Étude géologique, hydrogéologique et pédologique des croûtes en Algérie. S.E.S. Alger, 209 p.
- DURAN, M.J.H., BARBUT, M.M. (1954)** : Carte des sols de l'Algérie, légende. Service géographique de l'armée, échelle 1/500.000ème.
- DURAN J. H., (1959)** : "Les sols rouges et les croûtes en Algérie- Alger".
- EMBERGERL., (1955)**: Une classification biogéographique des climats. *Recueil*.
- ESCADAFAL, R. (1987)**: The use of earth observation satellites for soil mapping in arid and tropical regions. *EARSeL Newsletter*, (33-34): 16-18.
- 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). *Études et thèses*, Paris, Orstom éditions, 317 p.
- ESCADAFAL, R. (1993)**: Remote sensing of soil color: principles and applications. *Remote Sensing Reviews*, 7: 261-279.
- ESCADAFAL, R. (1994)**: Soil spectral properties and their relationships with environmental parameters – examples from arid regions. In: Hill, J., Mégier, J., eds. *imaging spectrometry – a tool for environmental observations*, Dordrecht (The Netherlands), Kluwer Academic Publisher.
- ESCADAFAL, R. (1998)**: Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil color of arid. *Remote Sens. Environ.*, 66: 17-28.
- ESCADAFAL, R., POUGET, M. (1987)** : Cartographie des formations superficielles en

- zone aride (Tunisie méridionale) avec Landsat TM. *Photo-interprétation* i, no. 1987-4, fascicule 2 © juil.-août 1987, éditions Technip, 27, rue Ginoux, Paris 15e, p. 9-15.
- ESCADAFAL, R. AND HUETE, A.R. (1991):** Improvement in remote sensing of low vegetation cover in arid regions by correcting vegetation indices for soil «noise». *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, 312, série II, p. 1385-1391.
- ESWARAN, H., ILAIWIN M., OSMAN, A. (1981):** Mineralogy and micro - morphology of aridisols. Proc. 3rd Int. Soil Classification Workshop, ACSAD, Damascus.
- FALQUE M.c., BORNAND M. et ROBBEZ-MASSON J. M., (1995):** Gestion des paysages : intérêt d'un outil SIG d'aide à l'évaluation. *Sciences et sociétés*.
- FAO, (1990):** Management of gypsiferous soils. *Soils Bulletin* 62, 81 p
- FARPOOR, M.H., KHADEMI, H., EGHBAL, M.K et KROUSE, H.R., (2004):** Mode of gypsum deposition in southeastern Iranian soils as revealed by isotopic composition of crystallization water", *Geoderma*, v. 121, p. 233 – 242.
- FAVROT J. C., ARROUAYS D., BORNAN M., GIRARD M. C., et HARDY R., (1994).** Informatisation et spatialisations de la ressource sol: le programme "Inventaire, gestion et conservation des sols". *Cahiers Agricultures*, 3, 237-246.
- FENSHOLT, R. (2003):** Assessment of primary production in a semi - arid environment from satellite data: exploiting capabilities of new sensors. Institute of Geography, University of Copenhagen, Denmark, – *PhD*, 270p.
- FITZPATRICK E.A., (1986):** Comparison of Soil Taxonomy with FITZPATRICK'S system of soil designation and classification. *Ciencia del suelo*, vol. 4, 193-207.
- FLOREA N., AL-JOUMAA Kh., (1998):** Genesis and classification of gypsiferous soils of the middle Euphrates floodplain, Syria", *Geoderma* 87 (1998) 67-85.
- GADDAS F. (2001):** Proposition d'une méthode de cartographie des pédopaysages. Application à la moyenne vallée du Rhône. *Thèse de doctorat*, INA Paris-Grignon, 212 p.
- GASCUEL-ODOUX, C., WALTER, C. et VOLTZ, M. (1993):** Intérêt du couplage des méthodes géostatistiques et de cartographie des sols pour la prédiction spatiale. *Science du Sol*, 31, 4, p. 193-213.
- GESSLER, P. E. (1996):** Statistical soil-landscape modelling for environmental management. *Thèse de doctorat*, Australian National University.
- GILLIOT, J.M. ET GIRARD, M.-C. (1997):** Le programme inventaire, gestion et conservation des sols et les pédopaysages. Application à une zone de la Lorraine. Chambre d'Agriculture Régionale de Lorraine, 30p + annexes. In : *Sols et Environnement*.
- GIRARD M.-C., (1983):** Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. Application à une région des plateaux jurassiques de Bourgogne. *Thèse (Docteur ès Sciences)*. *Sols* (12), 430 p.
- GIRARD M C., KING D., (1988):** Un algorithme interactif pour la classification des horizons; de la couverture pédologique. *Science du Sol*, vol. 26, 2, PP. 81-101.
- GIRARD M C., DUFAURE L., (1988):** Présentation d'un modèle de transport de l'eau dans les sols: SOURCE. In Etude sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-" *Biosphère*. INRA, p. 71-100.
- GIRARD, M C. et GIRARD, C M. (1989):** Télédétection appliquée, zones tempérées et intertropicales. Masson,. 260p. coll. *Sciences agronomiques*.
- GIRARD, M.-C. (1995):** Apport de l'interprétation visuelle des images satellitaires pour l'analyse spatiale des sols. Un exemple dans la région de Lodève. Institut National Agronomique Paris-Grignon- UER Dynamique des milieux et organisations spatiales – 78850 Grignon. *Étude et Gestion des Sols*, 2(1): 7-24.
- GIRARD, M.-C., GIRARD, C.M. (1999):** Traitement des données de télédétection. Dunod (*Technique et ingénierie*), 527 p.
- GIRARD, M.-C. ET GIRARD, C.M., (2004):** Traitement des données de télédétection.

Série environnement et sécurité Dunod, Paris, 1999, ISBN 2 10 048452 4, nouvelle présentation 2004, 529p.

GODDARD, T. KRYZANOWSKI, L., CANNON, K., LZAURRALDE, C. ET MARTIN, T. (1996): Potential of integrated GIS-Agriculture models for prediction farming systems. Dans: Integrating GIS and Environmental Modelling, Proc. of the Third International Conference/Workshop. *NCGIA Publications Office*, Santa Fe. National Centre for Geographic Information and Analysis.

GOOSSENS, R., et VAN RANST, E. (1998): The use of remote sensing to map gypsiferous soils in the Ismailia Province (Egypt). *Geoderma* 87: 47-56.

GOOSSENS, R., VAN RANST, E., GHABOUR, T.K., EL BADAWI, M. (1999): The use of remote sensing and GIS to detect gypsiferous soils in the Ismailia Province, Egypt. pp: 97-466 102.

GOOVAERTS P., (1998): "Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives", *GEODERMA* 89 1999. 1-45.

GOUSCOV N., (1964) : "Notice explicative de la carte géologique au 1/200.000e de Biskra (48) ", *service géologique de l'Algérie*, p13.

HAGAN, M.T., DEMUTH, H.B., ET BEALE, M. (1996): Neural network design. *PWS Publishing Company*, Boston, Massachusetts.

HALITIM A., (1985): Contribution à l'étude des sols des zones arides (Hautes plaines steppiques de l'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols. *Thèse doctorat*. univ Renne, 384 p.

HALITIM A., ROBERT M., (1987) : Interaction du gypse avec les autres constituants du sol. In Fédoroff N., Bresson L.M., Courty M.A. Eds. *Micromorphologie des sols*. pp. 179-186.

HALITIM A., ROBERT M., (1992): Geneses of gypseous and calcareous formations in arid zone (Algeria). *Dynamics and effects in soil properties*", *Workshop on gypseous soils. Aleppo: ICARDA-FAO*, 11 p.

HAMDI-AÏSSA, B. ET GIRARD, M.C. (2000) : Utilisation de la télédétection en régions sahariennes, pour l'analyse et l'extrapolation spatiale des pédopaysages. *Sécheresse*, 3: 179-188.

HAMDI-AÏSSA, B.H. (2001) : Le fonctionnement actuel et passé de sols du Nord Sahara (cuvette de Ouargla) : approches micromorphologique, géochimique, minéralogique et organisation spatiale. *Th. 3e cycle, Sciences sociales*, Paris, INA P-G, 307 p.

HANI, A., LALLAHEM, S., MANIA, J., DJABRI, L. (2006): On the use of finite - difference and Neural network models to evaluate the impact of underground water overexploitation. *Hydrol. Process.* 20, 4381-4390.

HATIRA A., BENMANSOUR B., GRIRA M., et GALLALI T., (2005) : Impact des eaux d'irrigation sur l'origine des accumulations gypseuses dans les sols de l'oasis de Metouia (Tunisie) ", *Étude et gestion des sols, volume 12, 1, 2005 - pages 43 a 54*.

HERRERO J et PORTA J., 1990: Micromorphology and genesis of soils enriched with gypsum. *CIHAM*. Jamz (Zaragova).

HERRERO I. J., (1991) : MORFOLOGIA y genesis de suelos sobre yesos", *Monografias INIA* N0.77, Ministerio de agricultura pesca y alimen. Madrid.

HERRERO, J., PORTA, J. AND FEDEROFF, N. (1992): Hypergypsic soil micromorphology and landscape relationships in Northern Spain. *SSSA J.*, 56: 1188-1194.

HERRERO, I. J. et PORTA J., (2000): The terminology and the concepts of gypsum-rich soils ", *Geoderma*, 96: 47-61.

HORNIK, K., STINCHCOMBE, M. & WHITE, H. (1989): Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks* 2, 359-366.

- HUNT, G. R (1977):** Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics* 42: 501-513.
- HUNT, G. R (1979):** Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology* 74: 1613-1629.
- HUNT, G.R., SALISBURY, J.W., LENHOFF, C.J. (1971):** Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: IV. Sulphides and sulphates. *Modern Geology* 3: 1-14.
- JAFARZADEH, A.A., et BURNHAM C.P., JAFARZADEH A.A., (1992) :** Gypsum crystals in soils. Cristaux de gypse dans les sols", *J. Soil SCI.*, 43(3): 409-420. *Soil SCI j.* 43 (3) 409-420.
- JAMAGNE M., (1967):** Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Ann. Agro.* n° hors série, 18, 142 p.
- JAMAGNE M., (1993) -** Evolution dans les conceptions de la cartographie des sols. *Pédologie*, XLIII, 1, 59-115.
- KAABACHE M., (1990):** les groupements végétaux de la région de Boussaâda (Algérie). Essai de synthèse sur la végétation steppique du Maghreb. *Thèses doct. D'état.* Univ. Paris-Sud. Orsay, 104 p.
- KADRI A., et HATIRA A., (1996):** Genesis and typology of gypso-saline accumulations in southern Tunisia", *International symposium on soils with gypsum Léida, Espagne*, pp. 55-59.
- KHAKURAL, B.R., ROBERT, P.C. ET MULLA, D.J. (1996):** Relating corn/soybean yield to variability in soil and landscape characteristics. Dans: Precision Agriculture, Proc. of the Third International Conference, P.C. Robert et al. (Eds.), Minneapolis, MI, (ASA-CSSA-SSSA). Pp.117 -127
- KHADEMI, H., MERMUT A.R., et KROUSE H.R., (1997) :** Isotopic composition of gypsum hydration water in la composition isotopique de l'eau d'hydratation de gypse dans selected landforms from central Iran", *Sélectionnés reliefs du centre de l'Iran. CHEM. GEOL.*, 138: 245-255.
- KHAN, N. M., RASTOSKUEV, V. V., SHALINA,E.V. AND SATO,Y., (2001):** Mapping Salt effected Soils using remote sensing Indicators simple approach with the use of GIS IDRISI. Proceeding so the 22 and Asian *Conference on Remote Sensing*, 5-9 November, Singapore. Center for Remote Imaging, sensing and Processing (CRISP), National University of Singapore; Singapore Institute of Surveyors and Valuers; Asian associionon remote sensing.
- KING C., (1983) :** Les qualités spectrales des sols nus : analyse de spectres radiométriques acquis sur le terrain dans le bassin parisien. 2ème Coll. Int. Signatures spectrales d'objets en télédétection. Bordeaux, INRA, No. 23, pp 253-264.
- KING C., (1985) :** Etude des sols et des formations superficie des sols par Télédétection. *Thèse de Doct. Ing.* Document BRGM na 96, Orléans, 174 p.
- KING D., (1986) :** Modélisation cartographique du comportement des sols basée sur l'étude de la mise en valeur du Marais de Rochefort. *Thèse Doc. Ing.* INA PG, 243 p.
- KING D., LE BISSONNAIS Y., HARDY R., EIMBERCK M., MAUCORPS J., KING C., (1992) :** Spatialisation régionale de l'évaluation des risques de ruissellement. Exemple du Nord - Pas-de-Calais. *Revue des Sciences de l'Information Géographique et de l'Analyse Spatiale*, 2 (2), 229-246
- KING, C., et DELPONT, G. (1993):** Spatial assessment of erosion: contribution of remote sensing, a review. *Remote Sensing Reviews*, 7: 223-232.
- KOUSKOV, N. 1964.** Notice Explicative de la carte Géologique au 1/200.000e de Biskra (48). Service géologique de l'Algérie, Pp. 1-13.
- KOVDA Y (1958):** Principles of theory and pracice of reclamation and utilization of saline soils in the arid zones. UNESCO - Iran symposium on salinity problems in the arid zones - Teheran 11, 15 Octobre 1958.

- KRASILNIKOV, P., CARRE, F., & MONTANARELLA, L., (2008):** "Soil geography and geostatistics (concepts and applications) ", JRC (*scientific and technical reports*), ICE (institute for environment and sustainability, 212 p. ISBN 978-92-79-08720-2 ISSN 1018-5593 Luxembourg: office for official publications of the European community's °c European communities, 2008.
- LAADJEL H., (2005) :** Contribution à la cartographie et à la répartition de la végétation spontanée dans la région du Ziban (Biskra), Mem. Ing., Université de Batna Algérie, 52.
- LACHTERMACHER, G et FULLER, J. D. (1994):** Backpropagation in hydrological time series forecasting: in Hipel, K. W., Mcleod, A. I., Panu. U. S. and Singh, V. P. (Eds), Stochastic and statistical Methods in hydrology and environmental Engineering, vol 3. Time series Analysis in Hydrology and Environmental Engineering, *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, Netherlands, pp. 229-242.
- LAGACHERIE P., (1992) :** Formalisation des lois de distribution des sols pour automatiser la cartographie pédologique à partir d'un secteur pris comme référence. Cas de la petite plaine naturelle Moyenne vallée de l'Hérault. *Th. Univ.sci. techn. Du Languedoc*, Montpellier, 175 p.
- LAGATES, D. R. AND McCABE, C. C., (1999):** Evaluating the use of goodness of fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research*, 35(1), 233-241.
- LALLAHEM, S. AND MANIA, J., (2003):** Anonlinear Rainfall-Runoff Model using Neural Network Technique: Exemple in Fractured Porous Media. *Mathematical and Computer Modelling*, 37, 1047-1061.
- LANGLOIS, Y. (1991).** Caractérisation de la variabilité spatiale des propriétés physiques des sols par échantillonnage aléatoire simple *Mémoire. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique*, 163 p.
- LEE K-S., LEE G-B., TYLER E-J., 1988 (a) -** Determination of soil characteristics from Thematic Mapper data of a cropped organic-inorganic soil landscape. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 52, pp 1100-1104
- Le HOUEROU H.N., (1959) :** Recherche Écologiques et Floristiques sur la Végétation de la Tunisie Méridionale, *Mémoire h.s. de l'Institut de Recherches Sahariennes*, Alger. 281 pages.
- LEGROS J. P (2009):** La salinisation des terres dans le monde. Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, conférence n°4069, Bull. n°40, Pp. 257-269.
- LEGROS J. P., (1996) :** Cartographie des sols: de l'analyse spatiale a la gestion des territoires". *Livres. 10 - collection génie l'environnement, Presses polytechniques et universitaires romandes ch.- 1015 Lausanne - ISBN 2-88074-298-6. 321 pages.*
- LEGROS J.-P. et BORNAND M., (1989) :** Systèmes d'Information Géographique et zonage agro-pédo-climatique. Séminaire d'agro-météorologie, 10 pages.
- LEGROS J.-P., (1987) :** Computerized data sets for soil maps. *In Geographical Information Technology in the field of environment. Volume III, Ecole Poly. Fédérale de Lausanne, Suisse*, Pp. 865-929.
- LILLESAND, T. & KIEFER, R. (1994).** *Remote sensing and image interpretation* (3rd ed.). New York, NY: John Wiley and Sons.
- LOYER J. Y. (1974) :** Les cartes d'utilisation des sols. La carte factorielle application au domaine sylvo-pastoral par pédologue (O.R.S.T.O.M .E) 91 –19 pages.
- MARSMAN B.A., et GRUUFER J.-J., (1986):** Quality of soil maps. A comparison of survey in a sanrly area. *Soi'l SUl'vey PapeI's* n° 15. Netherland, Wageningen, 103 pages.
- MARTEAU P. (1993):** Mémento roche et minéraux industriels « gypse et anhydrite) BRGM : service géologique national département géologie, Orléans cedex 2 France. R 37722. 36 Pages.
- MARTÍNEZ-MONTOYAA J. F., HERREROB J., CASTERADC M. A., (2010):** Mapping categories of gypseous lands in Mexico and Spain using Landsat imagery. *Journal*

of Arid Environments Volume 74, Issue 8, August, Pp 978–986.

MAUGET.G. (1967): L'évolution des ressources hydrauliques dans les oasis du bas Sahara algérien. Recherches sur l'Algérie. *Edition CNRS Paris*. Pages 68 – 75.

MASHALI A.M. (1996): Soil management practices for gypsiferous soils. In: R.M. Poch (ed). *Proceedings Int. Symp. On Soils with Gypsum*. Leida, Spain.

MATFIERON G., (1965) : Les variables régionales et leur estimation. *Masson*, Paris, 306 Pages.

MEILLE S., 2001 : Etude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure. *Thèse de Doctorat* en matériaux de l'université de Lyon. Institut national des sciences appliquées de Lyon. Pp 8-18.

METTERNICHT AND ZINCK (2003): Remote sensing of soils salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment* 85: Pp 1-20.

MERZOUK A., BADRAOUP M., FASSI D., AKESKOUSS H., BONN F., HINSE M. et GWYN H., (1990) : Essai méthodologique de classement et cartographie des terres en vue de la conservation des sols et des eaux en zones semi-arides : Apport de la télédétection. *Télédétection et Sécheresse*, 163-171

MERZOUK A., (1994) : Utilisation de la télédétection spatiale dans l'étude et l'inventaire des sols en zone semi-aride. *Télédétection de l'environnement* dans l'espace francophone. *Presses de l'Université du Québec/AUPELF*. ISBN 2-7605-0704-1. Pp : 22-30.

MICHOT D., (2003) : intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intra parcellaire. *Thèse de l'Université pierre et marie-curie-Paris VI*, 394 p.

MOMAL F., (1988) : Structuration et exploitation Numériques des informations géographiques. Application à la cartographie pédologique. *Thèse Doct. Ing.* INAPG, 161 pages.

MONOD T., (1992): Du désert. *Sècheresse*, 3(1). Pages 7-24

MOORE, I.D., P.E. GESSLER, G.A. NIELSEN, et G.A. PETERSON. (1993): Soil attributes prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 57:443-452.

MORI A., BEGON J.-C., DUCLOS G., S'FUDER R, (1983): First approximation of a national land evaluation system (France). In *proceeding of a Seminar on Soil Survey and Land Evaluation*, Wageningen, 26-29/9/83, Pp. 43-55.

MOUGENOT, B., POUGET, M., EPIMA, G.F. (1993): Remote sensing of salt affected soils. *Remote Sensing Reviews*, 13: 241-259.

MSANYA R.M., LANGOMR R, LOPUUSA C., (1987): Testing and improvement of a questionnaire to users of soil maps. *Soil Survey and land evaluation* (7) Pp. 33-42.

MULDERS M.A., (1987): Remote sensing in soil science. *Developments in soil science*, vol. 15, *Elsevier*, Amsterdam. 379 pages.

NAJJAR, Y., BASHEER, I. AND HAJMEER , M., (1997): Computational Neural Network for predictive microbiology : Methodology. *International Journal of food microbiology*, 34, 27-49.

NEVILLE P., COWARD R. I., WATSON R. P., INGLLS M., et MORALN S. (2000): The Application of TM Imagery and GIs Data in the Assessment of Arid Lands Water and Land Resources in West Texas. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 66, No. 11. Pp. 1373-1379. 0099-1112/00/6611-1373\$3.00/00 2000 *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*.

OMRAN El-Sayed E. (2012): ANeural Network Model for Mapping and Predicting Unconventional Soils at a Regional Level. *Applied Remote Sensing Journal* ISSN 2146 0922. Vol 2 (2): Pp 35-44.

OUAMER-Ali. K., (2008) : contribution à l'étude des sols gypseux d'Algérie. Valorisation

- d'une banque de données et détermination des profils références. Thèse de magistère, INA-El HARRACH. 152 pages.
- PAVAT J.-L., (1986)** : - Contribution à l'étude de la ressemblance entre types de sols. Apport de l'informatique. Application aux secteurs de référence. DEAENSAM, USTL, 75 pages + annexes.
- POCH R.M., (1992)**: Fabric and physical properties of soils with gypsic and hypergypsic horizons in the Ebro valley", *PhD thesis, university Gent, Belgium, 285pages*.
- PODWOJEWSKI T., P., et CLAUER N., (1998)** : Tracing the source of gypsum in new Caledonian soils by ree contents and s-sr isotopic compositions", *Chemical geology, 145: Pp 61-71*.
- PORTA J., (1998)**: "Methodologies for the analysis and characterization of gypsum in soils ", *Geoderma volume 87, issues 1-2, Pp 31-46*.
- PORTA, J. ET HERRERO, J. (1990)**: Micromorphology and genesis of soils enriched with gypsum. In: Soil micromorphology: a basic and applied science (ed. L. A. Douglas), pp. 321–339, Elsevier, Amsterdam.
- POUGET, M., (1968)** : Contribution a l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le sud-tunisien", *Cahiers ORSTOM série pédologie 6: Pp 309-365*.
- POUGET M., 1980. (b)** : Les relations sol- végétation dans les steppes sud Algéroises. Travaux et documents de l'ORSTOM. N° 116. Paris, 555p.
- QUIDEAU P., (1980)** : Cartographie détaillée des horizons en Forêt de Paimpont. Mémoire de DEA, ENSAR, 66 pages.
- RAZI S. (2006)** : Etude expérimentale de l'influence du gypse sur la dynamique du phosphore dans le sol et sa cinétique d'absorption par le ray-grass. Mém. Mag, Univ Batna, 194 p.
- RIAD, S., (2003)** : Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. *Thèse de doctorat (PhD)*. Université Lille I.
- RIAD S., MANIA J., BOUCHAOU L. and NAJJAR Y., (2004)**: Predicting catchment flow in semiarid region via artificial neural network technique, *Hydrological Process*.
- ROBBEZ-MASSON J.-M., DOLEDEC A.-F. et BILLY F., (1991)** : «Relations entre facteurs du milieu naturel et pédopaysages: choix des variables pertinentes pour une délimitation assistée», *Actes du colloque Gestion de l'espace et SIG*, INRA, Florac, pp. 5-15
- ROBBEZ-MASSON J.M., (1994)** : Reconnaissance et délimitation de motifs d'organisation spatiale. Application à la cartographie des pédopaysages. *Thèse ENSA Montpellier*. 189 p.
- ROGALA. J.-P., (1982)** : Analyse de l'hétérogénéité et de la structure des unités cartographiques. *Th. Doct. Ing. INAPG*, 224 pages.
- ROUAHNA H., (2007)**. Relation entre les nappes et la salinité dans les sols gypseux de la région d'Ain Ben Noui (Biskra). Mém. Mag, Univ Batna, 98 p.
- RUMELHART, D.E., HINTON, E. ET WILLIAMS, J. (1986)**: Learning internal representation by error propagation. *Dans Parallel distributed processing*. Vol. 1. MIT Press, Cambridge, Massachusetts. pp. 318-362.
- OZENDA., (1958)** : flore du Sahara septentrionale et central, *Edit Centre National de la recherche scientifique*, 242- 563.p.
- SEDRATI N., (2011)**: origines et caractéristiques physico-chimiques des eaux de la wilaya de Biskra-sud est Algérien. *Thèse de doctorat*, option hydrologie. Université de Badji Mokhtar Annaba-Algérie ; 252 p.
- SCANVIC, J. Y., (1992)**: télédétection spatial et informations géologiques. Manuels et Méthodes, *Editions BRGM* (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) ; Orléans, France.
- SCHOWENGERDT, R.A., (2007)**: Remote sensing: models and methods for image processing. Oxford, UK, *Elsevier Academic Press*.

- SIMONS S., (1989) :** - Prise en compte raisonnée des facteurs du milieu physique pour une appréciation de l'aptitude à la diversification des cultures après vignes. Application au secteur de Pézenas (Hérault). DEA ENSAM-USTL, 50 pages + annexes.
- STEWART P., (1969).** Quotient pluviométrique et dégradation bio sphérique : quelques réflexions. *Bull. Vocum. Hist. Agr. Phase.*, pp1 –4
- STONER, E.-R., BAUMGARDNER, M-F., (1981):** Characteristics variations in reflectance of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 1161-1165.
- SOIL SURVEY STAFF, (1951) –** Soil Survey Manual, US Department of Agriculture, Washington, 503 pages.
- SOIL SURVEY STAFF, (2003):** Ninth Edition. United States Department of Agriculture, 332 p.
- SOIL SURVEY STAFF, (2010):** Eleventh Edition. United States Department of Agriculture, 97-118 p.
- STIPA, (1984) :** Bertrand R., Falipou P., Legros J.P. ; Notice pour l'entrée des descriptions et analyses de sols en banques de données. ACCT. Paris, 136 p.
- TRICHET J., (1963):** Description d'une forme d'accumulation de gypse par voie éolienne dans le sud Tunisien. *Bull. soc. Géo. France*, pp : 617- 628.
- TRAUBE L., (1985) :** Analyses radiométriques et caractérisation des différences locales de l'état de surface des formations loessiques de la région d'Ermenonville. DEA de pédologie, INA-PG, 121 p
- THOMPSON D-R., PITTS D-E., HENDERSON K-E., (1983):** Simulation of Landsat Multispectral Scanner response of soils using laboratory reflectance measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol 47, pp 542-546
- TOURINO S. I. (2005) :** Mise en relation de la cartographie du rendement avec la distribution spatiale de l'état de surface du sol observée par télédétection. Application dans un contexte d'agriculture de précision. *Thèse doctorat* de l'institut national polytechnique de Toulouse Spécialité : analyse spatiale et agronomie .Laboratoire de Télédétection et Gestion des Territoires - LTGT (Toulouse, France).
- TOOMANIAN, N., JALALIAN, A. and EGHBAL, M. K. (2001).** Genesis of Gypsum Enriched Soils in Northwest Isfahan, Iran. *Geoderma*, 99: 199-224.
- VALS G. et VINATIER J.-M., (1979) -** Cartographie pédologique en séquence, essai au 1/100000 dans la région de Montauban de Bretagne, mémoire de DEA, ENSAR.
- VANA ALPHEN J.G., RIOS ROMERO F., 1971:** gypsiferous soils. Notes on their characteristics and management. Bulletin 12. International institute for land reclamation and improvement wageningen . The Netherlands, 44 p.
- VEILLEFON, J., (1976) :** Inventaire critique de sols gypseux de Tunisie", *ORSTOM, division des sols, Tunisie*, 98 pages.
- VIERA, S. R., NIELSEN D. R., BIGGAR J. W., (1981):** Spatial variability of field measured infiltration rates, *soil Sci.Soc. Am. J.* 45: Pp 1040-1048.
- WALTER, C. (2002) :** Analyse spatiale des sols en vue de leur gestion précise et de leur surveillance. *Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université Henri Poincaré, Nancy I. Document ENSA-INRA Rennes*, 83.
- WATSON A., 1979:** Gypsum crusts in *deserts journal of arid environnements*, 2 (1). Oxford, pp: 3- 20.
- WATSON A., (1983):** Gypsum Crust. In: "Chemical Sediments and Geomorphology: Precipitates and Residua in the Near Surface Environment". (Eds.) Goudie A. S. and Pye, K. *Academic Press. Inc.*, London. pp. 133-161.
- WATSON A., (1985):** Structure, chemistry and origin of gypsum crusts in southern Tunisia and the central Namib desert", *Sedimentology (1985)*, 32, Pp 855-875.
- WEBSTER R, (1977)-** Quantitative and numerical methods in soil classification and survey,

Monographs on Soil Survey, Clarendon Press, Oxford, 269 pages.

WEBSTER R., et OLIVER M.A., (2004): Geostatistics for environmental scientists", *Ed; Wiley, 271 pages.*

World Meteorological Organistaion (WMO) (1975): Intercomparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting, World meteorological Organisation, Technical report N° 429, Geneva, Switzerland.

XIAO R., and CHANDRASEKAR, V. (1997): Development of a neural network based algorithm for rainfall estimation fram radar obseNation. *In IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 35(1): 160-171.*

YONGCHALERMCHAI C., (1993). Etude d'objets complexes sol / plante, à différents niveaux d'organisation, de la parcelle au paysage. *Th. Doct. INA-PG, Sols, 19, Grignon, 183 p.*

ZAHOW M.F ET AMERHEIN C., (1992): reclamation of saline soil using synthetic polymers and gypsum soil. *Science & Society of America journal.56.4, pp: 1257- 1260*

<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>

<http://www.glcfc.umiacs.umd.edu/data/landsat/>

[Tapez un texte]

ANNEXES

Annexe. I

1. Classification automatique en Télédétection

1.1 Classifications non supervisées

On utilise une classification non supervisée lorsque l'identité des types de sols ou d'occupation des sols n'est pas connue. Cela résulte d'un manque d'information ou de l'incertitude sur la réalité du terrain (figure 87 a). Il existe des algorithmes de classification, composés de plusieurs itérations, permettant de créer des regroupements de pixels ayant des signatures spectrales similaires. L'utilisateur procède ensuite à la reconnaissance des classes créées par l'algorithme en affectant un nom et une couleur à chaque classe. Un des algorithmes de classification non supervisée est appelé agrégation autour des centres mobiles ou méthode ISODATA.

1.2 Classifications supervisées

Si l'utilisateur possède suffisamment d'informations sur le terrain d'étude pour constituer une nomenclature, il peut effectuer une classification supervisée. Pour cela, il doit au préalable définir des sites d'entraînement ou d'apprentissage correspondant à des régions homogènes et dont on connaît la nature (par opposition au passage précédent), délimitées par des polygones sur l'image (figure 87 b). Les caractéristiques spectrales de ces régions vont ensuite être utilisées pour entraîner la classification. Les pixels se trouvant à l'intérieur et à l'extérieur des sites d'entraînement sont ensuite affectés à telle ou telle classe. Toutes les méthodes de classification supervisée reposent sur l'hypothèse que les statistiques des données d'entraînement de chaque classe, dans chaque canal, sont distribuées selon la loi normale. C'est pourquoi une évaluation de la qualité des échantillons par le biais d'outils statistiques est nécessaire. Si les régions d'entraînement sont validées, on peut lancer la classification supervisée en choisissant une des méthodes suivantes (sous ENVI):

- Minimum distance ;
- parallélépipède ;
- maximum de vraisemblance ;
- SAM (Spectral Angle Mapper) ;
- SVM ou Séparateur à Vaste Marge.

L'algorithme de maximum de vraisemblance est le plus complexe, mais aussi le plus utilisé pour ses meilleurs résultats (Caloz et Collet, 2001 ; Lassieur, 2006). C'est un très bon algorithme, car il fournit de bons résultats par rapport aux algorithmes « minimum de distance » et « parallélépipède ».

Dans le cas du sous-bassin versant d'Oued Djedi, nous connaissant déjà la nature de la plupart des objets visibles sur l'image. On a appliqué alors la classification dirigée ou supervisée. Cette dernière s'appuie sur le choix de zones-tests sur le terrain et à l'image.

Il est rare de trouver des correspondances parfaites entre classes spectrales et d'information. Cela peut tout d'abord venir du fait qu'une même classe d'information peut présenter des variations

spectrales, liées aux différences naturelles du milieu (clairement, couvert végétal,...). À l'inverse, des zones aux identifications différentes pourront être réunies au sein d'une même classe spectrale de par leur état de surface identique (sols gypseux, salés, sableux, etc.). On comprendra dès lors que le choix des classes d'information devra s'appuyer sur des sélections thématiques d'objets, légende qui devra rester évolutive face à la restructuration comparative des classes spectrales.

Pour notre cas, nous nous sommes appuyés sur la photo-interprétation et le profil spectral (paragraphe...) pour réaliser la classification supervisée.

Enfin, la méthodologie peut s'orienter vers une classification générale de l'image, soit vers une extraction d'objets spécifiques sans chercher à interpréter l'image dans son ensemble.

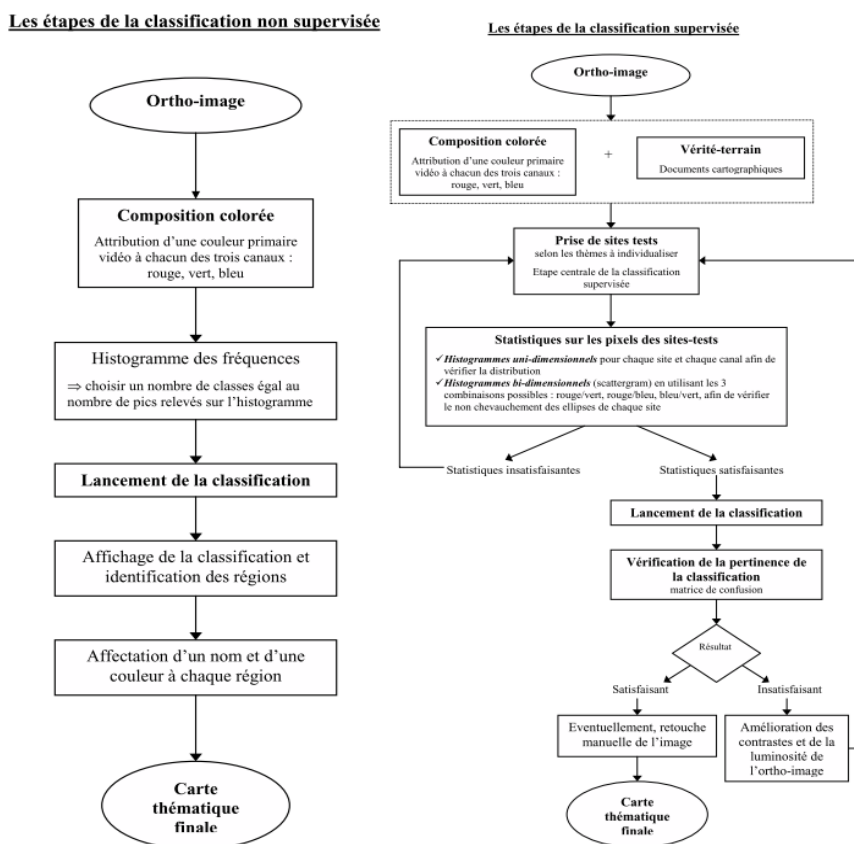


Figure 1.2-1 : Les étapes de la classification non supervisée à gauche (a) et supervisée à droite (b) (Dos Sontos, G., 2001)

2. Évaluation de la classification

La dernière étape d'une classification d'image consiste à valider sa pertinence. Pour cela on peut consulter le taux de pixels bien classés dans une matrice de confusion réalisée grâce à un fichier de référence représentant la réalité du terrain. Il ya une évaluation globale qui est divisée en deux on à :

- ✓ Une évaluation qualitative : comparaison visuelle avec des données exogènes (cartes, etc.) ;
- ✓ Et une évaluation quantitative elle- appréhende :
 - la comparaison des superficies obtenues avec des données exogènes (statistiques etc.) ;



- ou bien comparaison des nombres de classes de pixels provenant des zones d'apprentissage avec celles qui résultent de la cartographie obtenue.

2.1 L'évaluation spatialisée à l'aide de la matrice de confusion

Une matrice de confusion comprend les éléments suivants (Tableau 7-1) :

- En colonne les données des objets issus de la classification.
- En lignes les données des points de référence.
- La précision totale désigne le nombre d'objets bien classés divisé par le nombre total d'individus.
- Le taux de sur-détection, calculée selon les colonnes, correspond à la répartition des objets d'un groupe, issue de l'interprétation de données de télédétection, dans les diverses classes des données de référence.
- Le taux de sous-détection, calculée selon les lignes, est la répartition d'une classe de référence parmi les divers groupes issus de la classification (**Girard et Girard 2010**).

Figure 1- matrice de confusion

		Vérité terrain 					
		X1	...	Xii	...	XIn	XI.
Classification 	.						
	Xi	..	Xii	..	Xin	Xi.	
	.						
	X	..	Xni	..	Xnn	Xn	
	X.	...	X.j	..	X.n	X..	

X_{ij} : nb de pixels appartenant sur le terrain à la classe C_j et classés dans C_i

$X_{.j}$: somme des X_{ij} sur la colonne j

$X_{i.}$: somme des X_{ij} sur la ligne i

$X_{..}$: somme en ligne et en colonne (nombre total de pixels d'apprentissage).

2.2 Précision de la classification

A. Indice Kappa

L'évaluation de la qualité des classifications a été effectuée par l'indice de Kappa dont la valeur est comprise entre 0 et 1. Ce coefficient tient compte des erreurs en lignes et en colonnes (**Congalton et al. 1991**). Il permet une évaluation globale mais aussi au niveau de chaque classe, et il rend compte des deux types d'erreurs : déficit et excédent (**Girard et Girard 2010**).

[Tapez un texte]

- Si la classification est parfaite : $Kappa = 1$
- Si la proportion correcte observée est plus grande que la proportion correcte attendue due au hasard : $Kappa > 0$
- Si la proportion correcte observée est inférieure à la proportion correcte attendue due au hasard : $Kappa < 0$ (**Pontius 2000**).

Pour une classification donnée, un coefficient de Kappa supérieur à 0,8 indique une bonne qualité de classification, un coefficient compris entre 0,6 et 0,8 indique une classification de bonne qualité, en dessous de 0,6 la qualité de classification est faible.

B. Précision géographique globale

- Somme de la diagonale : $PGG = [(\sum_j \frac{X_{ij}}{X} \dots)] * 100$ **Équation 1**

- Erreur de commission $EC = (X_{kk}/X_k) * 100$ **Équation 2**

C'est la probabilité pour un pixel de la classe C_k sur terrain d'être bien classée en C_k sur la carte complément à 100%.

- Erreur d'omission $EO = (X_{kk}/X_k) * 100$ **Équation 3**

Probabilité pour un pixel classé en C_k sur la carte d'appartenir à C_k sur le terrain complément à 100 %.

Tableau 2. Matrice de confusion pour la trichromie original de 30 m de résolution (ETM+ 7,4,1)

Classes prédite	Classes observées				Nbr de pixels	Erreur de commission	% de bonne classification
	1	2	3	4			
1	8137	1129	751	91	10108	0.36	
2	556	3444	393	6	4399	0.40	
3	153	888	1454	104	2599	0.20	
4	82	91	58	1420	1651	0.20	
Nbr pixels	8928	9555	2656	1621	22760	Nbr total de pixels	
Erreur d'omission	0.29	0.54	0.28	0.13			

Indice global	Indice Kappa
0.75	0.61

[Tapez un texte]

Tableau 3. Matrice de confusion pour la trichromie indicielle de 30 m de résolution (IB, IH et NDVI)

Classes prédites	Classes observées				Nbr de pixels	Erreur de commission	% de bonne classification
	1	2	3	4			
1	18175	3135	662	6235	28207	0.36	64
2	4214	8181	6868	2094	21357	0.62	38
3	875	5996	60949	9877	77697	0.22	78
4	4154	3926	14957	81820	104857	0.22	78
Nbr pixels	27418	21238	83438	100028	232118	Nbr total de pixels	
Erreur d'omission	0.34	0.61	0.27	0.18			

Indice global	Indice Kappa
0.73	0.59

Annexe II

Base de données des 107 échantillons

X	Y	% caso4	%caco3	CE	pH	sable	limon	argile	Altitude
738885	3854085	10.5	15	0.8	7.5	94	2	14	146
739065	3853665	14.2	14	0.6	7.69	94	2	4	137
739125	3853545	14.4	14.6	1.4	7.65	90	6	4	138
739155	3853455	25.7	11	2.1	7.5	88	1	6	136
739275	3853125	30.51	8.6	3	7.81	88	2	6	125
739515	3852585	35.2	11.8	4.3	7.43	88	4	6	118
739635	3852285	41.45	11.8	4.5	7.78	82	6	6	113
739755	3851985	43	11.9	4.2	7.71	79	5	6	104
739845	3851745	44.2	11	4.6	7.78	80	6	6	97
739965	3851445	45	13.4	4.3	7.8	88	6	6	93
740055	3851265	46.7	13.1	4	7.78	78	6	4	82
740115	3851145	50.1	11.5	4.2	7.77	90	2	4	78
740145	3851025	51.5	9.4	6	7.76	95	2	4	75
740265	3850725	51	8.9	6.5	8.02	82	5	6	156
740415	3850365	50.9	5.5	6	7.89	82	5	6	143
740475	3850275	61.2	11.1	6.7	8.05	82	5	6	70
740595	3849975	14.6	2.2	7.2	7.89	82	5	6	134
740685	3849765	55.5	10.5	7.5	8.01	50	22	4	66
740895	3849225	55.5	11.1	7	7.75	49	22	4	68
741255	3852345	14.2	8.8	7.5	8.04	94	2	4	129
741465	3847815	25.6	9.6	7.2	7.79	45	5	6	125
741945	3846645	55.5	9.4	7.8	8.05	89	15	6	67
742065	3846375	41	13.6	8	8.02	85	5	6	123
742155	3846135	43	15.2	7.9	7.87	37	6	6	120
742455	3845445	62.4	10.5	7.9	7.78	95	22	14	63
740175	3854835	30	11.8	8	8.01	86	6	6	114
740235	3854685	43.61	11.6	7.5	7.74	72	8	6	107
740385	3854325	42.58	15.9	7.5	7.82	79	9	3	110
740505	3854025	44.81	12.4	7.5	7.82	94	2	4	108
740565	3853935	60.25	11.5	7.8	7.8	95	2	4	60
740595	3853875	40.71	13.9	7.9	7.84	95	2	4	112
740625	3853755	66.8	9.4	7.5	7.72	95	2	4	58
740715	3853575	44.84	14.6	7.6	7.74	94	2	4	101
740745	3853485	45	14	7.9	7.76	92	2	4	100
740805	3853395	45.1	12.4	8	7.84	88	6	6	95
740865	3853245	47.4	14	7.9	7.74	78	6	6	90
740925	3853095	47.51	16.5	7.9	7.76	94	2	4	90
741075	3852705	59.75	17	8.4	7.88	95	2	4	84
741135	3852615	14.45	9.7	8.4	7.79	85	5	6	127
741165	3852495	43	14.8	9.5	8.08	99	2	4	88
741285	3852225	42.88	15.3	9.4	7.79	95	2	4	88
741345	3852135	25	2.2	8.6	7.74	95	2	4	131
741345	3852075	61	14.5	10	8.1	95	2	4	85
741405	3851985	22	7.3	12	7.8	95	2	4	57
741495	3851745	60	9	15	8.18	89	4	14	84

[Tapez un texte]

741765	3851115	60	12.9	4.8	8.17	88	6	6	126
741975	3850665	55	10.6	1.2	7.48	88	6	6	128
742095	3850335	39	16	3.4	7.43	88	6	6	131
742125	3850275	55	11.3	4	7.54	75	5	10	132
742185	3850185	40	9.8	4.1	7.78	76	5	10	73
742305	3849855	48	10.4	4.6	7.78	76	5	10	113
742425	3849615	20	5.5	7	7.64	48	12	22	51
742605	3849165	30	16.4	6	7.52	92	13	4	68
742665	3849015	15	3.4	7.4	7.78	92	10.2	14	47
742725	3848865	12	2.4	6	7.79	92	21.2	4	72
742815	3848685	61.45	18.6	6.4	8.01	92	17	4	65
742845	3848595	60.88	12.6	6.5	8.02	95	15.2	4	64
742905	3848505	22	8.3	13	7.89	93	16.2	4	51
743115	3847995	59.4	8.4	6.6	7.87	93	18	4	63
743415	3847275	60.8	2.7	6.5	7.87	93	22.2	4	62
743475	3847155	41.1	11.8	7.1	7.76	92	27.1	4	88
743595	3846885	42.8	16.3	7.5	7.78	90	19.2	4	76
743625	3846795	75.7	10.3	7.6	7.78	90	21.2	4	47
743685	3846675	43.9	9.6	8	7.87	90	20.2	4	80
743745	3846555	77.9	12.8	12	7.89	95	15.1	14	46
743775	3846435	76.8	7	13	7.97	95	27.3	14	48
743835	3846285	44.5	7.9	8.5	7.88	96	14.1	4	75
743895	3846195	25	2.9	19.78	7.85	96	11	9	132
744015	3845925	15	8	8.6	8.3	75	8	9.89	178
744045	3845805	19	3.6	9	7.79	92	32	15	53
741135	3855135	21	3	10.4	8.1	95	2	21	49
741285	3854745	20	3.4	10.5	8.03	41	32	11	50
741345	3854535	43.6	5.4	10.3	8.02	95	2	17	77
741495	3854145	25	4	0.2	7.1	47	2	14	51
741585	3853935	12.45	3	1.2	7.45	75	10	23	108
741645	3853785	57.65	1.9	1.2	7.45	82	8	27	66
741675	3853725	15	2.3	4	7.74	31	36	16	51
741915	3853095	13.41	12	4.2	7.75	86	6	2	104
742305	3852015	14.5	2	4.5	7.74	94	2	3	100
742485	3851565	22.5	17.4	5	7.75	76	6	6	96
742605	3851235	89.4	2	5.6	7.73	41	32	4	48
742845	3850605	87.8	4.6	5.2	7.72	41	2	14	48
743055	3850035	42.5	17	6	7.74	76	10	31	88
743205	3849675	44	2	6	7.79	76	10	34	78
743595	3848655	72.03	4.9	9.9	7.74	75	10	34	49
743685	3853185	71.1	2	12	8.18	95	2	14	54
744135	3847245	71.99	12.6	12.6	8.18	96	2	14	49
744345	3846705	72	11.4	14.6	8.1	95	2	14	49
744645	3845925	17	2.8	17	8.38	93	2	14	47
744705	3845715	12	14	16.7	7.8	94	2	14	47
742665	3855855	19	9.6	18	8.01	76	10	35	48
742995	3855015	44	18.8	16.4	8.1	92	2	4	87
743145	3854625	27	5.1	0.2	7.45	74	10	27	50
743295	3854205	21	11.5	1.6	7.42	92	2	4	72
743475	3853695	13	9.3	4.6	7.58	82	8	13	52

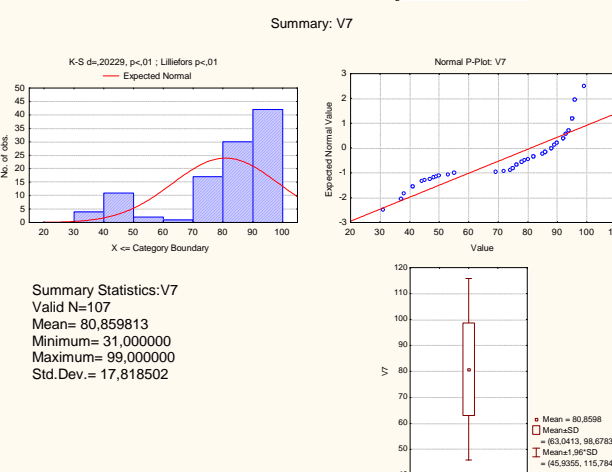
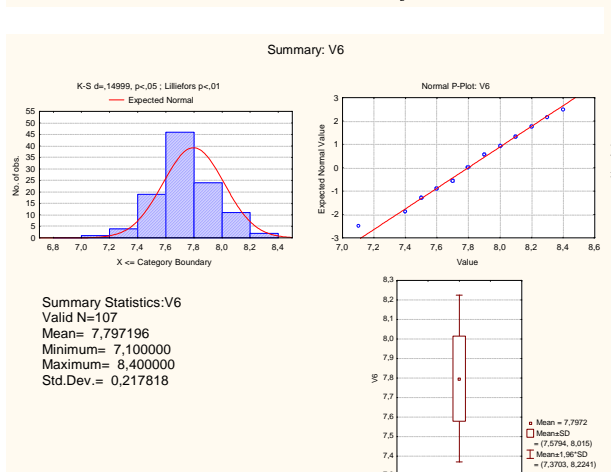
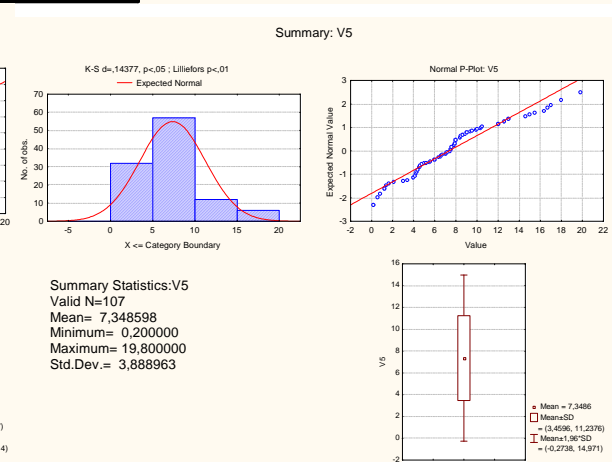
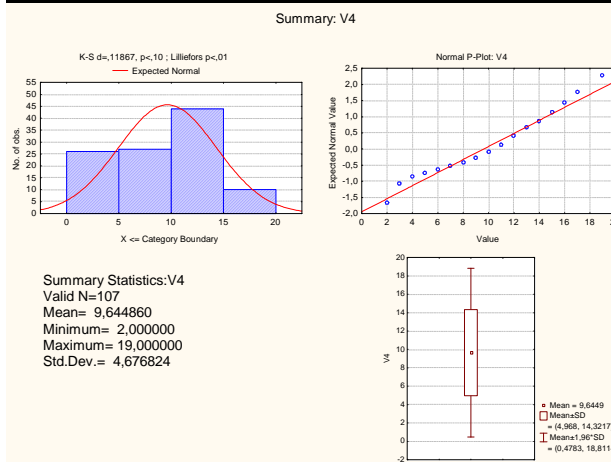
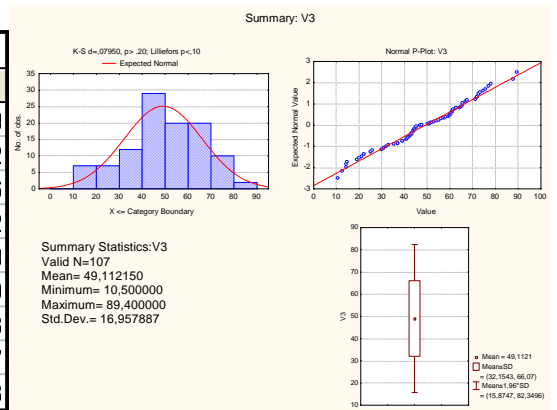
[Tapez un texte]

743535	3853515	22	3.4	4.4	7.59	86	6	16	50
743985	3847605	21	10.7	4.5	7.58	88	6	6	52
743805	3852825	22	11	4.4	7.4	55	22	38	60
743865	3852645	23	14	4.5	7.45	86	6	6	71
744045	3852195	24	5.6	12.6	7.54	53	22	16	49
744285	3851535	21	12	5.5	7.56	69	16	21	48
744525	3850935	22	7.1	15.5	7.56	86	6	16	44
745155	3849225	12	1.5	9	7.56	37	21	16	45
745545	3848235	13	6.4	8	7.59	38	23	17	43
745905	3847275	17	7	8	7.52	41	24	21	45
746085	3846765	21	2.5	8.9	7.88	44	19	17	44
746295	3846225	19	2.6	9	7.87	41	19	21	46

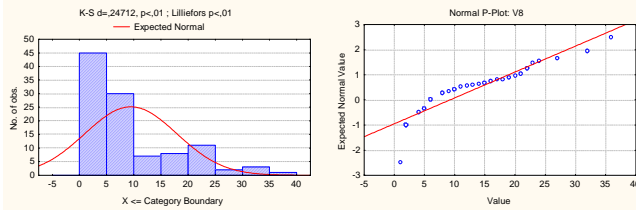
Annexe III

Statistique descriptives des 107 échantillons

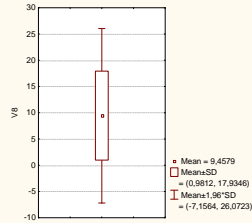
Variable	Descriptive Statistics (echensolessai3mars)				
	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
V3	107	49,11215	10,50000	89,4000	16,95789
V4	107	9,64486	2,00000	19,0000	4,67682
V5	107	7,34860	0,20000	19,8000	3,88896
V6	107	7,79720	7,10000	8,4000	0,21782
V7	107	80,85981	31,00000	99,0000	17,81850
V8	107	9,45794	1,00000	36,0000	8,47669
V9	107	9,94393	2,00000	38,0000	8,02218
V10	107	79,06542	43,00000	146,0000	23,99067
V11	107	7,75187	3,96000	11,0000	1,40998



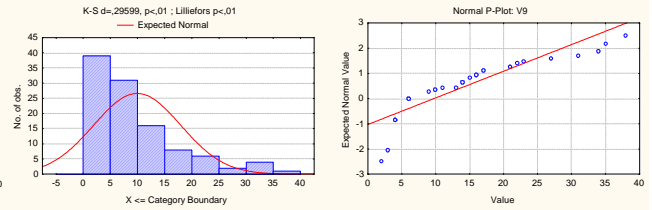
Summary: V8



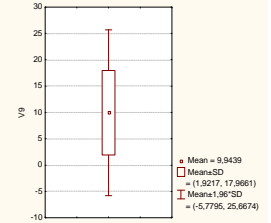
Summary Statistics:V8
Valid N=107
Mean= 9,457944
Minimum= 1,000000
Maximum= 36,000000
Std.Dev.= 8,476694



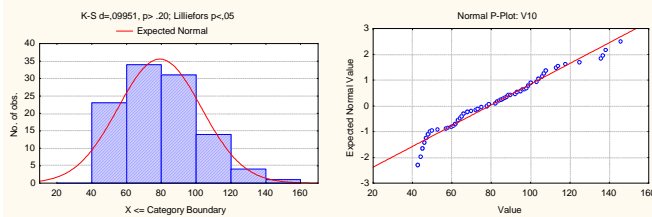
Summary: V9



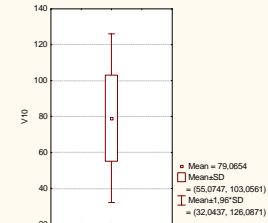
Summary Statistics:V9
Valid N=107
Mean= 9,943925
Minimum= 2,000000
Maximum= 38,000000
Std.Dev.= 8,022177



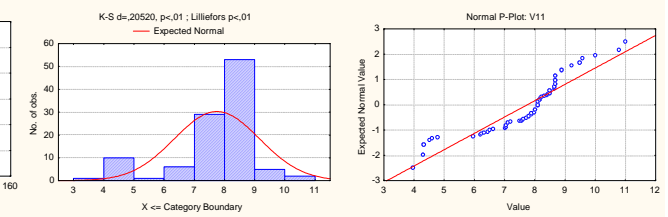
Summary: V10



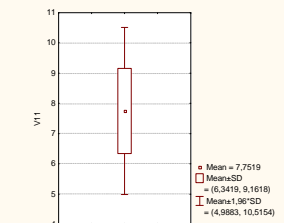
Summary Statistics:V10
Valid N=107
Mean= 79,065421
Minimum= 43,000000
Maximum=146,000000
Std.Dev.= 23,990671



Summary: V11



Summary Statistics:V11
Valid N=107
Mean= 7,751869
Minimum= 3,960000
Maximum= 11,000000
Std.Dev.= 1,409976



[Tapez un texte]

Annexe IV

La description des fosses et des profils pédologiques des sols suit essentiellement les critères de la fiche selon le modèle STIPA (2000-U.M.R. Sol et environnement-INRA Montpellier, 2011) téléchargeable sur le site <http://www.sols-de-bretagne.fr/a-telecharger/func-startdown/91/>