

CARACTÉRISATION DES SOLS GYPSEUX DANS LES ZONES ARIDES PAR TÉLÉDÉTECTION CAS DU SOUS-BASSIN VERSANT D'OUED DJEDI-BISKRA

T. Mostephaoui et R. Bensaid¹

Faculté des sciences vétérinaires, département des sciences agronomiques, laboratoire de
Lapapeza, université El hadj Lakhdar, Batna, Algérie

¹ Département des sciences agronomiques, université du 20 Août 1955, Skikda, Algérie
mostephaoui66@gmail.com

(Received 14 March 2011 - Accepted 21 November 2011)

RÉSUMÉ

La région du Zab el Gharbi fait partie des régions arides où les croûtes et encroûtements gypseux occupent une superficie relativement importante. Elle se caractérise par un manque des précipitations permanent (inférieur à 100 mm/an), ce qui rend l'irrigation indispensable pour assurer une production agricole intéressante. La région d'étude subit actuellement, suite à l'application du programme PNDA, un acharnement sans précédent de la part des agriculteurs. Des nouveaux périmètres agricoles sont exploités sans étude pédologique, en particulier ceux du bassin versant d'Oued Djedi. Par conséquent l'impact de l'irrigation se répercute sur l'évolution de la qualité des sols, d'où l'apparition de grandes plages de salinisation secondaire des sols et d'une désertification. Identifier et cartographier ces formations et connaître leur répartition spatiale contribueront à une meilleure gestion du bassin versant. Dans ce contexte, et pour la réussite de cette agriculture dans ces régions arides, les données géographiques sont des éléments essentiels. Parmi ces données, la carte des sols est obligatoire pour la mise en valeur des terres. La méthodologie utilisée pour la production de cette carte se base sur des données satellitales (ETM+ de Landsat 5 du 9/10/2009 à 30 m de résolution) et les données in situ. Elle comprend une analyse du comportement spectral (réflectance exo-atmosphérique) des aspects de surfaces des sols dans le visible et PIR et sur une classification supervisée par maximum de vraisemblance. La qualité du résultat obtenu, évaluée à l'aide de la matrice de confusion, a un coefficient Kappa de 92%. La carte ainsi produite, offre un support de visualisation et d'analyse de la distribution spatiale des sols à croûtes et encroûtements gypseux. La légende de la carte comprend 5 classes de sols compatibles avec la classification française CPCS (Commission de pédologie et de cartographie des sols, 1967).

Mots-clés: milieu aride, gypse, télédétection, cartographie, distribution spatiale

ABSTRACT

The region of Zab El Gharbi is one of the arid regions crusts and gypsum crusts occupy a relatively large area. It is characterized by a permanent lack of precipitation (less

than 100 mm / year), making irrigation essential to ensure an economic agricultural production. Following the implementation of the NPAD program, the study site, is undergoing an unprecedented activity by farmers. New agricultural areas are planted without study of the soil ability to development, notably in the watershed of Oued Djedi. The impact on soil quality, resulting in appearance of large ranges of secondary soil salinisation and desertification was evident in one of the satellite images. Identifying and mapping these formations and knowing their spatial distribution would contribute to better management of the watershed and the region. In this context, and for the success of the agriculture in these arid regions, the geographical data are essential elements. Among these data, the soil map is required for the land development. The methodology used for the production of this map was based on satellite data (Landsat ETM + 09/10/2009 5 of 30 m resolution) and in situ data. It included an analysis of the spectral behavior (exo-atmospheric reflectance) aspects of soil surfaces in the visible and IR and a supervised classification by maximum likelihood. The quality of the results obtained was assessed by using the confusion matrix with a Kappa coefficient of 92%. The map thus produced, offers support for viewing and analysis of the spatial distribution of soil crusts and gypsum crusts. The map legend includes five classes of soil classification compatible with the French CSSSC (Committee on Soil Survey and Soils Cartography, 1967).

Keywords: dry environment, gypsum, remote sensing, cartography, spatial distribution

INTRODUCTION

Les sols gypseux ou gypsisols¹ sont très sensibles aux changements environnementaux. La mauvaise gestion de ces sols provoque une dégradation importante du milieu, et elle constitue une menace pour l'agriculture surtout en sols irrigués (FAO, 1990). Les sols gypseux 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).

Dans le cadre de la revalorisation du secteur de l'agriculture en Algérie est surtout l'agriculture saharienne où la phoeniculture demeure la charnière. Des centaines d'hectares situés dans la région des Ziban, sont nouvellement aménagés et exploités par des agriculteurs qui ont bénéficié de l'aide octroyée par l'État (2004) dans le cadre du programme FNDRA², et PNDA³. Ces programmes dont l'objectif général d'assurer la sécurité alimentaire visent aussi l'amélioration du niveau de vie des populations rurales et la protection de milieux naturels fragiles.

¹ Gypsisols sont des sols avec une accumulation secondaire importante de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). On les trouve dans le climat aride. Les principaux systèmes de classification des sols gypseux sont : desert soils (URSS), aridisols (USDA soil taxonomy), yermosols ou xérosols (FAO-Unesco, 1974).

² Fonds national de développement rural et agricole.

³ Plan national de développement agricole.

Ce programme est un succès sur le plan technique, mais malheureusement la dimension scientifique (étude) a été omise. Les conséquences sont diverses: apparition des phénomènes de salinisation secondaire des sols au bout de la troisième année d'exploitation des périmètres irrigués. Le taux de salinisation est multiplié par 10. On note aussi l'apparition de l'ensablement et de la désertification dus aux implantations des villages et des parcelles agricoles à proximité des dunes stables. Il faut signaler que la région est caractérisée par des formations gypseuses, gypso-calcaires et salées au niveau de la sebkha; aux bordures de la sebkha les sols sont constitués par des sables gypseux et des barkhanes. Le taux de gypse atteint les 74 % et la nappe sulfato-sodique est à 5 mètres de profondeur. Dans ces conditions, et pour la réussite de ces programmes, une connaissance à priori des ressources en sols et en eau est essentielle. Donc, les données géographiques sont considérées comme des éléments importants pour toute mise en culture des terres. Parmi ces données, la carte des sols, qui est incontournable, représente une source d'information essentielle; son établissement fait partie des tâches prioritaires à effectuer avant toute mise en culture des terres.

Jusqu'à ce jour, dans la région d'étude, il n'existait qu'une cartographie d'inventaire des sols au 1/500.000^{ème}, effectuée en 1954 par Duran et Barbut selon les méthodes classiques de cartographie. Aucune carte de sol n'a été réalisée depuis, probablement à cause du coût excessif et au long délai de réalisation de ce type de carte.

Actuellement, la télédétection spatiale est devenue un outil performant, rapide et une source d'information fiable pour ce type d'étude. La cartographie des sols constitue à l'heure actuelle un objectif majeur de recherche en télédétection. 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 satellites 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), Mougnot *et al.* (1993), Cerveille *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). C'est dans ce contexte que la méthodologie utilisée pour la production de la carte des sols à moyenne échelle de notre région se base sur des données satellitaires (ETM+ de Landsat 5 du 9/10/2009 à 30 m de résolution) et sur les données *in situ*. Elle comprend une analyse du comportement spectral (réflectance exo-atmosphérique) des sols dans le visible et PIR et une classification supervisée du maximum de vraisemblance.

On cherche aussi à travers cette étude à établir des corrélations entre les propriétés extrinsèques (aspects de surfaces des sols) et intrinsèques de sols (textures, structures, MO, % (CaSO₄, 2H₂O), % CaCO₃, CE, la pente, *etc...*).

À partir de ces méthodes, on peut extrapoler sur toute une image des zones tests choisies auparavant et dont on connaît la signification thématique, la correspondance à un objet (ou un groupe d'objets) et établir à terme, une carte des sols compatibles avec le système de classification française (CPCS, 1967) sur l'ensemble du sous bassin versant d'Oued Djedi représentatif des Ziban.

Contexte géographique

Caractérisation du milieu naturel

La région d'étude des Ziban (Fig. 1), l'une des grandes oasis du Sahara Algérien, est composée de deux entités distinctes. Celle située à l'ouest de Biskra est appelée le Zab Gherbi. 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 nord de l'oasis.

Alors que l'axe sud de l'oasis est formé par l'ensemble des communes suivantes : Oumeche, Mlili, Ourelal, Mekhadema, Lioua. Connue comme étant la région des Oasis est représentée par le bassin versant d'Oued Djedi. Cette région est située à 450 km au Sud-Est d'Alger. Elle 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 sur 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.

La région d'étude appartient à l'étage bioclimatique aride inférieur (P entre 200 et 100 mm) 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 Melhir). La température moyenne sur toute l'année est de $22,39^{\circ}C$ avec une forte variation saisonnière. La température maximale est de l'ordre de $36,4^{\circ}C$ pour le mois de juillet avec une évapotranspiration de 420,8 mm et la température minimale est de l'ordre de $9,3^{\circ}C$ pour le mois de janvier avec 110,8 mm.

Le réseau hydrographique, assez marqué à proximité des reliefs (Figure 3), 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.

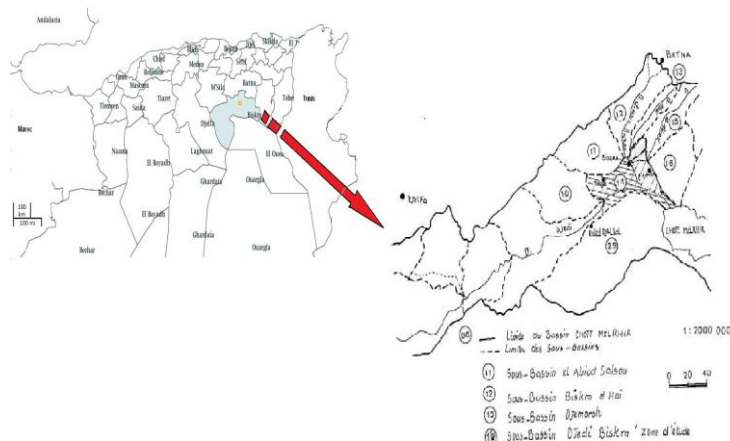


Figure 1. Localisation de la zone d'étude (source Aidaoui, 1994).

Le caractère lithologique général du site est occupé d'après Laffite (1939) *in* Aidaoui (1994), Kouskov (1964), par une formation dite « Deb deb » (Figure 2) que l'on peut rapporter au quaternaire moyen, représenté par plusieurs niveaux de glacis encoûtés (gypse et calcaire), mais dont le dépôt se poursuit sans doute encore de nos jours (Pouget, 1989).

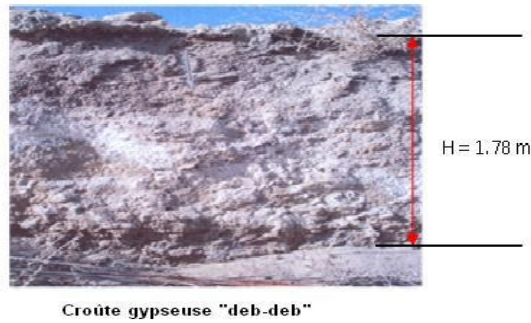


Figure 2. Croûte gypseuse « deb-deb » (Crstra, 2009).

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 psamophytes (*Aristida pungens*) sur les formations éoliennes.

MATÉRIELS ET MÉTHODES UTILISÉES

Matériels

Données optiques TM

Les données satellitaires :

Les données satellitaires utilisées sont celles provenant du capteur TM de Landsat 5 (Figure 3), acquises le 9 octobre 2009. Il s'agit de la période sèche où les sols sont nus, et présentée par une fenêtre (L, C) de 3847 * 2385 pixels sur les bandes 1 (bleu), 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.

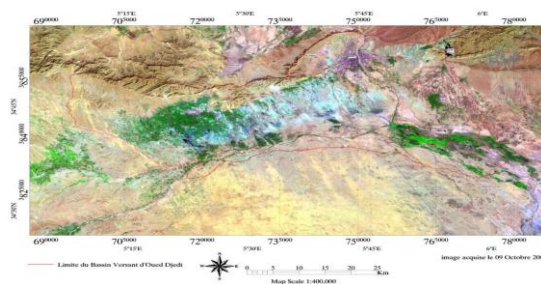


Figure 3. Trichromie 7, 4, 1 de ETM +Landsat 5 du 09/10/2009 de la région d'étude.

Un modèle numérique d'altitude

Un modèle numérique d'altitude ASTER⁴ (30 m) (Figure 4), décrivant la géomorphologie du bassin versant, a été intégré au système d'information géographique pour servir dans l'analyse de la répartition spatiale des sols.

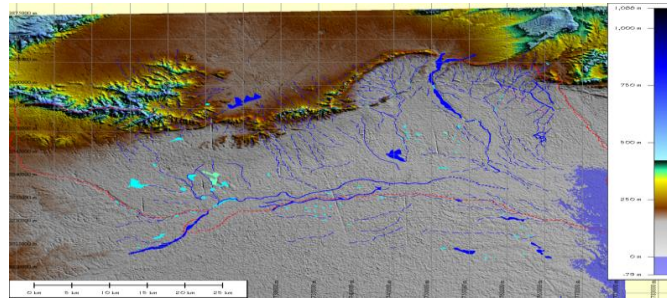


Figure 4. MNA Aster de 30 m de résolution de la région d'étude.

Données exogènes

Des données thématiques disponibles telles que les fonds topographiques, la carte pédologique au 1 : 500 000 (Duran & Barbut, 1954), la carte géologique 1 : 200 000 (1984), la carte du réseau hydrographique 1 : 50 000 (Crstra, 2007) et les données climatiques.

Données in situ

Des missions de terrain effectuées en 2007-2008 et 2009 ont permis d'identifier les limites du bassin versant et d'établir une typologie basée 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 CaCO_3 , le pourcentage de CaSO_4 , 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).

Le système de traitement d'images ENVI (version 6.1) de l'ITT⁵ Inc. a été utilisé.

Démarche méthodologique

Conformément à l'objectif de l'étude, la démarche de travail (Figure 5) est fondée sur l'identification puis la délimitation des unités des sols particulièrement les formations

⁴ Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.

⁵ Visual Information Solutions (ITT VIS)

gypseuses, obtenues à l'aide des réflectances exo-atmosphériques, puis, par des classifications dirigées sur une trichromie TM brut (R= TM7, V = TM4, B= TM1) acquise le 9/10/2009. Les images ont fait l'objet des prétraitements de routine à savoir, le rehaussement et les combinaisons des bandes les moins corrélées possible, avant de subir les classifications dirigées par la méthode du maximum de vraisemblance; enfin, un masque de la limite du bassin versant a été appliqué afin d'extraire la zone d'étude. La connaissance a priori du terrain, a permis de choisir la classification supervisée. Cette méthode est considérée comme une technique puissante de classification (Courault *et al.*, 1988; Escadafal, 1989; 1993; 1994; 1998; Boulahouat & Naert, 1996; Gilliot & Girard, 1997; Bonn, 1998; Hamdi-Aïssa, 2001; Girard & Girard, 2004; Schowengerdt, 2007; Collins *et al.*, 2009), et facilement reproductible.

L'évaluation de la pertinence des classifications a été réalisée dans un SIG en superposant à la carte obtenue par classification, les observations et les relevés de terrains localisés par GPS⁶ (Garmin, de précision environ 3 m).

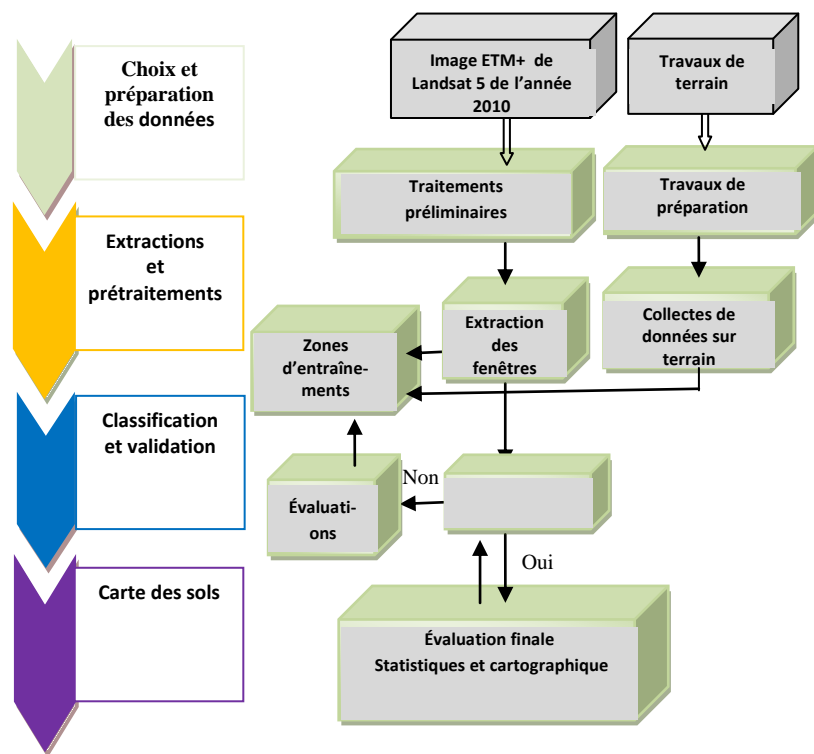


Figure 5. Démarche méthodologique de cartographie des sols par télédétection.

⁶ Global position system

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Résultats

Interprétations thématiques

Neuf thèmes sont identifiés par photo-interprétation de la trichromie TM au niveau du sous bassin versant (Fig. 6), dont six sont liés aux sols à savoir : i)- sols gypseux « plages de couleur cyan » (photos 2 et 5), ii) sols halomorphes « teinte bleutée » (photos 4, 4b), iii) sols minéraux bruts d'érosion et Régosols «sombres» (photo 1), iv) sols peu évolués d'apport éolien paléodune «marron » (photos 3, 3b), v) sols minéraux bruts d'apport éolien vi) sol peu évolué d'apport alluvial.

Trois thèmes liés à l'occupation du sol : i) palmeraies « couleur vert sombre » et ii) parcelles agricoles « couleur vert clair », iii) bâti, «couleur magenta ».

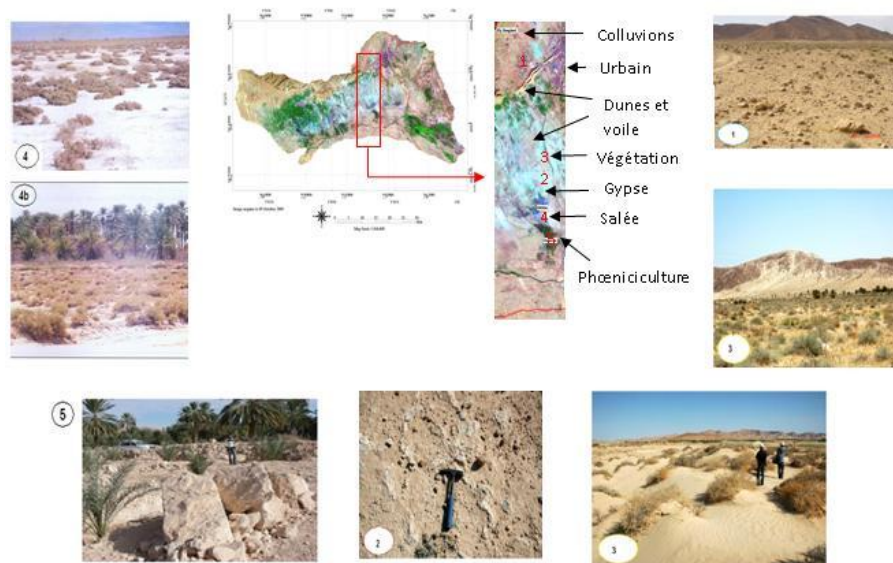


Figure 6. Photo-interprétation sur une trichromie TM 7, 4, 1 du 9 octobre 2009 du bassin versant d'oued Djedi.

Analyse des courbes spectrales

L'analyse des réponses spectrales (Fig. 7) combinée avec les résultats par photo-interprétation et le contrôle sur terrain nous ont permis de retenir huit thèmes susceptibles

d'être cartographiés. Ces thèmes, constituent aspects des surfaces des sols tests, 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 6; 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, l'humidité et la composition chimique (Torrent *et al.* (1983), *in* Courault *et al.* (1988) et Girard & Girard (2004)).

Dans la suite du texte le terme « sol » devra être compris comme « état de la surface du 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 due à leur teneur en eau. Selon Courault *et al.*, (1988), la réflectance des sols résulte directement de leurs compositions et de leurs couleurs. On peut donc relier la couleur Munsell, pour les sols mesurés sur le terrain, à leur réflectance et aux valeurs des comptes numériques des images satellites (Fig. 7).

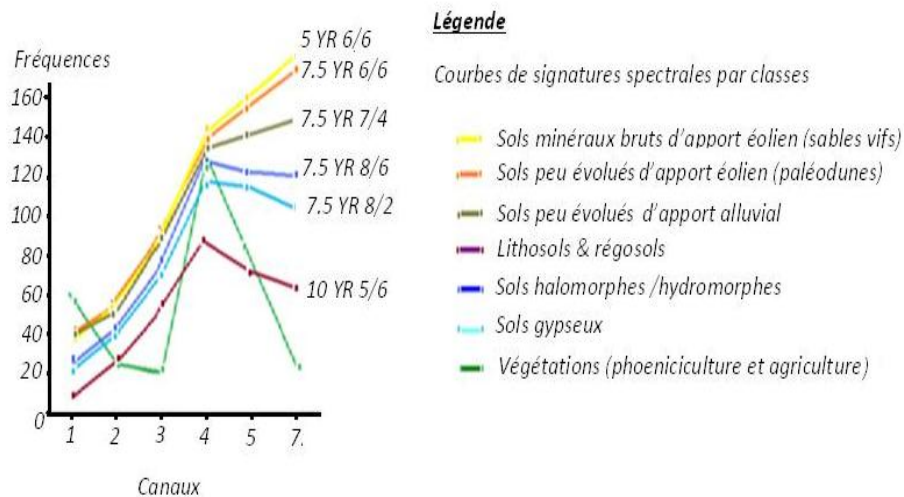


Figure 7. Courbes de comportements spectraux des classes observées sur l'image TM de Landsat 5 du 9/10/2009.

Evaluation de la classification

La classification est validée par la matrice de confusion (Tabl. 1) obtenue à partir des zones de contrôle. La qualité de la classification est estimée par le coefficient kappa = 0.92 proposé par Cohen (1960). Cet indice indique que les résultats de la classification sont admissibles. D'après Girard et Girard (1999), une classification est jugée statistiquement tout à fait bonne lorsque les accords correspondent à 80% et plus, des pixels des parcelles de référence et Pontius (2000) juge une classification statistiquement bonne lorsqu'elle est comprise entre 50 et 75 % des pixels des parcelles de référence. La classification a été validée avec les données de référence issues du terrain. Les calculs effectués sur cette matrice ont donné les indices d'exactitude de la classification (Tabl. 2). Il s'agit de la précision cartographique et des erreurs d'omission et de commission. La précision globale de la classification est de 92 %. La carte finale exprime la répartition spatiale des sols du Zab el Gharbi (Fig. 8). Sur la base de la résolution spatiale de l'image Landsat (30 x 30 m), la superficie des sols gypseux de cette zone d'étude est estimée à 33810 hectares (Tabl. 2, Fig. 9).

TABLEAU 1
Matrice de Confusion

VERITE TERRAIN									
THÈMES	1	2	3	4	5	6	7	8	TOTAL PIXELS TERRAIN
1 : S C G y	8 6 2	6 2	9 8	7 2	1 2	2 1	0	0	1 1 2 7
2 : S H a l	3 4	4 5 2	7 8	3 5	1	5	0	0	6 0 5
3 : S M B A E	1 6	1 0	5 2 1	2 6	1 3	6	0	0	5 8 2
4 : S M B E r o	1 3	6	3 6	4 1 0	2 3	1 6	0	0	5 0 4
5 : S M B E (Lith)	4	2	2 4	1 8	2 1 2	4 2	0	0	3 0 2
6 : S P E E r o (rég)	2	6	2 0	9	1 5	4 6 9	0	0	5 2 1
7 : végétations	0	0	0	0	0	0	3 7 4	2 5	3 9 9
8 : palmeraies	0	0	0	0	0	0	4 2	7 0 0	7 4 2
TOTAL PIXELS CLASSES	1031	538	777	570	277	559	416	725	4 7 8 2

1.SCGy: sols calcimagnésiques gypseux ; 2.SHal: sols halomorphes ; 3. SMBAE: sols minéraux bruts d'apport éolien ; 4. SMBEro: sols minéraux bruts d'érosion ; 5. SMBE(Lith): sols minéraux bruts d'érosion (lithologiques) ; 6. SPEEro (rég): sols peu évolués d'érosion (régosoliques) ; 7. végétations et 8. palmeraies.

La classification est bonne pour les sols gypseux (76,48%) et les sols halomorphes (74.71 %), mais montre des confusions près des dépressions; cela s'explique souvent par la ressemblance de constituants des sols (les sels) et de leurs couleurs (claire). On n'oublie pas que l'analyse ne prend pas en compte les valeurs individuelles des pixels, mais qu'elle enregistre seulement les relations de voisinage entre pixels.

Les sols minéraux bruts d'érosion et les sols d'apport alluvial sont bien individualisés par rapport aux autres classes. De la même manière, les confusions existantes entre ces classes s'expliquent aisément par leur constituant (sable) et la couleur (claire).

TABLEAU 2

Validation de la Classification: Indices d'Exactitude

Thèmes	Erreur d'Omission (%)	Erreur de Commission (%)	Précision Cartographique (%)	Surfaces (HA)
1	23.51	16.39	76.48	33810
2	25.28	15.98	74.71	18150
3	10.48	32.94	87.97	17460
4	18.65	28.07	81.34	15120
5	29.80	23.46	70.19	9060
6	9.98	16.10	90.01	15630
7	6.26	10.09	93.73	11970
8	5.66	3.44	94.33	22260
Total	2.26	2.26	4782/ 4893 = 97.73	286920

1. SCGy: sols calcimagnésiques gypseux ; 2. SHal: sols halomorphes ; 3. SMBAE: sols minéraux bruts d'apport éolien ; 4. SMBEro: sols minéraux bruts d'érosion (sable vif) ; 5. SMBELith: sols minéraux bruts d'érosion (lithologiques) ; 6. SPEEro (Reg): sols peu évolués d'érosion (régosoliques) ; 7. végétations et 8. palmeraies.

Il apparaît, d’après le Tableau 2, que les erreurs de commission sont faibles sauf pour la classe des sols minéraux bruts d’apport éolien (32.94%), qui présentent une confusion radiométrique essentiellement avec la classe gypseuse. Les erreurs d’omission sont aussi faibles, sauf pour la classe des sols minéraux bruts d’érosion (lithologiques) qui indiquent que 29.80 % des pixels issus de cette classe sont affectés à la classe sols peu évolués d’érosion (régosoliques).

Les erreurs d’omission sont plus acceptables que celles de commission. Il est donc préférable de ne pas classer un pixel plutôt que de l’affecter à une classe qui ne lui correspond pas (Collet *et al.*, 2001).

D’une manière générale, les résultats de cette classification par maximum de vraisemblance sont satisfaisants, car les pixels de référence sont bien classés, et ils varient entre 69.65 et 98.1 %.

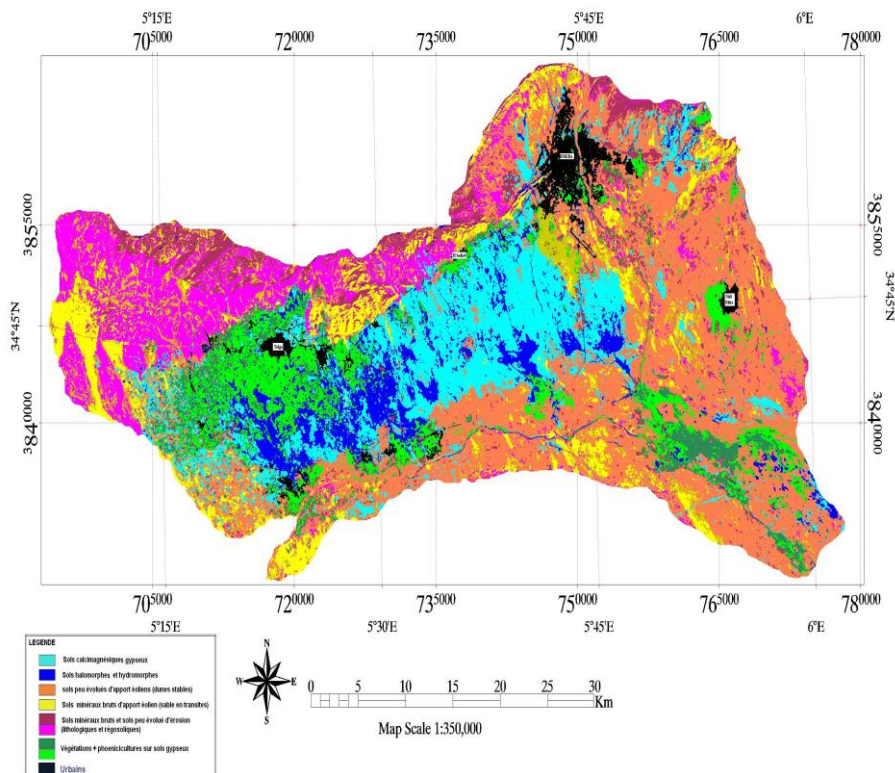


Figure 8. Image classée des états de surfaces du sol de Zab el Gharbi dans le bassin versant d’Oued Djedi par maximum de vraisemblance de l’image TM de Landsat 5 du 9/10/2009.

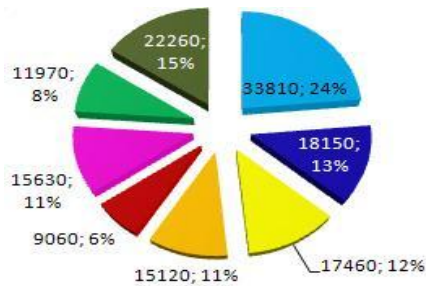


Figure 9. Superficie de chaque classe en hectares à partir de la classification.

Analyse cartographique

La carte issue de la classification par maximum de vraisemblance (Figure 8) montre une discrimination importante entre les états des surfaces localisées sur les glacis, sur le versant de Djebel Bou Rhezal d'une part et les états des surfaces des sols sur des topographies planes et des dépressions d'autre part (Figure 10). Ceci indique le rôle important de la topographie dans la distribution spatiale de ces états de surface et la corrélation entre la réflectance et les caractéristiques des sols.

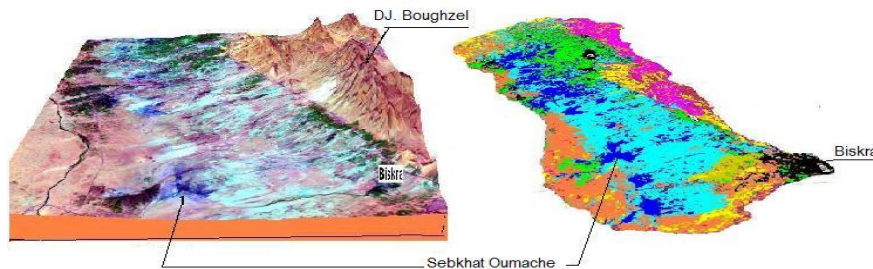


Figure 10. Image ETM+ de Landsat 5 drapé sur une MNA (Aster 30 m) de la région d'étude.

Les sols de la région d'étude sont relativement homogènes du fait d'une dominance gypseuse et saline initiale qui a uniformisé les différentes surfaces à la suite du lessivage progressif et continu des différents sels. Seules lors de ruptures de pente plus accusées se notent des accumulations gypseuses et salines plus importantes.

On observe alors en fonction de la position topographique (Fig. 10):

- en amont (montagne) sont généralement localisés les sols minéraux bruts et sols peu évolués d'érosion lithologiques et régosoliques peu profonds sur les reliefs. Ils sont caractérisés par des horizons à accumulation de calcaire diffus et des nodules de texture sableuse à sablo-limoneuse avec une très forte charge en cailloux et blocs (éboulements).
- au piémont sols calcimagnésiques souvent épais à croûtes calcaires de faibles profondeurs, à texture sableuse à sablo-limoneuse avec forte charge en cailloux en surface.

- les croûtes où encroûtements gypseux superficiels occupent le bas glacis et le plateau bordant la plaine centrale au nord-ouest (altitude moyenne 80 m).
- en aval, au niveau des bas fonds (la présence d'une nappe phréatique proche de la surface), sont localisés les sols halomorphe et hydromorphe (gley et pseudogley) ainsi que des sols calcimagnésiques gypseux, à croûtes gypseuses de nappe. Les bas fonds, temporairement inondés, portent des sols peu évolués alluviaux, de texture moyenne à lourde, et présentent souvent des caractères d'hydromorphie et d'halomorphie.

D'après l'analyse cartographique, les états de surface des sols calcimagnésiques gypseux, avec un encroûtement calcaire-gypseux (Deb-deb), couvrent une grande partie de la plaine (33810 hectares).

La carte donne aussi une idée sur la superficie importante qu'occupe la phoeniciculture dans la plaine, caractérisée par un état de surface du sol à croûte gypso-calcaire (Deb-deb). Quant à la surface des sols minéraux d'apport éolien en transit, dunes vives, elles occupent une superficie négligeable par rapport aux autres états de surface au nord ouest et au sud ouest du sous bassin versant, et correspond aux lits majeurs des oueds (berges ensablées) et aux placages éoliens sur les versants des djebels. Le sol sur lequel se déplacent ces sables éoliens sur les plaines est peu évolué, non climatique, très peu différencié à structure fondue peu développée du fait d'une texture sableuse sur 60 cm de profondeur.

Globalement, cette analyse cartographique confirme les résultats de l'analyse statistique et présente une répartition spatiale considérée comme satisfaisante par rapport à la réalité du terrain.

CONCLUSION

La classification dirigée est la plus appropriée pour l'identification des sols des régions arides et en particulier les sols calcimagnésiques à croûtement et encroûtement gypseux. Elle offre une plus grande marge de pratiques à l'opérateur qui peut l'appliquer, dès lors qu'il connaît quelques aspects des surfaces de référence ou dès qu'il peut identifier, par interprétation visuelle, des unités de sol avec un minimum de certitude. Les principales classes de sols ont été bien caractérisées par les différentes signatures spectrales exo-atmosphériques (pics de réflexion et d'absorption) dans le domaine du visible et de l'infrarouge. Celles-ci sont liées à la couleur et à la composition minéralogique des sols. La méthode, appliquée a permis de dresser une carte des sols à partir des images TM de Landsat 5, par classification répartie en 8 classes qui représentent bien la réalité du terrain, mais l'analyse de la matrice de confusion a montré la possibilité de confusion entre les sols, malgré le fait que les signatures spectrales des surfaces de sols gypseux se distinguent des autres surfaces de sols à plus de 98 %.

Enfin l'identification et la cartographie des sols gypseux par télédétection et des mesures sur le terrain peuvent être étendues à d'autres régions arides dépourvues de toute cartographie. L'intégration de toutes les données descriptives et géographiques en base de données dans un système d'information géographique, pour la mise à jour des cartes permet d'aider les décideurs à bien gérer leur territoire du point de vue aménagement hydro-agricole et de le préserver de toute dégradation.

On peut dire enfin, qu'il est certain que des images Landsat ETM+ offrent de réelles possibilités pour la détection, des régions arides et en particulier les sols gypseux à travers le comportement spectral des sols. Mais les résultats obtenus laissent penser à l'utilisation de la classification orientée objet sur des images à haute résolution (Alsat2 de 2.5 m de résolution) dans la suite des travaux, ce qui permettra probablement une bonne discrimination thématique.

RÉFÉRENCES

- Aidaoui, S. 1994. *Ressource en eau et aménagement hydro-agricole dans la région de Biskra « Ziban » (Algérie)*. Thèse de doctorat, université de Nancy II, laboratoire de géographie physique, pp. 317.
- Bialousz, S., Girard, M.-C. 1978. Les coefficients de réflexion spectrale des sols dans les bandes de travail de Landsat. *Fotointerpretacja w Geografii, Kaowice*, III(13): 96-109.
- Bonn, F. 1998. *Précis de télédétection*. Volume 2, applications thématiques, presse de l'université du Québec/AUPELF.
- 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.
- Casenave, A. et Valentin, C. 1989. *Les états de surface de la zone sahélienne*. Éd. Orstom, Collection Didactiques, 227 p.
- 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.
- Cierniewski, J., Courault, D. 1993. Bidirectional reflectance of bare soil surfaces in the visible and near-infrared range. *Remote Sensing Reviews*, 17: 321-339.
- Cohen, J. 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educ. Psychol. Meas.*, 20: 27-46.
- 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.
- Coque, R. 1962. *La Tunisie présaharienne : étude géomorphologique*. Armand Colin éd., Paris, Thèse d'état, 488 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.
- CPCS 1967. *Classification française des sols*. Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols.
- Crstra 2007. *Atlas de la faune et la flore des zibans*. Éd. 2007.
- Dekkiche, B. 1976. Sur quelques sols à accumulation de gypse dans le Hodna. *Annales de l'INA (el Harrach)*, VI(1).
- Djili, K. 2000. *Contribution à la connaissance des sols du nord de l'Algérie*. Thèse doctorat, INA, Alger, 243 p.
- Duran, M.J.H., Barbut, M.M. 1954. *Carte des sols de l'Algérie, légende*. Service géographique de l'armée, échelle 1/500.000^{ème}.

- Durand, J.H. 1953. *Étude géologique, hydrogéologique et pédologique des croûtes en Algérie*. S.E.S. Alger, 209 p.
- 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 typical 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 15^e, 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., Ilaïwin M., Osman, A. 1981. Mineralogy and micro - morphology of aridisols. *Proc. 3rd Int. Soil Classification Workshop*, ACSAD, Damascus.
- FAO-Unesco, 1974. *FAO/Unesco soil map of the world 1:5,000,000*. Unesco, World, V.I., legend, Paris, 59 p.
- FAO 1990. Management of gypsiferous soils. Soil resources, management and conservation service FAO land and water development division. *FAO Soils Bulletin 62*. FAO, Rome, 1990 M-51 ISBN 92-5-102948-2
- Florea, N., Al-Joumaa, Kh. 1998. Genesis and classification of gypsiferous soils of the middle Euphrates floodplain. *Syria Geoderma*, 87: 67-85.
- 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. 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.
- Halitim, A. et Robert, M. 1992. Genesis 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.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.

- 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.
- Herrero, I.J. 1991. Morfología y genesis de suelos sobre yesos. *Monografias INIA*, num. 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.
- Herro, I.J. et Porta, J. 2000. The terminology and the concepts of gypsum-rich soils. *Geoderma*, 96(1-2): 47-61.
- 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.
- 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.
- King, C., 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 1/200.000° de Biskra (48)*. Service géologique de l'Algérie, pp. 1-13.
- Mougenot, B., Pouget, M., Epima, G.F. 1993. Remote sensing of salt affected soils. *Remote Sensing Reviews*, 13: 241-259.
- Poch, R.M. 1992. *Fabric and physical properties of soils with gypsic and hypergypsic horizons in the Ebro valley*. Phd thesis, University Gent, Belgium, 285p.
- Pontius, R.G. Jr. 2000. Quantification error versus location in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(8): 1011-1016.
- 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 à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le sud-tunisien. *Cahiers ORSTOM*, série pédologie, 6: 309-365.
- Pouget, M. 1980. Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises. *Travaux et documents de l'Orstom*, n° 116, Paris, 555 p.
- Schowengerdt, R.A. 2007. *Remote sensing: models and methods for image processing*. Oxford, UK, Elsevier Academic Press.
- Stoner, E.-R., Baumgardner, M-F. 1981. Characteristics variations in reflectance of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 1161-1165.
- Trichet, J. 1963. Description d'une forme d'accumulation de gypse par voie éolienne dans le sud tunisien. *Bull. Soc. Géo.*, p. 617- 628.
- <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>
www.glcfc.umiacs.umd.edu/data/landsat/