

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للفلاحة
الحراش – الجزائر
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE
EL-HARRACH – ALGER
E.N.S.A.

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Science Agronomique

Mémoire

Ecole doctorale : Science du sol

Thème :

*Morphologie et propriétés des gypsisols références
du Hodna*

Présenté par :
RAHMOUNI Amina

Devant le jury compose de :

M^r DAOUD Y.

Professeur

Président

M^r DJILI K.

Professeur

Directeur de thèse

M^r DRIDI B.

Maître de conférence

Examineur

M^r HAMDI-AISSA B.

Maître de conférence

Examineur

Soutenu le : 17/06/2010

*Année Universitaire
2009-2010*

- Dédicace -

*Je dédie ce travail à une personne très très chère que
je n'oublierai jamais car elle restera toujours
vivante dans mon cœur*

A toi seul « Khali Messaoud »

Que dieu bénisse ton âme et t'accueille dans son vaste paradis

Amina

- Remerciements -

Je remercie Dieu le tout puissant, pour m'avoir donné la force, le courage, la santé et les moyens afin d'accomplir ce travail.

Je tiens à remercier également :

- *Monsieur Djili K. Professeur à l'E.N.S.A., mon directeur de thèse, de m'avoir dirigé, pour la réalisation de ce travail, malgré ces nombreuses occupations, il a toujours été présent pour me conseiller et m'orienter du début jusqu'à la mise en œuvre de ce travail.*
- *Monsieur Daoud Y., Professeur à l'E.N.S.A., qui m'a fait le grand honneur d'accepter de présider mon jury et pour ses orientations et précieux conseils tout le long de la réalisation de ce travail. Qu'il retrouve ici, l'expression de ma profonde gratitude.*
- *Monsieur Dridi B., Maître de conférence au département de science du sol à l'E.N.S.A., pour bien vouloir juger ce travail et faire partie du jury. Je lui exprime mes sincères reconnaissances pour son aide ainsi que ses encouragements constants.*
- *Monsieur Hamdi-Aïssa B., Maître de conférence au département des sciences agronomiques (Université de Ouargla) d'avoir voulu examiner mon travail ainsi que pour ses précieux conseils.*

Je désire remercier sincèrement tous nos enseignants du département de pédologie pour le savoir qu'ils m'ont inculqué durant toutes ces années.

Mes remerciements vont également à Ouamer-Ali Karim, pour toute son aide qu'il m'a portée du début jusqu'à la fin de réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble du personnel notamment, Hassiba, Ahmed, Amaar et Redouane sans oublier M^{elle} F. Larbi, bibliothécaire du département dont le mérite est reconnu.

Je tiens à exprimer mes sincères sentiments envers nos amis de la promotion pédologie 2004 et de post-graduation. J'espère que nous gardions les souvenirs des bons moments passés ensemble.

Je n'oublierai pas ma famille qui m'a porté un soutien moral depuis le début de réalisation de ce travail.

Amina

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I. Synthèse bibliographique	
1. Généralités	4
2. Les sols gypseux dans le monde	5
3. Les sols gypseux en Algérie	8
4. Origine du gypse dans le sol	13
Théorie per ascensum «origine des nappes»	14
Théorie per descensum	14
Théorie d'apport latéral	15
Théorie de l'action biologique «origine biologique»	15
théorie lagunaire «origine lagunaire»	16
Origine géologique	16
5. Formes d'accumulation du gypse	16
Accumulations généralisées	16
Encroûtements localisés	19
6. Classification des cristaux de gypse	20
7. Propriétés chimiques	22
pH	22
Solubilité du gypse	23
Relation gypse-calcaire	26
Relation gypse-CEC	28
8. propriétés physiques	29
Structure	29
Texture	30
Stabilité structurale	30
Résistance à la pénétration	31
Dynamique de l'eau dans le sol	31
9. Propriétés thermiques	32
10. Minéralogie des sols gypseux	34
11. Problèmes des analyses des sols gypseux	35
Granulométrie	36
Mesures d'humidité	37
Dosage du gypse	38
CEC et bases échangeables	38
12. Effet du gypse sur les plantes	39
13. Classification des sols gypseux	40
Classification française	40
Classification américaine	41
Classification WRB (2006)	45

Chapitre II. Matériel et Méthodes

1. Milieu d'étude	50
2. Méthodes d'étude	53
Etude à l'échelle locale	53
Etude à l'échelle de l'Algérie	58

Chapitre III. Résultats et discussion

1. Caractérisation morpho-analytique	62
Description des profils étudiés	62
Synthèse sur les profils étudiés	98
2. Traitements statistiques de la variable taux de gypse	99
Statistiques descriptives	99
Corrélation entre le gypse et les autres paramètres du sol	101
3. Etude de la base de données	112
Taux de remplissage de la base de données	112
Analyse statistique de la variable taux de gypse	114
Présentation des profils étudiés	118
Détermination des principaux profils références et établissement d'un schéma d'organisation général des profils étudiés	120
Synthèse sur les résultats obtenus	132
4. Discussion générale	133
Conclusion générale	140

Références bibliographiques

Annexes

Liste des tableaux

	Pages
Tableau I. Distribution des sols gypseux par pays (F.A.O., 1990)	07
Tableau II. Solubilité dans l'eau de quelques sels (g/kg de solution) en fonction de la température (Servant, 1975 in Halitim, 1988)	23
Tableau III. Influence de la température sur la solubilité du gypse (Pouget, 1968)	23
Tableau IV. Influence de la concentration de NaCl sur la solubilité du gypse (Pouget, 1968)	25
Tableau V. Action des chlorures de magnésium sur la solubilité du gypse (Pouget, 1968)	25
Tableau VI. Relation entre la CEC des sols et la teneur en gypse dans la vallée de Balikh en Syrie (F.A.O., 1990)	28
Tableau VII. Les minéraux les plus fréquents présents dans les sols gypseux (Eswaren et Gang, 1991)	34
Tableau VIII. Les sols gypseux dans la classification C.P.C.S. (1967)	40
Tableau IX. Les sols gypseux dans la clé de la Soil Taxonomy (2006)	43
Tableau X. Unités inférieures du groupe de référence des gypsisols (W.R.B., 2006)	48
Tableau XI : Méthodes et principes des différentes analyses de sol	55
Tableau XII : Données analytiques du profil P1	65
Tableau XIII : Comparaison des teneurs en gypse des deux méthodes pour chaque profil et pour l'ensemble des 05 profils étudiés	66
Tableau XIV : Données analytique du profil P2	73
Tableau XV : Données analytique du profil P3	80
Tableau XVI : Données analytique du profil P4	87
Tableau XVII : Données analytique du profil P5	95
Tableau XVIII : Statistiques descriptives de la variable taux de gypse	99
Tableau XIX: Comparaison des moyennes des taux de gypse entre les trois catégories d'horizons	100
Tableau XX : Résultats des corrélations linéaires entre le gypse et les autres paramètres du sol	102
Tableaux XXI : Taux de remplissage pour les variables analytiques de la base	113
Tableaux XXII : Taux de remplissage pour les variables descriptives de la base	113

Tableau XXIII : Renseignement des variables selon le taux de remplissage de la base	114
Tableau XXIV : Paramètres descriptifs de la variable taux de gypse pour l'ensemble des horizons ainsi que pour chaque catégorie d'horizon	115
Tableau XXV : Paramètres descriptifs de la variable taux de gypse et l'épaisseur des horizons diagnostiques gypsiques	116
Tableau XXVI : Paramètres descriptifs des taux de gypse pour les horizons diagnostiques gypsiques pour chaque catégorie d'horizon	117
Tableau XXVII : Comparaison des moyennes des taux de gypse des horizons diagnostiques étudiés	117
Tableau XXVIII : Nombre de profils étudiés par wilayas et zones d'études	119
Tableau XXIX : Répartition des grandes références par wilayas et zones d'études	123
Tableau XXX-a : Gypsisols références de la GR1 recensés en Algérie	125
Tableau XXX-b : Gypsisols références de la GR2 recensés en Algérie	126
Tableau XXX-c : Gypsisols références de la GR3 recensés en Algérie	127
Tableau XXX-d : Gypsisols références de la GR4 recensés en Algérie	127
Tableau XXX-e : Gypsisols références de la GR5 recensés en Algérie	128
Tableau XXX-f : Gypsisols références de la GR6 recensés en Algérie	129
Tableau XXXI : Moyennes des paramètres analytiques qui définissent les préfixes employés dans les gypsisols références étudiés	130
Tableau XXXII : Moyennes, épaisseurs et emplacement des horizons diagnostiques gypsiques des gypsisols références étudiés	131

Liste des figures

	Pages
Figure 01 : Distribution mondiale des Gypsisols selon la légende mondiale des sols (1998)	06
Figure 02 : Morphologie schématique d'un sol gypseux polygonale (Halitim, 1985)	18
Figure 03 : Différentes formes des cristaux de gypse (Jafarzadeh et burnaham, 1992)	21
Figure 04 : Solubilité du gypse en fonction de la taille des particules (F.A.O., 1990)	24
Figure 05 : Relation entre le gypse et le carbonate de calcium dans différents sols de Tunisie affectés par des croûtes gypseuses de surface (Vieillefon, 1976)	27
Figure 06 : Déshydratation du gypse à température croissante (Weisser et al. In Vieillefon, 1979)	33
Figure 07 : Extrait de la carte topographique de Biskra au 1/500 000 ème	51
Figure 08 : Extrait de la carte géologique de l'Algérie au 1/500 000 ème	52
Figure 9 : Emplacement des profils étudiés	54
Figure 10 : Emplacement des profils étudiés en fonction de la pente	54
Figure 11 : Courbe pF du profil P1	67
Figure 12 : Courbe pF du profil P2	74
Figure 13 : Courbe pF du profil P3	81
Figure 14 : Courbe pF du profil P4	88
Figure 15 : Courbe pF du profil P5	96
Figure 16 : Profil gypseux moyen des sols étudiés	100
Figure 17 : Profils gypseux des sols étudiés	101
Figure 18 : Relation entre le gypse et le pH pour les encroûtements gypseux	103
Figure 19 : Relation entre le gypse et le calcaire total pour les encroûtements gypseux	104
Figure 20 : Relation entre le gypse et la conductivité électrique de la solution du sol pour les encroûtements gypseux	105
Figure 21 : Relation entre les taux de gypse et les sulfates de la solution du sol pour les encroûtements gypseux	106
Figure 22 : Relation entre les taux de gypse et le calcium de la solution du sol pour les encroûtements gypseux	107
Figure 23 : Relation entre les taux de gypse et l'humidité au pF0 pour les encroûtements gypseux	108
Figure 24 : Relation entre les taux de gypse et l'humidité au pF2.5 pour les encroûtements gypseux	109
Figure 25 : Relation entre les taux de gypse et l'humidité au pF4.2 pour les encroûtements gypseux	110
Figure 26 : Relation entre les taux de gypse et l'indice de perméabilité hydraulique K (cm/heure)	111
Figure 27 : Représentation spatiale des gypsisols étudiés	118
Figure 28 : Schéma d'organisation général des gypsisols références étudiés	122
Figure 29 : Spatialisation des profils étudiés selon les grandes références (de GR1 à GR6)	124
Figure 30 : Schéma de la référence relative à P1	135
Figure 31 : Schéma de la référence relative à P2 et P5	136
Figure 32 : Schéma de la référence relative à P3	136

Liste des photos

	Pages
Photo 01 : Accumulations gypseuses rencontrées dans la région d'El Oued (Temmar, 1995)	09
Photo 02-a : Chaînettes à Ouargla (Rahmouni, 2007)	10
Photo 02-b : Chaînettes à El Oued (Temmar, 1995)	10
Photo 03 : végétation caractéristique de P1	62
Photo 04 : Aspect de surface caractéristique de P1	62
Photo 05 : Poudingues et cristaux de gypse agrandis	62
Photo 06 : Profil P1	63
Photo 07 : Des affleurements de gypse caractérisant le profil P2	70
Photo 08 : Végétation caractéristique de P2	70
Photo 09 : Horizon de surface du profil P2 sous les touffes de végétation	70
Photo 10 : Profil P2	71
Photo 11 : Végétation caractéristique de P3	77
Photo 12 : Aspect de surface caractéristique de P3	77
Photo 13 : Profil P3	78
Photos 14 : Végétation caractéristique de P4	84
Photos 15 : Aspect de surface caractéristique de P4	84
Photo 16 : Profil P4	85
Photo 17 : Poches de l'horizon de surface du profil P4	86
Photo 18 : Végétation caractéristique de P5	92
Photo 19 : Aspect de surface caractéristique du profil P5	92
Photo 20 : Croûte de battance en surface du profil P5	92
Photo 21 : Profil P5	93

Résumé

Cette étude a portée sur la caractérisation des gypsisols références d'Algérie selon le concept de la WRB (2006) à l'échelle locale d'abord et à l'échelle du pays ensuite.

L'étude détaillée de 5 profils de la région de « Bordj EL jir » dans la wilaya de M'Sila a montré que le solum des sols est à chaque fois constitué de deux couches distinctes. La couche de surface est peu épaisse (de 9 cm à 35 cm), peu pourvue en gypse (gypse < 5 %), calcaire (13 % < calcaire total < 25 %), meuble, de couleur foncée et bien structurée. En revanche, la deuxième couche est constituée d'une succession d'encroûtements gypseux (36 % < gypse < 82 %), épais (plus de 75 cm d'épaisseur), peu calcaires (1 % < calcaire total < 15 %), massifs, salés en profondeur (4 dS/m < CE < 21 dS/m), non organiques et présentent des signes d'hydromorphie en profondeur. Sur la base de ces résultats, quatre profils sur les cinq étudiés, constituent quatre gypsisols références qui sont :

- Hypergypsique Hyposalique Calcique Gypsisol (Aridique)
- Hypergypsique Hyposalique Endogleyique Gypsisol
- Hypergypsique Hypogypsique Hyposalique Endogleyique Gypsisol
- Hypergypsique Hyposalique Gypsisol

Le cinquième profil, quand à lui, il se rapproche beaucoup plus des solonchaks et serait un Episalique Endosalique Hyposalique Endogleyique Hypergypsique Calcique Solonchak (Aridique).

Les teneurs en gypse des horizons gypsiques sont statistiquement bien corrélées aux teneurs en calcaire total ($p < 0.0001$; $r = - 0.86$), à la rétention en eau à pF2.5 ($p = 4.8 \cdot 10^{-4}$; $r = 0.72$), à la rétention en eau à pF4.2 ($p = < 0.0001$; $r = 0.89$) et à la conductivité hydraulique ($p = 0.001$; $r = - 0.69$). Ainsi, l'augmentation des teneurs en gypse s'accompagne par une diminution de celles du calcaire total et de la conductivité hydraulique et par une augmentation de la rétention en eau aux pF2.5 et 4.2.

A l'échelle nationale, nous avons recensé 47 gypsisols références regroupés dans six grandes références. Ces dernières se distinguent les unes des autres par la présence ou non des horizon salique, gleyique, calcique ou luviqque avec toutes les combinaisons possibles avec l'horizon diagnostique gypsiqque. Les grandes références reconnues sont les suivantes :

- Gypsiqque Salique [Endogleyique] Gypsiqque (Sodique, Aridique, Arénique, Siltique)
- Gypsiqque Salique [Endogleyique] Calcique Gypsiqque (Sodique, Aridique, Siltique)
- Gypsiqque Salique [Endogleyique] Luviqque Gypsiqque (Sodique, Aridique, Siltique, Clayique)
- Gypsiqque Salique Calcique Luviqque Gypsiqque (Sodique, Aridique, Siltique, Clayique)
- Gypsiqque [Endogleyique] Gypsiqque (Sodique, Aridique, Arénique, Siltique)
- Gypsiqque [Endogleyique] Calcique Gypsiqque (Sodique, Aridique, Siltique, Clayique).

Mots clés : WRB, gypsisols, profils références, base de données pédologique, gypse, critères diagnostiques.

Summary

This research has taken to the characterisation of references gypsisols of Algeria according to the concept of WRB (2006) in local and national scales.

The detail study of 5 profiles in « Bordj El-Jir » reveals that the Solum of soils is every time constituted of 2 different layers. The surface layer is not very thick (from 9 cm to 35 cm), less gypsiferous (gypsum < 5 %), calcareous (13 % < total calcareous < 25 %), movable, dark color and well structured. Nevertheless, the second layer is constituted of gypsiferous encrusts succession (36 % < gypsum < 82 %), thick (more than 75 cm), less calcareous (1 % < total calcareous < 15 %), massive, salty in the depth (4 dS/m < CE < 21 dS/m), not organic with hydromorphic sign in the depth. Four profiles from the fives studied constitute references gypsisols witch are :

- Hypergypsic Hyposalic Calcic Gypsisol (Aridic)
- Hypergypsic Hyposalic Endogleyic Gypsisol
- Hypergypsic Hypogypsic Hyposalic Endogleyic Gypsisol
- Hypergypsic Hyposalic Gypsisol

The fifth profile is solonchaks and is Episalic Endosalic Hyposalic Endogleyic Hypergypsic Calcic Solonchak (Aridique).

Gypsum contents of gypsic horizons are statistically correlated with total calcareous contents ($p < 0.0001$; $r = -0.86$), water retention at pF2.5 ($p = 4.8 \cdot 10^{-4}$; $r = 0.72$), water retention at pF4.2 ($p = < 0.0001$; $r = 0.89$) and to hydraulic conductivity ($p = 0.001$; $r = -0.69$). Thus, the increase of gypsum contents in soils is accompanied with a decrease of total calcareous contents and hydraulic conductivity, and with an increase of water retention at pF2.5 and pF4.2.

At the national scale, we have registered 47 references gypsisols grouped together in six greats references witch are different by the presence or the absence of salic, gleyic, calcic, or luvic horizons combined with gypsic horizon. The great references are:

- Gypsic Salic [Endogleyic] Gypsisol (Sodic, Aridic, Arenic, Siltic)
- Gypsic Salic [Endogleyic] Calcic Gypsisol (Sodic, Aridic, Siltic)
- Gypsic Salic [Endogleyic] Luvic Gypsisol (Sodic, Aridic, Siltic, Clayic)
- Gypsic Salic Calcic Luvic Gypsisol (Sodic, Aridic, Siltic, Clayic)
- Gypsic [Endogleyic] Gypsisol (Sodic, Aridic, Arenic, Siltic)
- Gypsic [Endogleyic] Calcic Gypsisol (Sodic, Aridic, Siltic, Clayic).

Key words : WRB, gypsisols, references profiles, pedological data base, gypsum, diagnostic criterion.

ملخص :

شملت هذه الدراسة على معرفة gypsisol المرجعية في الجزائر حسب مبدأ WRB(2006) وذلك على المستوى الجهوي في بادئ الأمر, ثم على مستوى الوطن . بينت الدراسة المعمقة لخمسة مقاطع في منطقة " برج الجير " في ولاية المسيلة أنه متكون في كل مرة من طبقتين مختلفتين. الطبقة السطحية, هي رقيقة (من 9 إلى 35 سم), تحتوي على كمية قليلة من الجبس (جبس > 5 %) وهي كلسية (> 13 % > الكلس > 25%) , متفككة , ذو لون غامق و هيكله جيدة. من جهة أخرى, تتكون الطبقة الثانية من تعاقب القشرات الجبسية (> 36 % > الجبس > 82%), غليظة (أكثر من 75 سم), قليلة الكلس (> 1% > الكلس > 15%), صلبة, مالحة في الأعماق (> 4 dS/m² > CE > 21 dS/m²), غير عضوية وتحتوي على إشارات وجود الماء في الأعماق. بالاعتماد على هذه المعطيات, أربعة مقاطع من بين الخمسة المدروسة تعتبر gypsisol المرجعية وهي :

- Hypergypsique Hyposalique Calcique Gypsisol (Aridique)
- Hypergypsique Hyposalique Endogleyique Gypsisol
- Hypergypsique Hypogypsique Hyposalique Endogleyique Gypsisol
- Hypergypsique Hyposalique Gypsisol

يعتبر المقطع الخامس solonchaks وهو :

Episalique Endosalique Hyposalique Endogleyique Hypergypsique Calcique Solonchak (Aridique).

كميات الجبس في الطبقات الجبسية هي من الناحية الإحصائية جد متعلقة بكميات الكلس, قدرة الإحتواء على الماء في pF2.5 و pF 4.2, وجريان الماء. وبهذا الشكل, تزايد كميات الجبس يترافق مع تناقص كميات الكلس وسرعة جريان الماء, وكذلك يترافق مع تزايد قدرة الإحتواء على الماء في pF2.5 و pF 4.2. على مستوى الوطن, تمكنا من استخلاص 47 gypsisol نموذجي مصنفة ضمن 06 ستة مراجع كبرى. هذه الأخيرة مختلفة فيما بينها بتواجد أو عدم تواجد الطبقات التالية: horizon salique, gleyique, calcique, luviqque مع كل الاحتمالات مع الطبقة التشخيصية gypsique. المراجع الكبرى المستخرجة هي :

- Gypsique Salique [Endogleyique] Gypsisol (Sodique, Aridique, Arénique, Siltique)
- Gypsique Salique [Endogleyique] Calcique Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique)
- Gypsique Salique [Endogleyique] Luviqque Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique, Clayique)
- Gypsique Salique Calcique Luviqque Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique, Clayique)
- Gypsique [Endogleyique] Gypsisol (Sodique, Aridique, Arénique, Siltique)
- Gypsique [Endogleyique] Calcique Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique, Clayique).

مفتاح الكلمات : WRB , gypsisol , مقطع مرجعي , قاعدة المعطيات البيدولوجية , الجبس , معايير تشخيصية.

Introduction Générale

Les sels, au sens large du terme, constituent un trait pédologique majeur des sols d'Algérie. Ces derniers sont généralement dénommés en fonction du type de sel qu'ils renferment comme c'est le cas des sols calcaires, des sols gypseux et des sols salés. Le gypse constitue un élément de séparation entre les sels solubles (sels ayant une solubilité supérieure à celle du gypse) et les sels moins solubles (solubilité inférieure à celle du gypse) la solubilité du gypse étant de 2.6 g/l (Herrero et Porta, 1990). Le présent document s'intéresse aux sols à accumulation de gypse.

Les sols gypseux sont rencontrés dans tous les continents et caractérisent surtout dans les zones arides et semi-arides (Coque, 1962 ; Pouget, 1968 ; Boyadgiev, 1974 ; Watson, 1985 ; Halitim, 1988 ; F.A.O., 1990 ; Kadri et Gallali, 1991 ; Brenda et John, 2002). L'étendu de ces sols à travers le monde est difficile à délimiter (Herrero et Porta, 2000). La FAO (1990) estime leur superficie à environ 85 millions d'hectares tandis que Herrero et Boixadera (2002) les évaluent à 207 millions d'hectares. Ces chiffres sont loin d'être précis (Jafarzadeh et Zinc, 2000) car, de petites surfaces seulement des sols gypseux ont été étudiées (Herrero et Porta, 2000) et les informations précises sur leur distribution et ampleur manquent toujours (Jafarzadeh et Zinck, 2000).

En Algérie, les sols gypseux représentent environ 7966 km² soit 3.3 % de la superficie totale du pays et 12.2 % de la surface total des sols gypseux du monde et se placent ainsi en troisième position après la Chine et la Somalie (F.A.O., 1990). Les plus grandes extensions des accumulations gypseuses sont localisées dans les zones présentant une moyenne des précipitations comprises entre 100 et 250 mm (Brierre, 2000 ; Djili et al., 2002) où les facteurs de leurs formations sont réunis (présence de formations géologiques gypsifères, évaporation supérieure aux précipitations, une nappe saturée ou proche de la saturation en sulfates et calcium... etc) et deviennent moins fréquentes dans les régions hyper-arides où les précipitations sont inférieures à 100 mm (Hamdi-Aïssa, 2001). Dans les régions humides, ces sols peuvent aussi être rencontrés localement là où le milieu n'est pas favorable au drainage (Djili, 2000).

Aujourd'hui, malgré le nombre important d'études pédologiques, les sols d'Algérie sont encore mal connus (Djili, 2000). Pour les sols gypseux, la place qu'occupe l'Algérie dans le monde vis-à-vis de leur distribution fait que leur étude est une priorité, voire une obligation. Cependant, malgré que ce type de sol soit cité en Algérie depuis longtemps, il reste néanmoins très peu étudié. Malgré qu'ils font l'objet d'une mise en valeur agricole. De nombreuses contraintes apparaissent et exigent une meilleure connaissance de ce type de sol. Nous connaissons peu de choses sur ces sols, notamment leur localisation à travers le pays, et surtout les profils types qui les caractérisent. Les travaux réalisés jusqu'à présent reposent essentiellement sur une approche de caractérisation (Pouget, 1968 ; Vieilleffon, 1976 et 1979 ; Kedadra, 1993 ; Abdesselam, 1998 ; Razi, 2002 ; Rouahna, 2007 ; Tahtah, 2008), une

approche microscopique (Dekkiche, 1974 ; Halitim, 1985 ; Halitim et Robert, 1987 et 1991, Temmar, 1995 ; Hamdi-Aïssa et Fedoroff 1996 ; Hamdi-Aïssa, 2001 ; Tir, 2007) ou sur des approches statistiques (Bernou, 1996 ; Djili, 2000 ; Berkal, 2006 ; Ouamer-Ali, 2009).

Malgré l'intérêt agronomique et pédologique que véhiculent les sols gypseux, ils ne constituent pas un groupement à part qui les définit. Ils restent donc très marginalisés dans les classifications couramment utilisées en Algérie. La classification française (C.P.C.S., 1967) classe ces sols dans trois classes taxonomiques différentes (Sols Calcimagnésiques, Sols Isohumiques et Sols Hydromorphes) et la classification américaine (U.S.D.A., 1999) dans les Aridisols, les Gellisols, les Inceptisols, les Mollisols et les Vertisols. Ceci mène à réfléchir à la création d'une classification propre à l'Algérie qui prend en considération uniquement les sols de l'Algérie. Ceci ne peut se faire que si nous connaissons ces sols avec une précision qui permet leur caractérisation, leur détermination sur le terrain, leur ampleur et distribution dans le territoire national.

La présente recherche sur les sols gypseux références dans le sens de la WRB (2006) rentre dans cet objectif. En effet, les gypsisols références constituent un outil commode d'investigation des sols et permettent leur rattachement dans un système de classification nationale ou internationale comme celui de la FAO (WRB, 2006) par exemple. Dans le cas contraire, c'est-à-dire que si le pédologue fait abstraction de la référence pédologique, l'étude morphologique et analytique du sol devient isolée et n'aura pas d'intérêt national ni international.

Selon la base de référence mondiale pour les ressources en sols (WRB, 2006), les sols gypseux sont regroupés dans le Groupe de Sol de Référence des « Gypsisols ». Ces derniers sont définis en terme d'horizons, de propriétés et de matériaux diagnostiques gypsiques. La classification WRB est une classification qui se veut internationale puisqu' elle inclue à chaque fois les dernières découvertes sur les ressources mondiales en sols et sur leur interaction. Aussi, elle est conçue comme un lien de communication entre scientifiques pour identifier, caractériser et dénommer les principaux types de sols. Aujourd'hui, elle est largement utilisée pour les prospections aussi bien dans les pays en développement que dans les pays développés. De plus, sa terminologie est bien connue et universellement acceptée.

Le présent travail est une contribution à une meilleure connaissance des gypsisols d'Algérie à travers leur caractérisation morphologique et analytique, la détermination des principales références et leur localisation. Il s'agit également de retrouver d'éventuels relations entre les horizons diagnostiques de ces sols et les autres paramètres pédologiques. Cette étude est réalisée dans un premier temps dans un contexte régional (dans la plaine d'El-Hodna, au niveau de la région de « Bordj El-Jir » dans la wilaya de M'Sila). A cette échelle, les profils géoréférenciés (objet principal de ce travail) seront étudiés avec précision. Puis,

dans un deuxième temps, dans un contexte plus large, celui de l'ensemble des sols d'Algérie, ce qui nécessite une masse d'information importante d'où l'utilisation de la base de données relative aux sols gypseux d'Algérie.

Pour ce faire, ce travail s'articulera autour de trois grands chapitres :

- Le premier chapitre est une étude bibliographique synthétique des différents travaux sur le gypse et les sols gypseux. Il a pour objectif une contribution à une meilleure connaissance des sols gypseux d'Algérie.
- Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la zone d'étude et la méthodologie utilisée pour réaliser cette recherche à différentes échelles.
- Le dernier chapitre est réservé à la présentation et à la discussion des principaux résultats obtenus.

Une discussion générale des résultats suivie d'une conclusion générale constituent le dernier volet de ce document.

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

1. Généralités

Le gypse est une roche sédimentaire formée de sulfate de calcium hydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). C'est le sulfate le plus répandu dans la nature. Sa solubilité est de 2,6 g/l dans l'eau pure à 25°C et à une pression de 1 atmosphère (Herrero et Porta, 1990). La solubilité du gypse dépend de la composition chimique des solutions aqueuses, la température, la pression (Ellorza et al., 1998) et aussi de la taille des cristaux de gypse, elle croît avec la finesse des particules (F.A.O., 1990). Son système de cristallisation est du type prismatique monoclinique (Eswaran et Gang, 1991).

Plus soluble que le calcaire, le gypse reste un des facteurs les plus importants dans la différenciation et la caractérisation des sols des zones arides. Il joue un rôle efficace dans la genèse et le fonctionnement des sols (Kedadra, 1993). Il est utilisé comme référence pour séparer entre les sels solubles (sels ayant une solubilité supérieure à celle du gypse) et les sels moins solubles (solubilité inférieure à celle du gypse).

Le minérale se présente sous les formes lamellaires, prismatiques, fibreuses ou massives. Les cristaux ont différentes formes telle que la forme d'une pointe de flèche. Sous d'autres formes, les cristaux sont groupés formant ensemble une fleur appelée "rose de sable" (F.A.O., 1990). Il appartient à la classe chimique des sulfates, la sous classe des hydratés sans anions étrangers et à la famille des évaporites.

La présence du gypse dans les sols affecte la plupart de leurs propriétés, causant des problèmes physiques, chimiques et des problèmes de fertilité (Mashali, 1996).

Les sols gypseux sont des sols qui contiennent des quantités suffisantes de gypse pour affecter la croissance des plantes. Ils sont bien représentés dans des zones sèches où les sources en sulfate de calcium sont disponibles (F.A.O., 1990). Ils sont rencontrés dans tous les continents, mais ils caractérisent les zones arides et semi-arides du monde où les roches mères ou les sédiments gypseux sont fréquents et la pluviométrie est insuffisante pour évacuer le gypse des profils (Abdesselam, 1998).

Van Alphen et Ramiro (1971) désignent sous le nom de sols gypseux les sols à teneur supérieure à 2 % de gypse, alors que la classification F.A.O. (1998) nomme gypsisols les sols à teneur supérieure à 5 % de gypse. Barazanji (1973) a fait ressortir cinq classes caractéristiques des sols gypseux en tenant compte de l'aspect « sol-plante » :

- sol non gypsifère, teneur en gypse < 0,3 %
- sol faiblement gypsifère, teneur en gypse comprise entre 0,3 et 10 %
- sol modérément gypsifère, teneur en gypse comprise entre 10 et 15 %
- sol fortement gypsifère, teneur en gypse comprise entre 15 et 25 %
- sol gypsifère, teneur en gypse comprise entre 25 et 50 %
- sol extrêmement gypsifère, teneur en gypse > 50 %

Dans le sol, le gypse peut être présent sous forme de traces ou bien sous formes dominantes avec la présence d'un horizon gypsique, hypergypsique ou pétrogypsique (Eswaran et Gong, 1991). Cette variation est fonction du climat, de la topographie, de la physiographie (Herrero et Porta, 2000) ainsi que des régimes hydriques et thermiques du sol (Toomanian et al., 2001).

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. Cependant, aux fortes teneurs, les sols gypseux sont considérés comme peu fertiles et ont des rendements relativement bas à cause, notamment, de leurs mauvaises propriétés physiques et du déséquilibre dans le prélèvement des éléments nutritifs par les racines des plantes (Abdesselam, 1998).

2. Les sols gypseux dans le monde

Les sols gypseux sont très répandus dans le monde, mais ils sont typiques des régions arides et semi-arides (F.A.O., 1990). Leur régime hydrique est aridique, xérique ou ustique (Watson, 1979 ; Coque, 1962 ; F.A.O., 1990 ; Khademi et Mermut, 2003). La figure 01 représente la distribution des sols gypseux dans le monde.

Les fortes accumulations gypseuses sont rencontrées dans plusieurs régions arides et semi-arides du monde là où l'évapotranspiration dépasse les précipitations pendant une grande période de l'année. Les plus grandes zones d'extension des accumulations gypseuses se localisent dans les régions où la moyenne annuelle des précipitations est inférieure à 250 mm (Watson, 1985).

A l'échelle du globe terrestre, l'étendu des sols gypseux dans le monde est difficile à établir. D'après F.A.O. (1990), l'espace occupé correspondrait à 85 millions d'hectares, alors que Herrero et Boixadera (2002) l'estiment à 207 millions d'hectares. Généralement, ces sols se confinent dans les déserts chauds ayant une moyenne de précipitation annuelle inférieure à 250 mm (Watson, 1985 ; Djili et al., 2003). Le tableau I. montre la distribution des sols gypseux par pays et par continent selon les chiffres énoncés par F.A.O. (1990).

D'après le tableau I., environ 45 % de ces sols se concentrent en Chine (17,5 %), en Somalie (15,2 %) et en Algérie (12,2 %). Ces sols se localisent essentiellement dans le nord de l'Afrique, le sud et l'est de l'Europe et au sud-est de l'Asie (Jafarzadeh et Zinck, 2000), la partie méditerranéenne de l'Europe (Van Alphen et Ramiro, 1971), l'Argentine, le Chili et l'Australie.

Selon la carte des sols du monde, les sols gypseux se rencontrent dans des conditions très variées :

- Végétation : Artemisia, Atriplex, Stipa, Lygeum, Ziziphus, Juniperus, Aristida, Salsola, Suaeda, Anabosis, Tamarix, Calligonum et autres.

- Climat : Méditerranéen continental et sub-tropical, désertique tropical et sub-tropical, tropical aride et sec.
- Roche mère : alluvions récentes, dépôts deltaïques et éoliens, quaternaire, dépôts continentaux et marins, crétacés, marnes, argiles, gypses, calcaires, roches d'âges variés (Villafranchien, Néogène, Paléogène, Crétacé, Jurassique).

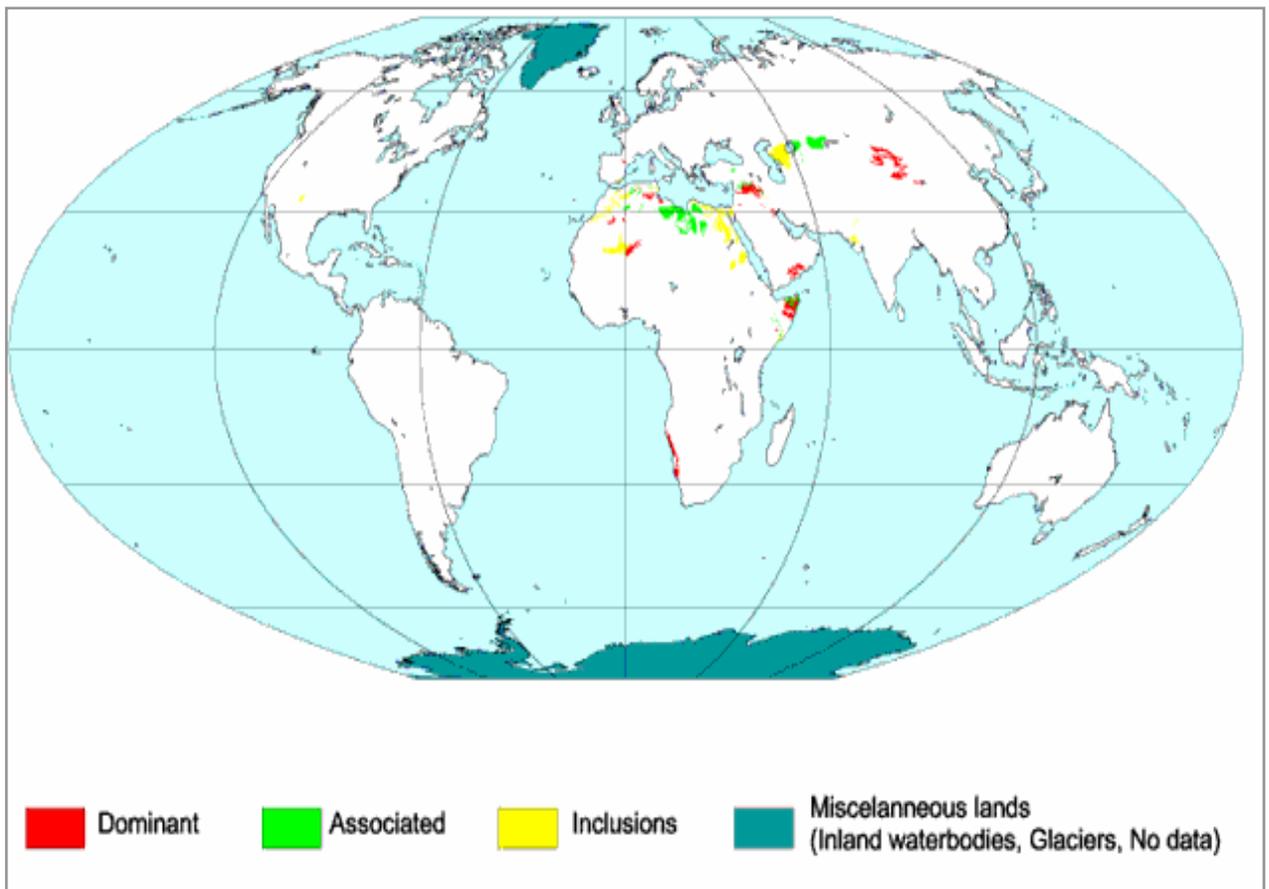


Figure 01 : Distrinition mondiale des gypsisols selon la légende mondiale des sols (1998).

I. Distribution des sols gypseux par pays (F.A.O., 1990)

	pays	Km ²	% par rapport à la surface totale du pays	% par rapport à la surface totale des sols gypseux
Afrique	Maroc	1114,3	2,5	1,7
	Algerie	7966,3	3,3	12,2
	Tunisie	1439,8	9,3	2,2
	Libye	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
	Namibie	5327,7	6,5	8,2
Asie du Sud	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	--	0,4
	Yémen A.R.	2931,0	8,8	4,5
	Koweït	354,6	--	0,5
	Iraq	4779,2	11,0	7,3
	Iran	4,2	--	--
	Pakistan	9,5	0,01	--
	Inde	182,0	0,06	0,3
Asie centrale	USSR	5074,1	0,2	7,7
	Mongolie	60,9	0,04	0,1
	Chine	11484,9	1,2	17,5
Europe	Turquie	64,2	0,08	0,1
	Espagne	165,5	0,3	0,3
Amérique du Sud	Nouveau Mexique	78,0	--	0,1

3. Les sols gypseux en Algérie

En Algérie, les résultats sur les superficies des sols gypseux sont incertains car seules de petites surfaces de sols gypseux ont fait l'objet d'études pédologiques (Durand, 1953, 1963 ; Boyadjiev, 1974 ; Kulke, 1974 ; Kedadra, 1993 ; Abdesselam, 1998), d'approche morphologique et microscopique (Dekkiche, 1974 ; Temmar, 1995 ; Tir, 2007) et statistiques (Bernou, 1996 ; Djili, 2000 ; Berkal, 2006 ; Ouamer-Ali, 2009). Les formations gypseuses sont couramment rencontrées dans les régions arides du Maghreb (Durand, 1954). D'après la F.A.O. (1990), les sols gypseux occupent en Algérie 7966,3 Km² soit 3,3 % de la surface du pays et 12,2 % de la surface totale des sols gypseux du monde (tableau I.). Globalement, la présence des sols gypseux est signalée à Oran, Mostaganem, Saïda, Tiaret, Ksar-Chellala, Djelfa, M'Sila, les bordures des chotts et Zahrez, Bousaâda, Hodna, Mechria, El-Bayadh, Khenchla, Batna, Adrar, Ouargla, Ain-Sefra, Biskra, El-Oued (le Souf), Touggourt (Oued-R'hir), Timimoun et El-Goléa.

Pour l'Algérie du nord, 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. Selon Djili (2000), la faible distribution des sols gypseux en Algérie ($\approx 3,3$ %) serait due au fait que les sols sont dépourvus en cet élément soit par absence d'une source de gypse, soit parce qu'il a été lixivié hors du profil par les pluies. Les très faibles taux de gypse (teneur comprise entre 0 et 5 %) sont les plus fréquents dans les sols du nord d'Algérie quelle que soit la position de l'horizon dans le profil. Ces sols se localisent essentiellement dans quatre principales régions du nord de l'Algérie : la région oranaise, la région sud-est algéroise, la région de Annaba et la région sud oranaise (Brezina). Les autres teneurs (>5 %) sont relativement peu fréquentes et concernent surtout les régions arides et semi-arides situées au sud et au sud-est algérois. Aussi, il y a une légère tendance à l'augmentation des taux de gypse d'ouest en est. Selon la latitude, cette distribution n'est pas homogène ; le gypse est lié aux phénomènes de station. Elle tend vers une légère augmentation du nord vers le sud de l'Algérie du nord.

Les sols du nord de l'Algérie sont caractérisés par des accumulations de gypse sous forme discontinue quel que soit son emplacement dans le profil. Par la suite, vient la forme diffuse qui décroît du haut vers le bas du profil. En fin, la forme continue est la forme la moins bien représentée au niveau du profil. Elle se situe dans l'étage semi-aride. En fonction des hauteurs de pluies, l'auteur a fait ressortir trois régions distinctes. La première délimitée par l'isohyète 300 mm correspond aux régions des fortes accumulations gypseuses des sols. Les dépôts gypseux sont importants et homogènes dans le profil. La deuxième se situe entre l'isohyète 300 et 400 mm. Ici, les pluies sont en mesure de lixivier le gypse mais, restent insuffisantes pour l'évacuer hors du profil à cause de la forte évapotranspiration. La troisième est relative aux régions dont la pluviométrie annuelle dépasse les 400 mm. Donc, c'est à partir de l'isohyète 400 mm que les conditions locales de la genèse du gypse dans le sol deviennent prépondérantes.

Le gypse étant un sel assez soluble, il est en mesure d'être lixivié hors du profil par les eaux des pluies, même si l'évapotranspiration reste assez forte. Dans cette tranche pluviométrique, le gypse est rare et sa présence dans le profil est inhérente aux conditions du milieu (source importante de gypse, une position topographique favorable à son accumulation ou un milieu confiné non drainant).

Berkal (2006), dans une étude de valorisation des données pédologiques sur les sols du sud algérien montre que le gypse à l'échelle du Sahara est un paramètre très variable dans l'espace, aussi bien en surface, en sub-surface qu'en profondeur. A cette échelle, les sols sont peu gypseux. Les valeurs extrêmes varient entre moins de 1 % et 80 % dans le profil. Ce qui veut dire que même si les accumulations gypseuses sont courantes dans les milieux arides, elles ne sont pas liées aux Sahara.

Toujours au niveau du Sahara, les sols gypseux de la région de Souf ont fait l'objet de nombreuses études (Durand 1949 ; Kaddouri, 1992 ; Kedadra, 1993 ; Temmar, 1993) qui ont montré que généralement, les taux de gypse augmentent en profondeur. Dans la région d'El Oued, la présence du gypse dans les agglomérations géologiques, les sols et les nappes contribue à une grande diversité des formations pédologiques gypseuses. De même, les formations gypseuses montrent une assez grande diversité (pouvant aller de puissantes croûtes polygonées aux traces de sulfates de calcium dans les solutions du sol) et dont l'usage locale utilise les termes "Tercha", "Tafza", "Louse" et "Tarra" (photo 1).



Photo 1 : Accumulations gypseuses rencontrées dans la région d'El Oued (Temmar, 1995)

a) et e) Roses de sable ; b) Lous de surface ; c) Gypse en lance
d) Tarra ; f) Tercha ; g) Lous de nappe

1. Lous : C'est une roche gypseuse présentant une cristallisation poussée, régulière, dure et résistante pouvant atteindre 20 à 40 cm de diamètre. On la trouve souvent en formation discontinue et même en fortes accumulations évoluant vers une croûte gypseuse. Le cas le plus fréquent sous lequel se présente le Lous est l'accumulation en "rose de sable" indurée en croûte.

2. Tercha : On le trouve en surface sous forme de cristaux fins d'un millimètre de diamètre, libres ou agglomérés les uns aux autres. Le gypse présente une cristallisation irrégulière et peu importante sous forme de nodules agglomérés les uns aux autres. Cette forme se rencontre généralement en surface, tendre et facilement pulvérisable se présentant sous forme d'encroûtement. Le tercha se rencontre aussi sous forme de lamelles localisées dans l'horizon de sable feuilleté fortement gypsique. Il peut prendre un développement vertical en chaînettes le long du Talus (particules de gypse et grains de sables liés entre eux).
3. Tafza : Dans la tafza, le gypse ne présente pas de cristaux bien formés, mais se trouve sous forme d'accumulations poudreuses blanchâtres plus ou moins dures contenant peu de sable. Elle peut s'étendre de la surface jusqu'au contact de la nappe.
4. Tarra : C'est un encroûtement gypseux de profondeur, dur, jaunâtre contenant un peu de sable. Elle est toujours surmontée par une croûte gypseuse dure.
5. Roses de sable : On les trouve toujours dans les matériaux non gypseux, le plus souvent du sable fin à grossier, siliceux. Elles peuvent être isolées ou, au contraire, plus ou moins soudées entre elles formant un véritable encroûtement.
6. Gypse en fer de lance : Ici, le gypse est associé au sable, mais il ne présente pas de cristallisations avancées. Ce sont des formes en lances ou lamelles localisées généralement entre les niveaux fortement gypseux. Les lances de gypse sont plus ou moins facilement pulvérisables.
7. Gypse en chaînettes : En fait, c'est le tercha qui prend un développement vertical en chaînettes (nodules gypseux formant des chaînettes) (photos 2-a et 2-b). Ce type d'individualisation est facilement pulvérisable. Il assure généralement le lien entre deux niveaux gypseux.



Photo 2-a : Chaînettes à Ouargla
(Cliché A. Rahmouni, 2007)



Photo 2-b : Chaînettes à El Oued
(Cliché N. Temmar, 1995)

Les concrétions gypseuses se trouvent partout dans le Souf, dans n'importe quel endroit et à tous les niveaux dans le profil (Bataillon, 1955). D'après Kedadra (1993), d'El Oued jusqu'au nord de Guemmar, le lous forme avec le tercha une masse rocheuse plus ou moins compacte et profonde. Alors qu'au sud d'El Oued (30 km), cette bande ne contient que de la tercha qui continue à l'est par une bande sablonneuse appelée "Horra". A l'ouest d'El Oued, la tafza dont la hauteur varie de quelques centimètres à 3 ou 4 mètres est la forme de gypse la plus dominante. Elle s'étend sur 25 km de Tiksebt (4 km au nord d'El Oued) jusqu'au Hobba. Dans cette bande, le lous ne s'y rencontre que par îlots. Les sols de la région d'Amiche (sud-ouest d'El Oued) ne présentent pas d'accumulations gypseuses significatives (Kaddouri, 1993). De Tiksebt jusqu'à Ababsa (6 km au sud d'El Oued), la surface est occupée par le sable, alors que la forme de gypsetafza se situe seulement en profondeur. Au sud d'El Ababsa jusqu'à El Oglâ, il y a une absence totale du tafza. A l'ouest, il y a une autre bande appelée "Bande Sahanne", elle est occupée en profondeur par le lous. Au dessus, on trouve le tarra et enfin, le tercha jusqu'à la surface sous différentes formes. A Z'goum (nord-est d'El Oued) jusqu'à Debila (nord de Z'goum), le lous prend la relève. Au nord de ces deux villages, c'est la tafza qui prédomine, sauf à l'est et au nord-est "Hassi Khalifa" où le lous devient compact en profondeur.

Le sol du Souf est caractérisé par une abondance des formations gypseuses, aussi bien dans les matériaux géologiques, dans les eaux souterraines qu'à la surface de la région. Les sols gypseux se développent généralement sur les produits transportés ou sur un dépôt de matériau pédologique gypseux (anciens croûtes et encroûtements gypseux de nappe). Les encroûtements de profondeur sont souvent surmontés d'une croûte. Il existe aussi de vastes encroûtements nus mais jamais de croûte sans encroûtement.

Pour les différents cristaux de gypse qu'on trouve dans la région de Souf, on peut distinguer plusieurs formes. La rose de sable est formée de cristaux ayant une forme lenticulaire, alors que les cristaux de « tercha en chaînette » ont une forme tubulaire car ils cristallisent autour des racines. De même, au niveau des horizons de sables feuilleté fortement gypsique, on peut trouver de petits cristaux libres en forme tabulaire. La forme prismatique caractérise le lous.

L'étude microscopique des lames minces des sols gypseux au niveau de cette région (Temmar, 1995) montre que le gypse joue un rôle de matrice dans la plupart des lames. Il apparaît sous forme fragmentée, granulaire ou radiale, de tailles moyennes ou plus petites. En générale, il représente plus de 50 % de la lame pour les différentes formes d'accumulation de gypse. On note aussi la présence de rares ou important cristaux de gypse de tailles petites à moyennes (la taille dépend de la vitesse de cristallisation), sous forme de lentilles granulaires, radiales ou sous forme de losanges. Le gypse, le plus souvent, est uniquement sous forme de ciment servant de matrice au sol. D'autres fois, il est observé sous les deux formes ciment et lenticulaire et rarement il devient entièrement lenticulaire. En ce qui concerne les traits pédologiques gypseux, le gypse revêt différentes formes d'accumulations :

- Ils sont sous forme de grains de gypse cristallisés. Ces derniers peuvent être entourés de revêtements (limoneux, calcaires ...etc).
- Ils peuvent être sous forme d'amas de lenticules de petites ou de grandes tailles et d'autres qui se déposent les unes sur les autres.
- Les cristaux se déposent, ou bien sont regroupés d'une façon très dense de tailles moyennes ou plus petites. D'autres lenticules sont placées les unes sur les autres parallèlement et d'autres se regroupent en forme de bouquets.
- Les traits pédologiques se caractérisent surtout par la forme d'accumulation du gypse en plages denses, en bouquets ou superposés parallèlement.

Dans le tercha, les cristaux de gypse s'accumulent en des amas de petites lenticules, et d'autres de grandes lenticules. Par contre, la tefza présente des formes beaucoup plus variées :

- Petits cristaux de gypse lenticulaires, individualisés, non enchevêtrés. Ils forment la masse et ils sont formés dans un temps très bref, dans la frange capillaire d'une nappe sursaturée en sulfates.
- De plus grands cristaux lenticulaires, formés dans des vides en chenaux. Ils sont enchevêtrés, leur croissance a été longue, donnant naissance à des mosaïques compactes et polyédriques.
- De grands cristaux lenticulaires, formés dans les mêmes conditions que les premiers, mais dans des vides en chenaux. Ils sont eux aussi isolés, mais leur temps de formation est encore plus court que celui des premiers.
- Des cristaux polyédriques, de plus grande taille que les précédents, en mosaïques enchevêtrés (Temmar, 1995).

A l'échelle de l'Algérie, Ouamer-Ali (2009) a mis en évidence l'effet de la variation des tranches pluviométriques sur la répartition des teneurs en gypse. Les sols qui présentent les plus grandes teneurs en gypse correspondent préférentiellement aux hauteurs de pluies comprises entre 100 et 300 mm (étage bioclimatique aride selon les normes proposées par Le Houérou et al.,1977). Quand les précipitations sont inférieures à 100 mm, l'accumulation du gypse est homogène dans les horizons de surface et de sub-surface (le taux de gypse moyen est d'environ 11 %). En profondeur, il y a une légère augmentation des teneurs en gypse (environ 15 %). Dans l'étage bioclimatique aride, l'accumulation du gypse est caractéristique de l'horizon de sub-surface. Dans l'étage semi-aride, le profil est relativement moins gypseux par rapport aux deux autres tranches pluviométriques. Aussi, les sols d'Algérie sont dominés par des accumulations de gypse de formes discontinues (en cristaux, microcristaux et en amas). Elles caractérisent les sols des hautes plaines steppiques dans la partie nord de l'Algérie.

Dans la région du Hodna, Dekkiche (1974) a montré que le gypse se trouve dans plusieurs types de sols et principalement dans les sols à accumulation et individualisation du calcaire et de sel soluble où il peut constituer de véritables horizons gypsiques sous les horizons calciques, pétrocalciques ou certains horizons à accumulation de sels solubles. Les accumulations sont diverses, elles peuvent être sous formes poudreuses, pulvérulentes, en taches, pseudomycéliums ou sous forme cristallisée. Par ailleurs, en fonction de sa localisation dans le profil, il existe quatre types de distribution :

- Répartition régulière à travers le profil.
- Accumulation dans les parties moyennes et profondes du profil.
- Forte accumulation dès la surface et dans la partie moyenne du profil.
- Une accumulation variable à travers le profil.

4. Origine du gypse dans le sol

Les origines et les processus de l'accumulation du gypse dans les sols ont fait l'objet de nombreux travaux (Pouget, 1968 ; Dekkiche, 1974 ; Watson, 1980 ; Halitim, 1988). Il en ressort que la formation et la distribution géographiques des accumulations gypseuses pédogénétiques sont le résultat d'une combinaison de plusieurs facteurs tels que la topographie, la nature du matériau parental, l'âge, l'histoire climatique et les conditions géomorphiques (Watson, 1988 ; Eswaran et Gong, 1991 ; Cook et al., 1993 ; Ellorza et Santollala, 1998 ; Toomamina et al., 2001).

La plupart des sols gypseux se situent dans les zones arides, certains dans les zones semi-arides. La présence du gypse reflète la caractéristique de l'humidité qui était présente dans les temps géologiques. Les dépôts du gypse sont liés à la présence d'une nappe d'eau salée. Les lits et les lagunes des fleuves sont des endroits idéaux pour la formation des gisements secondaires de gypse. Le gypse peut être déposé selon d'autres manières. Il peut être transporté par l'eau ou par le vent et être déposé dans de nouvelles zones à la surface ou dans le profil (F.A.O., 1990).

Lors de l'oxydation des ions sulfates présents dans la solution du sol, l'acide sulfurique qui en résulte réagit dans les sols calcaires avec le CaCO_3 pour former le gypse. Dans les sols irrigués, la lixiviation des sols salins contenant du sulfate et du calcium dans la solution du sol peut conduire à la précipitation et à l'accumulation du gypse dans l'horizon de sub-surface. La formation du gypse peut résulter du remplacement du NaCl par CaSO_4 quand l'eau d'irrigation contient une quantité substantielle de calcium et de sulfate. Ce résultat peut être obtenu également lors de la lixiviation partielle des sels du sol parce que le NaCl est beaucoup plus soluble que le CaSO_4 (F.A.O., 1990).

Les hypothèses et théories expliquant la genèse des accumulations gypseuses sont diverses (Coque, 1962 ; Durand, 1963 ; Trichet, 1963 ; Pouget, 1968 ; Watson, 1979). Ceci est lié aux caractéristiques spécifiques de chaque région d'étude. Les principales théories ou hypothèses sont :

- Théorie per ascensum « origine des nappes ».
- Théorie per descendum.
- Théorie d'apport latéral.
- Théorie de l'action biologique « origine biologique ».
- Théorie lagunaire « origine lagunaire ».
- Origine géologique.

4.1. Théorie per ascensum « origine des nappes »

C'est un mode dominant en milieu très aride. Cette théorie implique des mouvements ascendants par ascension capillaire à partir d'une nappe superficielle active. Plusieurs auteurs ont décrits des accumulations gypseuses dont la genèse tient à ce type de modèle (Durand, 1949 ; Bellair, 1954 ; Kulke, 1974 ; Pouget, 1968 ; Risacher, 1978 ; Watson, 1979 ; Jafarzadeh et Burnham, 1992 ; Podwojewski et Arnold, 1994).

Le processus de formation de croûtes de nappe est lié à l'évaporation au niveau de la nappe, ainsi que son degré de saturation. Selon Halitim (1985), la genèse par mouvement « per ascensum » peut jouer pour 03 raisons :

- une $ETP > P$ la plus grande partie de l'année,
- un niveau de nappe proche de la surface. Le niveau piézométrique de la nappe permettant un dépôt de gypse est fonction de la texture, la température et de la composition chimique de cette nappe. En effet, l'encroûtement gypseux serait d'autant plus éloigné de la nappe que cette dernière sera moins saturée vis-à-vis au gypse, et
- une nappe saturée ou proche de la saturation en gypse.

La réalité de ce mode de formation est suggérée par la présence de nodules gypseux en « rose de sable » à la base du profil, ces roses de sables seraient liées à l'action d'une nappe superficielle active (Halitim, 1988).

4.2. Théorie « per descendum »

C'est un mode typique des climats modérément arides (Jafarzadeh et Burnham, 1992). Il est défini par un mouvement (descendant) lixiviant permettant d'une part au sol de garder un taux d'humidité favorable, et d'autre part une redistribution et une re-précipitation du gypse sans grande perte. Une situation qui peut être observée dans les sols à recouvrement éolien. Le résultat est la formation d'une croûte gypseuse illuviale. Une couche qui serait par la suite exhumée par l'effet de déflation éolienne (Watson, 1985).

4.3. Théorie d'apport latéral

Elle est définie par les mouvements d'apports latéraux permettant un enrichissement et une accumulation du gypse dans le sol (Watson, 1985). Ouamer-Ali (2009) classe cette source en deux types d'apports essentiels :

- Les apports riches en gypse ou en éléments Ca^{++} ou SO_4^- issus des mécanismes caractéristiques de l'érosion tel que :
 - ❖ l'action de l'eau et l'effet de pente, où interviennent l'écoulement et le ruissellement (Toomamien et al., 2001; Herrero et Boixadera, 2002),
 - ❖ les mouvements de masse avec coulée de boue et de sédiments (Herrero et al., 1992; Herrero et Boixadera, 2002),
 - ❖ le colluvionnement (Halitim, 1988) et
 - ❖ l'altération "in situ" du matériel parental (Herrero et Boixadera, 2002).

Ces mouvements d'apport se font généralement grâce aux processus de dissolution-recristallisation.

- Les événements issus du processus de déflation (enlèvement des matériaux meubles par le vent) des surfaces des chotts, des sebkhas et des zones basses par l'altération du vent et la diffusion instantanée dans l'atmosphère des particules de gypse sous forme de poussière de sable (Coque, 1962 ; Pouget, 1968 ; Dekkiche, 1974 ; Watson, 1985). Il est utile d'indiquer que ce processus peut être à l'origine d'une part de la formation de croûtes de surfaces comme c'est le cas des nebkhas (Pouget, 1980) et, d'autre part de la mise en place de formes plus dominantes telles que les lunettes (Durand, 1954, Boyadgiev et Sayegh, 1992). Halitim (1988) indique que la seule présence d'une forte proportion de sable fin pourrait confirmer l'origine éolienne.

4.4. Théorie de l'action biologique « origine biologique »

Il est possible qu'il y ait une précipitation biologique du gypse en relation avec la respiration des racines. En effet, l'activité des racines libérant du gaz carbonique permet une dissolution du calcaire, ce qui entraîne la formation d'ions bicarbonates (HCO_3^-) et calcium (Ca^{++}). Ce dernier en excès dans une solution déjà saturée en sulfate provoque une précipitation du gypse. Ainsi, les amas gypseux se localisent au niveau des racines et des radicelles (Pouget, 1968).

4.5. Théorie lagunaire « Origine lagunaire »

La présence de gypse d'origine lagunaire est de moindre importance. 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). C'est le mécanisme responsable de la formation du gypse pulvérulent.

4.6. Origine géologique

Le gypse peut être contenu dans le substrat géologique. De ce fait, le gypse peut alimenter soit le sol qu'il supporte (Carter et Inskeep, 1988), soit les alluvions qui en dérivent (Kadri, 1987).

Parmi les formations géologiques riches en gypse, on retiendra surtout :

- Le trias supérieur (Salifère principal) pendant lequel se sont déposées les couches évaporitiques salines, gypseuses et argileuses excessivement carbonatées. Plus épaisse et volumétriquement les plus importantes de tous les temps, et en particulier des temps mézoïques sur le Sahara.
- Le Jurassique moyen où le gypse peut être intercalé dans les formations du Jurassique et surtout dans les marnes vertes du bathonien (Kadri, 1987).
- Le Crétacé : les couches évaporitiques du Crétacé, principalement les formations du Crétacé supérieur constituent une source continue d'ion calcium (Kadri, 1987).

5. Formes d'accumulation du gypse

Le dépôt du gypse se forme lorsque le produit de concentration des ions SO_4^- et Ca^{++} (produit ionique) dans la solution dépasse la valeur de son produit de solubilité à la température donnée $[\text{SO}_4^-] [\text{Ca}^{++}] > K_{\text{psCaSO}_4}$ (Pouget, 1968). D'après la F.A.O. (1990), ceci correspond à une conductivité électrique inférieure à 60 dS/m.

Aussi, le dépôt peut se faire par concentration des solutions au niveau de la frange capillaire de la nappe où l'activité des racines est maximale. Le dégagement du gaz carbonique provoqué par la respiration du système racinaire favorise la précipitation du gypse par la formation des ions bicarbonate. Une adsorption sélective des ions Cl^- (diamètre plus faible) par rapport aux ions SO_4^- pourraient éventuellement baisser le produit de solubilité du gypse et former ainsi un dépôt (Pouget, 1968).

Dans le sol, le gypse peut se présenter sous différentes formes en fonction des conditions dans lesquelles il précipite (Djili, 2000). Il paraît sous forme pulvérulente, en pseudomycélium, en amas, en nodule, en rose de sable, en encroûtement et en croûte massive ou polygonale (Martin, 1963 ; Boyadgiev, 1974 ; Kulke, 1974 ; Dekkiche, 1974 ; Stoops et Ilawi, 1981 ; Warren, 1982 ; Pankova et Yamnova, 1987 ; Halitim, 1988 ; Boyadgiev et Sayegh, 1992 ; Drak, 1997).

Selon le degré de précipitation du gypse dans le profil, on distingue les accumulations généralisées et les accumulations localisées. Les premiers regroupent les croûtes, les surfaces polygonales et les encroûtements. Les seconds englobent les nodules, les amas, les racines gypsifères, les pseudomycéliums et le gypse diffus (Abdessalem, 1998).

5.1. Accumulations généralisées

Le caractère essentiel qui permet de distinguer entre les croûtes et les encroûtements est purement agronomique, il s'agit de la pénétration des racines. Les taux de gypse et de salure sont plus élevés dans la croûte que dans l'encroûtement (Pouget, 1968).

5.1.1. Croûtes

Les croûtes gypseuses forment des horizons remarquablement continus. Elles peuvent être définies comme étant des accumulations superficielles contenant au moins 15 % de gypse (Watson, 1989).

La plupart des croûtes de gypse est rencontrée dans le nord de l'Afrique, surtout en Algérie (Durand, 1949 ; 1963 ; Kulke, 1974 ; Horta, 1982 ; Halitim, 1985) et en Tunisie (Coque, 1962 ; Vieilleffon, 1976 ; watson, 1979). Selon la diversité des régions dans lesquelles les croûtes se sont développées, plusieurs définitions ont été faites. On représente ici les principales :

✓ Croûte zonaire

Elle est définie par Bureau et Roederer (1961) comme étant la partie zonée (la plus durcie et souvent superficielle) de la formation, généralement désignée par la croûte gypseuse. Elle apparaît comme une partie plus dure, pellicule zonée de quelques millimètres. Elle se présente sous forme de taches rectangulaires ou polygonales lisses entourées d'un léger bourrelet de gypse pulvérulent plus ou moins durci. La dimension de ces plaques de croûtes varie de 10 à 60 cm au maximum et elles sont souvent fissurées.

✓ Croûte de nappe

Cette croûte se présente comme un encroûtement très induré et compact. Elle caractérise en général un horizon fortement induré et elle est de ce fait imperméable aux racines. L'horizon est blanchâtre ou rosâtre, la terre fine est presque inexistante (Pouget, 1968).

✓ Croûte gypseuse

C'est la partie endurcie, superficielle des formations, désignée par le terme de croûte gypseuse, elle correspond à la croûte zonaire des pédologues (Kadri, 1987). Watson (1985) définit les croûtes gypseuses comme des dépôts gypseux indurés et compacts. Ces dépôts contiennent au moins 15 % de leur poids en gypse.

5.1.2. Surfaces polygonales

Ces formations ont été décrites en Tunisie (Bureau et Roederer, 1961), en Syrie (Stoops et Allaiwi, 1981) et en Algérie (Halitim, 1985). La macrostructure polygonale est liée aux phénomènes de dessiccation de la surface. Morphologiquement, elle présente des bords courbés, limités par une remontée de fines pellicules gypseuses (figure 02).

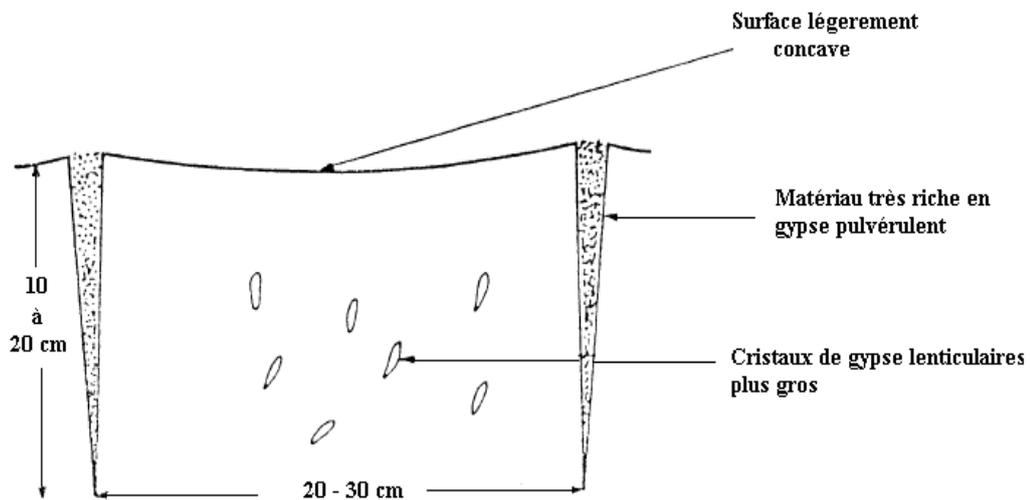


Figure 02 : Morphologie schématique d'un sol gypseux polygonal (Halitim, 1985)

5.1.3. Encroûtements

Durand (1953) définit l'encroûtement comme une formation dure d'allure plus ou moins scoriacée se présentant sous l'aspect d'un grès. Dans leur étude, Bureau et Roederer (1961) notent que l'encroûtement est une formation enrichie en CaSO_4 , assez compacte se trouvant sous la croûte zonale. Selon Pouget (1968), ces formations peuvent dépasser 1,50 m d'épaisseur et sont plus dures à leur partie supérieure qu'à leur base. Elles sont souvent entremêlées de racines pétrifiées et se rencontrent le plus souvent dans des sables. Leur origine est en relation avec la présence d'une nappe salée dont elles sont toujours situées au dessus. L'horizon se trouvant en surface ou en profondeur est enrichi en gypse ou seulement consolidé par la nappe. Selon Vieilleffon (1976), l'encroûtement gypseux peut être de structure polygonale amorphe farineuse, onctueuse et beige.

5.2. Accumulations localisées

5.2.1. Amas

Les amas se présentent comme un assemblage lâche (friable) d'une multitude de très fins cristaux plus ou moins aciculaires et à angles vifs. Le dépôt se fait généralement sous forme d'un amas, leur évolution conduit progressivement à des granules et feuillets mal définis qui, peu à peu, s'anastomosent latéralement en s'indurant pour former l'encroûtement et éventuellement la croûte (Pouget, 1968).

5.2.2. Nodules

Selon Durand (1963), les nodules ressemblent à de petites poupées de loess. Ils représentent une zone médullaire homogène à structure étoilée avec quelques éléments classiques. Exposés à l'air, ils deviennent très durs avec une couleur beige clair. Leur nombre passe par un maximum à une certaine profondeur. La texture des sols qui en contiennent est généralement fine.

5.2.3. Racines gypsifères

Selon Durand (1953), les racines gypsifères se présentent dans leur stade jeune sous forme de feutrage de fins cristaux dans la région pilifère de la racine. Complètement développées, elles deviennent un tube à paroi épaisse conservant dans son axe la racine autour de laquelle les cristaux de gypse ont précipité. Ces formations sont appelées aussi "Rhizolithes" ou "manchons racinaires" (Benmati et Nefil, 1996).

5.2.4. Pseudomyceliums

Le gypse prend une forme très fine, sous forme de traînées blanchâtres. Celles-ci résultent de la concentration du gypse dans les pores ou au niveau des racines. Pour différencier les formes gypseuses des formes calcaires, Herrero et al., (1992) utilisent le terme "gypse vermiforme".

5.2.5. Gypse diffus

Il ne peut être détecté que par analyse chimique (Abdesselam, 1998).

6. Classification des cristaux de gypse

Les cristaux de gypse sont classés d'après leurs dimensions, formes et modes d'arrangement (Jafarzadeh et Burnaham, 1992). D'après la dimension, on dénombre trois catégories : Spar ($> 20 \mu\text{m}$), Microspar (5- $20 \mu\text{m}$) et Micrite ($< 5 \mu\text{m}$). Selon le type d'arrangement, les cristaux de gypse peuvent avoir un arrangement radiale, parallèle ou un arrangement qui se fait au hasard (random). Selon la forme du cristal, Jafarzadeh et Burnaham (1992) distinguent les formes suivantes (figure 03) :

1. Forme tabulaire : Il y a les cristaux tabulaires pseudo-rhomboédriques et les cristaux tabulaires pseudo-héxagonaux. Les premiers résultent de l'aplatissement parallèle des faces donnant une forme de diamant. Certains cristaux sont presque carrés. Cette forme se rencontre surtout dans les sols sulfato-acides. Le deuxième type est constitué de six cotés. Les auteurs expliquent que ce type de cristaux surgit au cours du développement des faces prismatiques. Ils ont été reportés au niveau des sols à climat aride d'Espagne.
2. Forme lenticulaire : Dans le sol, c'est la forme la plus commune. Les cristaux lenticulaires sont sous forme de longs losanges. Les faces sont quelquefois incurvées, donnant une section ressemblant à une lentille biconvexe.
3. Forme granulaire : Dans les sols gypseux, plusieurs espaces sont remplis par des mosaïques de cette forme. Ce type de cristaux peut être biogénique (formé par les racines ou de petits organismes de sol), comme il peut être d'une origine abiotique (origine occasionnelle particulièrement dans un matériau fin). Ces cristaux sont probablement déposés par la solution sursaturée de gypse et sont façonnés par mutuelle interférence.
4. Forme prismatique : On distingue les cristaux prismatiques pseudo-héxagonaux et les cristaux prismatiques pinacoïdaux. Les deux sont formés à la suite d'un fort développement cristallin. Le deuxième type est la forme prismatique la plus répandue. Elle possède des sections transversales d'une régularité nettement moindre par rapport au premier type et des transmissions pinacoïdales à forme ciselée oblique.
5. Forme aciculaire : Ce sont des cristaux pseudo-héxagonaux allongés donnant des terminaisons pointues, presque comme une pyramide régulière. C'est la forme caractéristique des bassins salés.
6. Forme fibreuse : Ce sont des cristaux pseudo-héxagonaux courbés ou même ondulés, qui manquent de terminaisons pointues. La forme est expliquée par une cristallisation sous une tension résistante.



Forme tabulaire pseudo-rhombodrique



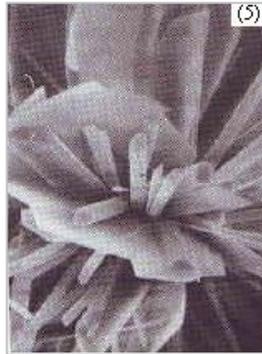
Forme tabulaire pseudo-héxagonale



Forme lenticulaire



Forme granulaire



Forme prismatique pseudo-héxagonale



Formes prismatiques pinacoïdales



Forme aciculaire



Formes fibreuses



Formes Tubulaires



Forme entrelacée



Forme en rose de sable

Figure 03 : Différentes formes des cristaux de gypse (Jafarzadeh et Burnaham, 1992)

7. Forme tubulaire : Ici, les cylindres cristallins prennent la forme d'une racine disparue. Les arrangements des tubes rencontrés sont de nature solitaire, radiale et parallèle. Les bouquets de tubes parallèles ressemblent au corail.
8. Forme entrelacée (en ficelles) : Occasionnellement, les jumelages en "queue d'hirondelles" sont répétés comme une image dans un miroir. La forme simple des cristaux en ficelles est attribuée à une cristallisation rapide par sursaturation de la solution. Cependant, la grande complexité de la forme est attribuée en un dépôt lent qui se fait par une solution juste saturée.

7. Propriétés chimiques du gypse

7.1. pH

Selon Florea et Aljoumaa (1998), les gypsisols riches en sable grossier ont des pH faibles situés entre 7,6 et 7,8. De même, 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).

Djili (2000) montre qu'il y a une faible relation entre ces deux paramètres même si les coefficients de corrélation linéaires ($r = 0,095$) et curvilinéaires ($r = 0,173$) sont statistiquement significatifs. Ce qui fait qu'il n'y a aucune tendance particulière de la variation des valeurs du pH en fonction de l'augmentation des taux de gypse. Quelle que soit la teneur en gypse, les pH des sols de l'Algérie du nord sont supérieurs à 7. En plus, l'auteur a trouvé un effet d'entonnoir de la distribution des valeurs de pH en fonction des taux de gypse (quand le taux de gypse tend vers zéro, le pH varie entre 7 et 9, contrôlé soit par la présence du carbonate de calcium ou soit par d'autres sels. Au fur et à mesure que les taux en gypse augmentent, le pH devient de moins en moins variable. Avec 100 % de gypse, le pH s'équilibre très près de 8).

L'équation de régression linéaire est de type : $\text{pH} = 7,8 + \text{gypse} (\%) 0,002$ avec $r = 0,095$

L'équation de régression curvilinéaire est de type :

$$\text{pH} = 7,8 + 0,14 \text{ gypse} (\%) - 0,0003 (\text{gypse})^2 + 10^{-6} (\text{gypse})^3 \quad \text{avec} \quad r = 0,173$$

A l'échelle de l'Algérie, Ouamer-Ali (2009) a trouvé une corrélation non significative entre le gypse et le pH. Quelle que soit la teneur en gypse (même à des taux très faibles), le pH se trouve compris entre les valeurs 7 et 9 avec une gamme préférentielle allant de 7,5 à 8,4. Ce qui fait que les valeurs du pH n'ont aucune influence sur la variation des taux de gypse.

L'équation de régression linéaire est de type : $\text{gypse} (\%) = 1,622 \text{ pH} + 3,175$. avec $r = 0,028$

7.2. Solubilité du gypse

Le gypse tout en étant plus soluble que le calcaire (14,3 mg/l à 25°C selon Bathurst, 1971) est nettement moins soluble que les autres sels généralement présents dans la solution du sol tels que NaCl, KCl, CaCl₂, K₂SO₄, Na₂CO₃, Na₂SO₄ (tableau II).

Tableau II. Solubilité dans l'eau de quelques sels (g/kg de solution) en fonction de la température (Servant, 1975 in Halitim, 1988)

Température	NaCl	CaCl ₂	MgCl ₂	Na ₂ SO ₄	CaSO ₄	MgSO ₄
0°C	263,4	373	346	44,9	1,756	211
10°C	263,6	394	349	82,6	1,926	236
20°C	264,4	427	351	160,2	2,016	262
30°C	267,2	535	365	325	2,12	313

7.2.1. Solubilité dans l'eau pure

De très nombreux auteurs ont étudié les lois qui régissent la solubilité du gypse (CaSO₄ 2H₂O) dans l'eau pure (Pouget, 1968, Vieilleffon, 1979 ; Porta, 1998). La quantité du sulfate de calcium dissoute dépend de son degré d'hydratation (la solubilité de la forme semi-hydratée est 5 fois plus grande que la forme hydratée) et de la température (un maximum de solubilité entre 35 et 40°C) (tableau III).

Tableau III. 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 (g/l)	1,756	1,926	2,016	2,085	2,095	2,105	2,108	2,083	1,880	1,690	1,630

La solubilité dépend aussi de la taille des particules. Elle augmente avec la finesse des particules en raison de la surface spécifique qui est d'autant plus grande que les particules sont fines. Aussi, on peut avoir le même degré de solubilité du gypse en des temps très courts rien qu'on diminuant la taille des particules gypseuses (figure 04).

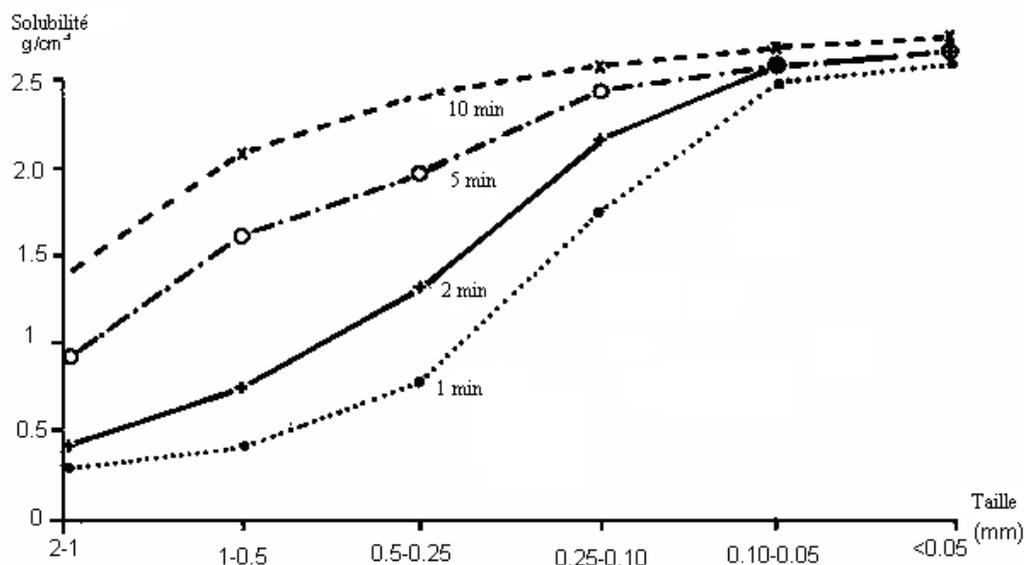


Figure 04 : Solubilité du gypse en fonction de la taille des particules (F.A.O., 1990)

7.2.2. Solubilité du gypse en présence d'autres sels

En présence d'autres sels, la solubilité du gypse (électrolyte faible) se trouve modifiée lorsque l'on introduit dans la solution des électrolytes forts ayant ou non des ions en commun avec lui.

Le produit de solubilité K_{ps} du sulfate de calcium est égal, pour une température déterminée, au produit des activités des ions SO_4^{2-} et Ca^{++} lorsque la solution est saturée. Or, l'activité (a) d'un ion est égale au produit de sa concentration (C) par le coefficient d'activité correspondant f ($a = f \cdot C$).

d'où :

$$K_{ps \text{ CaSO}_4} = a_{\text{Ca}^{++}} \cdot a_{\text{SO}_4^{2-}}$$

$$K_{ps \text{ CaSO}_4} = [\text{Ca}^{++}] \cdot [\text{SO}_4^{2-}] \cdot f_{\text{Ca}^{++}} \cdot f_{\text{SO}_4^{2-}}$$

❖ Action des chlorures

D'une façon générale, en ajoutant à une solution saturée de gypse des chlorures de sodium ou de magnésium, la solubilité du gypse augmente. Cette dernière augmente avec la force ionique (Pouget, 1968). Le tableau IV donne les variations du produit de solubilité de CaSO_4 en fonction de la température et de la concentration en NaCl avec la force ionique.

Tableau IV. Influence de la concentration de NaCl sur la solubilité du gypse (Pouget, 1968)

NaCl g/l	CaSO ₄ g/l		Force ionique I		Produit de solubilité Kps	
	14°C	20°C	14°C	20°C	14°C	20°C
0	1,70	2,10	0,050	0,062	1,56.10 ⁻⁴	2,40.10 ⁻⁴
2,925	2,32	2,70	0,118	0,130	2,90 "	4,00 "
14,62	3,68	4,00	0,358	0,368	7,30 "	8,12 "
58,50	5,72	6,00	1,168	0,176	17,64 "	19,36 "
131,6	7,20	7,30	2,462	2,464	28,10 "	28,60 "
204,7	6,30	6,30	3,686	3,686	21,60 "	21,60 "
234,0	5,90	5,90	4,174	4,174	18,90 "	18,90 "
292,6	5,30	5,30	5,156	5,156	15,20 "	15,20 "

En ce qui concerne l'action des chlorures de magnésium sur la solubilité du gypse, le tableau V montre que l'augmentation des chlorures de magnésium augmente la solubilité du sulfate de calcium dans des proportions comparables et même supérieures à celles du chlorure de sodium.

Tableau V. Action des chlorures de magnésium sur la solubilité du gypse (Pouget, 1968)

Grammes / litre de solution	
MgCl ₂	CaSO ₄
0,00	2,08
8,50	4,26
19,18	5,56
46,64	7,59
121,38	8,62
206,98	6,57
337,00	2,77
441,10	1,39

En résumé, la solubilité du gypse à la température ambiante, de l'ordre de 2 g/l, augmente jusqu'à 7 g/l dans les solutions contenant environ 120-130 g/l de chlorure de sodium ou de magnésium. Elle diminue ensuite pour des solutions plus concentrées en chlorure.

❖ Action du pH

A la suite de la fixation des ions $\text{SO}_4^{=}$ par les ions H^+ avec formation d'ions HSO_4^- , la solubilité du gypse augmente un peu en milieu acide. La précipitation est moins complète pour un pH fortement acide que pour un pH neutre ou alcalin (Pouget, 1968). En fait, ce phénomène ne peut guère intervenir car dans tous les sols gypseux étudiés le pH est toujours supérieur à 7.

❖ Action des sulfates de sodium et de magnésium

En ajoutant à une solution saturée de sulfate de calcium une certaine quantité de sulfate de magnésium par exemple, le produit des concentrations des ions $[\text{SO}_4^{=}] [\text{Ca}^{++}]$ devient supérieur au produit de solubilité du sulfate de calcium. La solution devient sursaturée et doit déposer tôt ou tard, une partie du corps le moins soluble (sulfate de calcium) sous forme de phase solide (précipitation).

La solubilité du gypse diminue en présence de sulfate de magnésium ou de sodium sous l'effet d'ion commun.

7.3. Relation gypse-calcaire

La plupart des sols gypseux contiennent du carbonate de calcium à diverses teneurs et formes. Le gypse et le carbonate de calcium sont liés l'un à l'autre excepté dans des sols ayant un faible développement du profil tels que les Sierozems (F.A.O., 1990).

Du point de vue genèse des sols, là où les sols contiennent un mélange de calcaire et de gypse, plusieurs groupes pourraient se former dans des conditions arides ou semi-arides. Typiquement, le CaCO_3 s'accumule dans la partie moyenne du profil sous forme de concrétions ou de nodules calcaires, avec un horizon gypseux en profondeur. Cette séquence d'horizons pourrait être expliquée par la différence de solubilité entre ces deux sels. Le gypse, étant plus soluble que le calcaire, tend à se lixivier et à s'accumuler en profondeur formant un horizon gypsique. Ensuite, il se forme au-dessus des individualisations calcaires visuelles. Halitim et Robert (1987) montrent que la pression de cristallisation du gypse est à l'origine de l'envahissement des accumulations calcaires en détruisant les individualisations calcaires par le gypse avec une désintégration et une dilution au niveau de calcaire.

Il est généralement observé qu'avec l'augmentation des teneurs en gypse, la teneur en calcaire diminue. Boyadgiev (1974) explique ce phénomène sur la base des formes du carbonate de calcium et du gypse et à la présence des sels solubles dans les sols. Quand la forme du carbonate de calcium et du gypse est tendre et pulvérulente, le rapport entre le gypse et le contenu en carbonate de calcium est significatif. Il est exprimé par l'équation suivante :

Gypse (%) = $100 - 1,281 \text{ CaCO}_3$ (%). Cependant, quand le gypse est dans la catégorie des sables et le carbonate de calcium est présent sous forme de nodules ou de croûtes, ou bien quand les sels solubles sont présents, le rapport entre le contenu en gypse et en carbonate de calcium devient insignifiant.

En Tunisie, Vieilleffon (1976) a trouvé un rapport négatif entre le gypse et le contenu en calcaire pour des sols ayant des accumulations superficielles (figure 05).

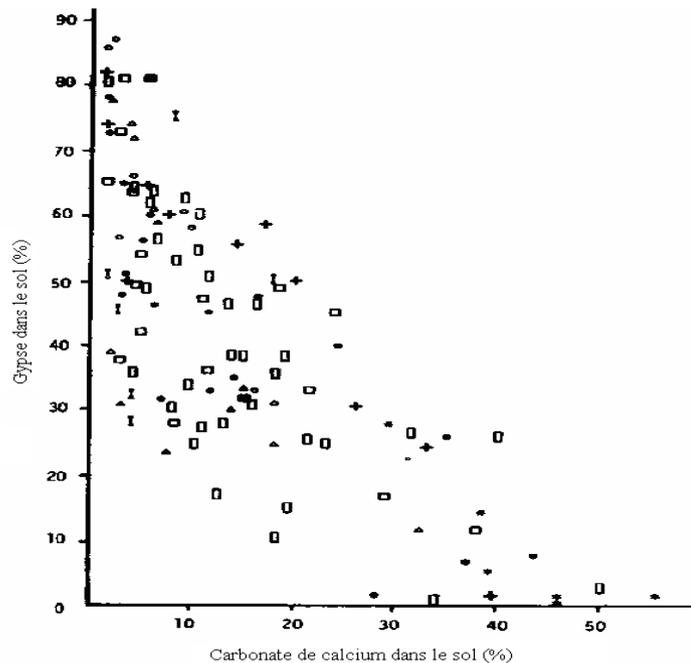


Figure 05 : Relation entre le gypse et le carbonate de calcium dans différents sols de Tunisie affectés par des croûtes gypseuses de surface (Vieilleffon, 1976)

Dans le contexte pédologique nord Algérien, Djili (2000) a montré que le gypse dans le sol est souvent accompagné par du calcaire. En revanche, la plupart des sols calcaires ne contiennent pas du gypse. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que la plupart des roches sont carbonatées alors que les sources en gypse sont relativement rares et souvent très localisées. Aussi, le gypse est nettement plus soluble que le calcaire et donc facilement mobilisable par les pluies qui l'évacuent hors du profil. L'auteur a trouvé une relation inversement proportionnelle entre ces deux paramètres. La relation linéaire est de type :

Gypse (%) = $-0,41 \text{ CaCO}_3$ (%) + 18,98. Avec $r = -0,314$ et N (nombre de couple) = 462

De son côté, Ouamer-Ali (2009) a trouvé que les valeurs en gypse supérieures à 35 % coïncident avec les taux de calcaire total inférieur à 20 % et que les valeurs inférieures à 25 % se situent dans la tranche inférieure à 35 % du calcaire total. Au-delà de 35 % de calcaire total, la relation gypse-calcaire total devient très faible à nulle. L'équation de régression linéaire est une corrélation négative et très hautement significative.

$$\text{Gypse (\%)} = -0,478 \text{ calcaire total (\%)} + 24,065, \text{ avec } r = 0,339 \text{ et } N = 654$$

Du point de vue nutrition des plantes, le gypse influence les états physiques et chimiques du sol et affecte la croissance des plantes et la production végétale (Bensaid, 2008). La présence du gypse dans des sols calcaires a deux effets opposés sur la solubilité des éléments nutritifs et sur leur biodisponibilité. D'une part, la présence du gypse tend à diminuer le pH des sols calcaires et à augmenter par conséquent la solubilité de plusieurs minéraux tels que les phosphates, les oxydes ou des hydroxydes de fer, le zinc et le manganèse. D'autre part, l'augmentation de l'activité de calcium dans la solution du sol, due à la présence du gypse, peut mener à une interaction possible entre le calcium et plusieurs cations nutritifs tels que le zinc, le fer et le manganèse et à une diminution de leur biodisponibilité (F.A.O., 1990).

7.4. Relation gypse-CEC

La capacité d'échange cationique dépend généralement de la matière organique, de la texture et du type de minéraux. La plupart des sols gypseux est pauvre en matière organique, par conséquent, la contribution des colloïdes organiques à la CEC est faible. Aussi, la présence d'argile dans ces sols dépend du matériau originel. Les sols classés comme Gypsiorthids typiques (Soil Taxonomy, 1975) présentent des teneurs en argiles qui excèdent rarement les 20 % en poids avec des valeurs de CEC faibles qui se situent entre 7 et 14 meq/100 g de sol (F.A.O., 1990). Ce type de relation peut être expliqué aussi par le fait que le gypse n'est pas un constituant du complexe adsorbant du sol. En effet, les particules de gypse n'ont pas de charges négatives et présentent une faible surface spécifique. Donc, la capacité d'échange cationique diminue à mesure que la teneur en gypse du sol augmente. Un exemple des sols gypseux de la vallée du Balikh en Syrie est donné dans le tableau VI.

Tableau VI. Relation entre la CEC des sols et la teneur en gypse dans la vallée de Balikh en Syrie (F.A.O., 1990)

Gypse (%)	0	10	25	50	75
CEC (meq/100g)	24	21	18	11	5

Au niveau des sols d'El-Hodna, Boukadoum (2007) a trouvé une relation significative et inversement proportionnelle entre ces deux paramètres. La relation linéaire est de type : $\text{CEC (meq/100g)} = -0,012 \text{ gypse (\%)} + 9,64$. Avec $r = -0,47$ et N (nombre de couple) = 22

8. Propriétés physiques

D'après l'échelle de Mohs, le gypse a une faible dureté (1,5 à 2). C'est un minéral de couleur jaunâtre et brunâtre, l'éclat est vitreux à nacré et il a un clivage parfait. Il se présente sous différentes formes (macles) qui varient généralement de dimensions et d'aspects. Selon la dimension, leur étude peut être faite par observation visuelle, par microscope ordinaire ou par microscope électronique. Selon l'aspect, les cristaux de gypse peuvent être automorphes, limitées par des faces nettes, ces cristaux apparaissent comme des jumeaux. Ils peuvent être xénomorphes, avec des limites irrégulières. La morphologie xénomorphe peut naître par une interférence mutuelle durant le développement du cristal (cristaux grenus) ou par dissolution partielle (Jafarzedeh et Burnham, 1992).

8.1. Structure

La plupart des sols gypseux ont une structure peu favorable. Ceci est dû au fait que les particules des sols gypseux sont faiblement agrégées suite aux faibles forces de cohésions qui attirent les particules de sol, d'où ce type de sol rencontre de sérieux problèmes d'érosion. Cependant, le gypse peut agir différemment sur les caractéristiques du sol selon sa teneur et selon le type de sol (Razi, 2006) :

- A de faibles teneurs, le gypse peut avoir un effet favorable sur le sol.
- En sols très argileux et très dispersible, le gypse améliore l'infiltration, diminue l'érosion et augmente la floculation.
- En sols sodiques, le gypse améliore la structure en déplaçant les ions Na^+ du complexe adsorbant et les remplaçant par les ions Ca^{++} . Il s'agit de la désalinisation du sol.
- En sols acides, le gypse change les propriétés de ces sols en déplaçant les ions Al^{3+} et en diminuant de sa toxicité.

Dans le sol, le gypse intervient aussi par une action chimique (augmentation en concentration en électrolytes et phénomène d'échange) ainsi que par une action physique au niveau des contacts qui interviennent sur la structure globale du matériau par cristallisation et croissance cristalline du gypse (Halitim, 1985). Selon Smith et Robertson (1962) cités par F.A.O. (1990), les teneurs entre 3 et 10 % en gypse n'interfèrent pas significativement avec les caractéristiques du sol telles que la structure, la consistance et la rétention en eau. Alors que les teneurs entre 10 et 25 % en gypse tendent à briser la continuité de la masse du sol par l'effet des cristaux de gypse. Cependant, les sols à teneurs supérieures à 25 % en gypse ne constituent pas un bon support pour les plantes, le sol présente de faibles plasticité, cohésion et agrégation et devient de ce fait complètement instable à l'eau.

8.2. Texture

La texture des sols gypseux dépend largement de la nature du matériau parental dans lequel le sol s'est développé (Van Alphen et Rios Romero, 1971). Cependant, elle est aussi fortement influencée par la présence des teneurs élevées des cristaux de gypse.

Le gypse se trouve dans toutes les fractions granulométriques du sol, mais il est dans la plupart des temps lié à la fraction grossière et fine du sable (0,05 mm - 2 mm), suivie de la fraction limoneuse (F.A.O., 1990). Poch (1992), dans une étude des sols gypseux d'Espagne, indique que la texture est étroitement liée à la teneur en gypse ; à de faibles teneurs, la texture est déterminée par le matériau parental. Cependant, l'augmentation des teneurs en gypse engendre la formation d'une texture à dominance de limons et de sables en raison d'une cristallisation grossière. Toutefois, on observe une grande gamme des textures dans les sols gypseux autour de la méditerranée. Le contenu en argile varie entre 2 et 50 %. Ce large intervalle textural dépend de la genèse des sols.

La dissolution du gypse et son transport dans le profil du sol durant l'irrigation ou après les précipitations influence la plasticité, l'agrégation et la texture (Mashali, 1996). Pour les sols du nord d'Algérie, Djili (2000) indique que d'une façon générale, l'augmentation des taux d'argile est accompagnée par une diminution du taux de gypse. Cependant, les faibles taux d'argiles peuvent correspondre en même temps aux forts et aux faibles taux en gypse. En effet, le gypse peut être rencontré en Algérie aussi bien dans les sols argileux (marnes, alluvions des chotts et Sebkh...etc) qu'au niveau des sols sableux des régions arides.

8.3. Stabilité structurale

Selon Boyadjiev (1974), un contenu en gypse qui dépasse 15 % tend à donner une structure instable. Il y a cependant une tendance d'améliorer la stabilité structurale lorsque le contenu en gypse excède 25 %. La teneur de 1 % de gypse a un effet favorable sur la stabilité structurale d'un sol salé et non carbonaté.

Quand le gypse se dissout, de petits trous et des fissures sont formées dans les couches de gypse qui s'élargissent graduellement jusqu'à la formation des cavités dans le substratum et dans le sous-sol. Ces cavités croissent largement avec la dissolution du gypse et par conséquent, les matériaux de la couche superficielle perdent leur cohésion et leur stabilité et se dirigent vers le bas pour remplir ces cavités, ce qui fait la formation d'une surface irrégulière (Mashali, 1996).

8.4. Résistance à la pénétration

Le taux de gypse est corrélé positivement avec la résistance de pénétration des sols. L'augmentation de la résistance à la pénétration causée par le gypse est due aux cristaux de gypse qui se trouvent dans les pores préexistants qui réduisent le volume des pores réguliers et continus nécessaires pour la croissance des racines. La résistance à la pénétration des horizons fortement gypseux est peut être un facteur qui influence le développement des racines indépendamment d'autres caractéristiques physiques ou chimiques de ces sols (Poch, 1992).

8.5. Dynamique de l'eau dans le sol

8.5.1. Rétention en eau

L'énergie de rétention de l'eau dans les sols gypseux est considérée comme étant semblable à celle dans les sols non gypseux. L'eau utilisable par les plantes est évaluée dans la gamme de la pression allant de 0,3 bars à 15 bars (F.A.O., 1990). Les valeurs retrouvées dans la littérature sont variées; par exemple, Mashina (1965), cité par Van Alphen et Rios Romero (1971) constate que l'eau disponible présente des valeurs de l'ordre de 11 à 22 % en volume dans les horizons non gypseux de surface, et de 13 à 22 % en volume pour les horizons gypseux de sub-surface ayant plus de 80 % de gypse. Van Alphen et Rios Romero (1971) indiquent qu'avec des teneurs en argile de 40 % et en gypse variant entre 1 et 9 %, la quantité de l'eau disponible est plus importante. Elle varie entre 23 et 38 % dans les horizons de surface non gypseux.

Van Alphen et Rios Romero (1971) montrent que pour des échantillons du bassin de l'Euphrate en Syrie, la quantité la plus importante de l'eau du sol est retenue entre les tensions correspondantes à pF 1,5 et pF 2,7.

Une étude comparative des caractéristiques hydriques des sols dans la région d'El Hodna (Algérie), le bassin de Balikh (Syrie) et la région de Karak (Jordanie) menée par Boyadjiev (1974) a permis de faire ressortir les conclusions suivantes :

- Les quantités d'eau retenue par le sol sont minimales lorsque la teneur en gypse est d'environ 25 %.
- Dans la gamme entre 25 à 35 % de gypse, la teneur en eau retenue dépend de la forme du gypse et de la texture du sol.
- Une augmentation de la rétention en eau est notée lorsque la teneur en gypse est au dessus de 35 % et au dessous de 10 %.

En définitive, il ressort que la rétention de l'eau dans les sols gypseux est fonction du taux d'argile, de la teneur et surtout de la dimension des cristaux de gypse.

8.5.2. Circulation de l'eau dans le sol

Le mouvement interne de l'eau dans la plupart des sols gypseux est modéré à rapide, excepté là où le gypse accumulé dans des couches compactes empêche le mouvement de l'eau (F.A.O., 1990).

Dans le massif du Kirovabad, la conductivité hydraulique varie entre 20 et 100 cm/jour au niveau des horizons gypsiques de sub-surface, et entre 120 et 190 cm/jour pour les horizons non gypsiques de surface (Van Alphen et Rios Romero, 1971). Dans les Oasis de Gabès en Tunisie, Ammani et al. (1976) cités par Van Alphen (1971), notent qu'elle varie entre 200 et 250 cm/jour dans les horizons de surface contenant du gypse, alors qu'elle est de 60 à 150 cm/jour dans les horizons de sub-surface. Dans le bassin de l'Euphrate, Van Alphen et Rios Romero (1971) ont obtenu des valeurs allant de 30 à 475 cm/jour dans les horizons de sub-surface et de 160 à 820 cm dans les horizons de surface. Selon Poch (1992), la présence de gypse n'implique pas un comportement particulier de la circulation de l'eau, car son impact est lié uniquement à la dimension et à la répartition des cristaux de gypse. En effet, Keren et al. (1980) ont montré que la conductivité hydraulique diminue en apportant du gypse sous forme de particules fines, inférieures à 44 μ m. Cependant, elle n'est pas affectée par les dimensions allant de 0,25 à 1 mm de diamètre. En plus, la baisse de la valeur de la conductivité hydraulique dans le premier cas est essentiellement liée à un colmatage mécanique par les fines particules du gypse. D'après F.A.O. (1990), après irrigation d'un sol gypseux, le gypse se dissout et il est transporté, parfois une croûte de gypse est formée. La réduction de l'activité hydraulique peut être due à la précipitation du gypse dans les pores après dissolution.

9. Propriétés thermiques

On sait depuis longtemps que le gypse se déshydrate à température relativement peu élevée pour donner du plâtre dont la réhydratation à l'eau est à son tour aisée. Selon vieilleffon (1979), dans les milieux géologiques, les formes du sulfate de calcium les plus répandues sont la forme hydratée ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) « le gypse » et, la forme déshydratée (CaSO_4) « l'anhydrite ».

La première forme semble seule exister dans les sols, excepté dans certains déserts chauds. Il existe aussi des formes d'hydratation intermédiaires; le gypse peut se déshydrater pour donner d'autres sels ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) en perdant 3/4 de son eau, c'est la forme semi-hydratée (figure 06).

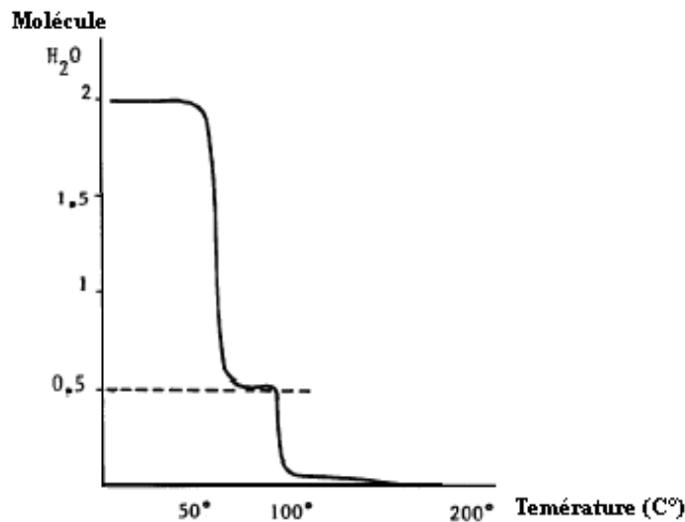


Figure 06 : Déshydratation du gypse à température croissante (Weisser et al. In Vieillefon, 1979)

Les principales formes (phases) sont les suivantes :

- Phase déshydratée : gypse monoclinique.
- Phase semi-hydratée : hemihydrate.
 - Naturelle : Basanite
 - Artificielle : - Variété α : préparée en solution ou en autoclave donc en présence d'un excès d'eau sous forme liquide ou vapeur.
 - Variété B : préparée en absence d'eau.
- Phase anhydre : anhydrite
 - Naturelle : orthorhombique.
 - Artificielle : - Anhydrite réversible ou anhydrite III, obtenue par chauffage au dessous de 200°C, très hygroscopique.
 - Anhydrite irréversible ou anhydrite II, obtenue par chauffage au dessus de 200°C, non réhydratable.
 - Plâtre surcuit ou γ , obtenu par chauffage au dessus de 1000°C.

10. Minéralogie des sols gypseux

La composition minéralogique des sols gypseux n'est ni uniforme, ni stable (Ouamer-Ali, 2009). Selon Eswaren et Gang (1991), de nombreux minéraux sulfatés peuvent être présents et associés avec les sols gypseux. La plupart de ces minéraux sont plus solubles que le gypse. Par conséquent, ils reflètent des conditions environnementales de température et de régime d'humidité très spécifiques s'ils sont présents dans le sol. Le tableau VII montre une liste des minéraux les plus fréquents présents dans les sols gypseux.

Tableau VII. Les minéraux les plus fréquents présents dans les sols gypseux (Eswaren et Gang, 1991)

Le minéral	Sa formule	Présence saisonnière
Gypse	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	H, P, E
Bassanite	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	P
Anhydrite	CaSO_4	H, P, E
Mirabilite	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	H
Thénardite	Na_2SO_4	H, P, E
Epsomite	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	H, P, E
Hexahydrite	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	E
Konyaite	$\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	H, P, E
Bloedite	$\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	E
Loewite	$\text{Na}_{12}\text{Mg}_7(\text{SO}_4) \cdot 15\text{H}_2\text{O}$	E

H : Hiver.

P : Printemps.

E : Été.

La Mirabilite est un minéral qui se forme en hiver. Elle se transforme en été par déshydratation en Thénardite (perte de 10 molécules d'eau). Au niveau du sol, elle se trouve juste au dessous de la surface du sol en raison de sa grande solubilité. Les croûtes de l'Héxahydrites se forment seulement en été, quand l'Epsomite était plus abondante durant la période du froid. La Konyaite est considérée comme étant le minéral le plus fréquent dans ce type de sol par rapport à ceux cités auparavant. A la température ambiante et à une humidité élevée, le minéral se transforme en Bloedite. Les deux autres minéraux sulfatés, « Anhydrite et Bassanite », sont fréquents au niveau de la surface du sol après une déshydratation partielle du gypse par la température. On note que la Bassanite est à son tour très facilement rehydratable tel que le gypse.

Il existe d'autres minéraux sulfatés moins solubles que ceux cités précédemment. Il s'agit de la Celestite (SrSO_4) qui a été reportée dans de nombreux sols gypseux, particulièrement ceux du Moyen Orient. En Iraq, elle a été identifiée par Barzanji et Stoops (1974) au niveau de certains horizons pétrogypsiques.

Les sols gypseux n'ont pas une représentation minéralogique particulière, bien que l'observation de la palygorskite (attapulgite) a été souvent associée à la présence et à la formation du gypse. Boyadgiev et Sayegh (1992) suggèrent une relation directe entre la forme du gypse et la palygorskite. Celle-ci est observée dans les situations suivantes :

- Dans les sols gypseux présentant des formes spongieuses.
- Dans les encroûtements discontinus de surface en présence d'une activité biologique (Lichen) qui contribue à sa formation.
- Dans les croûtes gypseuses où elle est considérée comme résiduelle.
- Dans les matériaux éoliens sous formes de loess originaire des régions désertiques. Dans ce dernier cas, la palygorskite peut exister dans les niveaux supérieurs du profil lorsqu'elle n'est pas formée sous des conditions locales.

D'après Halitim (1985), les facteurs qui contribuent à la formation de la palygorskite sont :

- La présence de quartz et de silicates phylliteux (source de silice et d'aluminium).
- Un pH élevé sans excès (entre 8 et 9).
- Une source suffisante de Mg^{++} .

Selon Dekkiche (1974), l'Attapulgite est fort bien marquée dans les sols du Hodna, particulièrement dans les sols à accumulation de gypse où elle paraît associée au gypse, et à un milieu riche en sulfate de calcium d'une part et à la smectite d'autre part. Cependant, d'après Millot et al. (1969), la palygorskite nécessite un environnement alcalin avec un apport de silice et de magnésium pour se former. Donc elle caractérise beaucoup plus les milieux calcaires.

11. Problèmes de l'analyse des sols gypseux au laboratoire

La présence du gypse détermine de nombreux caractères spécifiques sur le plan de la couleur, la structure, la texture, la consistance...etc. En plus, les propriétés physico-chimiques induites par le gypse sont très particulières et ont une influence non négligeable sur les résultats des analyses que l'on applique aux sols gypseux. Ceci induit de nombreux obstacles rencontrés durant les analyses de ce type de sol. Les méthodes classiques d'analyses des sols s'appliquent difficilement aux sols gypseux (notamment en ce qui concerne la granulométrie, les mesures d'humidité et de pF, le dosage du gypse, les mesures de CEC et des bases échangeables ... etc) en raison de certaines propriétés particulières du gypse : solubilité non négligeable, densité plus faible que celle des constituants minéraux habituels des sols, facilité de déshydratation et de réhydratation....etc. Selon Vieilleffon (1979), les phénomènes liés aux propriétés thermiques du gypse réagissent sur les mesures d'humidité et de pF, la granulométrie et le dosage du gypse alors que la densité et la solubilité ne jouent de rôle que dans l'analyse granulométrique.

11.1. Granulométrie

L'analyse granulométrique est une analyse de base qui permet de déterminer avec précision les pourcentages des différents constituants minéraux d'un sol (sable, limon et argile) et par la suite déterminer la texture du sol à l'aide du triangle de texture. Cette analyse repose sur un ensemble de concepts universellement admis qui en gouvernent la méthodologie. Cette dernière réside dans les traitements et la destruction des constituants gênant la dispersion des fractions granulométriques. La méthode consiste à l'attaque de la matière organique de la quantité de terre à analyser par l'eau oxygénée et celle du calcaire par l'acide chlorhydrique. En présence du gypse, l'opération devient plus délicate. Après les traitements préalables de dispersion, on procède à l'extraction du gypse par l'agitation mécanique de l'échantillon en utilisant une solution d'oxalate d'ammonium (Coutinet, 1965). Par la suite, une solution d'hexamétaphosphate de sodium est utilisée pour la dispersion des particules élémentaires. Enfin, le prélèvement des argiles et limons fins se fait à la pipette de Robinson et les sables sont déterminés par tamisage.

Les propriétés du gypse concourent à fausser l'analyse granulométriques. Ce qui fait qu'il est très rare, voire impossible, que l'analyse classique (méthode internationale) donne des résultats satisfaisants. D'après Vieilleffon (1979), les causes des difficultés rencontrées sont dues à plusieurs phénomènes aux effets plus ou moins contradictoires semblant intervenir pour source d'erreur. Les trois principaux seraient :

- la floculation des suspensions de terre,
- l'incidence du poids spécifique du gypse sur les paramètres opératoires, et
- l'incidence des propriétés thermiques du gypse au cours du séchage des échantillons.

* Incidence de la floculation

Le phénomène de floculation résulte de la dissolution aisée d'une partie, même infime, du gypse de l'échantillon, fournissant en abondance des ions calcium à la solution qui vont se fixer sur le complexe adsorbant, alors que l'argile se rassemble en formant des sortes de flocons. Les mesures portant sur les fractions argile et limon seront inférieures à la réalité, et une certaine part de ces fractions se trouvera dans la fraction limon grossier. La floculation se manifeste à des teneurs en gypse de 10 % et même plus faibles.

* Incidence du poids spécifique

La mesure des pourcentages des fractions fines des sols inférieures à 20 ou 50 µm est généralement faite par décantation en utilisant la loi de Stokes (1851) :

$$C = \frac{2 r^2 (d_1 - d_2) g}{9 e}$$

C est la constante de Stokes.

r est le rayon de la particule en cm.

d1 densité de la particule 2,65 (densité du quartz).

d2 densité de l'eau = 1.

g accélération de la pesanteur 981 cm/s (constante de gravitation).

e viscosité du liquide en dyne. Sec. Cm⁻².

La densité et la viscosité du fluide (généralement l'eau) varient en fonction de la température. Des tables donnent la valeur de la constante C aux différentes températures rencontrées au laboratoire et pour une valeur de densité du sédiment de 2,65. Il faut également noter que la densité du gypse (ou son poids spécifique) est nettement inférieure à celle des constituants minéraux habituels des sols ; le gypse a une densité de 2.32 (Boyadgiev et Verheye, 1996). L'utilisation de la méthode basée sur la loi de Stokes qui considère une densité moyenne des particules de 2,65 conduit à une erreur de surestimation des fractions d'argile et des limons si aucune correction n'est faite.

* Incidence des propriétés thermiques

Le séchage à 105°C, éliminant une partie de l'eau de constitution des particules gypseuses conduit à une sous estimation, à la fois dans les fractions fines et dans les fractions grossières. Pour la même température classiquement adoptée en analyse des sols pour les mesures d'humidité et de séchage, des prélèvements de l'analyse granulométrique, la déshydratation peut être plus ou moins poussée et conduit à des résultats erronés (vieilleffon, 1979).

11.2. Mesures d'humidité

La mesure de l'humidité des sols, qu'il s'agit d'analyse de caractérisation ou d'études plus spécifiques du régime hydrique, se fait par la méthode classique qui consiste à une dessiccation de l'échantillon de terre à l'étuve ordinaire à 105°C pendant 16 à 24 heures (jusqu'à obtention de poids constant). Cette méthode ne peut pas s'appliquer aux échantillons gypseux, car elle donne des résultats erronés par excès. En effet, le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se transforme dans ces conditions en sulfate semi-hydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. Le terme final de la déshydratation est l'anhydrite CaSO_4 . De ce fait, la mesure d'humidité sur des échantillons gypseux est surestimée, en raison du départ de l'eau de constitution du gypse s'ajoutant à l'eau normalement fixée par le sol (vieilleffon, 1979).

Selon Pouget (1968), l'eau de constitution du gypse représente $36/172 * 100 = 20,6 \%$ de la teneur en gypse. Il suffirait donc de retrancher environ 1/5 de la teneur en gypse pour connaître la teneur en eau "mécaniquement" liée au sol. Ce qui fait que le dosage du gypse est indispensable pour obtenir une mesure d'humidité correcte. Cependant, cette méthode qui suppose que le gypse est complètement déshydraté après 24 heures à 105°C, (ce qui n'est pas prouvée) n'est applicable qu'aux analyses de caractérisation, du fait de la nécessité de doser simultanément le taux de gypse. Elle ne peut convenir pour l'établissement de profils hydriques périodiques. Par ailleurs, Vieilleffon (1979) indique que la mesure d'humidité peut se faire dans une étuve ventilée à une température ne dépassant pas 70°C. La perte de poids est due à l'eau d'imbibition évaporée; car à cette température, le gypse n'est pas encore affecté.

11.3. Dosage du gypse

Parmi les principales contraintes lors des manipulations au laboratoire pour le dosage du gypse, il y a :

- La présence de sels de SO_4^- et /ou de Ca^{++} autres que le gypse.
- L'existence de formes diverses de sulfate de calcium.
- Les réactions d'échanges, dans lesquelles Ca^{++} peut remplacer d'autres cations tels que le Na^+ ou Mg^{++} .
- Difficulté de mise en suspension de la totalité du gypse (Mathieu et Pieltain, 2003).

Le gypse possède plusieurs caractéristiques physico-chimiques, c'est pourquoi il existe plusieurs méthodes pour son dosage. Les méthodes qui ont été développées pour le dosage du gypse vont depuis la dilution dans l'eau pour les faibles teneurs jusqu'à l'attaque par l'acide chlorhydrique, le carbonate d'ammonium ou par le carbonate de sodium. Les ions sulfates libérés en solution sont ensuite déterminés par précipitation du sulfate de baryum.

D'autres méthodes sont basées soit sur la précipitation du gypse par l'acétone, suivie de la mesure de la conductivité électrique de l'extrait (Bower et al., 1948), soit sur la différence entre les teneurs en calcium et magnésium de l'extrait de pâte saturées et l'extrait aqueux dilué (US Salinity Laboratory Staff, 1954).

Selon Vieillefont (1979), le principal défaut de ces méthodes est de doser exclusivement le sulfate de calcium, sans renseigner sur son état d'hydratation.

11.4. CEC et bases échangeables

La présence du gypse, généralement associé aux carbonates et aux sels solubles est un obstacle dans la détermination de la capacité d'échange cationique (un paramètre utile pour évaluer la minéralogie et la fertilité des sols) et des bases échangeables. Le gypse (comme le carbonate de calcium), suite à sa solubilité, libère des ions Ca^{++} qui entrent en compétition avec l'ion saturant, la CEC est donc sous estimée. En outre, la dissolution du gypse surestime les cations échangeables, notamment, le taux de Ca^{++} qui est généralement plus élevé que la CEC. De ce fait, il faut dissocier les cations échangeables des cations provenant de la dissolution du gypse et des autres sels dans les solutions utilisées pendant la manipulation. Le résultat sera toujours approximatif, étant donné que dans le sol, d'autres réactions peuvent avoir lieu simultanément (Tahtah, 2008). En général, les valeurs de la CEC décroissent avec l'augmentation des teneurs en gypse (Poch, 1992).

12. Effet du gypse sur les plantes

Le gypse agit différemment sur les productions agricoles selon sa teneur « effet quantité », sa forme, sa distribution verticale et horizontale dans le profil et la profondeur des accumulations. Van Alphen et Rios Romero (1971) rapportent d'une façon générale que la productivité agricole diminue quand la teneur en gypse augmente. Ils concluent que jusqu'à 2 % de gypse dans le sol, il favorise la croissance des plantes. Entre 2 et 25 %, il a peu ou pas d'effet nuisible sous forme pulvérulente. Mais à plus de 25 %, le gypse peut causer une réduction substantielle des rendements. Ces réductions seraient dues en partie aux rapports déséquilibrés entre les ions, en particulier les rapports K/Ca et Mg/Ca. En Tunisie, Bureau et Roederer (1960) rapportent que des teneurs supérieures à 30 % en gypse sont toxiques pour la croissance des plantes. Selon Jafarzadeh et Zinck (2000), les teneurs supérieures à 40 % en gypse sont peu convenables à l'agriculture. Selon Smith et Robertson (1962), la croissance des racines des sols gypseux en Iraq est réduite là où la teneur en gypse est supérieure à 10 %. Aussi, les sols contenant plus de 25 % de gypse dans la zone racinaire donnent une faible croissance du végétal. Les racines ne pénètrent pas dans la couche de gypse, même lorsque le sol est humide. Aussi, des teneurs en gypse supérieures à 50 % engendrent des problèmes de résistance mécanique à la pénétration racinaire, ce qui fait que l'exploration du sol par les racines est gênée. Le sol a une faible capacité de rétention en eau, la perméabilité, la stabilité structurale, la cohésion, l'agrégation et les propriétés chimiques seront par conséquent affectées (Mashali, 1996). Boyadjiev et verheye (1996) et jafarzadeh et Zinck (2000) classent les teneurs en gypse dans la rhizosphère en 5 classes :

- 0 à 3 % : teneur basse.
- 3 à 10 % : teneur moyenne.
- 10 à 25 % : teneur moyenne à élevée.
- 25 à 40 % : teneur élevée.
- > 40 % : teneur très élevée.

En générale, les plantes réagissent différemment aux différentes teneurs en gypse. F.A.O. (1990) classe les cultures vis-à-vis de leur tolérance en gypse dans quatre principaux groupes :

Groupe I : Tolérant au gypse – cultures qui montrent une tolérance à 40 % de gypse dans le sol sans diminution significative de rendement : Luzerne, trifolium, blé, orge, lentille, avoine, tomate et oignons.

Groupe II : Semi-tolérant au gypse – cultures qui montrent une tolérance à 20 % de gypse dans le sol sans diminution significative de rendement. Le rendement peut chuter de 50 % à des niveaux de gypse élevés (40 %). Ce groupe inclut : fève, betterave, canne à sucre, sorgho, maïs et soja.

Groupe III : Semi-sensible au gypse – cultures qui montrent une tolérance jusqu'à 10 % de gypse sans baisse significative de rendement. La chute de rendement se produit à des niveaux élevés de gypse. Ce groupe inclut : Coton, arachides, pomme de terre et tournesol.

Groupe IV : Sensibles au gypse – parmi ces cultures, on trouve le tabac.

13. Classification des sols gypseux

L'intérêt pour les sols gypseux a augmenté durant les décennies récentes. Ainsi, ils sont maintenant identifiés dans la plupart des classifications à différents niveaux et avec une assez grande diversité de termes et de définitions (R.P.F., 1995).

13.1. Classification française

La classification française éditée en 1967 (C.P.C.S.), classe les sols dans des classes, des sous classes, des groupes et des sous groupes. Les sols gypseux sont répartis dans trois classes d'après cette classification (tableau VIII).

Tableau VIII. Les sols gypseux dans la classification C.P.C.S. (1967)

Classe	Sous classe	Groupe	Sous groupe
Sols calcimagnésiques	Sols gypseux	Sols gypseux rendziniformes	/
		Sols bruns gypseux	modal à encroûtement gypseux
Sols isohumiques	Pédoclimat frais pendant les saisons pluvieuses	Sierozems	à croûte gypseuse
Sols hydromorphes	Minéraux ou peu humifère	à redistribution de calcaire et de gypse	à encroûtement ou à nodule

- Les sols gypseux dans la classe des sols calcimagnésiques sont des sols dans lesquels l'horizon supérieur contient des sulfates de chaux. La couleur est généralement grise claire, parfois beige. La structure est souvent finement grumeleuse. Cette sous classe renferme deux groupes. Le premier est le groupe des sols gypseux rendziniformes. Ce sont des sols gypseux peu épais (moins de 50 cm), de profil AR ou ACR. Le deuxième groupe est le groupe des sols bruns gypseux. Ce sont des sols gypseux à horizon A3 ou même (B) et possédant éventuellement des horizons profonds d'accumulation de gypse.
- Les sols gypseux représentés dans la classe des sols isohumiques font partie de la sous classe des sols à pédoclimat frais pendant les saisons pluvieuses; la teneur en matière organique est faible et l'altération minérale est plus forte en profondeur où une argilification préférentielle est fréquente. Ce sont des sols à croûte gypseuse du groupe des Sierozems. Ils sont faiblement décarbonatés en surface et ne présentent qu'une teneur limitée en matière

organique, même dans l'horizon supérieur. Ces sols possèdent une structure grumeleuse à nuciforme, parfois lamellaire ou compacte en surface, polyédrique en dessous.

- Les sols gypseux présentés dans la classe des sols hydromorphes sont des sols à encroûtements ou à nodules de gypse possédant moins de 8 % de matière organique sur une profondeur de 20 cm, ou plus de 8 % sur une faible profondeur (en générale le taux de matière organique est inférieur à 4,5 %). L'hydromorphie s'exprime par des caractères de couleur (taches de composés réduits ou réoxydés après réduction) ou par la redistribution des éléments solubilisables en particulier en milieu réduit : oxydes de fer, de manganèse, calcaire, sur environ le mètre supérieur.

Ces classes ne présentent pas une définition précise (manque de précision pour les données analytiques car la CPCS est une classification morphogénétique), ce qui rend le système de classification difficile pour son application et surtout pour la translation des unités vers les autres systèmes de classifications.

13.2. Classification américaine

13.2.1. Soil Taxonomy (U.S.D.A., 1999)

Pour identifier les sols gypseux, la Taxonomie des sols exige la présence d'un des deux horizons diagnostiques qui diffèrent selon la teneur en gypse : un horizon gypsique ou un horizon pétrogypsique.

❖ Horizon gypsique

C'est un horizon diagnostique de sub-surface enrichi en sulfates secondaires. Il présente les caractéristiques suivantes :

1. Il est non ou faiblement cimenté au point qu'un morceau sec peut se désagréger dans l'eau, et
2. son épaisseur est de 15 cm ou plus, et
3. il contient au moins 5 % de gypse et au moins 1 % (en volume) d'accumulation de gypse secondaire visible, et
4. le produit de l'épaisseur de l'horizon en centimètre avec le pourcentage de gypse est égal ou supérieur à 150.

Exemple : un horizon de 30 cm d'épaisseur avec 5 % de gypse est qualifié d'horizon gypsique, si la teneur en gypse visible (en volume) est d'au moins de 1 % et qu'il est peu ou pas cimenté.

❖ **Horizon pétrogypsiq**

C'est un horizon diagnostique enrichi en gypse secondaire et qui présente les caractéristiques suivantes :

1. Il est fortement cimenté avec du gypse (avec ou sans autres agents de cimentations). Il est dur et massif, et
2. les fragments secs ne s'effritent pas dans l'eau et les racines ne peuvent pas le pénétrer, et
3. son épaisseur est de 10 cm ou plus, et
4. l'horizon contient au moins 5 % de gypse et le produit de l'épaisseur en cm avec le contenu en gypse est égale à 150 ou plus.

Habituellement, le contenu en gypse est relativement élevé, il excède 60 %.

Ces horizons sont limités aux climats arides et aux matériaux originels riches en gypse.

13.2.2. Clé de la Soil Taxonomy (2006)

La dernière version de la clé de la Soil Taxonomy (2006) classe les Aridisols en 07 sous ordres, parmi lesquels on trouve les gypsids. Ces derniers présentent les caractéristiques suivantes :

1. Un horizon gypsiq ou pétrogypsiq dont la limite supérieure se trouve à moins de 100 cm de la surface.
2. Ils n'ont pas un horizon pétrocalcique placé au-dessus de l'horizon gypsiq ou l'horizon pétrogypsiq.
3. Ils ont un régime de température de sol plus chaud que cryique.
4. Ils n'ont pas un duripan ou un horizon salique dont la limite supérieure se trouve à moins de 100 cm de la surface.

Les gypsids comportent cinq grands groupes qui sont :

a) Pétrogypsids : Ce sont les gypsids ayant un horizon pétrogypsiq ou pétrocalcique dont la limite supérieure est à moins de 100 cm de la surface.

b) Natrigypsids : Ce sont les gypsids ayant un horizon natrique dont la limite supérieure est à moins de 100 cm de la surface.

c) Argigypsids : Ce sont les gypsids ayant un horizon argilique dont la limite supérieure est à moins de 100 cm de la surface.

d) Calcigypsids : Ce sont les gypsids ayant un horizon calcique dont la limite supérieure est à moins de 100 cm de la surface.

e) Haplogypsids : Ce sont les autre gypsids.

Les horizons gypsiques et pétrogypsiques sont aussi utilisés pour la définition d'autres catégories notamment au niveau des Salids, Argids, Cryids et autres. Le tableau IX montre les différents niveaux de classification concernés par le gypse dans la clé de la Soil Taxonomy (2006).

Tableau IX. Les sols gypseux dans la clé de la Soil Taxonomy (2006)

Ordres	Sous ordres	Grands groupes	Groupes
Aridisols	Argids	Gypsiargids	Aquic Gypsisols Durinodic Gypsiargids Vitrixerandic Gypsiargids Vitrandic Gypsiargids Xeric Gypsiargids Ustic Gypsiargids Typic Gypsiargids
		Petroargids	Petrogypsic Ustic Petroargids Pétrogypsic Petroargids
	Cryids	Gypsicryids	Calcic Gypsicryids Vitrixerandic Gypsicryids Vitrandic Gypsicryids Typic Gypsicryids
		Petrocryids	Petrogypsic Petrocryids
	Gypsids	Petrogypsids	Petrocalcic Petrogypsids Calcic Petrogypsids Vitrixerandic Petrogypsids Vitrandic Petrogypsids Xeric Petrogypsids Ustic Petrogypsids Typic Petrogypsids
		Natrigypsids	Lithic Natrigypsids Vertic Natrigypsids Petronodic Natrigypsids Vitrixerandic Natrigypsids Vitrandic Natrigypsids Xeric Natrigypsids Ustic Natrigypsids Typic Natrigypsids

		Argigypsid	Lithic Argigypsid Vertic Argigypsid Calcic Argigypsid Petronodic Argigypsid Vitrixerandic Argigypsid Vitrandic Argigypsid Xeric Argigypsid Ustic Argigypsid Typic Argigypsid
		Calcigypsid	Lithic Calcigypsid Petronodic Calcigypsid Vitrixerandic Calcigypsid Vitrandic Calcigypsid Xeric Calcigypsid Ustic Calcigypsid Typic Calcigypsid
		Haplogypsid	Lithic Haplogypsid Leptic Haplogypsid Sodic Haplogypsid Petronodic Haplogypsid Vitrixerandic Haplogypsid Vitrandic Haplogypsid Xeric Haplogypsid Ustic Haplogypsid Typic Haplogypsid
	Salids	Aquisalid	Gypsic Aquisalid
		Haplosalid	Petrogypsic Haplosalid Gypsic Haplosalid
Gelisol	Orthel	Anhyorthel	Petrogypsic Anhyorthel Gypsic Anhyorthel
	Tubel	Anhytubel	Petrogypsic Anhytubel Gypsic Anhytubel
Inceptisol	Ustept	Calciustept	Petrogypsic Calciustept Gypsic Calciustept
		Haplustept	Gypsic Haplustept
	Xerept	Haploxerept	Gypsic Haploxerept
Mollisol	Ustoll	Calciustoll	Gypsic Calciustoll
Vertisol	Torrert	Gypsitorrert	Chromic Gypsitorrert Typic Gypsitorrert

	Usterts	Gypsiusterts	Lithic Gypsiusterts Halic Gypsiusterts Sodic Gypsiusterts Aridic Gypsiusterts Udic Gypsiusterts Leptic Gypsiusterts Entic Gypsiusterts Chromic Gypsiusterts Typic Gypsiusterts
		Haplusterts	Gypsic Haplusterts

13.3. Classification WRB (2006)

La légende FAO-UNESCO de la carte des sols du monde à une échelle au 1/5.000.000 (F.A.O., 1975) a inventorié les sols dans 26 unités et 103 sous unités. Sur la carte, les sols gypseux ne sont pas considérés à un niveau élevé de la classification. La présence d'un horizon gypseux, comme définie en Taxonomie des sols des USA, est employée pour définir les Yermosols gypsiques et les Xérosols gypsiques au deuxième niveau. Dans la légende de la carte, un horizon gypseux est accepté dans d'autres sous unités, exemple des Yermosols luviqes et calciques, les Kastanozèms luviqes et calciques, les Chernozèms luviqes et calcique, les Cambisols calciques et les Solonchaks.

La version révisée de la carte de sol du monde (F.A.O., 1988) présente deux types majeurs de sols, les calcisols et les gypsisols, tout en supprimant les Yermosols et les Xérosols. Les calcisols ont un horizon calcique ou pétrocalcique. Les gypsisols ont un horizon gypsique ou pétrogypsique. En 1999, la FAO identifie 30 groupes de sols de référence pour constituer la Base de Référence Mondiale des Ressource en sols. Ils incluent trois nouveaux groupes de sols de référence, à savoir les Cryosols, les Durisols et les Umbrisols. Les Greyzems ont été abandonnés et ont fusionné avec les Phaeozems, tandis que les Podzoluvisols sont devenus les Albéluvisols. La dernière édition de la WRB (2006) identifie deux autres groupes de référence. Il s'agit des Stagnosols et des Technosols. Ainsi, 32 groupes sont identifiés jusqu'à nos jours.

La classification WRB repose sur 03 critères de différenciation qui sont :

- Les horizons diagnostiques,
- les propriétés diagnostiques et
- le matériau diagnostique.

La clé de la WRB (2006) identifie les gypsisols comme étant les sols :

- a) ayant un horizon pétrogypsiqque endéans les 100 premiers centimètres de la surface du sol, ou
- b) un horizon gypsiqque endéans les 100 premiers centimètres de la surface du sol et n'ayant pas un horizon argique moins qu'il soit imprégné de gypse ou de carbonate de calcium.

13.3.1. Horizons diagnostiques

❖ Horizon gypsiqque

C'est un horizon non cimenté contenant des accumulations secondaires de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sous différentes formes. Si l'accumulation du gypse devient des concentrations continues et qui font disparaître la structure lithologique et la structure pédologique, on utilisera le qualificatif hypergypsiqque.

En ce qui concerne les critères diagnostiques, un horizon gypsiqque doit avoir :

- a) 5 % ou plus de gypse ou 1 % ou plus (en volume) de gypse secondaire visibles, et
- b) une épaisseur de 15 cm ou plus, et
- c) le produit de l'épaisseur (en cm) avec le pourcentage de gypse égal ou supérieur à 150.

Sur le terrain, le gypse peut se trouver sous forme de pseudomycéliums, de cristaux grossiers ou d'accumulations poudreuses compactes. Cette dernière forme donne à l'horizon gypsiqque une structure massive.

Selon cette même classification, les horizons gypsiques dans les régions sèches peuvent être associés aux horizons calciques ou saliques, mais occupant toujours des positions séparées à l'intérieur du profil car le produit de solubilité est différent pour chaque type de sels.

❖ Horizon pétrogypsiqque

C'est un horizon cimenté contenant des accumulations secondaires de gypse. Pour les horizons diagnostiques, un horizon pétrogypsiqque doit avoir :

- a) 5 % ou plus de gypse ou 1 % ou plus (en volume) de gypse secondaire visible, et
- b) une cimentation telle que des fragments secs ne se délitent pas dans l'eau et ne peuvent être pénétré par des racines, et
- c) une épaisseur de 10 cm ou plus.

Sur le terrain, les horizons pétrogypsiques sont des matériaux durs et blanchâtres qui contiennent principalement du gypse. Parfois, des horizons pétrogypsiques extrêmement durs et anciens sont coiffés d'une couche laminaire fine d'environ 1 cm d'épaisseur.

Vu que l'horizon pétrogypsiqse se développe au départ d'un horizon hypergypsiqse, ces deux horizons sont intimement liés. C'est le degré de cimentation qui les distingue. Autrement dit, lorsqu'un horizon hypergypsiqse s'indure, il devient un horizon pétrogypsiqse.

13.3.2. Propriétés diagnostiques

Les propriétés diagnostiques d'un sol reflètent les conditions spécifiques de ce sol. Pour les gypsisols, la propriété diagnostique qui le caractérise est la propriété aridique. Cette propriété combine un certain nombre de propriétés communes aux horizons de surface des sols présents en conditions arides et là où la pédogenèse se développe plus vite que les nouvelles accumulations de surface dues à l'activité éolienne ou alluviale.

Les propriétés aridiques ont tous les caractères suivants :

- a) Une teneur en carbone organique inférieure à 0,6 % si la texture du sol est loam sableux ou plus fine, ou inférieure à 0,2 % si la texture est plus grossière qu'un loam sableux, prise en moyenne pondérée dans les 20 premiers cm du sol ou sous le sommet d'un horizon B, ou d'un horizon cimenté ou de la roche, s'ils sont plus superficiels, et
- b) des preuves d'activité éolienne sous l'une ou l'autre des formes suivantes :
 - la fraction sable, dans un sous horizon ou dans des fissures remplies de matériau soufflé, contient une proportion importante de particules de sable arrondies ou sub-angulaires présentant une surface mate (en employant une loupe avec un grossissement de 10 fois). Ces particules présentent 10 % ou plus de la fraction sable quartzeux moyen et plus grossier, ou
 - des fragments de roche usés par le vent (ventifacts) en surface, ou
 - de l'aéroturbation (par exemple des couche croisées), ou
 - des preuves d'érosion et/ou de dépôts éoliens, et
- c) des échantillons à la fois brisés et écrasés ont une valeur de couleur Munsell égale ou supérieure à 3 à l'état humide et égal ou supérieure à 4,5 à l'état sec, et un chroma égal ou supérieur à 2 à l'état humide, et
- d) un taux de saturation en bases (par NH_4OAc 1M) est égal ou supérieur à 75 %.

13.3.3. Matériaux diagnostiques

Les matériaux diagnostiques d'un sol sont définis afin de refléter les matériaux parentaux d'origine, dans lesquels les processus pédogénétiques n'ont pas encore eu une activité telle qu'ils y aient laissé une empreinte significative. La WRB (2006) définit pour les gypsisols le matériau diagnostique Gypsirique. Ce dernier est défini comme un matériau de sol minéral qui contient au moins 5 % de gypse (en volume).

Les unités de niveau inférieur du groupe de référence des gypsisols se fait en employant des qualificatifs (préfixes et suffixes). Le tableau X résume la liste du niveau inférieur des gypsisols.

Tableau X. Unités inférieures du groupe de référence des gypsisols (W.R.B., 2006)

Clé pour le groupe de référence	Qualificatifs (préfixes)	Qualificatifs (suffixes)
Gypsisols	Petric Hypergypsic Hyporgypsic Arzic Technic Leptic Vertic Endosalic Endogleyic Petroduric Duric Petrocalcic Calcic Luvic Haplic	Ruptic Sodic Hyperochric Tkyric Yermic Aridic Skeletic Arenic Siltic Clayic Novic

Les définitions des éléments formatives (qualificatifs suffixes et préfixes) du deuxième niveau du groupe de référence des gypsisols sont présentées au niveau de l'annexe 1 (tableaux I, II et III).

13.3.4. Règles de classification

La classification WRB (2006) consiste en trois (03) étapes essentielles :

1. Etape 01

L'expression, épaisseur et profondeur des horizons est retenue pour les besoins des horizons, propriétés et matériaux diagnostiques qui sont définis en terme de critères morphologiques et/ou analytiques. Quand un horizon accomplit les critères de plusieurs horizons, propriétés ou matériaux diagnostiques, ils sont considérés comme des cas de chevauchement ou de coïncidence qui peuvent arriver.

2. Etape 02

La combinaison des horizons, propriétés et matériaux diagnostiques décrits est comparée avec celles de la clé de la WRB dans le but de faire ressortir le Groupe de Sol de Référence (GSR) qui est le premier niveau de classification de la WRB. L'utilisateur à travers cette clé commence systématiquement en premier lieu par le début de la liste du premier niveau des GSR et exclue un par un tous ceux ne répondant pas aux exigences et conditions établies par la WRB. Le premier sol qui répond aux besoins de la WRB est le GSR recherché.

3. Etape 03

Pour le deuxième niveau de classification, des qualificatifs listés dans la table de la clé de classification sont utilisés (préfixes et suffixes)

13.3.5. Utilisation des qualificatifs

Dans la mesure du possible, quand on classe un profil de sol, tous les qualificatifs listés avec le GSR doivent être rapportés. Pour la cartographie des sols, et selon l'échelle, l'utilisation de ces qualificatifs est différente. Dans ce cas, les préfixes ont la priorité d'utilisation par rapport aux suffixes. On note que pour exprimer un certain degré de ces qualificatifs, des indicateurs sont utilisés tels que : Epi – Endo – Hyper – Hypo – Para et Ortho. Les préfixes sont toujours placés avant le nom du GSR, tandis que les suffixes, ils sont mis entre parenthèses après le nom du GSR.

CHAPITRE II : Matériel et méthodes

1. Milieu d'étude

Les sols étudiés se situent dans la région de « Bordj El-Jir » sur la RN 40 à environ 30 km à l'est de la commune de « Ain El-Hjel » dans la wilaya de M'Sila (figure 07).

La région appartient aux plaines d'El-Hodna caractérisées par des alluvions actuelles (lacs, marécages, dayas, chotts, sebkha, limon et croûtes gypso-salines) (figure 08).

Les précipitations annuelles varient de 200 à 300 mm. La moyenne annuelle des précipitation pour la wilaya de M'Sila calculée entre la période 1996-2005 est d'environ 216 mm. Le mois le plus pluvieux est le mois de septembre avec une moyenne annuelle de 33 mm. Par opposition, le mois de juillet est le mois le plus sec avec une moyenne annuelle de 2 mm (ONM, 2007).

La moyenne des températures annuelles est relativement élevée et se situe entre 17.5°C et 18.2°C (F.A.O., 1975). Pour la station de M'Sila, juillet est le mois le plus chaud (32°C en moyenne) et janvier est le plus froid (8.5°C en moyenne) (ONM, 2007).

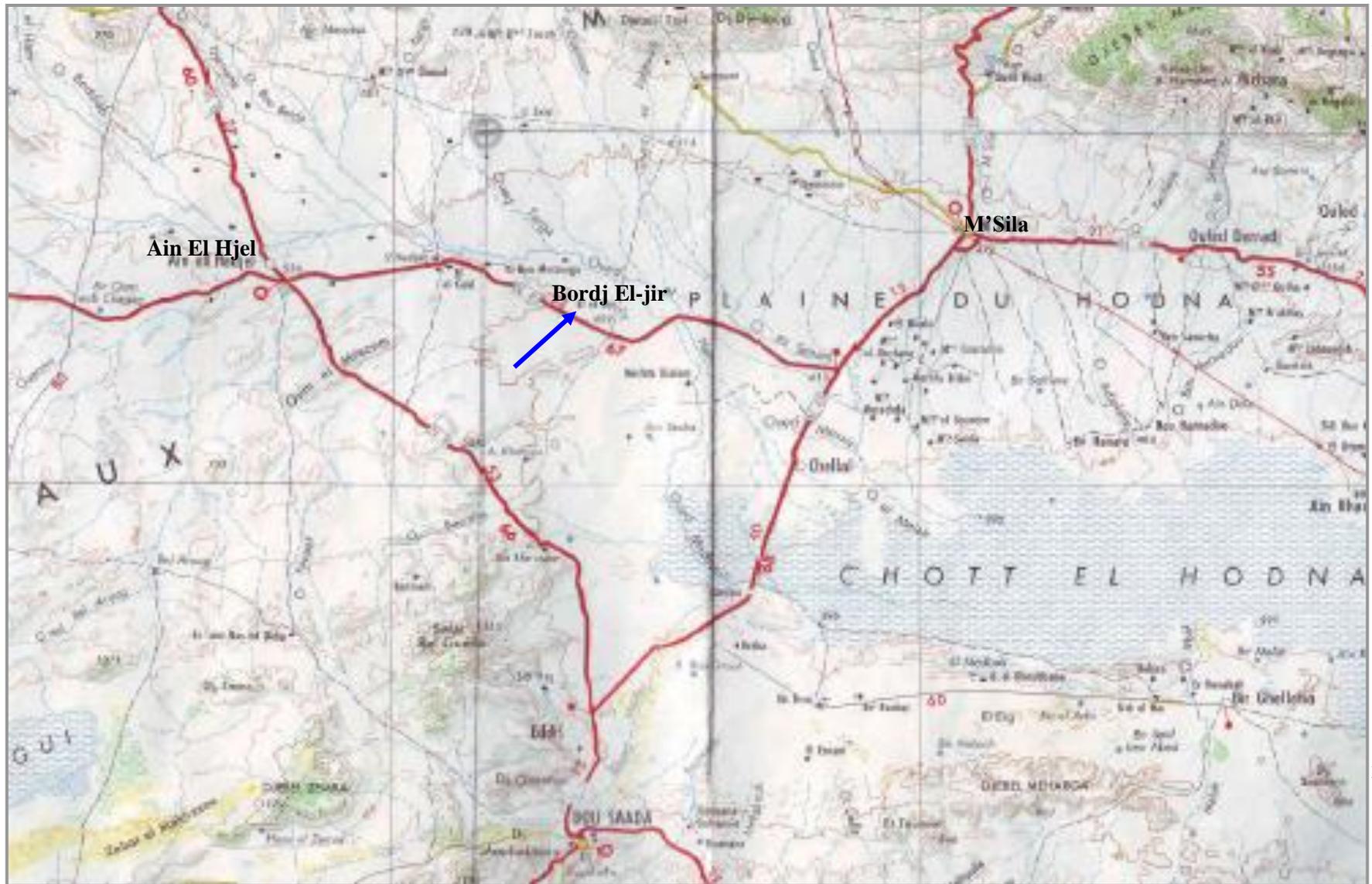
L'évapotranspiration potentielle est entre 1240 et 1290 mm/an. Le calcul de l'ETP d'après la formule de Turc donne une valeur de 1290 mm/an pour M'Sila (F.A.O., 1974).

Le climat de la région d'étude est classé (méthode d'Emberger) dans l'aride moyen (sub-aride) caractérisé par des précipitations variant de 200 à 300 mm par an et un nombre de mois sec oscillant entre 5 et 9 (F.A.O., 1974).

La végétation caractéristique de la zone est représentée par des groupements calcicoles à Alfa et Armoise (*Stipa tenacissima* et *Artemisia herba alba*), des groupements gypso-calciphiles (*Anabasis oropediorum*), des groupements limono-gypso-haloclines (*Atriplex glauca*, *Moricandia arvensis* et *Salsola vermiculata*) et des groupements marno-gypso-haloclines (*Lygeum spartum* et *Astragalus armatus*) (F.A.O., 1974).

Les sols sont représentés par des sols peu évolués à texture lourde, calcaire, avec des caractères gypso-salins plus ou moins accentués développés à partir d'alluvions de marnes (F.A.O., 1974).

X= 3° 34'
Y= 35° 52'



X= 4° 56'
Y= 35° 52'

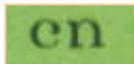
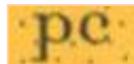


X= 3° 34'
Y= 35° 9'

X= 4° 56'
Y= 35° 9'

Figure 07 : Extrait de la carte topographique de Biskra au 1/500 000 ème (I.N.C.T., 1960)

Légende

-  Alluvions actuelles : lacs, marécages, dayas, chotts, sebkha, limons et croûtes gypso-salines.
-  Crétacé moyen (marin ou lagunaire) Cénomaniens.
-  Pliocène continental : poudingues, calcaires lacustres.
-  Dunes récentes.
-  Crétacé inférieur (faciès continentaux ou lagunaires).

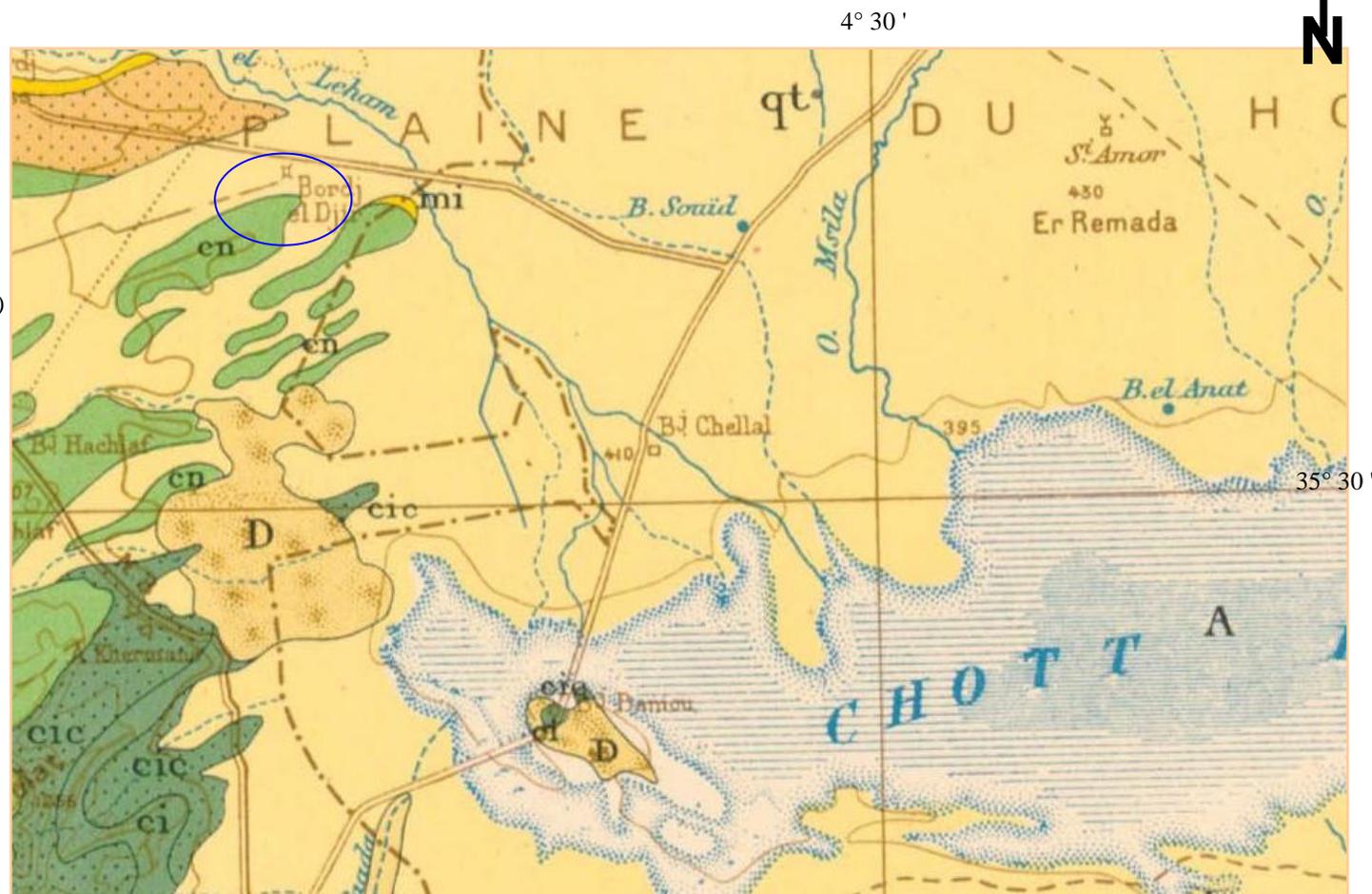


Figure 08 : Extrait de la carte géologique de l'Algérie au 1/500 000 ème

2. Méthodes d'étude

L'étude porte sur la caractérisation et la détermination des gypsisols références en Algérie. En premier lieu, elle est menée à l'échelle locale dans la zone de « Bordj El-Jir » dans la wilaya de M'Sila où les profils qui ont fait l'objet de l'étude sont décrits (description morphologique et analytique) et classés dans le système de classification choisi (WRB, 2006). L'objectif ici est de déterminer les gypsisols références qui caractérisent la zone d'étude. Par la suite, l'étude a pris un contexte plus vaste à l'échelle de l'Algérie. Il s'agit en fait de l'exploitation d'une base de données relative aux gypsisols d'Algérie. Pour cela, les données de la base sont traitées, classées et représentés dans l'espace géographique algérien.

Etude à l'échelle locale

Cette partie de la recherche vise essentiellement la détermination des gypsisols références dans la zone d'étude. Pour cela, nous avons d'abord réalisé une prospection de terrain qui a permis de localiser les profils à étudier. Par la suite, nous avons décrit les profils, prélevé des échantillons de chaque horizon et réalisé des analyses au laboratoire. En fin, les résultats obtenus ont été traités et interprétés.

Caractérisation morphologique

Avant la description des profils et le prélèvement des échantillons de sols, nous avons d'abord caractérisé le milieu environnant (végétation, physiographie, charge caillouteuse de la surface, couleur du terrain et autres caractéristiques). Les profils géoréférenciés au préalable ont été ensuite creusés (les profondeurs des profils étudiés dépassent les 100 cm), décrits au détail et échantillonnées.

Cette prospection a permis de retenir 4 profils (P1, P2, P3 et P4) le long d'une pente sur une miniséquence et un 5ème profil qui se situe sur un sommet à environ 06 km de la séquence étudiée (figures 09 et 10). Vingt-six (26) échantillons ont été prélevés et analysés au niveaux des laboratoires de l'ENSA (département de science du sol) et de l'INRAA (station de Mahdi Bouâalam).

X= 4°10'39,60"
Y= 35°38'57,92"

X= 4°16'10,52"
Y= 35°38'57,92"



X= 4°10'39,60"
Y= 35°35'24,41"

X= 4°16'10,52"
Y= 35°35'24,41"

Figure 09 : Emplacement des profils étudiés

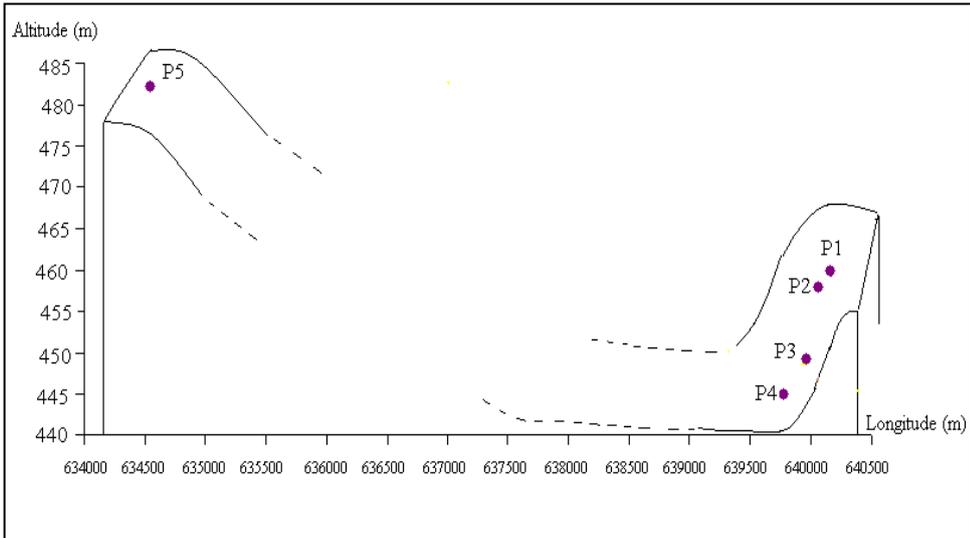


Figure 10 : Emplacement des profils étudiés en fonction de la pente

Méthodes d'analyse

Les échantillons de sol prélevés ont été séchés à l'air libre, broyés et tamisés à 2 mm. Par la suite, nous avons calculé le pourcentage des éléments grossiers (diamètre supérieur à 2 mm) pour chaque échantillon de sol. Les analyses effectuées sont représentées dans le tableau XI.

Tableau XI : Méthodes et principes des différentes analyses de sol

Types d'analyse	Méthodes et principes
1. pH	Méthode potentiométrique au pH-mètre : avec un rapport sol/eau égal à 1/2,5.
2. Taux d'humidité	Méthode Vieuillefon (1979) : passage des échantillons à l'étuve dans une étuve ventilée à une température de 68°C.
3. Calcaire total	Méthode volumétrique au calcimètre de Brnard.
4. Carbone organique total	Méthode Walkly-Black (1934) : oxydation à froid par une solution de bichromate de potassium qui se trouve en excès.
5. Azote total	Méthode Kjeldhal : fixation de l'azote ammoniacal par l'acide sulfurique sous forme de sulfate d'ammonium.
6. CE et bilan ionique	<p><u>La CE</u> : lecture de l'extrait de pâte saturée par un conductivimètre.</p> <p><u>Les anions</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Les chlorures (Cl⁻) : méthode de Mohr (méthode argentimétrique). - Les sulfates (SO₄²⁻) : méthode turbidimétrique au glycérol. Les sulfates précipités sous forme de sulfate de baryum sont dosés par colorimétrie. - Les carbonate (CO₃²⁻) et bicarbonates (HCO₃⁻) : méthode à l'acide sulfurique en présence d'indicateurs colorés (le phénolphtaleine pour les carbonates et le rouge de méthyle orange pour les bicarbonates). <p><u>Les cations</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Le Na⁺ et K⁺ : dosage par spectrophotomètre à flamme. - Le Mg⁺⁺ et Ca⁺⁺ sont dosés par spectrophotométrie à absorption atomique.
7. Gypse	Méthode gravimétrique (Coutinet, 1965) : attaque du gypse par une solution de carbonate d'ammonium. Les sulfates qui en résultent sont précipités par une solution de chlorure de baryum sous forme de sulfate de baryum.
8. CEC et bases échangeables	<p><u>La CEC</u> : méthode Bower : à l'acétate de sodium à pH 8,2</p> <ul style="list-style-type: none"> - Saturation : par une solution d'acétate de sodium (pH 8,2). - Lavage : par l'éthanol - Déplacement : par une solution de d'acétate d'ammonium tamponnée à pH 7. <p><u>Les bases échangeables</u> : déplacement avec une solution d'acétate d'ammonium à pH 7.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Na⁺ et K⁺ : lectures par spectrophotomètre à flamme. - La somme de Mg⁺⁺ et Ca⁺⁺ : obtenus par différence par rapport à la CEC.
9. Granulométrie	<p><u>Horizons de surface</u> : méthode internationale à la pipette de Robinson</p> <p><u>Encroûtements gypseux</u> : tamisage à sec pour obtenir les fractions sable grossier, sable fin et la somme des argiles et des limons.</p>
10. Conductivité hydraulique	Mesure de l'écoulement de l'eau à charge constante à travers une colonne de terre dans des tubes de percolation de 30 mm de diamètre et 13 cm de hauteur.
11. Capacité de rétention en eau	Sur des échantillons de sol remaniés, la teneur en eau est obtenue aux points de pF0, pF1.6, pF2.5, pF3.54 et pF4.2
12. Stabilité structurale	Méthode Hénin : traitement des échantillons de sol vis-à-vis l'action de l'eau, l'alcool et le benzène.

Pour chaque analyse du sol, nous avons effectué deux répétitions (exception faite pour l'analyse de la capacité de rétention en eau et la l'analyse de la granulométrie où le nombre de répétition est de 3).

Aussi, pour quelques traitements, nous nous sommes limités aux horizons de surface, c'est-à-dire les horizons A1 et A2 des profils P1 et P5 et les horizons A des profils P2, P3 et P4. Il s'agit du dosage de la matière organique, de l'azote total, la CEC et les bases échangeables et la stabilité structurale. Le choix des horizons de surface pour ces analyses par rapport aux horizons de sub-surface et de profondeur représentés par les encroûtements gypseux est justifié soit par le fait que l'analyse n'apporte pas d'information significative si elle a été faite sur les encroûtements gypseux (cas du dosage de la matière organique et l'azote total qui donnent un aperçu sur l'état de dégradation de la matière organique et de sa fertilité chimique. De même, pour l'indice de stabilité structurale qui fait ressortir l'action de l'eau, cause majeur de la détérioration de la structure de la partie superficielle du sol), soit à cause des fortes teneurs en gypse qui caractérisent les encroûtements gypseux (cas de la CEC effectuée seulement pour les horizons de surface puisque les teneurs très élevées en gypse au niveau de ces horizons rendent difficile, voire impossible, la détermination de la CEC avec n'importe quelle méthode d'analyse. La CEC sera toujours sous-estimée du fait que l'ion calcium qui est très abondant dans le sol rentre en compétition avec l'ion saturant). En ce qui concerne les bases échangeables, la lecture des ions calcium (Ca^{++}) et magnésium (Mg^{++}) par spectrophotomètre à absorption atomique nous donnait des résultats tantôt trop surestimés, tantôt trop sous estimés comparativement aux valeurs de la CEC malgré le nombre de répétitions et le nombre de dilutions faites sur nos échantillons de sol. Nous avons donc supposé que la somme des cations échangeables été égale à la valeur de la CEC et que la somme de Ca^{++} et Mg^{++} échangeables est obtenue par différence par rapport à la CEC.

Nous avons aussi testé la méthode de Pouget (1968) où les taux de gypse sont obtenus après passage des échantillons de sol à des températures de séchage différentes. D'abord, à 68°C jusqu'à obtention de poids constant. Puis, à la température de 105°C jusqu'à obtention de poids constant. La différence entre les deux taux d'humidité représente le 1/5 du taux de gypse présent dans l'échantillon de sol. On note que les teneurs en gypse qui sont prises en considération dans tous les traitements statistiques, interprétations pédologiques et notamment dans la classification des sols, sont celles de la méthode gravimétrique (méthode Coutinet, 1965).

La séparation des différentes fractions granulométriques du sol des encroûtements gypseux ne peut pas se faire avec la méthode classique à la pipette de Robinson, puisque les teneurs très élevées en gypse influencent les principes dont reposent la granulométrie (problèmes liés à la floculation, au poids spécifique et aux propriétés thermiques du gypse). Pour cela, nous nous sommes limité à une séparation à sec de l'échantillon de sol. On obtient la fraction de sable grossier, sable fin et la somme des argiles et des limons.

Traitements des données

A partir des résultats morphologiques et analytiques obtenus, nous avons classées les profils étudiés dans le système de classification WRB (2006). Puis, les données relatives aux taux de gypse ont subi une série de traitements statistiques avec les logiciels « Excel » et « Origin 5.0 » à un niveau de confiance de 95 %.

Les types de traitements sont les suivants :

- Statistiques descriptives.
- Comparaison des moyennes.
- Corrélations.

➤ Statistiques descriptives

Elles permettent de déterminer la variabilité du paramètre étudié (le taux de gypse) dans le profil pour l'ensemble des horizons étudiés ainsi que pour chaque catégorie d'horizons. Le coefficient de variation (CV) est utilisé pour quantifier cette variabilité (Douaoui, 1993). Les valeurs du coefficient de variation sont comparées aux normes d'interprétation, donnant ainsi cinq classes de variabilité (tableau I., annexe 2).

➤ Comparaison des moyennes

La comparaison des moyennes d'un paramètre donné pris deux à deux (t-test) est réalisée par le test de Student avec le logiciel « Origin 5.0 ». Ce test a pour but d'évaluer statistiquement les différences des valeurs d'une variable donnée pris deux à deux. Ce test consiste à chercher si les échantillons à étudier appartiennent à la même population (différence non significative) ou non (différence significative) (Berkal, 2006).

➤ Relations entre les taux de gypse et les autres paramètres du sol

Il s'agit de faire des corrélations qui consistent à l'établissement d'un model mathématique (régression) reliant une variable aléatoire Y (à expliquer) à K variables (K≥1) (explicatives) aléatoires ou non. Ce model étant construit pour prédire ultérieurement la variable à expliquer (Tranchefort, 1974). Les corrélations étudiées entre les taux de gypse et les autres paramètres concernent tous les paramètres du sol qui constituent avec la teneur en gypse un nombre de couple d'échantillons égale à vingt-six (26). Ceci veut dire que l'étude de la corrélation teneur en gypse – teneur en calcaire total, pris comme exemple, implique que l'analyse du calcaire total est faite sur l'ensembles des échantillons étudiés. Ainsi, les corrélations qui n'ont pas été faites sont celles qui constituent 07 couples d'échantillons avec les teneurs en gypse (analyses réalisées uniquement sur les horizons de surface). Les corrélations sont prises dans une première approche dans leurs globalité, puis elles sont divisées en horizons de surfaces (faibles teneurs en gypse) et horizons représentant les encroûtements gypseux (horizons de sub-surface et de profondeur ayant des teneurs très fortes en gypse).

Pour chaque corrélation étudiée, le taux de gypse représente la variable indépendante, tandis que le reste des paramètres constituent les variables dépendantes. Autrement dit, les corrélations étudient l'effet des teneurs en gypse sur les autres paramètres du sol. L'ajustement choisi pour l'ensemble des corrélations est un ajustement linéaire. Ainsi, les corrélations sont de type :

$$Y = ax + b$$

Avec :

X : teneurs en gypse (%).

Y : variables dépendantes.

Etude à l'échelle de l'Algérie

Le deuxième volet de ce travail concerne l'étude des gypsisols à l'échelle de l'Algérie. Pour cela, une base de données relative aux sols gypseux d'Algérie est utilisée. Cette base dont le gypse est le facteur discriminant a déjà fait l'objet d'une étude de valorisation (Ouamer-Ali, 2009). Elle est constituée de 35 études pédologiques, 206 profils et 904 horizons.

L'information dans la base est saisie à l'aide du tableur « Excel » et les données sont partagées en deux (02) blocs d'information :

- un bloc de données quantitatives : il s'agit des données analytiques dont l'information est présentée par une donnée numérique tel que le pH et le taux de gypse.
- un bloc de données qualitatives : ici, l'information est donnée en décrivant la variable elle-même tel que la texture et la forme d'accumulation du gypse.

Les études consultées pour la réalisation de la base ont été retirées à partir des services du département sol de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H.), le département de science du sol de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique (E.N.S.A. ex I.N.A.) et le département de science de la terre de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (U.S.T.H.B.).

Les données acquises dans la base sont les suivantes :

- Les coordonnées des profils et la localisation des études.
- La hauteur annuelle moyenne de pluies.
- L'épaisseur des horizons.
- Les données morphologiques suivantes : forme d'accumulation du gypse, texture, structure, couleur, test HCl, humidité, porosité, nature de la matière organique, friabilité, compacité, plasticité et autres caractéristiques.
- Les données analytiques suivantes :

- ❖ Granulométrie (taux d'argile, de limon et de sable),
- ❖ capacité d'échange cationique (CEC) et les bases échangeables,
- ❖ calcaire total,
- ❖ taux de gypse,
- ❖ conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée et le bilan ionique,
- ❖ pH du sol,
- ❖ taux de matière organique,
- ❖ azote total,
- ❖ le taux de sodium échangeable (ESP),
- ❖ le SAR,
- ❖ les taux d'humidité aux pF2.5 et pF4.2,
- ❖ l'indice de stabilité structurale,
- ❖ la perméabilité hydraulique (K hennin) et
- ❖ la densité réelle et la densité apparente.

Prétraitements de la base de données originale

Avant d'utiliser la base de données telle quelle, il est utile de rappeler que les gypsisols sont des sols qui répondent à un certains nombres de critères. La dernière version de la WRB (2006) exige la présence de l'un des horizons diagnostiques suivant : un horizon diagnostique gypsique ou un horizon diagnostique pétrogypsique à condition que le sol ne soit ni un histosols, ni un anthrosols, ni un technosols, ni un cryosols, ni un leptosols, ni un vertisols, ni un fluvisols, ni un solonetz, ni un solonchaks, ni un gleysols, ni un andosols, ni un podzols, ni un plinthosols, ni un nitisols, ni un ferralsols, ni un planosols, ni un stagnosols, ni un chernozems, ni un Kastanozems, ni un phaeozems. Pour cela, un prétraitement de la base s'avère indispensable. Il s'agit d'une opération qui consiste à faire ressortir tous les gypsisols de la base de données originale, car les 206 profils de la base ne répondent pas tous aux conditions exigées par la WRB (2006).

Pour ce faire, des colonnes ont été ajoutées au niveau de la base pour faciliter le tri des profils. Ces colonnes sont relatives à l'épaisseur de chaque horizon du profil, du numéro de profil et du produit taux de gypse par l'épaisseur de l'horizon. Avec l'aide de l'option « Filtre », 73 profils gypsisols sont recensés, le reste étant considéré comme des sols gypseux et non des gypsisols dans le sens de la WRB.

Traitements de la base de données

Les traitements proprement dits de la base de données concernent en premier lieu l'étude statistique de la variable taux de gypse selon différentes approches. Puis, la représentation géographique des gypsisols de la base. Enfin, la détermination des principaux gypsisols références de la base de données et qui sont par la suite regroupés selon des critères de différenciation dans un schéma pyramidal organisé.

➤ Analyses statistiques de la variable taux de gypse

Après avoir calculé le taux de remplissage pour l'ensemble des variables qui constituent la base de données (on note que l'absence de l'information pour une variable donnée n'est pas mentionnée comme nulle), nous nous sommes intéressés aux variables qui définissent les horizons diagnostiques des gypsisols selon la WRB (2006), à savoir le taux de gypse et l'épaisseur de chaque horizon diagnostique. Les études statistiques sont faites grâce au logiciel « Excel » avec un niveau de confiance de 95 %.

Ces analyses statistiques sont faites selon deux approches différentes. La première approche (approche globale) concerne tous les horizons de la base de données qui contiennent une information sur le taux de gypse. Pour cela, les horizons sont pris soit tous ensembles, soit par catégories d'horizons, c'est-à-dire H1, H2 et Hp. La deuxième approche (approche par horizons diagnostiques) est relative aux horizons diagnostiques gypsiques. Pour la deuxième approche, la variable taux de gypse et l'épaisseur sont traitées pour l'ensemble des horizons diagnostiques gypsiques ainsi que pour chaque catégorie d'horizons (H1, H2 et Hp).

Pour les deux approches, les horizons H1 constituent les horizons de surface (premier horizon de chaque profil), les horizons H2 sont les horizons de sub-surface (deuxième horizon de chaque profil) et les Hp sont les horizons de profondeur (à partir du troisième horizon de chaque profil).

➤ Spatialisation des profils étudiés de la base de données

Les 73 profils étudiés sont projetés sur la carte d'Algérie qui constitue le support Comgéo (I.N.C.T., 2000) dont les coordonnées des limites géographiques sont connues. La localisation est effectuée avec l'aide du logiciel « MapInfo 7.0 ». Pour cela, tous les profils étudiés ont été préalablement géoréférencés dans le même système de projection. Les systèmes de projections utilisés sont le système UTM (Universal Transverse Mercator) et le système Lambert Algérie.

➤ **Profils références et établissement du schéma d'organisation général**

L'identification des gypsisols références d'Algérie et la réalisation d'un schéma organisé qui les regroupe a nécessité plusieurs étapes :

- Classification des sols de la base de données : Cette classification a aboutit a la reconnaissance des différents gypsisols références qui constituent la base de données.
- Détermination de la structure générale qui rentre dans la dénomination des sols classés car, c'est à partir du nom de chaque profil classé que des regroupements sont effectués au sein d'un schéma général hiérarchisé. Les qualificatifs utilisés dans la classification, notamment les préfixes, vont servir de critères de différenciation entre les sols références. Nous avons désignés les préfixes comme critères de différenciation (par rapport aux suffixes) par la simple raison que la classification utilisée emploie en premier les préfixes quand l'échelle est petite. Avec l'augmentant de l'échelle, la classification devient plus précise et l'utilisation des suffixes à ce niveau sera recommandée.
- Etablissement d'un schéma général dont les gypsisols références ayant des caractères en communs sont regroupés dans un ensemble de sols références dénommé grande référence. Les regroupements sont faits en se basant sur les préfixes ayant des taux de présence les plus important.

Une fois que les sols sont structurés dans ce diagramme pyramidal, les grandes références recensées sont représentées dans une carte d'Algérie de la même façon que la représentation des différents profils étudiés afin de voir dans quelle mesure leur distribution est tributaire de l'espace géographique algérien.

CHAPITRE III : Résultats et discussions

1. Caractérisation morpho-analytique

Pour étudier les gypsisols références de la zone d'étude, nous présentons dans un premier temps les caractéristiques morphologiques des profils (caractères généraux et description détaillée de chaque profil) et les résultats analytiques des vingt-six (26) échantillons prélevés. Cette présentation des différents résultats sera ensuite suivie par la classification des 05 profils dans la Base de Référence Mondiale pour les ressources en sols (WRB, 2006), la classification française (CPCS, 1967) et la classification américaine (USDA, 1999). Nous terminerons ensuite cette étude par des traitements statistiques relatifs à la variable taux de gypse.

1.1. Description des profils étudiés

1.1.1. Profil 01 (P1)

1.1.1.1. Caractères généraux

- Date de description : 03-11-2008.
- Les coordonnées du profil sont les suivantes :

Longitude est : 4° 14' 51.0"

Latitude nord : 35° 36' 56.4"

Altitude : 460 m

- Terrain à proximité d'une carrière de gypse.
- Végétation à base d'armoïse (*Artémisia herba alba*) (photo 03).
- Pièrosité de surface est estimée à plus de 50 % (photo 04), constituée essentiellement de pierres, cailloux et blocs de forme généralement arrondie.
- La pente est d'environ de 3 à 4 %.
- La couleur du terrain est en général claire.



Photo 03 : végétation caractéristique de P1



Photo 04 : Aspect de surface caractéristique de P1

- Les éléments grossiers sont agglomérés formant une roche qui ressemble au poudingue. A l'intérieur de la roche, on note la présence de cristaux de gypse (Photo 05). Les éléments grossiers sont cimentés par du calcaire (effervescence à l'HCl), ce qui fait penser qu'on est en présence d'une ancienne dalle Nougá (les éléments grossiers sont cimentés par du calcaire).

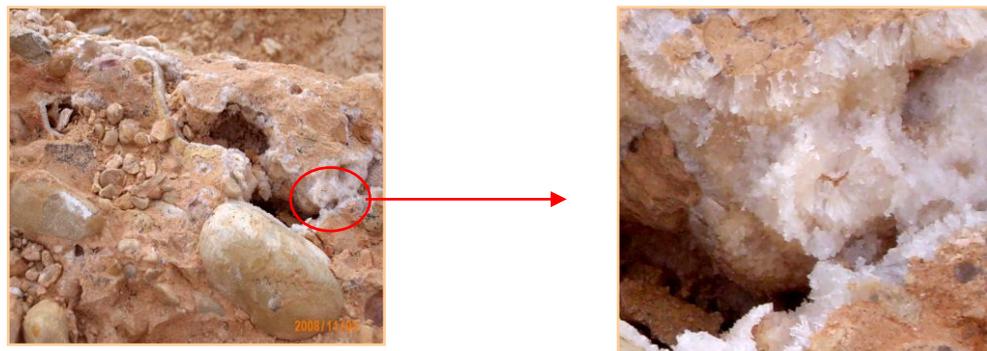


Photo 05 : Poudingues et cristaux de gypse agrandis

1.1.1.2. Description morphologique du profil P1

A1 : (0 – 17 cm) ; horizon A de surface ; frais ; couleur à l'état humide 7.5 YR 6/4 ; texture sablo-argileuse ; structure polyédrique sub-angulaire peu nette ; poreux ; fragile ; meuble ; apparemment organique (présence de quelques racines mortes d'armoise) ; faible activité biologique ; quelques racines vivantes ; pas d'éléments grossiers ; absence de taches ; vive effervescence à l'HCl ; transition régulière et progressive.

A2 : (17 – 35 cm) ; deuxième horizon A de surface ; frais ; couleur à l'état humide 7.5 YR 7/6 ; plus claire que le précédent à l'état frais ; texture limoneuse ; structure polyédrique sub-angulaire peu nette ; poreux ; fragile ; peu compact ; apparemment organique (présence de quelques racines mortes) ; pas de traces d'activité biologique ; pas d'éléments grossiers ; absence de taches ; vive effervescence à l'HCl ; transition brutale et nette.

Bym1 : (35 – 60 cm) ; encroûtement gypseux ; frais ; couleur à l'état humide 7.5 YR8/6 ; à l'état frais la couleur est blanchâtre ; texture sableuse ; structure massive à éclats anguleux ; très poreux ; compact et très dure ; apparemment non organique ; pas de traces d'activité biologique ; pas d'éléments grossiers ; vive effervescence à l'HCl ; absence de taches ; transition régulière et progressive.

Bym2 : (60 – 110) ; encroûtement gypseux ; sec ; couleur à l'état humide 7.5YR7/8 ; texture sableuse ; structure massive à éclats anguleux ; peu poreux ; dur ; moins compact que l'horizon sus-jacent ; s'effrite assez difficilement à la main (peu fragile) ; apparemment non organique ; pas de traces d'activité biologique ; présence d'éléments grossiers de forme sub-angulaire et de taille variable (de 2 à 6 cm) ; vive effervescence à l'HCl ; pas de taches ; transition progressive.

Bym3 : (> 110) ; encroûtement gypseux ; frais ; couleur à l'état humide 7.5YR7/9 ; texture sablo-limoneuse ; structure massive à éclats anguleux ; pas de pores visibles ; compact ; peu fragile (s'effrite difficilement à la mains) ; très dur ; massif ; apparemment non organique ; pas de traces d'activité biologique ; il se distingue par rapport à l'horizon sus-jacent par sa richesse en éléments grossiers de tailles variables et de formes arrondies ; vive effervescence à l'HCl ; le gypse se présente sous forme de pseudomycéliums.



Photo 06 : Profil P1

1.1.1.3. Principales caractéristiques morphologiques de P1

Le profil P1 se caractérise du point de vue morphologique par cinq horizons distincts. Sur les 35 premiers centimètres de la surface, on trouve les deux premiers horizons qui paraissent visuellement presque identiques. Ils sont frais, fragiles, meubles, poreux, de couleur sombre à l'état frais avec une vive effervescence à l'HCl et paraissent organiques. Ces horizons surmontent une accumulation gypseuse sur une profondeur de plus de 75 cm dont la limite est brutale et très nette. Cette accumulation se subdivise en trois horizons représentant les encroûtements gypseux. Ces derniers sont de couleur nettement plus claire que les horizons de surface (à l'état frais). Ils sont aussi compacts, non à peu fragiles, moins poreux et non organique comparativement aux deux premiers horizons de surface. A la base du profil, le gypse s'individualise sous forme de pseudomycéliums.

1.1.1.4. Données des analyses au laboratoire

Les données analytiques du profil P1 sont représentées dans le tableau XII. Ce tableau montre que le pH du sol est légèrement à moyennement alcalin. Au niveau des horizons de surface (A1 et A2), les valeurs dépassent 8. Au niveau des encroûtements gypseux, le pH diminue jusqu'à un minimum de 7.93 pour le dernier horizon Bym3.

Si nous considérons que l'optimum en matière organique d'un sol doit être au moins supérieur au dixième (1/10) de la teneur en argile, le premier horizon contient presque une quantité optimale contrairement à l'horizon A2 qui est pauvre en matière organique. Aussi, les teneurs en azote total sont faibles dans A1 et A2.

Les teneurs en calcaire total sont faibles à moyennes et varient de 9 à 23 % (tableau II., annexe 2, tableau II). On remarque qu'il y a une rupture des valeurs entre le deuxième et le troisième horizon (A2 et Bym1) où le contenu en calcaire total passent brutalement de 23 % à 9 %. Ce sont des valeurs présentant le maximum et le minimum dans ce profil.

Selon les normes de l'USDA (1954) (tableau III., annexe 2), l'horizon A1 est non salé ($CE < 2$ dS/m). Les horizons A2 et Bym1 sont légèrement salés. Les deux derniers horizons (Bym2 et Bym3) sont salés. Le faciès chimique de la solution du sol est de type sulfato-calcique pour Bym2 et sulfato-sodique pour Bym3.

La texture est sablo-limoneuse et limoneuse respectivement pour les horizons A1 et A2. Les trois derniers horizons ont des teneurs en sable supérieures à 70 % (70.5 %, 80 % et 82 % pour Bym1, Bym2 et Bym3). C'est une texture grossière qui coïncide avec les teneurs très élevées en gypse.

Tableau XII : Données analytiques du profil P1

Horizons		A1	A2	Bym1	Bym2	Bym3	
Profondeurs (cm)		0-17	17-35	35-60	60-110	>110	
Eléments grossiers (%)		17,35	20,06	23,99	47,29	54,01	
Taux d'humidité à 68°C		2,32	2,69	2,22	1,7	2,38	
Taux d'humidité à 105°C		3,08	3,4	15,09	13,18	10,73	
Gypse (%) calculé d'après l'humidité à 68 et 105°C		3,8	3,55	64,35	57,4	41,75	
pH eau		8,37	8,16	7,97	7,95	7,93	
Gypse (%)		2,03	1,77	57,87	51,61	36,46	
Calcaire (%)		13,25	23,5	9,12	11,25	15,83	
Matière organique (%)		1,14	0,95	/	/	/	
Azote total (%)		0,077	0,078	/	/	/	
CEC (cmol+/kg sol)		13,12	12,89	/	/	/	
Cations échangeables (Cmol+/kg sol)	K+	0,11	0,15	/	/	/	
	Na+	0,25	0,15	/	/	/	
	(Ca ⁺⁺ + Mg ⁺⁺)	12,76	12,59	/	/	/	
Conductivité électrique (dS/m)		1,36	2,67	3,08	6,04	7,71	
Bilan ionique (meq/l)	Anions	SO ₄ ⁼	17,3	33,45	33,63	36,24	48,28
		HCO ₃ ⁻	1,17	3	4,75	3	3,5
		Cl ⁻	3,85	5,5	6,5	22,5	38,25
	Σanions		22,32	41,95	44,88	61,74	90,03
	Cations	Ca ⁺⁺	25,2	37	39,4	51,4	42,4
		K ⁺	0,35	0,21	0,21	0,37	0,31
		Na ⁺	1,21	2,13	4,22	15,54	43,12
		Mg ⁺⁺	0,48	0,47	0,72	1,35	1,88
Σcations		27,24	39,81	44,55	68,66	87,71	
Granulométrie (%)	A	14,76	21,51	29,34	19,49	16,5	
	LF	12,51	29,51				
	LG	4,51	6,75				
	SF	41,71	25,62	27,8	25,31	23,88	
	SG	22,75	12,39	42,7	54,84	59,1	
Classes texturales (U.S.D.A., 1986)		SL	L	/	/	/	
pF	0	48,48	52,58	46,71	50,9	48,55	
	1,6	33,46	36,62	29,95	33,07	31,46	
	2,5	23,65	29,3	21,64	20,71	26,63	
	3,54	19,28	22,96	19,39	17,2	11,46	
	4,2	16,26	20,48	15,73	14,33	9,19	
Conductivité hydraulique K (cm/h)		5,91	4,1	2,13	5,24	4,24	
Indice d'instabilité structurale (Is)		2,69	3,09	/	/	/	

D'après Barazanji (1973), les taux de gypse sont dans les horizons A1 et A2 faibles (teneurs comprises entre 0,3 et 10 %), tandis que le reste des horizons est extrêmement gypseux (teneurs supérieures à 50 %). En se basant sur les critères de détermination des gypsisols établies par la WRB (2006), le sol possède deux horizons diagnostiques gypsiques. Il s'agit des horizons Bym2 et Bym3.

Comparativement aux valeurs de gypse trouvées par la méthode gravimétrique (Coutinet, 1965), celles du calcul après passage à l'étuve aux températures de 68°C et 105°C (Pouget, 1968) sont légèrement supérieures. Ceci supposerait la présence d'autres composés chimiques hydratés associés au gypse. La comparaison des teneurs de gypse des deux méthodes (t-test) montre que la différence est non significative (tableau XIII) que ce soit pour chaque profil ou pour l'ensemble des profils étudiés.

Tableau XIII : Comparaison des teneurs en gypse des deux méthodes pour chaque profil et pour l'ensemble des 05 profils étudiés

Approche selon la méthode et les profils	p	t-calculé	Signification
Pouget P1/ Coutinet P1	1	0	NS
Pouget P2 / Coutinet P2	1	0	NS
Pouget P3 / Coutinet P3	1	0	NS
Pouget P4 / Coutinet P4	1	0	NS
Pouget P5 / Coutinet P5	0,7	0,399	NS
Pouget / Coutinet (ensemble des profils)	0,345	0,953	NS

NS = non significative

La capacité d'échange cationique est moyenne. Elle est de l'ordre de 13 Cmol+/kg sol en A1 et 12 Cmol+/Kg sol en A2. Il ne serait pas possible de trouver une éventuelle relation qui pourrait exister entre les valeurs de la CEC et celles des teneurs en gypse car ces dernières sont faibles et évoluent dans une gamme restreinte pour les horizons de surface.

Les teneurs en eaux aux différentes pressions sont représentées dans la figure 11. A première vue, l'écart entre les cinq horizons est relativement faible. Les courbes montrent aussi qu'il y a une chute d'humidité importante pour tous les horizons entre les pF0 et pF2,5. Cette chute est en moyenne de 25 % d'eau pour l'ensemble des horizons. Par la suite, la chute est de moindre importance entre les pF2,5 et pF4,2 (exception faite pour l'horizon Bym3). La réserve utile est de 9 % d'eau en moyenne. De plus, l'horizon A2 est l'horizon qui retient le plus d'eau aux différentes valeurs de pF. Cet horizon est un horizon de surface dont la teneur en gypse et en MO sont faibles et le taux d'argile est 21 %. La teneur en argile serait donc à l'origine de cette relative grande rétention en eau pour cet horizon. En général, le profil présente une capacité de rétention de l'eau très élevée de l'ordre de 50 %, à saturation. Par la suite, cette teneur diminue à environ 25 % d'humidité de façon presque homogène entre les différents horizons du profil. La teneur en eau à pF4,2 reste élevée et varie de 20 % pour l'horizon A2 de surface à environ 10 % pour l'encroûtement gypseux Bym3.

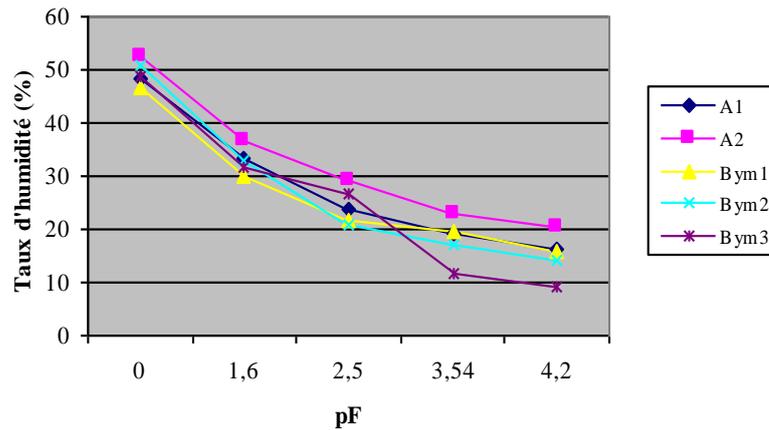


Figure 11 : Courbe pF du profil P1

Les indices de perméabilité montrent que la vitesse d'infiltration de l'eau (coefficient K) est moyenne (tableau IV., annexe 2) pour tout le profil. En combinant les résultats relatifs à la perméabilité et à la stabilité structurale, l'évaluation de la stabilité structurale est faite en se basant sur une équation de droite qui lie les deux paramètres. La stabilité est excellente pour les horizons de surface A1 et A2.

1.1.1.5. Caractéristiques synthétiques du profil P1

Sur le plan morphologique, le profil P1 est un profil constitué de deux principales couches de sol. Une première couche qui s'étend sur les 35 premiers centimètres du sol, constituée de deux horizons. C'est deux horizons sont friables, légèrement organiques, de couleur sombre (à l'état frais) et meubles. Juste en dessous, se trouve une accumulation gypseuse sur plus de 75 cm d'épaisseur. C'est un encroûtement gypseux subdivisé en trois horizons nettement plus clair à l'état frais que les deux premiers horizons de surface, dur, compact, moins poreux, peu à non fragile et apparemment non organique. Le gypse s'individualise à la base du profil sous forme de nodules et de pseudomycéliums.

Les analyses montrent que le profil est légèrement à moyennement alcalin, mieux pourvu en matière organique en A1 que A2 et pauvre en azote total. Elles sont moyennes dans l'ensemble (14 % en moyenne de calcaire total). Les teneurs en calcaire total sont inversement proportionnelles aux taux de gypse qui sont faibles en surface (environ 2 % de gypse) et extrêmement forts pour les encroûtements gypseux (les teneurs en gypse passent de 57 à 36 % du premier au dernier encroûtement gypseux du profil). La salinité augmente avec la profondeur, elle passe de 1.36 dS/m dans l'horizon A1 jusqu'à 7.71 dS/m dans l'horizon Bym3. Le faciès chimique de la solution du sol est de type sulfato-calcique pour Bym2 et sulfato-sodique pour Bym3. La capacité d'échange cationique est moyenne et presque identique dans les horizons de surface (13 Cmol+/kg sol en moyenne). La texture est sablo-limoneuse et limoneuse pour les horizons de surface et grossière pour les horizons de profondeurs. La perméabilité hydraulique est légèrement plus élevée en surface qu'en

profondeur. La stabilité structurale est excellente en A1 et A2. Le sol possède une capacité de rétention en eau à saturation qui varie entre 48 % et 52 % d'eau. L'horizon A2 est l'horizon qui retient le plus d'eau à tous les niveaux de pF. Les réserves utiles varient entre 17 % d'eau (enregistré dans Bym3) et 6 % d'eau (enregistré dans Bym1).

1.1.1.6. Classification du profil P1

❖ Classification WRB (2006)

- A1 est un premier horizon de surface.
- A2 est un deuxième horizon de surface qui présente :
 - Une épaisseur de 18 cm (≥ 15 cm).
 - Un taux de calcaire total de 23 % (≥ 15 %).
 - Plus de 5 % en calcaire total plus élevé que l'horizon sous-jacent (taux de calcaire total en Bym1 est de 9 %).
 - Un taux de carbone organique de 0.55 (≤ 0.6).

Par conséquent, A1 est un calcique (cc) ayant une propriété aridique (ar).

- Bym1 est un encroûtement gypseux qui présente :
 - Une épaisseur de 25 cm (≥ 15 cm).
 - Un taux de gypse de 57 % (≥ 50 %).
 - Le produit entre le taux de gypse et l'épaisseur de l'horizon ($57 * 25$) est de 1425 (≥ 150).

Bym1 est donc un horizon diagnostique hypergypsique (hp).

- Bym2 est aussi un encroûtement gypseux avec :
 - Une épaisseur de 40 cm. Pour des fins de classification, on considère que le 4^{ème} horizon se termine au niveau des 100 premiers cm de la surface du sol.
 - Un taux de gypse de 51 % (≥ 50 %).
 - Le produit entre le taux de gypse et l'épaisseur de l'horizon ($51 * 40$) est de 2040 (≥ 150).

Bym2 est un horizon hypergypsique (hp) qui présente aussi :

- Une CE de 6.04 dS/m (≥ 4 dS/m). ce qui fait que Bym2 est aussi un horizon hyposalique (ws).
- Bym3 ne rentre pas dans l'identification du profil car sa profondeur dépasse les 100 premiers cm de la surface du sol.

Ainsi, le profil P1 est un :

« **Hypergypsique Hyposalique Calcique Gypsisol (Aridique)** ».

❖ **Correspondance dans la classification américaine (USDA, 1999)**

- Ordre : Aridisols
- Sous ordre : Gypsid
- Grand groupe : Calcigypsid
- Groupe : Xeric Calcigypsid

❖ **Correspondance dans la classification française (CPCS, 1967)**

- Classe : Sols calcimagnésiques
- Sous classe : Sols gypseux
- Groupe : Sol bruns gypseux
- Sous groupe : à encroûtement gypseux

1.1.2. Profil 02 (P2)

1.1.2.1. Caractères généraux

- Date de description : 03-11-2008.
- Les coordonnées du profil sont les suivantes :
 - Longitude est : 4° 14' 47.6"
 - Latitude nord : 35° 37' 3.1"
 - Altitude : 458 m
- Le terrain est marqué par l'affleurement des accumulations gypseuses en surface du sol (photo 07).



Photo 07 : Des affleurements de gypse Caractérisant le profil P2

- La végétation est à base d'armoise (*Artémisia herba alba*) et d'atriplex (*Atriplex halimus*) (photo 08).
- La charge caillouteuse en surface n'est pas importante.
- La pente est d'environ 2 %.
- La couleur du terrain est en général claire.
- Le premier horizon est un horizon qui se situe au dessus de la surface du sol uniquement sous les touffes de végétation (photo 09).



Photo 08 : Végétation caractéristique de P2

Horizon de surface



Photo 09 : Horizon de surface du profil P2 sous les touffes de végétatio

1.1.2.2. Description morphologique du profil P2

A : (au dessus de la surface du sol sur une épaisseur d'environ 20 cm) ; horizon de surface ; frais ; couleur à l'état humide 7.5 YR 6/4 ; texture limono-sableuse ; structure polyédrique peu nette ; très poreux ; meuble ; apparemment organique (présence de quelques racines mortes) ; moyenne activité biologique ; présence de racines vivantes de la végétation ; pas d'éléments grossiers ; vive effervescence à l'HCl. ; pas de taches ; transition nette et brutale.

Bym1 : (0 – 25 cm) ; encroûtement gypseux ; frais ; couleur à l'état humide 2.5Y8/1-2 ; couleur à l'état frais est claire 2.5Y8/2 ; texture argilo-sableuse ; structure massive à éclats anguleux ; poreux ; compact ; fragile ; dur ; apparemment non organique ; pas de traces d'activité biologique ; pas d'éléments grossiers ; effervescence à l'HCl moins vive que le précédent ; pas de taches ; transition nette et régulière avec l'horizon sous-jacent.

Bym2 : (26 – 40 cm) ; encroûtement gypseux ; frais ; couleur à l'état humide 2.5Y8/3 ; plus clair que le précédent à l'état frais ; texture argilo-sableuse (collant avec présence d'une sensation de sable) ; structure massive à éclats émoussés ; très poreux ; moins compact que le précédent ; dur ; très léger ; apparemment non organique ; pas de traces d'activité biologique ; pas d'éléments grossiers ; effervescence à l'HCl moins vive que le précédent ; pas de taches ; transition nette et régulière.

Bymg1 : (40 – 80 cm) ; encroûtement gypseux ; frais ; couleur à l'état humide 10YR8/4 ; à l'état frais il est plus ocre que le précédent ; compact ; présence de quelques pores visibles ; compact ; pas de traces d'activité biologique ; apparemment non organique ; structure massive à éclats anguleux ; texture limoneuse ; effervescence à l'HCl plus vive que l'horizon précédent ; présence de quelques taches d'hydromorphie ; rares éléments grossiers de petite taille et de forme sub-angulaire ; transition nette et régulière.

Bymg2 : (> 80 cm) ; encroûtement gypseux ; sec ; couleur à l'état humide 10YR8/3 ; couleur à l'état sec plus ocre que l'horizon précédent ; structure massive à éclat anguleux ; très peu poreux ; très compacte ; plus dur que le précédent ; apparemment non organique ; pas de traces d'activité biologique ; rares éléments grossiers plus gros que ceux du précédent (1 à 2 cm) ; vive effervescence à l'HCl ; présence de quelques taches d'hydromorphie ajoutée à la couleur ocre en profondeur.



Photo 10 : Profil P2

1.1.2.3. Principales caractéristiques morphologiques de P2

La description morphologique du profil P2 montre qu'il est constitué d'un horizon placé à la surface du sol. C'est l'horizon que nous avons considéré horizon de surface sous les touffes de végétation représentées par l'Atriplex et l'Armoise dispersées et en voie de disparition. Cet horizon est discontinue, meuble, frais, poreux, fragile, de couleur sombre à l'état frais et parait organique. Juste en dessous se trouve une accumulation gypseuse sur plus de 80 cm d'épaisseur qui affleurent par endroits à la surface du sol. Elle est subdivisée en 4 encroûtements gypseux. Les encroûtements gypseux sont compacts, massifs, non organiques, plus caillouteux en profondeur, claires en surface et plus ocre avec quelques taches d'hydromorphie en profondeur.

1.1.2.4. Données des analyses au laboratoire

Les données analytiques du profil P2 sont présentées dans le tableau XIV. Le pH du sol est légèrement alcalin dans tout le profil.

Les teneurs en calcaire total sont faibles à moyennes. L'horizon de surface en contient un maximum avoisinant les 13 %. Par la suite, les valeurs chutent au niveau des deux premiers encroûtements gypseux (Bym1 et Bym2) à 3 %. Au niveau des derniers horizons, ces valeurs augmentent avec la profondeur pour atteindre 11.5 % dans Bym4.

Le sol est légèrement salé pour les trois premiers horizons. Les valeurs de la CE varient entre 2.87 et 3.29 dS/m. Le reste des horizons est salé ($CE \geq 6$ dS/m) avec un faciès chimique de la solution du sol de type sulfato-calcique pour Bymg1 et Bymg2.

La CEC est similaire à celle du profil P1 (13 Cmol+/kg de sol). La matière organique est optimale comparativement au taux d'argile.

Mis à part l'horizon A, le profil présente des teneurs en gypses extrêmement élevées. A partir de l'horizon Bym1, les teneurs en gypse suivent une distribution selon un gradient décroissant avec la profondeur passant de la valeur maximale enregistrée dans Bym1 (81 %) à 60 % en profondeur. Le minimum est enregistré en A (4 % de gypse). Les accumulations gypseuses sont des horizons diagnostiques gypsiques. On remarque qu'il y a un rapport inversement proportionnel entre les taux de gypse et les teneurs en calcaire. Les grandes quantités en gypse coïncident avec les faibles teneurs en calcaire total et vis vers ça.

La texture est sablo-limoneuse en surface (A). Le reste du profil présente des teneurs en sable qui dépassent les 58 % avec une dominance des sables grossiers par rapport aux sables fins (comme c'est le cas de tous les encroûtements gypseux des 05 profils étudiés).

Tableau XIV : Données analytiques du profil P2

Horizons		A	Bym1	Bym2	Bymg1	Bymg2	
Profondeurs (cm)		Sup. au sol	0-25	25-40	40-80	>80	
Eléments grossiers (%)		3,6	3,45	5,55	5,41	23,67	
Taux d'humidité à 68°C		1,68	3,73	2,3	2,06	2,02	
Taux d'humidité à 105°C		2,89	22,82	20,32	17,26	16,71	
Gypse (%) calculé d'après l'humidité à 68 et 105°C		6,05	95,45	90,1	76	73,45	
pH eau		7,93	7,91	7,9	8,04	7,95	
Gypse (%)		4,44	81,92	77,68	66,96	60,97	
Calcaire (%)		13,5	3,5	3,25	10,5	11,5	
Matière organique (%)		1,49	/	/	/	/	
Azote total (%)		0,081	/	/	/	/	
CEC (Cmol+/kg sol)		13,02	/	/	/	/	
Cations échangeables (Cmol+/kg sol)	K ⁺	0,25	/	/	/	/	
	Na ⁺	0,2	/	/	/	/	
	(Ca ⁺⁺ + Mg ⁺⁺)	12,57	/	/	/	/	
Conductivité électrique (dS/m)		2,81	2,87	3,29	6,6	6,05	
Bilan ionique (meq/l)	Anions	SO ₄ ⁻	28,92	33,36	35,98	52,2	44,09
		HCO ₃ ⁻	6,75	5,75	3,75	2,5	2,75
		Cl ⁻	6,5	6,5	7,5	24,5	21,5
	Σanions		42,17	45,61	47,23	79,2	68,34
	Cations	Ca ⁺⁺	43	42,4	40,4	41	41,8
		K ⁺	0,88	0,48	1,57	6,1	5,93
		Na ⁺	2,1	2,25	4,22	20,46	20,11
		Mg ⁺⁺	0,74	0,33	0,51	1,91	1,6
Σcations		46,72	45,46	46,7	69,47	69,44	
Granulométrie (%)	A	13,01	16,86	36,68	40,88	13,06	
	LF	3					
	LG	1,5					
	SF	52,13	24,09	31,25	26,62	24,51	
	SG	27,16	58,57	31,58	31,88	49,56	
Classes texturales (U.S.D.A., 1986)		SL	/	/	/	/	
pF	0	39,35	55,18	65,69	53,73	51,03	
	1,6	27,97	39,05	48,77	34,95	33,74	
	2,5	14,66	32,57	36,53	28,49	25,73	
	3,54	12,53	26,96	34,81	22,96	20,13	
	4,2	8,66	24,83	27,32	19,87	13,61	
Conductivité hydraulique K (cm/h)		11,08	1,78	2,45	1,75	1,4	
Indice d'instabilité structurale (Is)		3,34	/	/	/	/	

Les teneurs en eau aux différents niveaux de succion sont représentées par la figure 12. Les cinq courbes sont parallèles entre elles, ce qui signifie que la perte d'eau est relativement la même pour les différents horizons et pour chaque pF. Il y a une chute d'humidité importante d'environ 25 % d'eau entre les pF0 et pF2.5. Par la suite, cette chute d'humidité devient moins importante entre les pF2.5 et pF4.2, elle est en moyenne de 8 %. Contrairement aux encroûtements gypseux, l'horizon A retient la quantité d'eau la moins importante. A l'opposé, l'encroûtement gypseux Bym2 est l'horizon qui retient le plus d'eau à tous les pF. Ce phénomène serait dû aux particules gypseuses de l'encroûtement qui sont du point de vue granulométrique très fines. En générale, la rétention en eau à tous les points de pF pour les horizons de profondeur semble être liée à la teneur en gypse, plus le taux de gypse est élevé, plus la rétention en eau est élevée.

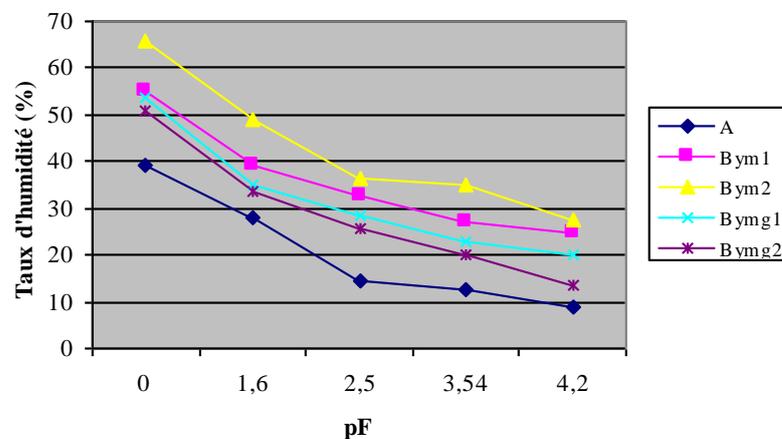


Figure 12 : Courbe pF du profil P2

En surface, le sol a une bonne stabilité structurale et présente une conductivité hydraulique assez rapide en raison de la texture grossière qui domine. En profondeur, l'écoulement de l'eau devient moyen à assez lent (Bym2). La baisse de la conductivité hydraulique au niveau des encroûtements gypseux serait liée au colmatage des pores de sol par les particules de gypse de taille fine (Keren et al, 1980 et Poch, 1992).

1.1.2.5. Caractéristiques synthétiques du profil P2

Ce sol se caractérise par des accumulations gypseuses sous formes d'encroûtements gypseux qui affleurent par endroits en surface formant des plaques blanchâtres. A la surface du sol, se trouve l'horizon de surface au dessus des touffes de végétation représentées par l'Atriplex et l'Armoise. Cet horizon est organique, poreux, meuble, fragile et de couleur plus sombre que les accumulations gypseuses qui sont subdivisées en quatre autres horizons. Leur épaisseur dépasse les 80 cm à partir de la surface du sol. Ils présentent presque les mêmes caractéristiques morphologiques que P1 (durs, compacts, moins poreux, massifs et non organiques), à part qu'ils présentent des signes d'hydromorphie représentés par une couleur ocre en bas du profil et par des taches d'hydromorphie.

Le profil est légèrement alcalin avec des teneurs faibles à moyennes en calcaire total qui oscillent entre 3 % et 13 %. Contrairement à l'horizon de surface A qui n'est pas gypseux, les horizons de sub-surface et de profondeur ont de fortes teneurs en gypse qui diminuent en profondeur, variant de 80 % à 60 % et sont inversement proportionnels avec les teneurs en calcaire total du sol. La salinité augmente avec la profondeur pour atteindre un maximum de 6 dS/m en Bymg1 et Bymg2. Le faciès chimique de la solution du sol est de type sulfato-calcique pour les horizons salés. La CEC est moyenne en surface. A saturation, le sol ne retient pas l'eau de la même façon. L'horizon de surface en retient 39 %, tandis que les encroûtements gypseux peuvent en retenir jusqu'à 65 %. La chute d'humidité entre pF0 et pF2.5 varie entre 29 % et 22 % d'eau. La réserve utile oscille entre 6 et 12 % d'eau en fonction des horizons. En surface, le sol a une bonne stabilité structurale et présente une conductivité hydraulique assez rapide en raison de la texture grossière (sableuse) qui domine. En profondeur, l'écoulement de l'eau devient assez lent à moyen.

1.1.2.6. Classification du profil P2

❖ Classification WRB (2006)

- A est un horizon de surface discontinue.
- Bym1 est un encroûtement gypseux ayant les caractéristiques suivantes :
 - Une épaisseur de 25 cm (≥ 15 cm).
 - Un taux de gypse de 81 % (≥ 50 %).
 - Le produit entre le taux de gypse et l'épaisseur de l'horizon ($81 * 25$) est de 2025 (≥ 150).

Bym1 est un horizon hypergypsiq (hp).

- Bym2 est un encroûtement gypseux qui présente :
 - Une épaisseur de 15 cm (≥ 15 cm).
 - Un taux de gypse de 77 % (≥ 50 %).
 - Le produit entre le taux de gypse et l'épaisseur de l'horizon ($77 * 15$) est de 1155 (≥ 150).

Bym2 est donc un horizon hypergypsiq (hp).

- Bymg1 est aussi un encroûtement gypseux avec :
 - Une épaisseur de 40 cm (≥ 15 cm).
 - Taux de gypse de 66 % (≥ 50 %).
 - Le produit entre le taux de gypse et l'épaisseur de l'horizon ($66 * 40$) est de 2640 (≥ 150).
 - Des taches d'hydromorphie.

Bymg1 est un horizon hypergypsiq (hp). Il est aussi un horizon endogleyique (ng) et hyposalique (ws) puisque :

- La CE est de 6.6 dS/m (≥ 4 dS/m).
- Bymg2 est aussi un horizon hypergypsiq avec une épaisseur de 20 cm et une teneur en gypse de 60 %. Il est aussi un horizon endogleyique.

Le profil P2 est donc un :

« Hypergypsiq Hyposalique Endogleyique Gypsiol ».

❖ Correspondance dans la classification américaine (USDA, 1999)

- Ordre : Aridisols
- Sous ordre : Gypsids
- Grand groupe : Haplogypsids
- Groupe : Xeric Haplogypsids

❖ Correspondance dans la classification française (CPCS, 1967)

- Classe : Sols calcimagnésiques
- Sous classe : Sols gypseux
- Groupe : Sol bruns gypseux
- Sous groupe : à encroûtement gypseux

1.1.3. Profil 03 (P3)

1.1.3.1. Caractères généraux

- Date de description : 04-11-2008.
- Les coordonnées du profil sont les suivantes :
 - Longitude est : 4° 14' 43.1"
 - Latitude nord : 35° 37' 8.9"
 - Altitude : 449 m
- Végétation à base d'armoise (*Artémisia herba alba*) avec quelques touffes de Harmel (*Péganum harmala*). (photo 11)
- Importante charge caillouteuse de surface (30 à 40 %), de taille fine et de forme généralement arrondie. (photo 12).
- Durant la nuit du 3 au 4 novembre, des chutes de pluie ont marquées la zone.
- La pente est très douce et varie de 2 à 3 % (on se trouve sur un léger replat).



Photo 11 : Végétation caractéristique de P3



Photo 12 : Aspect de surface Caractéristique de P3

1.1.3.2. Description morphologique du profil P3

A : (0 – 9 cm) ; horizon de surface ; frais ; couleur à l'état humide 7.5 YR4/6 ; texture argilo-sableuse ; structure polyédrique à sub-angulaire peu nette ; poreux ; meuble ; friable ; fragile ; apparemment organique (présence de quelques racines mortes d'Armoise) ; faible activité biologique ; présences de quelques racines vivantes ; quelques éléments grossiers de formes arrondies et de petites tailles ; vive effervescence à l'HCl ; pas de taches ; transition nette et irrégulière.

Bym1 : (9 – 30 cm) ; encroûtement gypseux ; frais ; couleur à l'état humide 2.5 Y8/3 ; couleur blanchâtre à l'état frais ; texture argilo-limoneuse ; très collant ; structure massive à éclat anguleux ; poreux ; peu compact ; fragile ; apparemment non organique ; pas de traces d'activité biologique ; peu d'éléments grossiers ; faible effervescence à l'HCl ; absence de taches ; limite progressive et régulière.

Bym2 : (30 – 48 cm) Idem que le précédent sauf qu'il est plus compact ; limite nette et régulière.

Bym3 : (48 – 60 cm) ; encroûtement gypseux ; frais ; couleur à l'état humide 10YR8/3 ; couleur plus ocre à l'état frais que le précédent ; texture sablo-argileuse ; structure massive à éclat anguleux ; peu poreux ; compact ; très friable ; apparemment non organique ; pas de traces d'activité biologique ; pas d'éléments grossiers ; vive effervescence à l' HCl ; pas de taches ; transition progressive.

Bymg1 : (60 – 86 cm) ; encroûtement gypseux ; frais ; couleur à l'état humide 7.5 YR6/6 ; couleur à l'état frais 10YR7/6 ; texture limono-sableuse ; structure massive à éclats anguleux ; pas de pores visibles ; plus compact que le précédent ; relativement moins friable que le précédent ; apparemment non organique ; pas de traces d'activité biologique ; pas d'éléments grossiers ; vive effervescence à l'HCl ; couleur ocre à l'état sec avec quelques plages plus sombres par endroits ; individualisation du gypse sous forme de pseudomycéliums ; transition progressive.

Bymg2 : (> 86 cm) ; Idem que le précédent sauf qu'il est sec ; couleur à l'état humide 7.5YR7/8 ; couleur à l'état sec 7.5R7/6 ; texture argilo-sableuse (collant avec sensation de sable) ; peu friable.

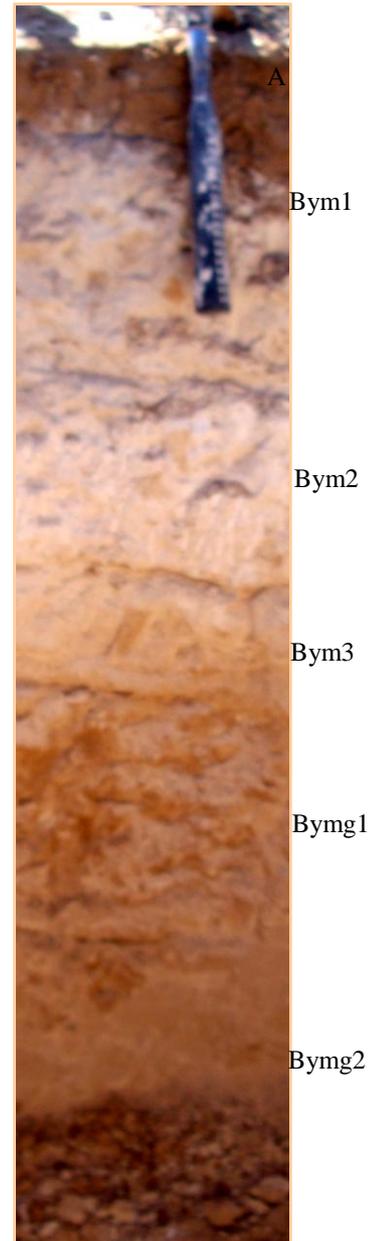


Photo 13 : Profil P3

On note que les horizons Bym3, Bymg1 et Bymg2 brillent au soleil à cause de la présence des cristaux de gypse qui sont très fins.

1.1.3.3. Principales caractéristiques morphologiques de P3

Le profil P3 est formé d'un horizon de surface qui surmonte une couche gypseuse représentée par 05 encroûtements gypseux successifs. La limite entre l'horizon de surface et le premier encroûtement gypseux est nette et irrégulière. L'horizon de surface est moins épais que la couche gypseuse qui a plus de 75 cm d'épaisseur. Il est frais, friable, meuble, fragile, poreux et organique. La couleur des encroûtements gypseux devient de plus en plus ocre profondeur (horizons Bymg1 et Bymg2). Globalement, ils sont frais, fragiles, plus compacts que l'horizon de surface et non organique.

1.1.3.4. Données des analyses au laboratoire

Les données analytiques du profil P3 sont représentées dans le tableau XV. Le profil est légèrement alcalin et présente des pH homogènes (de 7.93 à 7.98). Contrairement à l'horizon de surface non gypseux et fortement calcaire (teneur en calcaire total en A = 25 %), les encroûtements gypseux sont faiblement à moyennement calcaires (2 % <calcaire totale<14 %). Par exemple, l'horizon Bym1 a une teneur en gypse égale à 81 % et une teneur en calcaire total de 2 %, alors que l'horizon A qui a une teneur en calcaire total de 25 % est presque dépourvu de gypse (teneur inférieure à 0,5 %).

Les teneurs en gypse se distribuent de la même façon que celles des profils P1 et P2. L'horizon de surface est pauvre en gypse, alors que les horizons de sub-surface et de profondeur en ont des teneurs élevées et montrent un gradient inversement proportionnel à la profondeur. La CE est remarquablement plus élevée comparativement aux deux profils précédents, surtout au niveau des encroûtements gypseux (17 dS/m sont enregistrés dans Bym4). Par contre, l'horizon de surface (A) a une valeur de CE de 2.76 dS/m. Le profil P3 se situe dans une position topographique plus basse que P1 et P2, ce qui explique en partie sa richesse en sels. Globalement, le profil est légèrement à excessivement salin (les horizons A et Bym1 sont légèrement salins, Bym2 et Bym3 sont salins et Bymg1 et Bymg2 sont excessivement salins). Le profil salin est de type descendant. Le faciès chimique de la solution du sol est de type chloruro-calcique pour Bym2 et Bymg2 et chloruro-sodique pour Bym3 et Bymg1.

La capacité d'échange cationique est moyenne (14 Cmol+/kg de sol pour l'horizon A). Cette valeur s'expliquerait par la teneur en argile qui est relativement plus élevée que celles des profils P1 et P2 (taux d'argile en A = 23 %). La texture est sablo-argilo-limoneuse en surface. Au niveau des encroûtements gypseux, il y a une dominance de la fraction sableuse par rapport à la somme des argiles et des limons.

La figure 13 montre que la rétention en eau varie de 43 % à 56 % d'eau à saturation et de 23 % à 34 % à la capacité au champ. Les teneurs en eau pour les encroûtements gypseux sont proportionnelles à celles des teneurs en gypse à tous les pF. La réserve utile varie de 9 % à 11 % d'eau. De même, aux basses tentions, ce sont les encroûtements gypseux qui ont la grande capacité de rétention d'eau. Par contre, aux pF supérieurs à 2.5, l'horizon de surface (A) a le même comportement de rétention en eau que Bymg1 et Bymg2.

Tableau XV : Données analytiques du profil P3

Horizons		A	Bym1	Bym2	Bym3	Bymg1	Bymg2	
Profondeurs (cm)		0-9	9-30	30-48	48-60	60-86	>86	
Eléments grossiers (%)		24,34	3,7	15,09	9,72	10,77	13,82	
Taux d'humidité à 68°C		3,45	2,05	3,01	2,67	3,17	3,33	
Taux d'humidité à 105°C		4,19	20,5	19,33	16,62	13,53	14,62	
Gypse (%) calculé d'après l'humidité à 68 et 105°C		3,7	92,25	81,6	69,75	51,8	56,45	
pH eau		7,94	7,93	7,95	7,98	7,92	7,95	
Gypse (%)		0,33	81,02	67,84	62,21	47,22	49,56	
Calcaire (%)		25	2,38	6,5	10,5	14,25	11,25	
Matière organique (%)		1,18	/	/	/	/	/	
Azote total (%)		0,0735	/	/	/	/	/	
CEC (Cmol+/kg sol)		14,31	/	/	/	/	/	
Cations échangeables (Cmol+/kg sol)	K ⁺	0,29	/	/	/	/	/	
	Na ⁺	0,15	/	/	/	/	/	
	(Ca ⁺⁺ + Mg ⁺⁺)	13,87	/	/	/	/	/	
Conductivité électrique (dS/m)		2,76	3,2	14,91	16,7	16,92	16,69	
Bilan ionique (meq/l)	Anions	SO ₄ ²⁻	37,12	32,14	47,31	43,23	34,17	43,9
		HCO ₃ ⁻	2	4,5	4	7	6	4
		Cl ⁻	3,5	5,5	99	118,5	117,5	111,5
	Σanions		42,62	42,14	150,31	168,73	157,67	159,4
	Cations	Ca ⁺⁺	36	44,8	80,7	77,1	72	84,3
		K ⁺	0,95	0,9	2,21	2,35	2,26	1,85
		Na ⁺	2,37	4,69	79,9	88,11	86,44	61,78
		Mg ⁺⁺	0,71	0,56	2,57	3,25	3,49	3,9
Σcations		40,03	50,95	165,38	170,81	164,19	151,83	
Granulométrie (%)	A	23,01	42,16	21,68	26,2	15,7	15,64	
	LF	7,001						
	LG	8,5	21,9	32,52	30,2	38,04	38,78	
	SF	41,64						
	SG	15,31						35,12
Classes texturales (U.S.D.A., 1986)		SAL	/	/	/	/	/	
pF	0	43,83	56,35	55,08	49,58	52,03	52,25	
	1,6	32,07	40,31	38,7	34,02	35,54	35,89	
	2,5	23,25	34,91	31,11	28,07	23,53	24,29	
	3,54	17,74	31,93	22	22,83	15,36	18,44	
	4,2	14,51	27,87	19,66	19,26	13,97	15,06	
Conductivité hydraulique K (cm/h)		4,41	1,48	1,63	1,13	4,94	5,22	
Indice d'instabilité structurale (Is)		3,31	/	/	/	/	/	

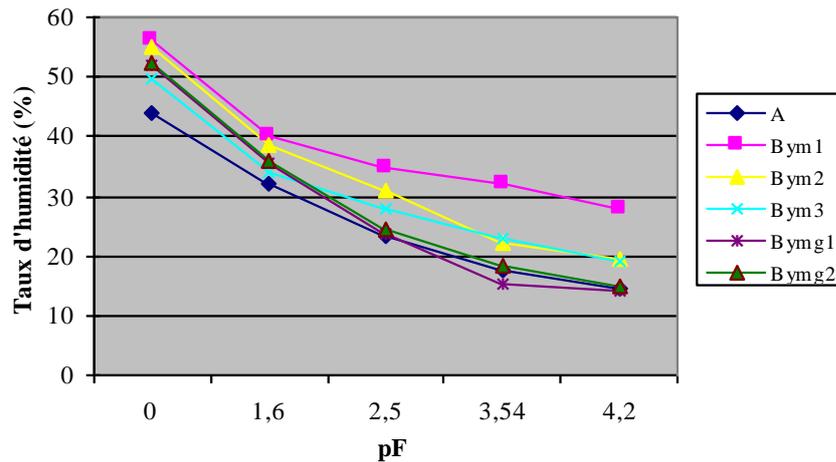


Figure 13 : Courbe pF du profil P3

Le sol a une très bonne stabilité structurale en surface liée probablement à sa teneur en calcaire total. La vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol est moyenne pour les horizons du profil. Les valeurs de l'indice de perméabilité hydraulique sont moyennes et varient de 1 à 5 cm/heure.

1.1.3.5. Caractéristiques synthétiques du profil P3

L'horizon de surface de P3 est peu épais, meuble, fragile, poreux et paraît organique. Il surmonte une couche épaisse constituée d'une série d'encroûtement gypseux de plus de 75 cm d'épaisseur. Ces encroûtements sont en général compacts, frais, fragiles, non organiques, très claires dans la partie supérieure et ocre à la base probablement liée au phénomène d'hydromorphie.

Le pH est alcalin et varie très peu dans le profil. Le sol est fortement calcaire en surface et moyennement calcaire en profondeur. Globalement, au niveau des encroûtements gypseux, les teneurs en gypse diminuent vers la profondeur. Contrairement à P1 et P2, le troisième profil P3 enregistre des valeurs de CE qui augmentent dans le sens de la profondeur et qui sont salins à extrêmement salins. Le faciès chimique de la solution du sol est de type chloruro-calcique pour Bym2 et Bymg2 et Chloruro-sodique pour Bym3 et Bymg1. La CEC est moyenne. Le sol peut contenir de 43 % à 56 % d'eau à saturation selon les horizons et de 23 % à 34 % à la capacité au champ. L'horizon Bym1 est l'horizon qui retient le maximum d'humidité aux différentes succions. Les teneurs en eau pour les encroûtements gypseux sont proportionnelles à celles du gypse à tous les pF. La réserve utile varie entre 9 % et 11 %. En surface, la stabilité structurale est très bonne et la texture est sablo-argilo-limoneuse. Le profil se caractérise aussi par une vitesse moyenne de circulation de l'eau dans le sol.

1.1.3.6. Classification du profil P3

❖ Classification WRB (2006)

- A est un horizon de surface d'une épaisseur de 9 cm.
- Bym1 présente les caractéristiques suivantes :
 - Une épaisseur de 21 cm (≥ 15 cm).
 - Un taux de gypse de 81 % (≥ 50 %).
 - Le produit entre le taux de gypse et l'épaisseur de l'horizon ($81 * 21$) est de 1701 (≥ 150).

Bym1 est un horizon hypergypsique (hp).
- Bym2 est un horizon hypergypsique (hp) et un horizon hyposalique (ws) puisqu'il a :
 - Une épaisseur de 18 cm (≥ 15 cm).
 - Un taux de gypse de 67 % (≥ 50 %).
 - Le produit entre le taux de gypse et l'épaisseur de l'horizon ($67 * 18$) est de 1206 (≥ 150).
 - Une CE de 14.91 dS/m (≥ 4 dS/m).
- Bym3 est un encroûtement gypseux avec :
 - Une CE = 16.7 dS/m (≥ 4 dS/m).

Bym3 est donc un horizon hyposalique (ws).
- Bymg1 est un horizon hypogypsique (gy), un horizon endogleyique (ng) et un horizon hyposalique (ws). Il présente les caractéristiques suivantes :
 - Une épaisseur de 26 cm (≥ 15 cm).
 - Un taux de gypse de 47 % (≥ 5 %).
 - Le produit entre le taux de gypse et l'épaisseur de l'horizon ($47 * 26$) est de 1222 (≥ 150).
 - Une CE = 16.92 dS/m.
 - Une couleur ocre (signe d'hydromorphie).
- Bymg2 est aussi un horizon hyposalique (ws) avec une CE de 16.69 (≥ 4 dS/m).

De ce fait, le profil P3 est un :

« Hypergypsique Hypogypsique Hyposalique Endogleyique Gypsisol ».

❖ **Correspondance dans la classification américaine (USDA, 1999)**

- Ordre : Aridisols
- Sous ordre : Gypsid
- Grand groupe : Haplogypsid
- Groupe : Xeric Haplogypsid

❖ **Correspondance dans la classification française (CPCS, 1967)**

- Classe : Sols calcimagnésiques
- Sous classe : Sols gypseux
- Groupe : Sol bruns gypseux
- Sous groupe : à encroûtement gypseux

1.1.4. Profil 04 (P4)

1.1.4.1. Caractères généraux

- Date de description : 04-11-2008.
- Les coordonnées du profil sont les suivantes :

Longitude est : 4° 14' 36.5"

Latitude nord : 35° 37' 19.6"

Altitude : 445 m

- Couleur du terrain claire.
- Pente 3 à 4 %.
- Végétation représentée par *Peganum harmala*, *Atriplex halimus* et *Salsola vermiculata* (photo 14)



Photo 14 : Végétation caractéristique de P4

- Charge caillouteuse moins importante que celle de P3 (20 % à 30 %). Elle est de forme arrondie à anguleuse (photo 15).



Photo 15 : Aspect de surface caractéristique de P4

1.1.4.2. Description morphologique du profil P4

A : (0 – 15 cm) ; horizon de surface ; frais ; couleur à l'état humide 7.5 YR 5/6 ; texture sablo-limono-argileuse ; peu collant ; peu plastique ; structure polyédrique sub-angulaire peu nette ; poreux ; meuble ; friable ; apparemment organique ; très faible activité biologique ; fines racines vivantes de la végétation ; rares éléments grossiers de petites tailles et de formes généralement arrondies ; vive effervescence à l'HCl ; pas de taches et pas de nodules ; limite nette et régulière.

Bym1 : (15 – 42 cm) ; encroûtement gypseux ; frais ; couleur à l'état humide 10 YR7/6 ; couleur beige à blanchâtre à l'état frais ; texture argileuse ; collant ; structure massive à éclats anguleux ; poreux ; très compact ; friable ; apparemment peu organique ; présence de quelques fines racines ; pas d'éléments grossiers ; vive effervescence à l'HCl ; pas de taches ; limite progressive et régulière.

Bym2 : (42 – 63 cm) ; Idem que le précédent, sauf que la couleur à l'état humide est 10 YR7/8 ; moins clair à l'état frais que l'horizon sus-jacent ; texture argilo-sableuse (collant avec présence d'une sensation de sable) ; apparemment non organique ; faible effervescence à l'HCl ; transition progressive.

Bym3 : (63 – 96 cm) ; Idem que Bym2 sauf que la couleur à l'état humide est 10YR6/8 ; texture limono-sableuse ; peu compact ; vive effervescence à l'HCl ; présence de fins cristaux de gypse individualisés sous forme de pseudomycéliums ; transition progressive.

Bymg : (> 96 cm) ; encroûtement gypseux ; sec ; couleur à l'état humide 10 YR7/6 ; plus ocre à l'état frais que l'horizon sus-jacent ; texture sablo-argileuse ; peu collant ; structure massive à éclats anguleux ; poreux ; très compact ; fragile (les éléments structuraux s'effritent facilement à la main) ; apparemment non organique ; pas de traces d'activité biologique ; pas d'éléments grossiers ; effervescence moyenne à l'HCl ; présence de nombreux cristaux de gypse qui brillent au soleil.

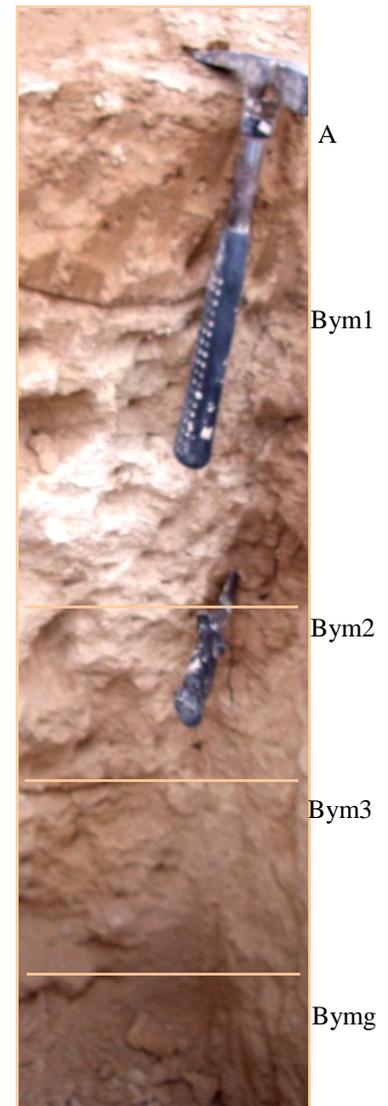


Photo 16 : Profil P4

On note la présence de poches de l'horizon de surface au niveau des horizons Bym1 et Bym2. Ces poches constituent des traces d'activité biologique (Crotovinas) et correspondraient à des anciennes galeries de Gerboises ou bien, ils sont dus à un ancien développement racinaire qui s'est prolongé depuis l'horizon de surface (photo 17).



Photo 17 : Poches de l'horizon de surface du profil P4

1.1.4.3. Principales caractéristiques morphologiques de P4

Le profil P4 se trouve en bas de pente de la mini séquence étudiée (P1, P2, P3 et P4). La principale caractéristique qui marque le milieu est la végétation indicatrice de salinité représentée essentiellement par l'Atriplex et Salsola. La structure générale de ce profil est représentée par un horizon de surface qui repose sur une succession de 4 encroûtements gypseux. L'horizon de surface, d'une épaisseur de 15 cm est frais, poreux, meuble, apparemment organique et présente de rares éléments grossiers de petites tailles et de formes généralement arrondies. Il s'étale par endroits au niveau des encroûtements gypseux formant des poches. La transition est nette et régulière vers les encroûtements gypseux. Ces derniers ont plus de 80 cm d'épaisseur, sont plus clairs que l'horizon de surface et deviennent plus ocres en profondeur. Ils sont aussi compacts, apparemment peu ou pas organiques, massifs, fragiles et à la base, le gypse est individualisé se trouve sous forme de cristaux qui brillent au soleil.

1.1.4.4. Données des analyses au laboratoire

Les données analytiques du profil P4 sont représentées dans le tableau XVI. Le pH est légèrement alcalin pour tout le profil. Les valeurs varient entre 7.84 et 8. La teneur en calcaire total est moyenne en A (21 % de calcaire total) et faible pour les horizons de profondeur avec un maximum au niveau du dernier horizon Bymg (6 % de calcaire total). Les faibles teneurs sont mentionnées au niveau des encroûtements gypseux (Bym1, Bym2, Bym3 et Bymg) qui ont des taux en gypse supérieurs à 50 %. De la même façon que les autres profils, la CEC est moyenne en surface (CEC = 13.58 Cmol+/kg sol). La teneur en argile (22.5 %) serait à l'origine de la valeur de la CEC.

Les taux de gypse au niveau des accumulations gypseuses diminuent du haut vers le bas du profil. L'horizon de surface (A) est très peu gypseux (teneur en gypse inférieure à 2 %). La conductivité électrique enregistre des valeurs élevées variant de 2.68 à 21.63 dS/m. Elles augmentent avec la profondeur. Cette salinité est expliquée par le fait que le profil se situe en bas de pente de la séquence P1, P2, P3 et P4. Les sels plus solubles que le gypse migrent des points les plus hauts et s'accumulent en bas de pente. Le faciès chimique de la solution du sol des horizons salés est chloruro-sodique pour Bym1, Bym3 et Bymg et sulfato-sodique pour Bym2.

Tableau XVI : Données analytiques du profil P4

Horizons		A	Bym1	Bym2	Bym3	Bymg	
Profondeurs (cm)		0-15	15-42	42-63	63-96	>96	
Eléments grossiers (%)		10,11	11,77	7,22	5,96	3,66	
Taux d'humidité à 68°C		3,366	3,766	2,733	3,36	3,21	
Taux d'humidité à 105°C		4,31	20,87	19,58	20,13	16,39	
Gypse (%) calculé d'après l'humidité à 68 et 105°C		4,72	85,52	84,23	83,85	65,9	
pH eau		7,84	7,85	7,98	8	7,98	
Gypse (%)		1,88	73,34	72,12	70,36	53,76	
Calcaire (%)		21,75	3,5	2,55	1,5	6,88	
Matière organique (%)		1,01	/	/	/	/	
Azote total (%)		0,0665	/	/	/	/	
CEC (Cmol+/kg sol)		13,58	/	/	/	/	
Cations échangeables (Cmol+/kg sol)	K ⁺	0,64	/	/	/	/	
	Na ⁺	0,2	/	/	/	/	
	(Ca ⁺⁺ + Mg ⁺⁺)	12,74	/	/	/	/	
Conductivité électrique (dS/m)		2,68	16,86	17,39	18,75	21,63	
Bilan ionique (meq/l)	Anions	SO ₄ ⁼	34,6	78,66	99	100,67	90
		HCO ₃ ⁻	4	5	5	3	2
		Cl ⁻	1,5	96,5	95,5	108,5	130,5
		Σanions	40,1	180,16	199,5	212,17	222,5
	Cations	Ca ⁺⁺	36,8	91,6	85,6	87,9	92
		K ⁺	2,99	6,55	6,42	6,88	5,73
		Na ⁺	2,68	93,68	94,92	95,78	100,18
		Mg ⁺⁺	1,31	4,73	5,23	5,48	5,77
		Σcations	43,78	196,56	192,17	196,04	203,68
Granulométrie (%)	A	22,5	25,81	31	26,35	17,52	
	LF	14,001					
	LG	8,33					
	SF	38,34	24,5	31,47	32,54	36,62	
	SG	12,3	49,14	37,07	40,43	44,93	
Classes texturales (U.S.D.A., 1986)		SAL	/	/	/	/	
pF	0	47,63	48,96	53,47	48,22	46,78	
	1,6	34,41	33,54	36,96	34,84	30,89	
	2,5	21,53	26,37	29,34	29,95	19,94	
	3,54	17,08	21,67	24,03	21,72	16,33	
	4,2	14,4	19,51	20,82	18,94	12,75	
Conductivité hydraulique K (cm/h)		5,11	1,98	2,3	3,35	5,03	
Indice d'instabilité structurale (Is)		3,03	/	/	/	/	

La figure 14 montre qu'il y a une chute d'humidité de l'ordre de 26 % à 18 % entre l'humidité à saturation et l'humidité à la capacité au champ. Les courbes sont très proches les unes des autres entre les pF0 et pF1.6, ce qui signifie que l'horizon de surface et les encroûtements gypseux ont approximativement une même capacité de rétention d'eau dans cette gamme de pF. A partir de pF1.6, les courbes commencent à se distinguer par une légère séparation. On note que l'encroûtement Bym2 est l'horizon qui retient le plus d'eau à tous les niveaux de succions. La réserve utile de ce profil varie de 6 à 11 % (6 % enregistré dans Bym1 et 11 % dans Bym3).

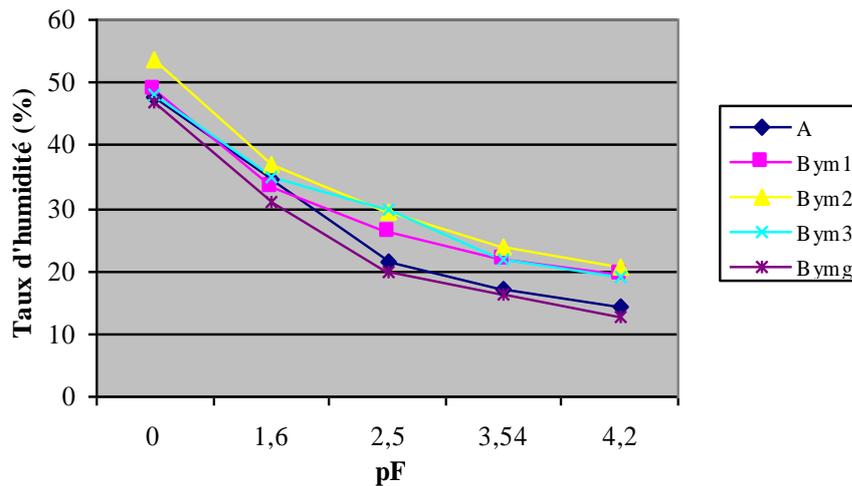


Figure 14 : Courbe pF du profil P4

La conductivité hydraulique est moyenne pour tout le profil. La valeur maximale est enregistrée au niveau de l'horizon de surface (5.11 cm/h). Elle atteint un minimum dans le premier horizon des encroûtements gypseux (1.98 cm/h au niveau de l'horizon Bym1) et augmente par la suite en profondeur. La texture est sablo-argilo-limoneuse et la stabilité structurale est excellente dans l'horizon de surface.

1.1.4.5. Caractéristiques synthétiques du profil P4

Le profil P4 est marqué par la présence d'une végétation caractéristique de la salinité. Sur le plan morphologique, il n'y a pas une grande différence avec les profils précédents. L'horizon de surface qui surmonte les accumulations gypseuses se trouve prolongé par endroits jusqu'au deuxième et troisième horizon du profil. La couleur des encroûtements gypseux devient de plus en plus ocre avec la profondeur. Les cristaux de gypse s'individualisent dans les deux derniers horizons sous forme de pseudomycéliums qui brillent au soleil.

Le profil est légèrement alcalin, moyennement pourvu en calcaire en surface et faiblement pourvu en calcaire au niveau des encroûtements gypseux. Les teneurs en gypse sont inversement proportionnelles à celles du calcaire total. En surface, la capacité d'échange cationique est moyenne, le sol a une excellente stabilité structurale et la texture est sablo-argilo-limonoeuse. Mis à part l'horizon de surface qui n'est pas salé, la conductivité électrique augmente avec la profondeur et enregistre les valeurs les plus élevées par rapport à tous les sols étudiés. Le faciès chimique de la solution du sol est de type chloruro-sodique pour Bym1, Bym3 et Bymg et sulfato-sodique pour Bym2. La vitesse de circulation de l'eau dans tout le profil est moyenne. Selon les horizons, le sol peut retenir de 46 % à 53 % d'humidité. L'horizon Bym2 est l'horizon qui retient la quantité la plus importante en eau à tous les points de succions. La réserve utile varie entre 6 % et 11 %.

1.1.4.6. Classification du profil P4

❖ Classification WRB (2006)

- A est un horizon de surface qui présente les caractéristiques suivantes :
 - Une épaisseur de 15 cm (≥ 15 cm).
 - Un taux de calcaire total de 21 % (≥ 15 %). La teneur en calcaire total est supérieure de l'horizon sous-jacent à plus de 5 %.
 - Un taux de carbone organique de 0.58 % (≤ 0.6 %).

A est donc un horizon calcique (cc) ayant la propriété aridique (ar).

- Bym1 est un encroûtement avec les caractéristiques suivantes :
 - Une épaisseur de 27 cm (≥ 15 cm).
 - Un taux de gypse de 73 % (≥ 50 %).
 - Le produit entre le taux de gypse et l'épaisseur de l'horizon ($73 * 27$) est de 1971 (≥ 150).
 - Une CE de 16.86 dS/m (≥ 15 dS/m).
 - Le produit entre la CE et l'épaisseur de l'horizon ($16.86 * 27$) est de 455.22 (≥ 450).

Bym1 est un horizon hypergypsiq (hp) et un horizon épissalique (ea).

- Bym2 possède les caractéristiques suivantes :
 - Une épaisseur de 21 cm (≥ 15 cm).
 - Un taux de gypse de 72 % (≥ 50 %).
 - Le produit entre le taux de gypse et l'épaisseur ($72 * 21$) est de 1512 (≥ 150).
 - Une CE de 17.39 dS/m (≥ 15 dS/m).
 - Le produit entre la CE et l'épaisseur de l'horizon ($17 * 21$) est de 365.

Bym2 est donc un horizon hypergypsiq (hp) et un horizon hyposalique (ws).

- Bym3 est un encroûtement gypseux avec :
 - Une épaisseur de 33 cm (≥ 15 cm).
 - Un taux de gypse de 70 % (≥ 50 %).
 - Le produit entre le taux de gypse et l'épaisseur de l'horizon ($70 * 33$) est de 2310 (≥ 150).
 - Une CE de 18.75 dS/m (≥ 4 dS/m).
 - Le produit entre la CE et l'épaisseur de l'horizon ($18 * 33$) est de 618 (≥ 450).

Bym3 est un horizon endosalique (ns) et un horizon hypergypsiq (hp).

- Bymg est un encroûtement gypseux endogleyique (ng) car il présente une couleur ocre signe d'hydromorphie.

Ainsi, le profil P4 est classé comme suit :

« **Hypergypsiq Episalique Endosalique Hyposalique Endogleyique Calcique Gypsiol (Aridique)** »

ou

« **Episalique Endosalique Hyposalique Endogleyique Hypergypsiq Calcique Solonchaks (Aridique)** »

Le profil P4 est nommé gypsiol du moment qu'il contient des horizons diagnostiques gypsiques (au niveau de Bym1, Bym2 et Bym3). De la même façon, il est classé dans le Groupe de Sols de Référence des solonchaks car il répond aux critères diagnostiques de ce type de sol et contient des horizons diagnostiques saliques (Bym1 est un horizon épisalique). Si on tient compte des règles de classification de la WRB (2006), la procédure de classement se fait en éliminant un par un tous les Groupes de Sols de Référence ne répondant pas aux critères exigés par la WRB en suivant l'ordre qui nous a été proposé par la clé. Du moment où les solonchaks se situent à une position plus avancée que les gypsiols, nous pouvons conclure que le profil P4 n'est pas un gypsiol, mais plutôt un solonchak. Le nom retenu dans la classification de ce profil est donc le deuxième, c'est-à-dire :

« **Episalique Endosalique Hyposalique Endogleyique Hypergypsiq Calcique Solonchaks (Aridique)** »

Le problème qui se pose au niveau de ce profil est un problème de concordance entre les horizons diagnostiques choisis et la réalité du terrain qui montre que P4 du point de vue morphologique est beaucoup plus un sol gypseux qu'un autre type de sol puisqu'on ne peut pas négliger une couche épaisse d'encroûtements gypseux visibles et très clairs.

❖ **Correspondance dans la classification américaine (USDA, 1999)**

- Ordre : Aridisols
- Sous ordre : Gypsisols
- Grand groupe : Haplogypsisols
- Groupe : Xeric Haplogypsisols

❖ **Correspondance dans la classification française (CPCS, 1967)**

- Classe : Sols calcimagnésiques
- Sous classe : Sols gypseux
- Groupe : Sol bruns gypseux
- Sous groupe : à encroûtement gypseux

1.1.5. Profil (05) P5

1.1.5.1. Caractères généraux

- Date de description : 03-11-2008.
- Les coordonnées du profil sont les suivantes :
 - Longitude est : 4° 11' 9.2"
 - Latitude nord : 35° 38' 0.9"
 - Altitude : 482 m
- La végétation est à base de *Péganum harmala* (photo 18).
- La charge caillouteuse est très importante (>50%). Elle est composée d'éléments de tailles variables, il y a une variation à l'échelle métrique; de quelques mm à quelques cm jusqu'à 15 cm. La forme est arrondie en général (photo 19)
- Le terrain est plat, mais situé sur le sommet d'un microrelief.
- Le profil est surmonté par une croûte de battance de quelques millimètres d'épaisseur (photo 20).



Photo 18 : Végétation caractéristique de P5



Photo 19 : Aspect de surface caractéristique du profil P5



Photo 20 : Croûte de battance en surface du profil P5

1.1.5.2. Description morphologique du profil P5

A1 : (0 – 25 cm) ; horizon de surface ; frais ; couleur à l'état humide 7.5 YR6/4 ; couleur marron à l'état frais ; texture limono-sablo-argileuse ; structure polyédrique peu nette ; présence importante de cailloux ; poreux ; meuble ; très fragile ; apparemment organique ; présence faible de racines ; faible activité biologique ; nombreux éléments grossiers (>25%) de tailles variables (quelques mm à quelques cm) et de formes variables mais généralement arrondies ; pas de taches ; vive effervescence à l'HCl ; transition régulière et progressive qui se fait sur 2 à 3 cm et qui est discontinue par endroits.

A2 : (25 – 33 cm) ; horizon de surface ; frais ; couleur à l'état humide 7.5 YR7/3 ; plus claire que le précédent à l'état frais ; texture limono-sablo-argileuse ; structure polyédrique peu nette ; moins poreux que A1 ; fragile ; apparemment peu organique ; quelques rares racines ; pas de trace d'activité biologique ; moins d'éléments grossiers que l'horizon A1 de petites tailles et de formes arrondies ; vive effervescence à l'HCl ; absence de taches ; transition brutale et régulière.

Bym1 : (33 – 60 cm) ; encroûtement gypseux ; sec ; couleur à l'état humide 7.5YR 8/2 ; couleur blanchâtre à l'état sec ; texture limono-sableuse ; structure massive à éclats anguleux ; non poreux ; très compact ; les éclats sont relativement légers ; un maximum de dureté se situe au sommet de l'horizon et le minimum est à sa base ; apparemment non organique ; pas de trace d'activité biologique ; peu d'éléments grossiers ; vive effervescence à l'HCl ; transition régulière et progressive.

Bym2 : (60 – 110 cm) ; Idem que le précédent sauf qu'il est frais ; couleur à l'état humide 7.5 YR8/3 ; texture sableuse ; peu de pores visibles ; moins compact que l'horizon sus-jacent ; plus fragile que Bym1 ; nombreux éléments grossiers de taille centimétrique (de 1 à 4 cm) et de forme sub-angulaire ; transition brutale.

Bym3 : (>110 cm) ; encroûtement gypseux ; frais ; couleur à l'état humide 7.5 YR 7/8 ; couleur blanchâtre à l'état frais ; texture sableuse ; structure massive à éclats émoussés et parfois anguleux ; pores non visibles ; les éclats sont durs par endroit et fragiles par endroit ; apparemment non organique ; pas de traces d'activité biologique ; nettement plus riche en éléments grossiers de tailles et de formes variables (tendance arrondie) ; vive effervescence à l'HCl ; présence de cristaux de gypse qui brillent au soleil.

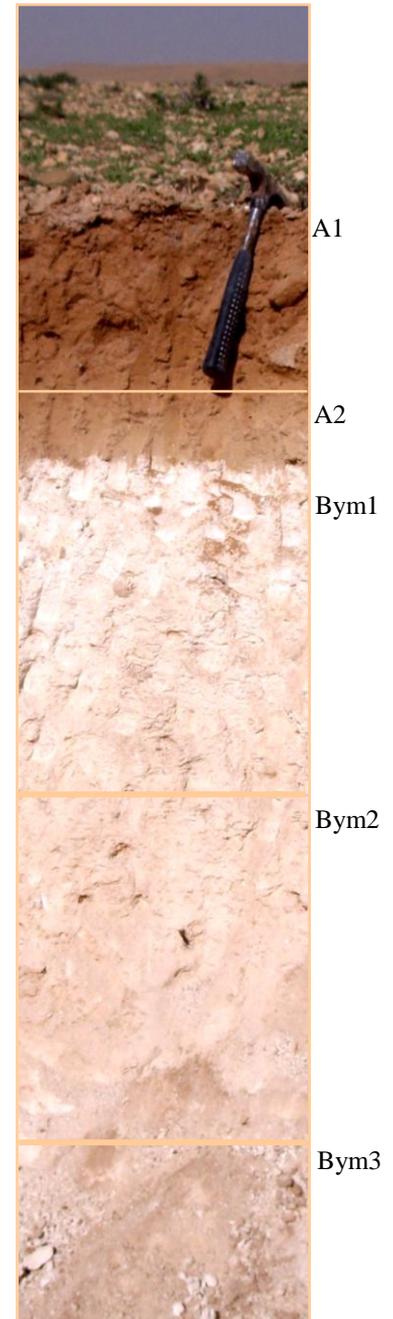


Photo 21 : Profil P5

1.1.5.3. Principales caractéristiques morphologique de P5

Le profil P5 est isolé par rapport à la mini séquence P1, P2, P3 et P4 et se situe à l'altitude la plus élevée. Le milieu est marqué par une végétation à base de *Péganum harmala*, une charge caillouteuse très importante et croûte de battance à la surface du profil. Le profil P5 est subdivisé en 5 horizons. Les deux premiers sont des horizons de surface d'une trentaine de centimètres d'épaisseur. Ils sont frais, meubles, fragiles, apparemment organiques, poreux, riches en éléments grossiers surtout en A1 et de couleur sombre à l'état frais. La limite vers les encroûtements gypseux se fait de façon continue et brutale. Les encroûtements gypseux sont blanchâtres, apparemment non organique, plus secs en haut qu'en bas du profil, le maximum de dureté se situe au sommet de ces horizons, les éléments grossiers deviennent plus abondants en profondeur.

1.1.5.4. Données des analyses au laboratoire

Les données analytiques du profil P5 sont représentées dans le tableau XVII. Les deux premiers horizons de surface A1 et A2 sont moyennement alcalins. Les horizons de profondeurs sont légèrement alcalins. Les valeurs du pH varient entre 7.87 et 8.02.

En surface, les teneurs moyennes en calcaire total est de l'ordre de 19 % et 24 % respectivement pour A1 et A2. La distribution du calcaire total dans le profil a la même tendance que P1. Nous passe subitement du maximum de CaCO_3 dans A2 (CaCO_3 % = 24 %) à la valeur minimale (3 %) au sommet des encroûtements gypseux (Bym1). Par la suite, les taux en calcaire total augmentent avec la profondeur jusqu'à environ 10 % au niveau du dernier horizon Bym3.

La CEC est relativement forte par rapport aux autres profils étudiés. Les valeurs de 15 dS/m et 17 dS/m enregistrées respectivement en A1 et A2 seraient dues aux fortes teneurs en argile (22.5 % et 28 %), et aux teneurs en matière organique (1.29 % en A1 et 1.62 % A2).

Contrairement aux horizons de surface A1 et A2 qui ne sont pas gypseux (teneurs en gypse d'environ 1 %), l'horizon Bym1 est le plus gypseux (75 %). La même tendance de distribution du gypse marque ce sol que celle des autres sols. Les taux de gypse sont très faibles en surface du profil et très élevées en Bym1 et diminuent avec la profondeur pour les encroûtements gypseux.

En surface, les horizons sont légèrement salins (2 à 3 dS/m) et salins au niveau des encroûtements gypseux (4 à 8 dS/m). Le faciès chimique de la solution du sol est sulfato-calcique dans tout le profil. La salinité augmente avec la profondeur pour atteindre un maximum de 8.39 dS/m au niveau du dernier horizon Bym3.

Les teneurs en eaux aux différents niveaux de succions représentées dans la figure 15 montrent que l'horizon A2 a la plus grande capacité de rétention en eau à tous les pF. A saturation, l'horizon peut retenir jusqu'à 67 % d'eau et jusqu'à 30 % au point de flétrissement permanent. Les teneurs en argile (28 %) seraient à l'origine de cette grande aptitude de rétention d'eau. Une chute d'humidité de l'ordre de 30 % à 20 % est enregistrée entre les pF0 et pF2.5 pour tout le profil. La réserve utile est d'environ 7 % d'eau.

Tableau XVII : Données analytiques du profil P5

Horizons		A1	A2	Bym1	Bym2	Bym3	
Profondeurs (cm)		0-25	25-33	33-60	60-110	>110	
Eléments grossiers (%)		45,75	14,24	8,4	19,02	39,92	
Taux d'humidité à 68°C		2,95	3,98	1,96	3,48	2,23	
Taux d'humidité à 105°C		3,61	5,71	19,79	20,03	17,37	
Gypse (%) calculé d'après l'humidité à 68 et 105°C		3,3	8,65	89,15	82,75	75,7	
pH eau		8,02	8,01	7,88	7,87	7,96	
Gypse (%)		1,15	1,23	75,35	67,31	64,18	
Calcaire (%)		19,75	24,33	3,38	8,13	10,16	
Matière organique (%)		1,29	1,62	/	/	/	
Azote total (%)		0,0787	0,089	/	/	/	
CEC (cmol+/kg sol)		14,96	16,81	/	/	/	
Cations échangeables (cmol+/kg sol)	K ⁺	0,43	0,18	/	/	/	
	Na ⁺	0,19	0,34	/	/	/	
	(Ca ⁺⁺ + Mg ⁺⁺)	14,34	16,29	/	/	/	
Conductivité électrique (dS/m)		2,65	3,23	4,76	7,54	8,39	
Bilan ionique (meq/l)	Anions	SO ₄ ⁼	35,5	30,4	36,78	41,74	44,43
		HCO ₃ ⁻	4,25	4,5	2,5	3,5	2,5
		Cl ⁻	1,75	4,5	14	37,5	40
		Σanions	41,5	39,4	53,28	82,74	86,93
	Cations	Ca ⁺⁺	38,2	45,4	51,2	48,8	45,8
		K ⁺	1,13	0,28	0,46	0,44	0,84
		Na ⁺	2,01	6,36	9,04	36,47	42,25
		Mg ⁺⁺	0,97	0,84	1,07	2,07	2,46
	Σcations	42,31	52,88	61,77	87,78	91,35	
Granulométrie (%)	A	22,51	28,01	44,63	37,09	22,55	
	LF	13	10,01				
	LG	6	14,42				
	SF	46,77	37,57	19,96	28,44	33,55	
	SG	8,26	5,72	34,1	33,62	40,14	
Classes texturales (U.S.D.A., 1986)		SAL	SAL	/	/	/	
pF	0	49,64	67,35	46,60	54,49	57,37	
	1,6	36,49	49,54	31,67	38,34	43,67	
	2,5	24,69	36,64	27,02	31,44	27,12	
	3,54	21,13	30,71	22,48	26,97	25,12	
	4,2	18,47	30,28	19,48	23,87	19,72	
Indice de perméabilité hydraulique K (cm/h)		5,11	2,96	1,53	1,95	4,71	
Indice d'instabilité structurale (Is)		4,03	5,26	/	/	/	

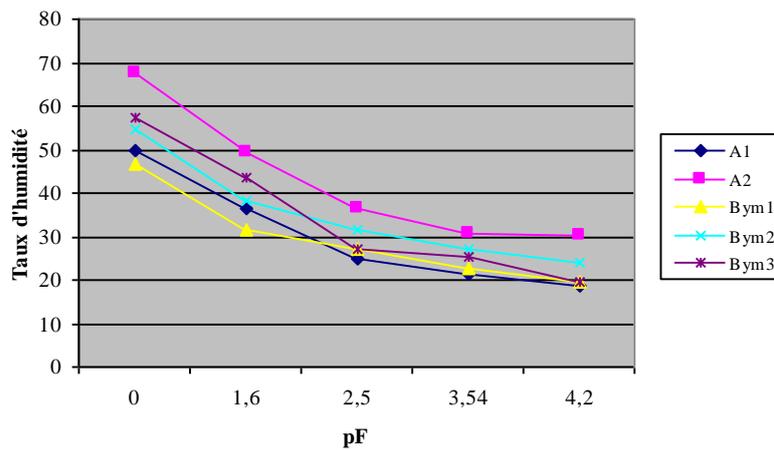


Figure 15 : Courbe pF du profil P5

Le sol présente une très bonne stabilité structurale en surface. La conductivité hydraulique est dans l'ensemble du profil moyenne. Elle se situe entre 1.53 cm/h et 5.11 cm/h respectivement pour Bym1 et A1. Ces valeurs sont inversement proportionnelles à celles du gypse.

1.1.5.5. Caractéristiques synthétiques du profil P5

Le profil P5 se situe à l'altitude la plus élevée par rapport aux quatre autres profils. Sa morphologie générale ressemble à celle du profil P1 (les profils P1 et P5 se situent à des positions topographiques presque analogues). Le profil est surmonté par une mince croûte de battance. Le premier horizon de surface (A1) est moins clair, plus riche en éléments grossiers et paraît plus pourvu en matière organique que le deuxième horizon de surface (A2).

Les encroûtements gypseux subdivisés en trois horizons (Bym1, Bym2 et Bym3) s'étendent sur une épaisseur dépassant les 75 cm. Ils sont de couleur très claire (voire blanchâtre) à l'état frais, le maximum de dureté est enregistré au sommet de ces accumulations. Les éléments grossiers deviennent de plus en plus importants en profondeur.

Les deux horizons de surface qui ne sont pas gypseux, pauvres en azote total et non salins, sont moyennement alcalins, moyennement calcaires et ont des valeurs de CEC moyenne. Par contre, les encroûtements gypseux sont légèrement alcalins et renferment des quantités en gypse inversement proportionnelles à celles en calcaire total.

Les valeurs de la CE augmentent avec la profondeur pour atteindre 8.39 dS/m au niveau de l'horizon Bym3. Le faciès chimique de la solution du sol est de type sulfato-calcaïque pour tous les horizons du profil.

A saturation, le sol possède une très grande capacité de rétention en eau qui varie entre 46 % et 67 % d'humidité. Cette aptitude à retenir l'eau est enregistrée de façon très remarquable au niveau de l'horizon A2 qui a une teneur élevée en argile (28 %). La réserve utile ne varie pas beaucoup, elle oscille entre 6 % et 7 % d'eau.

Le sol a une très bonne stabilité structurale en surface et une conductivité hydraulique moyenne avec des valeurs inversement proportionnelles à celles des taux de gypse.

1.1.5.6. Classification du profil P5

❖ Classification WRB (2006)

- A1 est un premier horizon de surface.
- A2 est un deuxième horizon de surface.
- Bym1 est un encroûtement gypseux qui présente les caractéristiques suivantes :
 - Une épaisseur de 27 cm (≥ 15 cm).
 - Un taux de gypse de 75 % (≥ 50 %).
 - Le produit entre le taux de gypse et l'épaisseur de l'horizon ($75 * 27$) est de 2025 (≥ 150).
 - Une CE de 4.76 dS/m (≥ 4 dS/m).

Bym1 est donc un horizon hypergypsique (hp) et un horizon hyposalique (ws).

- Bym2 est aussi un encroûtement gypseux avec :
 - Une épaisseur de 40 cm (≥ 15 cm).
 - Un taux de gypse de 67 % (≥ 50 %).
 - Le produit entre le taux de gypse et l'épaisseur de l'horizon ($67 * 40$) est de 2680 (≥ 150).
 - Une CE de 7.87 dS/m (≥ 4 dS/m).

Bym2 est donc un horizon diagnostique hypergypsique (hp) et un horizon diagnostique hyposalique (ws).

- Bym3 ne rentre pas dans la classification puisqu'il se situe au-delà des 100 premiers cm de la surface du sol.

Le profil P5 est donc un :

« Hypergypsique Hyposalique Gypsisol ».

❖ Correspondance dans la classification américaine (USDA, 1999)

- Ordre : Aridisols
- Sous ordre : Gypsids
- Grand groupe : Calcigypsids
- Groupe : Xeric Calcigypsids

❖ Correspondance dans la classification française (CPCS, 1967)

- Classe : Sols calcimagnésiques
- Sous classe : Sols gypseux
- Groupe : Sol bruns gypseux
- Sous groupe : à encroûtement gypseux

1.2. Synthèse sur les profils étudiés

Les résultats obtenus montrent que sur les cinq profils étudiés, un répond en mêmes temps aux critères diagnostiques des gypsisols et solonchaks. C'est un profil classé dans le Groupe de Sols de Références des solonchaks. Il s'agit du profil P4 qui se situe en bas d'altitude de la mini-séquence étudiée. Sur les quatre profils restant, nous avons recensé quatre gypsisols références qui sont les suivants :

- Hypergypsique Hyposalique Calcique Gypsisol (Aridique) : elle correspond au profil P1.
- Hypergypsique Hyposalique Endogleyique Gypsisol : elle correspond au profil P2.
- Hypergypsique Hypogypsique Hyposalique Endogleyique Gypsisol : elle correspond au profil P3.
- Hypergypsique Hyposalique Gypsisol : elle correspond au profil P5.

Sur le plan morphologique, les profils étudiés (y compris le profil P4) sont constitués de deux couches bien distinctes. La première est représentée par le (s) horizon (s) de surface qui surmonte (ent) une deuxième couche constituée d'une succession d'encroûtements gypseux plus épaisse. La limite entre la première et la deuxième couche est très nette. Les horizons de surface sont dans l'ensemble d'épaisseur variables (de 9 à 33 cm), fragiles, poreux, meubles, organiques avec de faibles traces d'activité biologique. Ils sont de couleur sombre et d'une structure polyédrique sub-angulaire et montrent une vive effervescence à l'HCl. Les accumulations gypseuses sont épaisses (plus de 100 cm). Il s'agit d'une succession d'encroûtements gypseux de couleur nettement plus claire que celle des horizons de surface mais qui s'assombrie avec la profondeur (cas des profils P2, P3 et P4). La couleur ocre en profondeur correspondrait au phénomène d'hydromorphie du à des mouvements fluctuant de nappe. Les sommets des encroûtements gypseux sont plus durs que leur base. Ils sont compacts, de structure massive à éclats anguleux, non organiques, moins calcaire que les horizons de surface. Le gypse s'individualise parfois en profondeur sous forme de cristaux et de pseudomycéliums de gypse.

Les résultats des analyses révèlent que les profils sont légèrement à moyennement alcalins ($7.84 < \text{pH} < 8.37$) avec des faibles teneurs en matière organique et en azote total. Les teneurs en calcaire total sont plus fortes en surface et varient de 13 % à 25 %. Dans les accumulations gypseuses, elles sont moins fortes ($1.5 \% < \text{CaCO}_3 \% < 15 \%$) et augmentent avec la profondeur. De l'autre côté, les teneurs en gypse suivent une distribution contraire à celle du calcaire total. Les horizons de surface sont pauvres en gypse (teneurs inférieures à 5 %). A partir des encroûtements gypseux, les teneurs en gypse diminuent avec la profondeur. Elles varient de 82 % à 36 %. La CEC en surface a des valeurs moyennes (12 à 16 Cmol+/kg) et serait en relation avec les faibles teneurs en matière organique et de taux d'argiles. Les sols étudiés sont plus salés en profondeur qu'en surface. Les horizons de surface sont non à légèrement salés ($1 \text{ dS/m} < \text{CE} < 3 \text{ dS/m}$) tandis que pour les encroûtements gypseux, ils sont légèrement à extrêmement salés ($3 \text{ dS/m} < \text{CE} < 21 \text{ dS/m}$). Les profils P3 et P4 sont les profils qui ont les valeurs les plus élevées de CE. Les faciès chimiques des solutions du sol de la

majorité des horizons saliques sont sulfato-calciques et sulfato-sodiques. Le faciès chimique chloruro-sodique marque uniquement le profil P4. La texture en surface est limoneuse, sablo-argilo-limoneuse à sablo-limoneuse. En profondeur, la séparation à sec montre que la fraction sableuse est la plus dominante dans tous les encroûtements gypseux (83 % < fraction sableuse < 54 %). La stabilité structurale est très bonne à excellente pour tous les horizons de surface. La vitesse d'infiltration de l'eau est moyenne à assez rapide (2.96 cm/h < indice K < 11 cm/h) en surface et assez lente à moyenne (1.13 cm/h < indice K < 5.24 cm/h) au niveau des encroûtements gypseux. Cette vitesse d'infiltration est inversement proportionnelle aux taux de gypse. A saturation, les horizons de surface retiennent une quantité d'eau qui varie entre 39 % et 67 % d'eau. Les encroûtements gypseux en retiennent que 46 % à 65 %. A la capacité au champ, la quantité d'eau retenue est de 14 % à 36 % en surface et de 19 % à 36 % en profondeur. Au point de flétrissement permanent, les horizons de surface retiennent de 8 % à 30 % d'eau et les encroûtements gypseux entre 9 % 17 % d'eau. La réserve utile est de l'ordre 6 % à 9 % pour les horizons de surface et de 6 % à 17 % pour les encroûtements gypseux.

2. Traitements statistiques de la variable taux de gypse

Dans ce qui suit, nous présenterons les traitements statistiques relatifs à la variable taux de gypse. Ces traitements concernent des statistiques descriptives pour chaque catégorie d'horizon (H1, H2 et Hp). Par la suite, des relations sont établies entre la variable à étudier (taux de gypse) et d'autres variables du sol. Nous rappelons que les horizons de surfaces (H1) sont les horizons se trouvant juste au dessus des accumulations gypseuses (c'est-à-dire les horizons A1 et A2 des profils P1 et P5 et les horizons A des profils P2, P3 et P4), les horizons de sub-surface (H2) représentent le premier horizon de chaque accumulation gypseuse des profils étudiés (c'est-à-dire les horizons Bym1 de chaque profil étudiés) et les horizons de profondeur (Hp) représentent le reste des encroûtements gypseux.

2.1. Statistiques descriptives

Le tableau XVIII présente les statistiques descriptives à un niveau de confiance de 95 % de la variable taux de gypse pour chaque catégorie d'horizon.

Tableau XVIII : Statistiques descriptives de la variable taux de gypse

Paramètres statistiques	H1	H2	Hp
Nombre d'échantillons	7	5	14
Moyenne	1,83	73,9	60,59
Ecart-type	1,29	9,67	11,38
Minimum	0,33	57,87	36,46
Maximum	4,44	81,92	77,68
Coefficient de variation (CV %)	70	13	18

L'analyse statistique montre que les horizons de surface sont faiblement gypseux (environ 2 % de gypse) alors que les horizons de sub-surface (74 % de gypse) et de profondeur (60 % de gypse) le sont extrêmement.

Le tableau montre également que les teneurs en gypse des horizons de surface limitées par les valeurs de 0.33 % et 4.44 % ont une variabilité très élevée (CV = 70 %). Par contre, les horizons de sub-surface et de profondeur sont faiblement à modérément variables (les CV sont de l'ordre de 13 % et 18 % pour les horizons H2 et Hp). Les résultats signifient que l'accumulation du gypse concerne particulièrement les horizons de sub-surface et que les teneurs en gypse ont tendance à diminuer légèrement en profondeur.

La comparaison des moyennes des teneurs en gypse entre les couples d'horizons est représentée dans le Tableau XIX.

Tableau XIX: Comparaison des moyennes des taux de gypse entre les couples des trois catégories d'horizons

Couples d'horizons	H1 et H2	H1 et Hp	H2 et Hp
t- calculé	19,8533	13,44107	2,32176
probabilité	2,30 E ⁻⁹	3,73 E ⁻¹¹	0,03292
signification	THS	THS	S

S : Relation significative. THS : Relation très hautement significative.

Les résultats du tableau XIX révèlent que la différence entre les différents couples d'horizons est significative. Un résultat confirmé par le profil gypseux moyen (Figure 16) qui paraît hétérogène. Effectivement, il y a une accumulation nettement visible des teneurs en gypse dans les horizons de sub-surface avec une teneur moyenne de 74 % suivie de l'horizon de profondeur qui accumule en moyenne 60 % de gypse et en dernier vient l'horizon de surface H1 qui n'en contient que 2 % en moyenne. Djili (2000) a trouvé la même distribution des teneurs en gypse dans le profil en climat semi-aride, le profil moyen étant de type H2>Hp>H1 avec une nette concentration des teneurs en gypse dans les horizons de sub-surface. Toutefois, les teneurs trouvées par l'auteur sont nettement moins importantes dans les horizons de sub-surface et de profondeur (3.46 % en H1, 6.22 % en H2 et 4.76 % en Hp).

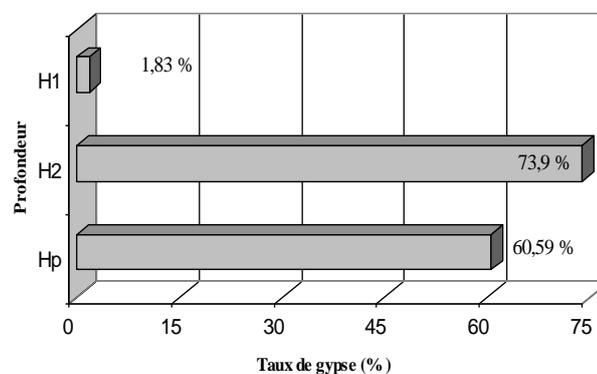


Figure 16 : Profil gypseux moyen des sols étudiés

Dans le détail, les 05 profils gypseux représentés dans la figure 17 ont la même allure générale du profil moyen. Les teneurs en gypse ont tendance à augmenter au niveau des horizons médians. Les plus grandes teneurs se situent en générale à une profondeur comprise entre 25 et 75 cm de profondeur. Le gypse plus abondant dans les horizons médians provient de l'effet de la remontée capillaire due à la forte évaporation qui caractérise la région (1290 mm/an).

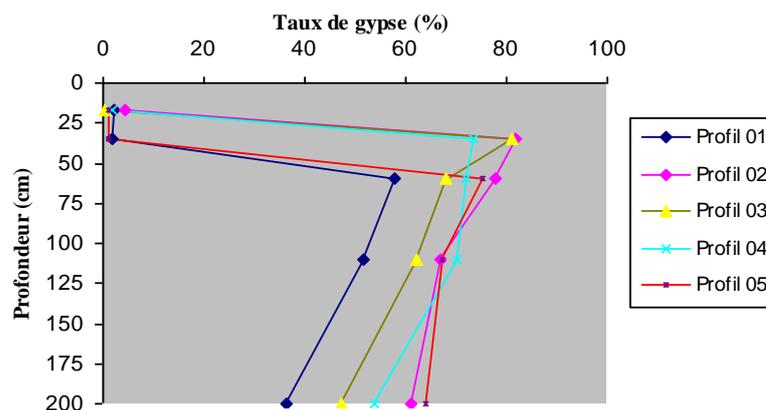


Figure 17 : Profils gypseux des sols étudiés

2.2. Corrélations entre le gypse et les autres paramètres du sol

Nous rappelons que les corrélations sont faites entre la variable taux de gypse et les autres paramètres du sol qui constituent avec elle un nombre de couples d'échantillons égales à 26. Vu que les sols étudiés se subdivisent en deux couches bien distinctes, une couche qui représente les horizons de surface, meubles, fragiles, poreux et peu pourvus en gypse, et une couche qui représente les encroûtements gypseux, compacts, massifs, peu poreux, non organiques et très riches en gypse, nous a conduit à étudier les corrélations séparément (horizons de surface et encroûtements gypseux) sans prendre en considération l'ensemble des horizons pour ne pas dénaturer statistiquement la morphologie générale des sols étudiés. Dans toutes les corrélations étudiées, la variable taux de gypse est la variable explicative. Les résultats statistiques des différentes corrélations de la variable à étudier et les autres paramètres du sol sont représentés dans le tableau XX.

Tableau XX : Résultats des corrélations linéaires entre le gypse et les autres paramètres du sol

Corrélations	Approche	Formule de la régression linéaire	P	R	Signification
Gypse - pH	Horizons de surface	$\text{pH} = - 0.00571 \text{ gypse (\%)} + 8.04903$	0.9294	-0.04162	NS
	Encroûtements	$\text{pH} = - 0.00185 \text{ gypse (\%)} + 8.0683$	0.17212	-0.32675	NS
Gypse – calcaire total	Horizons de surface	$\text{Calcaire total (\%)} = - 2.8567 \text{ gypse (\%)} + 25.39021$	0.05564	-0.74308	NS
	Encroûtements	$\text{Calcaire total (\%)} = - 0.30849 \text{ gypse (\%)} + 27.45229$	<0.0001	-0.86904	THS
Gypse - CE	Horizons de surface	$\text{CE (dS/m)} = - 0.03544 \text{ gypse (\%)} + 2.65925$	0.86692	-0.07863	NS
	Encroûtements	$\text{CE (dS/m)} = - 0.14487 \text{ gypse (\%)} + 19.77868$	0.25192	-0.27645	NS
Gypse – SO_4^-	Horizons de surface	$\text{SO}_4^- \text{ (meq/l)} = - 2.01566 \text{ gypse (\%)} + 34.73585$	0.39073	-0.38726	NS
	Encroûtements	$\text{SO}_4^- \text{ (meq/l)} = 0.11124 \text{ gypse (\%)} + 44.22894$	0.80664	0.06019	NS
Gypse – Ca^{++}	Horizons de surface	$\text{Ca}^{++} \text{ (meq/l)} = 0.8989 \text{ gypse (\%)} + 35.72387$	0.69915	0.18012	NS
	Encroûtements	$\text{Ca}^{++} \text{ (meq/l)} = - 0.15436 \text{ gypse (\%)} + 70.97238$	0.70943	-0.09152	NS
Gypse-Humidité au pF0.	Horizons de surface	$\text{H pF 0 (\%)} = - 2.94855 \text{ gypse (\%)} + 55.24142$	0.33564	-0.42995	NS
	Encroûtements	$\text{H pF 0 (\%)} = 0.16223 \text{ gypse (\%)} + 41.86416$	0.06877	0.42628	NS
Gypse-Humidité au pF2.5	Horizons de surface	$\text{H pF 2.5 (\%)} = - 3.20561 \text{ gypse (\%)} + 30.69257$	0.14903	-0.60621	NS
	Encroûtements	$\text{H pF 2.5 (\%)} = 0.26673 \text{ gypse (\%)} + 10.55702$	4.83503E ⁻⁴	0.72191	THS
Gypse-Humidité au pF4.2	Horizons de surface	$\text{H pF 4.2 (\%)} = - 2.76907 \text{ gypse (\%)} + 22.65532$	0.22136	-0.52974	NS
	Encroûtements	$\text{H pF 4.2 (\%)} = 0.36323 \text{ gypse (\%)} - 4.55439$	<0.0001	0.89419	THS
Gypse – K henin	Horizons de surface	$\text{K henin} = 1.82608 \text{ gypse (\%)} + 2.17877$	0.00626	0.89648	HS
	Encroûtements	$\text{K henin} = - 0.08503 \text{ gypse (\%)} + 8.30461$	0.00107	-0.69016	HS

Toutes les régressions linéaires concernant les horizons de surface sont, du point de vue statistique, non significatives (exception faite pour la corrélation taux de gypse–k henin). Par ailleurs, le nombre de couples des horizons de surface n'est que de 7. La représentation graphique des différentes corrélations se limite donc uniquement aux horizons représentant les encroûtements gypseux.

2.2.1. Relation gypse – pH

La relation entre les teneurs en gypse et les valeurs du pH est représentée par la figure 18. Du point de vue statistique (tableau XX), elle est non significative ($p = 0.17$), faible et négative ($r = -0.32$). L'augmentation des teneurs en gypse induit donc une diminution des valeurs de pH. Ces statistiques sont confirmées par la représentation graphique de la corrélation illustrée par la figure correspondante. Le nuage de points montre que l'augmentation des teneurs en gypse s'accompagne globalement par une diminution des valeurs de pH. Ceci serait expliqué par le fait que le gypse est un sel qui résulte d'une base faible $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et d'un acide fort (H_2SO_4). Ce qui fait penser que le gypse (à l'état pur) pourrait être considéré comme acidifiant du sol. Toutefois, la solubilité du gypse augmente un peu en milieu acide par suite de fixation des ions SO_4^- par les ions H^+ et formation des ions HSO_4^- . Ce qui correspond à des conditions de précipitation moins complète comparativement à un pH neutre ou alcalin (Pouget, 1968). Une situation qui ne guère intervenir car selon Djili (2000), même si la relation entre les deux paramètres est statistiquement significative, il n'y a aucune tendance particulière à la variation des valeurs de pH puisque quelles que soient les teneurs en gypse, les valeurs de pH sont toujours supérieures à 7.

Les valeurs de pH pour l'ensemble des horizons des profils se trouvent comprises entre 7.84 et 8.37. Nos résultats concordent avec ceux d'Ouamer-Ali (2009) et Boyadgiev et Verheye (1996) qui ont trouvé une gamme préférentielle de variation des valeurs de pH en fonction de la variation des taux de gypse allant de 7.5 à 8.4.

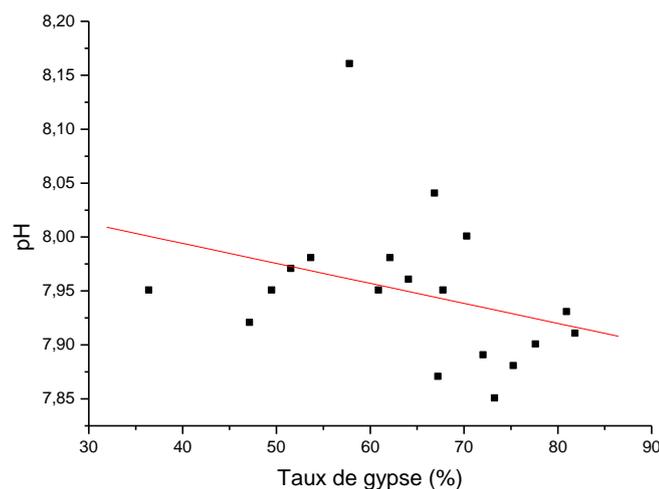


Figure 18 : Relation entre le gypse et le pH pour les encroûtements gypseux

2.2.2. Relation gypse – Calcaire total

La relation entre les teneurs en gypse et celles du calcaire total est représentée dans la figure 19. Les statistiques (tableau XX) montrent que pour les faibles teneurs en gypse (horizons de surface où les teneurs en gypse sont inférieures à 5 %), la relation est non significative ($p = 0.05$) et négative ($r = - 0.74$). Tandis que pour les fortes teneurs en gypse (encroûtements gypseux ayant des taux en gypse supérieurs à 36 %), la relation est très hautement significative ($p < 0.0001$), très forte et négative ($r = - 0.86$). Ceci signifie que l'effet négatif des teneurs en gypse sur les quantités de calcaire total ne s'expriment qu'aux niveaux des fortes teneurs en gypse. Plusieurs études concernant cette relation (Boyedgiev, 1974 ; Vieilleffon, 1976 ; Djili, 2000 ; Berkal, 2006 ; Ouamer-Ali, 2009) confirment les résultats obtenus dans cette étude.

L'analyse du nuage de points montre que la relation respecte le rapport 100/100. Aussi, l'augmentation de l'un des deux paramètres s'accompagne dans la majorité des cas par une diminution de l'autre paramètre de la relation étudiée.

A partir de l'ensemble des données des deux paramètres, nous pouvons tirer les observations suivantes :

- Pour les teneurs en gypse inférieures à 5 %, les teneurs en calcaire total sont comprises entre les valeurs de 13 % et 25 %.
- Pour les teneurs en gypse supérieures à 70 %, les taux de calcaire se situent entre 1.5 % et 3.5 %.
- Pour les quantités de gypse comprises entre 36 % et 70 %, les teneurs du calcaire total sont limitées par les valeurs de 6.5 % et 16 %.

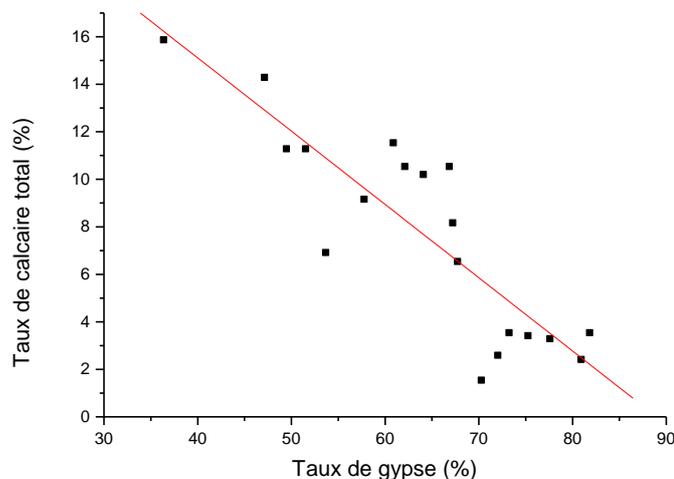


Figure 19 : Relation entre le gypse et le calcaire total pour les encroûtements gypseux

2.2.3. Relation gypse – Conductivité électrique

La corrélation taux de gypse - conductivité électrique est sur la plan statistique (tableau XX) non significative et négative pour les faibles teneurs en gypse ($p = 0.86$; $r = -0.07$) ainsi que pour les fortes teneurs ($p = 0.25$; $r = -0.27$). Ceci implique que l'augmentation des teneurs en gypse s'accompagne d'une diminution des valeurs de la conductivité électrique.

Le nuage de points représenté dans la figure 20 ne permet pas de faire ressortir un effet particulier de la variation des valeurs de la conductivité électrique en fonction de la variation des teneurs en gypse. La part de variation des valeurs de la conductivité électrique par la variation des taux de gypse ne représente que 7.5 %. Ceci suggère d'autres facteurs du sol pourraient avoir plus d'effet sur la variation de la conductivité électrique du sol. Il s'agit spécialement de la position topographique des profils étudiés (les profils se situant en bas de pente sont plus salés que ceux qui se situent à l'amont). Egalement, les horizons qui se situent en profondeur sont plus salés que ceux de surface.

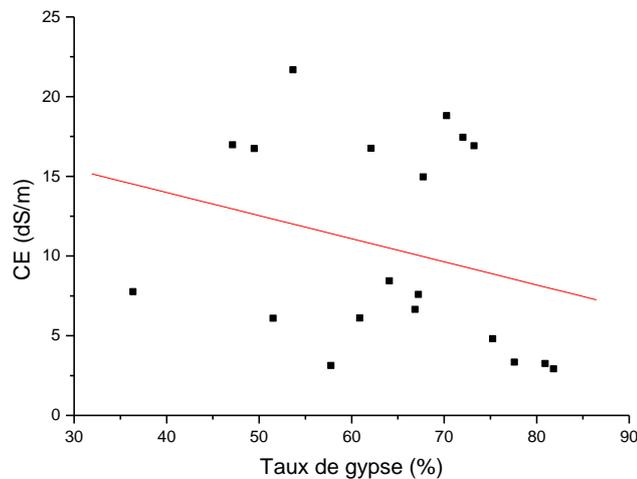


Figure 20 : Relation entre le gypse et la conductivité électrique de la solution du sol pour les encroûtements gypseux

2.2.4. Relation gypse – SO_4^- de la solution du sol

La représentation graphique de la relation entre les taux de gypse et les sulfates de la solution du sol est illustrée dans la figure 21. Les statistiques indiquent que la relation est non significative et négative ($p = 0.39$; $r = -0.38$) pour les faibles teneurs en gypse et non significative et positive ($p = 0.8$; $r = 0.06$) pour les fortes teneurs en gypse (tableau XX).

Le nuage de points représenté dans la figure 21 est assez dispersé et ne montre pas une tendance particulière de l'effet des teneurs en gypse sur la quantité de sulfates dans la solution du sol. L'ajustement linéaire confirme cette constatation puisque la droite tend vers une position parallèle avec l'axe des abscisses. Ceci est illustré par le faible coefficient de corrélation qui montre que seulement 0.36 % des sulfates de la solution du sol seraient originaires du gypse présent dans le sol. Ceci supposerait la dissolution d'autres sources de sulfates dans le sol autres que le gypse tel que la Mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), la Thénardite (Na_2SO_4) et l'Epsomite ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).

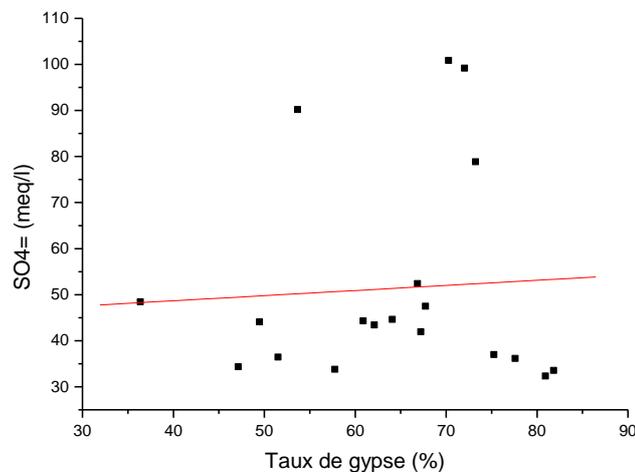


Figure 21 : Relation entre les taux de gypse et les sulfates de la solution du sol pour les encroûtements gypseux

2.2.5. Relation gypse – Ca^{++} de la solution du sol

L'étude de l'évolution du calcium de la solution du sol en fonction de l'évolution des teneurs en gypse est presque similaire à celle des sulfates de la solution du sol. Les statistiques montrent qu'elle est non significative et positive pour les horizons de surface ($p = 0.69$; $r = 0.18$) et non significative et négative pour les encroûtements gypseux ($p = 0.7$; $r = -0.09$).

Le nuage de points représenté dans la figure 22 assez dispersé ne donne aucune tendance particulière de la variation du calcium de la solution du sol en fonction de la variation des teneurs en gypse. Ceci est confirmé par l'ajustement linéaire presque parallèle à l'axe des abscisses et par la faible valeur du coefficient de corrélation qui montre que le calcium de la solution du sol peut avoir d'autres origines que le gypse tel que la dissolution du calcaire (CaCO_3) (Halitim, 1988) ou à partir d'interactions liées à la nature du milieu, avec la présence de CaCl_2 et de CaHCO_3 (Carter et Inskeep, 1988 et Servant, 1975 cités par Ouamer-Ali, 2009).

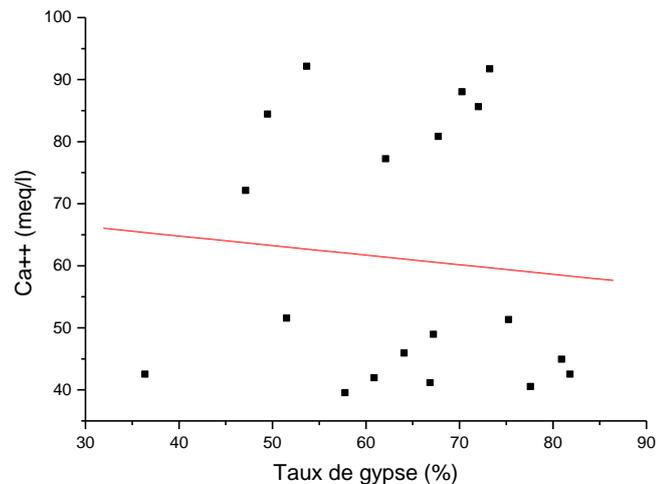


Figure 22 : Relation entre les taux de gypse et le calcium de la solution du sol pour les encroûtements gypseux

2.2.6. Relation gypse – Humidité à pF 0

L'étude de la relation entre les taux de gypse et les teneurs en eau à saturation montre qu'elle est non significative ($p = 0.33$) et négative ($r = -0.42$) pour les faibles teneurs en gypse et non significative ($p = 0.06$) et positive ($r = 0.42$) pour les fortes teneurs en gypse (tableau XX). La capacité de rétention en eau à saturation est donc statistiquement indépendante des teneurs en gypse.

Malgré ces statistiques, l'analyse du nuage de points des fortes teneurs en gypse représenté dans la figure 23 montre que les points ne sont pas trop dispersés et que l'augmentation des taux de gypse s'accompagne généralement par celles de l'humidité à pF0. Cette tendance est confirmée par l'ajustement linéaire de la relation qui montre que l'humidité à la saturation est corrélée positivement aux taux de gypse. Ce résultat signifie que les horizons les plus gypseux sont ceux qui ont tendance à retenir le plus d'eau à saturation.

Selon les résultats obtenus, quand les teneurs en gypse sont inférieures à 5 %, l'humidité du sol à saturation se trouve comprise entre 39 % et 67 %. A des teneurs en gypse supérieures à 36 %, la capacité de rétention de l'eau à pF0 est située entre 46 % et 65 % d'eau.

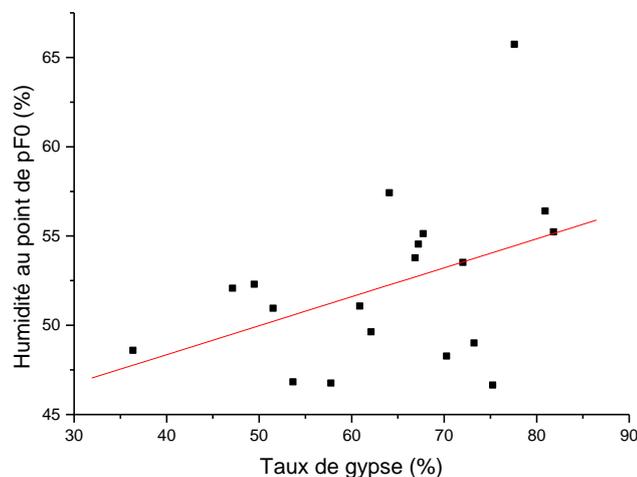


Figure 23 : Relation entre les taux de gypse et l'humidité au pF0 pour les encroûtements gypseux

2.2.7. Relation gypse – Humidité à pF 2.5

A la capacité au champ, la relation entre les taux de gypse et l'humidité à pF2.5 est statistiquement non significative et négative pour les faibles teneurs en gypse ($p = 0.14$; $r = -0.6$) et très hautement significative et positive ($p = 4.83 \cdot 10^{-4}$; $r = 0.72$) pour les fortes teneurs en gypse (tableau XX). Ceci signifie que la rétention en eau à la capacité au champ est fortement liée aux fortes teneurs en gypse.

La figure 24 illustre cette relation. L'analyse du nuage de points montre clairement que l'augmentation des fortes teneurs en gypse est accompagnée dans de nombreux cas par celles de la capacité de rétention en eau à pF2.5. La valeur élevée du coefficient de corrélation confirme la forte relation qui lie les deux paramètres. La part de la variation des teneurs en eau en fonction de celle des taux de gypse est de l'ordre de 51 %.

Cette relation permet de conclure que les fortes teneurs en gypse influencent de façon très significative le pouvoir de rétention d'eau à ce pF. Par contre, les faibles teneurs en gypse n'ont pas un effet sur la rétention en eau à ce niveau de succion. Autrement dit, la relation à pF2.5 s'exprime beaucoup plus quand les teneurs en gypse sont fortes.

On note qu'aux faibles teneurs de gypse, ces sols retiennent une quantité d'eau variant entre 14 % et 36 %. Pour les fortes teneurs en gypse, la rétention eau varie de 20 % à 36 %.

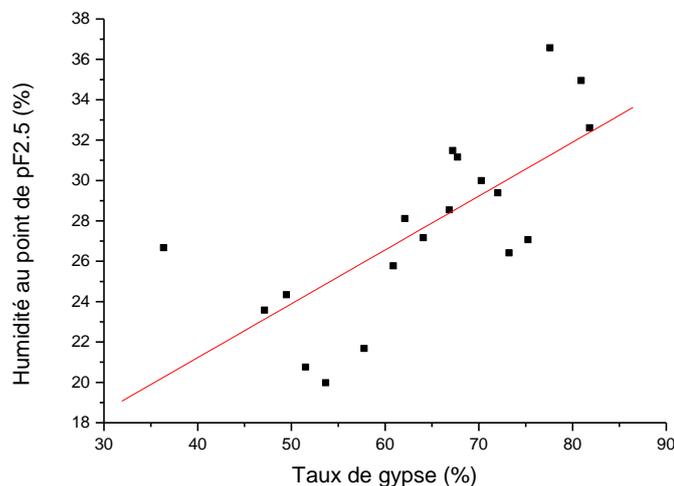


Figure 24 : Relation entre les taux de gypse et l'humidité au pF2.5 pour les encroûtements gypseux

2.2.8. Relation gypse – humidité à pF 4.2

La relation entre les teneurs en gypse et l'humidité au point de flétrissement permanent (pF4.2) est semblable à celle du pF2.5. Le tableau XX montre qu'elle est non significative et positive pour les faibles teneurs en gypse ($p = 0.22$; $r = -0.52$) et très hautement significative et positive pour les fortes teneurs en gypse ($p < 0.0001$; $r = 0.894$).

Le nuage de points très serré autour de la droite de régression linéaire représenté dans les figures 25 montre que la que l'augmentation des fortes teneurs en gypse s'accompagne par une augmentation de la capacité de rétention en eau à pF4.2. La valeur très élevée du coefficient de corrélation ($r = 0.89$) montre la forte liaison qui lie les deux paramètres.

En général, quand les teneurs en gypse sont inférieures à 5 %, les teneurs en eau à pF4.2 varient de 8 % à 30 %. A des teneurs supérieures à 36 % de gypse, la capacité de rétention en eau est limitée par 9 % et 27 %.

En définitive, la rétention en eau au point de flétrissement permanent est en relation directe avec les fortes teneurs en gypse. L'augmentation des valeurs de ces dernières induit l'augmentation des teneurs en eau retenues à pF4.2.

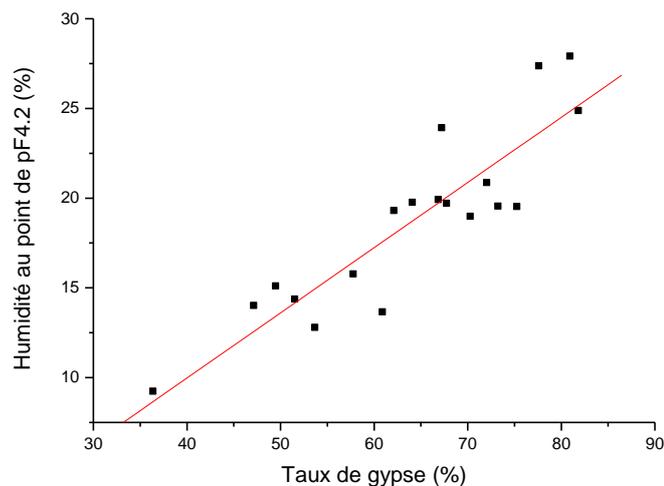


Figure 25 : Relation entre les taux de gypse et l'humidité au pF4.2 pour les encroûtements gypseux

Selon les résultats obtenus sur la rétention en eau à tous les niveaux de succion, la rétention en eau du sol est en relation avec les teneurs en gypse dans le sol. Cet effet du gypse se manifeste quand les taux de gypse sont très élevés (teneurs représentant les encroûtements gypseux des profils étudiés). Les faibles teneurs en gypse ne contribuent pas de façon significative à la rétention en eau du sol qui serait liée principalement à d'autres paramètres du sol. Au niveau des encroûtements gypseux, le gypse participe à la rétention en eau aux pF2.5 et pF4.2. Par contre, à saturation, le gypse semble ne pas avoir un effet significatif sur la rétention en eau du sol.

2.2.9. Relation gypse – Conductivité hydraulique

L'étude de cette relation pour les horizons de surface et les encroûtements gypseux est statistiquement hautement significative ($p = 0.006$; $p = 0.00107$) pour les faibles et les fortes teneurs en gypse. La tendance linéaire est positive pour les faibles teneurs en gypse ($r = 0.89$). Tandis que pour les fortes teneurs, elle est négative ($r = - 0.69$) (tableau XX).

Cette corrélation est représentée au niveau de la figure 26. L'analyse du nuage de points montre que pour la majorité des points, l'augmentation des teneurs en gypse induit une diminution de la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol.

Selon les teneurs en gypse, le gypse peut donc avoir deux effets opposés sur la conductivité hydraulique du sol. Les faibles teneurs en gypse favorisent la conductivité hydraulique, et les fortes teneurs ont en un effet inverse.

Aussi, la vitesse d'infiltration de l'eau au niveau des horizons de surfaces est généralement plus élevée et peut aller jusqu'à 11 cm/heure. Par contre, au niveau des encroûtements gypseux, cette vitesse est relativement ralentie.

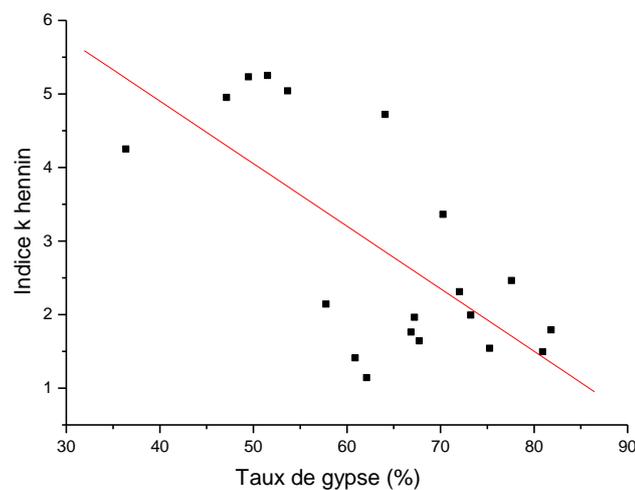


Figure 26 : Relation entre les taux de gypse et conductivité hydraulique K (cm/heure)

3. Etude de la base de données

La deuxième partie de cette étude consiste en la valorisation et l'étude d'une base de données relative aux sols d'Algérie. L'objectif visé ici est de recenser, localiser et de déterminer les gypsisols références d'Algérie. Nous présenterons d'abord la structuration globale de la base de données vis-à-vis des différentes variables qui la constituent (variables quantitatives et qualitatives). Par la suite, nous effectuerons des traitements statistiques de la variable «taux de gypse» en considérant d'abord l'ensemble des horizons et ensuite uniquement les horizons diagnostiques des gypsisols. A la fin, les sols références recensés en Algérie seront regroupés dans un système d'organisation hiérarchisé et localisés dans la carte d'Algérie.

Pour la conception de la base de données relative aux gypsisols, nous nous sommes intéressés aux critères diagnostiques de la WRB (2006) qui sont le taux de gypse, l'épaisseur de l'horizon gypseux et le produit entre ces deux paramètres. Ainsi, 122 profils de la base répondent aux critères de détermination des gypsisols. Lors de la classification de ces profils, il s'est avéré que les valeurs de la conductivité électrique (CE) des horizons de quelques profils est extrêmement élevée. Ces profils répondent non seulement aux critères diagnostiques des gypsisols, mais aussi à ceux des solonchaks. Il a fallu donc éliminer ces profils puisqu'ils sont considérés comme solonchaks car, ils sont déterminés bien avant les gypsisols dans la clé de classification de la WRB (2006). De ce fait, la base de données contient 73 gypsisols qui vont faire l'objet des différents traitements qui vont suivre.

Taux de remplissage de la base de données

Nous avons calculé les taux de remplissage en divisant le nombre d'horizons renseignés de chaque variables sur le nombre total d'horizons qui est égale à 320 horizons, le résultat est multiplié par le chiffre 100. Ce taux est calculé pour les 35 données analytiques ainsi que les 13 données descriptives. Les résultats sont présentés par ordre décroissant dans les tableaux XXI et XXII.

Tableaux XXI : Taux de remplissage pour les variables analytiques de la base

Variables	Nombres d'horizons renseignés	Taux de remplissage (%)	Variables	Nombres d'horizons renseignés	Taux de remplissage (%)
Pluviométrie (mm)	320	100	Na+éch/T	142	44.4
pH	293	91.6	HCO ₃ ⁻ (meq/l)	138	43.1
CaSO ₄ 2H ₂ O (%)	281	87.8	Na ⁺ (meq/100g)	137	42.8
CaCO ₃ (%)	285	89.1	Limon (%)	129	40.3
CE (dS/m)	248	77.5	C/N	122	38.1
Sable (%)	201	62.8	Argile (%)	116	36.2
MO (%)	184	57.5	N (%)	111	34.7
SAR	183	57.2	ESP	86	26.9
Mg ⁺⁺ (meq/l)	183	57.2	Mg ⁺⁺ (meq/100g)	47	14.7
Na ⁺ (meq/l)	175	54.7	CO ₃ ⁼ meq/l	30	9.4
Ca ⁺⁺ (meq/l)	173	54.1	Humidité à pF4,2(%)	26	8.1
K ⁺ (meq/l)	172	53.8	Ca ⁺⁺ meq/100g	25	7.8
Cl ⁻ (meq/l)	164	51.3	Humidité à pF2,5(%)	14	4.4
Cl/So ₄	163	50.9	Dr	14	4.4
SO ₄ ⁼ (meq/l)	163	50.9	K hennin	5	1.6
K ⁺ (meq/100g)	143	44.7	Da	4	1.3
CEC (meq/100g)	143	44.7	Is	2	0.6
Mg ⁺⁺ +Na ⁺ /T	142	44.4	/	/	/

Tableaux XXII : Taux de remplissage pour les variables descriptives de la base

Variables	Nombres d'horizons renseignés	Taux de remplissage (%)
Profondeur	320	100
Couleur	295	92.9
Texture	264	82.5
Autres caractéristiques	237	74.1
Formes d'accumulations du gypse	212	66.3
Structure	206	64.4
Humidité	164	51.3
Calcaire (effervescence à HCl)	113	35.3
Compacité	111	34.7
Porosité	100	31.3
Nature de la MO	91	28.4
Friabilité	52	16.3
Plasticité	31	9.7

En se basant sur les normes utilisées par Djili (2000) représentées dans le tableau XXIII, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Seules 02 variables sur 35 variables analytiques, soit 5.71 % de l'ensemble des variables analytiques, sont très bien renseignées. Il s'agit de la pluviométrie et du pH du sol avec des taux de remplissage de 100 % et 92 %.
- La teneur en gypse, le taux de calcaire total et la conductivité électrique, soit 8.57 % des variables analytiques sont relativement bien renseignés avec des taux de remplissage comprises entre 77 % et 88 %.
- Dix autres variables (28.57 %) sont moyennement renseignées. Le taux de remplissage varie de 50 % et 63 %.

- Le reste des variables qui représente plus que la moitié des variables de la base de données (57.14 %) sont insuffisamment renseignées. Ici, le taux de remplissage est compris entre 45 % et 0.5 %.

Pour les variables descriptives, le tableau XXII montre que :

- La profondeur et la couleur (15.38 % de l'ensemble des variables analytiques) sont des variables très bien renseignées avec des taux de remplissage de 100 % et 93 %.
- Deux autres variables sont relativement bien renseignées (la texture et autres caractéristiques qui ont des taux de remplissage de 82 % et 74 %).
- Les formes d'accumulation du gypse, la structure et l'humidité, soit 23.07 % des variables descriptives sont moyennement renseignées. Le taux de remplissage est compris entre 51 % et 67 %.
- Les six variables qui restent (46.15 % de l'ensemble des variables analytiques) sont insuffisamment renseignées. Le taux de remplissage est compris entre 9 % et 36 %.

Tableau XXIII : Renseignement des variables selon le taux de remplissage de la base

Taux de remplissage (%)	Renseignement
> 90 %	Variables très bien renseignées
70 % – 90 %	Variables relativement bien renseignées
50 % – 70 %	Variables moyennement renseignées
< 50 %	Variables insuffisamment renseignées

Il ressort de ce résultat que les différentes variables, qu'elles soient analytiques ou descriptives, ne sont pas uniformément renseignées. L'information dans la base de données est donc hétérogène. Cependant, on peut considérer que l'information nécessaire dans le cadre de cette étude est acceptable. En effet, mis à part la CEC qui est insuffisamment renseignée, la profondeur, le taux de gypse, la salinité et le calcaire total sont bien à très bien renseignés.

Analyse statistique de la variable taux de gypse

Les analyses statistiques sont effectuées pour la variable analytique « taux de gypse » selon deux approches différentes. Une approche relative à tous les horizons des gypsisols pris dans leur globalité et par catégorie d'horizons (H1, H2 et Hp). L'autre approche est relative uniquement aux horizons diagnostiques gypsiques des gypsisols de la base de données.

Approche globale

L'approche globale signifie qu'il n'y a pas de distinction entre horizons diagnostiques gypsiques et horizons non diagnostiques. Le tableau XXIV montre les statistiques descriptives relatives à la donnée taux de gypse sur 281 horizons. L'étude est faite dans un premier temps pour l'ensemble des horizons des gypsisols, pris tous ensemble. En deuxième lieu, les

horizons sont regroupés en horizons de surface (H1), de sub-surface (H2) et de profondeur (Hp). Nous rappelons que les horizons de surfaces (H1) représentent le premier horizon dans le profil, l'horizon de sub-surface (H2) est l'horizon se trouvant juste en dessous de l'horizon H1 et l'horizon de profondeur (Hp) représente l'ensemble des horizons à partir du troisième horizon dans le profil.

Tableau XXIV : Paramètres descriptifs de la variable « taux de gypse » pour l'ensemble des horizons ainsi que pour chaque catégorie d'horizon

Paramètres descriptifs	Ensemble des horizons	H1	H2	Hp
Nombre d'échantillons	281	57	63	161
Moyenne	21.55	22.92	24.2	20.03
Médiane	15.8	20.6	15.64	14.88
Ecart-type	20.69	21.62	23.4	19.18
Minimum	0	0	0	0
Maximum	96	96	93	95
Coefficient de variation (CV %)	96	94	96	95

Le tableau XXIV fait apparaître que les gypsisols de la base de données sont dans leur ensemble fortement gypseux (la teneur moyenne en gypse est de 21 %). Toutefois, les statistiques révèlent que certains horizons des gypsisols peuvent être complètement dépourvus de gypse (0 %), alors que d'autres peuvent être constitués essentiellement par cet élément (96 % de gypse). Par ailleurs, plus de 50 % des horizons étudiés ont des teneurs en gypse supérieures à 15 %. Ces résultats sont confirmés par le coefficient de variation (CV %) égale à 96 % et qui montre que les valeurs du taux de gypse présentent une variabilité très élevée et sont hétérogènes dans la base de données.

En ce qui concerne les données pour chaque catégorie d'horizons, les moyennes en gypse montrent une très légère augmentation des taux de gypse au niveau des horizons de sub-surface (les teneurs moyennes sont de 23 %, 24 % et 20 % respectivement pour H1, H2 et Hp). Ce schéma de distribution des teneurs en gypse ne représente qu'une tendance générale puisque les valeurs des taux de gypse évoluent dans une gamme assez large limitée par les valeurs de 0 % et 96 % pour les H1, 0 % et 96 % pour les H2 et 0 % et 95 % pour les Hp. Aussi, la moitié des échantillons présentent des teneurs supérieures à 20 %, 15 % et 14 % respectivement pour H1, H2 et Hp. Les coefficients de variation supérieurs à 94 % confirment l'hétérogénéité très élevée de la distribution des teneurs en gypse pour chaque catégorie d'horizon.

Dans l'ensemble, nous pouvons dire que les teneurs en gypse qu'elles soient prises pour l'ensemble des horizons ou pour chaque catégorie d'horizon sont très variables dans la base de données. Aussi, le profil moyen de cette base est fortement gypseux et présente une répartition homogène avec une très légère tendance à l'augmentation des teneurs en gypse dans l'horizon de sub-surface.

Approche par horizons diagnostiques

Cette approche d'étude par horizons diagnostiques est adoptée pour ne pas sortir du concept des gypsisols établie par la WRB (2006). Il y a lieu de rappeler qu'un gypsisol doit avoir soit un horizon diagnostique gypsique soit un horizon diagnostique pétrogypsique dans les 100 premiers centimètres de la surface du sol. Ces deux horizons sont définis comme suit :

- une teneur en gypse supérieure ou égale à 5 % (en poids) et à 1 % (en volume) pour les deux horizons diagnostiques gypsiques et pétrogypsiques,
- une épaisseur supérieure ou égale à 15 cm pour les horizons diagnostiques gypsiques et à 10 cm pour les horizons diagnostiques pétrogypsiques,
- un produit entre le taux de gypse et l'épaisseur de l'horizon supérieur ou égale à 150 pour les horizons diagnostiques gypsiques,
- un degré de cimentation élevé pour les horizons diagnostiques pétrogypsiques de façon à ce que le morceau de cet horizon ne se délite pas dans l'eau et que les racines des végétaux ne peuvent pas y pénétrer.

Dans cette approche nous n'avons pas considéré le pourcentage de 1 % de gypse pris en volume pour l'identification de ces horizons diagnostiques car l'information est non disponible au niveau de la base. De ce fait, nous nous sommes basés uniquement sur le pourcentage pris en poids des teneurs en gypse (5 %). Pour la même raison, le degré de cimentation du gypse n'a pas été pris en considération pour différencier un horizon diagnostique pétrogypsique d'un horizon diagnostique gypsique. Pour cela, nous n'avons fait ressortir que les horizons diagnostiques gypsiques de la base de données. Le tableau XXV montre les paramètres descriptifs pour la variable taux de gypse et l'épaisseur des horizons diagnostiques gypsiques.

Tableau XXV : Paramètres descriptifs de la variable taux de gypse et l'épaisseur des horizons diagnostiques gypsiques

Paramètres descriptifs	Taux de gypse (%)	Epaisseur (cm)
Nombre d'échantillons	127	127
Moyenne	31.12	33.26
Médiane	25.9	30
Ecart-type	21.2	17.84
Minimum	5	15
Maximum	96	100
Coefficient de variation (CV %)	68	53

L'analyse statistique portée sur 127 horizons diagnostiques gypsiques, soit 39.68 % de la totalité des horizons de la base de données, montre que les horizons diagnostiques sont des horizons Hypogypsiques dans l'ensemble puisque la teneur moyenne en gypse (31 %) se trouve comprise entre 25 % et 50 %. Ces horizons ont aussi une épaisseur moyenne qui avoisine les 33 cm. Toutefois, ces résultats révèlent une variabilité très élevée illustrée par les coefficients de variation de l'ordre de 68 % et 53 % respectivement pour les taux de gypse et l'épaisseur des horizons. Cette grande variabilité est aussi marquée par la gamme de variation

des teneurs en gypse relativement élargie et limitée par les valeurs de 5 % et 96 % et des valeurs de l'épaisseur des horizons qui évoluent entre 15 cm et 100 cm. Egalement, la moitié des échantillons a des teneurs en gypse supérieures à 26 % et des épaisseurs supérieures à 33 cm.

Les mêmes horizons diagnostiques sont subdivisés en horizons de surface, de sub-surface et de profondeur et vont être traités de la même façon que pour l'ensemble des horizons diagnostiques gypsiques. Le tableau XXVI illustre la distribution des teneurs en gypse des horizons diagnostiques dans le profil pour chaque catégorie d'horizon.

Tableau XXVI : Paramètres descriptifs des taux de gypse pour les horizons diagnostiques gypsiques pour chaque catégorie d'horizon

Paramètres descriptifs	H1	H2	Hp
Nombre d'horizons	28	38	61
Moyenne	34.86	30.68	29.68
Médiane	31.75	21.61	24.8
Ecart-type	20.48	23.43	20.19
Minimum	6,7	6.55	5
Maximum	96	93	95
Coefficient de variation (CV %)	58	76	68

D'après le tableau XXVI, 28 horizons sur 127 horizons diagnostiques (soit 22 %) se localisent au niveau de l'horizon de surface (H1), 38 horizons (soit 30 %) en sub-surface (H2) et 61 horizons restants (48 % de la totalité des horizons diagnostiques) en profondeur (Hp). De plus, les moyennes en gypse suivent un ordre légèrement décroissant avec la profondeur (34 % pour les H1, 30 % pour les H2 et 29 % pour les Hp). Ce résultat est fondamentalement important car, il signifie que les fortes concentrations des teneurs de gypse affectent beaucoup plus les sommets des horizons gypsiques par rapport à leur base. Il confirme les travaux de Djili, 2000 et Halitim, 1985 et signifie que dans le contexte de l'Algérie, l'accumulation du gypse serait due à la remontée capillaire, mais que la percolation à partir des horizons de surface n'est pas à écarter. La comparaison des moyennes en gypse représentée dans le tableau XXVII montre que la légère diminution des moyennes en gypse dans le profil est statistiquement insignifiante car, la différence des teneurs en gypse entre les couples de catégorie d'horizon (H1H2, H1Hp et H2Hp) est non significative. Ainsi, la distribution générale des teneurs en gypse des horizons diagnostiques est statistiquement homogène. Ce résultat reste une tendance générale car, les valeurs des taux de gypse présentent une grande variabilité marquée par des coefficients de variations très élevés (58 %, 76 % et 68 % respectivement pour H1, H2 et Hp).

Tableau XXVII : Comparaison des moyennes des taux de gypse des horizons diagnostiques étudiés

Couples d'horizons	H1 et H2	H1 et Hp	H2 et Hp
t- calculé	- 0.753	- 1.119	- 0.227
probabilité	0.453	0.266	0.82
signification	NS	NS	NS

Présentation des profils étudiés

La représentation spatiale des gypsisols étudiés est illustrée par la figure 27.

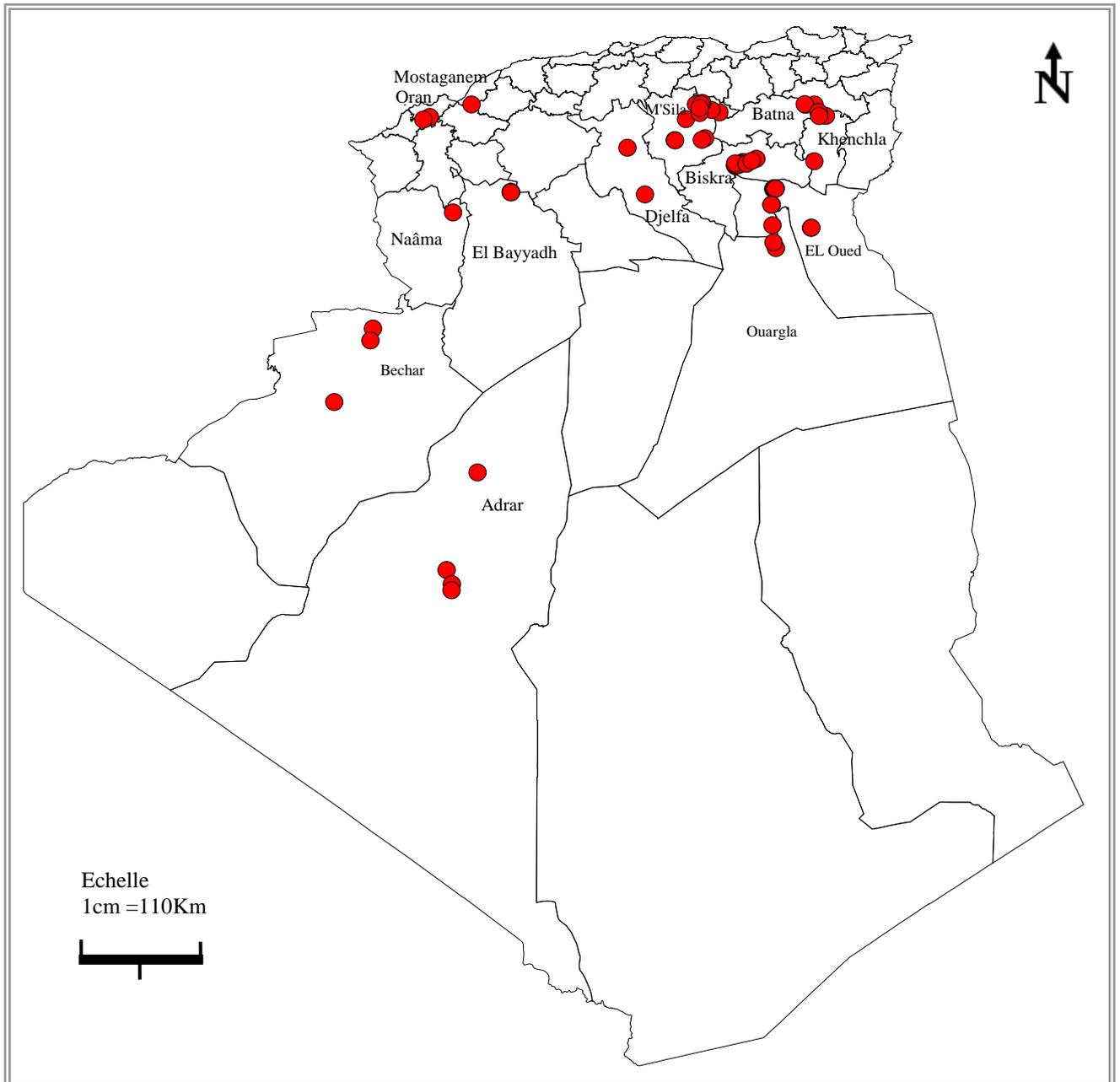


Figure 27 : Représentation spatiale des gypsisols étudiés

La figure 27 montre que la distribution des 73 profils de la base de données n'est pas homogène à travers le territoire de l'Algérie. L'essentiel des études se localisent dans la partie nord-est et nord centre et sud-ouest du cadre géographique du pays. Par ailleurs, le nord-ouest et le sud-ouest sont représentés par un nombre limité de profils. Cette constatation est bien illustrée par le tableau XXVIII qui résume la localisation et le nombre des profils étudiés par wilayas et zones d'études.

Tableau XXVIII : Nombre de profils étudiés par wilayas et zones d'études

wilayas	Zones d'études	Nombre de profils
Biskra	El-Omri, Tolga et Ourelal	17
	Ziban / Oasis Tolga	2
	Khanget Sidi Nadji	1
M'Sila	Hodna / M'Sila	12
	Bousaâda	1
El- Oued	Souf / Reguiba	2
	Mguerba	8
Ouargla	Ouad righ	3
	Oued righ / Oued Souf	3
Saïda	Ain Sekhouna	4
Adrar	Touat	3
	Timimoun (Transèque)	1
Batna	Lutaud chemora	3
Khenchla	Remila	3
Bechar	Zousfana	2
	Meguiden	1
Oran	Arbal / M'leta TI'elat	2
Djelfa	Bassin du Zahrez - Gharbi	1
	Mesaâd Ain El Ibil	1
Mostaganem	Bordjias	1
El Bayyadh	Chott Echergui	1
Naâma	Ain Sefra	1

Le tableau XXVIII montre que la wilaya de Biskra est la wilaya la plus représentée dans la base de donnée avec 20 profils, soit 27.4 % de l'ensemble des profils de la base. Par la suite, viennent les wilayas de M'Sila et El-Oued classées par ordre décroissant avec 13 et 10 profils, soit 17.8 % et 13.7 % de la totalité des profils étudiés. Six autres profils sont représentés dans la wilaya de Ouargla (soit 8.2 % de l'ensemble des profils de la base). Le reste des études est répartie entre les wilayas de Saïda (4 profils), Adrar (4 profils), Batna (3 profils), Khenchla (3 profils), Bechar (3 profils), Oran (2 profils), Djelfa (2 profils), Mostaganem (1 profil), El Bayyadh (1profil) et Naâma (1 profil). Ce tableau montre aussi que les études de la base de données ne couvrent pas tout le territoire national, seules 14 wilayas dont 22 zones différentes qui représentent les profils des gypsisols de la base de données. De ce fait, la distribution spatiale de ces sols est hétérogène. Effectivement, les études se localisent en grande majorité dans la partie nord du pays avec un nombre de 50 profils (soit 68.5 % de l'ensemble des gypsisols étudiés). De l'autre coté, le sud représenté par les wilayas de El-Oued, Ouargla, Adrar et Bechar ne participe que par 23 profils de la base (soit 31.5 % de l'ensembles des profils gypsisols de la base de donnée.

Détermination des principaux gypsisols références et établissement d'un schéma d'organisation général des profils étudiés

Les 73 profils de la base de données sont classés selon le système de classification WRB (2006). En se basant sur la dénomination des profils classés, nous avons aboutit à la détermination de 47 gypsisols références. Nous précisons qu'un sol référence est un profil moyen qui regroupe un ensemble de profils pédologiques ayant un ou plusieurs caractères en commun.

La classification WRB est une classification non hiérarchisée, dite horizontale. Dans ce qui suit, nous allons établir un schéma générale d'organisation des sols références recensés dans un système pyramidal passant du caractère le plus important et le plus commun entre les sols jusqu'aux niveaux considérés comme secondaires. L'étude a permis de déterminer deux (02) niveaux distincts d'hiérarchisation. Le premier niveau constitue les grandes références (GR). Ils englobent un certain nombre de gypsisols références ayant un caractère en commun. Le deuxième niveau d'hiérarchisation est représenté par les sols références appartenant à la même grande référence.

Lors de la classification, nous avons remarqué que l'ensemble des sols classés rentre dans la structure générale suivante :

« Gypsique Salique Gleyique Calcique Luvique Gypsisols (Sodique, Aridique, Arénique, Siltique, Clayique) ».

Les qualificatifs ajoutés au Groupe de Sol de Référence des gypsisols, qu'ils soient des suffixes ou des préfixes, ne sont pas utilisés de façon obligatoirement simultanée. Autrement dit, les sols sont classés dans différentes combinaisons possibles entre ces éléments formatifs, et le préfixe « Gypsique » qui se trouve est commun pour tous les sols références du fait que les gypsisols sont définis par la présence des horizons diagnostiques gypsiques.

On rajoute au préfixe « Gypsique » des indicateurs pour marquer l'intensité et le degré de son importance. Ces indicateurs sont : Hyper et Hypo pour donner les préfixes Hypergypsique et/ou Hypogypsique et/ou Gypsique. La même remarque est faite pour le préfixe « Salique ». Les indicateurs utilisés sont : Hyper et/ou Hypo et/ou Endo. On note que la signification de chacun de ces indicateurs est la suivante :

- Hyper : expression forte de certaines caractéristiques du sol.
- Hypo : expression faible de certaines caractéristiques du sol.
- Endo : Horizon, propriété ou matériel commençant entre 50 et 100 centimètres de la surface du sol.

L'établissement du schéma d'organisation générale des sols étudiés implique l'établissement des critères de différenciation. Le choix de ces critères est fait par rapport aux qualificatifs employés dans la classification. Il s'agit des préfixes « Salique », « Gleyique », « Calcique » et « Luvique ». Le choix entre ces éléments formatifs se fait selon le taux d'apparition le plus important dans le nom du sol classé. Ainsi :

- La première distinction entre les profils fait rassembler tous les sols ayant le préfixe « Salique » du moment qu'ils constituent la majorité des profils classés (68.5 %).
- Les profils restant sont regroupés dans deux autres ensembles. Un ensemble relatif aux profils ayant uniquement le préfixe « Calcique » et un autre n'ayant pas de préfixes spécifiés dans la dénomination du profil.

En résumé nos sols sont classés dans les trois ensembles suivants :

1. Un premier ensemble qui rassemble les sols avec un préfixe « Salique ». Il regroupe 50 profils.
2. Un deuxième ensemble de sols n'ayant pas de préfixes spécifiés. Le nombre de sols qui le constituent est de 17 profils.
3. Un troisième ensemble regroupant les sols ayant uniquement le préfixe « Calcique ». Nous dénombrons seulement 6 profils sur les 73 étudiés.

A partir de ces ensembles, nous inventorions six (06) grandes références (GR1, GR2, GR3, GR4, GR5 et GR6) structurées dans un schéma hiérarchisé (figure 28), partant du niveau le plus haut dans la classification représenté par le Groupe de Sol de Référence des gypsisols. A partir de ces gypsisols découlent les six GR dénombrées suivant les séparations faites par rapport aux préfixes choisis. Nous précisons que pour chaque grande référence, le caractère d'hydromorphie en profondeur (représenté par le préfixe « Endogleyique ») peut être présent, comme peut ne pas l'être. Pour cette raison, dans la structure générale de chaque GR, nous mettons le préfixe Endogleyique entre crochets pour dire qu'il peut être présent exceptionnellement dans chaque GR.

Les GR recensées sont réparties par wilayas et zones d'étude dans le tableau XXX, puis représentées dans des cartes d'Algérie (figure 29).

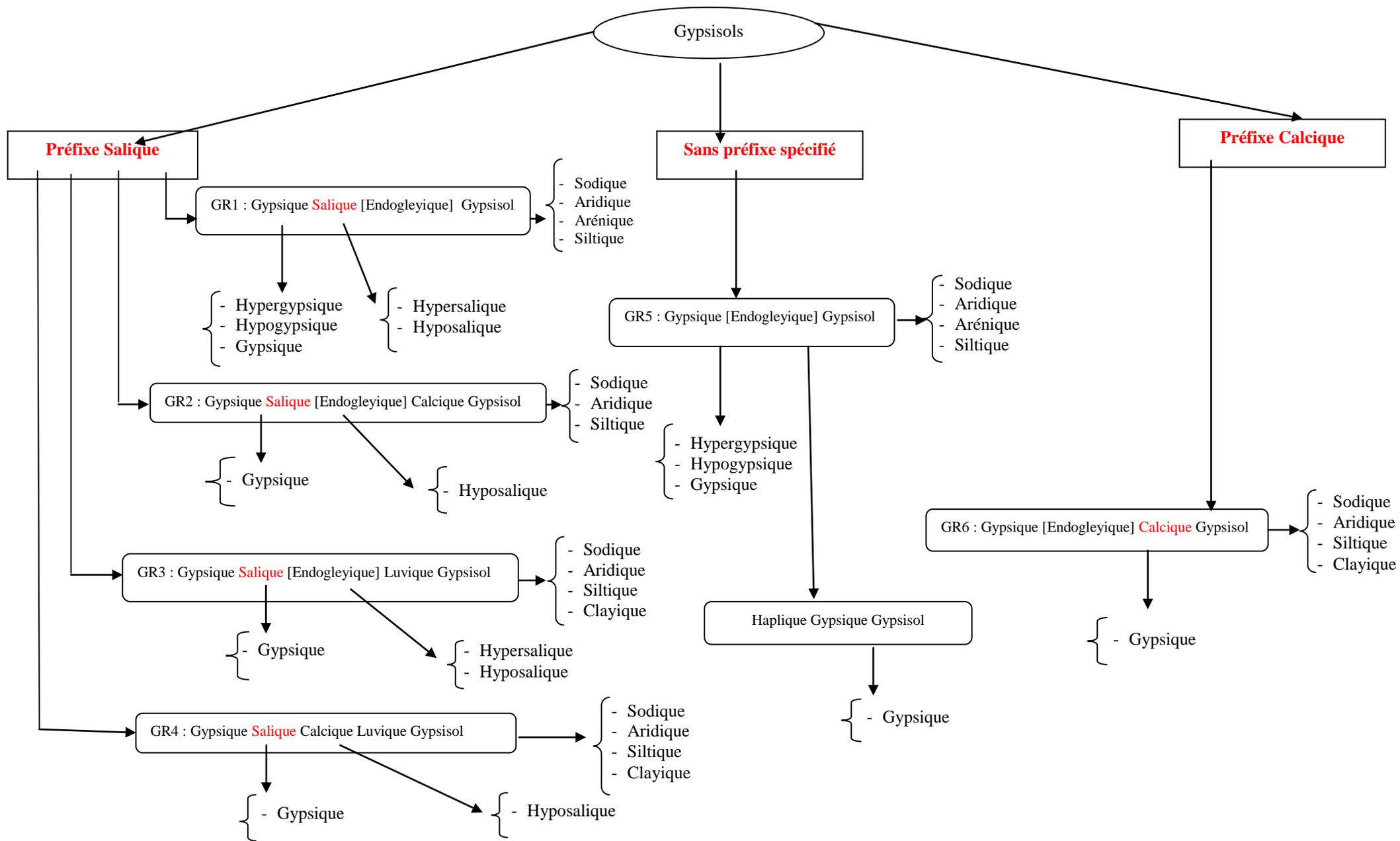


Figure 28 : Schéma d'organisation général des gypsisols références étudiés

Tableau XXIX : Répartition des grandes références par wilayas et zones d'études

Références	wilayas	Zones d'études	Nombre de profils
GRI	Biskra	El-Omri, Tolga et Ourelal	12
		Khanget Sidi Nadji	1
	Adrar	Touat	3
		Timimoun (Transèque)	1
	M'Sila	Hodna	3
		Bousaâda	1
	El- Oued	Mguerba	6
	Ouargla	Oued righ / Oued Souf	2
Mostaganem	Bordjias	1	
Khenchla	Remila	1	
GR2	M'Sila	Hodna	5
	Biskra	El-Omri, Tolga et Ourelal	3
	El- Oued	Mguerba	1
	Djelfa	Bassin du Zahrez - Gharbi	1
		Mesaâd Ain El Ibil	1
Khenchla	Remila	1	
GR3	Batna	Lutaud chemora	3
	M'Sila	Hodna	1
	Biskra	El-Omri, Tolga et Ourelal	1
GR4	Khenchla	Remila	1
	Oran	Arbal/ M'leta Tl'elat	1
GR5	Biskra	El-Omri, Tolga et Ourelal	3
	Ouargla	Oued righ	3
		Oued righ / M'ghaier	1
	El- Oued	Souf / Reguiba	2
		Mguerba	1
	Bechar	Zousfana	1
		Meguiden	1
	Saïda	Ain Sekhouna	2
El Bayyadh	Chott Echergui	1	
Naâma	Ain Sefra (El-biod)	1	
GR6	M' Sila	Hodna / M'Sila	1
		Hodna	1
	Bechar	Zousfana	1
	Saïda	Ain Sekhouna	2
	Oran	Arbal / M'leta Tl'elat	1

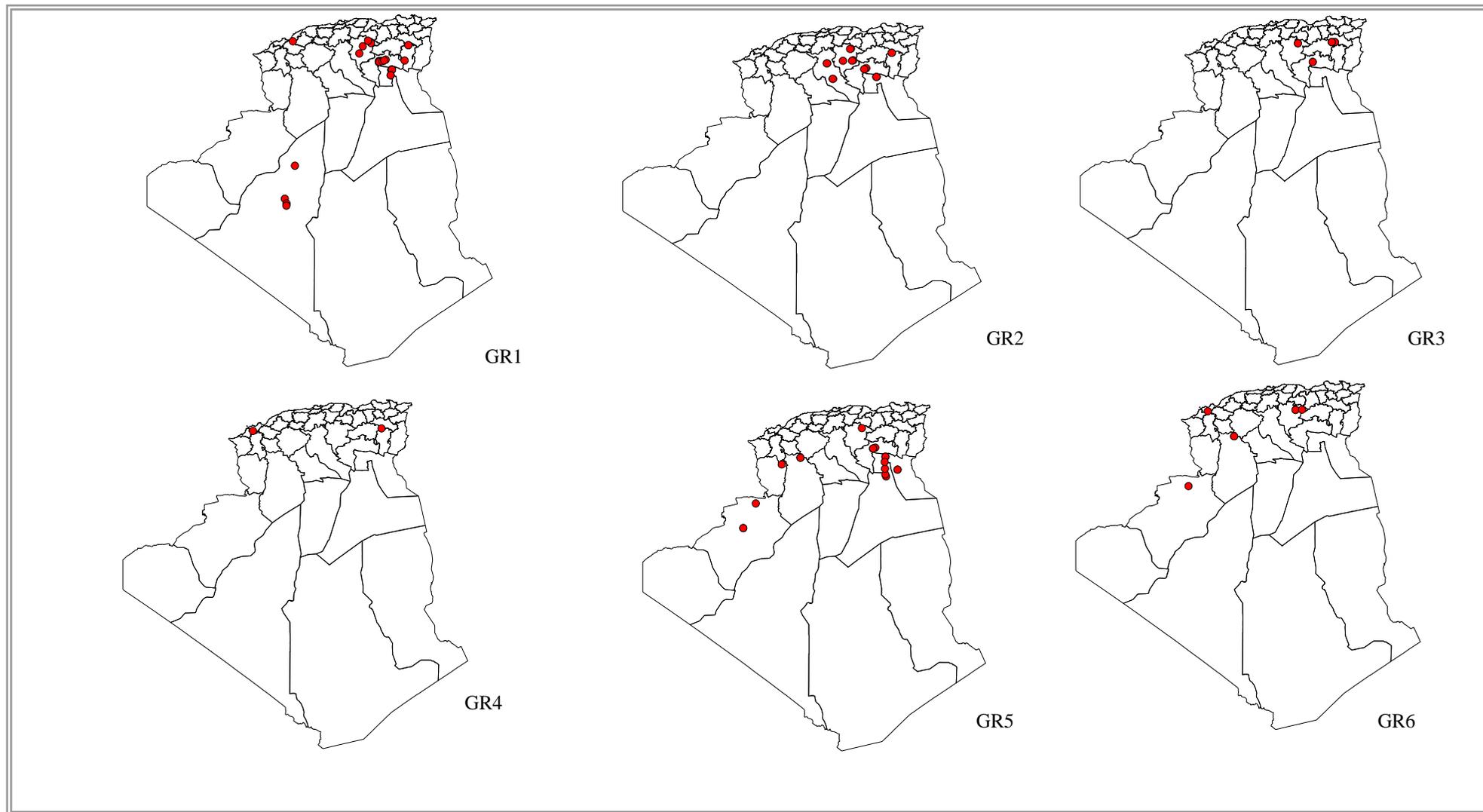


Figure 29 : Spatialisation des profils étudiés selon les grandes références (de GR1 à GR6)

❖ **Première grande référence (GR1)**

Cette première grande référence appartient au premier ensemble. Elle est caractérisée par les préfixes « Salique » et « Calcique ». La structure générale de cette grande référence se présente comme suit :

« Gypsique Salique [Endogleyique] Gypsisol (Sodique, Aridique, Arénique, Siltique) ».

Au préfixe « Gypsique » est ajouté l'indicateur Hyper. Pareillement, nous ajoutons les indicateurs Hyper, Hypo et Endo au préfixe « Salique ». Les 17 gypsisols références appartenant à cette grande référence sont listés dans le tableau XXX-a. La carte relative à la distribution spatiale des profils de la GR1 (figure 29, GR1) ne montre pas une distribution spatiale particulière. Effectivement, les profils, au nombre de 31, sont localisés dans la partie nord-est ainsi que la partie sud-ouest de l'Algérie (wilaya d'Adrar). Ces sols sont caractérisés par le caractère salin.

Nous avons réalisé des calculs sur les 100 premiers centimètres du sol de chaque grande référence (tableaux XXXI et XXXII). Ces calculs sont en rapport avec les horizons diagnostiques gypsiques et les paramètres du sol qui définissent les préfixes utilisés dans la classification et qui sont les valeurs de la CE pour le préfixe « Salique », le taux de calcaire total pour le préfixe « Calcique » et les valeurs de la CEC qui définissent l'horizon argique utilisé pour le préfixe « Luvique ». Les résultats pour la GR1 montrent que le profil gypseux moyen est homogène avec une légère augmentation au niveau des horizons de sub-surface. Les moyennes en gypse sont de 22 %, 25 % et 21 % pour les horizons de surface, de sub-surface et de profondeur. De l'autre côté, les moyennes des valeurs de CE (6.3 dS/m, 6.8 dS/m et 7.6 dS/m) montrent un profil salin également homogène. Aussi, on note que les horizons diagnostiques gypsiques peuvent se situer en surface, en sub-surface et en profondeur avec des teneurs moyennes de l'ordre de 30 %.

Tableau XXX-a : Gypsisols références de la GR1 recensés en Algérie

Gypsique Hypersalique Hyposalique Gypsisol (Aridique, Arénique, Siltique)
Gypsique Hypersalique Hyposalique Gypsisol (Sodique)
Gypsique Hyposalique Endogleyique Gypsisol (Aridique)
Gypsique Hyposalique Endogleyique Gypsisol (Sodique)
Gypsique Hyposalique Gypsisol *5
Gypsique Hyposalique Gypsisol (Arénique)
Gypsique Hyposalique Gypsisol (Aridique) *8
Gypsique Hyposalique Gypsisol (Aridique, Arénique) *2
Gypsique Hyposalique Gypsisol (Aridique, Siltique)
Gypsique Hyposalique Gypsisol (Siltique)
Gypsique Hyposalique Gypsisol (Sodique)
Gypsique Hyposalique Gypsisol (Sodique, Arénique)
Gypsique Hyposalique Gypsisol (Sodique, Aridique) *2
Gypsique Hyposalique Gypsisol (Sodique, Aridique, Arénique) *2
Gypsique Hyposalique Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique)
Gypsique Salique Gypsisol
Hypergypsique Hypogypsique Hyposalique Gypsisol

*x : x est le nombre de répétition des gypsisols références par rapport à l'ensemble des profils étudiés (73 profils)

❖ **Deuxième grande référence (GR2)**

La deuxième grande référence (GR2) fait partie du premier ensemble des profils caractérisés par le préfixe « Salique ». La structure générale de cette grande référence se présente comme suit :

« Gypsique [Endogleyique] Salique Calcique Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique) ».

Nous rajoutons l'indicateur Hypo au préfixe « Salique ». Les 09 gypsisols références de cette grande référence sont listés dans le tableau XXX-b. La carte relative à la distribution des profils de GR2 (figure 29, GR2) montre que les 12 profils sont surtout localisés dans la partie nord-est de l'Algérie. Ces profils présentent un horizon calcique et ont un caractère salin. Les teneurs moyennes en gypse sont homogènes dans le profil (24 % en horizon de surface, 20 % en sub-surface et 24 % en profondeur). Le profil calcaire est par contre descendant avec des moyennes de 18 %, 26 % et 28 % pour H1, H2 et Hp. Les valeurs moyennes de la conductivité électriques augmentent vers la profondeur (4.7 dS/m en surface, 5.2 dS/m en sub-surface et 8.5 dS/m en profondeur). La majorité des horizons diagnostiques des ces sols occupent les horizons de profondeur.

Tableau XXX-b : Gypsisols références de la GR2 recensés en Algérie

Gypsique Hyposalique Endogleyique Calcique Gypsisol (Aridique)
Gypsique Hyposalique Calcique (Aridique, Siltique)
Gypsique Hyposalique Calcique Gypsisol (Aridique) *2
Gypsique Hyposalique Calcique Gypsisol (Sodique, Aridique) *3
Gypsique Hyposalique Calcique Gypsisol (Sodique, Siltique)
Gypsique Hyposalique Endogleyique Calcique Gypsisol (Aridique)
Gypsique Hyposalique Endogleyique Calcique Gypsisol (Sodique)
Gypsique Salique Calcique Gypsisol (Sodique)
Gypsique Salique Endogleyique Calcique Gypsisol

*x : x est le nombre de répétition des gypsisols références par rapport à l'ensemble des profils étudiés (73 profils)

❖ **Troisième grande référence (GR3)**

Elle appartient au premier ensemble et se caractérise par le préfixe « Luviqque » ajouté au préfixe « Salique ». La structure générale de cette grande référence se présente comme suit :

« Gypsique Salique [Endogleyique] Luviqque Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique, Clayique) ».

On rajoute les indicateurs Hyper et Hypo au préfixe « Salique ». La carte de distribution de GR3 représentée dans la figure 29 montre qu'ils sont localisés au nord-est du pays. Le nombre restreint des profils expliquerait cette distribution localisée des profils qui caractérise les wilayas de Batna, M'Sila et Biskra. Ces sols sont plus salins que les deux précédents. Les moyennes de CE oscillent entre 13 dS/m en sub-surface et 20 dS/m en

profondeur. De même, les valeurs moyennes de la CEC sont de 19 Cmol+/kg, 25 Cmol+/kg et 28 Cmol+/kg pour H1, H2 et Hp. Le profil gypseux moyen est ascendant (18 % en surface, 16 % en sub-surface et 11 % en profondeur). Les horizons diagnostiques gypsiques se distribuent de façon presque homogène dans le profil. Les 05 sols références sont inventoriés dans le tableau XXX-c.

Tableau XXX-c : Gypsisols références de la GR3 recensés en Algérie

Gypsique Salique Endogleyique Luvique Gypsisol (Sodique, Aridique, Clayique)
Gypsique Hypersalique Hyposalique Luvique Gypsisol (Sodique, Aridique)
Gypsique Hyposalique Luvique Gypsisol (Sodique, Aridique)
Gypsique Hyposalique Luvique Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique)
Gypsique Salique Luvique Gypsisol (Sodique, Aridique)

❖ **Quatrième grande référence (GR4)**

Les préfixes « Calcique » et « Luvique » étant présent en même temps avec l'élément formatif « Salique », la quatrième grande référence combine les deux précédentes et présente la structure générale suivante :

« Gypsique Salique Calcique Luvique Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique, Clayique) ».

On ajoute l'indicateur Hypo au préfixe « Salique ». Ces sols ne contribuent que par 2 profils sur les 73 étudiés (tableau XXX-d). La carte relative à la distribution des profils de GR4 (figure 29, GR4) ne présente aucune tendance particulière de la distribution de ces sols en Algérie. Un profil est situé dans la wilaya de Khenchla et l'autre à Oran. Ces deux sols présentent des teneurs en gypse très faibles en surface et sub-surface (le taux de gypse est de 0.5 %) avec un profil gypseux moyen de type descendant (11 % de gypse dans les horizons de profondeur). La salinité augmente avec la profondeur, elle passe de 8.7 dS/m et 9.7 dS/m en surface et sub-surface à 17.8 dS/m en profondeur. Les teneurs moyennes en calcaire sont moyennes et homogènes (de l'ordre de 20 % pour tout le profil). Les valeurs moyennes de la CEC suivent une légère diminution avec la profondeur (26 Cmol+/kg en surface et sub-surface et 22 Cmol+/kg en profondeur). Le nombre très limité des profils représentant la GR4 ne permet pas d'avoir une idée sur la localisation des horizons diagnostiques gypsiques dans le profil.

Tableau XXX-d : Gypsisols références de la GR4 recensés en Algérie

Gypsique Hyposalique Calcique Luvique Gypsisol (Sodique, Clayique)
Gypsique Hyposalique Calcique Luvique Gypsisol (Aridique, Siltique)

❖ **Cinquième grande référence (GR5)**

Cette grande référence appartient au deuxième ensemble qui regroupe les profils classés ne présentant aucun préfixe particulier. La structure générale de ces sols prend la forme suivante :

« Gypsique [Endogleyique] Gypsisol (Sodique, Aridique, Arénique, Siltique) ».

Le tableau XXX-e montre 08 sols références qui appartiennent à cette grande référence. Sur l'ensemble des profils étudiés, les profils de la GR5 constituent 17 profils. Ils se localisent surtout au nord-est du Sahara (les wilayas de Biskra, Ouargla et El-Oued). Ces sols sont aussi éparpillés dans quelques wilayas de l'ouest (Bechar, Adrar, Naâma et El Bayyadh). Le profil gypseux moyen est homogène avec des teneurs fortes de l'ordre de 32 % dans tout le profil.

Un cas particulier se présente lorsque le profil ne présente aucun suffixe proposé dans la clé de classification du Groupe de Sols de Référence des gypsisols. Dans ce cas, on ajoute le préfixe « Haplique » qui veut dire que le profil est typique et ne présente pas de caractéristiques supplémentaires à part qu'il est un Gypsique Gypsisol. Dans ce cas, la structure générale des profils classés se présente comme suit : « Haplique Gypsique Gypsisols ». Les horizons diagnostiques gypsiques se distribuent de façon équitable dans les profils.

Tableau XXX-e : Gypsisols références de la GR5 recensés en Algérie

Gypsique Endogleyique Gypsisol *2
Gypsique Gypsisol (Arénique) *3
Gypsique Gypsisol (Aridique) *5
Gypsique Gypsisol (Aridique, Arénique) *2
Gypsique Gypsisol (Aridique, Siltique)
Gypsique Gypsisol (Sodique, Aridique)
Gypsique Gypsisol (Sodique, Aridique, Arénique)
Haplique Gypsique Gypsisol *2

*x : x est le nombre de répétition des gypsisols références par rapport à l'ensemble des profils étudiés (73 profils)

❖ Sixième grande référence (GR6)

La sixième grande référence appartient au troisième ensemble de sols ayant un préfixe calcique. Ils ne représentent que 6 gypsisols références sur les 47 dénombrés en Algérie (tableau XXX-f). La structure générale des sols classés est de type :

« Gypsique [Endogleyique] Calcique Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique, Clayique) »

La localisation de ces sols en Algérie est représentée dans la figure 29 (GR6). Elle ne montre pas une distribution particulière en fonction de l'espace géographique. Les études sont distribuées dans les wilayas de Saïda, Oran, Bechar et M'Sila. Les profils gypseux et calcaires pour ce type de sol sont de type descendant, les valeurs moyennes en gypse passent de 8 %, 12 % à 14 %. Celles du calcaire total sont de 24 %, 26 % et 35 % pour les horizons H1, H2 et Hp. Les horizons diagnostiques gypsiques sont absents dans les horizons de surface et plus présent au niveau des horizons de profondeur.

Tableau XXX-f : Gypsisols références de la GR6 recensés en Algérie

Gypsique Calcique Gypsisol
Gypsique Calcique Gypsisol (Aridique)
Gypsique Calcique Gypsisol (Siltique)
Gypsique Calcique Gypsisol (Sodique)
Gypsique Calcique Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique)
Gypsique Endogleyique Calcique Gypsisol (Sodique, Aridique, Clayique)

Les principales caractéristiques relatives aux taux de gypse, de calcaire total, les valeurs de la conductivité électrique, de la capacité d'échange cationique ainsi que les données sur les horizons diagnostiques pour chaque grande référence sont indiquées dans les tableaux XXXI et XXXII.

Tableau XXXI : Moyennes des paramètres analytiques qui définissent les préfixes employés dans gypsisols références étudiés

Paramètres à décrire		Gypse (%)	CE (dS/m)	Calcaire total (%)	CEC (Cmol+/kg sol)	Nombre de profils étudiés	Nombre de profils références
GR1	H1	21.9	6.31	10.5	7.92	31	17
	H2	24.7	6.85	12.5	7.73		
	Hp	21.4	7.67	13.9	7.43		
GR2	H1	24.4	4.7	18.3	13.1	12	9
	H2	20.5	5.2	26.7	13.05		
	Hp	23.7	8.5	28.1	11.5		
GR3	H1	17.9	18	20.6	19.6	5	5
	H2	16.3	13	18.7	25.2		
	Hp	11.4	20	19.2	28.7		
GR4	H1	0.51	8.7	19.6	26.9	2	2
	H2	0.53	9.7	21.6	26.5		
	Hp	11.1	17.8	20.1	22		
GR5	H1	31.9	2.4	6.2	4.7	17	8
	H2	33.9	2.4	7.1	4.3		
	Hp	31.3	2.6	4.6	8.3		
GR6	H1	8.3	1.6	23.8	19.9	6	6
	H2	12.3	1.8	26.4	16.3		
	Hp	14.5	2.2	35.5	14.8		

Tableau XXXII : Moyennes, épaisseurs et emplacement des horizons diagnostiques gypsiques des gypsisols références étudiés

Paramètres à décrire		Nombre d'horizons diagnostiques	Taux de gypse (%)	Epaisseur de l'horizon diagnostique (cm)
GR1	H1	15	34.9	35.3
	H2	17	30.2	38.5
	Hp	25	28.2	26.6
GR2	H1	4	32.6	30
	H2	4	22.5	31.8
	Hp	16	36.2	25
GR3	H1	1	23	15
	H2	2	31.5	49
	Hp	2	10.3	41
GR4	H1	/	/	/
	H2	/	/	/
	Hp	2	8.7	37
GR5	H1	10	35.1	38.7
	H2	12	36.8	45.5
	Hp	10	34.7	33.7
GR6	H1	/	/	/
	H2	2	22.7	24
	Hp	7	22.2	27.4

Synthèse sur les résultats obtenus

Il en ressort de cette étude relative à la base de données que les gypsisols étudiés au nombre 73 sont caractérisés par des teneurs en moyenne fortes en gypse (21 % en gypse), mais sont d'une disparité assez élevée. La répartition dans le profil est globalement homogène avec une légère tendance (statistiquement non significative) à l'augmentation des teneurs en gypse dans les horizons de sub-surface. Aussi, les horizons diagnostiques gypsiques étudiés sont en moyenne des horizons diagnostiques Hypergypsiques ayant des teneurs en gypse de 31 % avec des épaisseurs avoisinant les 33 cm dans le profil. Toutefois, la majorité des horizons diagnostiques se situent au niveau des horizons de profondeurs, puis les horizons de sub-surface et enfin les horizons de surface avec des concentrations en gypse affectant les sommets des horizons gypsiques par rapport à la base.

Les sols étudiés se distribuent de façon très hétérogène en Algérie et concernent surtout nord-est représentées par les wilayas Biskra, M'Sila, El-Oued, Ouargla, Batna, Khenchla et Djelfa. Le reste des profils est situé dans les parties nord-ouest (Saïda, Oran, Mostaganem et El Bayyadh) et sud-ouest (Adrar et Bechar).

Ces sols, une fois classés, ont permis de recenser 47 gypsisols références. Ces derniers rentrent dans la structure générale suivante :

«Gypsique Salique Gleyique Calcique Luvique Gypsisols (Sodique, Aridique, Arénique, Siltique, Clayique)».

Le regroupement de ces sols références selon des critères de différenciation (qui reposent essentiellement sur les préfixes utilisés lors de la classification) a permis de les organiser dans une structure hiérarchisée pyramidale. Le sommet de cette pyramide est occupé par le Groupe de Sol de Référence des gypsisols à partir duquel découlent les six (06) grandes références recensées. Les gypsisols références regroupés au sein d'une même grande référence ont tous un caractère ou plus en commun.

4. Discussion générale

L'étude a porté sur 5 profils situés sur un microrelief. Les profils P1, P2, P3 et P4 se situent sur une minitoposéquence, tandis que le profil P5 se trouve isolé sur un sommet d'un microrelief un peu plus loin que les autres.

Tous les profils ont la même morphologie et sont de type A/By. L'horizon A constitue les horizons de surface non gypseux (teneurs en gypse < 5 %). Il surmonte une accumulation gypseuse épaisse très riche en gypse (teneurs en gypse comprises entre 36 % et 82 %) sous forme d'encroûtements gypseux finement cristallisés en profondeur.

Sur le terrain, les sommets des encroûtements gypseux sont les plus durs et les moins calcaires. Ils correspondent aux horizons les plus gypseux (jusqu'à 82 % de gypse) et les moins calcaires (2 % de calcaire total). En général, l'augmentation des teneurs en gypse est accompagnée par une diminution de celle du calcaire total.

Les sols étudiés sont caractérisés par des traces d'hydromorphie représentées soit par des taches d'oxydo-réduction, soit par la couleur ocre qui affecte presque tous les profils en profondeur. Ce phénomène traduit la présence d'une nappe relativement profonde et salée du fait que les horizons de profondeur sont salins à excessivement salins. Le profil salin est descendant. Les valeurs de la CE peuvent atteindre 21 dS/m au niveau du profil P4 qui se trouve en bas de pente. La solution du sol est dominée par les anions sulfates et chlorures et les cations calcium et sodium.

Selon les normes de Jamagne et al. (1977) (tableau V, annexe 2), la rétention en eau aux différents pF des horizons de surface semble être très surestimée surtout pour les moyens et hauts potentiels ($pF \geq 2.5$), d'autant plus que la texture est grossière (limoneuse, sablo-argilo-limoneuse et sablo-limoneuse) ne permettant pas ainsi une grande rétention en eau. Ce résultat reste difficilement explicable. En profondeur, cette rétention est dans la majorité des cas en relation avec les taux de gypse qui possède un pouvoir fixateur de l'eau dans le sol assez élevé. Les corrélations entre les teneurs en gypse et les humidités aux pF2.5 et pF4.2 qui sont statistiquement significatives et positives confirment ce résultat.

Les valeurs moyennes de la CEC (entre 13 et 17 Cmol+/kg sol) sont essentiellement dues aux teneurs d'argile et de matière organique qui sont d'ailleurs peu élevées.

Ces sols sont plus perméables en surface (perméabilité moyenne à assez rapide avec des valeurs de conductivité hydraulique qui varient entre 3 et 11 cm/heure) qu'en profondeur (perméabilité moyenne à assez lente avec des valeurs qui varient entre 1 et 5 cm/heure). En surface, cette perméabilité est liée à la texture grossière. Par contre, en profondeur, elle est étroitement liée aux teneurs en gypse. Plus l'horizon est riche en gypse, moins il est perméable. Dans ce cas, il est difficile d'interpréter la vitesse de filtration de l'eau en fonction de la texture des horizons de profondeur, car même si la fraction grossière reste la plus dominante, la séparation entre les différentes fractions était faite à sec, donc n'exprime pas le phénomène d'infiltration de l'eau dans le sol. Ces résultats sont difficiles à comparer avec les résultats de la bibliographie qui sont très variables et qui ne donnent pas une idée précise sur

la circulation de l'eau en fonction des teneurs en gypse. Selon Van Alphen et Rios (1971), la vitesse de circulation de l'eau change en fonction des horizons gypsiques de surface ou des horizons gypsiques de sub-surface. Par opposition, Poch (1992) ne lie pas ce phénomène à la présence du gypse. Selon cet auteur, la circulation de l'eau est fonction de la dimension et de la répartition des cristaux de gypse.

Tous les sols ont une bonne à excellente stabilité structurale en surface due essentiellement à l'effet flocculant des ions calciums provenant de la solubilité du gypse et du calcaire.

Calculés sur 7 échantillons, les statistiques montrent que pour les horizons de surface, mis à part la conductivité hydraulique, le gypse n'est pas significativement corrélé au pH, au calcaire total, à la conductivité électrique, aux sulfates et au calcium de la solution du sol, aux teneurs d'humidité à la saturation, à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent. Par contre, pour les horizons de profondeur, le gypse est statistiquement négativement corrélés aux teneurs en calcaire total (un résultat confirmé par toutes les études menées dans ce sens) et de la conductivité électrique. Ceci suggère que les particules gypseuses sont sous formes très fines (selon Karen et al., 1980, le diamètre serait inférieur à 44 μ m), ce qui induit un colmatage mécanique des pores par les fines particules du gypse qui diminuent la conductivité hydraulique. Ce résultat pourrait être l'explication de la corrélation positive et très hautement significative de la rétention en eau aux hautes pressions (pF2.5 et pF4.2) en fonction des teneurs en gypse.

La recherche des sols références selon cette classification a permis de retenir quatre (04) gypsisols références à partir des cinq étudiés. Le profil P4 n'est pas un gypsisols mais plutôt un solonchaks. Les quatre références reconnues sont :

- Hypergypsique Hyposalique Calcique Gypsisol (Aridique) : elle correspond au profil P1.
- Hypergypsique Hyposalique Endogleyique Gypsisol : elle correspond au profil P2.
- Hypergypsique Hypogypsique Hyposalique Endogleyique Gypsisol : elle correspond au profil P3.
- Hypergypsique Hyposalique Gypsisol : elle correspond au profil P5.

Ces références ont pratiquement la même morphologie. Une couche d'horizons de surface qui surmonte une succession d'encroûtements gypseux. Cependant, ils se distinguent par les points suivants :

- La première référence se distingue par rapport aux autres par la teneur en calcaire total (> 15 %) et l'épaisseur (> 15 cm) qui définissent l'horizon calcique en surface. La teneur en gypse dans les encroûtements gypseux est comprise entre 36 % et 60 %. La teneur en carbone organique très faible en surface (< 0.6 %) et qui donne au profil le caractère aridique. La salinité augmente avec la profondeur (1dS/m < CE < 8dS/m) et définis les horizons hyposaliques.

- La deuxième référence ne présente pas beaucoup de détails comparativement à la précédente. Elle est essentiellement caractérisée par le caractère salin ($2\text{dS/m} < \text{CE} < 9\text{dS/m}$) qui fait ressortir l'horizon hyposalique dans la classification. Les teneurs en carbone organique sont légèrement plus élevées que la première référence. Aussi, le gypse dans les encroûtements gypseux prend des valeurs comprises entre 60 % et 82 %. Le caractère d'hydromorphie est représenté par des taches d'oxydo-réduction et une couleur ocre en profondeur. Dans le cas où les signes d'hydromorphie sont absents, nous retrouvons la troisième référence relative au profil P5.
- La quatrième référence ressemble à la deuxième avec la présence de cristaux de gypse très fins qui brillent au soleil. Les valeurs de la CE, au niveau des encroûtements gypseux sont largement plus élevées que celles des précédentes ($14\text{dS/m} < \text{CE} < 17\text{dS/m}$). Les teneurs en gypse sont comprises entre 47 et 81 % et définissent un l'horizon diagnostique hypergypsi-

Les schémas suivants résument les principaux caractères morphologiques des quatre références.

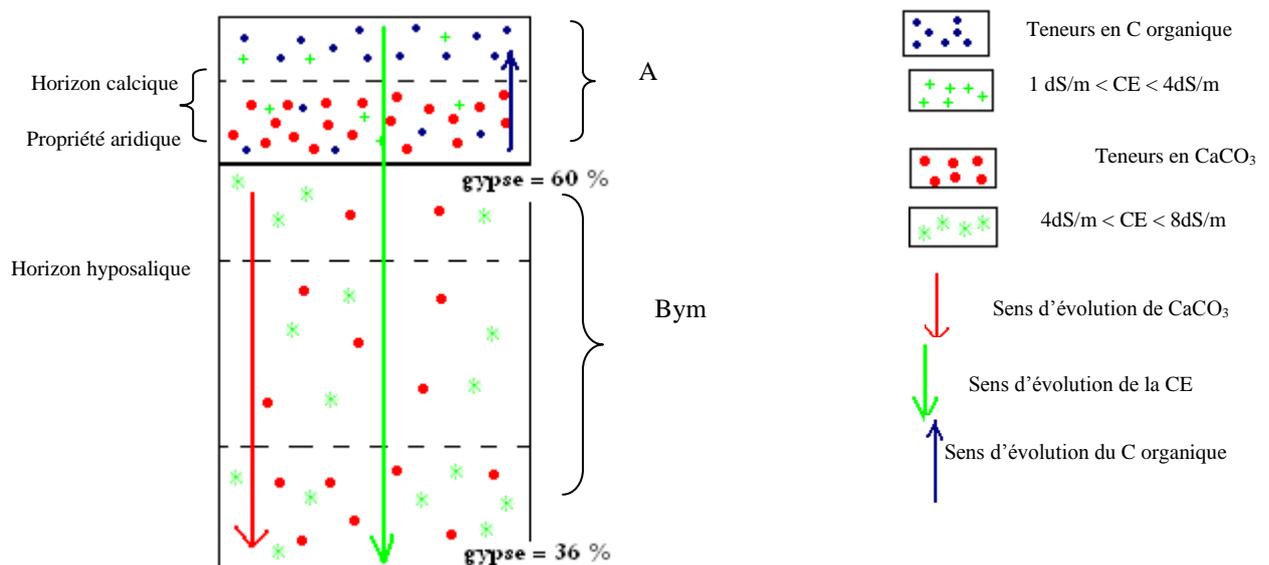


Figure 30 : Schéma de la référence relative à P1

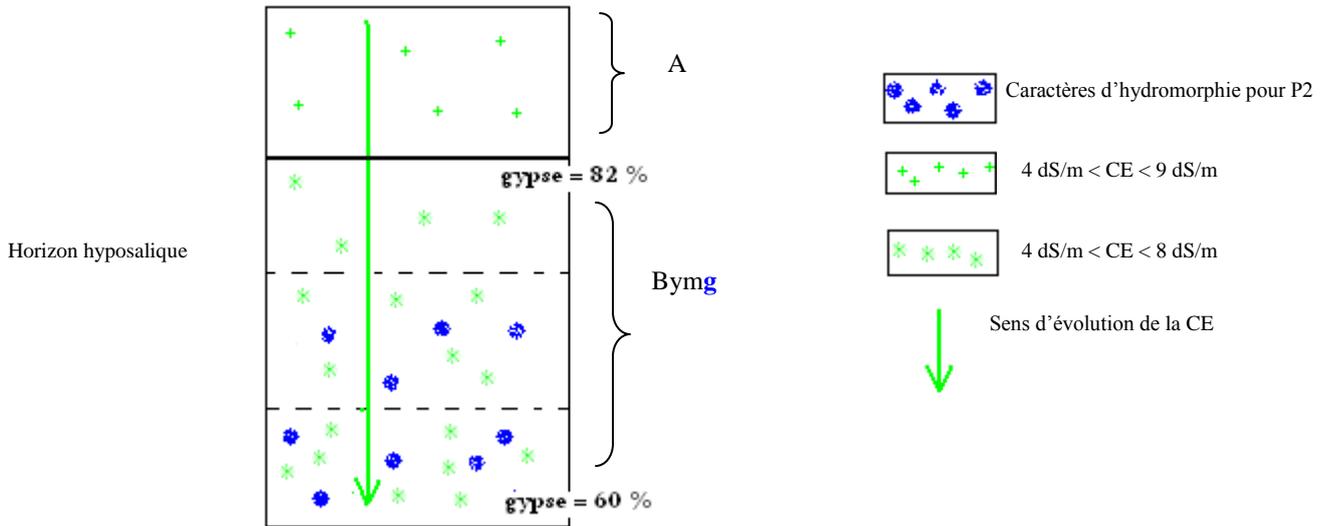


Figure 31 : Schéma de la référence relative à P2 et P5

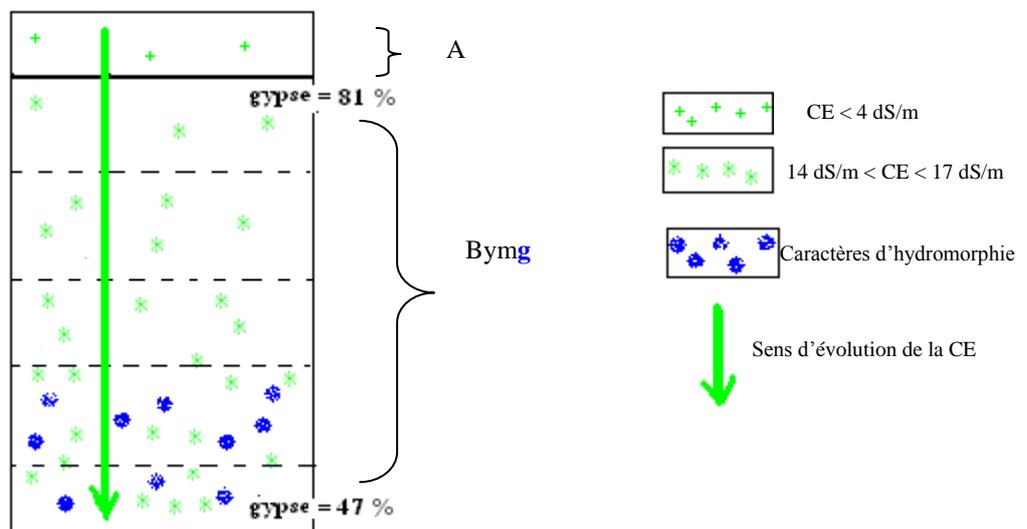


Figure 32 : Schéma de la référence relative à P3

Le deuxième volet relatif à l'étude de la base de données a permis de mettre en évidence 47 gypsisols références sur les 73 sols gypseux étudiés. Ces sols sont dans l'ensemble très gypseux (teneurs en gypse moyenne égale à 21 %) avec un profil gypseux moyen de type H2>H1>Hp avec les teneurs correspondantes de 24 %, 23 % et 20 % de gypse.

Les horizons diagnostiques qui définissent ces gypsisols ont des teneurs en gypse de l'ordre de 31 % en moyenne et des épaisseurs de 33 cm également en moyenne. Toutefois, 48 % de ces horizons se localisent en profondeur, 30 % en sub-surface et 22 % en surface avec des teneurs légèrement plus fortes en surface qu'en profondeur.

La majorité des gypsisols étudiés se localisent dans la partie est de l'Algérie (wilayas de Biskra, M'Sila, El-Oued, Batna et Khenchela). Le reste couvre les wilayas de l'ouest (Saïda, Oran, Mostaganèm et Naâma) et l'ouest du Sahara (Adrar et Bechar).

Le regroupement de ces sols références a fait apparaître six grandes références, chacune ayant une structure générale différente de l'autre. Elles se distinguent par les caractères suivants :

- le caractère calcaire qui exprime la présence d'un horizon calcaïque dans le profil,
- le caractère salin qui indique par le biais des valeurs de la CE l'intensité de la salinité (horizon hyposalique, horizon hypersalique) et l'emplacement de l'horizon salique (endosalique) et,
- le caractère luviq ue représenté par la présence d'un horizon argique.

Sur la base de ces caractéristiques, les sept références se présentent comme suit :

1. Grande référence GR1

- La structure générale des profils est de type :
Gypsique Salique [Endogleyique] Gypsisol (Sodique, Aridique, Arénique, Siltique)
- Elle représente 31 profils sur les 73 de la base (soit 42.46 %) et 17 gypsisols références sur les 47 recensés (soit 36.17 %).
- Distribution non tributaire de l'espace géographique étudié.
- Le profil gypseux moyen est homogène avec une légère augmentation au niveau des horizons de sub-surface. Il est de type H2>H1>Hp avec des teneurs en gypse de l'ordre de 25 %, 22 % et 21 % pour les trois catégories d'horizons.
- Le profil moyen salin est homogène à légèrement descendant. Les valeurs de la CE sont de l'ordre de 6dS/m à 7dS/m.
- Les horizons diagnostiques gypsiques sont situés au niveau des trois catégories d'horizon.

2. Grande référence GR2

- La structure des profils est de type :
Gypsique [Endogleyique] Salique Calcique Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique)
- Elle représente 12 profils, soit 16.43 % de l'ensemble des profils étudiés et 09 gypsisols références, soit 19.14 % de l'ensemble des sols références.
- Localisation dans la partie est de l'Algérie (Biskra, M'Sila, El-Oued et Khenchla).
- Le profil gypseux moyen est homogène avec des teneurs qui oscillent entre 20 % et 24 %.
- Le profil salin moyen est descendant avec des valeurs salées à très salées variant de 4 dS/m à 9 dS/m.
- Le profil calcaire moyen est descendant avec des valeurs moyennes à forte variant de 18 % à 28 % de calcaire total.
- La majorité des horizons diagnostiques occupent les horizons de profondeur.

3. Grande référence GR3

- La structure générale des profils est de type :
Gypsique Salique [Endogleyique] Luvique Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique, Clayique)
- Elle représente 5 profils (6.84 % de l'ensemble des profils étudiés) qui sont aussi des gypsisols références (10.63 % de l'ensemble des gypsisols références recensés).
- Localisation au nord-est du pays (wilayas de Batna, M'Sila et Biskra).
- Le profil gypseux moyen de type H1>H2>Hp avec des teneurs de l'ordre de 18 %, 16 % et 11 %.
- Le profil salin moyen est de type Hp>H1>H2 avec les valeurs de 13dS/m, 18dS/m et 20dS/m.
- Les valeurs de la CEC augmentent en profondeur et varient entre 19 Cmol+/kg sol et 29 Cmol+/kg.
- La localisation des horizons diagnostiques est indéterminée à cause du nombre très limité des profils de cette grande référence.

4. Grande référence GR4

- La structure générale des profils est de type :
Gypsique Salique Calcique Luvique Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique, Clayique)
- Très faiblement représentée (2 profils représentant au même temps les gypsisols références inventoriés).
- Le profil gypseux moyen est marqué par des teneurs très faibles en gypse surtout en surface (0.5 %). Puis, les teneurs augmentent en profondeur (11 %).

- Le profil calcaire est homogène avec des valeurs en calcaire total de l'ordre de 20 %.
- Le profil salin moyen est descendant. Les valeurs de CE varient de 8 dS/m à 18dS/m.
- Les valeurs de la CEC sont les plus élevées comparativement aux autres grandes références. Elles diminuent avec la profondeur et varient de 22cmol+/kg de sol à 27cmol+/kg de sol.

5. Grande référence GR5

- La structure générale des profils est de type :
Gypsique [Endogleyique] Gypsisol (Sodique, Aridique, Arénique, Siltique)
- Elle représente 17 profils (23.28 % de l'ensemble des profils étudiés) et 08 gypsisols références (soit 16.66 % de l'ensemble des sols références).
- Localisation au nord-est du Sahara avec quelques wilayas de l'ouest de l'Algérie.
- Le profil gypseux moyen est homogène avec des teneurs fortes de l'ordre de 32 %.
- Les horizons diagnostiques gypsiques sont situés au niveau des trois catégories d'horizon.

6. Grande référence GR6

- La structure générale des profils est de type :
Gypsique [Endogleyique] Calcique Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique, Clayique)
- Elle représente 6 profils (8.21 % de l'ensemble des profils étudiés) qui sont aussi des gypsisols références (12.76 % de l'ensemble des gypsisols références recensés).
- Distribution non tributaire de l'espace géographique étudié.
- Profil gypseux moyen descendant avec des valeurs variant de 8 % à 15 %.
- Profil calcaire moyen descendant ayant des valeurs comprises entre 23 % et 36 %.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail réalisé a porté sur l'identification des gypsisols références, à l'échelle locale (région de « Bordj El jir ») et nationale.

Les profils étudiés à l'échelle locale ont tous la même morphologie générale représentée par deux couches, la limites entre les deux étant très nette. La couche de surface est non gypseuses ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O} < 5\%$), meubles, friables, peu organiques et de couleurs sombre. La deuxième couche est un encroûtement gypseux plus riches en gypse au sommet qu'à sa base ($36\% < \text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O} < 82\%$), clair, dur, massif et non organique.

Les profils sont légèrement à moyennement alcalins. Les valeurs du pH sont comprises entre 7.93 et 8.4. Cette gamme de variation préférentielle pour les sols gypseux a déjà était identifiée par Boyadgiev et Verhey (1996) et Ouamer-Ali (2009).

D'une façon générale, l'augmentation des teneurs en gypse s'accompagne par la diminution des taux de calcaire.

Les horizons de surface sont limoneux à sablo-limoneux, ce qui leur confère une conductivité hydraulique moyenne à rapide (2 à 11 cm/h). En profondeur, la conductivité hydraulique est lente à moyenne (1 à 5 cm/h).

Les faibles teneurs en argiles ($13\% < \text{argile}\% < 28\%$) et en matière organique ($\text{MO} < 2\%$) seraient à l'origine des valeurs moyennes de la CEC qui varie entre 13 et 17 Cmol^+/kg de sol.

La stabilité structurale des horizons de surface est très bonne à excellente.

La salinité augmente en profondeur ($2\text{dS/m} < \text{CE} < 21\text{dS/m}$). Les solutions du sol sont dominées par les anions sulfates, chlorures et les cations calcium et sodium.

En surface, les sols retiennent une teneur en eau qui varie entre 39 % et 67 % à pF0 et entre 14 % et 36 % à pF2.5 et entre 8 % et 30 % à pF4.2. En profondeur, elle est liée aux teneurs en gypse surtout pour les hauts potentiels.

Les statistiques montrent que le gypse est significativement corrélé au calcaire total ($p < 0.0001$; $r = - 0.86$), à la rétention en eau à pF2.5 ($p = 4.8 \cdot 10^{-4}$; $r = 0.72$), à la rétention en eau à pF4.2 ($p = < 0.0001$; $r = 0.89$) et à la conductivité hydraulique ($p = 0.001$; $r = - 0.69$).

La classification des profils étudiés montre que le profil P4 répond au même temps aux critères diagnostiques des solonchaks et des gypsisols et, de ce fait est un solonchaks. Ce résultat ne reflète pas fidèlement la morphologie du profil et privilégie l'analyse de la CE par rapport à la présence de l'importante accumulation gypseuse (73 % de gypse) dans le sol. Ce résultat suggère donc une réflexion sur la classification de ce type de sol (gypseux salé) dans le système WBR. Les sols étudiés sont regroupés en quatre références :

- Hypergypsique Hyposalique Calcique Gypsisol (Aridique) : elle correspond au profil P1.
- Hypergypsique Hyposalique Endogleyique Gypsisol : elle correspond au profil P2.
- Hypergypsique Hypogypsique Hyposalique Endogleyique Gypsisol : elle correspond au profil P3.
- Hypergypsique Hyposalique Gypsisol : elle correspond au profil P5.

L'analyse de la base de données pédologiques de l'Algérie a fait reconnaître 47 gypsisols références. Les horizons diagnostiques gypsiques peuvent se situer en profondeur (48 % de l'ensemble des horizons diagnostiques), en sub-surface (30 % de l'ensemble des horizons diagnostiques) ou en surface (30 % de l'ensemble des horizons diagnostiques). Les taux de gypse sont toujours plus grands dans les sommets des horizons gypseux.

Les gypsisols se répartissent de façon hétérogène en Algérie mais, se localisent préférentiellement dans la partie nord-est (wilayas de Biskra, M'Sila, El-Oued, Ouargla, Batna, Khenchla et Djelfa). On peut les rencontrer aussi dans le nord-ouest (Saïda, Oran, Mostaganem et El Bayyadh) et le sud-ouest (Adrar et Bechar).

Le regroupement des gypsisols a abouti à six (06) grandes références

- GR1 : Gypsique Salique [Endogleyique] Gypsisol (Sodique, Aridique, Arénique, Siltique) : ils représentent 42.46 % de l'ensemble des gypsisols étudiés.
- GR2 : Gypsique [Endogleyique] Salique Calcique Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique) : ils représentent 16.43 % de l'ensemble des gypsisols étudiés.
- GR3 : Gypsique Salique [Endogleyique] Luvique Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique, Clayique) : ils représentent 6.84 % de l'ensemble des gypsisols étudiés.
- GR4 : Gypsique Salique Calcique Luvique Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique, Clayique) : ils représentent 2.73 % de l'ensemble des gypsisols étudiés.
- GR5 : Gypsique [Endogleyique] Gypsisol (Sodique, Aridique, Arénique, Siltique) : ils représentent 23.28 % de l'ensemble des gypsisols étudiés.
- GR6 : Gypsique [Endogleyique] Calcique Gypsisol (Sodique, Aridique, Siltique, Clayique) : ils représentent 8.21 % de l'ensemble des gypsisols étudiés.

Cette étude qui est une contribution à une meilleure connaissance des sols d'Algérie, en particulier ceux du groupe des gypsisols, gagnerait à être complétée par une investigation plus large sur le terrain, appuyée par des analyses minéralogiques et micromorphologiques. Les aspects physiques, en particulier le comportement hydriques de ces sols, chimiques et biologiques sont souhaitables pour compléter la caractérisation de ce groupe de sols très complexe. Ce n'est qu'à ce prix que nous pouvons jeter les jalons d'une classification nationale des sols d'Algérie que nous pourrions relier aisément aux classifications et aux bases de données internationales.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- **Abdesselam S., 1998** - Contribution à l'étude des sols gypseux au Nord-Est de Sahara Algérien : Caractérisation et genèse. Cas des Oasis de Tolga (région de Zibane). Mém. Mag. INA (El Harrach), 149 p.
- **Abbrukova L.P. et Isayer V.A., 1983** – Structural mechanical of Gray-Brown gypsiferous soil. Soviet soil science. pp. 52-534.
- **Ali Y.A. et West I., 1983** – Relationships of modern Gypsum nodules in Sebkhah of loess to composition of brines and sediments in Northern Egypt. Journal of sedimentary, petrology. N°53. pp.1151-68.
- **Aubert G.** – Méthodes d'analyses des sols. 2^{ème} Trimestre. 1978. 191 p.
- **Baize D., 1995** – Guide pour la description des sols, Ed. INRA, 375p.
- **Barazandji A.F., 1973** – Gypsiferous soils in Iraq. P.H.D. Thesis. University of Belgium, 174 p.
- **Barzanji A.F. et Stoops G., 1974** – Fabric and mineralogy of gypsum accumulations in some soils of Iraq. Transactions of the 10 th international congress of soil science, VII Mineralogy and Micromorphology of soils, pp. 271-277.
- **Bataillon C.L., 1955** – Le Souf : Etude de la géographie humaine. Alger, Ed. Imber., 140 p.
- **Bathurst R.G.G., 1971** – Carbonate sediments and their diagenesis. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier, 620 p.
- **Bellair R., 1954** – Sur l'origine des dépôts de sulfate de calcium actuels et anciens. Ac. des Scie. pp.1059-1061.
- **Benmati A. et Nefil S., 1996** – Les accumulations calcaires et gypseuses dans la lithosphère des sols sous climat méditerranéen aride et semi-aride. Groupe de recherche agronomique méditerranéen. Qualité des sols et des eaux. 10-11 Décembre.
- **Bensaid R., 2008** – Comportement des sols gypseux sous irrigation en zone aride. Rapport annuel d'un projet de recherche. CNEPRU. Laboratoire de Batna.
- **Bernou S., 1996** – Contribution à la création d'une banque de données pédologiques des sols gypseux de l'Algérie du nord. Mem. Ing. INA. (El Harrach), 49 p.
- **Berkal I., 2006** – Contribution à la connaissance des sols du Sahara d'Algérie. De la base de données à la valorisation des paramètres pédologiques. Thèse magister, I. N. A., Alger, 221 p.
- **Boukadoum A., 2007** – Etat de la fertilité chimique des sols gypseux en zone aride « M'Sila ». Mém. Ing. INA (El Harrach). 88 p.
- **Boyadgiev T.G., 1974** – Contribution à la connaissance des sols gypseux. The Euphrate pilot irrigation project. F.A.O., Raqqa, 22 p.
- **Boyadgiev T.H. et Sayegh A.H., 1992** – Forms of gypsum in arid soils and soil parent materials. Pédologie, XLII -2. pp.171-182.
- **Boyadgiev T.G. et Verheye W.H. 1996** – Contribution to utilitarian classification of gypsiferous soil. Geoderma 74, pp. 321-338.
- **Bower C.A., Huss R.B., 1948** – Rapid conductometric method for estimating gypsum in soil. Soil Sci. 66, pp.199-209.
- **Brenda J.B. et John G.V.O., 2002** – Snowball morphology and SEM analysis of pedogenic gypsum. Southern New Mexico. U.S.A. Journal of Arid Environment 55. pp: 469-487.
- **Brierre P.R., 2000** – Playa. Playa lake. Sebkhah. Proposed definition for old term. J. Arid. Environ 45. pp: 1-7.
- **Bureau P., et Roederer P., 1961** – Contribution à l'étude des sols gypseux de la partie sud du Golf de Gabes. Bull. Ass. Fr. Etude sols N° spécial, pp. 150-176.

- **Carter B.J. et Inskeep W.P., 1988** – Accumulation of pedogenic gypsum in Western Oklahoma soils. *Soil. Soc. Am. J.* 52: pp. 1107-1113.
- **Cooke R.U., Waren A., Goudi S.A., 1993** – Desert geomorphology. U.C.L. press. London. 526 p.
- **Coque R., 1962** – La Tunisie présaharienne. Etude géomorphologique Arm Colin Ed. Paris, Thèse d'état, 488 p.
- **Coutinet S., 1965** – Méthode d'analyses utilisables pour les sols salés, calcaires et gypseux. *Agronomie tropicale*. 12, pp.1242-1253.
- **C.P.C.S., 1967** – Classification française des sols. Commission de Pédologie et de Cartographie des sols INRA., Paris. 79p.
- **Dekkiche B., 1974** – Contribution à l'étude des sols du Hodna et corrélation géochimique des eau de nappe. Thèse Univ. Gant. Belgique, 210 p.
- **Djili K., 2000** – Contribution à la connaissance des sols du nord de l'Algérie. Création d'une banque de donnée informatisée et utilisation d'un système d'information géographique pour la spatialisation et valorisation des données pédologiques. Thèse Doct. D'état INA (El Harrach). 243 p.
- **Djili K., Daoud Y. et Gaouar A., 2002** – Distribution of some pedological characteristics formed mediterranean climate. Exemples from the soils of northern Algeria. *Option Méditerranéennes, Serie A, Mediterranean Seminars. 7th International Meeting on Soils with Mediterranean Type of Climate (Selected Papers) n°50*, pp. 87-95.
- **Djili K., Daoud Y., Gaouar A. et Beldjoudi Z., 2003** – La salinisation secondaire des sols du Sahara. Conséquences sur la durabilité de l'agriculture dans les nouveaux périmètres de mise en valeur. *Cahier Sécheresse*, 14 (4), pp 241-246.
- **Douaoui A. 1993** – Contribution à l'étude des sols des plaines du Cheliff, variabilité spatiale de quelques propriétés physico-chimiques des sols du moyen Cheliff, incidences cartographiques. Thèse Mag. I.N.N.A., 122p.
- **Drak N.A., 1997** – Recent eolian origin of superficial gypsum crusts in southern of Tunisia. *Geomorphologic, archaeological and remote sensing evidence. Earth surface process and landforms*, vol. 22. pp. 641-656.
- **Durand J.H., 1949** – Formation de la croûte gypseuse du Souf (Sahara). *Compte rendu sommaire des sciences de la société géologique de France*. 13 pp. 303-305.
- **Durand J.H., 1953** – Etude géologique, hydrogéologique et pédologiques des croûtes en Algérie S.E.S. Alger. 209 p.
- **Durand J.H., 1954** – Les sols d'Algérie S.C.H., S.E.S. *Pédologie* N°2. 244 p.
- **Durand J.H., 1963** – Les croûtes calcaires et gypseuses en Algérie, formation et age. *Bull. Soc. Géol. Fr* (7). pp.958-959.
- **Ellorza M.G. et Santollala F.G., 1998** – Geomorphology of the tertiary gypsum formation in the Ebro depression (Spain). *Géoderma*, N°87. Pp.1-29.
- **Eswaren H. et Gong Z.T., 1991** – Properties, genesis, classification and distribution of soils with gypsum. In Nettleton, w.d. et al., 1991. *Properties, characteristics and genesis of carbonate gypsum and silica. Accumulation in soils. SSSA spec. Pub. N°26. Mandison*. pp.89-119.
- **F.A.O., 1974** – Etude des ressources naturelles et expérimentation et démonstration agricoles dans la région du Hodna. Algérie. Amélioration du pâturage et de l'élevage. *Rapport technique 2.*, F.A.O., Rome, Italie.
- **F.A.O., 1975** – Etude des ressources naturelles et expérimentation et démonstration agricoles dans la région du Hodna. Algérie. Les sols du Hodna. *Rapport technique 5*, vol.1. F.A.O., Rome, Italie. 141 p.
- **F.A.O., 1988** – Soil map of the world. Revised legend, by FAO–UNESCO–ISRIC. *World Soil Resources Raport* N° 60. Rome.
- **F.A.O., 1990** – Management of gypsiferous soils. F.A.O., *Bull.* N° 62 Rom. 81 p.

- **Farina M.P.W., Channon P. and Thibaud G.R., 2000** – A comparison of strategies for ameliorating subsoil acidity II. Long. Tetrm. Soil effect. Soil. Sci. Sos. AM. J. N°64, pp. 652-658.
- **Florea N. et Aljoumaa Kh., 1998** – Genesis and classification of gypsiferous soils of the middle Euphrates Floodplain, Syria. Geoderma 87: pp.67-85.
- **Halitim A. 1988** – Les sols des régions arides d'Algérie. Ed. O.P.U. Alger. 385 p.
- **Halitim A., 1985** – Contribution à l'étude des sols arides (Hautes plaines steppiques de l'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols. Thèse Univ. Rennes. 384p.
- **Halitim A. et Robert M., 1987** – Interactions du gypse avec les autres constituants du sol. Analyse microscopique de sols gypseux en zone aride (Algérie) et études expérimentales. « Soil Micromorphology ». Fedoroff et al. Ed. A.F.E.S. –plaisir, France, pp. 179-186.
- **Hamdi-Aïssa B. et Fedoroff N. 1996** – Macro and micromorphology of gypsum in desertic soils (Northern Sahara – Algeria). Proc. Int. Symposium on soil with gypsum. Lleida, Catalonia, Spain.
- **Hamdi-Aïssa B., 2001** – Le fonctionnement actuel et passé des sols du Nord Sahara (cuvette de Ouargla). Approche micromorphologique, géochimique et minéralogique et organisation spatiale. Thèse Doc. INA Paris-Grignon, 310 p.
- **Herrero J. et Boixadera J., 2002** – Gypsic Soils. Encyclopedia of soil science, pp. 635-639.
- **Herrero J. et Porta J., 1990** – Micromorphology and genesis of soils enriched with gypsum. CIHEAM JAMZ (Saragosse).
- **Herrero J. et Porta J., 2000** – The terminology and the concepts of gypsum rich soils. Géoderma 96. pp. 47-61.
- **Herrero J., Porta J., Fedoroff N., 1992** – Hypergypsic soils micromorphology and landscape relationships in northern Spain. Soil. Soc. Am. J. 56. pp. 178-172.
- **Horta DE OS., 1982** – calcrete, gypcret and soil classification in Algeria. Engineering geology. N°15. pp.15-52.
- **I.N.C.T., 1960** – Carte d'Algérie : 1/500 000 Biskra.
- **I.N.C.T., 2000** – Comgéo : Support informatique de représentation des limites géographiques de l'Algérie. Segmentation en wilayas ou en communes. Ed. Droit commercial : Ins. Natio.Carto.Téled., Alger – Algérie.
- **I.S.R.I.C., 1987** – International Soil Reference and Information Centre. Procedures for soil analysis. 2nd Ed. Edited by Van Reeuwijk L.P. Technical paper. N°9.
- **Jabiol B., 2001** – L'eau dans le sol. Support cours physique du sol. FIF-ENGREF. 46p.
- **Jafarzadeh A.A. et Zinck J.A., 2000** – Worldwide distribution and sustainable management of soils with gypsum. pp. 1-6.
- **Jafarzadeh A.A. et Burnham C.P., 1992** – Gypsum crystal in soils. Journal of soil science, 43. pp. 409-420.
- **Kaddouri F.R., 1992** – Caractérisation des sols des oasis. El-Oued. Mem. Ing. INA (El Harrach). 57 p.
- **Kadri A., 1987** – Pédologie des milieux gypseux. D.E.A. Fac des sciences de Tunis. 171 p.
- **Kadri A. et Gallali T., 1991** – contribution à l'étude hydro-pédologique et géochimique des accumulations gypso-salines dans le Nefzaoua – Tunisie prés-saharienne. Revisita. Agricultura suptorica et tropical. pp. 189-240.
- **Kedadra Y., 1993** – Caractérisation et évolution des sols de Gout (ElOued). Caractérisation des accumulations et formes de gypse. Mém. Ing. INA (El Harrach). 98 p.
- **Keren R., Keit J.F., Shainberg., 1980** – Influence of size of gypsum particles on the hydraulic conductivity of soils. Soils sciences 130. pp.113-117.
- **Khademi H. et Mermut A.R., 2003** – Micromorphology and classification of argids and associated gypsiferous aridisols from central Iran. Science direct Catena. pp.1-14.

- **Kulke H., 1974** – Zur géologie und Mineralogie der Kalk und gibkursten Algeriens. *Geologichan*, 63, pp. 970-78.
- **Le Houérou H.N., Claudin J., Haywood M., 1977** – Etude bioclimatique des steppes algériennes (cartes 1/1.000.000). *Bull.Soc.Hist.Nat.D'Afr. du N.*, n°68.
- **Mardoud T., 1980** – Gypsiferous soils in the Balikh basin. Characteristics and productivity. *Soils Taxonomy Workshop, ACSAD*. pp. 308-320.
- **Martin H., 1963** – A suggested theory for the origin and a brief description of some gypsum deposits of Southern-West of Africa. *Transaction of the geological society of South Africa*, 66. pp. 345-51.
- **Mashali A.M., 1996** – Soil management practices for gypsiferous soils in Poch R.M.(ed). *Proceeding syr. Gypsum. Lleida, Spain*.
- **Mathieu C. et Pieltain F., 1997** – Analyse physique des sols. *Méthodes choisies*. 3^{ème} Ed. 262 p.
- **Mathieu C. et Pieltain F., 2003** – Analyse chimique des sols. *Méthodes choisies*. 387 p.
- **Millot G. Paquet A. et Ruellan A., 1969** – Néof ormation de l'attapulгите dans les sols à carapaces calcaires de la basse Moulouya (Maroc orie,tal). *C.R. Acad. Sci. Paris. Série D*, pp. 274-277.
- **Nettleton W.W., Nelson R.F., Barasher B.R., Der P.S., 1982** – Gypsiferous soils on the western United States. In: *soil science society of America. Special publication. N°10*. pp.147-168.
- **O.N.M., Office Nationale de Météorologie. Dar El Baida, Alger 2007.**
- **Ouamer-Ali K., 2009** – Contribution à l'étude des sols à gypseux d'Algérie. Valorisation d'une banque de données et détermination des profils références. *Mém. Mag. INA (El Harrach)*. 151 p.
- **Pankova Y.L. et Yamnova I.A., 1987** – Forms of gypsic neof ormation as controlling factor affecting the ameliorative properties of gypsiferous soils. *Soviet soils science. N°19*.pp.94-102.
- **Poch R.M., 1992** – Characteristics of the sand fraction of two hyper gypsic horizons of "Epila De Urgell" NE Spain. *Egypt. J. Soil. Sci* 32. N°4. pp.523-535.
- **Podwojewski P. et Arnold M., 1994** – The origin of gypsum in verticals in New Caledonia determined by isotopic composition of sulfur. *Géoderma*, 63, pp. 179-195.
- **Pouget M., 1968 (a)** – Contribution à l'étude des côûtes et encroûtement gypseux de nappe dans le sud Tunisien. *Cahier ORSTOM Serie pédologie. Vol.VI. N° 3-4*, pp. 309-365.
- **Pouget M., 1968 (b)** – Mesure de l'humidité sur des échantillons de sols gypseux. *Cahier ORSTOM*. pp. 139-148.
- **Pouget M., 1980** – Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises. *Thèse Doct. d'état, Université d'Aix-MarseilleIII*, 55p.
- **Rahmouni A., 2007** – Sortie pédagogique à Ouargla en première année de post-graduation.
- **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". *Thèse Mag. Univ. Batna*. pp. 37- 157.
- **Risacher F., 1978** – Genèse d'une croûte de gypse dans un bassin de l'Alciplano Boliven. *Cahier ORSTOM, série pédologie. N°10*. pp. 91 -100.
- **Rouahna H., 2007** – Relation entre les nappes et la salinité dans les sols gypseux de la région de Ain Ben Noui-biskra. *Thèse Mag. Université de Batna*, 83 p.
- **R.P.F., 1995** – Référentiel Pédologique Français. *Techniques et pratiques*. Ed. INRA. AFES. 332P.
- **Stoops G. et Allaiwi M., 1981** – Gypsum in arid soils. Morphology and genesis. *Proc. Third int soil class. Wokshop. ACSAD.Damascus, Syria*. Pp. 175-185.
- **Tahtah S., 2008** – Influence du gypse sur les propriétés mécaniques des mélanges Argiles/Sables. *Mém. Mag. Univ. Batna*. pp. 39- 59.
- **Taimah A.Y., 1992** – Formation of gypsic horizons in some arid region. *Soil of Jordan.Soil. Sci.* 135, 6, pp. 486-498.
- **Temmar N., 1995** – Caractérisation et dynamique des accumulations gypseuses en région désertique (El-Oued). *Mém. Ing. INA (El Harrach)*. 47 p.

- **Tir C., 2007** – Genèse des sols à accumulation gypso-calcaire et saline, dans la région de Ain Ben Noui (Biskra). Thèse Mag. INA (El Harrach). 105 p.
- **Tomas M., Summer M., E Weeks G., et Saigusa M., 1999** – Long term effects of gypsum on crop yield and subsoil chemical properties. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* N°39. pp. 891-895.
- **Toomamina N., Jalalian A., Eghbal M.K., 2001** – Genesis of gypsum enriched soils in North West Isfahan. Iran. *Géoderma*, 99,3. pp.199-224.
- **Tranchefort J., 1974** – La régression. Application à l'agronomie. Bureau d'étude statistique de l'I.T.F.C., Paris. 178 p.
- **Trichet J., 1963** – Description d'une forme d'accumulation de gypse par voie éolienne dans le sud Tunisien. *Bull. Soc. Géol. France.* Pp. 619-628.
- **U.S.D.A., 1999** – Soil Taxonomy, a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd ed. Agriculture handbook N°436, Washington D.C.
- **U.S.D.A., 2006** – Key to soil Taxonomy. Soil conservation service. United States Department of Agriculture. The Tenth edition. 332 p.
- **U.S.Salinity Laboratory Staff, 1954** – Diagnostic and improvement of saline and alkali soils. U.S.D.A. Handbook, N°60, 160 p.
- **Van Alphen J.G., et Los Rios Romero F., 1971** – Gypsiferous soils. Notes on their characteristics and management. *Bull. 12. International Institute for land reclamation and improvement wageningen.* 44 p.
- **Van Hoesen J.G. et Buch B.J., 1999** – Crystal morphology of pedogenic gypsum from buried soils of Holocen to late. Pleistocene age in south western New York Mexico. *Géological. Soc. Of Am. Abstracts with programs*, 31, 1p.
- **Van Hoesen J.G., 2000** – Pedogenic gypsum in Southern New Mexico: genesis, morphology and isotopic signature. M.S. thesis, Lasvegas Univ. of Nevada. Las Vegas. 183 p.
- **Veba M.P., 1996** – The forms of gypsum neoformation in the soils of Central Asian Deserts. *Proc. Int. Symposium on soil with gypsum. Leida, Catalonia, Spain.*
- **Vieilleffon J., 1976** – Les problèmes de l'analyse des sols gypseux. Inventaire critique des sols gypseux en Tunisie. « Etude préliminaire ». *Direction des ressources en eau et en sol de Tunisie. E.S.* 98, 80p.
- **Vieilleffon J., 1979** – Contribution à l'amélioration de l'étude analytique des sols gypseux. *Cahier ORSTOM. Série pédolo. Vol. XVII. N°3.* pp. 195-223.
- **Warren J.K., 1982** – The hydrological setting, occurrence and signification of gypsum in late Quaternary salt lakes in Sourthen Australia sedimentology. N°15. pp. 609-37.
- **Watson A., 1979** – Gypsum crusts in deserts. *Journal of arid environment* 1 (2). Oxford, pp. 3-20.
- **Watson A., 1980** – vegetation polygon in the central Namib desert. *Madouga serie*, 11-12.
- **Watson A., 1985** – Structure, chemistry and origin of gypsum crusts in Southern Tunisia and central Namib desert. *Journal of arid environment*, 15, pp. 19-42.
- **Watson A., 1988** – Desert gypsum crusts as paler environmental indicators: A micropetrographic study of crusts from southern Tunisia and the Central Namib desert, *Journal of arid environments*, pp. 19-42.
- **Watson A., 1989** – Desert crusts and rock varnish (Arid zone geomorphology) HALTSON press New York. Pp. 28-44.
- **W.R.B., 2006** – World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication. *World Soil Resources Reports N°103. FAO, Rome.* 128p.

ANNEXES

Annexe 1

Tableau I : Définitions des éléments formatifs (préfixes) utilisés au niveau du deuxième niveau du groupe de sol de référence des gypsisols (W.R.B., 2006)

Qualificatifs (préfixes)	Définitions
Arzic (az)	Ayant une nappe phréatique riche en sulfates endéans les 50 premiers cm du sol durant une certaine période de l'année et contenant en moyenne au moins 15 % ou plus de gypse sur une profondeur de 100 cm de la surface du sol, ou jusqu'à une roche fortement indurée ou cimentée (uniquement dans les Gypsisols).
Calcic (cc)	Ayant un horizon calcique ou des concentrations de carbonates secondaires endéans les 100 premiers cm du sol.
Duric (du)	Ayant un horizon durique endéans les 100 premiers cm du sol.
Gleyic (gl)	Ayant des propriétés gleyiques endéans les 100 premiers cm du sol. <u>Endogleyic</u> (ng): ayant des propriétés gleyiques entre 50 et 100 cm de profondeur <u>Epigleyic</u> (glp) : ayant des propriétés gleyiques endéans les 50 premiers cm de la surface du sol.
Gypsic (gy)	Ayant un horizon gypsique endéans les 100 premiers cm du sol. <u>Hypergypsique</u> (hp) : ayant un horizon gypsique avec 50 % (en poids) ou plus de gypse (uniquement dans les Gypsisols) . <u>Hypogypsique</u> (wg) : ayant un horizon gypsique qui a 25 % au moins de gypse endéans les 100 premiers cm de la surface du sol (uniquement dans les gypsisols).
Haplic (ha)	Exprimant certains caractères de manière typique (typique dans le sens qu'il n'y a pas de caractérisation supplémentaire ou significative)
Leptic (le)	Ayant une roche dure continue endéans les 100 premiers cm du sol. <u>Endoleptic</u> (nl) : ayant une roche dure continue entre 50 et 100 cm du sol. <u>Epileptic</u> (el) : ayant une roche dure continue endéans les 50 premiers cm de la surface du sol.
Luvic (lv)	Ayant un horizon argique dont la CEC est égale ou supérieur 24 cmol Kg^{-1} d'argile parout dans l'horizon ou bien à 50 cm de sa limite supérieure endéans les 100 premiers cm du sol ou bien les 200 premiers cm de la surface du sol, si l'horizon argique a une texture sableuse équilibrée ou plus grossière. Aussi, le taux de saturation en base (par $\text{NH}_4\text{OAc 1M}$) est de 50 % ou plus dans la majeure partie de entre 50 et 100 cm de la surface du sol.
Petric (pt)	Fortement cimenté ou induré endéans les 100 premiers cm du sol.
Pétoalcic (pc)	Ayant un horizon pétoalcique endéans les 100 premiers cm du sol.
Péto duric (pd)	Ayant un horizon péto durique endéans les 100 premiers cm du sol.
Salic (sz)	Ayant un horizon salique endéans les 100 premiers cm du sol <u>Endosalic</u> (ns): ayant un horizon salique compris entre 50 et 100 cm de profondeur <u>Episalic</u> (ea) : ayant un horizon salique endéans 50 cm de la surface du sol. <u>Hypersalic</u> (hs) : ayant une conductivité électrique de l'extrait à saturation supérieur de 30 dS m^{-1} à 25°C endéans les 100 premiers cm du sol. <u>Hyposalic</u> (ws) : ayant une conductivité électrique de l'extrait à saturation supérieur de 4 dS m^{-1} à 25°C endéans les 100 premiers cm du sol
Technic (te)	Ayant 10 % ou plus (en volume) d'objets fabriqués dans les 100 premiers cm de la surface du sol ou jusqu'à une roche continue ou un horizon cimenté ou induré.
Vertic (vr)	Ayant un horizon ou une propriété vertique endéans les 100 premiers cm du sol.

Annexe 1

Tableau II : Définitions des éléments formatifs (suffixes) utilisés au niveau du deuxième niveau du groupe de sol de référence des gypsisols (W.R.B., 2006)

Qualificatifs (Suffixes)	Définitions
Arenic (ar)	Ayant une texture d'un sable fin équilibré ou plus grossière sur une épaisseur de 30 cm ou plus endéans les 100 premiers cm de la surface du sol.
Aridic (ad)	Ayant des propriétés aridiques sans horizon Takyrique ou Yermique.
Clayic (ce)	Ayant une texture argileuse sur 30 cm d'épaisseur ou plus endéans les 100 premiers cm de la surface du sol.
Hyperochric (ho)	Ayant un horizon de surface de 5 cm d'épaisseur ou plus, avec une valeur de 5,5 à l'état sec et qui devient plus foncée en s'humidifiant. Aussi, l'horizon a une faible teneur en carbone organique (moins de 0,4 %) et une structure lamellaire dans 50 % ou plus du volume de l'horizon et un fine croûte surface.
Novic (nv)	Ayant au-dessus du sol un horizon avec des sédiments récents (nouveau matériel) sur une épaisseur comprise entre 5 et 50 cm.
Ruptic (rp)	Ayant une discontinuité lithologique endéans les 100 premiers cm de la surface du sol.
Siltic (sl)	Ayant une texture limoneuse, limoneuse équilibrée, limono-argileuse équilibrée ou bien limono-argileuse sur un épaisseur de 30 cm ou plus endéans les 100 premiers cm de la surface du sol.
Skeletic (sk)	Ayant entre 40 % ou plus (en volume) de graviers ou d'autres fragments grossiers jusqu'à 100 cm de profondeur ou jusqu'à une roche continue ou un horizon cimenté ou induré.
Sodic (so)	Ayant 15 % ou plus de sodium et de magnésium échangeables (ensemble) sur le complexe d'échange endéans les 50 premiers cm du sol. <u>Endosodique</u> (son) : Ayant 15 % ou plus de sodium et de magnésium échangeables sur le complexe d'échange entre 50 et 100 cm de profondeur. <u>Hyposodique</u> (sow) : ayant 6 % ou plus en sodium échangeable dans au moins un sous-horizon de plus de 20 cm d'épaisseur endéans les 100 premiers cm du sol.
Takyric (ty)	Ayant un horizon Takyrique.
Yermic (ye)	Ayant un horizon Yermique comprenant un pavement de désert. <u>Nudiyermic</u> (yes) : ayant un horizon Yermique sans pavement de désert.

Annexe 1

Tableau III : Significations des horizons et propriétés diagnostiques qui définissent les suffixes et les préfixes du groupe de sol de référence des gypsisols (W.R.B., 2006)

Horizons et propriétés diagnostiques	Définitions
Horizon argique	<p>Un horizon sub-superficiel ayant une teneur en argile nettement plus élevée que l'horizon sus-jacent. La différenciation texturale peut être due à une accumulation illuviale d'argile, à une formation pédogénétique prédominante d'argile dans le sous-sol, ou à la destruction de l'argile, ou à une activité biologique, ou à une érosion de surface sélective de l'argile, ou à des mouvements ascendants des particules grossières dus au phénomène de gonflement et retrait, ou à la combinaison de deux ou plus de ces différents processus. Il doit avoir :</p> <ul style="list-style-type: none"> - une texture sablo-limoneuse ou plus fine et au moins 8 % d'argile dans la fraction terre fine, et - plus d'argile total que dans un horizon sus-jacent de texture plus grossière de manière telle que : <ul style="list-style-type: none"> ▪ si l'horizon sus-jacent contient au moins 15 % d'argile totale dans la fraction terre fine, l'horizon argique doit contenir au moins 3 % d'argile en plus, ou ▪ si l'horizon sus-jacent contient 15 % ou plus mais moins de 40 % d'argile totale dans la fraction terre fine, le rapport argile de l'horizon argique/argile de l'horizon sus-jacent doit être d'au moins 1,2, ou ▪ si l'horizon sus-jacent contient 40 % ou plus d'argile totale dans la fraction terre fine, l'horizon argique doit contenir au moins 8 % d'argile en plus, et - une augmentation de la teneur en argile sur une distance verticale de 30 cm si l'horizon argique est dû à une illuviation. Dans les autres cas, l'augmentation de la teneur en argile entre l'horizon sus-jacent et l'horizon argique doit être verticale sur une distance verticale de 15 cm, et - une absence de structure de roche en place dans plus de la moitié de l'horizon, et - une épaisseur d'au moins un dixième de la somme de l'épaisseur de tous les horizons sus-jacent avec un minimum de 7.5 cm. si l'horizon argique est entièrement composé de lamelles, celles-ci doivent avoir une épaisseur cumulée d'au moins 15 cm. un horizon de texture plus grossière recouvrant l'horizon argique doit avoir au moins 18 cm d'épaisseur ou 5 cm si la transition texturale vers l'horizon argique est abrupte (voir changement textural brusque).
Horizon calcique	<p>Un horizon dans lequel du carbonate de calcium secondaire (CaCO_3) s'est accumulé soit sous forme de distributions diffuses, soit sous forme de concentrations discontinues. Il doit avoir :</p> <ul style="list-style-type: none"> - une teneur de 15 % ou plus de carbonate de calcium dans la fraction fine de la terre, (pour les horizons hypercalciques, plus de 50 % de carbonates de calcium dans la fraction fine), et - 5 % ou plus de carbonate de calcium plus élevé que l'horizon sus-jacent. - une épaisseur d'au moins 15 cm, même épaisseur requise pour l'horizon hypercalcique.

Horizon durique	<p>Un horizon sub-superficiel présentant des nodules faiblement cimentés ou indurés dont le ciment est de la silice (SiO₂), probablement sous forme d'opale ou de microcristaux de silice ("durinodes"). Il doit avoir :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 10 % ou plus (en volume) de durinodes dont les propriétés sont les suivantes : <ul style="list-style-type: none"> · elles ne se délitent pas dans l'acide chlorhydrique (HCl) concentré, mais bien dans l'oxyde de potassium (KOH) concentré et chaud après traitement à l'HCl, et · elles sont fermes ou très fermes et cassantes à l'état humide, à la fois avant et après traitement à l'acide, et · Elles ont un diamètre d'au moins 1 cm, et - une épaisseur égale ou supérieure à 10 cm.
Horizon pétrocalcique	<p>Un horizon calcique induré dont le ciment est le carbonate de calcium et, certains endroits, du carbonate de calcium et d'un peu de magnésium. Il est naturellement soit massif, soit lamellaire, et extrêmement dur. Il doit avoir :</p> <ul style="list-style-type: none"> - une très vive effervescence à l'HCl (10 %), et - une cimentation par du carbonate secondaire telle que des fragments secs ne se délitent pas dans l'eau et que les racines ne peuvent pas le pénétrer sauf le long des fissures verticales dont l'espacement horizontal est d'au moins 10 cm et occupant moins de 20 % (en volume) de l'horizon, et - une croissance extrêmement dure lorsque l'horizon est sec, au point qu'il ne peut être creusé à la bêche ou à la sonde, et - une épaisseur d'au moins 10 cm, ou 1 cm s'il est laminaire et repose directement sur la roche.
Horizon pétrodurique	<p>Egalement connu sous le nom du duripan ou dorbank (Afrique du sud), est un horizon sub-superficiel, généralement rougeâtre ou brun rougeâtre, cimenté principalement par de la silice secondaire (SiO₂), probablement sous forme d'opale ou de microcristaux de silice). Les fragments séchés à l'air ne se délitent pas dans l'eau, même après immersion prolongée. Le carbonate de calcium peut être présent, mais comme agent cimentant accessoire. Il doit avoir :</p> <ul style="list-style-type: none"> - une cimentation ou une induration dans plus de 50 % d'un ou ses sous-horizons, et - des marques d'accumulation de silice (opale ou autres formes de silices), et - moins de 50 % du volume se délissant dans l'HCl 1M, même après imbibition prolongée, mais plus de 50 % se délissant dans KOH concentré ou bien dans des bains alternés acides et alcalins, et - une continuité latérale telle que des racines ne peuvent le pénétrer sauf le long de fractures verticales dont l'espacement horizontal est d'au moins 10 cm et occupant moins de 20 % (en volume) de l'horizon, et - une épaisseur d'au moins 1 cm.
Horizon salique	<p>Un horizon situé en surface ou à faible profondeur et qui est caractérisé par un enrichissement secondaire de sels facilement solubles, c'est-à-dire en sels plus solubles que le gypse (CaSO₄.2H₂O; log Ks = -4.85 à 25 °C). il doit avoir :</p> <ul style="list-style-type: none"> - une conductivité électrique (CE) de l'extrait de saturation supérieur à 15 dS/m à 25 °C à certains moments de l'année, ou une CE de plus de 8dS/m à 25°C à certains moments de l'année, si le pH (H₂O) de l'extrait de saturation dépasse 8,5, et - une épaisseur d'au moins 15 cm, et - un produit de l'épaisseur en cm avec la CE d'au moins 450.

Horizon takyrique	<p>Un horizon de surface de texture lourde comprenant un croute de surface et une partis inférieur de structure lamellaire. Il se forme sous conditions arides dans des sols périodiquement inondés. Il doit avoir :</p> <ul style="list-style-type: none"> - des propriétés aridiques, et - une structure lamellaire ou massive, et - une croûte de surface qui a toutes les propriétés suivantes : <ul style="list-style-type: none"> ▪ une épaisseur suffisante pour qu'elle ne se recroqueville pas entièrement en se desséchant, ▪ des fentes polygonales de dessiccation s'étendant sur au moins 2 cm d'épaisseur lorsque le sol est sec, ▪ une texture sablo-argilo-limoneuse, argilo-limoneuse, limono-argilo-limoneuse ou plus fine, ▪ une consistance très dure à l'état sec, et très plastique et collante à l'état humide, et ▪ une conductivité électrique (CE) à pâte saturée à 4 dS/m, ou inférieure à celle de l'horizon immédiatement sous-jacent à l'horizon takyrique.
Horizon vertique	<p>Un horizon sub-superficiel argileux qui, suit à des contractions et gonflements répétés présente des peds polis et rayés en surface ("faces de glissement appelés aussi slickensides"), ou des agrégats structuraux en fuseaux ou parallélépipédiques. Il doit avoir :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 30 % ou plus d'argile sur toute son épaisseur, et - des agrégats structuraux en fuseaux ou parallélépipédiques dont l'axe longitudinal est incliné de 10 à 60° par rapport à l'horizontale, et - des fasses de glissements qui se recourent, et - une épaisseur d'au moins 25 cm.
Horizon yermique	<p>Un horizon superficiel qui est constitué généralement, mais pas toujours, d'accumulations en surface de fragments de roches ("pavement de désert") enveloppés dans une croûte vésiculaire loameuse et couverts d'une couche mince de sable éolien ou de loess. Il doit avoir :</p> <ul style="list-style-type: none"> - des propriétés aridiques, et - un ou plus des critères suivants : <ul style="list-style-type: none"> ▪ un pavement vernissé ou comprenant des pierres ou graviers modelés par le vent ("ventifacts"), ou ▪ un pavement et une croûte vésiculaire, ou ▪ une croûte vésiculaire reposant sur un horizon A lamellaire, sans pavement.
Propriétés aridiques	<p>Les propriétés aridiques combinent un certain nombre de propriétés communes aux horizons de surface des sols présents en conditions arides et là où la pédogenèse se développe plus vite que les nouvelles accumulations de surface dues à l'activité éolienne ou alluviale. Les propriétés aridiques ont tous les caractères suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - une teneur en carbone organique inférieure à 0,6 % si la texture est un loam sableux ou plus fine, ou inférieure à 0,2 % si la texture est plus grossière qu'un loam sableux, prise en moyenne pondéré dans les 20 premiers cm du sol ou sous le sommet d'un horizon diagnostique de sub-surface, ou d'un horizon cimenté ou de la roche, s'ils sont plus superficiels, et - des preuves d'activité éolienne sous l'une ou l'autre des formes suivantes : <ul style="list-style-type: none"> ▪ la fraction sable, dans un sous horizon ou dans des fissures remplies de matériau soufflé, contient une proportion importante de particules de sables arrondies ou subangulaires présentant une surface mate (en utilisant une loupe grossissant 10 fois). Ces particules présentent 10 % ou plus de la fraction sable quartzeux moyen et plus grossier, ou ▪ des fragments de roches usées par le vent ("ventifacts") en

<p>Propriétés gleyique</p>	<p>surface, ou</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ de l'aéroturbation (exemple des couches croisées) ▪ des preuves d'érosion et/ou de dépôts éoliens, et <p>- des échantillons à la fois brisés et écrasés ont une valeur de couleur Munsell égale ou supérieure à 3 à l'état humide et égale ou supérieure à 4,5 à l'état sec, et un chroma égal ou supérieur à 2 à l'état humide, et</p> <p>- un taux de saturation en bases supérieur ou égal à 75 %.</p> <p>Un matériau a une propriété gleyique s'il est complètement saturé par la nappe phréatique pendant une période qui permet à des conditions réductrices de régner et s'il présente un modèle de couleur gleyique. Ce dernier peut être identifié par l'une ou les caractères suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 90 % ou plus de la matrice du sol reflétant des conditions d'engorgement (propriété réductomorphiques) permanent exprimés par des couleurs neutres (blanc à noire : N1 à N8) ou bleuâtres à verdâtres (2,5Y, 5Y, 5G, 5B), ou - 5 % ou plus de la matrice du sol reflétant l'alternance de conditions réductrices et oxydantes, comme cela se passe dans la frange capillaire et dans les horizons de surface des sols à niveau phréatiques fluctuant. Ce sont des propriétés oximorphiques. Ces derniers s'expriment par des tâches brun rougeâtre ou brun rougeâtre brillant, ou par des tâches jaunes brillant dans les sols sulfatés acides.
<p>Propriété verticale</p>	<p>Un matériau de sol a une propriété verticale est défini par l'une ou les deux caractères suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 30 % ou plus d'argile sur une épaisseur de 15 cm ou plus, et <ul style="list-style-type: none"> ▪ des faces de glissements "Slikensides" ou des agrégats de formes compressées, ou ▪ des fentes qui s'ouvrent et se ferment périodiquement et ayant une largeur de 1 cm ou plus, ou - un indice COLE de 0.06 ou plus sur une épaisseur de 100 cm de la surface du sol

Annexe 2

Tableau I : Normes d'interprétation du (CV) In Nolin et Caillier (Agrosol, 1992)

CV (%)	Classes de variabilité
< 15	Faible
15-35	Modérée
35-50	Elevée
50-100	Très élevée
> 100	Extrêmement élevée

Tableau II : normes d'interprétation du calcaire total (Lozet et Mathieu, 1990)

CaCO ₃ %	Classes de calcaires
<2	Trace
2-10	Faible
10-25	Moyenne
25-50	Forte
> 50	Très forte

Tableau III : Normes d'interprétation de la CE (USDA, 1954)

CE (dS/m)	Classes de salinité
0-2	Non salé
2-4	Légèrement salé
4-8	Salé
8-16	Très salé
> 16	Extrêmement salé

Tableau IV : Classes de percolation d'après le coefficient K (Aubert, 1979 In Mathieu et Pieltain, 1997)

Valeurs de K (cm/heure)	Vitesse de filtration
0-0,1	Très lente
0,1-0,5	Lente
0,5-2	Assez lente
2-6,5	Moyenne
6,5-12,5	Assez rapide
12,5-25	Rapide
>25	Très rapide

Tableau V : Relation entre l'humidité au point de flétrissement et à la capacité au champ en fonction de la texture (Jamagne et al. 1977 In Jabiol, 2001)

Texture	H CC %	HF %
S	8 %	3 %
SL	12 %	5 %
LS	19 %	9 %
LSA	22 %	11 %
L	17 %	8 %