

**INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE EL-HARRACH (ALGER) (I.N.A)**  
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER EN SCIENCES AGRONOMIQUES  
Spécialité Science du sol (Pédologie)  
Option : Pédosphère

# ***CONTRIBUTION A L'ETUDE DES SOLS GYPSEUX D'ALGERIE***

**valorisation d'une banque de données et  
détermination des profils références**

**Présenté par : M. OUAMER-ALI KARIM**

M HAMDIAISSA. B Maître de Conférence Directeur de thèse

M. DJILI. K Professeur Co-directeur de thèse

Devant le jury composé de : M. DAOUD. Y Professeur Président M. DRIDI. B Professeur Examineur  
Mme KOURGHLI. N Chargée de Cours Examinatrice



# Table des matières

Dédicace . . .	5
Remerciements . . .	6
Résumé . . .	8
Summary . . .	9
ص غ ل م ل ا . . .	10
Abréviations . . .	11
Introduction Générale . . .	12
CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE . . .	14
1. Le gypse: Élément et Minéral . . .	14
Introduction . . .	14
1. 1. Caractéristiques et propriétés du gypse . . .	14
1. 2. Processus de Déshydratation - Réhydratation . . .	20
2. Généralités sur les sols gypseux . . .	21
2. 1. Présentation des sols gypseux . . .	21
2.2. Répartition spatiale des sols gypseux . . .	22
2. 3. Pédogenèse des sols gypseux . . .	25
2.4. Morphologie caractéristique des accumulations du gypse . . .	28
2.5. Les accumulations gypseuses observées en Algérie . . .	29
2. 6. Caractéristiques et propriétés des sols gypseux . . .	30
2. 7. Particularité de la classification des sols gypseux . . .	32
2. 8. Méthodes de détermination du gypse . . .	36
2. 9. Relation gypse-constituants sol-végétation . . .	39
2. 10. Les Contraintes d'une valorisation agricole des sols gypseux . . .	40
CHAPITRE II. Matériel et Méthodes . . .	41
Introduction . . .	41
1. Mise en place de la banque de données pédologiques . . .	41
1. 1. Acquisition des données . . .	41
1. 2. Saisie et mise en forme des données de la banque . . .	43
2. Délimitation et présentation des milieux caractéristiques des études et des profils . . .	43
3. Traitement des données . . .	46
3. 1. Spatialisation des taux et des formes de gypse . . .	46
3. 2. Analyse statistique classique . . .	47
4. Détermination des principaux groupements gypseux sur la base d'une approche multidimensionnelle . . .	51
4. 1. Principe de mise en œuvre de la matrice . . .	52
5. Identification et détermination des profils références des sols à gypse . . .	54
Chapitre III. Résultats et discussions . . .	56
Introduction . . .	56
1. Les taux de remplissage de la banque de données . . .	56
1. 1. Les données quantitatives . . .	57

<b>1. 2. Les données qualitatives . .</b>	<b>58</b>
<b>2. Analyse statistique classique . .</b>	<b>59</b>
<b>2. 1. Approche globale . .</b>	<b>59</b>
<b>2. 2. Approche par catégorie d'horizons . .</b>	<b>85</b>
<b>Conclusion générale . .</b>	<b>95</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES . .</b>	<b>99</b>
<b>ANNEXE . .</b>	<b>116</b>
ANNEXE II . .	116
ANNEXE III . .	116
ANNEXE IV . .	117
ANNEXE V . .	118
ANNEXE VI . .	118
ANNEXE VII . .	118

---

## Dédicace

*A ma très chère, tendre, et combien courageuse mère. A ma douce et bien aimée femme Zahia. A mes deux adorables fils : Wassim-Chiheb et Samy. A mes frères : Sofiane, Tarik, Salaheddine (Dino). A ma sœur Asma et son mari Djamel. A Djazia et Aicha. A mes petits neveux: Ziad, Imad et Mérièm. A mon grand cousin Hamoud Hazi et sa petite famille. A ma Tante Dounia et ses enfants. A la famille Youyou. A Noucha et la famille Belhimer. A la famille Sider. A Skander et Wahiba Mekersi. A la famille Saïbi A Benhassen Med. A Kader, Saïd, Nassim, Ziriad, Tarik.... mes Vieux Amis du « SOR ». A Wahid, Mokrane, Hamid et Hocine. A Habib Z., Youcef Kh., Fethi S.Y., Assia M., Nazli N.B., Belkacem O., Mohamed.Y., Samira Y., Samira M., Zahida D., Zinou C., Kamel Gh., AbdelGhani K., Halim, Wahab B., Samir H-M, Amine I., Rabeh K., Hassen B., Hakim B., Mohamed B., Hakim M., Boualem D., Houria. A Ahmed B. (I.N.A-G.R.) et Smail B. Au personnel du département de science du sol de l'I.N.A. : El-Hadi O.F., Rédouane B., Amar M., Ahmed O., et Fétouma L. A mes collègues de L'I.N.S.I.D. A la mémoire de \* Mon très cher père El-hadj slimane. \* Mon Oncle Mostepha. \* Mon Oncle Madjid. \* Mes deux grand-mères : Cheriffa et Lalla. \* Mes deux inoubliables amis : Farid Sider Et Rédouane Benmérabet. Ceux qui nous ont quittés*

## Remerciements

Ce mémoire est l'aboutissement de Cinq années de travail, avec d'incessants déplacements entre le département de Science du sol de l'Institut National Agronomique, l'INSID, l'INRF et l'A.N.R.H.

Je tiens à exprimer mes remerciements et ma profonde gratitude à :

- M. Hamdi-Aissa. B., Maître de conférence (Université de Ouargla - département des sciences agronomiques), qui a, en tant que Directeur de Thèse, suivi ce travail de près, même lorsque 800 km nous séparaient. J'ai beaucoup appris avec lui, je le remercie pour sa confiance.
- M. Djili. K., Professeur à l'I.N.A., qui, en tant que Co-promoteur, m'a fait profiter de son expérience, ses conseils et ses suggestions pertinentes. Je le remercie chaleureusement pour avoir accepté de participer à cette aventure.
- \*M. Daoud. Y., Professeur à l'I.N.A., qui malgré un emploi du temps chargé, m'a fait le grand honneur d'accepter de présider mon jury. Je le prie de bien vouloir trouver ici l'expression de ma gratitude.
- \*Mme Kourghli. N., Chargée de cours à l'I.N.A., qui a bien voulu m'accorder son attention en prenant connaissance du manuscrit dans le détail et en analysant chaque point avec bienveillance. Je la remercie vivement de sa participation dans le jury.
- \*M. Dridi. B., Maître de conférence à l'I.N.A., qui m'a fait l'honneur de siéger dans mon jury de thèse. Qu'il soit assuré de ma reconnaissance et ma gratitude pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Mes remerciements et ma grande reconnaissance au Pr. Daoud.Y, pour ses précieux conseils et critiques. Il est pour moi un exemple de rigueur scientifique et de disponibilité.

Mes vifs remerciements s'adressent également à :

- M. Zanndouche W., Attaché de Recherches à l'I.N.R.F. (Algérie), pour son aide, ses relectures et son soutien constant ...
- M. Auvray C., Chargé de Recherches à LA.E.G.O.-E.N.S.G. et I.N.P.L.-Nancy (France), pour sa disponibilité et son inestimable aide.
- M. Himrane H., Chargé de Recherches à l'I.N.R.F. (Algérie), pour ses orientations et son aide dans le traitement des données.
- M. Dekkiche B., Chargé de cours à l'I.N.A., pour ses remarques et ses encouragements.
- M. Habila Med, « Directeur Général de l'institut national des sols, de l'irrigation et du drainage », pour les facilités accordées, particulièrement lors de l'année théorique.
- M. Kellou. Abd. pour ses conseils et son aide dans la réalisation des cartes et graphiques.
- L'ensemble du personnel du département de Pédologie de l'A.N.R.H.
- M. Hamouni. Med. pour ses orientations et critiques « statistiques ».
- Mme Ziane A., M. Kessal A. et Mme Ahmed-Zaid N. pour leur disponibilité et leur immense aide.
- M. Sahbi H., Melle Dehnoune Z. et Melle Malou S. pour leurs relectures attentives et minutieuses du document.
- Ma mère pour ses encouragements et ses prières et Ma femme pour sa patience et son dévouement.

« Tous les progrès sont précaires, et la solution d'un problème nous confronte à un autre problème »  
Martin Luther King

## Résumé

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les sols gypseux d'Algérie. Il s'agit, dans un premier temps, de caractériser l'importance, la structuration et la distribution dans l'espace et dans le profil des taux et des formes de gypse « à l'échelle de l'Algérie ». En second lieu, il s'agit d'évaluer l'organisation fonctionnelle et descriptive de cet élément en tenant compte du maximum de paramètres pédologiques pouvant intervenir dans le comportement et le fonctionnement de ces sols. Enfin, il s'agit de mettre en évidence, sur les plans morphologique, analytique et fonctionnel, les principaux groupements de sols gypseux pouvant être observés en Algérie et de tenter de déterminer des profils de référence.

L'approche méthodologique choisie a porté sur l'élaboration d'une banque de données informatisée, la délimitation et la présentation des milieux caractéristiques des études et des profils, et enfin le traitement statistique de l'information collectée en utilisant deux approches statistiques différentes. La première approche est une analyse statistique classique, et la seconde porte sur une analyse multidimensionnelle (ACP) dont le traitement appliqué repose sur une association des paramètres descriptifs et analytiques.

Les principaux résultats obtenus indiquent que les sols d'Algérie présentent des taux de gypse moyen d'environ 16% avec une variabilité importante. Dans leur globalité, les sols sont modérément gypsifères à gypsifères. Ils indiquent aussi que l'élément discriminant peut être associé à n'importe quelle fraction granulométrique du sol, qu'il s'oppose proportionnellement à la présence du calcaire total, qu'il interfère grandement dans la fonctionnalité de la CEC, et que son accumulation dans le sol, même si elle est prédominante dans les milieux secs à très secs, répond à la structuration de référence suivante :

Etage aride > Etage saharien > Etage semi-aride.

Pour l'approche par catégories d'horizons d'étude (h1, h2, hp), l'application des régressions simples indique que le gypse reste fortement corrélé, pour les trois horizons des profils, avec les paramètres texturaux (argile, limon, sable) et le calcaire total, alors qu'avec la CEC la relation n'est significative et intense qu'au niveau des horizons de profondeur. D'un autre côté, et contrairement à l'approche initiale, notre élément discriminant semble développer une relation significative et intense avec le Calcium soluble ( $Ca^{++}$ ), au niveau des horizons de profondeur. L'évaluation de l'interaction avec la pluviométrie, par rattachement aux étages bioclimatiques de références (étage semi-aride, étage aride, étage saharien), nous a permis de confirmer les résultats de l'approche globale, tout en proposant une structuration verticale de la distribution des taux de gypse dans le profil « propre à chaque étage climatique ».

L'analyse multidimensionnelle (ACP) nous a permis de mettre en évidence 6 groupements de sols à gypse bien distincts. L'affinement des résultats de l'ACP et l'exploitation du rôle de chaque axe nous a aidé à établir une clé de prédiction et d'identification des profils références des sols à gypse.

Mots clés : gypse, sols gypseux, Algérie, Banque de données, horizons, régression, analyse multidimensionnelle.

## Summary

The principal objective of this work is to study the gypsiferous soils of Algeria. It acts initially, to characterize the importance, the structuring and the distribution in space and profile, of the rates and the gypsum shapes on the scale of Algeria. In the second place, it is a question of evaluating the functional and descriptive organization of this element by taking account of the maximum of pedological parameters which can intervene in the behaviour and the operation of these soils. At last, it is a question to underline, on morphological, analytical and functional plans, the principal groupings of gypsiferous soils being able to be observed in Algeria and also trying to determine reference profiles.

The selected methodological approach related to the development of a computerized data bank, the delimitation and the presentation of the surroundings characteristic of the studies and profiles, and finally, the statistical processing of the collected information by using two different statistical approaches. The first approach is a traditional statistical analysis, and the second is a multidimensional analysis whose applied treatment rests on an association of the descriptive and analytical parameters.

The principal results obtained indicate that the grounds of Algeria show average gypsum rates from approximately 16% with a significant variability. In their globality, the soils are moderately gypsiferous to gypsiferous. They also state that the discriminate element can be associated at any particle shape of the soil, that it is opposed proportionally to the presence of total limestone, that it interferes largely in the functionality of the CEC, and that its accumulation in the ground, even if it is prevalent from dry to very dry environment, it answers to the structuring of following reference:

Arid stage > Saharan stage > Semi-arid stage

For the approach by category of horizon of study (h1, h2, hp), the application of the simple regressions indicates that the gypsum remains strongly correlated, for the three horizons of profiles, with the textural parameters (clay, silt, sand) and total Calcareous, whereas the relation is significant and intense only on the level of the horizons of depth with the CEC. In other side, and contrary at the initial approach, our discriminating element seems to develop a significant and intense relation with soluble calcium (Ca<sup>++</sup>), in the depth horizons. The evaluation of the interaction with rainfall, by fastening on the bioclimatic stages of reference (semi-arid stage, arid stage, Saharan stage), made it possible to confirm the results of the global approach, while proposing a vertical structuring of the gypsum rates distribution in the profile " specifically to each climatic stage ".

The multidimensional analysis permitted us to create 6 groupements of quite distinct soils with gypsum. The refinement of the results of the multidimensional analysis and the exploitation of the role of each axis helped us to establish a prediction key and identification of the reference profiles of gypsiferous soils.

key words: gypsum, gypsiferous soils, Algeria, Data Bank, horizons, regression, multidimensional analysis.

## ص خل مل ا

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة الأراضى "الجبسية" عبر التراب الجزائري ويتعلق الأمر بتجسيد أهمية هيكلية وتوزيع نسب الجبس وأشكاله على مستوى الوطن وذلك حسب الخصائص والساوور هذا من جهة ، ومن جهة أخرى (Pédologiques) أخرى يمكن هذا العمل من تقييم حركية هذا العنصر تفصيلا، مع مراعات بعض العناصر تؤثر على التربة، وبصفة عامة فإن الهدف مما سبق ذكره هو ضبط أهم مجتمعات التربة الجبسية و السورولوجية تحليليا و نشاطا، و التي يمكن ملاحظتها عبر التراب الوطني وكذا محاولة إستخلاص معالم مرجعية .

وتم إختيار منهجية عمل تتمثل في إنشاء بنك معلوماتي مدمج بالإعلام الآلي، وكذا تحديد واستظهار الاراسات و الساوور، وبصفة أخرى جمع المعلومات من خلال مصدري إحصاء مختلفين، المصدر الأول يتمثل في دراسة تحليلية (، و الذي يركز بدوره CP لإحصائية تقليدية (كلاسيكية) ، و أما المصدر الثاني فيتمثل على تحليل مختلف الأبعاد ( على مجموعة أطر بيانية و تحليلية .

أهم النتائج المستخلصة تشير إلى أن نسبة الجبس بالأراضى الجزائرية تمثل حوالي 16% مع خنبرات معتبرة و إجمالاً فإن الأراضى في الواقع هي جبسية إلى جبسية معتدلة و يشير هذا أيضا إلى أن أي تمييز حبيبي للتربة ذو و رغم CEC علاقة بعنصر التنيير، و الذي يفترض بدوره و بصفة نسبية على عنصر الكلس، و يؤثر على حركية وجوده المكثف بالمناطق الجافة و الجد جافة فهو يستجيب للهيكلة و المرجح الآتي :

الطبقة القاحلة < الطبقة الصحراوية < الطبقة شبه قاحلة

(، فإن تطبيق التراجع البسيط يشير إلى أن الجبس يبقى متماسكا  $h_1, h_2, h_p$  في ما يتعلق بالأصناف الأتقية للدراسة ( وذلك حسب (صلصال ، طمي ، Texturaux بشكل جيد و ذلك حسب أفاق الساوور الثلاثة مع الأبعاد السعيارية ( رمل) و عنصر الكلس.

\* فإن العلاقة تبقى عديمة و غير مؤثرة إلا على مستوى الأفاق الأعمقة ومن جهة أخرى CEC أما فيما يتعلق بـ ( على مستوى ++C و خلافا للإستنتاج الأول فإن عامل التنيير يظهر علاقة جلية و مؤثرة مع الكالسوم المستخلص ( الأفاق الأعمقة إن تقييم داخل نسبة ساقط الأمطار الملحق بطبقات بيو مناخية المرجعية (طبقة شبه قاحلة - طبقة قاحلة - طبقة الصحراوية).

هذا التقييم يسمح لنا بتأكيد الإستنتاج العام، مع إقتراح هيكلية أتقية لتوزيع نسب الجبس على محور "خاص بكل طبقة مناخية".

و (ACP) فيسمح لنا بضبط ك مجتمعات مختلفة للتربة الجبسية. و تسمح لنا نتائج CP أما التحليل مختلف الأبعاد ( تدقيقها وكذا إستدلال دور كل الساوور من إستكشاف مدخل يسمح لنا من تحديد محاور ومراجع حول الأراضى الجبسية.

الكلمات الرئيسية : الجبس ، التربة الجبسية ، الجزائر، بنك معلوماتية الأفاق، تحليل التراجعي ، تحليل متعدد الأبعاد.

: فقرة التبادل المشاردي \*CEC

---

## Abréviations

- A.N.R.H. : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.
- U.S.T.H.B. : Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- I.N.C.T. : Institut National de Cartographie et Télédétection.
- A ou Arg. : argile (%).
- L : limon (%).
- S : sable (%).
- g : gypse
- T : Texture
- Calc.tot ou C.t.: Calcaire total (%).
- C.E.C. : Capacité d'échange cationique (mé/100g).
- E.S.P. : Ex changeable sodium percentage (%).
- CE. : Conductivité électrique (dS/m).
- pH : potentiel hydrogène
- P ou pluvio. : pluviométrie (mm)
- C.P.C.S. : Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols.
- F.A.O.: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- U.S.D.A.: United States Department of Agriculture.
- B.R.M. : Base de Référence Mondiale pour les Ressources en Sols.
- U.S.S.L.: U.S. Salinity Laboratory Staff.
- h1 : horizons de surface.
- h2 :horizon de sub-surface.
- hp :horizon de profondeur.
- CV.: Coefficient de variation.
- sgn. : Signification statistique.
- ddl: degré de liberté.
- F.: Facteur
- S.A.S.: Statistical Analysis System
- A.C.P. : Analyse en composante principale.
- C.A.H. : Classification ascendante hiérarchique.

# Introduction Générale

La ressource en sols cultivables est limitée au niveau mondial, elle subit continuellement différentes actions de dégradation (Girard et al., 2005). En effet, sur les 15 milliards d'hectares de terres émergées (soit 29.3% de la superficie de la terre), la ressource en sols cultivables ne représente que 22% des terres, soit 3300 millions d'hectares. En réalité, les sols actuellement cultivés ne représentent que 1392 millions d'hectares. Les terres non cultivées présentent soit des contraintes biophysiques (aridité, pentes fortes), soit des contraintes chimiques (acidité, toxicité alumique), soit elles sont occupées par des forêts ou autres biomes (Cheverry et Robert, 1996; Robert et Stengel, 1999). Par ailleurs, selon Girard et al. (2005), plus de deux milliards d'hectares de terres sont perdus sous l'effet de processus de dégradation divers.

L'accumulation de différents sels dans les sols constitue l'un des principaux processus de leur dégradation, elle est fréquente dans les régions arides et semi-arides, elle touche près d'un milliard d'hectares (Sumner, 1993; Cheverry et Bourrié, 1998). Cette salinisation porte sur l'accumulation de sels de différente solubilité (calcaire, gypse, chlorure de sodium, ...). Il en résulte soit des teneurs supérieures aux seuils de tolérances des cultures qui provoquent des chutes de rendements, soit des terres incultes (absence de végétation), soit l'installation de paysages naturels typiques et spécifiques (Duchaufour, 1988; Bouteyer et Loyer, 1992). Parmi ces sels, le gypse occupe une place importante car c'est un sel qu'on rencontre à tous les niveaux des ères géologiques bien que les gisements les plus importants appartiennent aux ères secondaire et tertiaire. D'après Eswaran et al. (1981), le gypse constitue la forme de sulfate de calcium la plus répandue dans le sol.

Il faut signaler que le gypse peut être observé dans les sols des régions humides mais généralement à de faibles teneurs car il est considéré comme un élément éphémère (Herrero et Porta, 2000). Par contre, dans les régions arides et semi-arides, il serait permanent en se localisant à différents niveaux du paysage ou en différentes parties du profil pédologique (Pouget, 1980; Halitim, 1988).

Lorsqu'il est présent en faible quantité, le gypse a un effet positif sur les propriétés du sol et peut jouer un rôle d'amendement et d'engrais car il apporte des ions  $Ca^{++}$  et  $SO_4^{--}$  nécessaires à la croissance des plantes. Par contre, à des teneurs élevées, il affecte le comportement et le fonctionnement des sols et des plantes (Pouget, 1995). Toutefois, la teneur en gypse d'un horizon ou d'un sol n'est pas forcément le facteur le plus important car les formes d'accumulation gypseuse sont fondamentales (Pouget, 1995). Selon, le degré de précipitation du gypse dans le profil, on distingue deux types d'accumulations (Dekkiche, 1974; Abdesselam, 1999):

- les accumulations localisées ou discontinues qui regroupent les nodules, les amas friables, les racines gypsifiées, les pseudomycéliums, et le gypse diffus ;
- les accumulations généralisées ou continues qui regroupent les croûtes et les encroûtements.
- Ces accumulations sont souvent le résultat des différentes sources d'apports ou d'enrichissements sous l'impulsion de différents mécanismes ou processus de formation (Halitim, 1988; Fedoroff et Courty, 1989; Boyagdiev et Sayegh, 1992; Herrero et Boixadera, 2002).

Les différents systèmes de classification des sols (CPCS, FAO, USDA, RPF) utilisent des descriptions et des caractéristiques pour définir les types et la nature des sols contenant du gypse. Généralement, c'est l'appellation de « sols gypseux » qui est utilisée pour désigner des sols contenant du gypse à des teneurs variables (F.A.O., 1990; Pouget, 1995).

L'étendue des sols gypseux dans le monde serait difficile à établir. D'après la 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.

En Algérie, ces sols semblent occuper une superficie de 7966,3km<sup>2</sup> (F.A.O, 1990 ; Mashali, 1995, 1996). Dans les régions du Nord, ils sont relativement localisés et se confinent généralement dans les zones dépressionnaires (chotts) et autour des formations géologiques gypsifères de l'étage bioclimatique aride (Djili, 2000). Dans les régions de l'intérieur où l'aridité devient plus importante, ils occupent une superficie importante principalement au niveau des oasis (Durand, 1954; Mediouni, 1997; Abdesselam, 1999). Leur superficie cartographiée est estimée à près d'un million d'hectares (ministère de l'équipement, in Daoud et Halitim, 1994). Djili (2000), considère que les sols les mieux pourvus en gypse sont ceux qui se situent légèrement au sud du domaine des sols calcaires.

Les quelques travaux réalisés jusqu'à présent sur les sols gypseux d'Algérie ont abordé soit l'aspect descriptif « des formes d'accumulations gypseuses » mais de manière localisée (Durand, 1963; SOGREAH, 1969; Dutil, 1971; Kulke, 1974; Halitim, 1988; Bernou, 1996; Bensaid, 1999; Djili, 2000; Hamdi-Aissa et al., 2004), soit l'aspect géochimique sur la base de l'étude de l'interaction eau de nappes - sols (Rouahna, 2007), soit l'aspect chimique et Biologique (Sabah, 2006), et enfin soit les aspects géochimique, minéralogique, micro-morphologique et physique (Dekkiche, 1974; Halitim, 1988; Abdesselam, 1999; Hamdi-Aissa, 2001).

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les sols gypseux d'Algérie. Il s'agit, dans un premier temps, de caractériser l'importance, la structuration et la distribution dans l'espace et dans le profil des taux et des formes de gypse « à l'échelle de l'Algérie ». En second lieu, il s'agit d'évaluer l'organisation fonctionnelle et descriptive de cet élément en tenant compte du maximum de paramètres pédologiques pouvant intervenir dans le comportement et le fonctionnement de ces sols. Enfin, il s'agit de mettre en évidence, sur les plans morphologique, analytique et fonctionnel, les principaux groupements de sols gypseux pouvant être observés en Algérie et de tenter de déterminer des profils de référence.

Pour ce faire, ce travail a nécessité l'élaboration d'une banque de données informatisée, la délimitation et la présentation des milieux caractéristiques des études et des profils, et enfin la réalisation d'un traitement statistique de l'information collectée par deux approches statistiques différentes. La première approche est une analyse statistique classique, et la seconde porte sur une analyse multidimensionnelle dont le traitement appliqué repose sur une association des paramètres descriptifs et analytiques.

Le présent document est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique relative au gypse et aux sols gypseux. Le deuxième chapitre porte sur la méthodologie adoptée et les différentes approches choisies pour la réalisation de ce travail. Dans le troisième chapitre, les résultats obtenus sont présentés et discutés.

# CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

## 1. Le gypse: Élément et Minéral

### Introduction

---

Dérivé du mot latin « gypsum » et du mot grec « gypsos », le gypse est le sulfate de calcium hydraté de formule chimique  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Il est de la classe chimique des sulfates, de la sous classe des hydratés sans anions étrangers (Barriand et al., 1978), et de la famille des évaporites (Yuzer, 1982; Auvray, 2003). Le gypse est usuellement appelé « pierre à plâtre » (Quelet, 1964; Marnezy, 2004).

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

- macles simples : en pied d'alouette, en queue d'aronde, et en queue d'hirondelle ;
- macles complexes : les roses de sable.

Il peut aussi se présenter sous forme d'agrégats fibreux de cristaux allongés et enchevêtrés (Spath satiné), en masse grenue grossière (gypse Saccharoïde), ou très fin (Albâtre) (O'Donoghue, 1997; Gautier, 2004).

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

### 1. 1. Caractéristiques et propriétés du gypse

---

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

$$a=5.6\text{Å} ;$$

$$b=15.2\text{Å} ;$$

$$c=6.5\text{Å} ;$$

$$\beta=118\text{Å}.$$

La représentation schématique de la maille élémentaire du système monoclinique est sur la figure 1. Le cristal de gypse présente un clivage parfait (010) où les fractures obtenues sont lisses, et deux autres clivages secondaires (100) et (011) où les fractures sont respectivement fibreuses et conchoïdales (Williams, 1988; Siple, 1999).

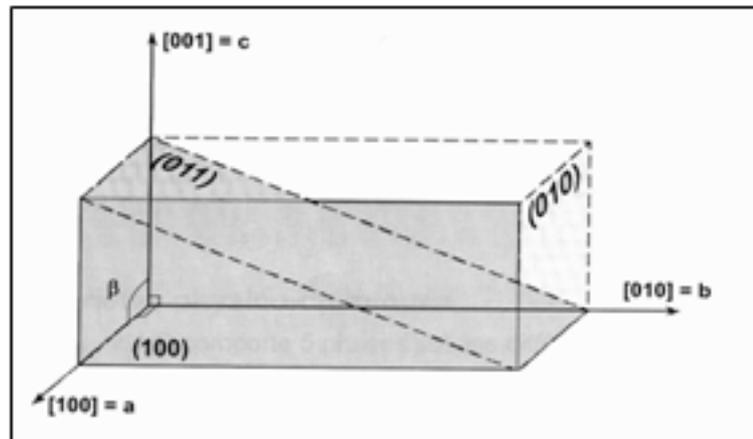


Figure 1 : Représentation schématique de la maille élémentaire du réseau cristallin monoclinique du gypse (les 3 faces référencées sont les plans des 3 principaux clivages)  
(Auvray, 2003)

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

### 1. 1. 1. Structure et composition

En général, la structure du gypse est définie comme étant une structure réticulaire simple (fig. 2), constituée par des feuillets de tétraèdres de forme anionique  $\text{SO}_4^{--}$  (le soufre au centre et les oxygènes aux sommets), étroitement liés entre eux par des cations  $\text{Ca}^{++}$ , et des molécules d'eau qui assurent la liaison et la cohésion entre les feuillets (Gautier, 2004).

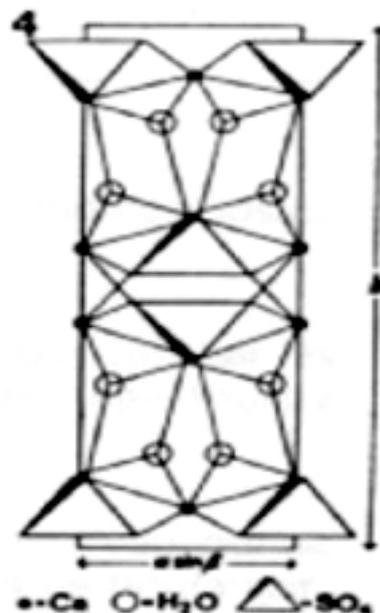


Figure 2 : La structure du gypse

(Fischesser, 1950)

Toutefois, Bosbach et al. (1996), in Auvray (2003), estiment qu'en solution aqueuse pure, le gypse présente un cristal à faciès majoritairement aciculaire (fig. 3).

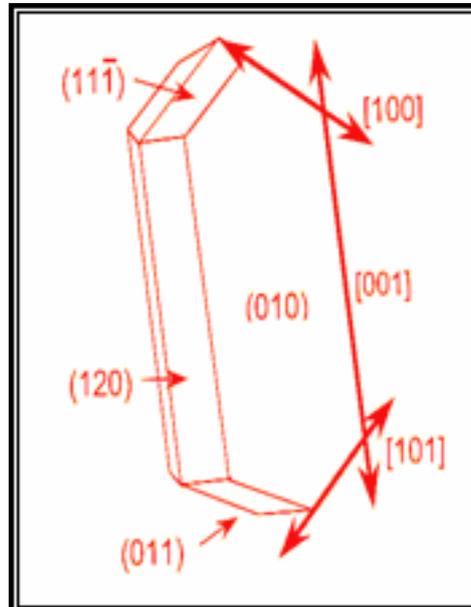


Figure 3 : Schéma structural d'un cristal de gypse aciculaire

(Bosbach et al., 1996, in Auvray, 2003)

Il se présente sous forme de doubles feuillets de  $\text{CaSO}_4$  parallèles au plan [010], unis entre eux par des molécules d'eau (Braitsch, 1971; Bosbach et Rammensee, 1994). Selon Mandal et Mandal (2002), une des deux molécules d'eau constitutives est sous la forme d'un anion qui a la possibilité de se séparer très facilement (fig. 4). Une disposition qui explique en grande partie le clivage facile et parfait du minéral (Jauzein, 1974).

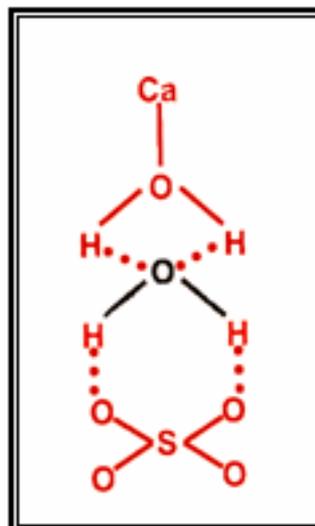


Figure 4 : Squelette atomique d'une molécule de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

(Mandal et Mandal, 2002)

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

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

### **1. 1. 2. Solubilité et processus de dissolution du gypse**

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

#### **1. 1. 2. 1. solubilité**

Le gypse est un minéral soluble. Sa solubilité est exprimée en gramme de sulfate de calcium (CaSO<sub>4</sub>) dans 1000g d'eau pure (Marnezy, 2004). Elle est égale à 2g/l à température ambiante (18-20°C) (Pouget, 1968 ; Auvray, 2003).

Le degré de solubilité du minéral est différemment caractérisé :

peu soluble (Quelet, 1964; Nakayama, 1971; Marnezy, 2004) ;

faiblement soluble (Pouget, 1968) ;

semi-soluble (F.A.O., 1990; Poch, 1996; Herrero et Porta, 2000).

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

Il ressort ainsi une différence appréciable assez nette et surprenante. Une différence issue globalement de l'approche évaluative choisie ; soit par comparaison au carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>), qui est le moins soluble (0.0013 g/l à 16°C) (Pouget, 1968), ou par comparaison à d'autres sels présents en solution (Porta, 1996; Gutierrez et Gutierrez, 1996), et ayant une plus grande solubilité (généralement, il est cité NaCl).

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

#### **1. 1. 2. 1. 1. la température**

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

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

D'après Fischesser (1950) et White (1988), le maximum de solubilité du gypse est généralement atteint entre 35°C et 40°C, avec un taux égal à 2.1g/l.

#### **1. 1. 2. 1. 2. la taille des particules de gypse**

Généralement, il est observé une augmentation de la solubilité du minéral avec l'affinement des cristaux de gypse (Kemper et al., 1975 ; F.A.O, 1990). A l'inverse, la présence de gros cristaux provoque une diminution du processus (Porta, 1998), et la dissolution du minéral pourrait ne pas être totale.

### **1. 1. 2. 1. 3. le pH**

Le pH est un paramètre important, qui influence la solubilité des espèces ioniques et la précipitation des minéraux (Quelet, 1964). En général, il est considéré que l'effet pH n'est déterminant sur la solubilité du gypse qu'avec l'attachement des ions  $H^+$  sur les anions  $SO_4^{--}$  et la formation de  $HSO_4^-$  (Artieda et Herrero, 1996). Ceci correspond à des conditions où la précipitation est moins complète en comparaison à un pH neutre ou alcalin (Pouget, 1968). Ce cas de figure reste très difficile à observer au niveau des sols gypseux, car leur pH est toujours supérieur à 7.

### **1. 1. 2. 1. 4. le type et la concentration des ions présents en solution**

Ils sont représentés par :

l'effet salure : Il se traduit par une augmentation de la solubilité du minéral due à

la présence en solution de sels ne comportant pas d'ions communs ( $Ca^{++}$ ,  $SO_4^{--}$ ) (Lagerwerff et al., 1965; Vieillefon, 1979; Frenkel et al., 1986). Ces sels favorisent d'un côté une augmentation de la concentration ionique ou « la force ionique » de la solution, et de l'autre une réduction de l'activité des ions communs (McNeal et al., 1970; Gutierrez et Gutierrez, 1996).

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

$$K_{\text{ips}} = \frac{[\text{Ca}^{2+}] [\text{SO}_4^{2-}] \gamma_{\text{Ca}} \gamma_{\text{SO}_4}}{(1) \quad (2)} = \text{constante}$$

Avec :

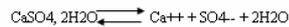
- $K_{\text{ips}}$  : constante de solubilité « caractéristique du produit de l'activité ionique » ;
- $[\text{Ca}^{2+}]$   $[\text{SO}_4^{2-}]$  : concentration de la solution en ions issus de la dissolution... (1) ;
- $\gamma_{\text{Ca}}$   $\gamma_{\text{SO}_4}$  : coefficient d'activité des ions communs... (2).

1. le produit de solubilité du gypse :  $K_{\text{ps}} = \frac{[\text{Ca}^{2+}] [\text{SO}_4^{2-}] \gamma_{\text{Ca}} \gamma_{\text{SO}_4}}{[\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]}$  4) suite à une augmentation de la concentration en sels en solution (caractérisée par l'augmentation de la concentration ionique ou de la force ionique), il se trouve que la concentration en ions ( $[\text{Ca}^{2+}]$   $[\text{SO}_4^{2-}]$ ) résultant de la dissolution tend à augmenter, afin de maintenir le produit d'activité à un niveau constant, d'où l'augmentation de la solubilité.

#### 1. 1. 2. 2. processus de dissolution

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

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



Le produit de solubilité du gypse est égal à  $10^{-4}$ .

à 25°C, 1 atm

Lors de l'étude du processus et de ses conditions, c'est la détermination du taux de dissolution du gypse qui est le point le plus important. Ce taux dépend grandement des composants chimiques et des conditions hydrodynamiques de la solution (White, 1984, in Gutierrez et Gutierrez, 1996), de la cinétique de dissolution (Valles et Bourgeat, 1988) et des conditions caractéristiques dans la phase aqueuse (Kemper et al., 1975; Berner, 1978).

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

$$dc / dt = KA (Cs - Ct)$$

Avec :

- $dc / dt$  : taux net de dissolution ;
- \*  $dc$  : variation des concentrations ;
- \*  $dt$  : variation du temps ;

- $K$ : coefficient de dissolution, qui est fonction de la taille des particules et de la vitesse du flux de la solution;
- $A$  : surface cristalline en contact avec la phase aqueuse ;
- $C_s$ : concentration de la solution à saturation;
- $C_t$ : concentration du sulfate de calcium en solution à un temps  $t$ .

Des tests ont été effectués dans des conditions de simulation de mouvement d'eau (flux d'écoulement) en présence d'une couche membranaire de diffusion. Selon Kemper et al. (1975) et Ahmad et al. (1979), les résultats obtenus font ressortir que le taux de dissolution du gypse est proportionnel à la racine carrée du flux d'écoulement.

Trudgill (1986) et Auvray (2003) estiment qu'en l'absence de mouvement d'eau la dissolution du gypse est gouvernée par le phénomène de la diffusion moléculaire, sous l'effet de l'écart entre la concentration à saturation et la concentration de l'eau au contact de l'échantillon. Celui-ci étant très important au départ, la dissolution apparaît relativement rapide. Mais, sous le seul effet de la diffusion moléculaire, les particules se propagent très lentement dans le liquide de manière à ce que la concentration dans la couche en contact avec le gypse approche de la valeur de la solution saturée. La dissolution devient alors très lente, et tend vers une valeur minimale. Cette situation est parfaitement illustrée par Robinet (1990) et Deletie et al. (1990) qui ont montré qu'après des essais de dissolution de longue durée, la dissolution est passée de  $7 \cdot 10^{-6}$  à  $1 \cdot 10^{-6}$  Kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> en 200 heures.

## 1. 2. Processus de Déshydratation - Réhydratation

---

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

En réalité, le phénomène de déshydratation du gypse en fonction de la température est assez complexe et dépend non seulement de cette température, mais aussi de la pression de vapeur d'eau au contact de la matière, de la finesse du gypse et de la présence d'impuretés en faible proportion (EGI-712, 2003).

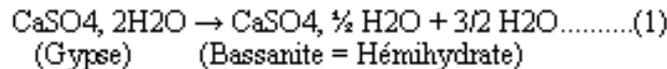
es différentes phases et les réactions caractéristiques (MacDonald, 1953; Conley et Bundy, 1958; Gautier, 2004) du système  $\text{CaSO}_4, x\text{H}_2\text{O}$  sont les suivantes :

- Entre 110 °C et 180 °C, apparaissent deux variétés d'hémihydrates ( $\text{CaSO}_4, \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ) :

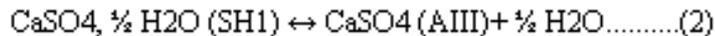
Variété a : Obtenue par chauffage en atmosphère humide. Son corps est compact et cristallin et possède des résistances mécaniques élevées.

Variété b : Métastable, obtenue par chauffage en atmosphère sèche. Son corps est floconneux et présente des fissures. Elle demande beaucoup d'eau de gâchage (70 % au lieu de 35 % pour la variété a, à finesse égale) et possède des résistances mécaniques assez faibles.

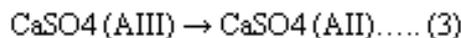
Les deux variétés « a et b » se distinguent par des différences de structure en surface. La réaction caractéristique de cette phase est la suivante :



- Entre 120°C et 250°C (selon l'atmosphère de cuisson), apparaît l'anhydrite soluble (CaSO<sub>4</sub> AIII), instable à la température ordinaire. La réaction caractéristique de cette phase est la suivante :

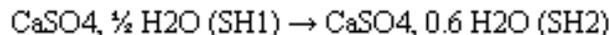


- Entre 400 °C et 600 °C, apparaît l'anhydrite très peu soluble (CaSO<sub>4</sub> AII) à prise lente (plâtre hydraulique). L'anhydrite naturelle se présente également sous cette forme. La réaction caractéristique de cette phase est la suivante :



La réaction (1) endothermique et la réaction (3) exothermique sont irréversibles, la réaction (2) est réversible (Auvray, 2003).

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



Avec SH : code

pour le semi-hydrate

D'après Artieda et Herrero (1996), le gypse, la bassanite et l'anhydrite apparaissent en nature sous différents environnements. Cependant, seule la bassanite et le gypse ont été observés dans les sols. L'hémihydrate est produite au niveau des croûtes de surface (Pouget, 1968), et est observée dans les formations gypsifères sous climats chauds et secs (Jauzein, 1974).

## 2. Généralités sur les sols gypseux

### 2. 1. Présentation des sols gypseux

L'appellation de « sols gypseux », mentionnée en tant que telle dans la plupart des classifications, est un terme d'usage courant désignant les sols contenant du gypse à des teneurs variables (F.A.O., 1990 ; Pouget, 1995). Le gypse, de par sa présence dans le profil tout entier ou bien sa localisation dans un horizon particulier, conditionne le comportement et l'aspect de ces sols (Boyadgiev et Verheye, 1996; Herrero et Boixadera, 2002).

D'après Barzanji (1973) et F.A.O (1990), il est possible de faire ressortir les cinq (05) classes caractéristiques des sols gypseux en tenant compte de l'aspect d'interaction « sol-plante » :

Taux de gypse (%)	Classe caractéristique
<0,3	sol non gypsifère
0,3-10	faiblement gypsifère
10-15	modérément gypsifère
15-25	fortement gypsifère
25-50	extrêmement gypsifère

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

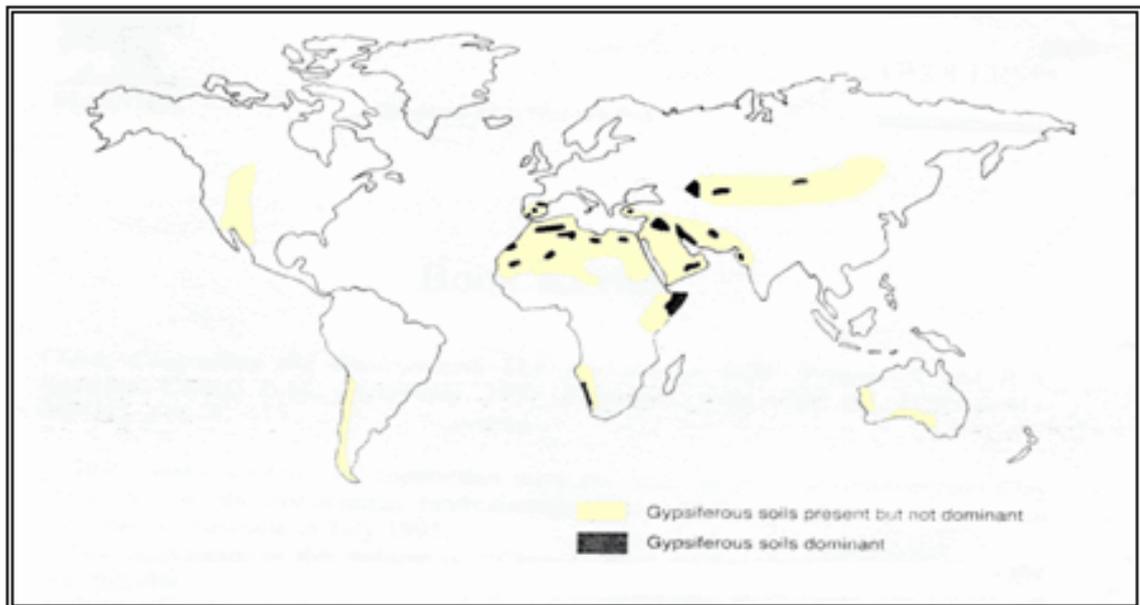
## 2.2. Répartition spatiale des sols gypseux

---

Les sols gypseux caractérisent généralement les zones arides et semi-arides du monde (Watson, 1985; Stengel et Gelin, 1998). Des zones où les roches mères ou les sédiments gypseux sont fréquents, et/ou les précipitations faibles et occasionnelles (300-400mm) induisent un drainage climatique déficitaire pour évacuer le gypse du sol (Herrero et Boixadera, 2002). Toutefois, ils peuvent être observés occasionnellement dans les régions à fortes précipitations (Boyadgiev et Verheye, 1996).

### 2. 2. 1. Distribution des sols gypseux dans le monde

L'espace occupé par les sols gypseux englobe pratiquement l'ensemble des continents (fig. 5).



*Figure 5. Distribution des sols gypseux dans le monde (F.A.O, 1993)*

La superficie caractéristique de ces sols correspondrait à 85 millions d'hectares (F.A.O, 1990). Le détail par pays et par continent est indiqué dans le tableau I.

Herrero et Boixadera (2002) estiment par contre que la superficie réelle des sols gypseux dans le monde est de 207 millions d'hectares.

Continent	Pays	Superficie des sols gypseux (Km <sup>2</sup> )	Le %par rapport à la superficie totale du pays	Le %par rapport à la superficie totale des sols gypseux du monde
<b>Afrique</b>	Maroc	1114,3	2,5	1,7
	Algérie	7966,3	3,3	12,2
	Tunisie	1439,8	9,3	2,2
	Libye	3956,8	2,2	6
	Egypte	382,2	0,4	0,6
	Soudan	785	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	0,4	0,6
	Namibie	5327,7	6,5	8,2
<b>Asie</b>	Syrie	3966,6	21,6	6
	Jordanie	80,5	0,8	0,1
	Arabie Saoudite	82,5	0,04	0,1
	Oman	471,6	-----	0,7
	Yemen	2931	8,8	4,5
	Koweït	354,6	----	0,5
	Irak	4779,2	11	7,3
	Iran	4,2	----	----
	Pakistan	9,5	0,01	----
	Inde	182	0,06	0,3
	Chine	11484,9	1,2	17,5
	Mongolie	60,9	0,04	0,1
	<b>Europe</b>	Turquie	64,2	0,08
Espagne		165,5	0,3	0,3
Ex-URSS		5074,1	0,2	7,7
<b>Amérique</b>	Mexique	78	-----	0,1

Tableau I. Distribution des sols gypseux dans le monde (F.A.O, 1990. Mashali, 1995)

## 2. 2. 2. distribution des sols gypseux en Algérie

Les sols gypseux sont cités en Algérie depuis fort longtemps, mais ils restent très peu étudiés. Les quelques études réalisées jusqu'à présent ont abordé soit l'aspect descriptif « des formes d'accumulations » mais de manière localisée (Durand, 1963; SOGREAH, 1969; Dutil, 1971; Kulke, 1974; Halitim, 1988; Bernou, 1996; Bensaid, 1999; Djili, 2000; Hamdi-Aissa et al., 2004), soit l'aspect géochimique sur la base de l'étude de l'interaction eau de nappes - sols (Rouahna, 2007), soit l'aspect chimique et Biologique (Sabah, 2006), et enfin soit les aspects géochimique, minéralogique, micro-morphologique et physique (Dekkiche, 1974; Halitim, 1988; Abdesselam, 1999; Hamdi-Aissa, 2001).

Selon F.A.O (1990) et Mashali (1995), les sols gypseux d'Algérie constituent 3,3% de la surface totale du pays et 12,2 % de la superficie totale des sols gypseux du monde, soit une superficie de 7966,3 km<sup>2</sup> (tab.I).

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

Globalement, la présence des sols gypseux est signalée dans les régions suivantes : Oran, Mostaganem, Saida, Tiaret, Ksar-Echellala, Djelfa, M'sila, les bordures des chotts et

des Zahrez, Boussaâda, Hodna, Mechria, El-Bayadh, Khenchela, Batna, Adrar, Ouargla, Ain sefra, Laghouat, Biskra, El-Oued (Le souf), Touggourt (Oued R'hir).

## **2. 3. Pédogenèse des sols gypseux**

---

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

### **2. 3. 1. Gisement et formation du gypse**

Le gypse se forme dans un environnement soumis à une très forte évaporation, par précipitation directe, comme c'est le cas des lacs asséchés (Durand, 1963; Bourque, 1997) ou des lagunes et étangs salés (Marnezy, 2004). Il peut aussi résulter de l'altération des roches sédimentaires (Dekkiche, 1974; Pouget, 1995), de la cristallisation de solutions aqueuses (F.A.O, 1990; Watson, 1983; Gutierrez et Gutierrez, 1996), de l'hydratation de l'anhydrite (Boyadgiev et Sayegh, 1992; McLaren et Cameron, 1996), du mélange ou de la rencontre de deux solutions (une eau chargée en calcium et une eau salée riche en sulfate) (Warren, 1982), et enfin des dépôts volcaniques ou de l'oxydation des gisements métallifères (O'Donoghue, 1997).

### **2. 3. 2. Conditions de formation du précipité de Gypse**

Le précipité ou le dépôt de gypse se forme lorsque le produit de concentration de ces ions (Q) dans la solution dépasse la valeur de son produit de solubilité (Kps) (Pouget, 1968; Valles et Bourgeat, 1988). D'après la F.A.O (1990), ceci correspond à une conductivité électrique inférieure à 60 dS/m. Le dépôt ou le précipité se présente généralement sous forme d'amas blanchâtres, très finement micro-cristallisés et très friables (Dekkiche, 1974).

### **2. 3. 3. Les facteurs de formation et de distribution des sols gypseux**

Les sols gypseux se présentent et se développent sous des conditions environnementales et dans des positions géomorphiques spécifiques (Djili, 2000; Herrero et Boixadera, 2002; Buck et Van Hoesen, 2005).

#### **2. 3. 3. 1. le climat**

La présence du gypse et son accumulation dans les sols sont très sensibles aux variations climatiques, particulièrement à l'alternance des périodes humides et sèches. Le gypse est un élément qui se dissout en condition d'humectation et tend à précipiter en période de grande chaleur, après dessèchement du sol (processus de dissolution et de recristallisation) (Carter et Inskeep, 1988; Porta et Herrero, 1988; Gutierrez et Gutierrez, 1996).

Selon Boyadgiev et Verheye (1996) et Djili (2000), l'effet du climat sur le devenir du gypse est prépondérant dans les sols des régions dominées par un régime d'humidité aridique où les conditions de mouvement par capillarité et par évaporation intense (mouvement « Per ascensum ») sont plus importantes que le processus de lixiviation (flux descendant).

Toutefois, il est possible de rencontrer des sols gypseux sous des régimes d'humidité xérique ou ustique, à cause de la présence d'une importante source de gypse de nature géologique (Dekkiche, 1974; Watson, 1983; Herrero et al., 1992).

### **2. 3. 3. 2. le relief**

Les sols gypseux sont observés et se développent dans des positions géomorphiques bien spécifiques favorisant l'endoréisme. Une situation dictée d'une part par la nature du relief et l'effet pente, et la distance qu'effectue le substrat pour se stabiliser (Canton et al., 1996; Roquero et Arias, 1996; Herrero et Boixadera, 2002), et d'autre part par l'effet d'alternance des phases d'érosion et sédimentation avec les phases de stabilité et de développement (Canton et al., 1996; Buck et Monger, 1999; Buck et Van Hoesen, 2005).

#### **2. 3. 3. 3. sources d'apports de gypse**

L'enrichissement du sol en gypse dépend des sources d'apports suivantes :

- la nature du substrat géologique (Fedoroff et Courty, 1989; Boyadgiev et Verheye, 1996; Herrero et Porta, 2000) ;
  - une nappe active peu profonde (Dekkiche, 1974; Kulke, 1974; Halitim, 1988; Abdesselam, 1999);
  - l'apport éolien (Coque, 1962; Trichet, 1963; Dekkiche, 1974; Drake, 1997) ;
  - l'apport hydrique de surface (Gutierrez et Gutierrez, 1996; Bourque, 1997; Khademi et al., 1997).
2. 3. 4. Les mécanismes de l'enrichissement des sols en gypse

Lors de l'étude des sols gypseux, l'accent est toujours mis sur les accumulations de gypse. De nombreux travaux ont été réalisés afin de déterminer l'origine et les mécanismes intervenant dans la formation de ces accumulations de gypse (Coque, 1962; Durand, 1963, Trichet, 1963; Pouget, 1968; Watson, 1979, 1983, 1985; Halitim, 1988; Drake, 1997; Porta, 1998).

### **2. 3. 4. 1. théorie Per ascensum**

C'est un mode dominant en milieu très aride (Jafarzadeh et Burnham, 1992). Il est défini par un mouvement d'ascension capillaire à partir de nappes superficielles actives dont les eaux sont saturées (Bellair, 1954; Pouget, 1968; Kulke, 1974; Watson, 1985; Halitim, 1988; Jafarzadeh et Burnham, 1992; Hamdi-Aissa et al., 1998).

Ce mode de mise en place intervient dans les conditions suivantes (Halitim, 1988)

ETP > P ; la plus grande partie de l'année ;

Un niveau de nappe proche de la surface ;

Une nappe saturée ou proche de la saturation

Le résultat est la formation des croûtes de nappes, identifiées généralement par la présence caractéristique des roses de sables (Kulke, 1974; Watson, 1979, 1985; Halitim, 1988; Jafarzadeh et Burnham, 1992).

### **2. 3. 4. 2. théorie Per descensum**

C'est un mode typique des climats modérément arides (Jafarzadeh et Burnham, 1992). Il est défini par un mouvement (descendant) lixiviant limité (Watson, 1985), permettant d'une part au sol de garder un taux d'humidité favorable et d'autre part une redistribution et 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 pédogénétique illuviale. Une couche qui serait par la suite exhumée par l'effet de déflation éolienne (Watson, 1985; Chen, 1997; Drake, 1997).

### **2. 3. 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). Deux types d'apports sont observés :

Les apports riches en gypse ou en éléments  $\text{Ca}^{++}$  ou  $\text{SO}_4^{2-}$  issus des mécanismes caractéristiques de l'érosion tels que :

l'action de l'eau et l'effet de pente, où interviennent l'écoulement et le ruissellement (Canton et al., 1996; Chen, 1997; Toomamien et al., 2001; Herrero et Boixadera, 2002),

les mouvements de masse avec, coulée de boue et de sédiments (Porta et Herrero, 1988; Herrero et al, 1992; Herrero et Boixadera, 2002),

le colluvionnement (Halitim, 1988, Porta et Herrero, 1988; Khademi et al., 1997),

l'altération « in situ » du matériel parental (Carter et Inskeep, 1988; Toomamien, 1995; Alonso, 1996; Herrero et Boixadera, 2002).

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

- Les apports issus du processus de déflation des surfaces des chotts, des sebkhas et des zones basses par l'action du vent et la diffusion instantanée dans l'atmosphère des particules de gypse sous forme de poussière de sable (Coque, 1962; Trichet, 1963; Pouget, 1968; Dekkiche, 1974; Taimah, 1992; Watson, 1992; Drake, 1997). Il est utile d'indiquer que ce processus peut être à l'origine, d'une part de la formation de croûtes de surface comme c'est le cas dans les nebkhas (Pouget, 1980) et d'autre part de la mise en place de formes plus proéminentes telles que les lunettes (Durand, 1954; Boyadgiev et Sayegh, 1992; Boyadgiev et Verheye, 1996). Halitim (1988) indique que seule la présence d'une forte proportion de sable fin pourrait confirmer l'origine éolienne.

### **2. 3. 4. 4. théorie lagunaire**

Dans cette approche, le dépôt de sulfate de calcium est dû à l'assèchement d'une source d'eau, par évaporation d'une eau plus ou moins riche en chlorure de sodium (Durand, 1963; Marnezy, 2004). La forme pulvérulente est déterminante de ce type de dépôts caractérisés par une grande pureté du minéral et une rareté des éléments clastiques (Halitim, 1988; Abdesselam, 1999).

### **2. 3. 4. 5. théorie de l'action biologique**

Cette théorie cible la cristallisation du sulfate de calcium au niveau de la frange capillaire, où l'activité racinaire est importante (Cooke, 1981; Bouteyer et Loyer, 1992; Buck et Van Hoesen, 2002) et dans les espaces micro-réduits ou dans les vides dus à l'activité des micro-organismes (Barzandji et Stoops, 1974; Buck et Van Hoesen, 2002).

Cette théorie est conditionnée par la richesse des sols en calcaire (F.A.O, 1990). Sous l'influence du gaz carbonique, on obtient la dissolution du carbonate de calcium avec, comme résultat, la formation de bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) et la libération du  $\text{Ca}^{++}$ . Ce dernier

sera responsable de la précipitation des sulfates et la formation du gypse (Pouget, 1968; Artieda et Herrero, 1996).

### **2. 3. 4. 6. théorie du gypse autogénique**

Cette formulation définit le sulfate de calcium obtenu par voie d'altération et/ou de réaction chimique (Glazovskaya, 1984; Watson, 1985; Boyadgiev et Verheye, 1996; Chen, 1997) sous l'impulsion de sources d'ions  $Ca^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$ . Le bon déroulement de ces cinétiques réactionnelles nécessite la présence des éléments clés suivants (Bonython et King, 1956; Watson, 1985; Ghabour et al., 1996) :

- des conditions de milieu favorables (température - eau - pression);
- des éléments activateurs : les bactéries sulfureuses;
- sources de carbonate;
- sources de sulfure.

## **2.4. Morphologie caractéristique des accumulations du gypse**

---

Le gypse pédogénétique s'accumule dans le sol sous des formes localisées ou continues, en fonction des conditions dans lesquelles il précipite.

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

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

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

Croûtes gypseuses : Elles résultent de la remontée à la surface ou bien du dépôt entre les fissures de fines particules gypseuses.

Croûtes de nappes : Elles résultent du dépôt de gypse suite à la fluctuation du niveau d'une nappe active saturée.

---

- Couches polygonales de surface : Ce sont des formations apparentes, qui résultent du phénomène de dessiccation de surface. Elles se caractérisent par des bords recourbés (Halitim, 1988). Ces formations ont été observées en Algérie (Durand, 1954; Pouget, 1971; Dekkiche, 1974; Halitim, 1988; Hamdi-Aissa, 2001), en Syrie (Stoops et Ilaiwi, 1981), et en Tunisie (Bureau et Roeder, 1961).

Les formes diffuses, pulvérulentes, pseudomycéliums, amas, nodules, encroûtements correspondent à l'horizon gypsique (B.R.M., 1998, 2006; U.S.D.A., 1999). Les croûtes correspondent à l'horizon petrogypsique (B.R.M, 1998, 2006 ; U.S.D.A., 1999).

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

## **2.5. Les accumulations gypseuses observées en Algérie**

---

Les accumulations de gypse sont couramment rencontrées dans les sols des zones arides nord-africaines et particulièrement du Maghreb (Bureau et Roeder, 1961; Coque, 1962; Durand, 1963; Pouget, 1968; Dutil, 1971; Kulke, 1974; Vieillefon, 1976; Pouget, 1980; Halitim, 1988; Watson, 1979, 1988; Djili, 2000).

En Algérie, les principales accumulations de gypse notées et observées sont présentées dans le tableau II.

Les accumulations gypseuses	Formes	Auteurs	Description Générale		Suggestion sur l'origine
			Epaisseur	Teneurs en gypse (%)	
Croûte de surface	- Général	Durand (1963)	1-5m	----	Ascension capillaire des eaux souterraines
	- Croûte polygonal endurci	Durand (1954)	1-4cm	----	-----
		Dehriche (1974)	----	----	-----
		Pouget (1971)	----	----	-----
		Halitim (1988)	----	----	-----
		Hamdi-Aïssa et al (1998)	1-2mm	----	-----
- Accumulation poudreuse	Durand (1963)	----	95	Évaporation d'eau profonde	
	Durand (1963)	----	-----	Évaporation d'eau lagunaire	
	Dehriche (1974)	///	96	Évaporation d'une eau d'apport d'irrigation ou d'inondation.	
	* Deb-Deb	Gousshov (1964)	----	----	-----
	* Fech-Fech	Capot-Rey et al., (1963)	----	----	-----
	- Cristaux ou Efflorescences gypseuses	Deley G (1964)	----	----	-----
		Hamdi-Aïssa et al (1998)	----	----	Ascension capillaire ou Évaporation de lacustres
Croûte de nappe	- Rose de sable	Bellair (1954)	1 m	50	Lacustres ou évaporation d'eaux souterraines
		Durand (1949)	0.6-1.5m	----	Évaporation d'une eau table de surface
		Kulke (1974)	5m	40-95	Évaporation d'eau souterraine
		Dehriche (1974) et Halitim (1988)	////	////	Ascension capillaire d'eaux souterraines
		Temmar (1995)	----	----	Ascension capillaire et évaporation d'eaux de nappe
		Neggani (1995)	----	----	Ascension capillaire et évaporation d'eaux de nappe
- Autres	Watson (1979)	2.5 m	----	Ascension capillaire d'eaux souterraines	
	Watson (1979)	0.5-1m	----	Ascension capillaire ou Évaporation de lacustres	
	Temmar (1995)	----	----	Ascension capillaire et évaporation d'eaux de nappe	
Dunes	- Gypse cristallisé en pellicule	Termier et Termier (1963) in Watson (1979)	50 m	----	Définition de Chott
	- Gypse sous forme sableuse	Pouget (1971, 1980)	----	----	Définition de Chott
	- sable Gypseux	Capot-Rey et Gremion (1967)	----	----	Évaporation de lacustres ou affleurement.

Tableau II. Les principales accumulations gypseuses notées et observées en Algérie

## 2. 6. Caractéristiques et propriétés des sols gypseux

Le gypse est un élément qui, par ses taux et ses formes, modifie profondément la morphologie du profil et agit sur les propriétés pédologiques et agronomiques des sols (Djili, 2000). Les caractéristiques et propriétés indiquées ci-dessous sont propres et spécifiques aux sols gypseux, et peuvent contribuer largement à leur identification et leur classification.

### 2. 6. 1. La texture

La distribution et l'arrangement des particules de différentes tailles sont des critères de diagnostic généralement utilisé dans la caractérisation et la classification des sols (Duchaufour, 1988).

L'utilisation de la définition de la texture dans le cas des sols gypseux est moins appropriée, puisque le gypse est considéré comme un inhibiteur de la dispersion des

particules et contraignant pour les méthodes d'analyse standard. Par conséquent, il est habituellement éliminé des échantillons de sols. Ce qui donne lieu à une expression de la texture de sol gypseux sur la base d'échantillon « libre-gypse » et non sur la base des conditions réelles de champ (Boyadgiev et Verheye, 1996). D'après la F.A.O (1990), il serait souhaitable de développer des méthodes de détermination de la texture des sols gypseux sans l'extraction initiale du gypse. Toutefois, Poch (1992), sur fond d'étude réalisée en Espagne dans la région d'Ebro, a montré que la texture des sols gypseux est étroitement liée à la teneur en gypse et qu'elle est conditionnée par le matériau parental. Ainsi, l'apport excessif de gypse engendre la formation d'une texture à dominance de limons et de sables en raison d'une cristallisation grossière et par conséquent induit une diminution des teneurs relatives en argile.

Concernant l'estimation de la texture sur terrain, c'est une approche qui n'est pas tellement prise en considération puisque le gypse (sous forme de cristaux) est présent dans la fraction sableuse (F.A.O., 1990; Abdesselam, 1999).

### **2. 6. 2. Les propriétés hydriques**

Les procédures analytiques standards pour la détermination de l'énergie de rétention de l'eau dans le sol à différents niveaux de succion ne peuvent pas être appliquées dans le cas des sols gypseux à cause, d'une part, de leur instabilité constitutive observée sous les différents régimes d'humidité, et d'autre part, à cause de la faible densité volumique du gypse (= 2,32 g / cm<sup>3</sup>) (Boyadgiev et Verheye, 1996). Il est fréquemment observé sur champ que les sols gypseux sont caractérisés par une absorption d'eau de surface très élevée qui s'effectue très rapidement et à des niveaux de succion très faible (F.A.O., 1990).

Boyadgiev (1974) et Herrero et Boixadera (2002) estiment que la rétention en eau des sols gypseux est fonction du taux d'argile, de la teneur et de la dimension des cristaux de gypse.

### **2.6.3. La structure**

La plupart des sols gypseux présentent une faible agrégation, par conséquent une structure peu favorable en raison de l'absence de forces d'attractions et de cohésions (F.A.O, 1990 ; Mashali, 1995). Pouget (1995) la présente comme une structure massive relativement friable à très massive, parfois indurée avec des cristaux plus ou moins visibles, et parfois présentant une surstructure lamellaire grossière.

D'après Halitim et al.(1983), Bini et Ristori (1987) et Abdesselam (1999), cette spécificité structurale assez complexe est due au phénomène d'éclatement résultant d'une action mécanique. Une action favorisée par le processus d'accumulation du gypse.

### **2. 6. 4. Le pH**

Les sols gypseux présentent un pH modérément à légèrement alcalin (pH=7,4 – 9,4) (Boyadgiev et Verheye, 1996). D'après Jafarzadeh et Burnham (1992), c'est un paramètre qui dépend largement du taux des autres sels présents dans le système, et ne présente aucun effet sur la formation « in situ » du gypse.

### **2. 6. 5. La capacité d'échange cationique**

Dans les sols gypseux, la valeur de la capacité d'échange cationique (CEC) est inversement corrélée avec les teneurs en gypse du sol. Selon Polemio et Rhoades (1977), Sayegh et al.

(1978), Frenkel et al.(1986) et F.A.O. (1990), l'augmentation de la teneur en particules de gypse provoquerait irrémédiablement une diminution de la capacité d'échange cationique. Ceci est causé par l'inexistence de charges négatives sur le gypse et aux dimensions non colloïdales de ses particules (Mousli, 1981) et l'effet stérique 2 en conséquence de la faible surface spécifique (Sayegh et al., 1978; Abdesselam, 1999).

### 2. 6. 6. La composition minéralogique

La composition minéralogique des sols gypseux n'est ni uniforme, ni stable. La persistance du minéral sulfaté soluble et son instabilité dans le milieu environnant illustres parfaitement les transformations minéralogiques pouvant être observées sur une courte durée (temps) et une distance réduite (Boyadgiev et Verheye, 1996). Il est fait référence en particulier à la bassanite ( $\text{CaSO}_4, 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) (Jauzein, 1974; Doner et Lynn, 1989) et la mirabilite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4, 10\text{H}_2\text{O}$ ) ou la thenardite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) (Boyadgiev et Verheye, 1996). Ces formes reflètent d'une part des conditions de température et de régime d'humidité très spécifiques et très localisées, et d'autre part des concentrations ioniques assez caractéristiques. Les minéraux comme  $\text{SrSO}_4$  et  $\text{BaSO}_4$  sont souvent associés au gypse (Hamdi-Aissa et al., 2004).

Les sols gypseux n'ont pas une représentation minéralogique particulière, quoique l'observation de la palygorskite (attapulgite) ait été souvent associée à la présence et à la formation du gypse, d'où découle une proportionnalité confirmée par Barzanji (1973). Dekkiche (1974) et Lee et al.(1983) considèrent l'attapulgite comme un constituant principal de la fraction fine des sols gypseux, à l'exception des sols formés sur des dépôts récents.

Cependant, Boyadgiev et Sayegh (1992) présentent la relation entre le gypse et l'attapulgite comme assez complexe, puisque l'attapulgite a été observée en grandes quantités dans les sols où le gypse se caractérise par la forme spongieuse. Une forme

---

2. *Effets stériques* : Il est lié à la géométrie de la molécule. C'est un effet qui traduit une gêne volumique apportée par un ou des substituants encombrants ou des contraintes angulaires lorsque les angles imposés par la structure de la molécule diffèrent de façon importante des valeurs normales correspondant à l'état d'hybridation des atomes (Gressier, 1998). □

représentative des conditions d'alternance humidité-sécheresse favorables à la néoformation de ce minéral à partir de solutions de sols gypseux, alors que Halitim (1988) conditionne la formation de l'attapulgite par :

- la présence de quartz et de silicates phylliteuses (source de silice et d'aluminium);
- un pH élevé sans excès (entre 8 et 9);
- une source suffisante de  $\text{Mg}^{++}$ .

### 2. 7. Particularité de la classification des sols gypseux

---

La classification est la représentation ou l'identification d'objets sous forme de compartiments, suivant des critères de choix acceptables et en respectant un ordre hiérarchique bien défini. L'objectif primaire des différentes classifications est de réaliser un regroupement des sols présentant les mêmes propriétés et le même potentiel (Boyadgiev et Verheye, 1996).

Les sols gypseux ont été cités en pédologie par Knopp en 1871 sous le nom des sols sulfatés (Dokuchaev, 1896, in F.A.O, 1990). Depuis, ils ont connu une évolution assez importante dans la dénomination, l'appartenance et l'étude des caractéristiques fonctionnelles suivant les approches proposées par les différents systèmes de classification. Une amélioration jugée limitée, par référence aux autres types d'unités de sols

majeurs, puisqu'ils sont toujours cités dans les niveaux inférieurs ou secondaires de ces classifications (Boyadgiev et Verheye, 1996): Calcimagnésique (C.P.C.S.,1967), Gypsiorthids (U.S.D.A ), Xérosols ou Yermosols (F.A.O-U.N.E.S.C.O).

L'intérêt porté ces dernières années aux sols gypseux a donné lieu à une succession d'améliorations et à un rehaussement du rang caractéristique de ces sols dans la hiérarchie des différents systèmes de classification (F.A.O., 1988, 1993; Pouget, 1995; U.S.D.A., 1994, 1999; B.R.M., 1998, 2006), atteignant à la fin le palier d'unité de sols majeurs.

### 2. 7. 1. Classification américaine

C'est une classification bien hiérarchisée, basée sur des combinaisons de caractères et paramètres (propriétés physique, chimique, morphologique, et pédoclimatique) représentant certains horizons-types, servant au diagnostic. Ce sont les horizons de surface, de subsurface et secondaires, que la soil taxonomy identifie comme les horizons diagnostiques (U.S.D.A., 1994, 1999).

Dans la classification américaine, les sols gypseux sont représentés dans l'ordre des Aridisols, sous ordre des gypsids. Ils sont identifiés par la présence de l'un des horizons diagnostiques suivants :

- horizon gypsic: c'est un horizon diagnostique de subsurface enrichi avec le sulfate de calcium secondaire, non ou peu cimenté, avec une épaisseur de 1,5 cm ou plus ayant au moins 5% de gypse de plus que l'horizon sous-jacent. Un horizon où le produit de l'épaisseur par le pourcentage de gypse est supérieur ou égal à 150 ;
- horizon pétrogypsic: c'est un horizon gypseux fortement cimenté en gypse, dur et massif. Le taux de gypse est relativement élevé et dépasse 60%.

La classification adoptée actuellement pour les sols gypseux dans la soil taxonomy est représentée dans le tableau III.

Ordre	Aridisols				
Sous ordre	Gypsids				
Grand groupe	Petro-	Marti-	Argi-	Calci-	Haplo-
<b>Sous groupe</b>					
Aquic					
Calcic	+		+		
Duric					
Duric Xeric					
Durimodic					
Gypsic					
Leptic					+
Lithic		+	+	+	+
Petrocalcic	+				
Petrogypsic					
Petrogypsic Ustic					
Petronodic		+	+	+	+
Sodic					+
Typic	+	+	+	+	+
Ustic	+	+	+	+	+
Vertic		+	+		
Vitrandic	+	+	+	+	+
Vitraxerandic	+	+	+	+	+
Xeric	+	+	+	+	+

Tableau III. Classification des sols gypseux selon la soil taxonomy

(U.S.D.A., 1994, 1999)

Les horizons gypsiques et pétrogypsiques sont aussi présents et utilisés dans la définition d'autres sous ordres : Argids, Cryids, Salids. (tab.IV)

Ordre	Aridisols					
Sous ordre	Argids		Cryids		Salids	
Grand groupe	Gypsi-	Petro-	Gypsi-	Petro-	Aqui-	Haplo-
<b>Sous groupe</b>						
Aquic	+					
Calcic			+			
Duric		+		+		
Duric Xeric		+		+		
Durimodic	+					
Gypsic					+	+
Leptic						
Lithic						
Petrocalcic						
Petrogypsic		+		+		+
Petrogypsic Ustic		+				
Petronodic						
Sodic						
Typic	+	+	+	+		
Ustic	+	+		+		
Vertic						
Vitrandic	+		+			
Vitraxerandic	+		+			
Xeric	+	+		+		

Tableau IV. Représentation des sous ordres caractérisés par les horizons gypsiques et pétrogypsiques dans la soil taxonomy

(USDA, 1994, 1999)

D'après Boyadgiev et Verheye (1996), beaucoup de sols gypseux sont classés dans l'ordre des Aridisols, soit dans le sous ordre des Gypsids ; quand les horizons gypsiques et pétrogypsiques sont situés à 100 cm de la surface du sol, ou bien dans les grands groupes gypsiques quand l'horizon gypsique présente une profondeur de 150 cm.

### 2. 7. 2. Référentiel pédologique français

Le référentiel pédologique français est un système qui est défini par la combinaison de différents caractères et paramètres (propriétés physique, chimique, morphologique, et pédoclimatique). Il est organisé sur la base de références, d'horizons de références, les types et les qualificatifs, le rattachement, et les grands ensembles de références (G.E.R) (R.P.F, 1990; Pouget, 1995).

Les sols gypseux sont présentés dans le référentiel pédologique français comme un G.E.R, portant l'appellation de gypsosols. Ce sont des solums caractérisés par des accumulations secondaires de gypse dans les horizons supérieurs et identifiés par les horizons de références suivants :

- horizon pétrogypsiq (Ym) : Horizon de concentration continue (croûte) de gypse, induré et morcelé en plaques polygonales dont l'amorce est visible dans l'horizon sous-jacent qui est toujours un horizon Ys .

- horizon gypsiq de surface (Ys) : Horizon de surface ou proche de la surface, d'épaisseur sensiblement constante et comprise entre 20 et 50 cm, caractérisé par une concentration continue (encroûtement) de gypse microcristallisé en relation avec l'activité racinaire et le cycle d'humectation en zones arides et semi-arides, sur roches mères gypseuses. La teneur totale du gypse est comprise entre 25 et 95% et celle du calcaire total est inférieure à 20%

- horizon gypsiq de profondeur (Yp) : Horizon d'épaisseur très variable (10 à 100 cm) caractérisé par une concentration continue (encroûtement) de gypse cristallisé et parfois induré en relation soit avec une nappe phréatique soit avec des phénomènes d'illuviation verticale ou avec une circulation latérale des solutions. La teneur en gypse est comprise entre 15 et 60% et le calcaire total est très variable (<40%)

De plus, tout solum, autre qu'un gypsosol, contenant un horizon Yp sera qualifié de « Gypsiq » et tout horizon qui n'est ni un Ys ni un Ym et qui montre une accumulation gypseuse localisée sous forme de pseudomycéliums, amas, nodules ou cristaux sera noté « -y » (horizon Sy, Cy, My, etc.). Les solums comportant de tels horizons seront dits « à horizons S, C, ou M gypseux »

### **2. 7. 3. La base de référence mondiale (B.R.M) pour les ressources en sols**

La Base de Référence Mondiale pour les ressources en sols a été conçue sur la base de la légende révisée de la carte mondiale des sols F.A.O-UNESCO (1988). Une manière de tirer profit des travaux de corrélation internationale sur les sols qui avaient été réalisés. La BRM est considérée comme un système de classification d'ensemble permettant aux utilisateurs d'y inclure leur système national de classification (B.R.M., 1998, 2006).

Après relecture de la légende révisée de la F.A.O, 30 groupes de sols de référence furent

identifiés pour constituer la BRM. La détermination et la description de ces groupes font référence aux principes suivants :

- la classification des sols est basée sur les propriétés des sols définies en termes d'horizons et de caractéristiques diagnostiques, qui doivent être mesurables et observables sur le terrain,
- le choix des horizons et des caractéristiques diagnostiques prend en compte leurs relations avec les processus de formation des sols,
- les critères diagnostiques retenus à un niveau élevé de généralisation ont de l'importance pour les aménagements,
- les paramètres climatiques ne sont pas appliqués dans la classification des sols. Il est admis que certains parmi les groupes principaux de sols peuvent se retrouver sous différentes conditions climatiques. Il a été décidé de ne pas introduire de séparation tenant compte des caractéristiques climatiques afin de ne pas subordonner la classification des sols à la disponibilité des données climatiques.

La Base de Référence Mondiale pour les ressources en sols permet la caractérisation de deux niveaux de catégories :

- niveau supérieur : les classes sont principalement différenciées par le processus pédogénétique primaire, qui est responsable des propriétés caractéristiques du sol, sauf la ou les matériaux originels « spéciaux » sont d'une importance primordiale ;
- niveau inférieur : les classes sont différenciées selon tout processus pédogénétique secondaire prédominant qui a affecté de manière significative les propriétés primaires du sol. Cependant, dans certains cas, les caractéristiques du sol qui ont un effet significatif sur son utilisation peuvent être prise en considération.
- Dans la BRM, les sols gypseux sont représentés par le groupe de référence (de niveau supérieur), les gypsisols (GY), dont les caractéristiques sont les suivantes :
- ayant soit un horizon gypsique ou pétrogypsique endessous les 100 premiers cm du sol, soit 15 % ou plus (en volume) de gypse, accumulé sous conditions hydromorphes, calculés en moyennes sur une profondeur de 100cm ; et,
- n'ayant pas d'horizon diagnostique autre qu'un horizon ochrique ou cambique, un horizon argique imprégné de gypse ou de carbonate de calcium, ou un horizon calcique ou pétrocalcique sous-jacent à l'horizon gypsique

Les horizons diagnostiques sont les mêmes horizons ayant été définis dans la légende révisée de la F.A.O.-U.N.E.S.C.O. (1988):

- horizon gypsique : 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. Il est caractérisé par :

15% ou plus de gypse ; si l'horizon contient 60% ou plus de gypse, il est appelé horizon hypergypsique. Le pourcentage de gypse est calculé en multipliant la teneur en gypse, exprimée en  $\text{cmolc kg}^{-1}$  de sol, par l'équivalent poids du gypse (86) divisé par 103 ; et,

une épaisseur d'au moins 15cm, épaisseur exigée également pour l'horizon hypergypsique.

- horizon pétrogypsique : c'est un horizon cimenté contenant des accumulations secondaires de gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Il est caractérisé par:

60% ou plus de gypse. Le pourcentage de gypse est calculé en multipliant la teneur en gypse, exprimée en  $\text{cmolc kg}^{-1}$  de sol, par l'équivalent poids de gypse (86), et exprimé en pourcentage ; et,

une cimentation telle que des fragments secs ne délitent pas dans l'eau et ne peuvent être pénétrés par des racines ; et,

une épaisseur d'au moins 10cm.

Les unités de niveau inférieur identifiées par la BRM et se rapportant au groupe de références gypsisols sont les suivants : pétrique, leptique, vertique, endosalique, sodique, durique, calcique, luviq, takyrique, yermique, aridique, arzique, squelettique, hyperochrique, hypergypsique, hypogypsique, haplique.

Les horizons gypsique et pétrogypsique sont aussi utilisés pour la définition d'autres groupes de sols de références tels que : Vertisols (VR), Solontchaks (SC), Gleysols (CL), Kastanozems (KS), Calcisols (CL), Solonetz (SN), Régosols (RG).

## 2. 8. Méthodes de détermination du gypse

---

Dans les différentes méthodes développées pour étudier et caractériser le gypse des sols, et spécialement dans le cas des sols gypseux des régions arides et semi-arides, il est fait

référence à une approche mixte: l'identification du gypse sur champs et la caractérisation au laboratoire (Porta, 1998).

## **2. 8. 1. Identification sur le terrain**

Sur le terrain, le gypse est identifié par un test chimique ou par observation.

### **2. 8. 1. 1. le test chimique**

Un échantillon de sol est pris dans un tube, et mélangé à de l'eau. Avec l'addition du Chlorure de Baryum ( $BaCl_2$ ) il y aura formation d'un nuage trouble résultant de la précipitation du sulfate de baryum. Ce dernier est un indicateur de la présence du gypse (Pouget, 1971; Porta, 1998). Seulement, cette procédure n'est utile que dans le cas où il n'y a que le gypse comme source de sulfates (Porta et al., 1986).

### **2. 8. 1. 2. détermination morphologique**

C'est une approche spécifique pour la détermination du gypse de forme cristalline présent dans les agrégats. Le gypse peut être identifié par l'observation de ces traits pédologiques, les différentes formes d'accumulation ont fait l'objet de nombreux ouvrages (Herrero et al., 1992; Boyadgiev et Sayegh, 1992; Verba, 1996) :

- tâches en pseudomycélium ;
- cristaux séparés (individualisés) ou regroupés en petites agglomérations ;
- gypse fibreux ;
- croûte gypseuse ;
- gypse spongieux (généralement cristaux en agglomération) ;
- sable gypseux ;
- roses de sable ou du désert ;
- roche dure gypseuse.

## **2. 8. 2. Détermination au laboratoire**

Diverses méthodes sont utilisées au laboratoire.

### **2. 8. 2. 1. méthodes chimiques**

L'application des méthodes chimiques pour la détermination des teneurs en gypse est une approche largement répandue (tab.V). L'utilisation de l'eau comme dissolvant est généralement à la base de ces différentes techniques. Le but essentiel de ces méthodes est la dissolution du minéral et l'obtention de la libération des ions sulfates ( $SO_4^{--}$ ) et des ions calcium ( $Ca^{++}$ ) (Porta, 1996,1998).

Cependant, ces différentes méthodes peuvent être influencées par plusieurs anomalies donnant lieu à une mauvaise interprétation des résultats :

- la libération d'ions calcium ( $Ca^{++}$ ) et d'ion sulfates ( $SO_4^{--}$ ) issus de la dissolution de sources autres que le gypse ;
- possible perte de l'ion calcium ( $Ca^{++}$ ) par phénomène d'adsorption ;
- difficulté de mise en suspension de la totalité du gypse ;
- les réactions d'échanges dans lesquelles le  $Ca^{++}$  peut remplacer d'autres ions, tels que  $Na^+$  et  $Mg^{++}$ .

Méthodes	Principe
<b>Bower et Huss (1948)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solubilisation du gypse présent dans l'échantillon avec l'eau distillée ;</li> <li>- Précipitation du gypse par l'acétone ;</li> <li>- Re-dissoudre le précipité dans de l'eau distillée ;</li> <li>- La teneur en gypse sera obtenue à l'aide d'une formule, en se basant sur la concentration en Ca<sup>++</sup></li> </ul>
<b>Bower et Huss (1948) et Richard (1954)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dissoudre le gypse présent dans l'échantillon de sol dans de l'eau suivant une préparation de rapport 1/5 ;</li> <li>- Précipiter le gypse avec l'addition d'acétone ;</li> <li>- Re-dissoudre le précipité par addition d'eau ;</li> <li>- Calcul de la conductivité de la solution ;</li> <li>- Détermination de la teneur en gypse par la lecture de la valeur de la CE sur un graphique de correspondance standard.</li> </ul>
<b>Couinet (1965)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dissolution à chaud du gypse dans une solution de carbonate d'ammonium ;</li> <li>- Filtrer et acidifier l'extrait (utilisation d'HCl), avant de le porter à ébullition ;</li> <li>- Ajouter une solution chauffée de Chlorure de baryum ;</li> <li>- Formation du précipité de sulfate de baryum ;</li> <li>- Filtrer et laver le précipité pour éliminer les chlorures, et chauffer à 900°C ;</li> <li>- Après la mesure de la différence de poids, le gypse est déterminé par calcul à partir d'une formule.</li> </ul>
<b>Lagerwerff et al. (1965)</b>	<p>Dans l'étude il est proposé deux (02) méthodes :</p> <p><b>Méthode I : méthode semi-quantitative</b> : elle se base sur la différence entre la CE d'un extrait dilué (ED) et d'un autre saturé (ES). Cette méthode nous permet de détecter la présence de gypse dans l'échantillon du sol en se référant à la CE d'une solution concentrée en gypse.</p> <p><b>Méthode II : méthode quantitative</b> : utilisation des deux (02) extraits précédents et de deux (02) réactifs de préparation à base d'acétone A et B.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 - Détection du gypse par simple addition de deux volumes de la solution B, dans un volume de ES (formation d'un nuage trouble) ;</li> <li>2 - Détermination de la concentration de Ca<sup>++</sup> dans la solution ES par la méthode conventionnelle ;</li> <li>3 - Détermination des sulfates dans les solutions ED et ES :             <ul style="list-style-type: none"> <li>* Addition du réactif A à un extrait des solutions ED et ES et après agitation à la main on a la flocculation du précipité ;</li> <li>* Centrifuger la solution, puis filtrer ;</li> <li>* Addition du réactif B, agiter jusqu'à ce que le précipité se disperse ;</li> <li>* Après centrifugation et addition d'eau distillée pour une dissolution complète du précipité, titrer le Ca<sup>++</sup> par EDTA, en utilisant un indicateur spécifique (Eriochrome noir T) ;</li> <li>* La concentration des sulfates sera calculée sur la base du calcium présent dans le précipité ;</li> <li>* Alternativement, après séchage du précipité à 110 °C, il sera dissout dans de l'eau et la CE sera mesurée. La teneur en gypse est déterminée par une formule avec lecture de la valeur sur un graphique de correspondance.</li> </ul> </li> </ol>

Tableau V. Les différentes méthodes humides utilisées pour la détermination du gypse

<b>Dick et Tabatabaï (1979), Niebo et Frankenberg (1985) et Skanë et al. (1987)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dissolution totale du gypse présent dans l'échantillon de sol dans de l'eau distillée ;</li> <li>- Utilisation de l'extrait dilué pour l'analyse des ions Ca<sup>++</sup> ou SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> par la technique d'ions chromatographiés qui permet une séparation des anions au niveau d'une simple colonne d'échange, selon leur sélectivité par une résine d'échange spécifique.</li> </ul>
<b>Nelson et al. (1978)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'estimation du gypse est basée sur la mesure de l'eau de cristallisation du gypse.</li> <li>- Cette eau est obtenue après passage de l'échantillon du sol dans un dessiccateur avec un gel de silice puis dans une étuve à 105°C.</li> </ul>
<b>Porta (1996, 1998)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mettre un gramme (01) de sol séché à l'air dans un flacon avec 500cm<sup>3</sup> d'eau distillée ;</li> <li>- agiter pendant 20mn ;</li> <li>- filtrer l'extrait ;</li> <li>- Précipitation du gypse par addition de l'acétone ;</li> <li>- Dissoudre le précipité dans de l'eau distillée ;</li> <li>- Mesure de la conductivité électrique (CE) et détermination de la teneur en gypse par la lecture de la CE sur un graphique de correspondance standard.</li> </ul>
<b>Vieillefon (1979)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Séchage de l'échantillon à différentes températures ;</li> <li>- Déterminer l'eau de cristallisation du gypse par pesées successives ;</li> <li>- La différence de poids sera utilisée pour estimer la teneur en gypse à partir d'une formule.</li> </ul>
<b>Irenkel et al. (1986)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilisation de résines Cl et Na pour extraire le Ca<sup>++</sup> et les SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> du gypse ;</li> <li>- Mesure de la CE des solutions d'extractions ;</li> <li>- Déterminer la teneur en gypse sur la base des lectures, en utilisant un graphique de correspondance standard.</li> </ul>
<b>Porta et al. (1986)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Attaque acide (HCl) à chaud de l'échantillon de sol ;</li> <li>- Addition du Baryum (Ba<sup>++</sup>) ;</li> <li>- Précipitation des sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) sous forme de sulfate de Baryum, que l'on dose par gravimétrie.</li> </ul>
<b>Benigari et Al-Ary (1994)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les sulfates (SO<sub>4</sub>) solubles non gypseux seront éliminés par l'éthanol 50%(V/V) ;</li> <li>- Addition de 0.5 M de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> et agitation. Transformation du gypse en CaCO<sub>3</sub> et Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> par dispersion ultrasonique.</li> <li>- Après centrifugation du produit, les ions sulfatés séparés de la phase solide seront analysés soit par gravimétrie après addition de Ba<sup>++</sup> et dosage du BaSO<sub>4</sub>, soit par turbidimétrie.</li> </ul>

Tableau V (suite). Les différentes méthodes humides utilisées pour la détermination du gypse

## 2. 8. 2. 2. détermination par analyse thermogravimétrique:

L'analyse thermo-gravimétrique est une méthode semi-quantitative, basée sur la perte de poids d'un échantillon de sol, présentant de fortes teneurs en gypse. La perte de poids est due à la déshydratation du minéral, sous forme d'une totale conversion du gypse en anhydrite (Porta, 1996,1998).

### 2. 8. 2. 3. détermination par diffraction aux rayons X

Elle peut être utilisée pour une identification qualitative du gypse, orientée à certains échantillons (technique de sédimentation) (Khan et Wabster, 1968, in Porta, 1998).

## 2. 9. Relation gypse-constituants sol-végétation

### 2. 9. 1. Interaction gypse - éléments nutritifs

Dans les sols gypseux, l'effet contraignant de l'élément gypse se traduit par l'action de l'ion calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) sur la solubilité des éléments nutritifs tels que P, K, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, N en formant des composés non solubles (Florea et Al-Joumaa, 1998), ce qui constitue le principal obstacle à leur prélèvement par les plantes et leur adsorption par les colloïdes (F.A.O., 1990)

### 2. 9. 2. Interaction gypse-matière organique

Le taux d'humus des sols gypseux varie beaucoup, quoiqu'il est généralement faible sous les conditions de climat aride et semi-aride. Il se concentre dans les couches de surface et tend à diminuer avec les profondeurs (Boyadgiev et Verheye, 1996). Selon la F.A.O (1990), il est respectivement de l'ordre de 0,4 à 1% et de moins de 0,2%. C'est un humus considéré comme riche en azote, avec un apport C/N dont le ratio est de l'ordre de 6 à 9 (Boyadgiev, 1974; Dekkiche, 1974).

La présence d'une forte teneur en gypse influe sur l'activité des micro-organismes avec réduction de la minéralisation (Singh et Taneja, 1977) et sur la réorganisation qui semble être freinée au stade acide fluviqve (Melouk, 1983).

### 2. 9. 3. Interaction gypse - calcaire

Dans la plupart des sols gypseux, le calcaire est présent sous différentes formes et teneurs. Cependant, il est généralement observé qu'avec l'augmentation du gypse la teneur en calcaire diminue. Ceci est lié à la différence de solubilité entre les deux sels (F.A.O., 1990).

Le gypse qui présente une solubilité plus importante, tend à s'accumuler en profondeur formant ainsi des horizons d'accumulations, tandis que le calcaire, élément très peu soluble, persiste et tend à s'individualiser dans la partie médiane ou supérieure du profil (F.A.O., 1990; Florea et AL-Joumaa, 1998).

### 2. 9. 4. Interaction gypse - végétation

Le développement d'une végétation "résistante au gypse" est apparenté au développement du profil. Si le sol est squelettique, le couvert végétal est pauvre à nul, par contre si le sol présente une évolution morphologique consistante, la biomasse et le couvert végétal sont présents à un niveau élevé (Herrero, 1996). Ce sont les conditions physiques et chimiques du sol, très variées selon la station, qui déterminent avant tout la constitution des groupements. Ce sont donc des groupements permanents ou édaphiques (Braun-Blanquet, 1949). Selon Pouget (1980), ces groupements édaphiques sont représentés par deux grands ensembles :

- les espèces gypsophiles : ce sont des espèces qui ne poussent que dans les sols très gypseux. Elles répondent à une double influence :

influence du gypse ;

influence des ions  $SO_4^{2-}$  sur la nutrition.

- les espèces gypsovagues (gypsiques) : ce sont des espèces qui tolèrent les sols riches en gypse, mais elles n'en ont pas besoin pour croître. On les retrouve dans des milieux salés, gypseux et non gypseux.

A partir de la carte internationale du tapis végétal et des conditions écologiques (Barry et al., 1974), la végétation caractéristique des sols gypseux se présente ainsi:

*Anthyllis sericea*.ssp. *henoniana*, *Arthrophytum schmittianum*, *Anabasis articulata*, *Traganum nudatum*, *Zygophyllum album* S.L, *Stipagrostis pungens*, *Caligonum comosum*, *Ephedra alata*.ssp., *Limoniastrum guyonianum*, *Stipagrostis plumosa*, *Euphorbia guyoniana*, *Oudneya africana*.

### 2. 10. Les Contraintes d'une valorisation agricole des sols gypseux

---

Les différents types de sols contraignants pouvant être rencontrés sur la surface du globe, se forment généralement sous des conditions de climats arides et semi-arides (Bouteyer et Loyer, 1992). Les sols gypseux sont inclus dans cette catégorie de sols, en raison de la présence de gypse en teneur élevée (Mashali, 1995). En fait, c'est la solubilité du gypse qui est la propriété la plus défavorable dans les sols gypseux, avec comme conséquence de sévères dysfonctionnements physique, chimique et de fertilité. Abbes (1995), Djemaa (1995) et Mashali (1995) résument les principales contraintes comme suit :

- une très grande sensibilité à l'érosion résultant de la faible agrégation entre les particules;
- la formation d'un horizon imperméable de surface, ou d'un horizon induré de subsurface ou de profondeur qui génèrent respectivement la germination et/ou le développement d'un système racinaire adéquat ;
- la présence d'une teneur excessive du gypse dans la zone d'activité racinaire affecte directement la capacité des racines à extraire les éléments nutritifs ;
- la dissolution du gypse et son lessivage pendant l'irrigation ou les chutes de pluie entraînent, dans certains sols, une augmentation de la plasticité et une altération de leur cohésion;
- la solubilité du gypse donne lieu à une très forte pression osmotique dans la solution du sol qui réduit l'extraction de l'eau par les plantes (cas des sols salés);
- la dissolution du gypse cause la formation de petits trous et de fissures au niveau des couches d'accumulation qui, en s'élargissant, forment de grandes cavités. Une forme de déstructuration de la surface du matériel pédologique qui perd ainsi sa cohésion et sa stabilité ;
- le départ massif de blocs de gypse peut être à l'origine du colmatage et de la dégradation de structure hydraulique dans le cas des périmètres d'irrigation.

---

# CHAPITRE II. Matériel et Méthodes

## Introduction

Les sols qui font l'objet de ce travail sont les sols gypseux d'Algérie. Cette recherche a pour objectifs de caractériser la variabilité dans le profil et dans l'espace des taux et des formes d'accumulation du gypse, de mettre en évidence sur les plans morphologique, analytique et fonctionnel les principaux groupements de sols gypseux pouvant être observés en Algérie et enfin de tenter de déterminer des profils de références.

La démarche adoptée dans ce travail s'articule autour des points suivants :

- mise en place d'une banque de données pédologiques,
- délimitation et présentation des milieux caractéristiques des études et des profils,
- traitement des données,
- détermination des principaux groupements gypseux sur la base d'une approche multidimensionnelle,
- identification et détermination des de profils références des sols à gypse.

## 1. Mise en place de la banque de données pédologiques

La banque de données est définie comme étant un ensemble de fichiers apparentés rassemblant des données structurées et objectives, dans un domaine défini de connaissance, et un système informatique de gestion, qui sert à gérer l'ensemble des fichiers et des données (entrée, stockage, sortie) (Legros, 1986). L'utilité d'une banque de données est de faciliter l'accès à une source d'informations, cette dernière ne peut être utile que si elle répond aux critères d'intégrité et de fiabilité (Chaumier, 1981).

L'élaboration de notre banque de données a nécessité les étapes suivantes : acquisition, saisie et mise en forme des données.

### 1. 1. Acquisition des données

---

L'inventaire pédologique a porté sur les études présentant les informations nécessaires pour la thématique posée et couvrant le territoire national.

Les études consultées dans cette recherche ont été réalisées soit par les services du département sol de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H.), soit par le département de science du sol de l'Institut National Agronomique (I.N.A), soit par le département des Sciences de la Terre de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB). Le tableau VI, donne la répartition des études consultées et des profils retenus

Régions	Superficie de l'étude	Echelle d'étude	Auteurs	Année	Codes des Profils étudiés
M'kiz el-elst	3000ha	1/20 000	Bensaïd A, Malaranouch A, Trea Baryalask	1974	Mk115, Mk146, Mk1755, Mk1570, Mk1417, Mk1251
Sig	9100ha	1/20 000	Vinas A	1980	SD137, SD145, SD444,
Bordjès	2382,2ha	1/20 000	Vassiloune V	1978	Bdj:135, Bdj:144, Bdj:151, Bdj:156, Bdj:178, Bdj:220
Rémila	12000ha	1/20 000	Aissoug M	1973	RGF94, RGF108, RGF208, RGF411, RGF9, RGF88, RGF332
Lutaid Chemora	/	1/100 000	Issoug H	1970	L.CBK391, L.CBK263, L.CBK246, L.CBK248, L.CBK340, L.CBK145, L.CBK167, L.CBK251, L.CBK299, L.CBK247, L.CBK393, L.CBK334, L.CBK374, L.CBK272
Ain Séhouira	/	1/200 000	Durand J.H	1954	Ain S301, Ain S302, Ain S303, Ain S304, Ain S315
El Boud	/	1/20 000	D.E.R.M.H.	1978	Eb 103, Eb4
Chert Elhougaï	/	1/200 000	Durand J.H	1954	Ch 3, 314
Bassrah el Zarez	/	1/100 000	Paquet M	1971	BZ-0389, BZ-0387, BZ-0421, BZ-0140, BZ-055, BZ-055, BZ-0527, BZ-0112
Boussada	83000ha	1/100 000	Durand J.H, Dutil P, Mèral	1961	Bouss1, 61
M'Sila	/	1/20 000	Dékliche B	1974	MSP81, MSP2, MSP84, MSP83, MSP9, MSP13, MSP7
Hocka/ Boutaleb	200000ha	/			MSP18, MSP84, MSP662, MSP75, MSP139, MSP1316, MSP148
Hocka/ Boussadh	/	1/100 000	P.N.U.D	1975	B0119, B61138
Hocka/ M'Sila	/	/			Bda1317
Maaba Daïettis koume	35000ha	1/100 000	Mironov N	1978	M'S1432, M'S1174, M'S42, M'S163,
Magan	2300ha	1/20 000	Khadroui A, Hemami B	1977	MD1136, MD1104
Kwaraï Sidi Nadjî	/	1/100 000	Aissoug M	1983	Mg23, Mg85, Mg95, Mg21, Mg190, Mg285
El Outaya	1542,3ha	1/100 000	Lenzor M, Eh	1980	ESN69
Zibou - Tolga	13000ha	1/20 000	Abdeslam S	1996	ED38, ED144, ED5, ED17, ED103, ED56, ED23
El Ouritoug-ourahl	/	1/20 000	Moukhalim V	1973	OT101, OT102, OT103, OT104, OT105, OT106, OT107, OT108, OT109, OT110, OT111, OT112, OT113, OT114, OT115, OT116, OT117, OT118, OT119, OT120, OT121, OT122, OT123, OT124, OT125, OT126, OT127, OT128, OT129, OT130, OT131, OT132, OT133, OT134, OT135, OT136, OT137, OT138, OT139, OT140, OT141, OT142, OT143, OT144, OT145, OT146, OT147, OT148, OT149, OT150, OT151, OT152, OT153, OT154, OT155, OT156, OT157, OT158, OT159, OT160, OT161, OT162, OT163, OT164, OT165, OT166, OT167, OT168, OT169, OT170, OT171, OT172, OT173, OT174, OT175, OT176, OT177, OT178, OT179, OT180, OT181, OT182, OT183, OT184, OT185, OT186, OT187, OT188, OT189, OT190, OT191, OT192, OT193, OT194, OT195, OT196, OT197, OT198, OT199, OT200, OT201, OT202, OT203, OT204, OT205, OT206, OT207, OT208, OT209, OT210, OT211, OT212, OT213, OT214, OT215, OT216, OT217, OT218, OT219, OT220, OT221, OT222, OT223, OT224, OT225, OT226, OT227, OT228, OT229, OT230, OT231, OT232, OT233, OT234, OT235, OT236, OT237, OT238, OT239, OT240, OT241, OT242, OT243, OT244, OT245, OT246, OT247, OT248, OT249, OT250, OT251, OT252, OT253, OT254, OT255, OT256, OT257, OT258, OT259, OT260, OT261, OT262, OT263, OT264, OT265, OT266, OT267, OT268, OT269, OT270, OT271, OT272, OT273, OT274, OT275, OT276, OT277, OT278, OT279, OT280, OT281, OT282, OT283, OT284, OT285, OT286, OT287, OT288, OT289, OT290, OT291, OT292, OT293, OT294, OT295, OT296, OT297, OT298, OT299, OT300, OT301, OT302, OT303, OT304, OT305, OT306, OT307, OT308, OT309, OT310, OT311, OT312, OT313, OT314, OT315, OT316, OT317, OT318, OT319, OT320, OT321, OT322, OT323, OT324, OT325, OT326, OT327, OT328, OT329, OT330, OT331, OT332, OT333, OT334, OT335, OT336, OT337, OT338, OT339, OT340, OT341, OT342, OT343, OT344, OT345, OT346, OT347, OT348, OT349, OT350, OT351, OT352, OT353, OT354, OT355, OT356, OT357, OT358, OT359, OT360, OT361, OT362, OT363, OT364, OT365, OT366, OT367, OT368, OT369, OT370, OT371, OT372, OT373, OT374, OT375, OT376, OT377, OT378, OT379, OT380, OT381, OT382, OT383, OT384, OT385, OT386, OT387, OT388, OT389, OT390, OT391, OT392, OT393, OT394, OT395, OT396, OT397, OT398, OT399, OT400, OT401, OT402, OT403, OT404, OT405, OT406, OT407, OT408, OT409, OT410, OT411, OT412, OT413, OT414, OT415, OT416, OT417, OT418, OT419, OT420, OT421, OT422, OT423, OT424, OT425, OT426, OT427, OT428, OT429, OT430, OT431, OT432, OT433, OT434, OT435, OT436, OT437, OT438, OT439, OT440, OT441, OT442, OT443, OT444, OT445, OT446, OT447, OT448, OT449, OT450, OT451, OT452, OT453, OT454, OT455, OT456, OT457, OT458, OT459, OT460, OT461, OT462, OT463, OT464, OT465, OT466, OT467, OT468, OT469, OT470, OT471, OT472, OT473, OT474, OT475, OT476, OT477, OT478, OT479, OT480, OT481, OT482, OT483, OT484, OT485, OT486, OT487, OT488, OT489, OT490, OT491, OT492, OT493, OT494, OT495, OT496, OT497, OT498, OT499, OT500, OT501, OT502, OT503, OT504, OT505, OT506, OT507, OT508, OT509, OT510, OT511, OT512, OT513, OT514, OT515, OT516, OT517, OT518, OT519, OT520, OT521, OT522, OT523, OT524, OT525, OT526, OT527, OT528, OT529, OT530, OT531, OT532, OT533, OT534, OT535, OT536, OT537, OT538, OT539, OT540, OT541, OT542, OT543, OT544, OT545, OT546, OT547, OT548, OT549, OT550, OT551, OT552, OT553, OT554, OT555, OT556, OT557, OT558, OT559, OT560, OT561, OT562, OT563, OT564, OT565, OT566, OT567, OT568, OT569, OT570, OT571, OT572, OT573, OT574, OT575, OT576, OT577, OT578, OT579, OT580, OT581, OT582, OT583, OT584, OT585, OT586, OT587, OT588, OT589, OT590, OT591, OT592, OT593, OT594, OT595, OT596, OT597, OT598, OT599, OT600, OT601, OT602, OT603, OT604, OT605, OT606, OT607, OT608, OT609, OT610, OT611, OT612, OT613, OT614, OT615, OT616, OT617, OT618, OT619, OT620, OT621, OT622, OT623, OT624, OT625, OT626, OT627, OT628, OT629, OT630, OT631, OT632, OT633, OT634, OT635, OT636, OT637, OT638, OT639, OT640, OT641, OT642, OT643, OT644, OT645, OT646, OT647, OT648, OT649, OT650, OT651, OT652, OT653, OT654, OT655, OT656, OT657, OT658, OT659, OT660, OT661, OT662, OT663, OT664, OT665, OT666, OT667, OT668, OT669, OT670, OT671, OT672, OT673, OT674, OT675, OT676, OT677, OT678, OT679, OT680, OT681, OT682, OT683, OT684, OT685, OT686, OT687, OT688, OT689, OT690, OT691, OT692, OT693, OT694, OT695, OT696, OT697, OT698, OT699, OT700, OT701, OT702, OT703, OT704, OT705, OT706, OT707, OT708, OT709, OT710, OT711, OT712, OT713, OT714, OT715, OT716, OT717, OT718, OT719, OT720, OT721, OT722, OT723, OT724, OT725, OT726, OT727, OT728, OT729, OT730, OT731, OT732, OT733, OT734, OT735, OT736, OT737, OT738, OT739, OT740, OT741, OT742, OT743, OT744, OT745, OT746, OT747, OT748, OT749, OT750, OT751, OT752, OT753, OT754, OT755, OT756, OT757, OT758, OT759, OT760, OT761, OT762, OT763, OT764, OT765, OT766, OT767, OT768, OT769, OT770, OT771, OT772, OT773, OT774, OT775, OT776, OT777, OT778, OT779, OT780, OT781, OT782, OT783, OT784, OT785, OT786, OT787, OT788, OT789, OT790, OT791, OT792, OT793, OT794, OT795, OT796, OT797, OT798, OT799, OT800, OT801, OT802, OT803, OT804, OT805, OT806, OT807, OT808, OT809, OT810, OT811, OT812, OT813, OT814, OT815, OT816, OT817, OT818, OT819, OT820, OT821, OT822, OT823, OT824, OT825, OT826, OT827, OT828, OT829, OT830, OT831, OT832, OT833, OT834, OT835, OT836, OT837, OT838, OT839, OT840, OT841, OT842, OT843, OT844, OT845, OT846, OT847, OT848, OT849, OT850, OT851, OT852, OT853, OT854, OT855, OT856, OT857, OT858, OT859, OT860, OT861, OT862, OT863, OT864, OT865, OT866, OT867, OT868, OT869, OT870, OT871, OT872, OT873, OT874, OT875, OT876, OT877, OT878, OT879, OT880, OT881, OT882, OT883, OT884, OT885, OT886, OT887, OT888, OT889, OT890, OT891, OT892, OT893, OT894, OT895, OT896, OT897, OT898, OT899, OT900, OT901, OT902, OT903, OT904, OT905, OT906, OT907, OT908, OT909, OT910, OT911, OT912, OT913, OT914, OT915, OT916, OT917, OT918, OT919, OT920, OT921, OT922, OT923, OT924, OT925, OT926, OT927, OT928, OT929, OT930, OT931, OT932, OT933, OT934, OT935, OT936, OT937, OT938, OT939, OT940, OT941, OT942, OT943, OT944, OT945, OT946, OT947, OT948, OT949, OT950, OT951, OT952, OT953, OT954, OT955, OT956, OT957, OT958, OT959, OT960, OT961, OT962, OT963, OT964, OT965, OT966, OT967, OT968, OT969, OT970, OT971, OT972, OT973, OT974, OT975, OT976, OT977, OT978, OT979, OT980, OT981, OT982, OT983, OT984, OT985, OT986, OT987, OT988, OT989, OT990, OT991, OT992, OT993, OT994, OT995, OT996, OT997, OT998, OT999, OT1000

Tableau VI. Répartition cartographique des études et des profils

Les données collectées sont les suivantes :

- l'élément gypse est pris comme facteur discriminant « dans la sélection des profils »,
- les coordonnées des profils, la localisation de l'étude,
- la hauteur moyenne annuelle des pluies,
- l'épaisseur des horizons,
- - les données morphologiques suivantes : forme d'accumulation du gypse, texture, structure, couleur, test HCl, humidité, porosité, matière organique.
- les données analytiques suivantes :

analyse granulométrique par la méthode internationale,  
 capacité d'échange cationique (CEC ou T),  
 calcaire total par la méthode volumétrique,  
 taux de gypse,  
 conductivité électrique à l'extrait de pâte saturée,  
 pH du sol,  
 les sels solubles (SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>),  
 le taux de sodium échangeable (ESP) =  $\frac{Na^+ \cdot 100}{CEC}$

## 1. 2. Saisie et mise en forme des données de la banque

La saisie de l'ensemble des informations sur micro-ordinateur a été réalisée à l'aide du tableur EXCEL. Le tableau des données étant mis en place, il a été nécessaire d'harmoniser la nature des caractères que l'on veut traiter (mise en conformité des données et codages des profils et horizons) (King et Duval, 1989). Ainsi, les données sont scindées en deux blocs d'informations, harmonisés et complémentaires :

- bloc des données quantitatives,
- bloc des données qualitatives.

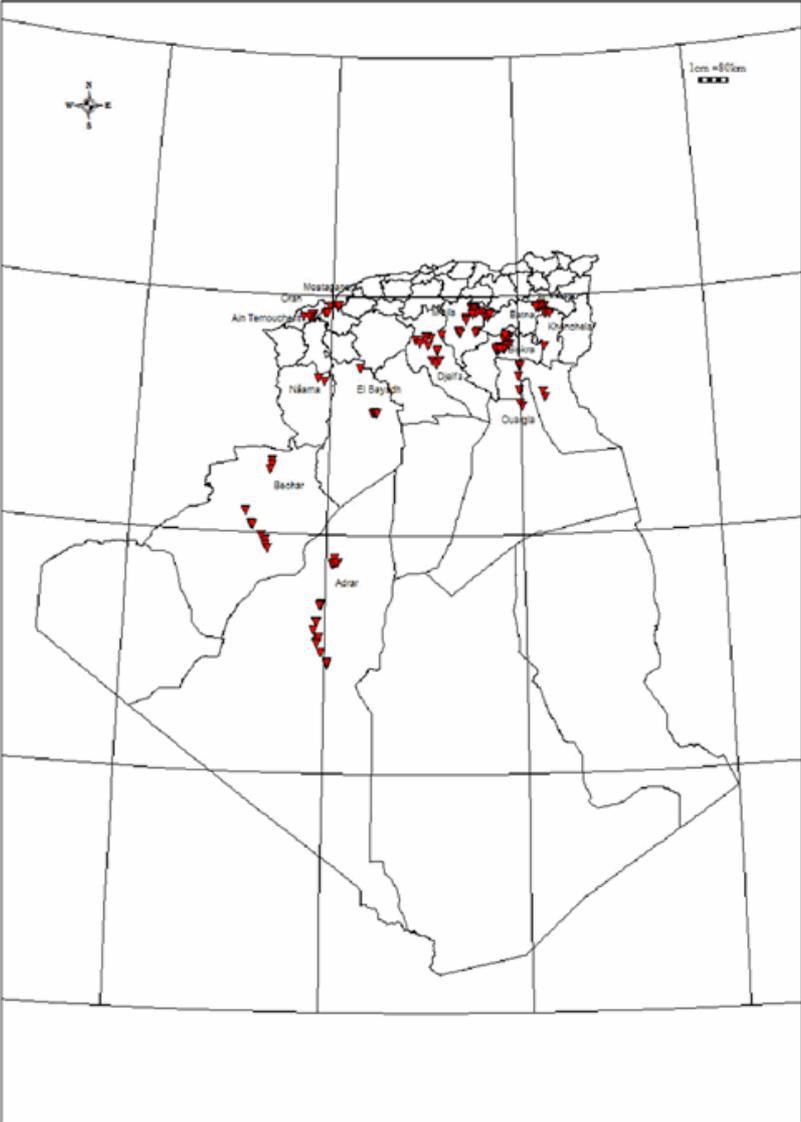
La banque constituée est composée de 35 études pédologiques (annexe I), de 206 profils, et de 904 horizons (fig. 6).

Toutefois, il est important d'indiquer que cette étude est effectuée à une échelle beaucoup plus petite que celles des études collectées, ce qui a engendré une superposition et par conséquent une diminution dans la qualité de la représentation de certains profils.

## 2. Délimitation et présentation des milieux caractéristiques des études et des profils

Cette partie de l'étude repose sur la représentativité et la localisation des profils et des études dans l'espace géographique et géomorphologique algérien.

Les données caractéristiques de chaque zone d'étude sont présentées dans le tableau VII.



**Figure6** :représentation spatiale des profils d'études

Ensembles géomorphologiques (Despois et Raynal, 1975; Mediouni, 1997)	Formations Géomorphologiques	Études	Profils d'études	Étages bioclimatiques (Le Houérou et al., 1977; Le Houérou, 1975, 1979; Nedjraoui, 2001)	
<b>TELL</b>	Plaines littorales et intérieures	M'letat télélat	M'h115, M'h746, M'h755, M'h570, M'h417, M'h1251		
		Sig	SD137, SD145, SD444,		
		Bordjias	Edjs135, Edjs144, Edjs151, Edjs156, Edjs178, Edjs220		
	Hautes plaines Est	Rémila	RGF94, RGF108, RGF308, RGF411, RGF9, RGF68, RGF352		
		Lutaud Chemora	L.CBK391, L.CBK265, L.CBK246, L.CBK248, L.CBK340, L.CBK145, L.CBK293, L.CBK354, L.CBK167, L.CBK374, L.CBK272, L.CBK251, L.CBK299, L.CBK247		300-600mm / an (Semi-aride)
		Bassin du Zahrez	BZ-G289, BZ-G387, BZ-G421, BZ-G140, BZ-G53, BZ-G327, BZ-G112		
		Ain Sekhouma	Ain S301, Ain S302, Ain S303, Ain S304, Ain S315		
		El Biod	E-b103, E-b4		
		Chott Echergui	ChC Ch314		
				M'SPB31, M'SPB2, M'SPB4, M'SPB3, M'SP18, M'SP54, M'SP62, M'SP75, M'SP1139, M'SP1316, M'SP9, M'SP13, M'SP7, M'SP148	
	Boussaada	BousL61			
<b>HAUTES PLAINES</b>	Hautes plaines Centre - Ouest	Hodna/ Boutaleb	Eb1159, Eb1158		
		Hodna/ Boussaada	Bda1317	100-300mm / an (Aride)	
		Hodna/ M'sila	M'S1452, M'S1174, M'S42, M'S163,		
		Maalba Dsiet tissleouine	MDT136, MDT194		
		Magra	Mg53, Mg85, Mg93, Mg31, Mg190, Mg283		
		Khanget Sidi Nadji	KSN69		
		El Outaya	EO68, EO144, EO5, EO17, EO103, EO56, EO23		
		Ziban - Tolga	O1GN, OT2CS, OT3HZ, OT5BS, OT7TN, OT8BBA		
		El Ouzri- Tolga- Ourelal	OTO1, OT031, OT038, OT092, OT0404, OT058, OT039, OT062, OT0222, OT057, OT052, OT0109, OT0146, OT0167, OT0160, OT0248, OT0163, OT0282, OT0225, OT0262, OT0308, OT0327		
		Erézina	EDb16, EDb36, EDb156, EDb162, EDb253, EDb493		
		Messaad Ain El Ibil	Malb-8k25, Malb-9L28, Malb-9k55, Malb-8L22		

Tableau VII. Délimitation et présentation des milieux caractéristiques des études et des profils

Ensembles géomorphologiques	Formations Géomorphologiques	Etudes	Profils d'études	Etages Bioclimatiques
			MB1,MB2,MB4,MB5, MB6,MB7, MB8,MB9,MB10,MB11,MB12,	
		M'guebra (El Oued)	MB13,MB14,MB15, MB16,MB17, MB18,MB19,MB20,MB21,MB22, MB23,MB24,MB25,MB28,MB29	
		Méguiden	Megd1, Megd14, Megd29,	
		Zousfana	Zs176, Zs198, Zs304,	
		Réguiba-Souf	SRb69, SRb70,	
		M'ghaier ( 1 )	ORhP1, ORhP2, ORhP3	
<b>SAHARA</b>	Sahara	M'ghaier ( 2 )	ORhPM1	<b>&lt; 100mm / an (Saharien)</b>
		El Oued (Ghouts)	E-GH2	
		Oued righ	OR553, OR559, OR557	
		Vallée de la saoura	VS37, VS67, VS88, VS113, VS186, VS200	
		Gourara	G374, G402, G352, G388	
		Timimoun	Tim1, Tim3, Tim6, Tim7, SbT456,	
		Sbaa-tsabit	SbTt238SbTt81, SbTt449, SbTt109, SbTt394 SbTt2, SbTt41, SbTt231, SbTt268, SbTt333	
		Tezdaia	Tezd14, Tezd16, Tezd18, Tezd19	
		Touat	T150, T307, T222, T210, T241, T298	
		Ait Messacud	Ait m/ R83, Ait m/ R11	

Tableau VII (suite). Délimitation et présentation des milieux caractéristiques des études et des

### 3. Traitement des données

Le traitement des données a porté sur la spatialisation des taux et des formes de gypse, et l'analyse statistique classique.

#### 3. 1. Spatialisation des taux et des formes de gypse

C'est une approche cartographique relative à la répartition du gypse dans l'espace et dans le profil (spatialisation latérale et verticale). Elle est basée sur des requêtes caractéristiques soit des taux, soit des formes de gypse par horizon. Le résultat est par la suite présenté sous forme de cartes, chacune d'elles présente trois types de cartogrammes :

- les cartogrammes des horizons de surface (h1),
- les cartogrammes des horizons de subsurface (h2),
- les cartogrammes des horizons de profondeur (hp).

La détermination des trois catégories d'horizons repose sur leur ordre de succession dans le profil, sans distinction d'épaisseur.

Pour les horizons de profondeur une combinaison des différentes couvertures des horizons 3, 4, 5, 6, parfois 7, 8 et 9 est réalisée.

La spatialisation est effectuée grâce au logiciel Mapinfo et au support géographique Comgeo (I.N.C.T., 2000). Ce dernier nous permet une projection rapide des limites géographiques de l'Algérie sans une digitalisation préalable.

Il est important d'indiquer qu'avant la spatialisation des données, l'harmonisation des coordonnées des profils dans un seul système de références est préalablement réalisée. Le système Universal Transverse Mercator (UTM) est utilisé.

---

## 3. 2. Analyse statistique classique

---

Les traitements suivants sont effectués :

- les statistiques descriptives pour l'ensemble des données,
- la comparaison des moyennes des taux de gypse entre les horizons,
- le calcul des distributions de fréquences du gypse (taux et formes),
- les relations statistiques pouvant exister entre le gypse et d'autres variables,

Les différents calculs sont réalisés à l'aide des logiciels EXCEL, SPSS et ORIGIN.

### 3. 2. 1. Statistiques descriptives

Dans ce travail, les statistiques descriptives utilisées sont :

- la moyenne,
- la médiane,
- les maxima et les minima,
- la variance,
- l'écart-type,
- le coefficient de variation.

Pour ce traitement, l'opération est scindée en deux phases, : un traitement initial pour le taux de gypse global et les différentes variables de la banque de données, et un second traitement pour les taux de gypse propres à chaque catégorie d'horizons.

### 3. 2. 2. Comparaison des moyennes

La comparaison des moyennes se fera par catégorie d'horizons, pris deux à deux. Elle est calculée entre les horizons de surface (h1) et de subsurface (h2), entre les horizons de surface (h1) et ceux de profondeur (hp) et entre les horizons de subsurface (h2) et ceux de profondeur (hp).

Ce calcul statistique est réalisé grâce au test de « Student ». Il a pour but d'évaluer statistiquement les différences pouvant exister dans les valeurs du taux de gypse entre deux horizons différents.

### 3. 2. 3. Calcul des fréquences de distribution

Ce traitement a porté sur la distribution des fréquences des taux et des formes de gypse au niveau de l'ensemble des données, sans distinction de profils et d'horizons, et ensuite au niveau de chaque catégorie d'horizons.

Ce calcul a pour objectif la réalisation d'histogrammes de fréquences nécessaires dans l'interprétation des cartogrammes de distribution des taux et des formes de gypse. C'est une forme de soutien visuelle qui permet d'affiner l'allure du modèle de distribution du minéral, d'un point de vue globale ou par horizon caractéristique.

La représentation des valeurs des taux de gypse se base sur une structuration en cinq (05) classes telles que proposées par Boyadgiev (1974,1975) et Djili (2000) :

Classe 1 : classe des teneurs très faibles « G1 » : 0-5%

Classe 2 : classe des teneurs faibles « G2 » : 5-15%

Classe 3 : classe des teneurs moyennes « G3 » : 15-25%

Classe 4 : classe des teneurs fortes « G4 » : 25-50%

Classe 5 : classe des teneurs très fortes « G5 » : >50%

La représentation des formes de gypse de la banque est effectuée sur la base de quatre classes, fixées arbitrairement : la forme diffuse, les amas, les cristaux et microcristaux, et les formes continues.

### **3. 2. 4. Les relations entre les variables**

L'étude des relations est un des caractères essentiels de la pédologie (Boulaine, 1979). Dans notre étude, il s'agit de rechercher les relations pouvant exister entre le paramètre discriminant, le gypse, et certaines variables de la banque de données, soit sur les données globales ou par catégorie d'horizons (h1, h2, hp). Cette approche se base sur la régression simple et la régression multiple.

#### **3. 2. 4. 1. La régression simple**

Les différentes variables nécessaires à l'étude des régressions simples sont extraites ou calculées (l'ESP).

Le but de cette opération est de déterminer le degré d'association ou la liaison qui existe entre notre paramètre d'étude (le gypse) et quelques variables de la banque. Le but est de tenter de cerner les facteurs édaphiques (pédologiques) ou climatiques (pluviométrie) pouvant affecter les teneurs en gypse du sol. L'analyse est effectuée sur les variables prises deux à deux.

L'appréciation de cette relation se fait à l'aide d'un coefficient défini comme le coefficient de corrélation « r » qui est la racine carrée de R2 «  $r = \sqrt{R2}$  ». Selon Dagnelie (1975), le coefficient de corrélation peut prendre des valeurs comprises en -1 et 1 ( $-1 \leq r \leq 1$ ) et sa signification repose sur l'hypothèse nulle du test de conformité, qui s'écrit :

$$H_0 : p = 0 \text{ (corrélation non significative).}$$

Dans notre étude, la signification du test de corrélation est estimée à partir de la table ajustée des valeurs critiques du coefficient de corrélation (Annexe II), après comparaison entre le « r observé » et le « r critique ».

Il est utile d'indiquer que cet ajustement a été réalisé sur la base de la loi de distribution de STUDENT, présentée comme suit :

$$[ \text{ la loi de distribution de STUDENT : } \text{tobs} = |r| \left( \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \right) ]$$

Le principe de ce test est alors de calculer une valeur « t » observée, et de rejeter l'hypothèse nulle lorsque cette valeur est trop élevée, c'est-à-dire lorsque  $\text{tobs} \geq t_{1-\alpha/2}$  pour un niveau de signification  $\alpha$  et avec  $n-2$  degrés de liberté. Et puisque la comparaison de  $\text{tobs}$  à  $t_{1-\alpha/2}$  est strictement équivalente à la comparaison de  $r$  à  $r_{1-\alpha/2}$ , il est possible donc de procéder aux tests de signification en rejetant l'hypothèse nulle lorsque  $|r| \geq r_{1-\alpha/2}$  (Iddir, 2003).

Les variables choisies pour la réalisation de ce traitement sont les différentes fractions de la granulométrie (l'argile, le limon et le sable), le calcaire total (Cal.tot), la capacité d'échange cationique (CEC), l'ESP, le pH, la conductivité électrique (CE), les sels solubles caractérisés par le  $\text{SO}_4^{--}$  et le  $\text{Ca}^{++}$  et enfin la pluviométrie.

Le choix de l'ensemble de ces variables est une tentative pour mieux identifier et mieux connaître les éléments susceptibles d'intervenir ou d'interférer dans la mise en place, l'accumulation et l'organisation du gypse dans le sol. Ces éléments ont été également choisis à cause de leur importance dans la mise en place, l'organisation et le fonctionnement des différents types de sols (U.S.D.A., 1994, 1999; Pouget, 1995; B.R.M., 1998, 2006), et leur intervention ou leur immixtion dans le déroulement des cycles et processus pédologiques (Aubert et Boulaine, 1967; Pedro, 1984).

Les régressions simples ont été réalisées en deux phases, un premier traitement pour les données globales, et un second traitement par catégorie d'horizon.

Il y a lieu d'indiquer que dans le second traitement, la relation entre la répartition des taux de gypse et la pluviométrie est étudiée de manière plus détaillée. Il est question d'examiner l'influence des hauteurs de pluies sur la disponibilité et la répartition du gypse, en se rapportant aux trois étages bioclimatiques de correspondance (tranches pluviométriques) (Le Houérou et al., 1977; Le Houérou, 1975, 1979; Nedjraoui, 2001), identifiés lors de la délimitation et la présentation des milieux caractéristiques des études et des profils (tab.VII). Pour rappel, il s'agit de :

- l' étage semi-aride ( $300 < P < 600\text{mm}$ ).
- l' étage aride ( $100 < P < 300\text{mm}$ )
- l' étage saharien ( $P < 100\text{mm}$ )

Ce calcul porte sur la comparaison des moyennes (traitement réalisé sur la base du même test présenté dans le paragraphe 3.2.2) des différents horizons dans un même étage bioclimatique, et ensuite sur la comparaison des moyennes entre les horizons de même catégorie mais dans des étages bioclimatiques différents. L'intérêt de cette seconde comparaison est de caractériser le comportement des horizons d'études selon leur étage de localisation.

### 3. 2. 4. 2. la régression multiple

La régression multiple est définie comme l'une des méthodes statistiques la plus utilisée dans les sciences appliquées et dans les sciences de l'homme et de la société. Elle se base

sur une variable dépendante et au moins deux variables indépendantes. Le degré de liaison entre ces variables est exprimé par « R<sup>2</sup> » le coefficient de détermination. Ce dernier peut prendre des valeurs comprises entre 0 et 1.

Selon Dagnelie et Palm (1995), Rouanet et al.(2002) et Borcard (2007), elle peut faire l'objet de différents usages :

- Décrire les relations entre une variable privilégiée, appelée variable dépendante (expliquée), et plusieurs variables, appelées variables indépendantes (ou explicatives) ;
- Effectuer des estimations et des prédictions de la variable dépendante en fonction des variables indépendantes et d'évaluer la précision et la signification ;
- Mettre au point un outil de contrôle : l'équation de régression qui est utilisée de manière à modifier la valeur d'une variable dépendante afin d'obtenir une valeur fixe de Y.

Dans cette étude, l'utilisation de la régression multiple va nous servir à construire et choisir des modèles de prédiction qui expriment ou identifient le mieux le comportement et la fonctionnalité du gypse dans des conditions spécifiques, liées à la nature du milieu encaissant.

La démarche adoptée pour ce traitement repose sur les étapes suivantes (Borcard, 2007; Ounnas, 2000; Rouanet et al, 2002):

- Sélectionner et combiner les paramètres d'étude (choix des variables indépendantes) ;
- Utiliser les équations des régressions simples pour définir avec exactitude le type de modèle d'équation à sélectionner (linéaire ou autre);
- Tester le degré de signification de chaque équation de régression, en comparant le R calculé avec le R critique de la table des valeurs ajustée (Annexe II). Il y a lieu de rappeler que les valeurs (du R critique) de cette table ont été estimées par la méthode d'interpolation (voir approche régression simple) ;
- Sélectionner les équations de régression "significatives" les plus importantes, par référence au coefficient multiple « R » le plus élevé ;
- Choisir et extraire les modèles de prédiction les plus appropriés en tenant compte de certains critères qui permettent d'apprécier la validité des différents ajustements (Rondeux, 1993; Foucart, 1999, 2006) : le coefficient de détermination élevé, les paramètres basés sur la valeur des résidus (faibles à proche de zéro), le coefficient de variation résiduel, la valeur de F « observé », les facteurs d'inflation et l'écart-type résiduel.

Dans notre cas, nous nous sommes limités à l'observation du coefficient multiple (racine carré de R<sup>2</sup>) le plus élevé et aux valeurs des résidus. Pour le premier critère, il est fait référence au « R critique » estimé "en première approche 3 " à un niveau de signification où le risque d'erreur est  $\alpha = 0,001$ . Pour le second critère, nous avons procédé à sa substitution par l'élimination des paramètres qui explique moins la dépendance, en s'appuyant sur les résultats de la régression simple (non significatifs). Sachant que ces dernières s'identifient toujours par des valeurs de résidus élevées (régression à rejeter).

Les paramètres choisis dans la réalisation de ce traitement sont : le gypse comme variable dépendante, l'argile, le calcaire total, la conductivité électrique et la pluviométrie comme variables indépendantes. Le choix de ces quatre variables est motivé par ce qui suit :

- l'argile est la fraction qui conditionne la nature texturale du sol. Même à de très faibles taux, elle influence la mobilité et la rétention des éléments minéraux (Pouget, 1980), la rétention et la circulation de l'eau dans le sol (Henin et al., 1969; Cherby, 1991), ainsi que l'accumulation des sels en surface (You et al., 1992).

Elle conditionne le comportement mécanique des sols (Grimaldi, 1977; Faure, 1978; Podwojewski, 1988), principalement la cohérence texturale (Roose et Sarrailh, 1990) et la CEC (Ruellan et Deletang, 1967; Podwojewski, 1988; Safar et al., 1992). De plus, elle est considérée comme un indicateur de milieu (stable, héritage, et néogénèse), pareil aux fossiles de faciès dans les roches sédimentaires (Boulaine, 1979).

- le calcaire total présent dans le sol peut intervenir soit comme paramètre contraignant où il provoque la rétrogradation de la matière organique et le blocage d'éléments minéraux (par augmentation du pH et par complexation) (Durand, 1954 ; Duchaufour, 1988) ou bien comme paramètre stimulant, en permettant la cristallisation du sulfate de calcium sous l'influence du gaz carbonique (Pouget, 1968; Artieda et Herrero, 1996). De plus, il présente un cation commun avec le gypse et le Calcium (Ca<sup>++</sup>)

- la conductivité électrique est un indicateur de la présence ou de l'absence des sels dissous en solution et de leur importance (Servant, 1975; Hadid, 1992),

la pluviométrie, de par sa fréquence, son irrégularité et son intensité, caractérise bien, l'équilibre climatique d'une région, le transfert d'eau, le modelé du paysage, la formation des sols (Haddouche, 1998), et le système dissolution - dynamique de certains

---

3. En seconde approche d'évaluation, il est fait référence à un niveau de signification où le risque d'erreur  $\alpha$  est égal 0,01, alors que dans le cas où c'est la troisième approche d'estimation qui est appliquée, le risque d'erreur  $\alpha$  équivaut à 0,05.

éléments solubles (Nedjraoui et Touffet, 1994; Haddouche, 1998).

Les différentes combinaisons caractéristiques de ce traitement ont été réalisées en deux étapes : la première représente l'analyse des données globales, et la seconde étape représente l'analyse des données par catégorie d'horizons.

Il est à signaler que l'introduction de la donnée pluie dans l'analyse des données par catégorie d'horizons, se fera en second lieu par rapport à l'argile, le calcaire total et la conductivité électrique, tout en se référant à l'influence des étages bioclimatiques semi-aride (300-600mm), aride (100-300mm) et saharien (<100mm).

## 4. Détermination des principaux groupements gypseux sur la base d'une approche multidimensionnelle

L'objectif de cette approche multidimensionnelle est l'identification des principaux groupements gypseux et de leur spécificité.

Notre choix s'est porté sur la méthode dite « analyse en composantes principales » (ACP).

L'analyse en composantes principales est une méthode statistique ancienne, issue des travaux de psychomètres américains (Hotelling, 1933; Thurstone, 1947). Cependant,

son utilisation comme approche d'analyse est assez récente, et plus précisément depuis l'avènement et la diffusion des moyens de calculs actuels tels que les ordinateurs (Lebart, 2004).

L'analyse en composantes principales est une technique essentiellement descriptive permettant d'étudier les relations qui existent entre les variables (multiparamétriques), sans tenir compte a priori, d'une quelconque structure (Jolliffe, 1986; Diamantaras et Kung, 1996). D'un autre côté, son but est d'identifier la structure de dépendance entre des observations multivariées afin d'obtenir une description ou une représentation graphique assez compacte de ces dernières. Une représentation axée sur le nombre des axes principaux à prendre en considération et dont le choix dépend des valeurs propres de chaque axe et des pourcentages correspondants (Boumaza, 1999; Harkat, 2003).

La représentation des éléments dans le plan ACP peut être obtenue sous trois formes : les coordonnées, la qualité de la représentation (mesurée par le  $\text{Cos}^2$ ) et la contribution (Picard, 1979 ; Bouxin, 2005).

En pédologie, il y a lieu de signaler son utilisation par différents auteurs tels que Norris et Loveday (1971), Webster (1977), Pouget (1980), Olivier (1984), Voltz (1986), Girard et King (1988), Walter (1990), Douaoui (1993) et Hamouni (2006).

La réalisation de notre analyse a nécessité les étapes suivantes:

- réajustement et fixation du nombre d'horizons maximal à 6, correspondant à une profondeur de profil de 2m,
- codification des variables (morphologiques et analytiques) (annexe III) et traitements en rangs,
- choix des variables et mise en place de la matrice d'étude,
- utilisation d'une matrice sous forme d'un tableau de type profils « individus » en ligne et de type variables-horizons « combinaison » en colonne, en similitude avec l'approche Dimitri (Girard et King, 1988) et Vladimir (King et Girard, 1988).
- réalisation de l'analyse en composantes principales à l'aide du logiciel S.A.S, sur la base de son mode sélectif,
- l'analyse a été poussée jusqu'à l'obtention de cinq axes desquels nous avons interprété les trois premiers (les axes qui présentent le maximum d'informations). Ces axes sont caractérisés par les variables - horizons et les profils qui leur sont fortement liés soit du côté positif ou du côté négatif,
- les variables - horizons « combinaison » et les profils « individus » sont ordonnés sur les axes selon leurs coordonnées (Philippeau, 1986; Berka, 1997; Boucheneb, 1999; Zannouché, 2001; Rouanet et al., 2002; Roy et Beust, 2004; Bouxin, 2005). Seulement, pour un axe donné il n'est pris en compte que les combinaisons et les individus qui présentent les plus fortes coordonnées (valeur absolue),
- représentation des variables - horizons sur les plans factoriels 1/2 et 1/3 et détermination de leur direction,
- représentation des profils ou individus sur les plans factoriels 1/2 et 1/3 et détermination de leur direction,
- identification et caractérisation des principaux groupements gypseux à partir de la combinaison des deux représentations.

### 4. 1. Principe de mise en œuvre de la matrice

---

La construction de la matrice d'étude (fig.7) est basée sur la banque de données caractérisée précédemment, et dans laquelle nous avons utilisé 35 études présentant des profils où la principale information recherchée, le taux de gypse et la forme d'accumulation gypseuse, est disponible.

Pour les autres paramètres pédologiques pris en considération, l'idéal aurait été de prendre tous les paramètres (20) existants (sauf Hcl) et qui interviennent de manière indéniable dans le comportement et le fonctionnement du sol. Malheureusement, ceci n'a pas été possible, puisque les variables et leur nombre ont été limités de manière sélective par l'outil de traitement (à cause de données manquantes). Le résultat final s'est traduit par la sélection de seulement 3 variables pédologiques de plus.

Les variables prises en compte sont :

- 3 variables quantitatives (taux de gypse, taux de Calcaire total, conductivité électrique (CE)),
- 2 variables qualitatives (formes d'accumulation du gypse, texture).

L'analyse en composantes principales, méthode d'ordination, est appliquée ainsi à une matrice de présence (code 1) - absence (code 0), structurée sur la base d'une transformation en rang, de 882 horizons, 206 profils et 5 variables pédologiques.

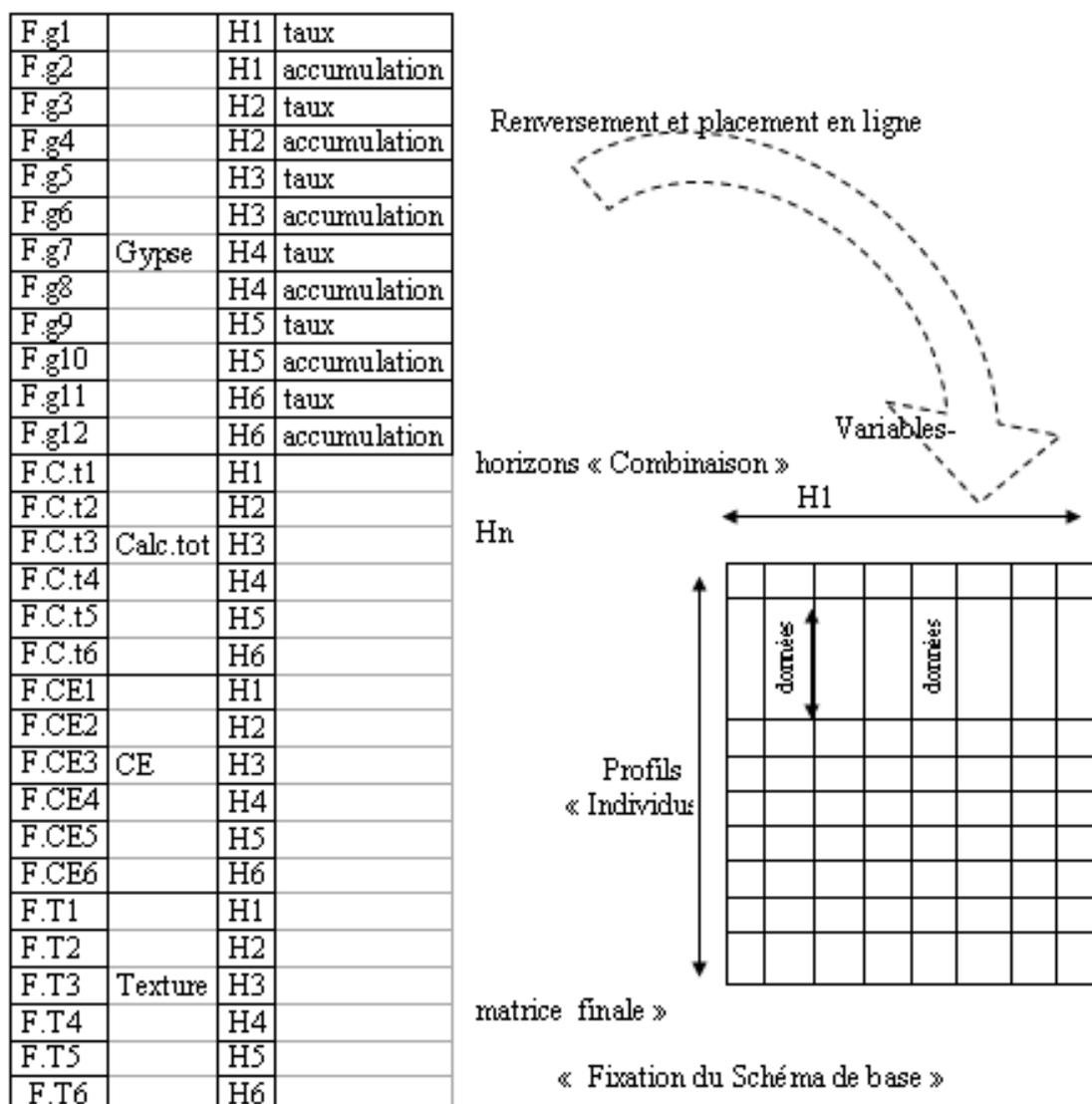


Figure 7. Elaboration de la matrice d'étude

## 5. Identification et détermination des profils références des sols à gypse

Elle se base sur l'établissement d'un schéma d'organisation général, reposant sur l'interprétation des deux premiers plans factoriels (relative aux trois axes interprétés) :

- Plan d'étude axe 1 et 2,
- Plan d'étude axe 1 et 3.

Le principe est de hiérarchiser la nature et l'effet du (ou des) processus qui régit (régissent) la formation et l'organisation de nos principaux groupements gypseux.

Nous avons commencé par identifier, l'effet ou les effets considérés comme englobant et important. Ceux qui restent ont été introduits comme des niveaux secondaires, selon leur degré d'importance.

En second lieu, nous avons assimilé la description ou la caractérisation de chaque groupement identifié en classe d'appartenance graduée, d'une part en se basant sur les trois niveaux d'influence identifiés précédemment et de leur importance, d'autre part en incluant la combinaison «sources d'apports en gypse - la nature du milieu encaissant ou milieu d'accueil (d'où ressort le niveau d'affluence, la texture, la présence ou non de calcaire, la présence ou absence d'effet CE)».

Il y a lieu d'indiquer que les composants (qualitatifs et quantitatifs) identifiés dans chaque classe d'appartenance graduée seront appréciés sous forme codifiée, en utilisant les données morphologiques et analytiques présentés en annexe III.

Pour finaliser, nous avons opté dans notre choix du profil référence, relatif à chaque groupement, de retenir que le taux de pourcentage le plus élevé assimilé à chaque classe.

# Chapitre III. Résultats et discussions

## Introduction

Ce travail a été initié sur la base d'une banque de donnée de 904 horizons, 206 profils et 21 variables.

Il s'agit d'utiliser et d'appliquer les connaissances théoriques et pratiques cumulées dans les différents travaux réalisés jusqu'à présent, d'une part sur la disponibilité et le comportement du gypse dans le profil et dans l'espace, et de l'autre sur la formation, le comportement et la distribution des sols gypseux.

Pour ce faire, l'élément gypse (taux et formes d'accumulations) a été prit comme facteur principal de sélection.

Le modèle méthodologie adopté, va nous permettre dans un premier temps, de présenter les résultats relatifs à la caractérisation et la valorisation des données de la banque, en s'appuyant sur :

- la structuration et la distribution du gypse dans l'espace et dans le profil,
- la structuration des autres variables constituant la banque,
- les relations et les éventuelles interactions susceptibles d'exister entre le gypse et quelques variables choisies.

Dans un second temps, nous déterminerons les principaux groupements gypseux d'Algérie et leurs spécificités, avant d'en extraire les profils références des sols gypseux.

Toutefois, ces deux phases de traitements ont été précédées par une petite évaluation qualitative de la masse de renseignements mis en banque, sur la base de la quantification du taux de remplissage de chaque variable (descriptifs ou analytiques).

## 1. Les taux de remplissage de la banque de données

Le calcul du taux de remplissage (TR) est réalisé sur la base de la formule suivante :

$$TR = (Hr * 100) / Ht$$

TR : taux de remplissage

Hr : nombre d'horizon renseigné pour chaque paramètre

Ht : nombre total des horizons

Les résultats obtenus sont mentionnés dans les tableaux VIII et IX, respectivement pour les données quantitatives et les données qualitatives. Les variables sont ordonnées par ordre décroissant de leurs taux de remplissage.

L'absence d'information pour une variable donnée, n'a pas été mentionnée comme une valeur nulle ( $\neq 0$ ).

### 1. 1. Les données quantitatives

Les variables présent en considération, au nombre de treize (13) sont classées en deux catégories : les variables notées et les variables estimées (tab.VIII).

<b>Variables</b>	<b>Nombre d'horizons renseignés</b>	<b>Taux de remplissage (%)</b>
<b>Variables notées</b>		
Phuviométrie	904	100
pHeau	797	88,16
CE (dS/m)	754	83,40
Calc.tot. (%)	746	82,52
Taux de gypse (%)	726	80,30
S (%)	640	70,79
L (%)	515	56,96
Na <sup>+</sup> (mé/l)	499	55,19
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mé/l)	488	53,98
Ca <sup>+</sup> (mé/l)	485	53,65
A (%)	484	53,53
CEC (mé/100g)	404	44,69
<b>Variable calculées</b>		
ESP (%)	244	26,99

Tableau VIII. Taux de remplissage des paramètres analytiques (notés et estimés)

Selon Djili (2000), lorsque le taux de remplissage est < 50% : insuffisamment renseignées

50-70% : moyennement renseignées

70-90 % : relativement bien renseignés

90-100% : très bien renseignés

L'examen de ce tableau révèle que :

deux (02) variables sur treize (CEC, ESP) soit 15,38%, sont insuffisamment renseignées (<50%),

- cinq (05) variables (limon, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2+</sup>, Ca<sup>++</sup>, et l'argile) soit 38,46%, sont moyennement renseignées (50-70%),
- cinq (05) variables (pH, CE, Calc.tot., taux de gypse et le sable) soit 38,46%, sont relativement bien renseignés (70- 90%),
- une seule variable (pluviométrie) présente un taux de remplissage égal à 100%, soit 7,69% des variables.

## 1. 2. Les données qualitatives

Les variables sélectionnées sont aux nombres de huit (8). Le taux de remplissage est indiqué dans le tableau IX.

Paramètres qualitatifs	Nombre d'horizons renseignés	Taux de remplissage (%)
Couleur	833	92,14
Texture	811	89,71
Structure	695	76,88
Forme d'accumulation du gypse	563	62,27
Humidité	502	55,53
porosité	394	43,58
matière organique	284	31,41
Test HCl	78	8,62

Tableau IX. Taux de remplissage des paramètres morphologiques

A la lecture de ce tableau, il ressort qu'aucune variable n'est renseignée à 100%. Toutes les descriptions ne sont pas systématiquement renseignées. De ce fait :

- trois variables sur huit (porosité, matière organique, test HCl) soit 37,5 %, sont insuffisamment renseignées (<50%),
- deux variables sur huit (forme d'accumulation, humidité) soit 25%, sont moyennement renseignées (50-70%),
- trois variables sur huit (couleur, texture, structure) soit 37,5 %, présentent des taux de remplissage supérieure à 70%.

Ainsi, il ressort que la quantification des taux de remplissage des paramètres quantitatifs et qualitatifs montre que la qualité des données de la banque est hétérogène. Il existe donc une grande disparité de renseignements entre les variables.

Les variables d'étude ne sont pas toutes systématiquement mesurées ou décrites, et donc renseignées.

La différence dans les taux de remplissage pourrait être expliquée par le fait que les études sélectionnées ont été réalisées sur la base de différents niveaux d'investigation (différentes échelles). Une situation dictée soit par les objectifs à atteindre, ou bien par les impératifs conjoncturels (contraintes techniques et économiques). King (1987), King et Duval (1989), Girard (1983) et Djili (2000) incriminent, pour leur part, l'absence d'une démarche méthodologique normalisée.

## 2. Analyse statistique classique

### 2. 1. Approche globale

Les traitements et calculs sont réalisés sur les données dans leurs globalités sans distinctions des profils et des horizons.

#### 2. 1. 1. Caractérisation des taux de gypse

##### 2. 1. 1. 1. statistiques descriptives

L'analyse des données a été menée sur un effectif de 726 horizons. Les résultats obtenus sont énoncés dans le tableau X.

<b>Nombre d'horizon</b>	726
<b>Moyenne</b>	15,980
<b>Médiane</b>	7,530
<b>Minimum</b>	0
<b>Maximum</b>	96
<b>Ecart-type</b>	19,460
<b>Variance</b>	378,580
<b>C.V.(%)</b>	121,760

*Tableau X : Les paramètres descriptifs*

Ces résultats montrent que les profils stockés « en banque », caractéristiques des sols gypseux d'Algérie, présentent un profil moyen globalement assez bien pourvu en gypse. La valeur moyenne observée étant égale à environ 16%. Se référant aux normes proposées par Barzanji (1973) et F.A.O (1990), il ressort qu'il s'agit en réalité d'un profil à horizon fortement gypsifère.

Toutefois, cette description ne peut pas être représentative de l'ensemble des données, puisque la médiane indique que 50 % des horizons stockés, présentent des taux inférieures à 7,530 % de gypse.

Ce tableau fait apparaître également, que le taux de gypse évolue dans une gamme limitée par les valeurs extrêmes 0 et 96%. La minimale 0% marque la présence d'horizon dépourvue de gypse. La maximale 96% indique la présence d'horizons à très forte teneur en gypse.

Cet écart de valeurs nous donne un temps soit peu, un aperçu sur la très grande variabilité, d'ou l'hétérogénéité assez importante des taux de gypse de la banque de données. Une situation confirmée par les valeurs très élevées de la variance (378,580) et du coefficient de variation (121,760%).

### 2. 1. 1. 2. analyses des fréquences de distribution des taux de gypse

Le calcul des fréquences de distribution des taux de gypse pour l'ensemble des données a été réalisé sur la base du découpage en classes établi par Boyadgiev (1974, 1975) et Djili (2000). Le résultat est représenté dans le tableau XI.

Ce traitement fait apparaître que :

- 42,84% des horizons contiennent de très faibles teneurs (G1) en gypse,
- 20,66% des horizons contiennent de faibles teneurs (G2) en gypse,
- 12,67% des horizons contiennent des teneurs moyennes (G3) en gypse.
- 15,98% des horizons contiennent de fortes teneurs (G4) en gypse.
- 7,85% des horizons contiennent de très fortes teneurs (G5) en gypse.

Globalement, il ressort que les très faibles à faibles teneurs en gypse sont les plus répondues, avec 63,5% des données de la banque. Le pourcentage restant (36,5 %), représente la gamme des teneurs moyennes à très fortes teneurs.

En utilisant les normes établies par Barzanji (1973) et F.A.O (1990), il s'avère que les 63,5% représentent les horizons non gypsifère à modérément gypsifère (taux de gypse < 15%), et les 36,5% définissent les horizons fortement gypsifère ou gypsifère (taux de gypse ≥ 15%).

Tableau XI. Les fréquences de distribution des taux de gypse

<b>Classes (DJILI, 2000)</b>	<b>0-5 % (G1)</b>	<b>5-15 % (G2)</b>	<b>15-25 % (G3)</b>	<b>25-50 % (G4)</b>	<b>≥50 % (G5)</b>
<b>Horizons</b>	311	150	92	116	57
<b>Fréquences (%)</b>	42,84	20,66	12,67	15,98	7,85

Tableau XI. Les fréquences de distribution des taux de gypse

### 2. 1. 2. Caractérisation des autres variables

Le tableau XII, présente les résultats du traitement statistique descriptif relatif aux variables restantes, stockées dans la banque de données.

Il s'agit d'une représentation globale des gammes de variations des différentes variables considérées, grâce notamment aux paramètres de position (la moyenne et la médiane) et de dispersion (minimum, maximum, l'écart-type et le CV).

Paramètres	N actifs	Moy.	Méd.	Min.	Maxi.	Var	Ec-Type	CV (%)
A (%)	484	24,93	20	0	71,81	374,24	19,35	77,61
L (%)	515	26,41	27,47	0	79,9	332,32	18,23	69,03
S (%)	640	43,93	42	0	98	936,97	30,61	69,68
Calc.tot (%)	746	17,27	14,33	0	79	205,716	14,35	83,05
CEC (mé/100g)	404	15,16	13,6	1	48	113,98	10,68	70,41
ESP (%)	244	29,41	21,57	3,16	90,72	482,48	21,96	74,68
CE (dS/m)	754	14,22	7,81	0,5	138,2	281,39	16,77	117,93
pH	797	7,92	7,9	7	8,93	0,11	0,33	4,23
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mé/l)	488	95,93	40,75	0	1708,8	30944,64	175,91	183,36
Ca <sup>+</sup> (mé/l)	485	58,12	26,7	0,23	633,6	7493,55	86,56	148,93
Pluvio(mm)	904	187,72	148,2	13,4	450	17033,48	130,51	69,52

Tableau XII. Statistiques descriptives des autres variables

Si on tient compte de l'ordre de grandeur des coefficients de variation (CV), il ressort que tous les paramètres, sauf le pH, présentent des CV très élevés (> 60%) (Annexe IV). Ce qui dénote qu'en générale les variables de notre banque de données ont une dispersion assez marquée. En d'autres termes, elles sont caractérisées par une hétérogénéité assez importante.

De façon plus précise, et en considérant l'approche dissociative classique adoptée en science du sol, il ressort les différences notables suivantes :

- les paramètres liés à la constitution du sol, l'argile, le sable, le limon et le calcaire total sont caractérisés par une grande gamme de variation des taux (plus de 70% d'amplitude), allant jusqu'à composer l'essentielle de la matrice du sol, cas du sable (98%). Cette grande variabilité est confirmée par les écart-types d'estimation, dont les valeurs sont supérieures à 14.

Cette représentation grossière fait apparaître un enchevêtrement de données assez complexe, que l'on peut associer inévitablement à la dimension de l'espace d'étude et à la nature pédologique des grands ensembles y afférant (Cote, 1983; Mediouni, 1997).

L'observation des médianes nous montre que la moitié de ces taux (50%) reste généralement inférieure à 45%.

- les paramètres physico-chimiques sont représentés d'une part, par les variables à grande gamme de variation ou à grande étendue :

- la capacité d'échange cationique, comprise dans l'intervalle [1-48 mé/100g], montre une variation des teneurs de très faible à très élevées (Chamayou et Legros, 1989),

- les taux d'ESP, compris dans l'intervalle [3,16% - 90,72%], traduisent une amplitude de plus de 80%. Sur la base de U.S.S.L. (1954), il est question de la variation d'horizons non sodiques vers des horizons excessivement sodiques (Annexe V),

- la conductivité électrique, représentée par l'intervalle [0,5 dS/m – 138,2 dS/m], correspond à la variation d'horizons non salés vers des horizons hyper salés (U.S.S.L., 1954).

- Et d'autre part, par le pH qui symbolise le paramètre le moins variable ou le plus homogène, en référence à l'intervalle d'étude qui est assez réduit [7 – 8,93].

Les écart-types d'estimation semble confirmer cet état de fait. La CEC, l'ESP, et la CE ont des valeurs supérieures à 10, alors que le pH présente une valeur de l'ordre de 0,33, représentant des données très groupées autour de la moyenne et même de la médiane.

- les éléments chimiques, représentés par les sulfates ( $\text{SO}_4^{--}$ ) et le calcium soluble ( $\text{Ca}^{++}$ ), principaux éléments constituants du gypse, sont caractérisés également par une très grande variation de leurs teneurs. Les limites extrêmes respectifs étant de [0-1708,8 mé/l] et [0-633,6 mé/l]. Une variabilité confirmée par les très importantes valeurs des écarts-types d'estimations (175,91 pour  $\text{SO}_4^{--}$  et 86,56 pour  $\text{Ca}^{++}$ ).

En se basant sur l'objectif et les différentes étapes de réalisation de la banque de données, il est possible de dire que cette grande variabilité repose en premier, sur l'effet des types de sols et de leurs richesses en ces éléments (Servant, 1975 ; Khademi et al., 1997), et en second, sur les différentes techniques de dosage de ces éléments (Swoboda et Thomas, 1965; Porta, 1996).

L'examen des valeurs médianes minimise grandement l'ampleur de ces étendues, puisque 50% des données stockées en banque présentent des taux inférieurs à 50mé/l. Une disponibilité qui est perçue comme faible à nulle (Servant, 1975).

- la pluviométrie, qui est le seul paramètre climatique pris en compte lors de la réalisation de la banque de données, ne semble pas déroger à la règle. Elle est caractérisée par une grande variation des hauteurs de pluie, correspondant au passage des régions sud (13,4mm), et l'étage bioclimatique saharien (< 100 mm) vers les régions nord (450mm), et l'étage bioclimatique semi-aride (300-600mm) (Le Houérou et al., 1977; Le Houérou, 1975,1979; Nedjraoui, 2001), d'où une amplitude de près de 436,5mm. Cette grande variabilité est confirmée par la valeur de l'écart-type d'estimations (130,51).

A partir de la médiane (148,2mm) il est possible d'indiquer que la moitié des profils d'étude se localise dans l'étage bioclimatique aride.

### **2. 1. 3. les relations entre les taux de gypse et les autres variables**

Dans cette approche il est question de rechercher les relations statistiques susceptibles d'exister entre les taux de gypse et quelques variables analytiques pour les données globales.

Les traitements ont été réalisés sur la base des régressions simples et des régressions multiples.

#### **2. 1. 3. 1. Les régressions simples pour l'approche globale**

Nous avons étudiés les régressions simples entre les taux de gypse et onze (11) variables ; dix (10) pédologiques, il s'agit de l'argile, du limon, du sable, du calcaire total, de la capacité d'échange cationique, du pourcentage de sodium échangeable, du pH, de la conductivité électrique, et enfin des sels solubles ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ), et une (01) climatique, il est question de la hauteur des pluies.

Ce traitement est réalisé sur la base d'un choix entre deux ajustements graphiques : l'ajustement linéaire et l'ajustement curvilinéaire.

Dans la présentation des résultats nous n'avons pris en compte que le meilleur ajustement.

##### **2. 1. 3. 1. 1. Gypse - Argile**

La relation entre les taux de gypse et les taux d'argile pour les différents profils de la banque de données est illustrée par la figure 8. Le traitement est réalisé sur la base de 393 couples de données.

L'examen de la représentation graphique de ces données (fig. 8) fait ressortir un nuage de points respectant le rapport 100/100 (ce rapport signifie que dans 100g de terre si on a une dominance d'argile il ne peut pas y avoir du gypse et le contraire est juste). L'allure du nuage s'identifie par un aspect plus ou moins dispersé, principalement au-dessus de la barre des 5% de taux de gypse. D'un autre côté, le regroupement et le positionnement des points le long de l'axe des abscisses, nous renseigne grandement sur l'importante variabilité des taux d'argile avec la prédominance des très faibles taux de gypse, identifiés par la classe 0-5%.

De façon plus pragmatique, le nuage de point suggère que :

- Les fortes à très fortes teneurs en gypse (>25%) se situent seulement dans la tranche des taux d'argile compris entre 0 et 20% ;
- Les faibles à très faibles taux de gypse (<15%) et à un degré moindre les teneurs moyennes (15-25%) peuvent être associées à n'importe quelle teneur en argile (la gamme varie de 0 à 72%).

En somme, la dispersion des points ne semble correspondre à aucune forme linéaire pouvant être aperçue visuellement, nous pouvons donc supposer l'existence d'une relation non linéaire entre les deux variables.

Cette hypothèse est confirmée par la technique de l'ajustement du model graphique. L'ajustement du nuage de points par une droite n'ayant pas aboutit (le coefficient de corrélation obtenu étant non significatif), il ressort que son remplacement par une courbe (ajustement polynomial du second degré), semble être plus approprié, puisque le coefficient de corrélation obtenu est négatif et très hautement significatif ( $r_{obs} > r_{cri}$ , pour un ddl égale à 390) (voir Annexe VI).

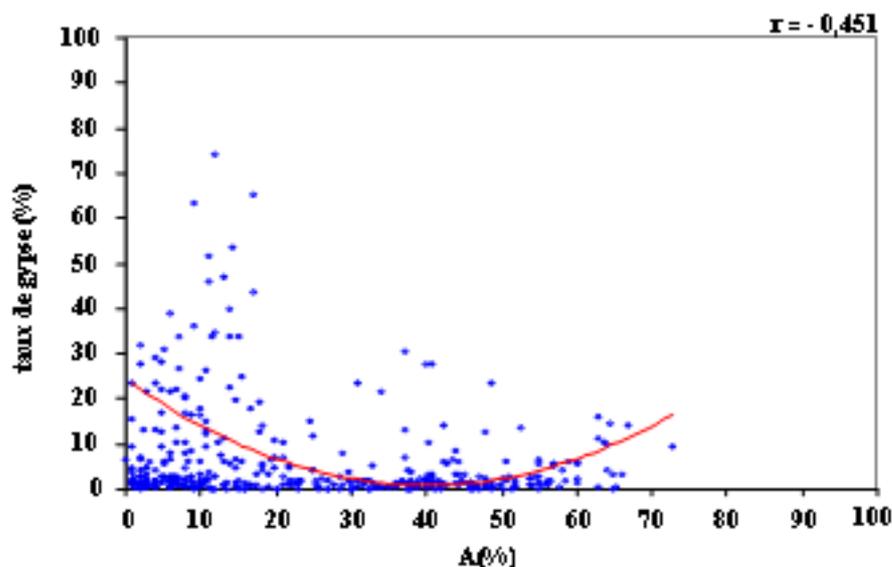


Figure8 : Relation curvilinéaire gypse-argile

L'ajustement polynomiale se présente en cloche renversée, avec deux phases :

- une première phase, où l'on observe une diminution progressive des taux de gypse, passant de 23,37 % à 0,88 %, en même temps qu'une augmentation des taux d'argile, allant de 0 jusqu'à environ 39,11%,
- une seconde phase, au-delà de 39,11 % d'argile et 0,88% de gypse, où la tendance cinétique s'inverse comparativement à la phase initiale. C'est-à-dire, que plus les taux d'argile augmentent et plus les taux de gypse augmentent, jusqu' au seuil respectif de 71,81% et 16,59%.

L'équation de la courbe se présente comme suite :

$$[y = 0,014 x^2 - 1,150 x + 23,370]$$

Il est connu que les argiles, de part leur importance, confèrent au sol sa structure et ses propriétés mécaniques. Ils permettent, en s'associant à différents composants dans le sol, de constituer les complexes argilo-humiques (ou organo-minéral) (Gensac, 1969; Duchaufour, 1988). Alors que le gypse est plus connu par son aspect envahissant (Halitim et Robert, 1987; Halitim, 1988) et modificateur, de la texture en premier et par la suite des propriétés du sol (Kulke, 1974; Vieillefon, 1979). Son action se traduit en finalité par la désintégration et la dilution du matériau pédologique. On peut considérer donc qu'il est question de deux éléments en totale opposition.

En étudiant l'association « gypse – argile », différents auteurs (Dekkiche, 1974; Halitim, 1988; Poch, 1992; Abdesselam, 1999; Djili, 2000; Berkal, 2006) estiment qu'il y a effectivement une tendance générale à la diminution des taux de gypse quand les taux d'argile augmentent. Sans omettre de signaler que la présence et l'abondance du gypse dans le sol peuvent être considérées comme des caractéristiques des sols dont la texture est dominée par la fraction grossière.

Il est à noter que ces résultats concernent des zones où la formation du gypse et la genèse des ces accumulations sont régies d'une part, par un climat très évaporant (aride ou désertique), et où le déficit hydrique est important (Djili, 2000), d'autre part, par la présence soit d'une nappe peu profonde fortement minéralisée, soit par un apport hydrique ou éolien (Halitim, 1988; Poch, 1992). Dans notre approche, l'allure de la courbe de tendance nous indique une situation beaucoup plus complexe. En effet, elle nous montre une liaison avec deux phases :

- la première phase correspond à une relation négative, donc inversement proportionnelle. En tenant compte de la configuration des points, du seuil limite de l'argile et des taux de gypse impliqués, il est possible que cette phase soit en bon accord avec l'idée développée par les auteurs cités plus haut.

Une hypothèse qui doit être prise sous réserve, puisque la proportion des autres constituants reste à définir (limon et sable). Une appréhension confirmée par le calcul fait sur la base de l'équation de la courbe de notre graphique, puisqu'à 0% d'argile le gypse se présente avec un taux de 23,37% seulement.

- la seconde phase où l'accroissement des taux des deux variables est simultané, semble définir une situation assez originale. La distribution du gypse en fonction d'une texture fine à très fine (argileuse à très argileuse) ne semble pas être une situation à exclure. Un scénario auquel Dekkiche (1974), Abdesselam (1999) et Djili (2000) ont fait allusion dans leurs études.

Généralement, le gypse en envahissant le matériel pédologique commence par remplir graduellement la matrice et puis les vides structuraux, et avec les phénomènes de croissance cristalline, il provoque une désintégration et une dilution du matériau d'accueil (Guyot et al., 1984; Delmas et al., 1985; Halitim et Robert, 1987 ), d'où l'évacuation des particules fines à moyennement fines du profil.

L'allure assez évolutive qu'a prise la deuxième phase de la courbe de tendance semble ne pas adhérer à cette logique, Ceci nous amène à émettre une multitude d'hypothèses pouvant aider à comprendre ce phénomène :

- des prélèvements ou des échantillonnages réalisés dans des sols où les dépôts se sont faits en strates,
- des points d'analyses caractéristiques :
- des sols argileux où l'apport du gypse s'est fait par un phénomène de redistribution très modéré « processus de dissolution et cristallisation » (Riché, 1976; Boyadgiev et Sayegh, 1992),

des sols argileux très riches en calcaire, ayant subi l'action d'une solution fortement minéralisée (Halitim, 1988; Boyadgiev et Sayegh, 1992; Abdesselam, 1999),

des sols de zones basses de colluvions ou d'alluvions stratifiés (cônes de déjections) ou bien de zones à forte anthropisation (cas des oasis) (Riché, 1976; Vinas, 1980),

des sols de régions à climat chaud, où les conditions de drainage ne sont pas favorables (faibles perméabilités, texture assez lourde), c'est-à-dire des milieux confinés. Ces derniers peuvent être favorables à la formation et/ou à la précipitation du gypse, et à la synthèse ou la néoformation des argiles, respectivement les smectites (à partir de l'altération de roches basiques) ou les argileux fibreux (la sépiolite et l'attapulгите ou palygorskite) (Beauchamps, 2006). Généralement, ce sont des sols qui présentent des solutions à faciès sulfaté-calcique dominant, avec la présence de faciès secondaire sulfaté - magnésique ou sodique,

des sols de régions à climat chaud et humide, dont le cortège minéralogique d'origine est conditionné par les feldspaths plagioclases (riche en calcium) et la pyrite (riche en soufre). Cette association peut favoriser respectivement la néoformation des argiles et la formation et/ou la précipitation du gypse (Duchaufour, 1988),

des sols de milieux évaporitiques sursalés (bassin lacustre), où il est possible d'observer, d'une part la formation et la précipitation du gypse, d'autre part la néoformation des argiles sous forme d'argiles fibreuses (l'attapulгите ou paligorskite) (Lee et al, 1983; Hamdi-Aissa et al, 1998; Legros, 2007 ).

Par ailleurs, il n'est pas à écarter que ces résultats traduisent en partie des erreurs ou des imprécisions dans les mesures.

### **2. 1. 3. 1. 2. Gypse – Limon**

Réalisée sur la base de 417 couples de données, la relation entre les taux de gypse et les teneurs en limon des échantillons de sol montre un nuage de points plus ou moins important, assez lâche, mais respectant le rapport 100/100 (fig. 9).

Globalement, l'allure du nuage de points semble traduire une tendance générale à la diminution des taux de gypse quand les taux de limon augmentent. Cependant, l'observation attentive de la dispersion des points laisse apparaître que :

- Les plus importantes teneurs en gypse sont observées pour des taux de limon variant dans les gammes 0-10% et 30-60%. C'est aussi dans ces deux gammes que se concentre la majorité des très faibles teneurs en gypse (0-5%),

- Les faibles taux de gypse (5-15%), les teneurs moyennes (15-25%) et à un degré moindre les fortes teneurs (avec une gamme restreinte variant entre 25 et 35%) peuvent être associés à n'importe quelle teneur en limon ( 0-60%).

De ce fait, on peut dire que l'élément gypse peut être associé à n'importe quelle teneur en limon dans le sol.

L'utilisation de la technique d'ajustement graphique nous permet d'apprécier la tendance qu'épouse en réalité le nuage de points et la complexité de cette association. Assimilé en premier lieu à une variation linéaire, le résultat n'a pas été concluant. Nous avons tenté par la suite un ajustement en courbe. Ce dernier (ajustement polynomial du second degré) a été meilleur, puisque le coefficient de corrélation obtenu est négatif et très hautement significatif ( $r = -0,468$ , ddl = 414).

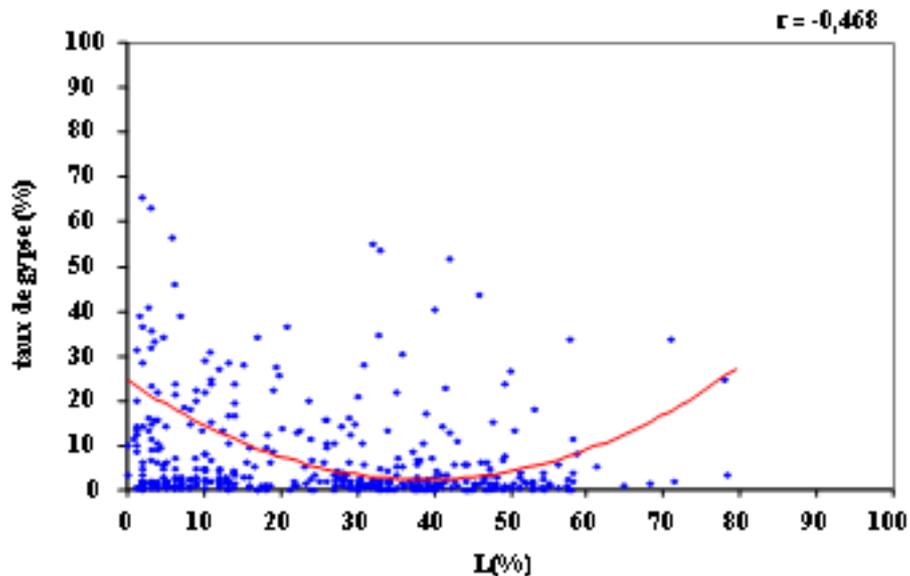


Figure9 : Relation curvilinéaire gypse-limon

L'ajustement polynomial se présente sous forme de cloche renversée avec deux phases :

- une première phase, où l'on observe une diminution progressive des taux de gypse, allant de 24,47% à 0,9%, pour une augmentation des taux de limon variant de 0% à 41,037%,
- une seconde phase, au-delà de 41,037 % de limon et 0,9 % de gypse, que nous présenterons comme une phase d'accroissement. Une phase où plus les taux de limon augmentent et plus les teneurs en gypse augmentent. Le seuil limite correspondra à des taux respectifs, de 71,81% et 16,59%.

L'équation de la courbe s'écrit comme suit :

$$[y = 0,014 x^2 - 1,149 x + 24,475]$$

Tout comme pour la relation gypse - argile, on est en présence d'une interaction bien particulière. Elle est représentée par l'illustration ci-dessus (fig.9), avec deux phases différentes.

Etant la fraction intermédiaire entre les argiles et les sables, avec un aspect fin à moyennement fin (Coudé-Gaussen et al.,1983; Coude-Gaussen et al.,2007), et en partant du fait que la pression née de la mécanique de cristallisation et de mouvement du gypse induit une élimination des particules fines du profil (Guyot et al., 1984; Delmas et al., 1985; Halitim et Robert, 1987). Il est possible de dire que la relation inversement proportionnelle observée dans la première phase tend à reproduire une logique « d'asocialité » entre les deux paramètres.

Cet état de fait peut être jugé cohérent du moment que la présence et l'abondance du gypse dans le sol sont citées comme des caractéristiques des sols dont la texture est dominée par la fraction grossière (Dekkiche, 1974; Pouget, 1980; Halitim, 1988; Abdesselam, 1999; Djili, 2000; Berkal, 2006).

Comparativement à la première phase, la seconde partie du graphique s'identifie par une situation totalement opposée, symbolisant un accroissement simultané des taux des deux variables. Cette phase dénote, d'un autre côté, que le gypse peut être observé avec un taux élevé, dans un matériau encaissant de texture limoneuse. Seulement, cette dernière ne peut être que de nature grossière (fraction cernée entre 20 et 50 $\mu$ m) (F.A.O, 1990).

D'un point de vue pédo-paysagique, Ali et West (1983), Coudé-Gaussen et al. (1983) et Lédée (1998) assimilent ce phénomène de reprise à des échantillons de sols caractérisés par les limons " loess iques" enrichis en gypse. Une forme de sédimentation (qu'on peut avoir sous forme de strates) qui est générée par les apports hydro-éoliens au niveau des plateaux et/ou des buttes (Svasek et Tewindt ,1974; Pye , 1980).

### 2. 1. 3. 1. 3. Gypse – Sable

Cette relation obtenue sur un nombre de couples de données égales à 483, fait ressortir un nuage de points plus ou moins important et dispersé. En réalité, il se présente sous forme d'un triangle rectangle, étiré vers la droite par rapport à l'axe des abscisses, mais en respectant le rapport 100/100 (fig.10).

Dans l'ensemble, l'allure de ce nuage indique une tendance à la diminution des taux de gypse quand il y a un accroissement des taux de sable. Néanmoins, l'examen en détail de la dispersion des points nous permet de noter ce qui suit :

- les plus importantes teneurs en gypse (> 50%) sont observées pour des taux de sable variant entre 10 et 50%,
- les teneurs moyennes (15-25%) et à un degré moindre les fortes teneurs (25-50%) en gypse sont caractéristiques des teneurs en sable allant de 10 à 80%,
- les faibles taux de gypse (5-15%) sont observés dans les gammes 0-20% et 40-90% de teneur en sable, alors que la majorité des très faibles teneurs en gypse (0-5%) se concentre dans les gammes 0-35% et 70-98% de teneur en sable.

Il est clair que la relation entre le gypse et le sable semble être plus ou moins complexe. L'ajustement du nuage de points par une courbe (ajustement polynomial du second degré) a été jugé plus approprié. Le coefficient de corrélation ainsi obtenu est négatif et très hautement significatif (robs = -0,317, ddl = 480).

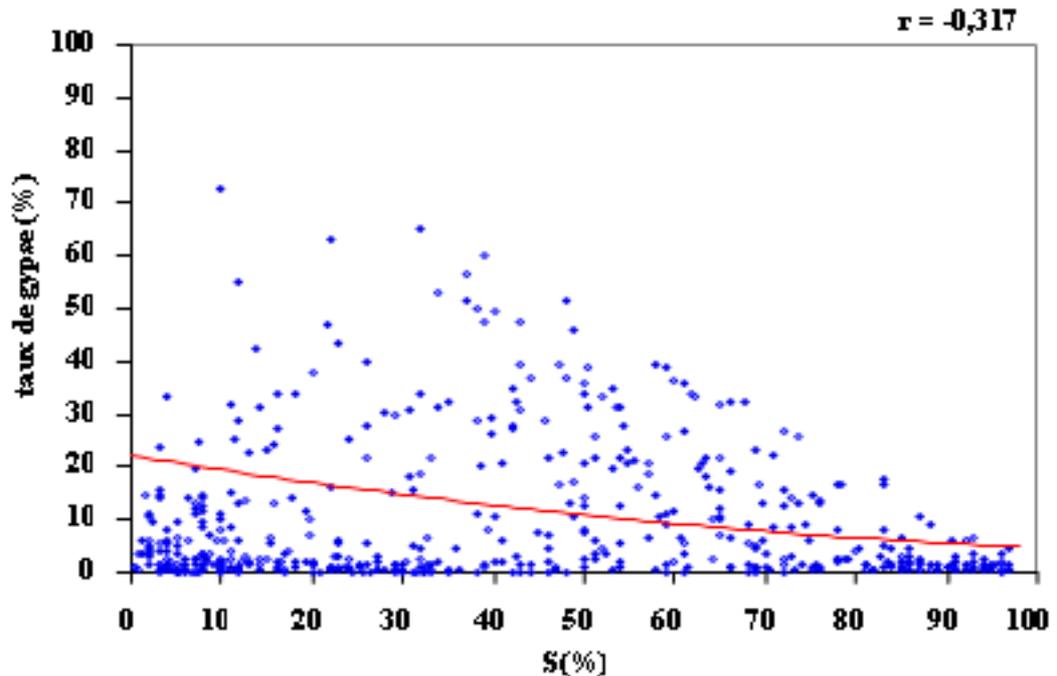


Figure 10 : Relation curvilinéaire gypse-sable

La courbe de tendance choisie (fig. 10) révèle une diminution progressive des taux de gypse quand le taux de sable augmente. En effet, les taux de gypse passent de 22,172% à des valeurs nulles (0%) en sable jusqu'à des taux d'environ 6 % de gypse pour 80% de sable. Au-delà de cette valeur du taux de sable, la liaison semble moins intense et le gypse se stabilise avec un taux d'environ 5%.

L'équation de la courbe s'écrit telle que suit :

$$[y = 0,001 x^2 - 0,278 x + 22,172]$$

De nombreux travaux ont mis en évidence la relation qui existe entre la texture sableuse et les taux et les formes de gypse dans le sol (Coque, 1962; Trichet, 1963; Stoops et Ilaiwi, 1981; Kadri et Gallali, 1990; Poch, 1992; Drake, 1997; Abdesselam, 1999). Les résultats obtenus indiquent une tendance à l'augmentation des taux et de l'importance des formes d'accumulation du gypse avec la prédominance de sable, principalement avec la fraction grossière.

Pour notre approche, nous avons considéré la texture sableuse dans son ensemble, sans dissocier la fraction fine de la grossière. Cela ne nous empêche pas de noter que la relation schématisée (fig.10) ne semble pas corroborer, ne serait-ce que pour le cas d'ensemble, les résultats énoncés dans la bibliographie (selon références ci-dessus). Il ressort que les taux de gypse diminuent progressivement en même temps qu'une augmentation des taux de sable.

Cette tendance régressive peut être expliquée par ce qui suit :

- il s'agit d'une mauvaise appréciation de la disponibilité du gypse (il peut être sous forme de gros cristaux) et une surévaluation du taux de sable.
- Le gypse qui est sous forme cristalline, formant ainsi le squelette des sols sableux, et par conséquent la fraction sableuse (Pouget, 1980; Halitim et Robert, 1987) n'a pas

été dosée sur la base d'une technique appropriée (spécifique au dosage du gypse). De ce fait, la mise en suspension de la totalité des particules de gypse ne peut pas être effective (Vieillefon, 1979; Porta, 1998).

- il s'agit de l'utilisation d'échantillons de sols sableux caractéristique des zones où la seule source d'apport de gypse est le recouvrement éolien (chargé en particules gypseuses) (Taiméh, 1992; Hamdi-Aissa et Fedoroff, 1996; Drake, 1997) de très faible intensité.

#### **2. 1. 3. 1. 4. Gypse - Calcaire total**

L'évaluation de l'intensité de la relation entre le taux de gypse et le taux de calcaire total est faite sur la base de 654 couples de données.

L'analyse de la représentation graphique (fig.11) fait ressortir un nuage de points très important et dispersé, présentant un allongement vers l'axe des ordonnées, mais en respectant le rapport 100/100. L'allure de ce nuage suggère une tendance à la diminution du taux de gypse quand le taux de calcaire total augmente. La dispersion et la disposition des points semblent confirmer cette tendance :

- les plus fortes valeurs de gypse coïncident avec les taux de calcaire inférieur à 20%.
- la majorité des faibles à très faibles taux de gypse (<15%) et les taux moyens de gypse ( 15 - 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.

En appliquant la technique de l'ajustement du modèle graphique, il semble que le résultat obtenu confirme les observations citées plus haut. L'application d'une droite (ajustement du 1er degré), comparativement à un ajustement par une courbe, est plus cohérent, donnant lieu à un coefficient de corrélation négatif et très hautement significatif ( $r = -0,339$ ,  $ddl = 652$ ).

Cette courbe de tendance révèle une diminution brutale des taux de gypse quand le taux de calcaire total augmente. Le taux de gypse chute de 24,065% à valeur nulle (0%) en calcaire total, jusqu'à 0 % de gypse pour 50,345% de calcaire total. Au-delà de ces deux valeurs la liaison entre les deux variables devient très faible à nulle.

L'équation de la relation s'écrit comme suit

$$[y = -0,478 x + 24,065]$$

La coexistence du gypse avec le calcaire total dans le sol à fait l'objet de nombreuses observations (Durand, 1963; Pouget, 1968; Gaddas, 1971; Boyadgiev, 1974; Halitim, 1988; Podwojewski et Petard, 1996; Abdesselam, 1999; Djili, 2000; Berkal, 2006). Dans

$$[y = -0,478 x + 24,065]$$

La coexistence du gypse avec le calcaire total dans le sol à fait l'objet de nombreuses observations (Durand, 1963; Pouget, 1968; Gaddas, 1971; Boyadgiev, 1974; Halitim, 1988; Podwojewski et Petard, 1996; Abdesselam, 1999; Djili, 2000; Berkal, 2006). Dans

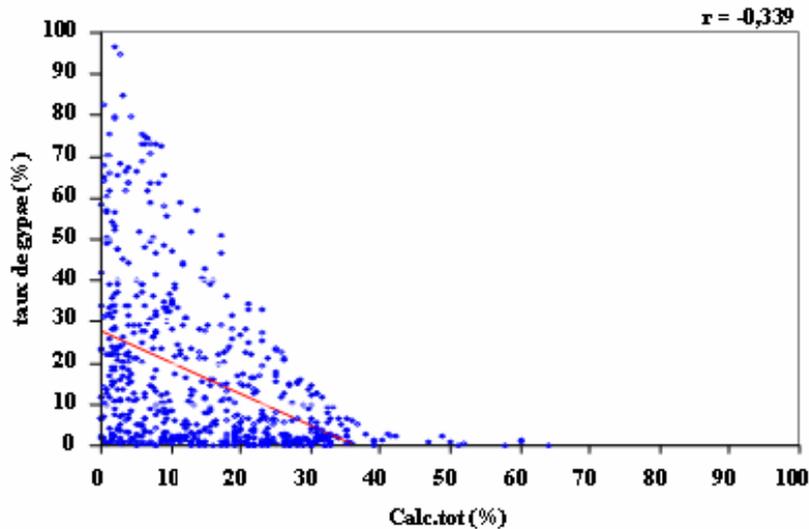


Figure 11: Relation linéaire gypse-calcaire total

l'ensemble, les résultats obtenus font apparaître que l'augmentation du premier paramètre s'accompagne, forcément, par la diminution du second et vice-versa.

Pour notre traitement, il semble que le résultat obtenu ne déroge pas à la règle. La relation entre les deux variables d'étude a été identifiée, en effet, comme inversement proportionnelle.

Selon Baci (1984) et la F.A.O (1990), cette tendance relationnelle est due à la différence dans leur degré de solubilité, sensiblement régi par le système " effet ions communs – effet concentration ionique". Boyadgiev (1974) semble confirmer cet aspect réactionnel, tout en insistant sur l'influence de la morphologie de dépôt, propre à chaque élément. La relation peut être plus prononcée si les deux sels sont sous forme de poudre.

Alors que Halitim et Robert (1987), Halitim (1988) et Djili (2000) estiment, pour leur part, que la proportionnalité et la disponibilité de l'un par rapport à l'autre restent conditionné par la nature du milieu d'accueil ou du milieu encaissant et le principe ou le mécanisme de formation. De là, découle ce qui suit :

- la présence du second (calcaire) peut favoriser la formation et l'accumulation du premier (gypse). Il s'agit du cas où l'on a une dilution du matériau d'accueil ; solubilisation ou dissolution du calcaire, avec comme résultat la libération du Ca<sup>++</sup>. Ce dernier rentre directement dans la formation du gypse.
- Pour ce faire, le calcaire doit être sous sa forme cristalline, c'est-à-dire la calcite (Halitim et Robert, 1987; B.R.M., 1998, 2006)
- la présence et l'accumulation du premier (gypse) peut bloquer et détruire la formation et/ou l'évolution du second (calcaire). Il s'agit du cas où on a un envahissement des accumulations calcaires par le gypse. Ce processus se traduit par une désintégration et une dilution du « niveau » calcaire.

Le principe est que la pression que produit la cristallisation du gypse détruit et bloque l'évolution des individualisations calcaires, par suite de l'arrivée continue de solutions à faciès sulfaté - calcique.

### 2. 1. 3. 1. 5. Gypse - Capacité d'échange cationique

L'étude de l'évolution des taux de gypse en fonction de la variation des valeurs de la capacité d'échange cationique est réalisée sur la base de 357 couples de données.

L'examen de la représentation graphique de ces données, sur la figure 12, fait ressortir un nuage de points très dispersé, principalement au-dessus de la barre des 5% de taux de gypse. Alors qu'en dessous de ce seuil, il dessine un resserrement le long de l'axe des abscisses. Globalement, l'allure de ce nuage semble montrer une diminution du taux de gypse quand la valeur de la CEC augmente.

L'analyse de la dispersion et de la disposition des points ne semble pas confirmer cette tendance relationnelle :

- les plus importantes teneurs ainsi que la majorité des faibles teneurs en gypse (5-15%) sont observées dans la gamme des faibles valeurs de la CEC (< 15 mé/100g),
- les très faibles taux de gypse (< 5%) et les teneurs moyennes en gypse (15-25%) peuvent être associés à n'importe quelle valeur de la CEC ; la gamme varie de 1 à 50mé/100g.

En appliquant la technique d'ajustement graphique en vue de déterminer la forme du modèle le plus représentatif, il se trouve que c'est l'ajustement par une droite (ajustement du 1er degré) et non l'ajustement par une courbe (ajustement polynomial au second degré), qui est le plus approprié. De ce fait, la relation entre les deux variables est réellement de tendance inversement proportionnelle. Le coefficient de corrélation représentatif est négatif et très hautement significative ( $r = -0,189$ ,  $ddl = 355$ ).

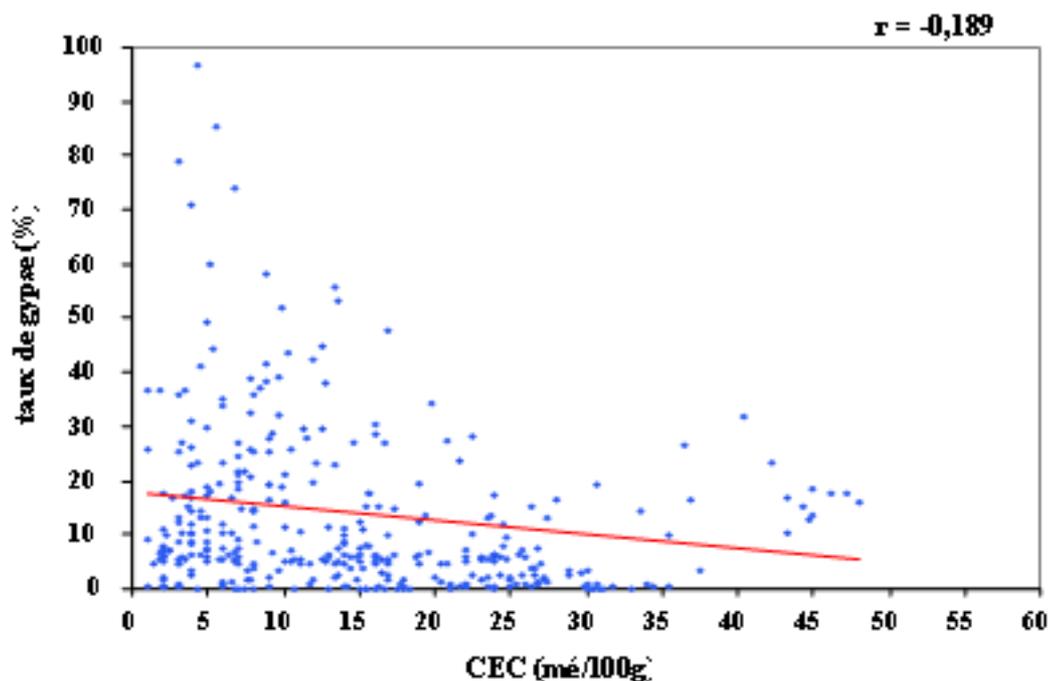


Figure 12: Relation linéaire gypse – CEC

Cette courbe de tendance suggère une diminution des taux de gypse quand les valeurs de la CEC augmentent. Le taux de gypse passe de 12,820 % pour une valeur égale à 1 mé/100g de la CEC à un taux nulle (0 %) de gypse pour une CEC égale à 50 mé/100g. Au-delà de ces valeurs la liaison entre les deux variables devient très faible à nulle.

L'équation de la relation se présente sous la forme suivante :

$$[y = -0,265 x + 14,200]$$

Dans les sols gypseux, il est souvent fait référence à de faibles valeurs de la CEC (Poch, 1992; Boyadgiev et Verheye, 1996; Abdesselam, 1999). Cette situation est généralement assimilée aux faibles à très faibles teneurs en matière organique (F.A.O., 1990) et en argile (hormis les milieux où le matériel parental en est la source) (Poch, 1992), qui caractérisent ces types de sols.

D'après Frenkel et al.(1986), c'est plutôt l'accroissement des particules gypseuses qui interfère sensiblement dans la fonctionnalité de la CEC.

Les travaux réalisés sur l'association gypse-CEC (Barzanji ,1973; Dekkiche,1974; Porta, 1975; Polemio et Rhoades, 1977; Sayegh et al., 1978; Ilaiwi, 1983; Poch, 1992 ; Boyadgiev et Verheye, 1996) confirment cette état de fait. Il est observé que le taux de gypse est toujours inversement corrélé avec la valeur de la capacité d'échange cationique (CEC).

En se rapportant à notre approche d'étude, il est clair que les résultats atteints concordent, en grande partie avec ce qui a été observé par les différents auteurs.

Pour expliquer ce type de relation, nous pouvons émettre trois types de suppositions ; les deux premières sont liées à la nature structurale du gypse et la troisième est d'ordre expérimental :

- l'inexistence de charges négatives sur le gypse et aux dimensions non colloïdales de ses particules (Mousli, 1981; Boyadgiev et Verheye,1996),
- l'effet stérique en conséquence de la faible surface spécifique des particules gypseuses (Sayegh et al., 1978; Abdesselam, 1999),
- une mauvaise appréciation du taux de gypse dans les échantillons de sols. Les méthodes traditionnelles d'analyses utilisées pour la caractérisation des cations échangeables et des sels solubles sont souvent inadaptées aux sols riches en sels solubles et /ou en sels cristallisés (gypse, calcite...) car elles ne permettent pas de faire la distinction entre elles (Thomas, 1982; Podwojewski et Petard, 1996).

### 2. 1. 3. 1. 6. Gypse - ESP

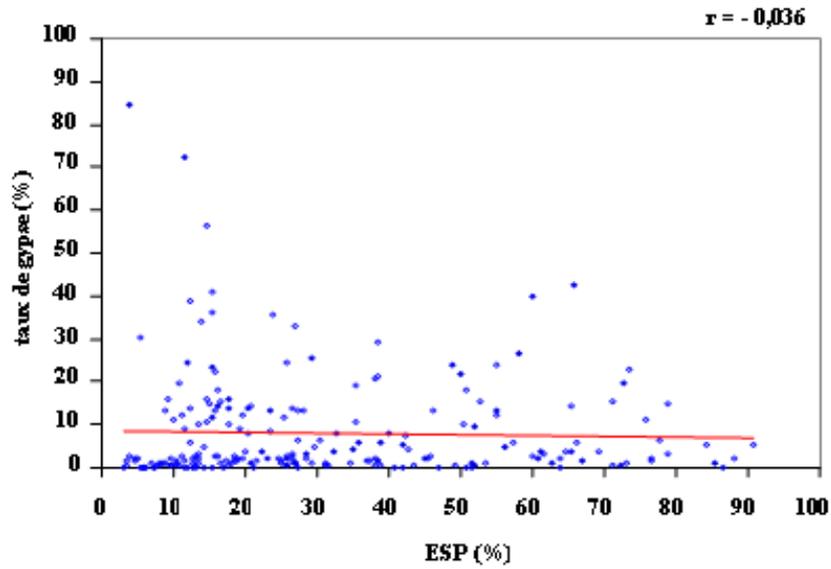
Calculée pour 212 couples de données, cette relation est illustrée par la figure 13.

La représentation graphique de ces données (fig.13) montre un nuage de points pas très important et très dispersé. Un nuage qui semble s'apparenter à une distribution aléatoire, où il n'y a ni augmentation ni diminution d'une variable en fonction de l'autre. Néanmoins, il est possible d'en extraire les observations suivantes :

- une légère tendance au regroupement et au resserrement des points le long de l'axe des abscisses pour la portion cernée entre les valeurs d'ESP de 10 à 40% et

la gamme des faibles taux de gypse (0-5%), les valeurs moyennes (15-25%) et les valeurs importantes du gypse (>25%).

- les profils à caractère sodique concernés par cette relation s'identifient par une très grande variabilité des taux d'ESP.
- L'application du meilleur ajustement graphique confirme l'absence de liaison entre ces deux variables. L'ajustement par une droite révèle que la relation est non significative ( $r = -0,036$ ,  $ddl = 210$ ).



L'équation caractéristique de la relation s'écrit sous la forme suivante :

$$[y = -0,019 x + 8,790]$$

Figure 13: Relation linéaire gypse – ESP

En se référant à la classification établie par USSL (1954), on peut noter que les données relatives au gypse caractérisées par ce traitement s'identifient comme des profils sodiques à excessivement sodiques (Annexe V).

Il est à souligner que dans le contexte algérien, la sodisation est généralement liée à la salinité des sols (Durand, 1954; Djili, 2000). Le sodium du complexe absorbant proviendrait essentiellement des chlorures de sodium en solution. Ce dernier, étant un sel très soluble, la formation du profil sodique reposerait donc sur la dynamique de ce sel (Djili, 2000; Touaf, 2002; Saidi et al., 2004).

Selon Pouget (1968), la présence et l'observation du gypse dans ce type de profils, peuvent être considérées comme une situation originale et complexe. L'étude réalisée par Servant (1975) confirme cet état de fait ; il s'agit de l'aboutissement de processus réactionnels reposant sur l'interaction des sels en solutions (chlorures, sulfates et (bi)carbonates) et des conditions de milieu favorables. Expérimentalement, il est obtenu ce qui suit :

- un sol fortement salé, à faible valeur du rapport  $Cl/ SO_4$  ; il est question d'une solution d'un sol riche en ions sulfates,
- présence d'une source d'apport en  $Ca^{++}$ , pour l'échange  $Cl^- - Ca^{++}$ ,

- un pH alcalin, n'excédant pas 8,5 à 8,8.

Dans l'influence du type de salure, il est utile de rappeler que les observations faites par la BRM (1998, 2006) semblent appuyer les hypothèses émises par Servant (1975). Il est fréquemment observé sous l'horizon natrique (horizon diagnostique) une couche de sol affectée par des chlorures, sulfates ou (bi)carbonates.

D'un autre côté, la présence du sodium à des teneurs très faibles peut stimuler (présente un effet inverse) la cristallisation du gypse néoformé (issue du phénomène de dissolution) (Watson, 1985).

### **2. 1. 3. 1. 7. Gypse - Conductivité électrique**

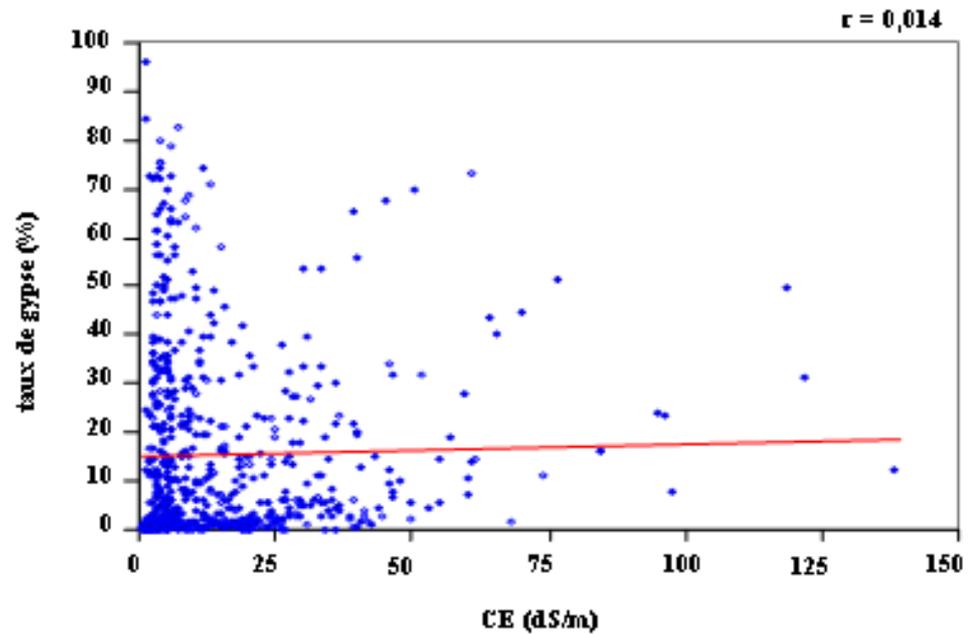
Déterminé sur un nombre de couples de données égales à 663, la variation du taux de gypse en fonction de la conductivité est illustrée par la figure 14.

La projection caractéristique met en évidence un nuage de points importants et dispersés. Toutefois, l'aspect de la distribution des points nous permet de considérer ce qui suit :

- la majorité des taux de gypse, avec une prédominance pour la gamme des faibles à très faibles taux de gypse, s'associent à des valeurs de la CE inférieures à 25dS/m.
- à partir de 25dS/m et jusqu'à 35 dS/m, la relation est moins importante, la représentation des points s'étire un peu.
- au-delà de 35 dS/m, la relation est très faible, par rapport aux deux précédentes tranches. De plus, les points sont disparates et très dispersés.

Dans l'ensemble, on peut dire que le nuage de points semble dessiner une légère tendance à la diminution des taux de gypse quand les valeurs de la CE augmentent.

L'ajustement graphique le plus représentatif ne semble pas conforter cette tendance relationnelle. L'ajustement linéaire et la droite y afférente révèle que la relation est non significative ( $r=0,014$ ,  $ddl = 661$ ).



**Figure 14: Relation linéaire gypse-CE**

L'équation de la relation s'écrit sous la forme suivante :

$$[y = 0,015 x + 15,204]$$

*Figure 14: Relation linéaire gypse-CE*

Comparativement aux différents travaux réalisés jusqu'à présent (Pouget, 1968 ; Halitim, 1988; Kadri et Gallali, 1990; Chauhuan, 1992; Abdesselam, 1999), il ressort que dans notre approche d'étude cette interaction ne reproduit pas le même schéma ou résultat, c'est-à-dire une diminution du taux de gypse proportionnelle à une augmentation de la valeur de la conductivité électrique.

Néanmoins, cette tendance relationnelle (non significative) nous permet de synthétiser ce qui suit :

- ce sont des échantillons de solution de sols présentant de faibles taux de sels solubles « n'ayant pas d'ions communs », pouvant interférer dans la précipitation et la formation du gypse (Lagerwerff et al., 1965; Frenkel et al., 1986),
- il s'agit d'échantillons de solution de sols dont le type de salure est de faciès sulfaté (soit calcique, soit magnésique ou bien sodique) (Pouget, 1968; Dekkiche, 1974; Abdesselam, 1999). Pour Hachicha (1997) et Rouahna (2007) cela est représentatif de zones où la salure des sols est liée aux caractéristiques des nappes et à leur variabilité.
- La conductivité d'un extrait de sol ne représente que très partiellement la salinité de ce sol, négligeant ainsi le comportement des minéraux dans une solution ionique, et par conséquent l'activité de ces ions (Droubi et al., 1976; Le Brusq et Loyer, 1982).

### 2. 1. 3. 1. 8. Gypse - pH :

La relation entre les taux de gypse et le pH des profils de la banque de données est obtenue sur la base de 699 couples de données.

La distribution des points représentée sur la figure 15, donne lieu à un nuage très important et très dispersé, n'indiquant aucune tendance selon la variation des deux paramètres. En revanche, il nous permet d'observer que quelle que soit la teneur en gypse des sols, même à des taux très faibles, on a un pH cerné entre 7 et 9, avec une gamme préférentielle allant de 7,5 à 8,4.

Il est utile d'indiquer que cette gamme a été identifiée par Boyadgiev et Verheye (1996) comme référentielle aux sols gypseux (faiblement à modérément alcalins).

L'ajustement graphique le plus représentatif confirme l'absence de lien entre les taux de gypse et le pH, le coefficient de corrélation obtenu ( $r = 0,028$ ) est non significatif pour un ddl de 697

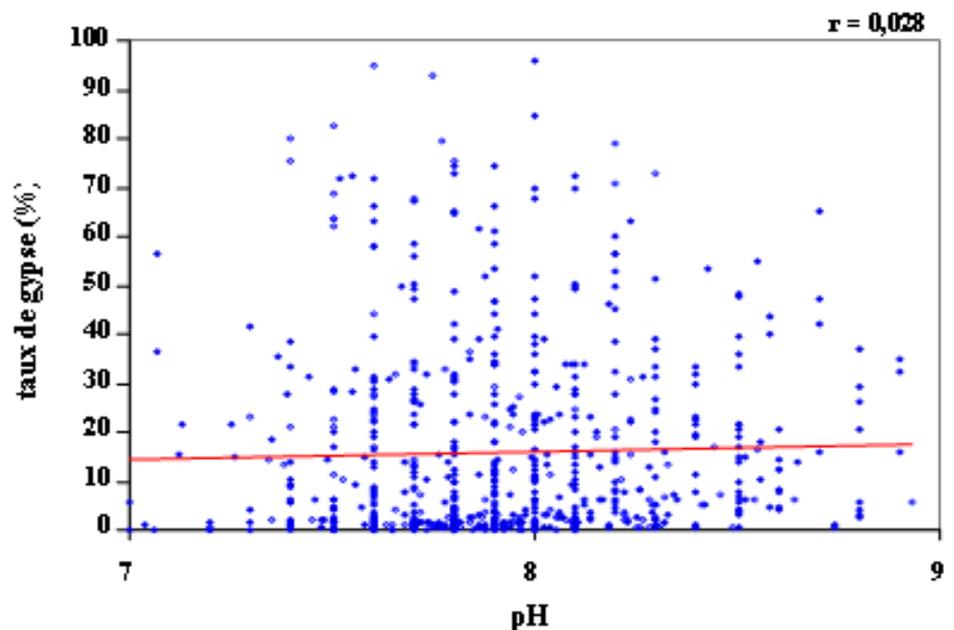


Figure 15: Relation linéaire gypse-pH

L'équation de la relation s'écrit sous la forme suivante :

$$[y = 1,622 x + 3,175]$$

Figure 15: Relation linéaire gypse-pH

En comparant nos résultats d'étude avec ceux présentés par Jafazadeh et Burnham (1992), Boyadgiev et Verheye (1996) et Djili (2000), il est noté une grande concordance. En effet, il ressort clairement que le pH du sol ne présente aucune influence sur la variation des taux de gypse.

En réalité, dans le système des sols gypseux, le pH ne semble jouer que le rôle d'indicateur de la nature « du milieu d'accueil » (Carter et Inskeep, 1988). Il est « le paramètre indicateur » directement conditionné par l'effet du taux des autres sels solubles présents en solution (Jafazadeh et Burnham, 1992), et en particulier du calcaire résiduel (Harden et al., 1991; Djili, 2000). Ces éléments mêmes, qui sont considérés comme les vrais régulateurs de ce système (Watson, 1992).

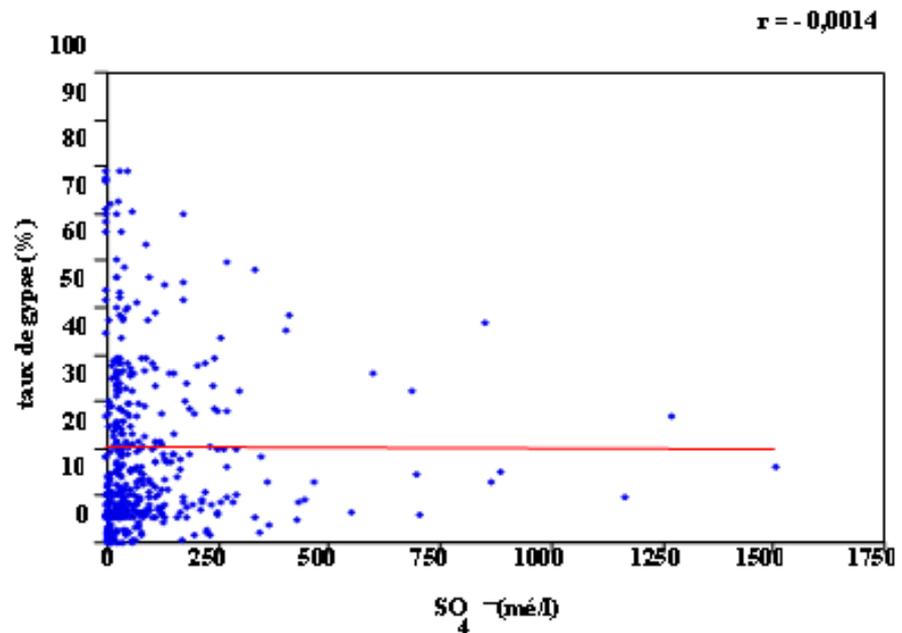
Pour Artieda et Herrero (1996), le pH ne devient déterminant sur la solubilité du gypse, qu'avec l'attachement des ions  $H^+$  sur les anions  $SO_4^{--}$  et la formation de  $HSO_4^-$ . Ceci correspond à des conditions où la précipitation est moins complète en comparaison à un pH neutre ou alcalin (Pouget, 1968). Une situation qui ne peut pas être effective dans les sols gypseux, car leur pH est toujours supérieur à 7.

### **2. 1. 3. 1. 9. Gypse - Sulfates ( $SO_4^{--}$ - en mé/l) de la solution du sol**

L'étude du degré de liaison entre ces deux paramètres est réalisée sur 493 couples de données. Le résultat est représenté par la figure 16.

La représentation graphique des données montre un nuage de points plus ou moins importants et dispersés. En tenant compte de l'aspect de la distribution des points il est visible que la majorité des données d'étude coïncident avec un taux de sulfates ( $SO_4^{--}$  en mé/l) inférieur à 250mé/l.

Globalement, l'allure du nuage ne nous permet pas d'en déduire une tendance particulière. Une situation confirmée par l'ajustement graphique le plus adéquat, la relation étant non significative (le coefficient de corrélation est égal à -0,0014 pour un ddl de 491).



L'équation de la relation s'écrit sous la forme suivante :

$$[y = -0,0005 x + 15,824]$$

Figure 16: Relation linéaire gypse –  $SO_4^{--}$  de la solution du sol

Ce résultat peut supposer l'intervention de sources d'apport de sulfates, autres que la dissolution du gypse :

- dissolution de  $Na_2SO_4$  (mirabilite), de  $MgSO_4$  et de  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  (thenardite) (Watson, 1983), de  $SrSO_4$  et de  $BaSO_4$  (Hamdi-Aissa et al., 2004)
- contact des échantillons avec des nappes chargées en sulfates (effet fluctuation) (Pouget, 1968; Hachicha, 1997; Rouahna, 2007)
- oxydation du soufre ; cas des milieux confinés (Dougherty et Barsotti, 1972)

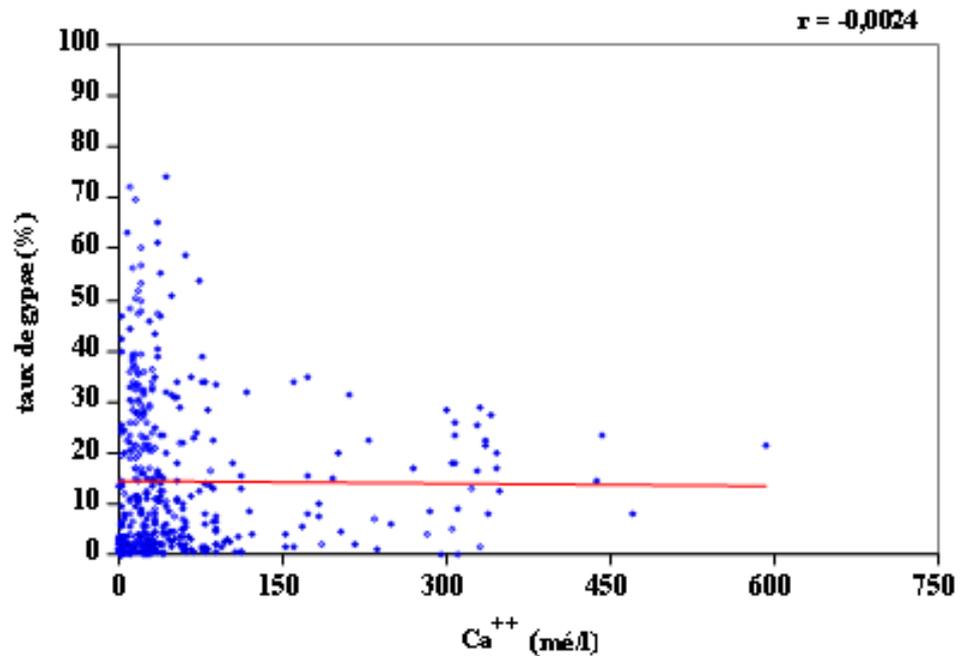
### 2. 1. 3. 1. 10. Gypse - Calcium ( $Ca^{++}$ en mé/l) de la solution du sol

Obtenue à partir de 442 couples de données, la relation entre les taux de gypse et les taux de calcium soluble est illustrée par la figure 17.

La représentation des données (fig.17) identifie un nuage de points plus ou moins importants et dispersés, ne présentant aucune tendance particulière suivant la variation des

taux des deux paramètres. Par ailleurs, il permet d'observer que la majorité des données d'étude coïncide avec un taux de calcium ( $\text{Ca}^{++}$  en  $\text{mé/l}$ ) inférieur à 150  $\text{mé/l}$ .

L'ajustement graphique choisi confirme l'absence de lien entre le gypse et le calcium soluble. L'ajustement par une droite révèle que la relation est non significative, avec un coefficient de corrélation égal à -0,0024, pour un ddl égale 440.



L'équation de la relation se présente sous la forme suivante :

$$[y = -0,001 x + 14,414]$$

Figure 17: Relation linéaire gypse -  $\text{Ca}^{++}$  de la solution du sol

A partir de ce résultat, il est possible de dire que le gypse n'est pas la seule source d'apport en  $\text{Ca}^{++}$ , en effet ce dernier peut être issu :

- des interactions liées à la nature du milieu, avec la présence de  $\text{CaCl}_2$ , et de  $\text{CaHCO}_3$  (Carter et Inskeep, 1988; Servant, 1975) ;
- la dissolution de  $\text{CaCO}_3$  (Halitim, 1988; Berigari et Al-Any, 1994).

### 2. 1. 3. 1. 11. Gypse - Pluviométrie

Ce traitement réalisé à partir de 726 couples de données, est représenté par la figure 18.

L'examen de la représentation graphique de ces données (fig.18) met en évidence un nuage de points d'aspect particulier et très explicite, conditionné par l'effet variations des tranches pluviométriques reportées en abscisse. En général, il laisse apparaître que :

- les sols peuvent être différemment pourvus en gypse pour une même pluviométrie,
- les sols qui présentent les plus grandes teneurs en gypse correspondent approximativement aux hauteurs de pluie inférieures à 300mm, et qu'elles oscillent préférentiellement entre 100 et 300mm.
- le taux de gypse régresse de part et d'autre de la gamme citée ci-dessus, particulièrement dans les zones où la pluviométrie est très importante (> 400mm).

Cette situation est bien traduite et confirmée par l'ajustement par une courbe (ajustement polynomial du second degré), qui révèle une relation positive (coefficient de corrélation égal à 0,273) et très hautement significative (ddl = 723).

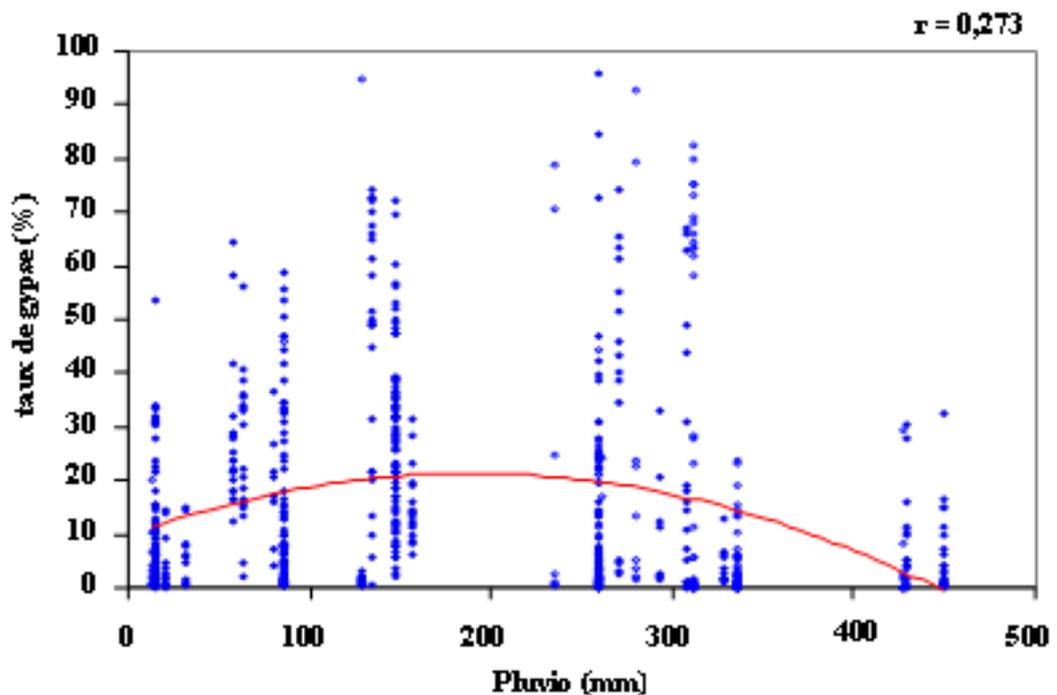


Figure 18: Relation curvilinéaire gypse- pluviométrie

La courbe obtenue semble confirmer les observations présentées plus haut, traduisant une relation sous forme de cloche avec trois segments :

- Le premier segment se situe dans la tranche pluviométrique inférieure à 130 mm. Il indique que les taux de gypse ont tendance à augmenter (passant de 11,33 à ≈20 %) avec l'augmentation des hauteurs de pluie (variant de 13,5 mm à 130 mm).

Le second segment correspond à un léger palier, situé entre 130 et 260 mm de pluie. A ce niveau, il n'y a pratiquement pas de variation du taux de gypse, il reste

approximativement égal à  $\approx 20\%$ .

- Le troisième segment, qui va au-delà de 260 mm, marque l'influence (assez marquée) de la hauteur de pluie sur la disponibilité du gypse dans le sol. C'est-à-dire que plus le taux de pluie augmente ( $> 400$  mm) et plus le taux de gypse diminue, jusqu'à atteindre des valeurs nulles (le taux passe de 8,95 à 0%).

L'équation de la courbe de régression simple s'identifie comme suit :

$$[y = -0,0003x^2 + 0,122 x + 9,749]$$

A la lumière de ces résultats, il ressort que :

- Les trois étages bioclimatiques de correspondance (Le Houérou et al., 1977; Le Houérou, 1975, 1979; Nedjraoui, 2001) sont bien représentés et justifiés,
- les régions naturelles favorables à la présence du gypse dans les sols Algériens se situent dans l'étage aride et l'étage saharien, avec une tendance préférentielle pour l'étage aride.
- l'étage semi-aride (300-600mm), se caractérise par des teneurs en gypse moins importantes et moins intenses. Ce qui signifie que l'intervention ou l'influence du facteur eau devient perceptible. Toutefois, les quantités « lixiviantes » ne sont pas encore suffisantes pour l'évacuer hors du profil (Pouget, 1995; Boyadgiev et Verheyne, 1996; Djili, 2000).

On peut dire que la situation est telle que, le sol garde d'une part un taux d'humidité favorable et d'autre part une redistribution et re-précipitation du gypse sans grande perte (Watson, 1985).

Globalement, l'accumulation du gypse dans le sol semble être un phénomène prédominant dans les milieux secs à très secs. Des milieux où les effets de forte évaporation, de la remontée capillaire et de fluctuation de la nappe peuvent être effectives (Bouteyre et Loyer, 1992; Abdesselam, 1999).

La représentativité de l'élément gypse dans les régions et dans les sols répond à la structuration suivante :

Etage aride > Etage saharien > Etage semi-aride

### **2. 1. 3. 2. Les régressions multiples pour l'approche globale**

Il est connu que la régression multiple repose sur le principe de contribution relative de deux ou de plusieurs variables indépendantes

sur la variation d'une variable dépendante. Pour ce faire, nous avons utilisé l'argile, le calcaire total (Calc.tot.), la conductivité

électrique (CE) et la pluviométrie comme variables indépendantes, alors que le gypse a été considéré comme variable dépendante.

Le traitement a été réalisé à partir de 726 échantillons, représentant l'ensemble des horizons à gypse. Le résultat des calculs et les

équations de régressions multiples sont présentés dans le tableau XIII.

(Y= Gypse , X1=Arg. , X2= Calc.tot. , X3 = CE , X4 = Pluie)

Horizons d'étude	Equations d'études	Equations de régressions	ddl	R  obs	R  théo	Sgn
h1 + h2 + hp	$Y_1 = f(X1, X2)$	$Y_1 = -0,034 X1 - 0,214 X2 + 11,528$	361	0,289	0,185	***
	$Y_2 = f(X1, X3)$	$Y_2 = -0,071 X1 + 0,138 X3 + 5,533$	362	0,238	0,184	***
	$Y_3 = f(X1, X4)$	$Y_3 = -0,076 X1 - 0,003 X4 + 8,90$	390	0,167	0,139	**
	$Y_4 = f(X2, X3)$	$Y_4 = -0,443 X2 - 0,022 X3 + 23,537$	603	0,316	0,146	***
	$Y_5 = f(X2, X4)$	$Y_5 = -0,333 X2 + 0,014 X4 + 22,330$	651	0,300	0,146	***
	$Y_6 = f(X3, X4)$	$Y_6 = 0,009 X3 - 0,010 X4 + 17,260$	660	0,070	0,087	ns
	$Y_7 = f(X1, X2, X3)$	$Y_7 = -0,032 X1 - 0,139 X2 + 0,106 X3 + 7,900$	337	0,273	0,191	***
	$Y_8 = f(X1, X2, X4)$	$Y_8 = -0,080 X1 - 0,294 X2 + 0,012 X4 + 11,870$	360	0,320	0,185	***
	$Y_9 = f(X1, X3, X4)$	$Y_9 = -0,095 X1 + 0,144 X3 + 0,004 X4 + 5,086$	361	0,242	0,185	***
	$Y_{10} = f(X2, X3, X4)$	$Y_{10} = -0,499 X2 - 0,017 X3 + 0,012 X4 + 21,786$	602	0,325	0,146	***
	$Y_{11} = f(X1, X2, X3, X4)$	$Y_{11} = -0,085 X1 - 0,180 X2 + 0,115 X3 + 0,011 X4 + 7,334$	336	0,291	0,191	***

ns : non significative  
\* : significative  
\*\* : hautement significative  
\*\*\* : très hautement significative

Tableau XIII. Résultat des régressions multiples

Les résultats présentés dans ce tableau sont obtenus sur la base de 726 échantillons représentant l'ensemble des horizons à gypse.

Les différentes combinaisons présentées ci-dessus (tab.XIII) définissent des relations significatives, sauf pour l'association « CE - Pluie », représentant l'équation de régression Y6, qui traduit une prédiction non significative.

Dans l'ensemble, ce sont les équations « de régression » Y4, Y5, Y8 et Y10 qui restent les plus importantes et les plus intéressantes. Elles se caractérisent par les coefficients multiples les plus élevés (supérieurs à 0,300) et très hautement significatifs ( $\alpha = 0,001$ ).

Toutefois, en s'appuyant sur les résultats des régressions simples (tab.XIV), il ressort que la CE (représentée par X3) ne semble présenter aucun intérêt dans la prédiction des taux de gypse dans le sol ( $|R| = 0,014$ ).

Il est approprié donc d'écarter le paramètre CE des variables explicatives et de l'estimation multiple.

De là, on est en mesure de dire que ce sont les équations « de régression » Y5 et Y8 qui sont sélectionnées.

Variable dépendante	Variable indépendante	Nombre de couples	ddl	R  obs	R  cri	sgn
Gypse	Argile	393	390	0,451	0,177	***
Gypse	Calc.tot	654	652	0,339	0,146	***
Gypse	CE	663	661	0,014	0,087	ns
Gypse	Pluie	726	723	0,273	0,146	***

Tableau XIV. Résultats des régressions simples (approche globale)

L'examen des deux équations caractéristiques (Y5 et Y8), nous permet d'observer que l'équation Y8 semble être la plus indiquée. Elle est constituée, contrairement à Y5, de trois paramètres, dont l'argile et le calcaire total qui sont les meilleurs estimateurs du gypse

(Arg = 0,451 et Calc.tot = 0,339), et est identifiée par un plus grand coefficient de corrélation « R » (= 0,320).

Le modèle sélectionné est :

$$[Y8 : \text{Gypse} = - 0,080 \text{ Arg.} - 0,294 \text{ Calc.tot.} + 0,012 \text{ Pluie} + 11,870] \dots (1)$$

avec « R » égale 0,320 à pour un ddl de 360

Cette formulation semble confirmer les résultats obtenus pour les relations individuelles. Le taux de gypse se trouve être inversement proportionnel au taux d'argile et au taux de calcaire total, par contre il est évolutif en fonction de la hauteur de pluie.

Il est à rappeler que dans la relation gypse - pluviométrie l'ajustement choisi est une courbe de tendance polynomiale, par conséquent la valeur positive du coefficient de régression simple ne doit pas être considérée comme un signe de proportionnalité.

Pour avoir une meilleure appréciation du résultat atteint, nous avons procédé à une Vérification du modèle obtenu sur la base de la nature des variables indépendantes (situation de renversement).

---

4. ou : s'insère dans le modèle comme suit  $Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 \dots + a_n X_n$

Le modèle à tester est :

$$Y = f(1/ \text{Arg}, 1/ \text{Calc. tot}, \text{Pluie})$$

Les résultats de ce traitement nous donnent l'équation suivante :

$$[ Y : \text{Gypse} = - 7,200 \text{ Arg.} + 2, 514 \text{ Calc.tot.} - 0,013 \text{ Pluie} + 10,553] \dots (2)$$

avec « R » égale à 0,038 pour un ddl de 360.

La comparaison des deux modèles (1 et 2), sur la base de leur coefficient multiple, montre que la première formulation et / ou estimation (1) reste la plus intéressante. La valeur du « R » de la seconde équation (2) n'ayant indiqué aucune amélioration. Elle reste une estimation très faible.

Ainsi, le modèle considéré est le suivant : (1)

$$[\text{Gypse} = - 0,080 \text{ Arg.} - 0,294 \text{ Calc. tot.} + 0,012 \text{ Pluie} + 11,870]$$

avec « R » égale 0,320 à pour un ddl de 360 .

A partir de ce modèle on peut dire que le taux de gypse dans nos données globales semble être caractérisé par l'action conjuguée de l'argile, du calcaire total et de la pluviométrie. Seulement, c'est le calcaire total qui présenté la plus grande contribution.

. Seulement, c'est le calcaire total qui présenté la plus grande contribution.

En s'appuyant sur la représentativité individuelle de chaque paramètre, il est évident que cette formulation doit être observée comme un schéma organisationnel variable, avec comme support de base les trois étages bioclimatiques de référence, et une structuration symbolisant dans l'ensemble :

- l'alternance entre sols de texture moyenne à grossière et les processus d'altération et de néoformation,
- le rôle du calcaire comme source de Ca<sup>++</sup>.

### **2. 1. 4. Analyses des fréquences de distribution des formes de Gypse**

Le calcul des fréquences de distribution des formes de gypse pour les données prises dans leur globalité, montre que :

- 2,07% des horizons présentent la forme diffuse,
- 24,55% des horizons présentent la forme en amas,

- 30,30 % des horizons présentent la forme cristaux et microcristaux
- 11,16% des horizons présentent la forme continue,
- 31,92% des horizons ne présentent pas d'accumulation de gypse.

Il ressort que le gypse sous la forme de cristaux et microcristaux, et la forme en amas présente les fréquences de distribution les plus élevées, soit respectivement 30,30% et 24,55%, suivies de la forme continue avec 11,16%, et enfin la forme la moins observée, la forme diffuse avec 2,07%.

## 2. 2. Approche par catégorie d'horizons

Les calculs sont effectués pour trois catégories d'horizons, sans distinction des profils. Les types d'horizons identifiés sont : h1 (horizon de surface), h2 (horizon de sub-surface) et hp (horizon de profondeur).

### 2. 2. 1. Caractérisation des taux de gypse

#### 2. 2. 1. 1. statistiques descriptives

L'étude a porté sur 155 horizons de surface, 173 horizons de sub-surface et 398 horizons de profondeur. Les résultats relatifs aux traitements statistiques descriptifs effectués pour ces trois catégories d'horizons sont fournis dans le tableau XV.

<b>Approche d'étude</b>	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>hp</b>
<b>Nombre d'horizons</b>	<b>155</b>	<b>173</b>	<b>398</b>
<b>Moyenne</b>	15,480	16,460	15,850
<b>Médiane</b>	7,13	7,88	7,7
<b>Minimum</b>	0	0	0
<b>Maximum</b>	96	93	95
<b>Ec- Type</b>	18,650	20,760	19,090
<b>Variance</b>	346,490	431,050	364,540
<b>C.V. (%)</b>	120,300	126,060	120,440

Tableau XV. les paramètres descriptifs du taux de Gypse

La lecture de ce tableau fait apparaître que les taux de gypse sont très variables dans chaque type d'horizons. Ils sont, dans l'ensemble, cernés par les valeurs extrêmes 0 et 96%.

Les valeurs très élevées de l'écart-type (>18), de la variance (>300) et du coefficient de variation (>120) confirment cet état de fait.

Une vue d'ensemble de nos résultats (global + types d'horizons), en ne se référant qu'aux paramètres de dispersions (écart-type, Variance et C.V.) et des moyennes, nous permet de constater qu'il y a une certaine constance dans les valeurs relatives aux teneurs en gypse dans les trois catégories d'horizons. De même que pour l'analyse globale (paragraphe 2. 1. 1. 1), ce taux de gypse reste assez proche des valeurs réelles pour l'ensemble des horizons.

Notons tout de même une légère prédominance de la teneur en gypse dans l'horizon de sub-surface (16,460 %) par rapport à l'horizon de surface (15,480 %) et de profondeur (15,850 %) (tab. XV). Cette dernière reste insignifiante, puisque le test de comparaison

des moyennes révèle que la différence est non significative (tab. XVI). Ce qui signifie que, globalement, la distribution du gypse dans le profil est homogène (fig. 19).

Couples d'horizons	h1 et h2	h1 et hp	h2 et hp
t calculé	0,45518	0,21051	-0,34584
P	0,64929	0,83335	0,72959
Niveau de probabilité	ns	ns	ns

Avec  $\alpha = 0.05$

Tableau XVI. Comparaison des moyennes du taux de gypse entre les trois catégories d'horizons

Ainsi, notre profil gypseux moyen se présente comme suit (fig. 19) :

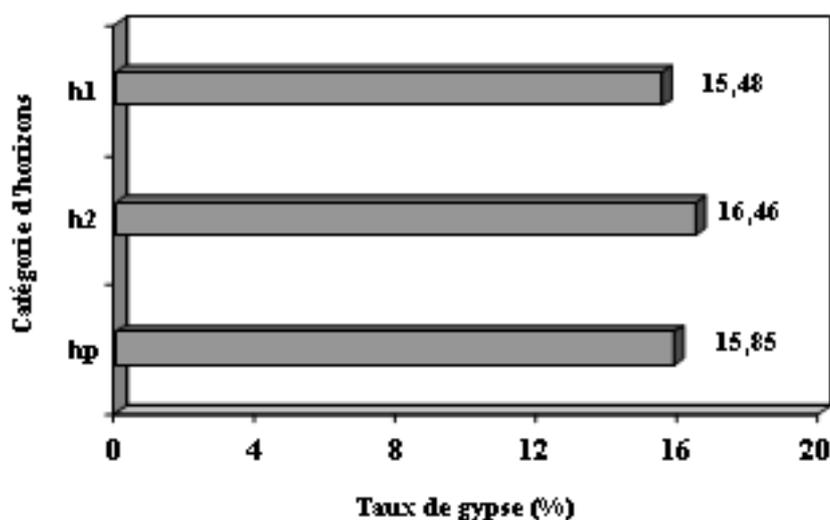


Figure 19: Profil gypseux moyen

### 2. 2. 1. 2. analyses des fréquences de distribution et spatialisation du taux de gypse

Cette analyse est basée sur la combinaison des cinq classes de gypse avec les trois catégories d'horizons (h1, h2, hp). Le résultat aboutit à la formation de quinze cartogrammes thématiques relatifs à la distribution des classes de taux de gypse dans l'espace (fig.20). La lecture de cette figure se fait du haut vers le bas (h1 à hp) pour la distribution d'une même classe de gypse dans le profil et de gauche à droite (G1 à G5) pour la distribution des classes de gypse en fonction de chaque catégorie d'horizons.

L'examen de la figure 20, fait apparaître que la classe G1 (très faibles taux de gypse) est la plus répandue dans les sols d'Algérie quelle que soit la catégorie d'horizons. Elle est essentiellement localisée dans les régions nord et plus précisément dans les profils des régions des hautes plaines. Les autres classes sont de moindres fréquences, mais restent toujours une caractéristique de cette même formation géomorphologique.

Par ailleurs, le nombre d'horizons n'étant pas le même en surface, en subsurface et en profondeur, cette interprétation visuelle risque d'être dévalorisée ou altérée de par le faible degré de perception et de la densité de l'information schématisée. En effet, l'échelle de nos cartogrammes étant beaucoup plus petite que celle des études d'origine (tab.VI), plusieurs

profils paraissent confondus et donc non décelables sur la carte. Une situation largement observée lorsqu'il est question de comparer une même classe de taux de gypse pour les trois catégories d'horizons.

Pour cela, et afin d'éviter cette situation nous avons exprimé les résultats sous forme d'histogrammes de fréquences (fig. 21 et 22). Ces derniers nous permettent d'homogénéiser, de quantifier et de valoriser la distribution spatiale des différentes classes de taux de gypse (Djili et al., 1999; Djili, 2000).

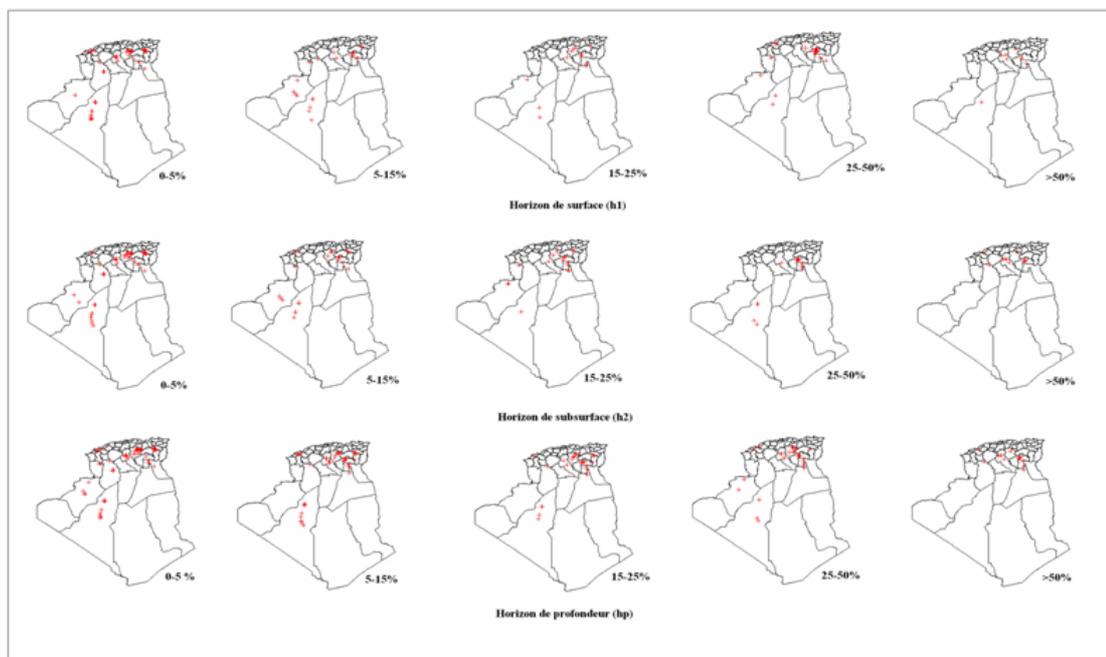


Figure 20 : spatialisation des taux de gypse selon la teneur (G5) et la position de l'horizon (h1 à hp) dans les sols d'Algérie

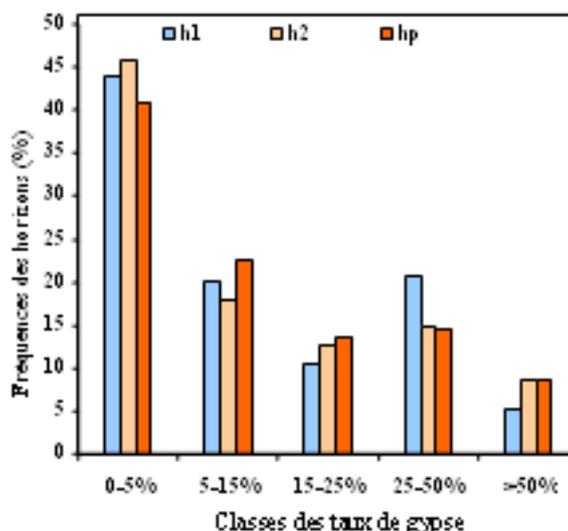


Figure 21: Fréquences des classes des taux de gypse

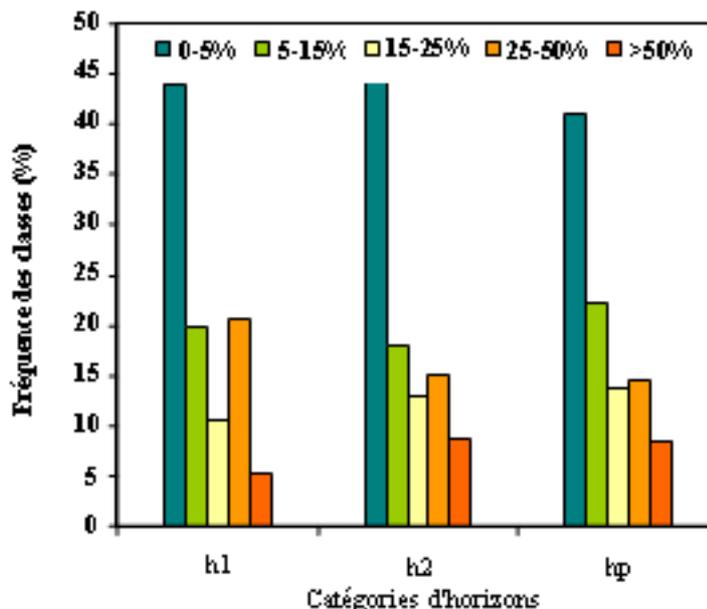


Figure 22: Fréquences des horizons par classes des taux de gypse

De manière générale, l'examen des figures 21 et 22, révèle ce qui suit :

- Pour une même classe de taux de gypse, la fréquence de distribution est la même pour chaque catégorie d'horizons, malgré quelques légères fluctuations. Ce qui conforte l'aspect de distribution homogène, dès lors que les données sont prises dans leur globalité.
- Une prédominance de la classe G1 (très faibles taux de gypse) sur les autres classes des taux de gypse, avec plus de 41% des effectifs, et cela quelle que soit la catégorie d'horizons incriminée dans le profil.
- Les fréquences des autres classes chutent brutalement pour les trois catégories d'horizons, donnant lieu à des valeurs d'effectifs compris entre 5 et 22% selon la classe et l'horizon considérés.

Les classes G3 (teneurs moyennes en gypse) et G5 (très fortes teneurs en gypse) semblent s'orienter préférentiellement vers une localisation en profondeur. Alors que les teneurs en gypse pour la classe G4 (fortes teneurs en gypse) présentent une localisation légèrement inverse.

De plus, la figure 22 nous permet de dire que la fréquence des différentes classes de gypse pour tous les horizons épouse de manière sensible la structure décroissante suivante :  $G1 > G2 > G4 > G3 > G5$ .

## 2. 2. 2. Les relations entre le taux de gypse et les autres variables par catégorie d'horizons

Il s'agit de développer les mêmes traitements et les mêmes relations que ceux réalisés pour l'approche globale, mais au niveau des horizons de surface, de sub-surface et de profondeur.

### 2. 2. 2. 1. Les régressions simples par catégorie d'horizons

Elles sont effectuées sur les variables prises deux à deux. Dans la présentation des résultats nous avons tenu compte du meilleur ajustement.

#### 2. 2. 2. 1. 1. Gypse – Argile

La relation entre le taux de gypse et le taux d'argile pour les horizons de surface, de subsurface et de profondeur est illustrée respectivement par les figures 23, 24, et 25. Ces traitements sont obtenus successivement, à partir de 86, 95 et 212 couples de données.

L'allure du nuage de points dans les trois catégories d'horizons présente une tendance similaire. Il semble que la variation des taux de gypse ne semble pas être conditionnée par la variation des teneurs d'argile. Toutefois, on note que :

Globalement, l'allure des courbes nous permet de faire les observations suivantes :

- les fortes teneurs en gypse sont observées au niveau des horizons faiblement argileux (<20%),
- la prédominance de la classe très faibles taux de gypse (0-5%).

Statistiquement, la relation est hautement significative, avec des coefficients de corrélation « r » respectives (h1, h2, hp) de -0,430 (ddl= 83), -0,428 (ddl = 92) et -0,472 (ddl = 209) (Annexe VII). Les équations de régression obtenues sont :

$$y_{h1} = 0,012 x^2 - 1,030 x + 21,876$$

$$y_{h2} = 0,017 x^2 - 1,266 x + 24,836$$

$$y_{hp} = 0,015 x^2 - 1,170 x + 23,642$$

une première phase, où il est observé une baisse importante et progressive du taux de gypse dans les trois horizons, en même temps qu'une augmentation du taux d'argile (seuil d'environ 40%).

- Il est utile d'indiquer que la disponibilité du gypse passe par des taux maximum d'environ 25 à 20% à un taux inférieur à 1,3%.
- une seconde phase, au-delà du seuil limite de 40% de taux d'argile et 1,3% de gypse, où la tendance relationnelle s'inverse comparativement à la phase initiale. Ainsi, le taux de gypse augmente proportionnellement avec le taux d'argile.

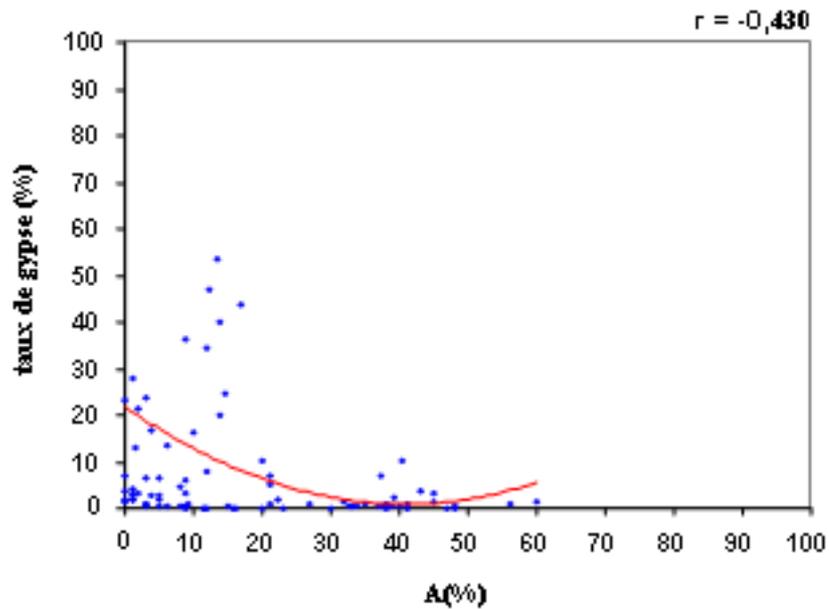


Figure 23: Relation gypse-argile pour les horizons de surface

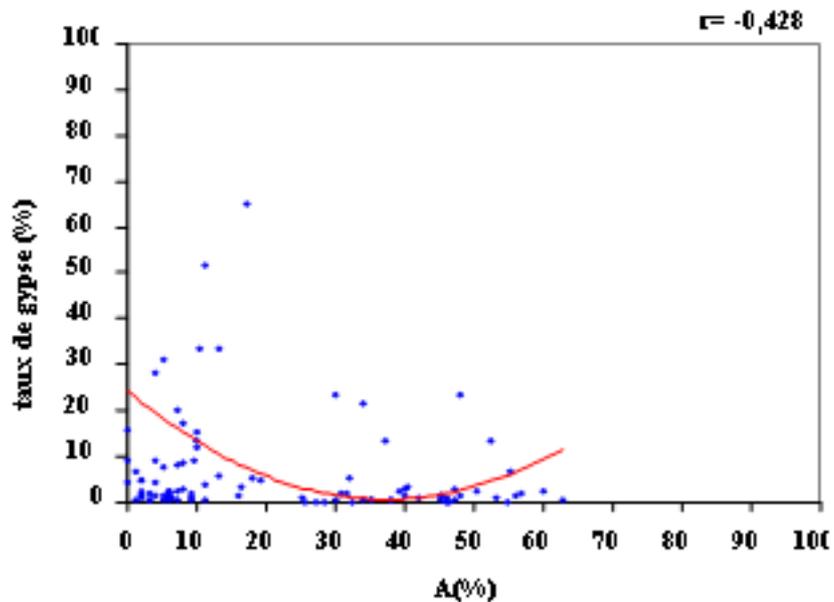


Figure 24: Relation gypse-argile pour les horizons de subsurface

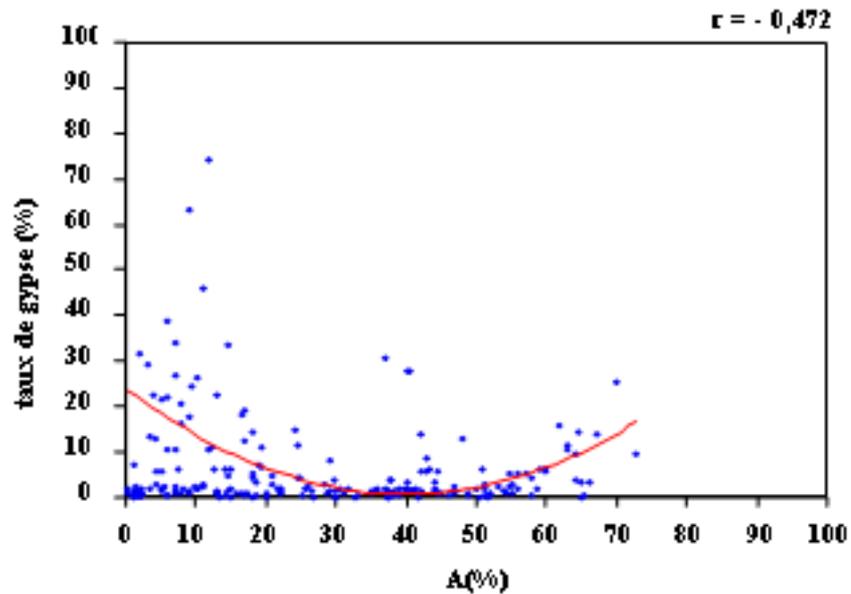


Figure 25 : Relation gypse-argile pour les horizons de profondeur

### 2. 2. 2. 1. 2. Gypse – limon

L'interaction entre le taux de gypse et le taux de limon dans les trois horizons d'étude est représentée respectivement par les figures 26, 27, et 28. Ces traitements sont réalisés sur la base de 90, 104 et 223 couples de données.

La disposition du nuage de points montre que dans les horizons de surface et de sub-surface la variation du taux de limon ne semble pas présenter d'influence sur la variation du taux de gypse. Ainsi, l'élément gypse peut être associé à n'importe quelle teneur en limon.

A l'opposé, la représentation des couples de points pour l'horizon de profondeur dégage une tendance générale à la diminution du taux de gypse quand le taux de limon augmente.

Dans l'ensemble, la répartition des points nous permet d'entrevoir la prédominance de la classe des très faibles taux de gypse (0-5%).

Le meilleur ajustement graphique montre que la relation dans les trois horizons est statistiquement significative. Elle est très hautement significative pour les horizons de

et de subsurface et hautement significative pour les horizons de profondeur (hp), les coefficients de corrélation « r » respectifs (h1, h2 et hp) sont : -0,424 (ddl=87), -0,455 (ddl=101) et -0,239 (ddl=220). Les équations de régression correspondantes sont :

$$y_{h1} = 0,009 x^2 - 0,851 x + 22,700$$

$$y_{h2} = 0,020 x^2 - 1,426 x + 25,920$$

$$y_{hp} = 0,013 x^2 - 1,122 x + 25,150$$

En se référant à l'allure des courbes, il apparaît que cette relation se caractérise par :

- une première phase où les taux de gypse diminuent, passant des maximums cernés entre 20 et 26% à un taux minimum inférieur à 4%, au moment où il est enregistré une augmentation des taux de limon (de 0 à 45% pour h1, de 0 à 35% pour h2, et de 0 à 42% pour hp).
- une seconde phase au-delà des seuils limites observés, stable pour l'horizon de surface (h1) et caractéristique pour les horizons de subsurface et de profondeur. Pour ces derniers, il est noté une augmentation du taux de gypse (>5%) en même temps que l'augmentation du taux de limon (>50%).

- surface il est noté une augmentation du taux de gypse (>5%) en même temps que l'augmentation du taux de limon (>50%).

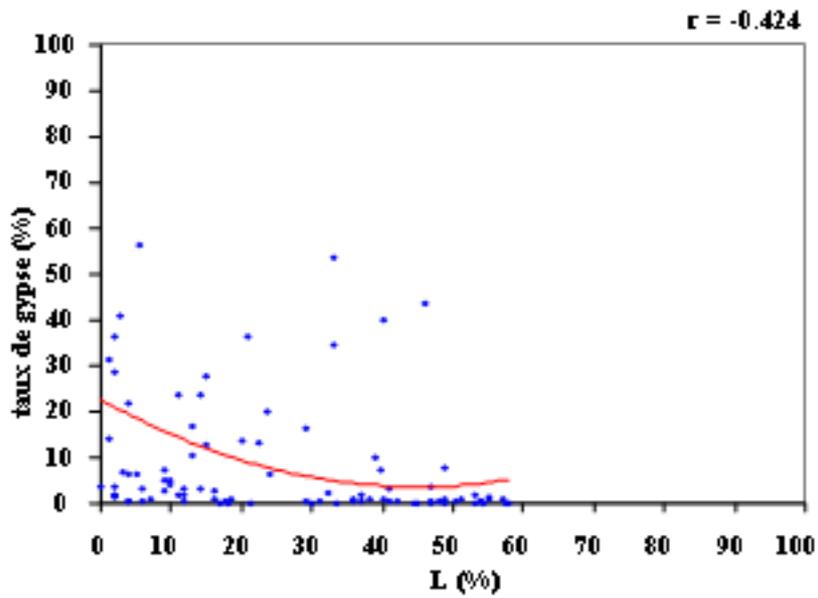


Figure 26: Relation gypse- limon pour les horizons de surface

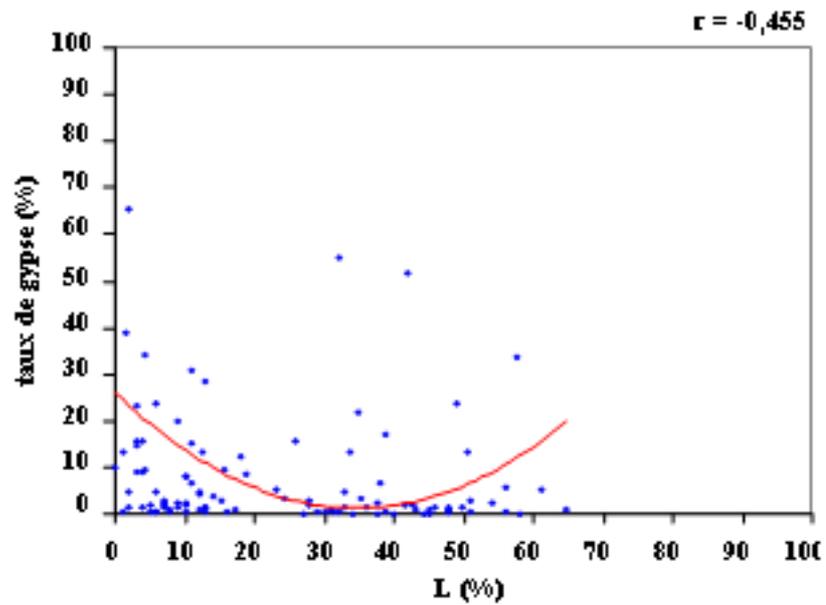


Figure 27: Relation gypse-limon pour les horizons de subsurface

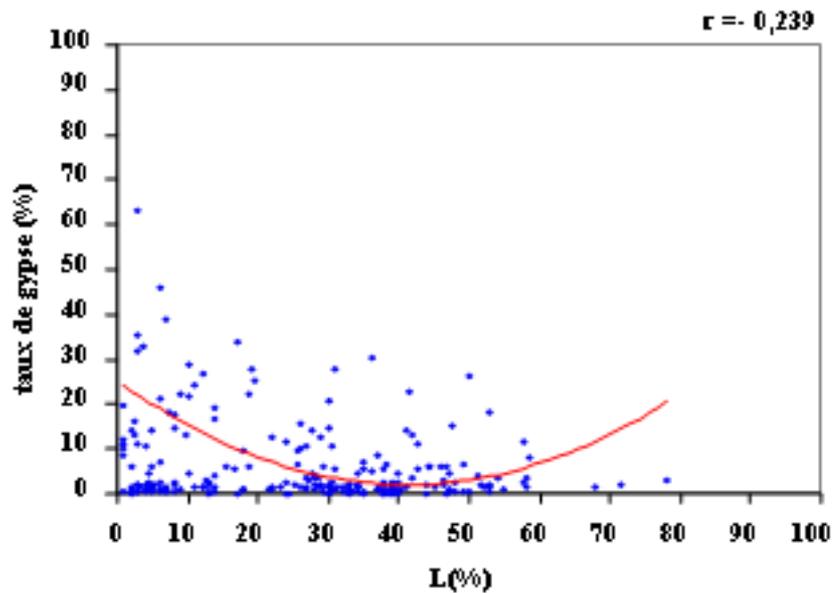


Figure 28: Relation gypse - limon pour les horizons de profondeur en partie moyenne (H3 et H4) avec un taux moyen à faible.

- **Classe VI**

- limite d'horizon de fond égale à H4; profondeur 60-150cm
  - une texture très fine,
  - fort taux de calcaire total,
- pas d'effet CE,
- disponibilité pour le gypse :

en surface et sub-surface (H1 et H2) avec un très faible taux et une morphologie de dépôt en faible individualisation d'amas,

en partie moyenne des profils (H3 et H4) avec un très faible taux.

A partir du pourcentage le plus élevé propre à chaque classe (fig.61), on peut indiquer que le nombre de profils références (à choisir) est égal à (06) au minimum.

---

# Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'étudier la répartition et le comportement du gypse dans le sol, de mettre en évidence les principaux groupements de sols gypseux pouvant être observés en Algérie, et enfin de tenter de définir des profils de référence.

L'approche méthodologique adoptée porte sur :

- la mise en place d'une banque de données où l'élément gypse (taux et formes d'accumulation) a été pris comme facteur discriminant de sélection des profils;
- un traitement des données reposant sur la projection et la répartition du taux et de la forme de gypse dans l'espace et dans le profil, une analyse statistique classique, et une analyse multidimensionnelle;
- l'identification et la détermination des profils références de sols à gypse.

Pour la projection et la répartition du taux et de la forme de gypse dans l'espace et dans le profil, et le traitement statistique classique, l'information est traitée selon deux niveaux d'approche, soit une approche globale et une approche par horizon (surface, sub-surface et profondeur). Avant d'entamer ces différentes phases d'analyses, nous avons procédé à une évaluation qualitative de la masse de renseignements mis en banque en calculant le taux de remplissage de chaque variable introduite.

Les principaux résultats obtenus montrent que, excepté pour la pluviométrie, aucune variable descriptive ou analytique n'est renseignée à 100%. Seulement 38% des variables sont renseignés à plus de 70%, les variables stockées ne sont donc pas toutes systématiquement renseignées.

Le taux de gypse moyen observé dans l'ensemble des horizons est de 16% avec un coefficient de variation de 121,76%.

Le calcul des fréquences de distribution du taux de gypse pour l'ensemble des horizons montre que 63,5% des horizons de la banque de données sont non gypsifères à modérément gypsifères (taux de gypse < 15%), et que 36,5% des horizons sont fortement gypsifères ou gypsifères (taux de gypse  $\geq$ 15%).

La caractérisation des autres paramètres constituant la banque de données, soit 21 variables, indique que, mis à part le pH qui est la variable la plus homogène (CV<5%), toutes les autres variables présentent une grande variation de leurs teneurs (CV > 60%).

L'étude de certaines interactions susceptibles d'exister entre le taux de gypse et certains paramètres choisis a mis en évidence de fortes interactions avec les paramètres texturaux (argile, limon, sable), le calcaire total, la CEC, et la pluviométrie. Les résultats obtenus indiquent que notre élément discriminant peut être associé à n'importe quelle fraction granulométrique du sol, qu'il s'oppose proportionnellement à la présence du calcaire total, qu'il interfère grandement dans la fonctionnalité de la CEC, et que son accumulation dans le sol, même si elle est prédominante dans les milieux secs à très secs, répond à la structuration de référence suivante :

Etage aride > Etage saharien > Etage semi-aride

En second lieu, l'utilisation des régressions multiples a permis de construire un modèle de prédiction symbolisant le comportement et la fonctionnalité du gypse de la banque sur la base de trois paramètres qui sont l'argile, le calcaire total et la pluviométrie. Le modèle obtenu est le suivant :

$$\text{Gypse} = - 0,080 \text{ Argile} - 0,294 \text{ Calcaire total} + 0,012 \text{ Pluie} + 11,870$$

( n = 364 ; R2 = 0,1024)

Le calcul des fréquences de distribution des formes de gypse pour l'ensemble des données montre que les horizons des sols d'Algérie sont dominés par des accumulations de gypse de forme discontinue (cristaux et microcristaux, et amas).

Les traitements statistiques sont également réalisés sur les données réparties par catégorie d'horizons (les horizons de surface « h1 », les horizons de sub-surface « h2 », et les horizons de profondeur( hp )). La structuration du taux de gypse démontre une certaine constante dans les valeurs relatives aux teneurs en gypse dans les trois catégories d'horizons. Le test de comparaison des moyennes la présente comme une distribution homogène. Le calcul des fréquences du taux de gypse par catégorie d'horizons (h1, h2, hp), s'articulant sur une approche associative de cartogrammes thématiques et d'histogrammes de fréquences, nous a permis de confirmer cet aspect global d'homogénéité. D'une part, il est observé que pour une même classe de taux de gypse, la fréquence de distribution est la même pour chaque catégorie d'horizons, d'autre part, il est noté une même structuration des fréquences de distribution des classes de gypse et d'allure sensiblement décroissante pour tous les horizons : G1 (très faibles teneurs) > G2 (faibles teneurs) > G4 (fortes teneurs) > G3 (teneurs moyennes) > G5 (très fortes teneurs).

L'application des régressions simples à ce niveau d'étude, avec les mêmes paramètres utilisés lors de l'approche globale, indiquent que :

- le gypse reste fortement corrélé, pour les trois horizons des profils, avec les paramètres texturaux (argile, limon, sable) et le calcaire total,

- la relation n'est significative et intense entre le gypse et la CEC qu'au niveau des horizons de profondeur,

- contrairement à l'approche initiale, le gypse développe une relation significative et intense avec le Calcium soluble (Ca<sup>++</sup>) au niveau des horizons de profondeur,

- l'interaction entre la pluviométrie et le taux de gypse, abordée de manière différente, par rattachement aux étages bioclimatiques de référence (étage semi-aride, étage aride, étage saharien), nous a permis de confirmer les résultats de l'approche globale, tout en proposant une structuration verticale de la distribution du taux de gypse dans le profil qui donne ce qui suit :

- les profils des sols des zones arides sont plus riches en gypse que les profils caractéristiques des sols des zones semi-arides,
- les profils des sols des zones arides présentent des taux moyens en gypse plus élevés dans les horizons de surface et de sub-surface,
- une distribution plus ou moins semblable en gypse pour les profils de l'étage bioclimatique saharien et l'étage bioclimatique semi-aride.

Pour ce qui est des régressions multiples, il ressort que contrairement à l'approche globale, deux paramètres seulement sur les quatre fixés (argile et calcaire total) sont impliqués dans la formation et la répartition du taux de gypse. Leur intervention caractérise les horizons de surface et de profondeur selon les équations suivantes :

Horizon 1 : Gypse = -0,034 Argile - 0,363 Calcaire total + 13,517

( n = 80 ; R2 = 0,1225 )

Horizon profond : Gypse = -0,032 Argile - 0,170 Calcaire total +10,880

( n = 197 ; R2 = 0,0652 )

Le calcul des fréquences de distribution des formes d'accumulation de gypse par catégorie d'horizons (h1, h2, hp) s'articulant sur la même approche associative que pour les données d'ensemble, nous a permis de confirmer l'aspect global d'homogénéité. En premier lieu, il ressort que les formes en amas et en cristaux et microcristaux sont les plus répandues dans les sols d'Algérie. En second lieu, il est observé un gradient de présence vertical, inversement proportionnel entre ces deux formes, caractéristique de l'ensemble des profils. Pour la forme en amas, le gradient diminue du haut vers le bas du profil (h1 à hp), alors que pour la forme en cristaux et microcristaux, il augmente du haut vers le bas du profil (h1 à hp). En dernier lieu, on a la même structure des données des fréquences de la forme de gypse quelle que soit la position de l'horizon dans le profil : cristaux et microcristaux > amas > continue > forme diffuse.

L'analyse multidimensionnelle (ACP) est réalisée à l'aide de 5 variables pédologiques qui sont le taux de gypse, le taux de calcaire total, la conductivité électrique (CE), la forme d'accumulation du gypse, et la texture, de 882 d'horizons et 206 profils. Elle a permis de mettre en évidence six (06) groupements de sols à gypse bien distincts. Deux groupements sont constitués par des profils avec le taux et l'accumulation du gypse de profondeur, deux autres groupements s'identifient par des profils avec le taux et l'accumulation de gypse pour les horizons de surface et de sub-surface et par le taux de gypse dans les horizons de subsurface, et les deux derniers groupements sont représentés par des profils avec de faibles accumulations de gypse dans la partie moyenne. L'analyse affinée des résultats de cette discrimination (identifiée) entre groupements, a démontré que cette mise en place bien structurée du gypse est conditionnée par un schéma où intervient, d'une part l'aspect variation des paramètres morphologiques et analytiques, et d'autre part, soit l'effet accroissement de l'aridité (variation Nord-sud), soit l'aspect localisation dans le paysage (organisation morpho – pédologique ; effet séquentiel), ou bien encore la nature du milieu d'accueil (effet stationnel).

En fonction des différentes hypothèses énoncées telles que l'effet indirect du climat (pour certains cas), l'effet de nappe (différemment chargée), l'intervention du matériau gypso - calcaire et la position topographique, les types de sols gypseux suivants sont identifiés:

- les sols à gypse de nappe qui sont de deux types :
  - à accumulation de profondeur, récente ou relique,
  - à accumulation de moyen profil pour les sols différemment salés.
- les sols à gypse pédogénétique qui sont de deux types :
  - à forte accumulation,
  - à faible individualisation.

Pour ce qui de l'identification et la détermination des profils références, nous nous sommes basés sur l'élaboration d'une clé de prédiction qui repose sur une variation dimensionnelle (effet appréciatif), où le degré de perception passe d'une vue globale à une vue stationnelle. Cette variation est symbolisée par une structuration en 3 niveaux d'influences et 6 classes de milieux d'observations. Les niveaux d'influences représentent l'agencement des trois

schémas d'organisation observés et les 6 classes de milieux d'observations représentent la description ou la caractérisation de chaque groupement en classe d'appartenance graduée. En se référant au taux le plus élevé assimilé à chaque classe (chiffre relatif au pourcentage de représentativité propre à chaque groupement), il est obtenu un nombre de profils références (à choisir) égal à 6 au minimum.

Il ressort que l'ACP a permis de reproduire approximativement les modèles de prédiction obtenus (même si leur lecture et leur structuration ne reposent pas sur la même approche de base) dans les plans et par des effets d'axes :

- l'aspect prédiction pour les horizons de fond est absorbé par l'axe à effet global,
- l'aspect prédiction pour les horizons de surface et pour les horizons de sub-surface ressort au niveau de l'axe à effet stationnel.

Il est utile de rappeler que pour l'axe à effet séquentiel les profils représentés ne sont constitués que par du gypse morphologique (formes d'accumulations).

Dans le cas de la prédominance des formes en cristaux et microcristaux, que ce soit pour l'approche globale ou par horizon, ces formes indiquent, généralement, l'influence et le déroulement du processus de dissolution-recristallisation qui sont largement associés dans l'analyse multidimensionnelle à l'effet d'une forte évaporation, de la remontée capillaire, ou de la fluctuation des nappes. Dans les cas de la disponibilité et de la répartition du gypse, sa dynamique serait contrôlée par le facteur hydrique.

---

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ababsa S., 1992** Le plan directeur général de développement des régions sahariennes. Termes de référence, Prêt BIRD : 3405 AL., 104 p.
- Abbes I. , 1995 Contraintes de mise en valeur dans les terres du Bassin du Forath-Irak. "Salinité et Gypse". Workshop on Management of Gypsiferous – Damascus, Syria, 15p.
- Abdesselam S., 1999 Contribution à l'étude des sols gypseux au Nord-Est du Sahara Algérien: Caractérisation et Genèse. Cas des oasis de Tolga (Région des Zibans).Thèse Mag., I.N.A., El-Harrach, 147p.
- Ahmed B., Kemper W.D., Haider G., Niazi M.A., 1979. Use of gypsum stones to lower the sodium adsorption ratio of irrigation water. Soil Sci. Soc. Am.J., Vol.43, pp : 698-703.
- Ali Y.A., West I., 1983 Relationships of modern gypsum nodules in sabkhas of loess to composition of brines and sediments in Northern. Egypt. J. Sed. Petrol., 53, 4, pp: 1151-1168.
- Alonzo J.J.G-A., 1996 Vegetation and soils on gypsiferous outcrops: Geographical contribution in an Eastern Sector of Madrid basin (Spain). Proc. Int. Symposium on soil with gypsum. Lleida, Catalonia, Spain.
- Ansan V., Arbey F., 2003. Les adernes et leur minéral. Formes, descriptions et caractérisations du gypse. Ed. Spécial – fontaine, Paris,75p.
- Artieda O., Herrero J., 1996.** Soils with gypsum. In the central Ebro Valley , Spain. Proc. International Symposium on soils with Gypsum. Llieda, Catalonia, Spain, Field trip guidebook, pp: 1-103.
- Aubert G., Boulaine J., 1967 La pédologie. PUF, Paris. Coll. Que sais-je n°11375.
- Auvray C., 2003 Vieillessement et comportement rhéologique du gypse. Thèse de doctorat de l'I.N.P.L., Spécialité : Génie civil – Hydrosystèmes Géotechnique, 279 p.
- Bachacou. J., 1973. L'effet Guttman dans l'analyse de données phytosociologiques. Document ronéo, Station de Biométrie, C.N.R.F., 45 p.
- Baci L., 1984 Contribution à l'étude de la salinisation des sols du Hodna (M'sila). Mém.Ing.INA, El-Harrach, 98p.
- Baize D., 1995 Guide pour la description des sols. INRA Éditions, 375 pp.
- Ballais J.L., 1994 Désertification et barrage vert en Algérie : le cas des Zibans. R.G.D ; T.XLIII, N°1, pp : 1-8.
- Barriand P., Cesbron F., Geffroy J., 1978. Les minéraux, leurs gisements, leurs associations. Editions du B.R.G.H., 298p.
- Barry J.P, Celles J.C, Faurel L., 1974 .Notice de la carte internationale du tapis végétal et des conditions écologiques : Feuilles d'Alger au 1/1.000.000. Ed.Soc.Hist.Nat.Afr.Nord, Alger, 42p.

- Barzanji A.F., 1973. Gypsiferous soils of Iraq. Ph. D. Thesis. Univ. Gent, 199p.
- Barzanji A.F., Stoops G., 1974. Fabric and mineralogy of gypsum accumulations in some soils of Iraq Transactions of the 10<sup>th</sup> international congress of soil science, VII Mineralogy and Micromorphology of soils, pp: 271-277.
- Beauchamp J., 2006 Les Argiles. Ed. Université de Picardie Jules Verne, Dép. Pédol. 20p.
- Bellair P, 1954 .L'origine des dépôts de sulfates de calcium actuels et anciens. Académie des Science, pp :1059-1061.
- Benzecri J., 1980 Pratique de l'analyse des correspondances, exposé élémentaire. Ed. Dunod. Paris. 424 p.
- Benmati A., 1993. Contribution à l'étude de l'altération des roches carbonatées tendres en milieu semi-aride de Souaghi (Bni-Slimane).Relation avec la pédogenèse fersiallitique et la formation des croûtes et encroûtements calcaires. Thèse de magistère, I.N.A., El-Harrach, 255p.
- Bensaid R., 1999. Les sols à accumulations gypso-calcaires de la région de Ain-Benoui (Biskra). Ann. Agron. I.N.A., El-Harrach. Vol.20, n° 1 et 2.
- Bérigari M.S., Al-Any F.M.S, 1994. Gypsum determination in soil by conversion to water-soluble sodium sulphate. Soil Sci.Am.J., 58, pp: 1624-1627.
- Berka S., 1997. Etude de la variabilité intra-spécifique de Cedrus atlantica Manetti en Algérie par l'étude des stomates. Ann. Rech. For. Algérie, 1997, 1, pp:12-24.
- Berkal S., 2006. Contribution à la connaissance des sols du Sahara d'Algérie de la base de données à la valorisation des périmètres pédologiques. Thèse Mag. Science du sol, I.N.A. , El-Harrach, 171p.
- Berner R.A., 1978** Rate control of mineral dissolution under Earth surface conditions.Am. J. Sci., 278 (9), pp: 1235-1252.
- Bernou S, 1996** Contribution à la création d'une banque de données pédologiques des sols gypseux de l'Algérie du Nord. Mém.Ing.INA, El Harrach, 49p.
- Besler H., 1972** Klimaverhältnisse und klimageomorphologische Zonierung der zentralen Namib (Südwestafrika). Stutt. Geogr. Stud. 83, 209pp.
- Bezou C., Nonat A., Mutin J. C.,1995**Investigation of the crystal structure of #-CaSO<sub>4</sub>, CaSO<sub>4</sub>.0,5H<sub>2</sub>O, and CaSO<sub>4</sub>.0,6H<sub>2</sub>O by powder diffraction methods. Journal of Solid State Chemistry, vol. 117, pp: 165-176.
- Bini C., Ristori G.G., 1987** Microstructure of soils developed on Gypsic-clay rocks in Northern Apennines (Italy). Micromorphologie des sols : Soil Micromorphology, pp: 481-485
- Bonython C.W., King D., 1956** The occurrence of native sulphur at lake Eyre. Transactions of the Royal Society of South Australia, 79, pp:121-130.
- Borcard D., 2007** Régression multiple : Corrélation multiple et partielle. Ed. Univ. Montréal, Départ. Sci.Biol, Bio-2042, 17p.
- Bosbach D., Rammensee W.,1994** In situ investigation of growth and dissolution on the (001) surface of gypsum by scanning force microscopy, Geoch. Et Cosmoch., vol. 58, n°2, pp : 843-849.

- 
- Boucheneb. N., 1999** Première données sur l'étude de la végétation de la région de Tamanrasset (Ahaggar). An.Rech. For.Algérie. 1999-2, pp: 3-22.
- Boulaine J., 1979** Pédologie appliquée. Ed. Masson, Paris, 213p.
- Boumaza R., 1999** Analyses factorielles des distributions marginales de processus. Thèse de doctorat. Discipline : Mathématiques appliquées.Univ.Joseph Fourier Grenoble 1. Sciences et géographie, 128p.
- Bourque P.A., 1997** Les minéraux et la séquence évaporitique. Source : Ed. Spéc.Revue planète terre, 75p.
- Bouteyere G., Loyer J. Y., 1992**Sols salés, eaux saumâtres, des régions arides tropicales et méditerranéennes : " Principaux faciès, conséquences pour l'agriculture ". In L'aridité : une contrainte au développement. ORSTOM. Edition, ouvrage collectif, pp : 68-78.
- Bouxin G., 2005** Les techniques d'ordination. ACP et Classification Ascendante. Numéro spécial - Revue Math. & Sci.hum., Mathathematics and Social Sciences.
- Bouzigues R., Favrot J.C., Herrera J., Gréco C., 1992** Valeur diagnostique des caractères hydromorphes et halomorphes de vertisols de la vallée du Cauto à Cuba. Application à l'évaluation des besoins en drainage agricole. Cah. ORSTOM. Sér., Pédol. Vol.XXVII, n°2, pp : 297-313.
- Bower C.A., Huss R.B., 1948** Rapid conductometric method for estimating gypsum in soil. Soil Sci.66, pp: 199-209
- Boyadgiev T.G., 1974** Contribution to the Knowledge of Gypsiferous Soils. The Euphtates pilot irrigation projet, Raqqa. Dossier, A.G.O.N./ SF, Syr. 67, 522, FAO-Rome.
- Boyadgiev T.G.,1975** Les sols du Hodna. Etude des ressources naturelles et expérimentation et démonstration agricoles dans la région du Hodna. Algérie - Dossier, F.A.O. Rome - document de synthèse + carte.
- Boyadgiev T.G., 1988** Characteristics, genesis and classification of saline soils in arid and semi-arid regions (in Bulgarian). Ph.D.thesis, Sofia, 379p.
- Boyadgiev T.G., Sayegh A.H, 1992** Forms of evolution of gypsum in arid and soil parent materials. Pédologie, XLII-2, pp:171-182.
- Boyadgiev T.G., Verheye W.H., 1996** Contribution to a utilitarian classification of gypsiferous soil Géoderma 74, pp: 321-338.
- Braitsch O., 1971** Minerals, rocks and inorganic materials. Salt deposit. Their origin and composition. Vol. 4, ED Springer-Verlag, 297 p.
- Braun-Blanquet J., 1949** Premier aperçu phytosociologique du Sahara tunisien. Soc. Hist.Nat. Afr. N., mém.h.s., 2, pp : 39-50.
- B.R.M., 1998** Base de Référence Mondiale pour les Ressources en Sols. Rapport sur les ressources en sols du monde. ISSS- ISRIC-F.A.O.Acco Leuven., Rome, 96p.
- B.R.M., 2006** World Reference Base For Soil Resources. Ed. FAO, IUSS, ISRIC, Rapport FAO n°103, Rome, 132p.
- Buck B.J., Monger H.C., 1999** Stable isotopes and soil-geomorphology as indicators of Holocene climate change, Northern Chihuahuan Desert. Journal of Arid Environments, 43, pp: 357-373.
-

- Buck B.J., Kipp J. Jr., Monger H.C., 2002** Inverted Clast Stratigraphy in an Eolian Archaeological Environment. *Geoarchaeology : An International Journal*, VI.17, n°7, pp: 665-687.
- Buck B.J., Van Hoesen J.G., 2002** Snowball morphology and SEM analysis of pedogenic gypsum, Southern New Mexico. *Journal of Arid Environments*, 51, pp: 469-487.
- Buck B.J., Van Hoesen J.G., 2005** Assessing the applicability of isotopic analysis of pedogenic gypsum as a paleoclimate indicator, Southern New Mexico. *Journal of Arid Environments*, 60, pp: 99-114.
- Bureau P., Roderer P., 1961** Contribution à l'étude des sols gypseux de la partie Sud du golf de Gabes. *Bulletin de l'Association Française d'étude des sols*, numéro spécial, pp : 150-176.
- Cantonb Y., Solé-Benet A., Lazaro R., Puigdefabregas J., 1996** Relationships between pedogenesis stages and hydro-pedological properties on gypsiferous mudstone in the tabernas desert (Se Spain). *Proc. Int. Symposium on soil with gypsum*. Lleida, Catalonia, Spain.
- Capot-Rey R. , Cornet A. , Blaudinthe B., 1963** Glossaire des principaux termes géographiques et hydrogéologiques Sahariens. *Trav. I.R.S., Imp. La typo-litho*, 81p.
- Capot-Rey R. , Gremion R., 1967** Remarque sur quelques sables Sahariens. *Trav. I.R.S., Tome XXIII*, 7p..
- Carter B.J, Inskeep W.P., 1988** Accumulation of pedogenic gypsum in Western Oklahoma soils. *Soil Sci.Soc.Am.J.*52, pp: 1107-1113.
- Chamayou, H., Legros, J.P., 1989** Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. Agence de Coopération Culturelle et Technique, Conseil International de la langue Française. Presses Universitaires de France. Paris. 594 p.
- Chauhan R. P. S., 1992** Comparative efficiency of gypsum and iron pyrites in sodic soil reclamation. *Journal of the Indian Society of soil science*, 40,2, pp: 404-405.
- Chaumier J., 1981** Les banques de données. 2<sup>ème</sup> éditions PUF. Collection que sais-je Paris., 123p.
- Chaumont M. , Paquin. C , 1972** Cartes des précipitation annuelles minimales fréquentielles en Algérie septentrionale. Echelle : 1/1.000.000. 1ère carte, Université d'Alger - faculté des sciences (notice et carte).
- Chen X. Y., 1997** Pedogenic gypcrete formation in arid central Australia. *Geoderma* 77, pp : 39-61.
- Cherby B., 1991** Les sols salés et leur réhabilitation. Etude bibliographique. C.E.M.A.G.R.E.F., 124p.
- Chevry C., Robert M., 1996** Les ressources mondiales en eau et en sol / une limitation pour l'avenir. *Cahiers Agricultures* 5, pp : 243-248.
- Chevry C., Bourrié G., 1998** La salinisation des sols. In Stengel P. et Gelin S. (ed.) *Sol: interface fragile*. I.N.R.A., Paris, pp : 109-127.
- Conley R. F., Bundy W. M., 1958 Mechanism of gypsification, *Geoch. et Cosmoch. Vol.* 15, pp: 57-72.

- Cooke.R.U, 1981** Salt Weathering in deserts Proc.Geol.Ass., 92(1), pp:1-16.
- Coque R., 1962** La Tunisie présaharienne. Etude géomorphologique. Arm.Colin Ed., Paris, thèse d'état, 488p.
- Cote M., 1983** L'espace Algérien. Les prémices d'un aménagement O.P.U, 278p
- Coudé-Gaussen G., Olive P., Rognon P. , 1983** Datation de dépôts loessiques et variations climatiques sur la bordure septentrionale du Sahara algéro-tunisien. Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys. 24, 1, pp : 61-73.
- Coude-Gaussen G., Rognon P., Le Coustumer M., 2007 Incorporation progressive de poussières sahariennes aux limons des îles orientales du Cap Vert. Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série deux, Sciences de la terre et des planètes (C.N.R.S.), vol. 319, n<sup>o</sup>11, pp : 1343-1349 (20 ref.).
- Coutinet S., 1965** Méthodes d'analyse utilisables pour les sols salés, calcaires et gypseux.
- Agronomie Tropicale, 12, pp : 1242-1253. C.P.C.S., 1967** Classification des sols. Association française pour l'étude du sol. I.N.A.P.G., 96p.
- Dagnelie P., 1975** Théorie et méthode statistiques, applications agronomiques. Volume II, les méthodes de l'inférence statistique.
- Dagnelie P., Palm R., 1995** Régression multiple et prévision de rendement agricoles en fonction de données météorologiques Notes Stat. Inform., Faculté des Sciences agronomiques, Gembloux, pp :1-6. Les presses agronomiques de Gembloux, 463p.
- Dan J., Yaalon D.H, Moshe R., Nissim S., 1982** Evolution of Reg soils in southern Israel and Sinai. Géoderma, 28, pp : 173-202.
- Daoud Y , Halitim A., 1994** Irrigation et salinisation au sahara algérien. Sécheresse, 5 (3), pp : 151-160.
- Dekkiche B., 1974** Contribution à l'étude des sols du Hodna et corrélation géochimique des eaux de la nappe. Thèse Université de Gant, Belgique, 210p
- Delagarde J., 1983**Initiation à l'analyse des données. Ed. Dunod Bordas. Paris. 157 p.
- Deletie P., Haguenauer B., Quenee B., Robinet A., 1990** Etude et surveillance de la dissolution du gypse sur deux sites d'ouvrages hydrauliques. Mém. Soc. Géol. France, n°157, pp. 33-42.
- Deley G., 1964** Le peuplement mycologique de quelques Ergs au Sahara Nord-occidental.Trav. I.R.S., Tome XXIII, 7p. 1968.
- Delmas A.B., Bini C., Berrier J., 1985** The effect of gypsum on the poral system geometry in two clay soils. Miner. Petrogr. Acta, 29A, pp : 499-509.
- Despois J., Raynal R., 1975** Géographie de l'Afrique du nord-ouest. Ed Bussière, Saint-Amand, France, 570p.
- Diamantaras K. I., Kung S. Y., 1996** Principal component neural networks. Theory and applications. John Wiley & Sons editions.
- Dick W.A., Tabatabai M.A., 1979** Ion chromatographic determination of sulfate and nitrate in soils. Sil Sci.Soc.Am.J., 43, pp:899-904.

- Djemaa A.K., 1995** Gestion des sols gypseux en république arabe Syrienne. Workshop on Management of Gypsiferous – Damascus, Syria, 16p.
- Djili K., Daoud Y., Ayache N., 1999** Analyse de la distribution verticale et spatiale du calcaire dans les sols de l'Algérie Septentrionale. Etude et gestion des sols, 6, 3, pp : 201-213
- Djili K., 2000** Contribution à la connaissance des sols du Nord d'Algérie. Création d'une banque de données informatisées et utilisation d'un système d'information géographique pour la spatialisation et la valorisation des données pédologiques. Thèse d'état en sciences agronomiques. INA, El- Harrach, 227p.
- Doner H.E., Lynn W.C., 1989** Carbonate, Halite, Sulfate and sulphide minerals. In: J.B. Dixon and S.B. Weed (Editors). Minerals in Soil Environments. Soil Sci.Soc.Am.Madison, WI, pp: 279-330.
- Dosso M., 1980** Géochimie des sols salés et des eaux d'irrigation. Aménagement de la Basse Vallée de l'Euphrate en Syrie. Thèse doct. Ing., Toulouse.
- 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.A., 122p. + annexes.
- Dougherty M.T., Barsotti N.J., 1972** Structural damage and potentially expansive sulphide minerals. Bull.Associ.Eng.Geol., 9, pp: 831-837.
- Drake N.A., 1997** Recent aeolian origin of surficial gypsum crusts in southern Tunisia : Geomorphological, Archaeological and remote sensing evidence. Earth surface processes and landforms.Vol.22, pp: 641-656.
- Droubi A., Fritz B., Tardy Y., 1976** Equilibre entre minéraux et solutions. Programmes de calculs appliqués à la prédiction de la salure des sols et des doses optimales d'irrigation. Cah. ORSTOM, sér.Pédologie.Vol.14, 1, pp: 13-18.
- Duchaufour P., 1988** Abrégé de pédologie. 2<sup>ème</sup> éd. Masson, Paris, 224p.
- 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., 1954** Les sols d'Algérie. Service des études scientifiques. Pédologie, N°2. Nouvelle édition, 140p.
- Durand J.H., 1963** Les croûtes calcaires et gypseuses en Algérie : formation et age. Bull. Soc. Géol. Fr. (7), pp : 959-968.
- Durand J.H., 1968** Sols Calcaires mélaniques du Pré-Rif occidental. Cah. O.R.S.T.O.M., Sér. Pédol, VIII, 2, pp :173-186.
- Dutil P., 1971** Contribution à l'étude des sols et paléosols sahariens. Thèse d'état faculté des sciences de l'université de Strasbourg, « fiche de synthèse », 346p.
- EGI-712, 2003 Les Ciments de Portland Université SHERBROOK – Le sulfate de calcium-CHAP 5, pp: 1 – 47.
- Escofier B., Pages J., 1990** Analyses factorielles simples et multiples : objectifs, méthodes et interprétation. Ed. Dunod. 2<sup>ème</sup> édition . Paris. 274 p.

- Eswaran H., Stoops G., Abtahi A., 1981** SEM morphologies of Halite. J.Micorso., 120, pp: 343-352
- F.A.O., 1988** Revised legend F.A.O-U.N.E.S.C.O Soil map of the world. F.A.O. World Soil Resources Rrep. 60 F.A.O, Rome, 119p.
- F.A.O, 1990** Management of Gypsiferous soils. FAO soils Bulletin n° 62, F.A.O, Rome
- F.A.O., 1993** World Soil Resources. An explanatory note on the F.A.O, World Soil Resources Map at scale 1/25.000.000. F.A.O. World Soil Resources Rep., 66, Rome, 64p.
- Faure P., 1978** Comportement des sols au compactage : Role de l'argile et conséquence sur l'arrangement des grains. Thèse Docteur es sciences, Unive.Sci.Médi.Grenoble., 179p.+ annexes.
- Fedoroff N., Courty M.A., 1989** Indicateurs pédologique d'aridification : Exemple du Sahara.Bull. Soc. Géol. France, (8) t.,V. N°1, pp : 43-53.
- Finot E., Lesniewska E., Goudonnet J .P., Mutin J.C., Domenech M., Kadi A. A., 2001 Correlating surface forces with surface reactivity of gypsumcrystals by atomic force microscopy. Comparison with rheological properties of plaster. Solid State Ionics, vol. 141-142, pp: 39-46.
- Fischesser R., 1950** Le gypse : Propriétés physiques et chimiques Cours minéralogie. Document « Lambert industries 1972 », 15p.
- Flament C., Milland L., 2005** Un effet Guttman en ACP. Math. & Sci.hum., Mathathématics and Social Sciences, 43 ème année, n°171, pp: 25-49
- Florea N., Al-Joumaa Kh., 1998** Genesis and classification of gypsiferous soils of the middle Euphrates Floodplain, Syria. Geoderma 87: pp67-85
- Foucart. T., 1999** Linéar multiple regression on canonical variables. Biometrical Journal 41(5), 1999(a), pp : 559-572.
- Foucart. T., 2006** Colinéarité et régression linéaire Math. & Sci.hum., Mathathématics and Social Sciences, 44<sup>e</sup> année, n° 173, 2006 (1), pp: 5-25.
- Frenkel H., Gerstl Z., Renger Van de Veen J., 1986** Determination of gypum and cation exchange capacity in arid soils by resin method. Geoderma, 39, pp: 67-77.
- Gaddas R., 1971** Le pistachier : conditions de climat et de sol. Sols de tunisie, Bulletin de la divisions des sols, 3, pp : 79-100.
- Gaddas F., 2001** Proposition d'une méthode de cartographie des pédopaysages. Application a la moyenne vallée du Rhône. Thèse de Doctorat de l'I. N.A. P.G., Département Agronomie-Environnement, 212p.
- Gallali T., 1980** Transfert sels-matière organique en zones arides mediterranéennes.Thèse de Doctorat es-sciences, université de Nancy-I, 202p.
- Gautier Y, 2004.** Les climats méditerranéens comme intersection des régions arrosées en hiver et sèches en été. Ed. Du monde, Encyclopædia Universalis.
- Gensac P., 1969** Les sols sur gypse en moyenne tarentaise. Description - caractères physico-chimiques. Bulletin de l'association française pour l'étude du sol-n°3, 11p.

- Ghabour Th.K., El-Taweel M.I., Hussein M.A., 1996** Impact of some factors on gypsum crystallization in soils under experimental conditions. Proc. Int. Symposium on soil with gypsum. Lleida, Catalonia, Spain.
- Girard M. C., 1983** Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. Application à une région des plateaux jurassiques de Bourgogne. Thèse de docteur ès science, revue Sols n° 12, 430p.
- Girard M. C., King D., 1988.** Un algorithme interactif pour la classification des horizons de la couverture pédologique : DIMITRI. Science du Sol, 26(2), pp : 81-102.
- Girard M-C., Walter C., Rémy J-C., Berthelin J., Morel J-L., 2005 Sols et environnement. AFES - Science Sup., cours, exercices et études des cas. Ed. Dunod., 816p.
- Glazovskaya M.A., 1984** Soils of the world. Vol.1: soil families and soil types. Vol.2: soil geography. Balkema, Rotterdam, pp: 214-401.
- Gousskov N., 1964 Notice explicative de la carte géologique de Biskra au 1/200.000. Publ.Serv.Géol.Algérie.13p.
- Gressier J.C. ,1998.** Effets de structure au sein des molécules. Thèse d'état université de Lemans,215p.
- Grimaldi M., 1977.** Etudes en laboratoires du comportement au tassement du sol limoneux du Rheu (Ille et Vilaine).Observations macromorphologiques. D.E.A-E.N.A.S.A de Rennes, I.N.R.A., Avignon , 120p. + annexes.
- Gutierrez E.M., Gutierrez S.F., 1996.** Geomorphology of the tertiary gypsum formation in the Ebro Depression. Proc. International Symposium on Soils with gypsum.Lleida, Catalonia, Spain, pp:1-20
- Guyot J., Delmas A.B., Jacquin M.,1984.** Amélioration de la structure des sols non salés par le gypse. Coll. AFES, Drainage, Dijon, pp: 359.376.
- Hadid R., 1992 .**Fertilisation des céréales en milieu salé saharien : Essai de transformation des eaux d'irrigation en solution nutritive.Thèse Ing., I.N.A., El-Harrach, 52p.
- Haddouche I., 1998.** Cartographie pédopaysagique de synthèse par télédétection. Images landsat TM. Cas de la région de Ghassoul (El-bayadh). Thèse magister, I.N.A., 103p. + annexes.
- Hachicha M., 1997. Mise en valeur des sols salés. Organisation, Fonctionnement et évolution de sols salés du nord de la Tunisie. Thèse Doctorat ENSA Rennes, 229 p. + annexes.
- Halitim A., Robert M., Berrier J., 1983 Etude expérimentale de l'interaction de la calcite et du gypse avec la montmorillonite.
- Conséquences sur le rôle de ces deux minéraux dans le comportement de matériaux argileux et l'amendement des sols.C.R.Acad.Sc.Paris.T 296, série II, pp : 1459-1464.
- Halitim A., 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.

- Halitim A., 1988.** Les sols des régions arides d'Algérie. Ed. OPU., 361p.
- Hamdi-Aissa B., 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-Aissa B., 2001. Le fonctionnement actuel et passé des sols du Nord Sahara (cuvette de Ouargla). Approche micro-morphologique, géochimique et minéralogique et organisation spatiale. Thèse de Doctorat, INA Paris-Grignon, 310p.
- Hamdi –Aissa B., Fedoroff N., Halitim A., Valles V., 1998. Short and long term soil-water dynamics in Chott soils in hyper arid areas :A case study in Ouargla Chott, Sahara , Algeria , 8p, in ISSS ed, 16<sup>th</sup> *Word Congress of Soil Science*, Montpellier , (publié sur CD-Rom).
- Hamdi-Aissa B., Valles V., Aventurier A., Ribolzi O., 2004. Soils and Brine Geochemistry and Mineralogy of Hyperarid Desert Play, Ouargla Basin, Algerian Sahara. *Arid Land Research and management*, Vol.18, n°2, pp:103-126 (24).
- Hamouni M., 2006** Contribution à la détermination des unités homogènes par différentes approches numériques (Cas du bas Cheliff). Thèse Mag. Science du sol, I.N.A., 131p.
- Harden J.W., Taylor E.M., Rehei M.C., MacFadden L.D., 1991  
Calcic, gypsic and siliceous soil chronosequences in arid and semiarid environments. In. W.D.nettleton (editor), occurrence, characteristics and genesis of carbonate accumulation. *Soils.Sci.Soc.Am.Publ.*26, Madison, WI, pp 1-16.
- Harkat M. F., 2003.** Détection et Localisation de Défauts par Analyse en Composantes Principales. Doctorat de l'I.N.P.L. (spécialité automatique et traitement numérique du signal), E.D. IAEM Lorraine, département de formation doctorale en automatique, 173p.
- Heijnen W. M. M., Hartman P. 1991** Structural morphology of gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), brushite ( $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) and pharmacolite ( $\text{CaHAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). *Journal of Crystal Growth*, vol. 108, pp: 290-300.
- Henni S., Grar R., Monnier G., 1969** Le profil cultural. Masson, Paris, 332p.
- Herrero J., Porta J., Fedoroff N., 1992. Hypergypsic soil micromorphology and landscape relationships in North-eastern Spain. *Soil Sci.Soc.Am.J.*56, pp: 1188-1194.
- Herrero J., 1996.** Old and new terms for soils with gypsum. Proc. Inter. Symposium on Soils with gypsum. Lleida, Catalonia, Spain, ppVII-X
- Herrero J., Porta J., 2000. The terminology and the concepts of gypsum-rich soils. *Geoderma* 96, pp: 47-61.
- Herrero J., Boixadera J., 2002** Gypsic Soils. *Encyclopedia of Soil Science.*, pp: 635-639.
- Hilliard C.; Reedyk S., 2006.** Texture du sol et qualité de l'eau. Agriculture et Agro-alimentaire canada. Ed. Services de dépôt OTTWA (ONTARIO)-CANADA, Tavaux publics et services gouvernementaire canada, 30p.

- Hotelling, H., 1933** Analysis of a complex of statistical variables into principal components.  
Journal of Educational Psychology, vol. 24, pp: 417-441.
- Iddir A., 2003** Variabilité Spatiale de la perméabilité et de quelques caractéristiques du sol mesurée « in-situ » dans une région aride (Biskra). Thèse Ing., I.N.A., El-Harrach, 106p.
- Iften L., 1989** Note sur l'interprétation des résultats analytiques des sols. A.N.R.H., Département Pédologie - S.R.S., 9p.
- Ilaiwi M., 1983** Contribution to the Knowledge of the soils of Syria. Ph. D. Thesis, University of Ghent, I.T.C., Belgium, XVIII + 259 + 62p.  
I.N.C.T., 2000
- Comgéo : Support informatique de représentation des limites géographiques de l'Algérie : « Segmentation en wilayat ou en commune » Ed. - Droit Commercial : Instit.Natio.Cartog.Téléédé., Alger - Algérie.
- Jafarzadeh A.A., Burnham C.P., 1992 Gypsum crystals in soils. J.Soils.Sci., 43, pp: 409-420. Jauzein A., 1974. Les données sur le système  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et leurs implications géologiques. Revue Géogr. Phys. Géol.Dyn.2 série. VolXVI (2), pp : 151-159:
- Jolliffe I. T., 1986** Principal Component Analysis. Springer-Verlag, New York.
- Kadri A., Satori G., 1990** . Etude pédologique d'un nouveau périmètre irrigué en Atilet dans la région de Nefzaoua, Tunisie. Rivista Di Agricoltura Subtropicale E Tropicale (Ed.), pp : 261-278.
- Kadri A., Gallali T., 1990** Contribution à l'étude hydro-pédologique et géochimique des accumulations gypso-salines dans le Nefzaoua, Tunisie Présaharienne. Rivista Di Agricoltura Subtropicale E Tropicale (Ed.), pp : 189-240.
- Kadri A. , Hatira A., 1996** Genesis and typology of gypso-saline accumulations in southern Tunisia. Proc. International Symposium on Soils with Gypsum Lliéda, Catalonia, Spain, pp: 55-59.
- Kemper W.D., Olsen J., Demooy C.J., 1975** Dissolution rate of gypsum in flowing water. Soil Science Society of America Proceedings. 39, pp: 458-464.
- Keren R., Kreit J.F., Shainberg.KJ, 1980** Influence of size of gypsum particles on the hydraulic conductivity of soils. Soil Science Vol.130, n°3: pp : 113-117.
- Keren R., Connor D.G.A., 1982** Gypsum dissolution and sodic soil reclamation as affected by water flow velocity. Soil Sci. Am.J.Vol.46, pp: 726-732.
- Khademi H., Mermut A.R., Krouse H.R., 1997** Sulfur Isotope geochemistry of gypsiferous arid soils from central Iran. Geoderma 80, pp : 195-209
- King D., 1986** Modélisation cartographique du comportement des sols basée sur la mise en valeur du « Marais de Rochefort ». Thèse de doctorat, INRA, Versailles, 173 p.+ annexes.
- King D., 1987 Modélisation de l'approche cartographique du comportement des sols. Science du sol, 25 (2), pp : 107-121.

- King D., Girard M. C., 1988** Réflexions sur la classification des profils de la couverture pédologique proposition d'un algorithme : VLADIMIR. *Science du Sol*, 26(4), pp : 239-254.
- King D., Duval O., 1989 Traitement informatique des données pédologiques. La bibliothèque Logos. *Science du sol*, 27 (1), pp : 77-80.
- Kulke H., 1974** Zur geologie und mineralogy der kalk-und giskrusten Algeriens. *Geologische Rundschau* 63, pp: 970-998
- Lagerwerff J.V., Akin G.W., Moses S.W., 1965** Detection and determination of gypsum in soils. *Soil.Sci.Soc.Am.Proc.*, pp: 553-540.
- Lameyre J., 1975** Roches et Minéraux : les Matériaux. Doin Editeurs, Paris, 128p.
- Lebart L., 2004** Analyse en composantes principales Cyscle postgrade de Statistique, Université de Neuchâtel, 1-50p.
- Le Brusq J.Y., Loyer J.Y., 1982** Relations entre les mesures de conductivités sur des extraits de sols de rapports sol/solution variables, dans la vallée du fleuve Sénégal *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., uol. XIX, no 3, 1982, pp : 293-301.*
- Lédée V., 1998** Etude bibliographique sur l'exploitation des formations géologiques à argile et éléments de silex de l'ouest et du sud du bassin parisien. *Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées (LCPC). Rapport de recherche, 80p.*
- Lee S.Y., Dixon J.B., Aba-Husayn M.M., 1983** Mineralogy of Saudi Arabian soil : Eastern Region. *Soil Sci.Soc.Am.J., Vol.47, pp: 321-326.*
- Legros J.P., 1986** Computerized DATA sets for soil maps in geographical information technology in field of environment. Vol. III. *Ec. Polyt. Fédér. Lauzane, Suisse, pp : 865-929.*
- Legros J., 2007** Les sols du monde. Ed. Presses Polytechniques et Universitaires romandes. 574p.
- Le houerou H.N., 1975** Deterioration of the ecological equilibrium in the arid zones of the North Africa. *F.A.O., Rome, 45-57.*
- Le houerou H.N., Claudin J., Haywood M., 1977** Etude bioclimatique des steppes algérienne (cartes 1/1.000.000). *Bull.Soc.Hist.Nat.D'Afr. du N. ; n°68.*
- Le houerou H.N., 1979 La désertification des régions arides. *La recherche, n°99, Vol.10, pp : 336-344.*
- Liu S., Nancollas G.H., 1971** The kinetics of dissolution of calcium sulfate dihydrate. *J.Inorg.Nucl.Chem., 33, pp: 2311-2316.*
- Lozet J., Mathieu C., 1990** Dictionnaire de science du sol. Ed. Technique et documentation. Lavoisier , 384p.
- MacFadden L.D., Amundson R.G., Chadwick O.A., 1991 Numerical modelling, chemical and isotopic studies of carbonate accumulation in soils of arid regions. In W.D. Nettleton (Editor), occurrence, characteristics and genesis of carbonate accumulation. *Soil Sci.Am..Publ.26, Madison, WI, pp: 17-35. Mandal P. K., Mandal T. K., 2002*
- Anion water in gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) and hemihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ). *Cement and Concrete Research, vol. 32, pp: 313-316.*

- Mashali A., 1995 Soil management practices for Gypsiferous soils. Land and Water development Division. Workshop on Management of Gypsiferous – Damascus, Syria, pp: 1-21.
- Mashali A., 1996 Soil management practices for gypsiferous soils. International Symposium on Soils with gypsum. Lieda, Catalonia, Spain, pp: 34-52.
- Marnezy A., 2004 Les roches blanches : gypse et anhydre en Haute-Maurienne. Université de Liège, Fiche environnement- commission formation éducation du C.I.S., 7p.
- M'Ba Minko N., Valet S., 2000 Effets de la sodicité et de l'alcalinité sur le fonctionnement hydrique : critère de prédiction des risques de sécheresse édaphique des sols compacts de la vallée du Niger. Poster-Scientifique registration n°66, Symposium n°29 sur l'irrigation et drainage, pp : 1-8.
- Mc Donald G. J. F., 1953 Anhydrite-gypsum equilibrium relations. Am. J. Science, vol. 251, pp: 884-898.
- McLaren R.G. , Cameron K.C., 1996 Soil science. Sustainable production and environmental protection Oxford university press. Second edition, 304p.
- McNeal B.L., Oster J.D., Hatcher J.T., 1970 Calculation of electrical conductivity from solution composition data as an aid to in-situ estimation of soil salinity. Soil Sci., 110, pp: 405-414.
- Mediouni K., 1997 Organisation et potentialités de la diversité biologique algérienne. Min. Envi., Tome II, Projet Alg. / 97/ G31/ FEM/PNUD.
- Melouk A., 1983 Etude du complexe organo-minéral en sols sales calcaires dans une zone du semi-aride (Hodna). Thèse Ingénieur d'état, I.N.A., 42p.
- Mousli O.F., 1981 Methods of evaluation and classification of gypsiferous soils and suitability for irrigated agriculture. Soil Taxonomy Workshop, A.C.S.A.D., 1980, pp: 278-320.
- Nakayama F.S., 1971 Calcium complexing and the enhanced of gypsum in concentrated sodium salt solutions. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 6, pp: 81-83.
- Nedjraoui D., Touffet J., 1994 Influence of station conditions on esparto grass production (*Stipa tenacissima* L.). *Ecologia Mediterranea* 20(1-2), pp: 67-76.
- Nedjraoui D., 2001 Ressources pastorales en Algérie. Profil Fourrager. Rapport d'étude F.A.O.- Organisation/ AG/AGP/AGPC., 33p.
- Neggazi M., 1995 Caractéristiques des sols et dynamique du gypse dans la région de Timimoune. Thèse Ing. Agro., I.N.A., El-Harrach, 72p.
- Nelson R.E, Klameth L.C., Nettleton W.D., 1978 Determinating soil gypsum content and expressing properties of gypsiferous soils. *Soil Sci.Soc.Am.J.*, 42, pp: 659-661.
- Nettelton W.D., Nelson R.E., Brasher B.R., Derr D.S., 1982 Gypsiferous soils on the western united states. In *Soil Sci. Soc.Am. special publ.*, n°10, pp: 147-168.
- Nieto K.F., Frankenberger W.T.Jr, 1985 Single column ion chromatography: I. analysis of inorganic anions in soils. *Soil Sci. Soc.Am.J.* 49, pp : 587-592.
- Norris J.M., Loveday J., 1971 The application of multivariate analysis to studies.

- II - The allocation of soil profiles to established groups: a comparison of soil survey and computer methods. *J. Soil Sci.*, 22(4), pp : 395-400.
- O'Donoghue M., 1997. Roches et Minéraux. Ed. Fontaine- Paris, Guide d'identification, 218p.
- Olivier M.A., 1984.** Soil variation in the Myre forest: its elucidation and measurement. Ph.D. Thèse, University of Birmingham, 230p.
- Ounnas A, 2000** Quantification de la croissance de *Pinus pinea* L. Dans le sous secteur littoral algérois. Thèse. Mag. Ins. Nat. Argo. El-Harrach. 88p. +annexes.
- Pedro G., 1984** La genèse des argiles pédologiques. Ses implications minéralogiques, physico-chimiques et hydriques. *Sci. Géol. Bull.* 37, 4, pp: 333-347.
- Philippeau G., 1986.** Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales. Service des Etudes Statistiques, I.T.C.F., 61p.
- Picard. J.F, 1979.** Une méthode de définition des stations en forêt : application à la forêt domaniale de Bellême. *Annales des sciences forestières - I.N.R.A.*, 36 (3), pp : 211-229.
- Poch R.M., 1992.** Fabric and Physical Properties of gypsic and hypergypsic horizons in the Ebro Valley. Ph.D. Thesis. Universities of Gent.
- Poch R.M., 1996.** Proceedings of the International symposium on soils with gypsum. Ed. Univ. Lleida, Catalonia, Spain, 97p.
- Podwojewski P., 1988.** Les vertisols de la nouvelle Calédonie. *Cah. ORSTOM. Sér. Pédol.*, Vol. XXIV, n°4, pp: 279-301.
- Podwojewski P., Pétard J., 1996.** Comparaisons entre différentes méthodes d'extraction des sels solubles et des cations échangeables dans un Vertisol à gypse de nouvelle Calédonie. *Etude et gestion des sols*, 3, 3, pp : 193-206.
- Polemio M., Rhoades J.D., 1977.** Determining cation exchange capacity: A new procedure for Calcareous and Gypsiferous Soils  
*Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, pp : 524-528.
- Porta J., 1975. Redistribuciones ionicas en suelos salinos, influencia sobre la vegetacion halofila y las posibilidades de recuperacion de los suelos con horizonte gypsic y otros suelos halomorfos de las margenes del rio Gilguela. Thèse de doctorat. E.T.S.I.A., Madrid, 261p.
- Porta J., Lopez - Acevedo M., Rodriguez R., 1986.** Técnicas y experimentos en Edafologia Vol. I : Col. Legi. Oficial E.A.C. Ediciones, Barcelona, 281p.
- Porta J., Herrero J., 1988.** Micromorphology and genesis of soils enriched with gypsum. In *Soil Micromorphology*. Douglas, L.A (edit). Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp: 321-339.
- Porta J., 1996. Methodology and Study techniques of gypsum in soils: A review International Symposium on Soils with gypsum. Lleida, Catalonia, Spain, pp: 21-33.
- Porta J., 1998.** Methodologies for analysis and characterization of gypsum in soils : A review.  
*Geoderma* 87 : pp : 31-46.

- Pouget M., 1968.** Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le sud tunisien. Cah. ORSTOM. pédologie n°3-4, pp : 310-365.
- Pouget M., 1971.** Etude agropédologique dans le Bassin du Zahrez-Gharbi au 1/100.000, wilaya de Djelfa. Etude AN.R.H (ed.) - département Sol., 2 rapports (études + annexes) + 3 cartes.
- Pouget M., 1980.** Les relations sol-végétation dans les steppes Sud Algéroises. Trav. Doc. ORSTOM. 116, 555P Soil Sci. Am.. Publ. 26, Madison, WI, pp: 17-35.
- Pouget M., 1995.** Les Gypsosols. Ed. I.N.R.A., Référentiel pédologique français, 6<sup>ème</sup> version, 332p.
- Pye K., 1980 .** Beach salcrete and eolian sand transport: evidence from North Queensland.  
J. Sed. Petrol., 50, pp : 257-261.
- Quelet R., 1964.** Précis de chimie. Tome II. Chimie Minérale. Ed. Presses Universitaires de Paris., 253p.
- Richard L.A., 1954 .** Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Department of agriculture Handbook 60, 107p. (Disponible sur <http://www.usssl.ars.usda.gov>)
- Riché G., 1976.** Les processus de formation des sols dans le bassin du Wabi Shebelle (Ethiopie). Cah. O.R.S.T.O.M., Sée. Pédol., Vol. XIV, n°3, pp : 227-243.
- Robert M., Stengel P., 1999.** Sols et Agriculture : ressource en sol, qualité et processus de dégradation. Cahiers Agricultures 8 (4), pp : 301-308.
- Robinet A., 1990.** Le comportement du gypse soumis à la dissolution. Exemple du réservoir du Mont Cenis (Savoie), surveillance de l'évolution et évaluation quantitative du phénomène. Thèse de Doctorat de l'université de Nancy, 122 p.
- Rondeux J., 1993.** La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Ed. Les Presse Agronomiques. Gembloux. Belgique. 541 p. + ill.
- Roose E., Sarrailh J.M., 1990.** Erodibilité de quelques sols tropicaux, Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. Cah. ORSTOM., Sér. Pédol., Vol. XXV, 1-2, pp: 7-30.
- Roquero E.G.-C., Perez Arias J., 1996.** Influence of slope degree and orientation on geomorphological and pedological differences on gypsiferous soils from miocene formations in central Spain. Proc. Int. Symposium on soil with gypsum. Lleida, Catalonia, Spain.
- 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, 83p.
- Rouanet. H, Lebanron. F, Le Hay. V, Ackermann. W, Le Roux. B, 2002.** Régression et Analyse géométrique des données réflexions et suggestions. Math. & Sci. hum., Mathématiques and Social Sciences, 40<sup>e</sup> année, n° 160, 2002, pp: 13-45.
- Roux M., 2005.** Analyse en composantes principales et analyse des correspondances : Deux importantes techniques pour l'exploration de tableaux rectangulaires de données. Ed. Université d'Aix – Marseille 3, I.M.E.P- C.N.R.S., 28p.

- Roy. T., Beust P., 2004.** ProxiDocs : un outil de cartographie et de catégorisation thématique de corpus. 7<sup>ème</sup> journées internationales d'Analyse statistique des données textuelles, pp : 977-985.
- R.P.F., 1990.** Référentiel Pédologique Français. Congrès Int. Sci. Sol, Kyoto, AFES, 203p.
- Ruellan A., Deletang J., 1967. Les phénomènes d'échange de cations et d'anions dans les sols. O.R.S.T.O.M., Paris. Documentations techniques n°5, 123p.
- Sabah R., 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. El-Hadj Lakhdar de Batna- Faculté des sciences, 171p.
- Safar T., Bruand A., Prost R., 1992.** Evolution structurale de la tranchée de drainage en sol argileux: importance de la nature minéralogique de l'argile. Science du Sol, Vol.30, n°3, pp : 185-192.
- Saidi. D., Le Bissonais Y, Duval O., Daoud Y., Halitim A., 2004.** Effet du sodium échangeable et de la concentration saline sur les propriétés physiques des sols de la plaine du Cheliff (Algérie). Étude et Gestion des Sols, Volume 11, 2, pp : 81-92
- Sayegh A.H., Khan N.A., Khan P., Ryan J., 1978.** Factors affecting gypsum and cation exchange capacity determinations in gypsiferous soils. Soil. Sci. Vol.125 , n°5, pp : 294-300
- Servant J.M., 1975 .** Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés du sud et du sud-ouest de la France. Thèse Montpellier, 194p. + annexe.
- Shumakov V.S., Mikhovich A.E., 1960.** The phenomenon of impulverization in the area of Elista. Soviet Soil Sci., pp: 781-782
- Singh B.R., Taneja S.N., 1977.** Effects of gypsum on mineral nitrogen status in alkaline soils. Plant and Soil, 48, pp: 315-321.
- Sipple. M., 1999 .** Réarrangements structuraux et modifications microstructurales associés aux transformations de phases dans le système CaSO<sub>4</sub> (s)H<sub>2</sub>O (g). Thèse de Doctorat de l'université de Bourgogne, 140 p.
- Skarie R.L., Arndt J.L., Richardson J.L., 1987.** Sulphate and gypsum determinations in saline soils. Soil Sc. Soc. Am. J., 51, pp: 901-903.
- SOGREAH., 1969.** Etude pédoclimatique des palmeraies de l'Oued R'hir en vue de leur mise en valeur. Superficie couverte 4400 ha + 8000ha au 1/20.000. Rapport d'étude « SOGETHA-SOGREAH », Sol + climat (Exemplaire I.N.S.I.D.), 201p. + annexes (fiches de palmeraies) + cartes d'implantations. Ingénieurs d'étude : Cortin A., De cock F., Barbier P., Leturcq P., **Baudy J.C., Breuleux F., Bruscarino A., Azzedinne H., Hertu J.Y. Stengel P., Gelin S., 1998 .** Sol : Interface fragile. Ed., INRA, Paris, 213p.
- Stoops G., Ilaiwi M., 1981.** Gypsum in arid soils. Morphology and genesis. Proceedings of the third international soil classification Workshop (eds F.H. Beinroth and A. Osman), pp 175-185. *The Arab Center for the Studies of arid zones and dry lands (ACSAD), Damascus.*

- Sumner M.E., 1993.** Sodics Soils : New perspectives. *Aus. J. Soil Res.*, 31, pp : 683-750.
- Svasek J.N., Tewindt J.H., 1974.** Measurements of sand transport by wind on a natural beach. *Sedimentology*, 21, pp: 311-322.
- Swoboda A.R., Thomas G.W., 1965.** The movement of sulphate Salts in Soils. *Soil Sci.Soc.Proceedings.*, pp: 540-544.
- Taimeh A., 1992.** Formation of gypsic horizons in some arid regions soil of Jordan. *Soil. Sci.*, 153, 6, pp : 486-490.
- Temmar N., 1995.** Caractérisation et dynamique des accumulations gypseuses en région désertique (El-Oued). Thèse Ing. Agro., I.N.A., El-Harrach, 47p.
- Thomas G.W., 1982.** Methods of soil analysis. Part2, Chemical and microbiological properties. Page A.L., Miller R.H. and Keeney D.R., eds. 2<sup>nd</sup> edition. Series Agronomy n°9, S.S.S.A. and A.S.A., Madison, Wis, USA., pp159-165.
- Thurstone L., 1947.** Multiple Factor Analysis. Ed. University of Chicago Press., 347p.
- Toomanian N., 1995.** Origin of gypsum and evolution of gypsiferous soils in North-West of Isfahan. Msc thesis. Isfahan University of Technology. Isfahan, Iran.
- Toomanian N., Jalalian A., Eghbal M.K., 2001. Genesis of gypsum enriched soils in North-west Isfahan, Iran. *Géoderma* 99, pp: 199-224.
- Touaf L., 2002.** Evaluation du niveau de salinité des sols du nord de l'Algérie. Thèse Mag. Dép.Sci.Sol, I.N.A., El-Harrach, 71p.
- Trichet J., 1963.** Description d'une forme d'accumulation de gypse par voie éolienne dans le Sud tunisien. *Bull.Soc.Géol.France*, pp :617-628.
- Trudgill S.T., 1986.** Introduction. On Trudgill S.T. (Ed). *Solute processes*. John Wiley and Son, pp: 1-14.
- U.S.D.A., 1994.** Keys to Soil Taxonomy (6<sup>th</sup> ed.). U.S.D.A. Soil Cons.Serv., Washington, DC, 306p.
- U.S.D.A., 1999.** Soil taxonomy, a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2<sup>nd</sup> ed. Agriculture handbook n°436, Washington D.C.
- U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954.** Diagnostic and improvement of saline and alkali soils. U.S.D.A. Handbook, n°60, 160p.
- Valles V., Bourgeat F., 1988.** Geochemical determination of the gypsum requirement of cultivated sodic soils. *Arid Soil Res. Rehabil.* 2, pp : 165-186.
- Verba M.P., 1996.** The forms of gypsum neoformations in the soils of Central Asian Deserts. Proc. Int. Symposium on soil with gypsum. Lleida, Catalonia, Spain.
- Vieillefon 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.
- Vieillefon J., 1979.** Contribution à l'amélioration de l'étude des sols gypseux.

Cahiers ORSTOM, Série pédologie, 17, pp :195-223.

**Vinas.A , 1980.** Etude agropédologique au 1/20.000 dans la région de Sig, wilaya de Mascara. Etude AN.R.H (ed.) - département Sol. 2 Rpports (étude + annexes) + 2 cartes.

**Voltz M., 1986.** Variabilité des propriétés physiques du sol en milieu alluvial : essai de la cartographie quantitative des paramètres hydro-dynamiques.Thèse Doc., Renne, 172p.

**Walter C., 1990 .**Estimation de propriétés du sol et quantification de leur variabilité à moyenne échelle. Cartographie pédologique et géostatistique dans le Sud de l'Ille-et-Vilaine (France)., Paris VI.

**Warren J.K., 1982.** The hydrological setting, occurrence and significance of gypsum in late quaternary salt lakes in South Australia. *Sedimentology*, 29, pp: 609-637.

**Watson A., 1979.** Gypsum crusts in deserts. *Journal of Arid Environments*, 2, pp: 3-20.

**Watson A., 1983.** Evaporite sedimentation in non marine environments. In: *Chemical sediments and geomorphology* .Ed. Gougie A.S., Pye K., Acadimic press. Lon., pp: 163-185.

**Watson A., 1985.** Structure, chemistry and origins of gypsum crusts in southern Tunisia and the central Namib Desert. *Journal of the International Association of Sedimentologists*, 32, N°6, pp: 855-875.

**Watson A., 1988.** Desert gypsum crusts as palaeoenvironmental indicators: A micropetrographic study of crusts from southern Tunisian and the central Namib Desert. *Journal of Arid Environments*, 15, pp: 19-42.

**Watson A., 1992.** Desert soils. *Developments in Earth surface Processes* 2.Weathering, soils and Paleosols.Chapitre 10, pp: 225-260.

**Webster R., 1977.** Quantitative and Numerical Methods in Soil Classification and Survey. Clarendon Press, Oxford. 269 p.

**White W.B., 1988.** Geomorphology and and Hydrology of Karst Terrains.Oxford University Press, 464p.

**Williams S. C., 1988.** The shear strength of gypsum single crystal on three cleavage Planes.

*Tectonophysics*, vol. 148, pp: 163-173.

**You W.R., Meng F.H., Xiao Z.H., Li O.Y., 1992.** Salt-water dynamics in soil.

I. Salt-water dynamics under unsaturated soils under stable evaporation conditions.*Pedosphere*, 2 , 3, pp : 219-235.

**Yuzer E., 1982.** Propriétés géotechniques des évaporites et formations évaporitiques de Turquie.Bull. Ass. Int. Géol. Eng., n°25, pp: 107-110.

**Zandouche O., 2001.** Etude comparative de la croissance de trois espèces Forestières : *Pinus pinea* L., *Pinus pinaster* Ait. et *Pinus canariensis* Ch.Smith. Aspect éco-dendrométrique.Thèse Mag. Univ. Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou, Faculté des Sciences de l'Ingénieur., D.G.R.E., 87p.

# ANNEXE

## ANNEXE II

$\alpha$ k	0,05	0,01	0,001
1	0,99692	0,999871	0,9999988
2	0,95000	0,990000	0,99900
3	0,8783	0,95873	0,99116
4	0,8114	0,91720	0,97406
5	0,7545	0,8745	0,95074
6	0,7067	0,8343	0,92493
7	0,6664	0,7977	0,8982
8	0,6319	0,7646	0,8721
9	0,6024	0,7348	0,8471
10	0,5760	0,7079	0,8233
11	0,5529	0,6835	0,8010
12	0,5324	0,6614	0,7800
13	0,5139	0,6444	0,7603
14	0,4973	0,6226	0,7426
15	0,4824	0,6055	0,7246
16	0,4683	0,5897	0,7084
17	0,4555	0,5751	0,6932
18	0,4438	0,5614	0,6787
19	0,4329	0,5487	0,6652
20	0,4227	0,5368	0,6524
25	0,3809	0,4869	0,5974
30	0,3494	0,4487	0,5541
35	0,3246	0,4182	0,5189
40	0,3044	0,3932	0,4896
45	0,2875	0,3721	0,4648
50	0,2732	0,3541	0,4433
60	0,2500	0,3248	0,4078
70	0,2319	0,3017	0,3799
80	0,2172	0,2830	0,3568
90	0,2050	0,2673	0,3375
100	0,1946	0,2540	0,3211
/	/	/	/
/	/	/	/
/	/	/	/
/	/	/	/
<b>200</b>	<b>0,1381</b>	<b>0,18088</b>	<b>0,22978</b>
<b>500</b>	<b>0,0875</b>	<b>0,11488</b>	<b>0,1464</b>

Valeurs calculées }

Les valeurs critiques de r pour  $\alpha = 0,05 ; 0,01 ; 0,001$  (table de FISHER ajustée)

## ANNEXE III

**a- structure**

(Ifen, 1989)

- 1- Massive
- 2- Grumeleuse
- 3- Grenue
- 4- Polyédrique-Subangulaire
- 5- Particulaire
- 6- Prismatique
- 7- Lamellaire
- 8- Squameuse
- 9- Motteuse
- 10- Columnaire
- 11- Cubique
- 12- Autre
- 13- Sans structure

**b-texture**

(Bernou, 1996)

- 1- Argileuse
- 2- Argilo-limoneuse
- 3- Equilibrée
- 4- Limoneuse
- 5- Limono-argileuse
- 6- Limono-sableuse
- 7- Limono-argilo-sableuse
- 8- Sableuse
- 9- Sablo-argileuse
- 10- Sablo-limoneuse
- 11- Argilo-sableuse
- 12- Sablo-argilo-limoneuse
- 13- Sablo-limono-argileuse

**c-les formes d'accumulation de gypse**

- 1- Diffuse
- 2- Amas
- 3- Cristaux et microcristaux
- 4- Continue

**d- Classes de calcaire total**

(Lozet et Mathieu, 1990)

- 1- < 2%
- 2- 2-10%
- 3- 10-25%
- 4- 25-50%
- 5- >50%

**e- Classes de gypse**

(Djili, 2000)

- 1- 0-5%
- 2- 5-15%
- 3- 15-25%
- 4- 25-50%
- 5- >50%

**f- Conductivité électrique**

(USSL, 1954)

- 1- 0-2dS/m
- 2- 2-4dS/m
- 3- 4-8dS/m
- 4- 8-16 dS/m
- 5- >16 dS/m

**ANNEXE IV**

Classe de variabilité	Valeur du C.V (%)
Faible	<15
Modérée	15 – 35
Elevée	35 – 50
Très élevée	50-100
Extrêmement élevée	> 100

*Les différentes classes du coefficient de variation (CV)*

(Mollin et Cailler, 1992 in Hemici, 1992)

## ANNEXE V

Norme	Classe de sodicité
ESP < 5	Non sodique
5 ≤ ESP < 10	Peu sodique
10 ≤ ESP < 15	Sodique
15 ≤ ESP < 20	Très sodique
ESP ≥	Excessivement sodique

*Le degrés de sodicité (ESP)*

(USSL, 1954)

## ANNEXE VI

Régressions simples	Nbre de couple	ddl	Equations de régression	r  observé	r  critique	nv de probabilité α
<b>gypse-argile</b>	393	390	$y = 0,014 x - 1,150 x + 23,370$	0,451	0,177	***
<b>gypse-limon</b>	417	414	$y = 0,014 x - 1,149 x + 24,475$	0,468	0,171	***
<b>gypse-sable</b>	483	480	$y = 0,001 x - 0,278 x + 22,172$	0,317	0,152	***
<b>gypse-calc.tot</b>	654	652	$y = -0,478 x + 24,065$	0,339	0,146	***
<b>gypse - CEC</b>	357	355	$y = -0,265 x + 14,200$	0,189	0,186	***
<b>gypse - ESP</b>	212	210	$y = -0,019 x + 8,790$	0,036	0,136	ns
<b>gypse - CE</b>	663	661	$y = 0,015 x + 15,204$	0,014	0,087	ns
<b>gypse - pH</b>	699	697	$y = 1,622 x + 3,175$	0,028	0,087	ns
<b>gypse - SO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	493	491	$y = -0,0005 x + 15,824$	0,0014	0,089	ns
<b>gypse - Ca<sup>++</sup></b>	442	440	$y = -0,001 x + 14,414$	0,0024	0,097	ns
<b>gypse - pluies</b>	726	723	$y = -0,0003 x + 0,122 x + 9,749$	0,273	0,146	***

ns : non significatif

\* : significatif

\*\* : hautement significatif

\*\*\* : très hautement significatif

*Résultats des régressions simples pour l'approche globale*

## ANNEXE VII

Régressions simples	Horizons	Nombre de couples	ddl	Equations de régression	r  observé	r  critique	nv de probabilité $\alpha$
Gypse-argile	h1	86	83	Gypse = 0,012x - 1,030x + 21,876	0,430	0,351	***
	h2	95	92	Gypse = 0,017x - 1,266x + 24,836	0,428	0,334	***
	kp	212	209	Gypse = 0,015x - 1,170x + 23,642	0,472	0,227	***
Gypse-limon	h1	90	87	Gypse = 0,009x - 0,851x + 23,700	0,424	0,345	***
	h2	104	101	Gypse = 0,020x - 1,426x + 25,920	0,455	0,321	***
	kp	223	220	Gypse = 0,013x - 1,122x + 25,150	0,239	0,234	***
Gypse-sable	h1	90	87	Gypse = 0,001x - 0,023x + 19,479	0,274	0,272	**
	h2	118	115	Gypse = 0,001x - 0,297x + 23,884	0,341	0,307	***
	kp	275	272	Gypse = 0,001x - 0,321x + 22,089	0,315	0,209	***
Gypse-calcaire	h1	137	135	Gypse = -0,760x + 26,379	0,402	0,289	***
	h2	155	153	Gypse = -0,697x + 27,796	0,409	0,272	***
	kp	362	359	Gypse = 0,011x - 0,923x + 25,213	0,339	0,185	***
Gypse-CEC	h1	73	71	Gypse = -0,125x + 13,322	0,077	0,230	ns
	h2	86	84	Gypse = -0,146x + 11,242	0,117	0,212	ns
	kp	198	195	Gypse = 0,009x - 0,630x + 17,108	0,225	0,184	**
Gypse-ESP	h1	35	33	Gypse = -0,066x + 12,375	0,069	0,334	ns
	h2	51	49	Gypse = -0,069x + 10,368	0,110	0,276	ns
	kp	126	124	Gypse = -0,014x + 8,180	0,030	0,181	ns
Gypse-CE	h1	143	141	Gypse = -0,016x + 13,817	0,024	0,171	ns
	h2	137	135	Gypse = -0,027x + 13,260	0,022	0,164	ns
	kp	363	361	Gypse = -0,162x + 17,377	0,102	0,110	ns
Gypse-pH	h1	148	146	/	0,028	0,168	ns
	h2	168	166	/	0,122	0,157	ns
	kp	383	381	/	0,028	0,124	ns
Gypse-So <sub>4</sub>	h1	143	141	Gypse = 0,003x + 15,467	0,069	0,171	ns
	h2	113	111	Gypse = -0,003x + 16,084	0,002	0,188	ns
	kp	237	235	Gypse = 0,0008x + 15,847	0,005	0,132	ns
Gypse-Ca <sup>++</sup>	h1	96	94	Gypse = -0,018x + 16,359	0,120	0,200	ns
	h2	111	109	Gypse = 0,0005x + 13,440	0,001	0,189	ns
	kp	235	233	Gypse = 0,045x + 12,665	0,240	0,220	***

ns : non significatif  
\* : significatif  
\*\* : hautement significatif  
\*\*\* : très hautement significatif.

*Résultats des régressions simples pour l'approche par catégorie d'horizons*