

**ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE EI HARRACH ALGER**  
Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en Sciences Agronomiques  
Ecole doctorale : Science du sol

# *Morphologie et propriétés des Calcisols références des hautes plaines sétifiennes*

Présenté par :  
**SALAH Djamila**  
Directeur de thèse : M. DJILI K. Professeur  
12-12-2011

Devant le jury : *Président du jury* : M. DAOUD Y. Professeur *Examineurs* : M. HAMDY AÏSSA B.  
Professeur M. DRIDI B Maître de conférence



# Table des matières

Remerciements . .	5
Résumé . .	6
Summary . .	7
ص خ لم . .	8
Liste des abréviations . .	9
Introduction . .	10
Chapitre I Etude bibliographique . .	12
1- Généralités sur le carbonate de calcium . .	12
2- La dissolution du carbonate de calcium . .	13
2-1- La température . .	14
2-2 Les teneurs en CO <sub>2</sub> . .	15
2-3- Rôle des ions H <sup>+</sup> . .	16
2-4- Rôle des cations Mg <sup>++</sup> et Ca <sup>++</sup> . .	16
2-5- La nature des sels . .	16
2-6- Le pH . .	17
2-7- Les alternances saisonnières . .	18
2-8- La dissolution de la calcite . .	18
3-La précipitation du carbonate de calcium . .	18
3-1-Formes d'accumulation du calcaire . .	19
3-2-Carbonatation in situ . .	21
4- Effet du carbonate de calcium sur les propriétés des sols . .	21
5- Relation du taux de calcaire avec les paramètres du sol . .	22
6- Distribution des sols calcaires en l'Algérie et dans le monde . .	23
7- Les sols calcaires . .	24
8- Gestion et utilisation des sols calcaires . .	25
9- Classification des sols calcaires . .	25
10- Les Calcisols (CL) de la WRB . .	26
10-1-Le groupe des Calcisols . .	26
10-2- Matériaux diagnostiques . .	27
10-3- Les unités inférieures . .	27
10-4-Associations des Calcicoles avec d autres groupes de référence . .	28
Chapitre II Matériels et méthodes . .	29
1- La région d'étude . .	29
2-Démarche méthodologique . .	29
2-1-Les Calcisols références de Sétif . .	29
2-2-Les Calcisols références d'Algérie . .	31
Chapitre III Résultats et discussion . .	33
1-Les Calcisols de la région de Sétif . .	33
1-1-Caractéristiques morphologiques et analytiques des sols étudiés . .	33
1-2-Analyse Statistiques . .	51

<b>2- Les Calcisols d'Algérie . .</b>	<b>55</b>
<b>2-1- Localisation des Calcisols du Nord de l'Algérie . .</b>	<b>55</b>
<b>2-2-Evaluation statistique de l'horizon diagnostique des Calcisols du nord de l'Algérie . .</b>	<b>58</b>
<b>Conclusion générale . .</b>	<b>63</b>
<b>Références bibliographiques . .</b>	<b>64</b>
<b>Annexes . .</b>	<b>68</b>
Annexe 1 : Matrice de corrélations entre le taux de calcaire et les différentes variables des horizons diagnostiques des Calcisols de Sétif . .	68
Annexe 2 Matrice de corrélation entre le taux de calcaire et les différentes variables du Nord de l'Algérie . .	68
Annexe 3 Critères diagnostiques des Calcisols . .	69
Annexe 4 Critères diagnostiques des Calcisols (suite) . .	70
Annexe 5 Critères diagnostiques des Calcisols (suite) . .	71
Annexe 6 Critères diagnostiques des Calcisols (suite) . .	72
Annexe 7 Critères diagnostiques des Calcisols (suite) . .	73

## Remerciements

Au terme de cette étude, je tiens à adresser ma profonde reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont soutenu, aidé et encouragé tout au long de ce travail et .en particulier :

**M. DAOUD Y.**, professeur au département de science du sol à l'ENSA d'El-Harrach, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury. Aussi, je lui suis très reconnaissante pour les conseils et les aides précieux qu'il m'a apporté à chaque fois que c'est nécessaire. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

**M. DJILI K.**, professeur au département science du sol à l'ENSA d'El-Harrach, à qui j'adresse mes vifs remerciements, d'avoir diriger ce mémoire, pour son aide efficace, sa disponibilité, ses conseils très utiles, sa patience, ses directives et ses réflexions avisées qu'il m'a apporté et qui m'ont permis de mener à terme ce travail.

**M. DRIDI B.** maître de conférence au département science du sol à l'ENSA d'El – Harrach, et **HAMDI AÏSSA B.**, maître de conférence à l'université de OUARGLA, je les remercie pour avoir accepté de juger ce travail ainsi que pour leurs critiques constructives, à plus d'un titre.

Mes vifs remerciements vont également à ma famille qui m a beaucoup soutenu tout au long de la réalisation de ce travail.

J'exprime aussi ma profonde gratitude a M. HABILA, Directeur Général de l'INSID, qui m'a permis et facilité l'accès aux études doctorales.

Mes plus profonds remerciements vont également à :

L'ensemble des enseignants (es) du département de science du sol, qui ont contribué à ma formation. Sans oublier la bibliothécaire du département MelleLARBI, pour son aide et sa gentillesse, et tous les techniciens du département (Redouane, Amar, Ahmed et Abd-elrahim).

M Kessal, Chef de département à l'INSID, qui m'a autorisé d'accéder au laboratoire pour les analyses du sol. Je ne saurais oublier tout le personnel du laboratoire de l'INSID qui m'a beaucoup aidé. Qu'il trouve ici ma profonde reconnaissance.

## Résumé

Cette recherche a porté sur l'étude de quelques Calcisols des hautes plaines sétifiennes et sur l'identification des Calcisols références de l'Algérie du Nord selon le concept de la WRB (2006). Concernant les Calcisols de la région de Sétif, cette étude a mis en évidence 5 références qui se différencient par la nature de leurs horizons diagnostiques (horizons calciques, hypercalciques et pétrocalciques) et par certaines de leurs propriétés diagnostiques (Charge caillouteuse, taches d'oxydo-réduction, texture, ESP). Ainsi, les Calcisols références recensés dans cette région sont les Petrocalcic Hypercalcic Calcisols (Densic) (Skeletal), les Petrocalcic Hypercalcic Calcisols (Sodic) (Densic) (Siltic), les Hypercalcic Calcisols (sodic) (Siltic) (Clayic), les Hypercalcic Calcisols et les Hypercalcic Calcisols (Skeletal). Les résultats ont montré aussi que les horizons diagnostiques calciques de la région de Sétif sont différemment pourvus en calcaire ( $24\% < \text{CaCO}_3 < 83\%$ ), et que leur texture et leur sodicité sont très variables ( $0,3\% < \text{ESP} < 38\%$ ). Ces horizons sont généralement basiques ( $8,2 < \text{pH} < 8,9$ ), non salins ( $\text{CE} < 1 \text{ dS/m}$ ) et peu pourvus en matière organique ( $\text{MO} < 1,7\%$ ). L'analyse de la base de données pédologique a permis d'identifier 23 Calcisols références du Nord de l'Algérie. Le regroupement de ces références en fonction de leurs horizons diagnostiques a permis de constituer quatre grandes références représentées par les Hypocalcic Calcisols (58 %), les Calcic Calcisols (27 %), les Hypercalcic Calcisols (13 %) et les Petrocalcic Calcisols (3 %). Les épaisseurs et les taux de calcaires des horizons diagnostiques sont très variables ( $15 \text{ cm} < \text{épaisseur} < 80 \text{ cm}$  ;  $15\% < \text{CaCO}_3 < 89\%$ ).

Mots clés : Calcisol, calcaire, critères diagnostiques, W.R.B (2006), profils références, Sétif, Algérie du nord.

## Summary

This research focused on the study of some of Calcisols Setif High Plains and the identification of references Calcisols on North of Algeria under the concept of the WRB (2006). Calcisols on the Setif region, this study revealed five references which differ in the nature of their diagnostic horizons (calcic horizons, and petrocalcic hypercalcic) and some of their diagnostic properties (charge stony, spots oxidation -reduction, texture, ESP). Thus, Calcisols references identified in this region are Petrocalcic Hypercalcic Calcisols (Densic) (Skeletal), the Petrocalcic Hypercalcic Calcisols (Sodice) (Densic) (Siltic), the Hypercalcic Calcisols (sodic) (Siltic) (Clayic), the Hypercalcic Calcisols and Hypercalcic Calcisols (Skeletal). The results showed that the calcic diagnostic horizons in the region of Setif are differently provided limestone ( $24\% < \text{CaCO}_3 < 83\%$ ), and texture and sodicity are highly variable ( $0.3\% < \text{ESP} < 38\%$ ). These horizons are generally basic ( $8.2 < \text{pH} < 8.9$ ), non-saline ( $\text{EC} < 1 \text{ dS / m}$ ) and is little provided with organic matter ( $\text{OM} < 1.7\%$ ). The analysis of the soil database identified 23 references Calcisols northern Algeria. The combination of these references according to their diagnostic horizons allowed to form four references represented by Hypocalcic Calcisols (58%), the Calcic Calcisols (27%), the Hypercalcic Calcisols (13%) and Petrocalcic Calcisols (3%). The thicknesses and rates of diagnostic horizons limestone are highly variable ( $15 \text{ cm} < \text{thickness} < 80 \text{ cm}$ ,  $15\% < \text{CaCO}_3 < 89\%$ ).

Keywords: Calcisols, limestone, diagnostic criteria, WRB (2006), reference profiles, Setif, Algeria North



## Liste des abréviations

- **P** : profil
- **EG** : Eléments grossiers
- **K** : perméabilité
- **Prof**d: profondeur
- **CEC** : capacité d'échange cationique (cmol(+)/kg).
- **MO** : matière organique
- **CE** : conductivité électrique (dS/m).
- **ESP** : pourcentage de sodium échangeable (%).
- **INSID** : Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage
- **CPCS**: Commission de Pédologie et de la Cartographie des Sols
- **USDA**: United State Department of Agriculture.
- **WRB**: World Reference Base for Soil Resources.
- **FAO**: Food and Agriculture Organisation.
- **O.N.M** : Office National Météorologique
- **I.N.C.T** : Institut National de Cartographie et de Télédétection.
- **Hz** : Horizons

# Introduction

Les sols calcaires existent dans toutes les grandes régions climatiques du monde, sur des roches très diverses, calcaires ou non calcaires (Ruellan, 1984). Ils sont fréquents dans les régions méditerranéennes et désertiques (Halitim, 1988 ; Mathieu, 2009). Dans les sols méditerranéens, le calcaire est très souvent un élément fondamental de description et de classification des sols (Ruellan, 1984). En Algérie, ces sols sont très fréquents et on les retrouve aussi bien dans les zones arides et semi arides (Halitim, 1988) que dans les zones humides et subhumides (Djili et Daoud, 1999).

Les travaux réalisés jusqu'à présent sur les sols calcaires en Algérie n'ont porté que sur la genèse, la formation et à la répartition du  $\text{CaCO}_3$  dans le profil et dans l'espace (Aubert, 1947 ; Durant, 1959 ; Boulaine, 1961 ; Belouam, 1976 ; Vogt, 1979 ; Pouget, 1980 ; Halitim et al., 1983 ; Ayache, 1996 ; Djili, 1983 ; Djili et Daoud, 1999 et Djili, 2000) plaçant en dernière priorité leur étude morphologique et analytique détaillée pour en faire des sols références à l'échelle locale ou nationale selon un système de classification des sols reconnu. Dans ce sens, quelques tentatives ont été effectuées pour la détermination des références relatives aux Solonchaks (Hadj Miloud, 2010) et aux Gypsisols (Rahmouni, 2010) selon le concept de la WRB.

En ce qui concerne les sols calcaire d'Algérie, ils sont généralement classés comme étant des sols peu évolués, calcimagnésiques et isohumiques par la CPCS (1967) et comme des inceptisols (xerochrepts), des aridisols (argids), des mollisols (rendolls et xerolls) par Soil Taxonomy (U.S.D.A., 1967) (Ruellan, 1976). Aujourd'hui, La WRB apparaît désormais comme un cadre consensuel pour la classification des sols du monde (Mathieu, 2009).

Les Calcisols occupent une superficie d'environ 800 millions d'hectares soit 6,3% de la surface de la terre (FAO, 1998). Ils sont principalement répartis dans les zones arides, semi-arides et sub-tropicales des deux hémisphères (FAO, 1998). Ils couvrent uniquement 10 000 km<sup>2</sup> des sols de l'Europe, soit 0.22% de la surface totale des sols où ils sont représentés par deux références dominantes, les Aridic Calcisols en Espagne et les Haplic Calcisols à Malte (317km<sup>2</sup>) (Tóth et al, 2008). Les Calcisols sont observés également dans la partie septentrionale du bassin méditerranéen (Mathieu, 2009). La légende FAO (1989) aux petites échelles ne fait ressortir pour l'Algérie que 3 groupes de sols qui sont les Cambisols, les Inceptisols et les Calcisols. Ces groupes ne sont présentés qu'au niveau le plus haut de la hiérarchie du référentiel de la FAO et, par conséquent, l'information pédologique tirée de ce document est limitée. C'est pourquoi, il est utile aujourd'hui d'étudier les sols calcaires d'Algérie et de rechercher dans quelle mesure ils peuvent se rattacher au groupe des Calcisols selon le concept du référentiel de la FAO (WRB, 2006) et constituer des Calcisols références. Cet objectif permettra par la suite de mieux cartographier ce type de sol et de faciliter l'échange d'une information pédologique normalisée avec les différents partenaires nationaux et internationaux. La présente recherche constitue donc une contribution à une meilleure connaissance des sols d'Algérie, en particulier les Calcisols.

Le présent travail s'assigne deux principaux objectifs. Dans le premier, il s'agit d'étudier en détail quelques Calcisols des hautes plaines sétifiennes pour rechercher dans quelle

mesure ils peuvent constituer des sols références selon la WRB (2006). Dans le deuxième, il s'agira d'exploiter une base de données pédologiques du Nord de l'Algérie pour identifier tous les profils références qui répondent à la définition des Calcisols selon la WRB et de les regrouper en profils de références.

Le choix de la région de Sétif s'est basée sur l'étude de Djili (2000) qui a montré dans quelles isohyètes il y a l'accumulation préférentielle du calcaire.

Pour présenter cette étude, nous avons organisé ce document autour de trois chapitres :

- Le premier chapitre est une étude bibliographique synthétique où nous présentons l'état des connaissances relatives au calcaire, aux sols calcaires et aux Calcisols. Ces derniers seront détaillés selon la WRB (2006).
- Le second chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude, la démarche méthodologique suivie sur le terrain et au laboratoire pour l'identification des Calcisols références de Sétif. Dans ce même chapitre, nous présentons la démarche suivie pour l'exploitation de la base de données du nord de l'Algérie pour identifier les Calcisols références.
- Les résultats et leur discussion sont présentés dans le troisième chapitre qui sera suivi par une conclusion générale.

# Chapitre I Etude bibliographique

## 1- Généralités sur le carbonate de calcium

Le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) se compose d'un ion carbonate ( $\text{CO}_3^{-2}$ ) et d'un ion calcium ( $\text{Ca}^{+2}$ ), sa masse molaire est de 100 g/mole (Dercourt et Paquet, 1999). C'est le composant principal du calcaire, de la craie et du marbre. C'est aussi le principal constituant des coquilles d'animaux marins, du corail et des escargots. Le carbonate de calcium se cristallise naturellement en principales formes : l'aragonite et la calcite. Il peut se présenter, dans les processus de cristallisation, sous forme de calcite à symétrie rhomboédrique comme le constituant essentiel des calcaires (De Os Horta, 1979 ; in Djili, 2000). Pouget (1980) et Halitim (1988) ont montré que dans les zones arides (où l'individualisation de calcaire est forte), le taux de carbonate de calcium est très important et sa cristallisation peut se présenter en forme de rhomboèdres, de bâtonnets et de baguettes.

Le carbonate de calcium est un sel composé d'une base forte ( $\text{Ca(OH)}_2$  -  $\text{pKa} = 12,6$ ) et d'un acide faible ( $\text{H}_2\text{CO}_3$  -  $\text{pKa} = 6,35$ ) (Dercourt et Paquet, 1999). Sa solubilité dans l'eau pure à 25°C est très faible, elle est de l'ordre de 15 à 20 mg/l à. Sous l'action de l'eau de pluie, chargée en acide carbonique ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), le calcaire se dissout pour former du bicarbonate de calcium ( $\text{Ca}(\text{CO}_3\text{H})_2$ ). De ce fait, le calcaire tend à disparaître des sols sous l'action des eaux de pluie, mais la solution du sol et la surface des colloïdes s'enrichissent en calcium (Cailleau et al, 2009).

Le calcaire est une roche sédimentaire principalement organogène qui peut être d'origine détritique ou chimique, composée majoritairement de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  mais aussi de carbonate de magnésium  $\text{MgCO}_3$  (Lozel et Mathieu, 1990). Lorsque la roche calcaire comporte une proportion non négligeable d'argile, elle devient une marne (Lozel et Mathieu, 1990).

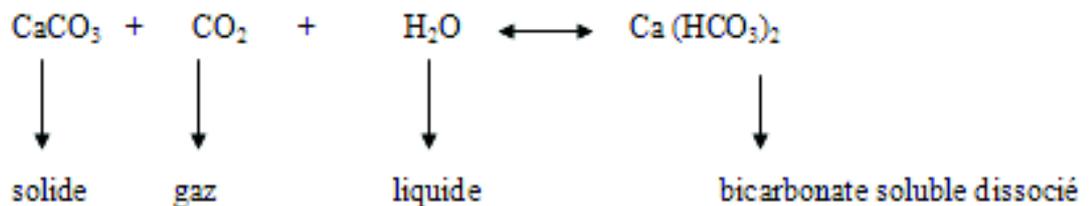
Sur le terrain, on identifie le carbonate de calcium dans les horizons (calcaires) par le degré d'effervescence en utilisant une solution HCl (10 %) et par sa teinte blanche, rosâtre ou rougeâtre. L'utilisation du pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ) permet de faire la distinction entre des accumulations à caractère basique (calcique) ( $8 < \text{pH} < 8,7$ ) dues à la dominance de  $\text{CaCO}_3$  et des accumulations à caractère ultrabasique (non calcique) ( $\text{pH} > 8,7$ ) dues à la présence de  $\text{MgCO}_3$  ou de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (W.R.B., 2006). Pour une estimation quantitative du  $\text{CaCO}_3$ , la méthode utilisée au laboratoire est la « calcimétrie volumétrique », c'est-à-dire par mesure de volume du  $\text{CO}_2$  dégagé, suite à l'action d'un excès d'acide chlorhydrique sur un poids connu de l'échantillon (Baize, 2000)

Le carbonate de calcium rentre dans les plus importants processus de la formation des sols calcaires. Il peut se déplacer des horizons de surface (par décalcarification) vers les horizons de profondeurs où il va s'accumuler sous certaines conditions spécifiques. Cependant, les principaux phénomènes de dissolution et d'accumulation du  $\text{CaCO}_3$  dans le

sol sont régis par plusieurs facteurs comme la pression partielle du  $\text{CO}_2$ , les concentrations des ions dans la solution du sol, la température et le pH entre autres.

## 2- La dissolution du carbonate de calcium

La dissolution du calcaire dans les sols se fait essentiellement par l'eau de pluie chargée en  $\text{CO}_2$ . Ce phénomène est d'autant plus important que la teneur en dioxyde de carbone dissout est importante et que l'eau est abondante (Legros, 2007). L'équation élémentaire qui illustre la dissolution du  $\text{CaCO}_3$  est la suivante :



Le comportement du  $\text{CaCO}_3$  dans le sol dépend en général des équilibres du système  $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ . Ces équilibres réglés en partie par les interfaces solide/liquide/gaz sont en relation directe avec la dynamique de l'eau dans le sol et les cinétiques de dissolution de carbonate de calcium et du  $\text{CO}_2$  (Benabdi, 1993). Les carbonates sont présentées dans les 3 phases, solide (carbonate de calcium ou de magnésium), liquide (ions carbonatés  $\text{CO}_3^{2-}$  et hydrogène-carbonates  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) et gazeuse ( $\text{PCO}_2$ ). Il représente donc l'un des points majeurs du couplage dans un système carbonaté triphasique (Besnard, 2000). La figure 1 représente tous les ions et composés qui interviennent dans la dissolution du carbonate de calcium.

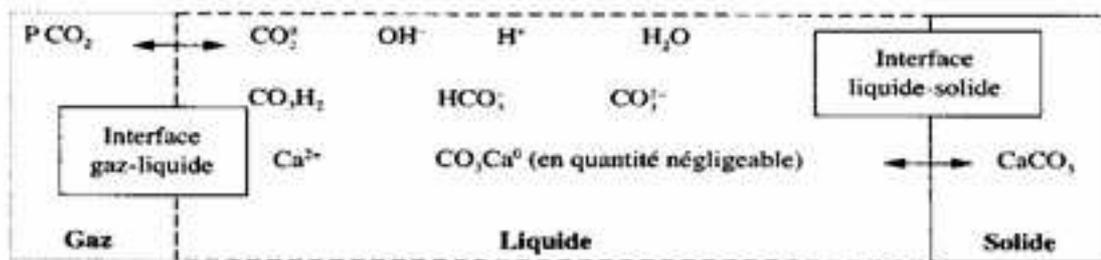


Figure 1 . Les espèces chimiques dans le système  $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O-CO}_2$  (Legros, 2007)

Les carbonates du sol réagissent avec les espèces chimiques dissoutes dans la solution du sol. Les réactions élémentaires de dissolution qui peuvent se produire sont les suivantes (Plumer et Call, 1978) :

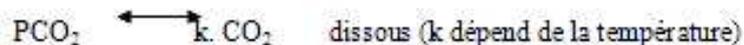


Ces réactions chimiques forment un « système couplé » complexe qui permet de rendre compte de manière satisfaisante le processus de dissolution de la calcite. Lorsque le système chimique est à l'équilibre (équation 4), la solution est dite saturée.

La solubilité du  $\text{CaCO}_3$  dépend des paramètres du milieu lié au sol, à l'eau et à l'atmosphère. Les principaux paramètres sont la température, la pression en  $\text{CO}_2$ , les ions  $\text{H}^+$ , les cations  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{Ca}^{++}$ , la nature des sels, le pH, l'alternance saisonnière et la dissolution de la calcite.

## 2-1- La température

Le carbonate de calcium est soluble dans l'eau chargée en  $\text{CO}_2$ . Cependant, la solubilité du gaz  $\text{CO}_2$  dans l'eau augmente avec la pression et diminue avec la température élevée. Lorsque la température diminue, la pression partielle de  $\text{CO}_2$  ne variant pas et la concentration en  $\text{CO}_2$  augmente (Morse et al., 2002). En effet, la figure 2 montre que pour une température de  $20^\circ\text{C}$ , le  $\text{CO}_2$  dissout est de  $1500 \text{ mg/l}$  et pour une température de  $40^\circ\text{C}$ , le  $\text{CO}_2$  dissout est de  $1000 \text{ mg/l}$ . Les carbonates se dissolvent donc mieux dans l'eau froide, chargée en  $\text{CO}_2$  et qui est donc plus agressive que dans l'eau chaude. C'est pourquoi les phénomènes karstiques sont bien développés en montagne (Legros, 2007). L'équation mise en cause est la suivante :



La température a un effet sur l'équilibre chimiques, les activités des espèces et sur les produits de solubilité.

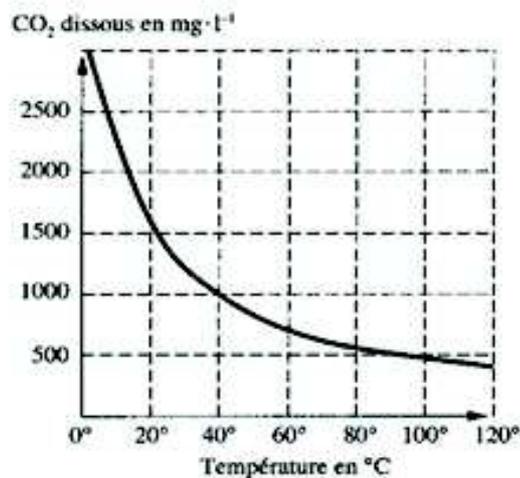


Figure 2 . Solubilité du CO<sub>2</sub> dans l'eau à la pression atmosphérique et sous atmosphère de gaz pur (BRGM, 1997).

## 2-2 Les teneurs en CO<sub>2</sub>

Nous avons vu que la teneur en CO<sub>2</sub> dépend de la température. Elle est liée également à l'activité biologique dans les sols (Legros, 2007). Les teneurs élevées en CO<sub>2</sub> dans le sol résultent de l'activité des plantes, des microorganismes du sol et surtout de la décomposition de la matière organique. La solubilité de CaCO<sub>3</sub> varie en fonction de la pression partielle en CO<sub>2</sub> (Durand, 1980). La figure 3 montre que l'augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> du sol provoque la dissolution de la calcite ; par conséquent, la concentration en Ca<sup>++</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans la solution du sol augmente (Bolt et Bruggenwet, 1979). L'activité biologique est donc susceptible de charger en CO<sub>2</sub> l'eau de pluie et de multiplier par trois, et même davantage, l'agressivité correspondante (Legros, 2007).

Par ailleurs, la quantité de CO<sub>2</sub> est liée à l'aération du milieu. Chamayou et Legros (1989) ont montré que dans le sol où les pores sont fermés, tout le CO<sub>2</sub> disponible est dissout. En conséquence, le pH augmente jusqu'à atteindre les alentours de 10 (tableau I). La dissolution du CO<sub>2</sub> a donc des conséquences sur la variation du pH et la dissolution du carbonate (Zemoura, 2005)

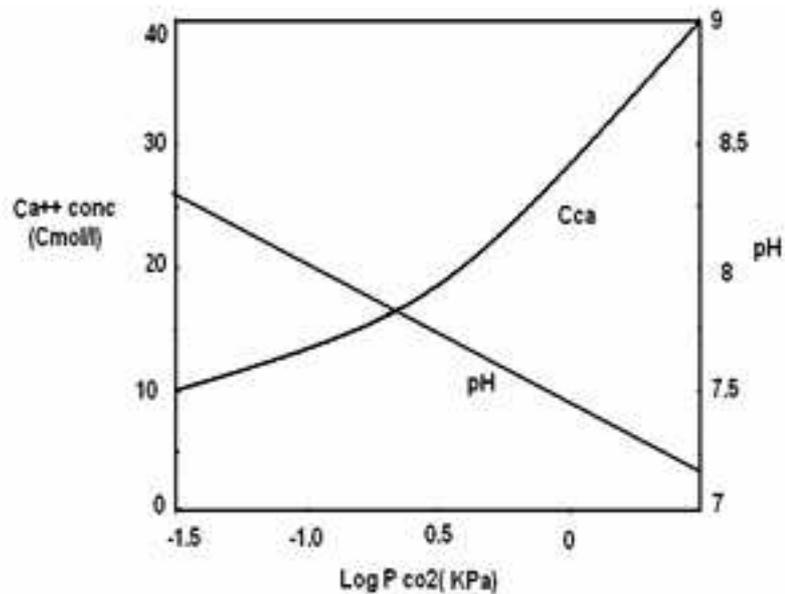


Figure 3 . Solubilité de la calcite à différentes pressions du CO<sub>2</sub> et variations de pH (Bolt & Bruggenwet, 1979)

Tableau I . Dissolution du CaCO<sub>3</sub> en milieu ouvert et fermé à l'aération

---

Paramètres	Système ouvert à l'air	Système fermé à l'air
Ca <sup>+2</sup> mg/ l CaCO <sub>3</sub> total pH teneur finale en CO <sub>2</sub> mg/l	16 49 8.3 0.44	6.0 12.5 9.95 0

### 2-3- Rôle des ions H<sup>+</sup>

---

La dissolution du CaCO<sub>3</sub> augmente en présence des H<sup>+</sup> fournis par l'humus et la végétation (acides organiques) (Robert et al., 1980). Au niveau des milieux de la rhizosphère, certaines espèces calcicoles acidifient le milieu en excréant des H<sup>+</sup> et des acides organiques. Elles créent donc une zone décarbonatée par dissolution du CaCO<sub>3</sub> autour des racelles (Jaillard, 1987). La réaction qui illustre les H<sup>+</sup> dans le sol est la suivante :



Cette réaction montre que l'étape de la nitrification libère des ions H<sup>+</sup>. Ces derniers, s'ajoutent à ceux de la solution du sol et accentuent ainsi la dissolution des carbonates de calcium dans le sol. Aussi, Durant (1980) a montré qu'il existe une bonne corrélation entre les teneurs en Ca<sup>++</sup> et en nitrates dans les eaux de drainage et dans le sol quand le pH devient acide.

### 2-4- Rôle des cations Mg<sup>++</sup> et Ca<sup>++</sup>

---

La solubilité de la calcite dépend du rapport Mg/Ca en % dans la solution du sol. Certes, la relation n'est pas linéaire mais le maximum de la solubilité est obtenu à une valeur de 10% de la concentration du Mg/Ca (Muxart et Birot, 1977). Si la quantité du Mg et du Ca est identique, l'eau sera agressive et dotée d'un fort pouvoir de dissolution (Legros, 2007).

### 2-5- La nature des sels

---

La solubilité du CaCO<sub>3</sub> est liée à la nature des sels de la solution du sol. La figure 4 indique que la présence du sel MgCl<sub>2</sub> dans la solution du sol fait augmenter beaucoup plus la solubilité du CaCO<sub>3</sub> qu'en présence de NaCl (USSSL, 1954). La présence des bivalents (Mg<sup>+2</sup>), changent donc la force ionique et diminuent les coefficients d'activité. Ce changement provoque par conséquent, l'augmentation de la solubilité de la calcite.

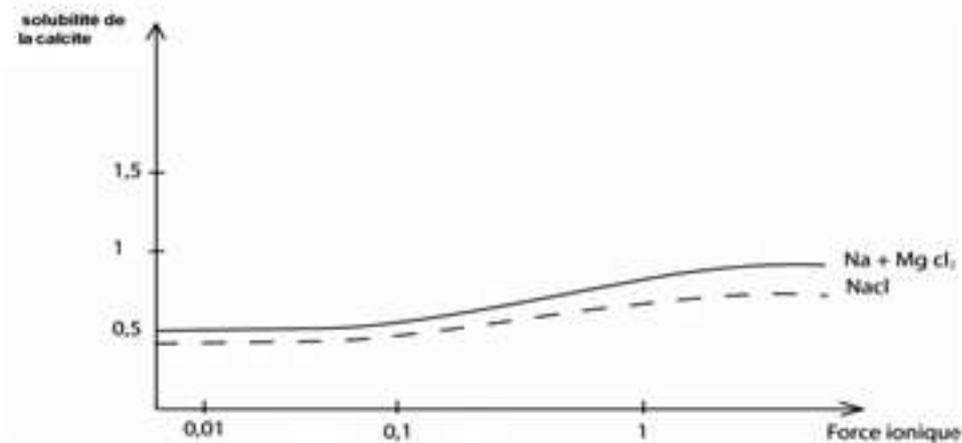


Figure 4. Effet de la nature des sels sur la solubilité du  $\text{CaCO}_3$  (USSL Staff, 1954)

## 2-6- Le pH

Dans une solution saturée vis-à-vis du carbonate, la variation du pH se fait selon l'équilibre du système  $\text{CaCO}_3/\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ . Le pH de la solution d'équilibre sera de 8,4 lorsque l'équilibre entre une phase solide  $\text{CaCO}_3$  et l'eau sous une pression de  $\text{CO}_2$  de  $10^{-35}$  atm est atteint (Bui et al., 1990 ; Callot et al 1978). Les résultats de ces chercheurs ont montré que la dissolution du  $\text{CaCO}_3$  dans une solution entraîne la variation du pH. Ceci est fonction du rapport de  $[\text{CaCO}_3] / [\text{H}_2\text{CO}_3]$ . Le pH augmente lorsque la concentration en  $\text{H}_2\text{CO}_3$  diminue et les concentrations en  $\text{HCO}_3^-$  et en  $\text{CO}_3^{--}$  augmentent (figure 5) (Zemoura, 2005).

Par ailleurs, l'étude de la relation qui existe entre le pH et le taux de calcaire des sols du nord de l'Algérie ressort que, l'augmentation des taux de calcaire entre 0 et 2,5% a un effet positif sur l'augmentation du pH jusqu'à 7,82 (Djili et Daoud, 1999 ; Djili, 2000).

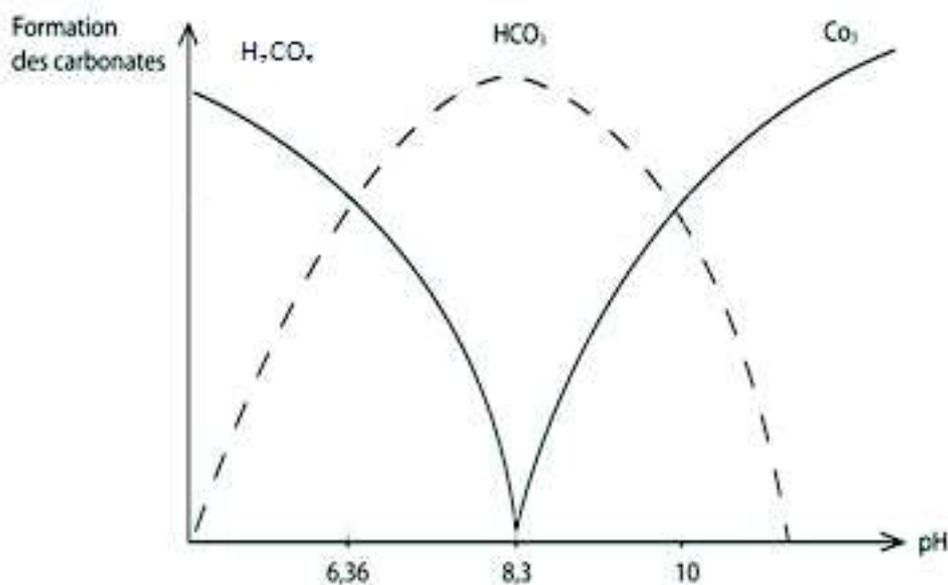


Figure 5 . Effet du pH sur la distribution des carbonates dans la solution du sol

## 2-7- Les alternances saisonnières

---

Le cycle d'humectation-dessiccation, en climat méditerranéen, provoque en période sèche la rétraction des argiles. Cette dernière peut détacher avec elle les pellicules de la calcite qui entourent les éléments grossiers calcaires du sol. Par conséquent, ces pellicules vont être facilement solubilisées ultérieurement dès que les conditions du milieu sont réunies (Lamoiroux, 1970).

## 2-8- La dissolution de la calcite

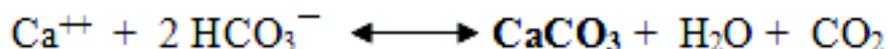
---

L'étude de Callot et al. (1980) et Delmas et al. (1987) sur la dissolution de la calcite en utilisant le microscope électronique à balayage a montré que la corrosion de la calcite paraît sous formes de pyramides en creux. Ces dernières finissent par se recouper constituant alors des pointes acérées et légèrement déjetées. Les formes de dissolution dépendent de plusieurs facteurs comme le pH et donc les teneurs en CO<sub>2</sub>, et le flux hydrique important. En revanche, quand le flux d'eau est lent, c'est la diffusion qui l'emporte, les formes de surface ont tendance à devenir lisses et arrondies (Delmas et al., 1987). La dolomite quant à elle, elle se corrode irrégulièrement vu qu'elle est une roche peu soluble (Robert et al., 1980).

## 3-La précipitation du carbonate de calcium

Contrairement à la dissolution, les conditions de précipitation du carbonate de calcium sont dues à l'augmentation de la teneur en Ca<sup>++</sup> et à la diminution de la pression partielle du CO<sub>2</sub>. Cette diminution pourrait être due à l'influence des facteurs du milieu entre autre, la

réduction de l'activité biologique. La concentration en  $\text{Ca}^{++}$  peut augmenter quand la teneur en eau du sol diminue à cause de l'évaporation, de la succion racinaire et de l'abaissement de la nappe et/ou de la présence des ions co-précipitants du calcium (ex :  $\text{Mg}^{++}$ ) (Ribolzi, 1993). La réaction qui résume ce phénomène s'écrit comme suit :



L'augmentation de la concentration en  $\text{Ca}^{++}$  est due, d'une part, à la solution carbonatée qui traverse les horizons non décalcifiés et, d'autre part, à la diminution ou même disparition de cette eau lorsqu'elle se déplace vers un milieu plus sec. Autrement dit, quand l'eau disparaît du sol, l'air occupe tous les pores, par conséquent, le  $\text{CaCO}_3$  précipite (Legros, 2007).

### 3-1-Formes d'accumulation du calcaire

La précipitation du carbonate de calcium donne plusieurs formes allant de la taille microscopique à la taille métrique. Les principales formes distinguées sont :

- Les stalactites et les stalagmites

Ce sont des précipitations du  $\text{CaCO}_3$  issues du dégazage du gaz carbonique de la solution de bicarbonate de calcium (cas des grottes) (Legros et al., 1987). L'eau, chargée de dioxyde de carbone, dissout le calcaire des roches qu'elle traverse et, en arrivant au contact de l'air, plus chaud, des cavités, elle dépose la calcite transportée. Celle-ci s'accumule en *stalactites* aux endroits où l'eau se détache du plafond ou en stalagmites aux endroits où les gouttes d'eau tombent sur le sol (Dercourt et Paquet, 1999).

- - Les aiguilles de calcite

Ce sont des accumulations de la calcite sous formes empilées dans deux directions et formant ainsi des aiguilles. On les rencontre dans les interstices qui séparent parfois les racines et sols voisins (rhizosphère) et dans les grottes. Selon Legros (2007), les hyphes mycéliums sont souvent allongés au contact de ces aiguilles. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les hyphes peuvent creuser des sillons sur les faces de la calcite (Pottier, 1986) ou que les hyphes se servent des aiguilles comme tuteur ou encore que les aiguilles peuvent se former au sein des hyphes (Callot et al, 2009). Les aiguilles sont souvent associés à la bactérie *Macromonas bipunctata* qui excréterait les acides organiques nécessaires à leur cristallisation (Mason-Williams, 1961).

- Les cellules calcifiées

L'observation de la rhizosphère au microscope électronique permet de mettre en évidence des cellules calcifiées (cristaux de calcite) (Jaillard, 1987). En effet, les cellules des racines peuvent absorber le calcium qui se précipite sous forme de  $\text{CaCO}_3$  dans les vacuoles, entraînant progressivement la mort des racines. Ces dernières sont par la suite libérées dans le sol et elles prennent plusieurs formes. Elles sont de taille moyenne de  $80\mu\text{m}$ , leurs formes sont arrondies et vacuolaires. Dans certains sols, ces cellules peuvent rentrer dans la constitution de la fraction du sable fin et en représenter jusqu'à environ 25%. Le mécanisme

de précipitation du  $\text{CaCO}_3$  dans les vacuoles ne se réalisera que si le pH de celles-ci est basique. Toutefois, le mécanisme biochimique n'a pas encore été complètement élucidé (Legros, 2007).

Ruellan (1980) a montré également que l'accumulation du calcaire dans le sol se fait sous différentes formes :

- Accumulation diffuse :

C'est une accumulation sans individualisation de calcaire dans la fraction fine (2 à 20 micron) du sol. Ceci peut induire à l'apparition des pseudo-mycéliums.

- Amas friables, granules et nodules :

Ce sont des concentrations de calcaire de formes et de dimensions très variées (quelques mm à quelques cm) dans un ou plusieurs horizons du sol. Les granules et nodules sont plus ou moins durcis, de couleur saumon ou blanche. Par contre, les amas sont friables et de couleur blanche à crème. Dans certains sols, et particulièrement dans les lœss, ces nodules sont parfois soudés par deux ou trois, d'où leurs noms de **poupées calcaires**. Il est également fréquent de trouver dans les sols des accumulations de calcaire sous forme de tuyaux vides. Ceci est dû à l'eau chargée de calcium en contact avec les racines où le calcaire se précipite par assèchement et prend ainsi la forme de la racine, d'où le nom **manchons racinaires**.

- Encroûtements :

C'est l'accumulation des amas, des granules et des nodules calcaires au point de faire disparaître la couleur sombre (brune ou rougeâtre) des horizons. La teneur en calcaire peut dépasser 60 %. L'encroûtement peut être soit crayeux ou tufeux de couleur claire et finement feuilleté, soit nodulaire.

- Croûtes :

Ce sont des formations calcaires ( $\text{CaCO}_3 > 70 \%$ ) à structure feuilletée discontinue pouvant atteindre quelques cm d'épaisseur. La croûte est de couleur blanc crème et si elle est dure (transformation vers une dalle), sa couleur devient rose.

- Dalle compacte :

elle est constituée de plusieurs feuillets calcaires, compacts, durs et continus de structure massive pouvant atteindre 10 à 20 cm d'épaisseur.

- Pellicule rubanée :

Elle est constituée de lamelles fines, de couleur blanche ou saumon, très calcaire ( $\text{CaCO}_3 > 80 \%$ ), très dure, son épaisseur varie de quelques millimètres à quelques centimètres. Elle enrobe généralement les dalles calcaires.

Généralement, les processus du cheminement des carbonates de calcium se fait comme suit (Vogt, 1984) :

Altération-dissolution → mobilisation → transport → précipitation-sédimentation  
→ induration → recristallisation

La formation des croûtes dans les milieux aérés se fait généralement par la solubilisation et le

déplacement du calcium vers les horizons de profondeur du profil. A ce niveau, le calcaire se précipite sous différentes formes (amas, nodules, ...). Le  $\text{CaCO}_3$  forme donc localement des amas indurés qui se transforment avec le temps en prise en masse dure généralisée (croûte). En période humide, la circulation de l'eau devient beaucoup plus latérale qu'horizontale. Par conséquent, la partie supérieure de la croûte est alors resolubilisée puis reprécipitée et recristallisée en période sèche. Cette alternance des saisons (humide/sèche) et des carbonates de calcium (mobilisation/dépôt) donne avec le temps la formation d'une structure feuilletée horizontalement. La formation de la croûte feuilletée est donc fonction du climat (Legros, 2007). Ces croûtes apparaissent beaucoup plus dans les régions méditerranéennes telles que le sud de la France et le Maghreb (Laouina et Vaudour, 1998 ; Vogt, 1984). Dans ce sens, Djili (2000) et Djili et Daoud (1999) ont montré que les croûtes calcaires apparaissent dans les régions semi arides et arides (pluviométrie  $<450\text{mm/an}$ ) de l'Algérie.

Le déplacement vertical du calcium des horizons de surface ne suffit pas pour expliquer la formation des croûtes calcaires. L'intervention d'autres facteurs, comme le relief et de la circulation latérale des solutions carbonatées contribuent à une grande diversité morphologique de la croûte. En effet, l'amont calcaire est à l'origine de l'accumulation du calcaire sous formes de croûtes épaisses en bas de pente (Ruellan, 1980). Les croûtes peuvent être fréquentes à l'aval des glacis, éboulis et aux dépôts alluviaux (Legros et al., 1987).

### 3-2-Carbonatation in situ

---

Les carbonates de calcium peuvent apparaître et se former in-situ. En bas de pente, par exemple, les forts taux de  $\text{CaCO}_3$  peuvent remplacer tous les minéraux tels que le quartz, les micas, les feldspaths et les argiles (Paquet et Ruellan, 1993). En effet, Dans les milieux où le climat est sec, la porosité est faible, les apports en  $\text{CO}_2$  sont faibles en période de saturation par l'eau et le pH est parfois très élevé ( $\text{pH} > 10$  quand il y a la présence de  $\text{Na}^+$ ), la solubilité de la silice devient importante (Ruellan, 1984). La dissolution du quartz et des silicates permet à la solution carbonatée en période humide de pénétrer et en période sèche de précipiter. Par conséquent, le volume des silicates sera progressivement remplacé par le calcaire, d'où le nom l'**épigénie**.

Par ailleurs, en zones arides, les accumulations calcaires sont souvent accompagnées par la sépiolite et la palygorskite (Amudson et al., 1989). Cependant, l'argile qui domine le plus est la palygorskite néoformée (argile fibreuse et riche en Mg). Les observations microscopiques de ces sols montrent que la fraction quartzreuse est soumise à des phénomènes de dissolution et de remplacement parfois isovolumique (épigénie) par la calcite (Halitim, 1988). Par contre, elles sont accompagnées de smectites et d'hématite en climat semi-aride (Legros et al., 1987).

## 4- Effet du carbonate de calcium sur les propriétés des sols

---

Le carbonate de calcium confère au sol des caractéristiques spécifiques en termes de comportement physique et chimique et influe sur son activité biologique. Le calcaire, à un certain seuil, a une action floculante sur les colloïdes minéraux et organiques du sol. Ceci induit un état structural satisfaisant et stable (à des taux de  $\text{CaCO}_3 < 5\%$ ), et peut permettre aux sols de créer des réserves en éléments nutritifs (Duchaufour, 2001). En revanche, les sols à pH élevé et à excès d'ions  $\text{Ca}^{++}$  ou bicarbonate dans la solution du sol, provoquent :

- la saturation du complexe adsorbant en  $\text{Ca}^{++}$  au détriment des autres cations ( $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ) qui peuvent alors faire défaut,
- l'insolubilisation éventuelle d'oligo-éléments indispensables à la plante (bore, fer, manganèse) et des carences en certains éléments nutritifs (N, Zn, Fe et le P).

L'interaction du  $\text{Ca}^{++}$  avec d'autres éléments comme le phosphore est à l'origine de la chlorose ferrique. La sensibilité à cette dernière dépend des espèces arboricoles et des assemblages avec certains porte-greffe (Riser et al., 1999). Selon Michaud (2007), les problèmes liés à une phytodisponibilité excessive de Cu pour le blé dur seront vraisemblablement rencontrés très majoritairement dans les sols calcaires en lien avec un risque élevé d'apparition d'une chlorose ferrique. Néanmoins, la faible concentration en  $\text{CaCO}_3$  dans les sols peut avoir un rôle positif. L'ion  $\text{Ca}^{++}$  sert comme pont pour la fixation de l'ion phosphorique qui reste alors sous forme échangeable (Gervy, 1970).

Certaines espèces calcicoles créent une zone décarbonatée par dissolution du calcaire autour des racelles. Il est fréquent que ce calcaire reprécipite au sein de la zone racinaires (Jaillard, 1987). Cette insolubilisation de la calcite autour des racines mortes est un obstacle à la minéralisation de la matière organique par effet d'enrobage (Morel, 1996).

## 5- Relation du taux de calcaire avec les paramètres du sol

Le carbonate de calcium peut se trouver en relation avec les variables du sol et de l'environnement. Ainsi, des études, notamment en Algérie (Halitim, 1988 ; Ayache, 1996 ; djili et al., 1999 ; Djili, 2000 et Berkal, 2006) ont montré que le taux de  $\text{CaCO}_3$  peut être lié à la pluviométrie, aux taux d'argile et de gypse, à la CE, la MO et à la CEC. Les principaux résultats ont montré que les teneurs en argile ne commencent à avoir un effet significatif sur les taux de calcaire qu'à partir d'un seuil de 30 % d'argile. Autrement dit, à partir de ces teneurs, les taux de calcaire diminuent. La CEC suit la même tendance que l'argile. Pour des teneurs élevées en  $\text{CaCO}_3$  dans le sol, les taux d'argile diminuent et la CEC diminue aussi. Le gypse peut se trouver en forte proportion dans le sol lorsque le taux de  $\text{CaCO}_3$  est inférieur à 20 %. Les faibles teneurs en MO sont obtenues pour des teneurs en  $\text{CaCO}_3$  inférieures à 20 %. Le calcaire n'a d'effet sur la CE qu'à partir d'une teneur de 30 %. Quant à la pluie, elle influence le taux de calcaire par la hauteur de ses précipitations, quand la hauteur des pluies augmente, les taux de  $\text{CaCO}_3$  dans le sol diminuent.

## 6- Distribution des sols calcaires en l'Algérie et dans le monde

Plusieurs auteurs ont étudié la distribution des taux de calcaire dans les sols (Aubert, 1947 ; Durant, 1959 ; Boulaine, 1961 ; Belouam, 1976 ; Vogt, 1979 ; Pouget, 1980 ; Halitim et al, 1983 ; Ayache, 1996 ; Djili, 1983 et 2000). Il ressort que les sols d'Algérie sont généralement bien pourvus en calcaire, allant des concentrations diffuses aux formes discontinues et continues. Selon Djili et al (1999), la distribution des taux de calcaire dans l'espace et dans le profil est régie par la pluviométrie. Les taux de calcaire dans les sols augmentent aussi bien du nord vers le sud que du haut vers le bas du profil en fonction de la hauteur des pluies. En effet, les forts taux en calcaire se localisent particulièrement dans les zones intérieures (régions steppiques et hauts plateaux) où la pluviométrie est inférieure à 500mm. Dans le profil, l'accumulation moyenne du taux de  $\text{CaCO}_3$  varie de la surface vers la profondeur de 20 à 29 %. Aussi, les teneurs maximales en  $\text{CaCO}_3$  des horizons peuvent atteindre ou dépasser 80% en dessous de 450 mm de pluviométrie annuelle (Djili et al, 1999). L'accumulation du calcaire est donc accentuée beaucoup plus dans les horizons de profondeur (Ruellan, 1984 ; Halitim, 1988). En revanche, dans les zones humides et subhumides, les sols sont moins pourvus en carbonate de calcium. En outre, la carte des sols du monde au 1/1 000 000 (FAO, 1989) montre que les Calcisols en Algérie se localisent uniquement dans les régions semi-arides.

Par ailleurs, il est difficile de quantifier avec précision la surface des Calcisols dans le monde entier, car beaucoup de ces sols se trouvent associés à d'autres sols tels que les Solonchack (WRB, 2006). Selon FAO (1998), la superficie totale couverte par les Calcisols dans le monde est estimée à environ 800 millions d'hectares (tableau II), soit 6,3% de la surface de la terre. Ces sols se localisent principalement dans les zones arides, semi-arides et sub-tropicales des deux hémisphères (figure 6).

**Tableau II . Superficie des Calcisols (en 1000 ha) dans le monde (FAO, 1998)**

Régions	Afrique	Australie	Europe	Nord d'Amérique	Nord et centre asiatique	Sud et centre d'Amérique	Sud et SE d'Asie	Total
Calcisols	171237	113905	56657	114720	95264	24318	220068	<b>796169</b>

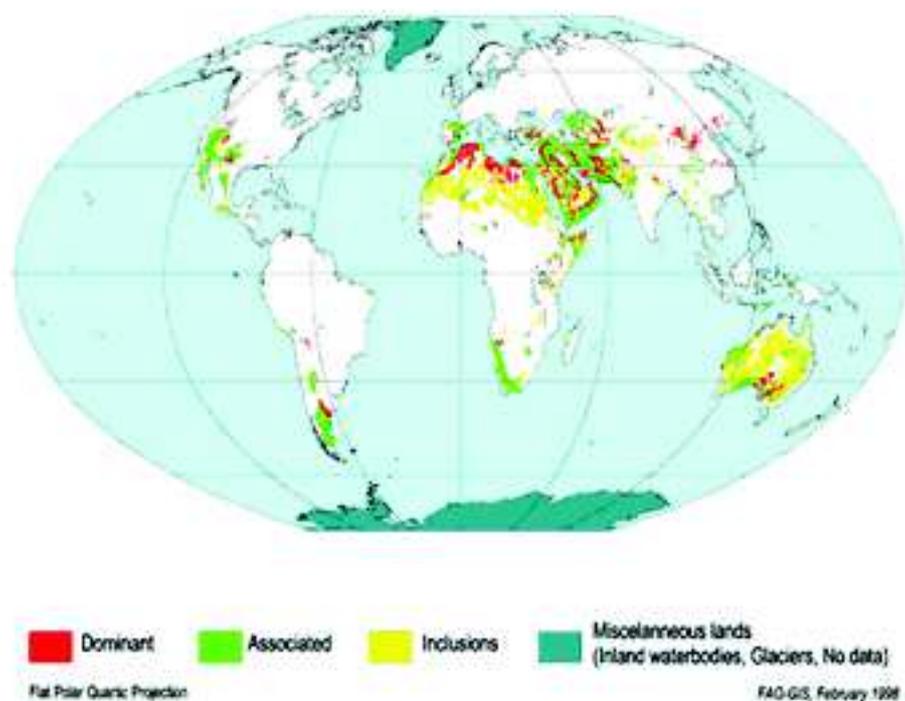


Figure 6 . Répartition des Calcisols à travers le monde (FAO, 1998)

## 7- Les sols calcaires

Les sols calcaires sont considérés comme étant des sols anciens (FAO, 2006). Selon Candy et al. (2004), un sol calcaire en Espagne sur une croûte d'épaisseur de 50 cm est âgé d'environ 100 000 ans. Le développement des sols calcaires est limité par des périodes de sécheresse très accentuées où tous les processus importants de la formation des sols comme l'altération chimiques, l'accumulation de la matière organique et l'entraînement des argiles sont ralentis. Beaucoup de sols calcaires de montagne (rendzines) ont des horizons de surface qui contiennent des éléments calcaires de forme arrondie tandis que les horizons de profondeurs ont des éléments grossiers très anguleux. Les sols calcaires peuvent être polygénétiques. Leurs formations changent au cours des changements climatiques et au cours des différentes ères géologiques. A titre d'exemple, le sol calcaire à horizon de subsurface argilique (argile illuviale) (Duchaufour, 2001).

La plupart des sols calcaires sont de type A/R ou A(B)C, bien structuré, ont de bonnes propriétés de drainage (à l'exception des sols sur marnes), une texture moyenne à fine, une bonne rétention en eau, une teneur faible en matière organique ( $MO < 2\%$ ) et un pH neutre à basique en profondeur. La capacité d'échange cationique est moyenne à élevée avec un complexe adsorbant complètement saturé en  $Ca^{++}$  et Mg. Dans le cas des sols limoneux, la structure de surface peut former des croûtes de battance. L'infiltration verticale des pluies diminue au détriment de l'écoulement latérale dominant, d'où le phénomène d'érosion. C'est la raison pour laquelle les horizons pétrocalciques affleurent en surface (Duchaufour, 2001).

## 8- Gestion et utilisation des sols calcaires

Les sols calcaires peuvent être différemment utilisés (WRB, 2006). Ils peuvent être utilisés aussi bien pour la sylviculture que pour le pâturage extensif ou encore pour l'agriculture où ils supportent de nombreuses spéculations agricoles. Cependant, les agriculteurs, en particulier les arboriculteurs et les viticulteurs doivent adapter leurs cultures par le choix des porte-greffes résistant aux fortes teneurs en calcaire (Legros, 2005). Toutefois, on note que, les sols calcaires donnent de bons rendements quand ils sont irrigués, fertilisés en éléments nutritifs (azote, phosphore et oligo-éléments) et quand ils sont sans obstacles physiques pour les plantes tels que la charge de surface en éléments grossiers et la profondeur du sol (cas des horizons petrocalcique) (WRB, 2006).

## 9- Classification des sols calcaires

Plusieurs travaux ont fait l'objet de tentative de corrélation entre la WRB et les différents systèmes de classifications (Legros, 2007). Les remarques soulevées à ce sujet sont les suivantes :

- Difficultés de corréler entre les différents systèmes de classification des sols existants et la WRB,
- Risque de confusions entre le WRB et le Référentiel Pédologique (R.P.). En effet, dans des cas très fréquents, on rencontre le même nom du qualificatif mais la signification est un peu différente ; nous citons les deux exemples suivant :
  - \***Magnésic** dont le  $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++} < 1$  pour la WRB et pour le RP il est entre  $0,2 < \text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++} < 2$ .
  - \***Ruptic** : la discontinuité verticale pour la WRB et pour le RP la discontinuité est horizontale.
- Dans certains cas, on trouve le même terme utilisé mais pas forcément la même signification. A titre d'exemple l'horizon **argic** utilisé par la WRB est un horizon de subsurface qui a une teneur en argile très élevée par rapport à l'horizon de surface. L'argile provient soit de l'illuviation de l'argile de l'horizon sus-jacent, soit de la néoformation au niveau des horizons de subsurfaces. L'horizon **argilic** utilisé dans USDA présente par contre des marques de l'illuviation de l'argile issue de l'érosion..
- Les caractéristiques utilisés sont définis souvent différemment comme par exemples :
- Calcaric Leptosols : sols peu évolués (CPCS) Calcaric Cambisols : sols peu évolués (CPCS)
- Ainsi, les Calcisols posent un problème de correspondance dans la classification française (CPCS). C'est pourquoi cette dernière les regroupe dans différentes classes suivantes :
- Classe des sols Calcimagnésiques
  - sous classe : des sols carbonatés groupe : rendzines groupe : brun calcaire
- Classe des sols Isohumiques
  - sous classe : isohumique à complexe saturé en  $\text{Ca}^{++}$  sols marrons groupe et sous groupe : sols marrons encroûtés groupe : siérozems

Quant à la classification américaine (USDA, 2009), elle les insère dans les ordres des inceptisols (xerochrepts), des aridisols (argids), des mollisols (rendolls et xerolls) et des alfisols (xéralfs).

## 10- Les Calcisols (CL) de la WRB

Nous donnons ici les principaux axes de la définition des Calcisols selon la Base de Référence Mondiale (W.R.B., 2006). Cette référence se base sur trois groupes de critères diagnostiques qui sont :

- Les horizons diagnostiques,
- les propriétés diagnostiques et
- les matériaux diagnostiques

En fonction de ces critères, la WRB distingue 32 groupes ou références dont le groupe des Calcisols. Par la suite, elle utilise ces mêmes critères pour distinguer les niveaux inférieurs de chaque groupe.

### 10-1-Le groupe des Calcisols

---

Le groupe de référence « Calcisols » englobe les sols dans lesquels il y a accumulation secondaire du carbonate de calcium. Cependant, ces sols doivent répondre aux conditions suivantes :

- D'abord, ils ne sont ni des Histosols, ni des Durisols, ni Gypsisols, ni Phaeozems, ni Kastanozems, ni Chernozems, ni Planosols, ni Solonetz, ni Ferralsols, ni Plinthosols, ni Podzols, ni Andosols, ni Gleysols, ni Solonchaks, ni Fluvisols, ni Vertisols, ni Leptosols, ni Anthrosols et ni Cryosols.
- Ensuite, ce sont des sols qui se caractérisent par la présence d'un **horizon calcique** ou **pétrocalcique** endéans les 100 premiers centimètres du sol ; et n'ayant pas d'horizons diagnostique autre qu'un horizon **ochrique** ou **cambique**, un horizon **argique** imprégné de calcaire, ou un horizon **gypsi** sous-jacent à un horizons pétrocalcique.

#### 10.1.1. Les horizons diagnostiques

- Horizon calcique

Cet horizon se caractérise par l'accumulation du **carbonate de calcium secondaire (CaCO<sub>3</sub>)** sous forme de distribution diffuse (particules fines de 1 mm ou moins), ou sous forme de concentrations discontinues (pseudo-mycélium, cutanés, nodules...) ou encore sous forme de concentrations continues pour donner un horizon hypercalcique. L'horizon calcique doit avoir :

- Une teneur en équivalent de carbonate de calcium de 15 % ou plus dans la fraction terre fine (pour les horizons hypercalciques, plus de 50 % d'équivalent de carbonate de calcium dans la fraction terre fine); et - Une épaisseur d'au moins 15 cm ; la même épaisseur est requise pour l'horizon hypercalcique.

- Relations avec d'autres horizons diagnostiques
-

Dans les régions arides et semi-arides, les horizons calciques peuvent s'associer avec l'horizon pétrocalcique lorsque les horizons hypercalciques s'indurent, et avec l'horizon gypsique en présence d'une nappe aquifère contenant des sulfates. La position de ces deux horizons est différente dans le profil en raison de la différence de solubilité du carbonate de calcium. Leurs distinction se fait selon la morphologie (les cristaux de carbonate de calcium pédogénétique ont une taille beaucoup plus petite).

- Horizon Pétrocalcique

Un horizon pétrocalcique (Gr. **petra** , roche, et L. **calx** , calcaire) est un horizon calcique induré dont le ciment est constitué principalement par le carbonate de calcium ; il peut être aussi composé par un mélange de carbonate de calcium et d'un peu de carbonate de magnésium. Il est naturellement soit massif, soit lamellaire, et extrêmement dur. L'horizon pétrocalcique doit avoir :

- Un équivalent carbonate de calcium **d'au moins 50 %** (en poids)
- Une forte consistance au point où les racines n'y pénètrent pas,
- Une épaisseur d'au moins 10 cm, ou 2,5 cm s'il est laminaire et repose directement sur la roche.

Sur le terrain il se présente sous forme de **croûtes non aplaties** massive ou nodulaire, ou sous forme de **croûtes aplaties** (lamellaires). La couleur est généralement blanche ou rose et la porosité est très fine.

- Relations avec d'autres horizons diagnostiques

Les horizons pétrocalciques peuvent s'observer en association avec des horizons duriques; ces derniers sont cimentés par la silice. D'autres associations s'observent avec les horizons gypsiques, hypergypsiques ou pétrogypsiques. Les horizons de surface qui leurs sont associés sont des horizons ochriques.

### 10.1.2. Propriétés diagnostiques

Les propriétés diagnostiques des Calcisols sont déterminées par la présence des **carbonates secondaires**. Cette expression se rapporte à du calcaire déplacé, suffisamment tendre pour être facilement rayé à l'ongle et précipité sur place à partir de la solution du sol plutôt qu'hérité d'un matériau originel. Pour être diagnostique, il doit s'être accumulé de manière significative. Sur le terrain, le carbonate de calcium s'accumule et s'individualise sous différentes formes. L'accumulation peut aller jusqu'à la formation de dalle calcaires. Lorsqu'ils se présentent sous forme de revêtements, les carbonates secondaires couvrent **au moins 50 %** des faces structurales. Lorsqu'ils se présentent sous forme de nodules tendres, ils occupent **5 %** ou plus du volume du sol.

## 10-2- Matériaux diagnostiques

---

**Définition** : « Un matériau de sol calcaire manifeste une vive effervescence à HCl 10 % dans la majeure partie de la terre fine. Le concept s'applique à du matériau contenant **plus de 2 %** d'équivalent carbonate de calcium » (W.R.B., 2006).

## 10-3- Les unités inférieures

---

Les critères de différenciation au niveau inférieur sont intimement liés aux critères diagnostiques du premier niveau. Il s'agit des préfixes ou des suffixes utilisés pour indiquer la profondeur ou exprimer l'intensité des caractéristiques ou des propriétés du sol. À titre d'exemples les **Vertic Calcisols** sont des Calcisols à caractère vertique et les **Calcisols sodic** sont des sols qui ont un taux en sodium échangeable important (ESP > 15 %).

### **10-4-Associations des Calcicoles avec d autres groupes de référence**

---

Les Calcisols peuvent se trouver en association avec d'autres groupes de sols. Beaucoup d'entres eux montrent des signes de redistribution verticale ou latérale du carbonate de calcium. Cette distribution change selon le relief, le climat et la géologie à travers les paysages. En effet, les sols se trouvant en association avec les Calcisols vont des Leptsols (les parties les plus élevées du paysage) aux Vertisols (les parties les plus basses d'un versant ou bas des pentes) (Duchaufour, 2001). A titre d'exemple, les Calcisols dans les zones des dépressions sont souvent associés aux Solonchaks et/ou Gleysols.

# Chapitre II Matériels et méthodes

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord la région d'étude et ensuite la démarche méthodologique adoptée pour l'étude des Calcisols de Sétif dans un premier temps et les Calcisols références d'Algérie (WRB, 2006) dans un deuxième temps.

## 1- La région d'étude

La présente étude de caractérisation des Calcisols a été réalisée sur une zone située au sud sud-ouest du chef lieu de la wilaya de Sétif. Cette zone est limitée au Nord par la ville de Sétif, au Sud par djebel Z'dimm et Youssef, à l'Ouest par oued sellam et à l'Est par la ville de Guidjal. Géographiquement l'aire de la zone d'étude se trouve entre les latitudes 36°01' à 36°07'nord et les longitudes 5°3' à 5°4' est (figure 7) :

Le climat de cette région est de type semi aride à hiver frais et été sec et chaud. Il se caractérise par une pluviométrie annuelle de 400 mm environ, une température maximale pendant l'été qui dépasse les 35° et une ETP de 1079 mm/an (O.N.M., 2008)

Cette région se caractérise par un relief plat (des terrasses) à moyennement ondulé par endroit. L'ensemble de ces terrains sont sédimentaires. Les formations quaternaires sont peu ou non tectonisées. Elles sont constituées essentiellement par des d'alluvions anciennes indéterminé, mais surtout par des formations du quaternaire ancien (villafranchien) et par des alluvions récentes ou actuelles (figures 8).

Les principaux sols de cette région sont les sols buns calcaires modaux, les sols bruns calcaires à encroûtement et les rendzines (O.T.I., 1974). Ces sols se sont développés sur les alluvions et/ou colluvions ou encore sur marnes. Le carbonate de calcium est souvent présent sous différentes formes, allant de la forme diffuse à la forme encroûtée et croûte ou dalle. La croûte calcaire est d'épaisseur variable (20 à 50 cm) et elle surmonte souvent un encroûtement calcaire à structure massive, parfois feuilletée et plus ou moins consolidée (O.T.I., 1974 ; Bechtel, 1975). Les taux de matière organique sont généralement faibles à moyens (MO < 2 %).

La région de Sétif est considérée comme étant une région à haut potentiel agricole. Sa superficie agricole est de 360.968,07 ha dont la majorité est destinée à la principale activité agricole qui est la céréaliculture pluviale (Batouche, 1990).

## 2-Démarche méthodologique

### 2-1-Les Calcisols références de Sétif

---

A ce niveau, il s'agit d'identifier sur le terrain des sols qui appartiennent tous au groupe des Calcisols (WRB, 2006) mais qui se différencient suffisamment en quelques unes de leurs caractéristiques pour en faire des Calcisols références de la région de Sétif. La principale difficulté réside donc en l'identification et la localisation sur le terrain de ces Calcisols.

Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur l'analyse des données fournies par les différents documents de base et sur la prospection sur le terrain.

- L'analyse des documents de base : les principaux documents consultés sont constitués essentiellement par :
- Les cartes topographiques au 1/25.000<sup>ème</sup> (feuilles de Mezloug 1 –2 ; 3-4 ; 5 – 6 et 7- 8)
- L'imagerie satellite de Sétif ( Map google earth, 2009)
- Les cartes géologiques au 1/50.000<sup>ème</sup> (feuilles de Navarin, 1977)
- Cartes des sols et de la classification agrologique au 50.000<sup>ème</sup> réalisées par O.T.I. (1974). Ces données nous ont permis de mieux comprendre l'organisation spatiale de la couverture pédologique et de circonscrire les grands ensembles pédologiques pouvant être éventuellement considérés comme étant des Calcisols.



Figure 7 . Localisation des profils de la zone d'étude (carte topographique au 1/25 000)

- La prospection sur le terrain : Forts des connaissances acquises précédemment, nous avons réalisé une prospection sur le terrain en se basant sur les unités géomorphologiques (différentes terrasses), l'aspect de surface des sols (densité, forme et nature des éléments grossiers) et sur quelques coupes artificielles (fondations pour la construction des maisons, tranchées de canalisation).
- Sur cette base, nous avons retenu 5 sols (figure 7) morphologiquement différents pouvant être éventuellement considérés comme étant des Calcisols. Par la suite, nous avons creusé des profils que nous avons décrits, échantillonnés et analysés au laboratoire.

La description du profil a été réalisée selon les recommandations de la fiche de description STIPA. L'analyse au laboratoire a été effectuée selon les normes AFNOR (1996) sur de la terre fine issue d'échantillons préalablement séchés à l'air libre et tamisés avec un tamis de 2 mm. Les analyses et les méthodes utilisées au laboratoire sont résumées dans le tableau III.

**Tableau III . Méthodes utilisées pour l'analyse du sol**

Données Analytiques	Méthodes d'analyse
Granulométrie (%) sans décarbonatation	Méthode internationale à la pipette de Robinson
La teneur en eau à différents potentiels (pF)	la presse à membrane (pF 2.7, pF 3 et pF 4.2).
Conductivité hydraulique K (cm/h)	Test de percolation Henin (1956), mesure sur échantillon remanié et saturé.
pH eau	Potentiométrique, le rapport terre/solution de 1/2.5
Calcaire total %	méthode volumétrique au calcimètre de Bernard (Dupuis, 1969).
CEC (cmol <sup>+</sup> /kg)	Méthode de Bower
Bases échangeables (cmol <sup>+</sup> /kg) Na <sup>+</sup> et K <sup>+</sup>	Extraction par la solution du Chlorure de Baryum et dosage par spectrophotométrie à flamme
C.E (ds/m)	Méthode électrique 25°C, rapport sol/eau = 1/5

Les traitements statistiques utilisés pour les 5 profils de Sétif sont basés sur les statistiques descriptives et sur les corrélations entre le calcaire et les autres paramètres pédologiques. A ce niveau, seules les corrélations significatives seront présentées graphiquement.

## 2-2-Les Calcisols références d'Algérie

L'objectif visé ici est d'identifier et de spatialiser les Calcisols références du Nord de l'Algérie à partir d'une base de données pédologiques (analytiques et géographiques) des sols d'Algérie. Pour cela, la démarche adoptée est la suivante :

### 2-2-1-Les données utilisées

Nous avons utilisé la base de données pédologique des sols d'Algérie élaborée par Djili (2000). Cette base de données qui est mise sous un tableur EXCEL est constituée d'un ensemble d'informations géographiques et analytiques issues d'études comprises entre le 1/20 000 et le 1/100 000. Les données proviennent essentiellement des études pédologiques et agropédologiques réalisées par le département de science du sol de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique (E.N.S.A.) et par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H.). Cette base de données est constituée par 1355 profils et 4088 horizons.

### 2-2-2-Analyse de la base de données

On sait que plusieurs groupes de sols (dans le sens de la WRB) peuvent comporter dans les 100 premiers centimètres du profil des horizons calciques ou pétrocalciques qui sont le principal critère diagnostique des Calcisols. Aussi, la démarche a consisté à éliminer de la base de données tous les profils qui contiennent ces horizons et qui sont cités par la

WRB avant les Calcisols. Dans notre cas, nous avons éliminé donc tous les Solonchacks et tous les Gypsisols de la base de données. Par la suite, à partir des profils restants, nous n'avons retenu que les profils qui répondent à la définition des Calcisols (W.R.B. 2006), en particulier aux critères des horizons diagnostiques (horizons calciques et petrocalciques). Ainsi, le traitement des données s'est basé sur les critères discriminants suivants :

- le taux du  $\text{CaCO}_3 \geq 15\%$ ,
- l'horizon diagnostique doit se situer dans les 100 premiers centimètres du sol
- l'épaisseur des horizons calcique et hypercalcique est d'au moins de 15 cm,
- l'épaisseur des horizons petrocalcique est d'au moins de 10 cm.

Sur cette base, sur les 1355 profils de la base de données pédologiques, nous n'avons identifié que 165 profils qui répondent à la définition des Calcisols et qui ont servi à créer une base de données des Calcisols. En tenant compte des propriétés diagnostiques, nous avons classé ces Calcisols jusqu'au niveau le plus détaillé de la WRB. Cette opération a engendré 23 Calcisols références que nous avons géolocalisés sur une carte du Nord de l'Algérie et sur lesquels les traitements statistiques ont été effectués.

La base de données des profils références a été spatialisée à l'échelle du pays en utilisant le logiciel de Map/Info version 7. Nous avons donc importé les profils dans le logiciel Map Info afin de représenter la répartition des différents types de profils sur un fond géographique de l'Algérie « Comgéo » (I.N.C.T., 2000).

A défaut de la disponibilité d'un horizon diagnostique dont le taux de  $\text{CaCO}_3$  varie entre 25 et 50 % dans la WRB, nous avons proposé de classer ces profils comme profils à horizon diagnostique calcique ( $25 < \text{CaCO}_3 < 50\%$ ) d'où la nomenclature « Calcic Calcisols ». Ainsi, en fonction du type d'horizon diagnostique, nous avons retenus 4 catégories de Calcisols références :

- Hypocalcic Calcisols,
- Hypercalcic Calcisols,
- Petrocalcic Calcisols et
- Calcic Calcisols.

Par la suite, nous avons réalisé des traitements statistiques qui ont porté sur les statistiques descriptives et les corrélations entre le taux du  $\text{CaCO}_3$  et les autres paramètres des horizons diagnostiques. Pour des raisons purement méthodologiques, seules les corrélations significatives seront représentées. Ces corrélations ont été réalisées avec le logiciel Excel 2007.

Il faut souligner que dans le texte, nous allons écrire les adjectifs qualificatifs des Calcisols en français et lorsqu'il s'agit du nom du sol, nous l'écrivons en anglais.

# Chapitre III Résultats et discussion

Dans ce chapitre, nous présenterons d'abord les Calcisols références de la région de Sétif, et ensuite les Calcisols de l'Algérie septentrionale. Les Calcisols références sont déterminés selon le concept de la WRB (2006).

## 1-Les Calcisols de la région de Sétif

Dans ce qui suit, nous présentons les caractéristiques morphologiques et analytiques des 5 Calcisols étudiés. Cette présentation sera suivie d'une analyse statistique des paramètres physiques et chimiques des profils étudiés.

### 1-1-Caractéristiques morphologiques et analytiques des sols étudiés

#### 1-1-1-Caractéristiques morphologiques et analytiques du profil 1

- Description morphologique du profil 1 (photo 1):

Commune : Guellal ; Ouled gacem Coordonnées : X = 5° 19' 4.4" Y = 36° 03' 44.6" Z = 878m  
Temps : Ciel couvert Terrain: plat Pente : ≤1% Occupation : jachère Charge de surface : peu de charge en surface (2 à 5%), de nature gravier et cailloux (2.5-7.5cm).



**Ap : 0-23cm :** frais à humide; couleur 7.5YR5/4 à l'état humide (marron foncé); friable; peu compact; structure polyédrique subangulaire peu nette moyenne à fine; texture argilo limoneuse à limoneuse; peu collant; plastique; présence de quelques racines fines; poreux; pas d'activité biologique; peu d'éléments grossiers (< 10%) de tailles et de formes diverses; vive effervescence à HCl; la limite nette est régulière avec l'horizon sous-jacent.

**ABk : 23-41cm :** frais ; couleur à l'état humide 7.5YR5/3.5 (marron foncé) texture argilo-limoneuse, collant, massif; peu poreux; compact; très fin chevelus racinaires; plus de 50% d'éléments grossiers caillouteux graveleux généralement arrondies et/ou anguleux; vive effervescence à HCl; limite peu nette et non régulière.

**Bkm : 41-80cm :** correspond à un encroûtement massif dur et compact; couleur à l'état humide 7.5 YR 5/2 (gris clair); constitué de plus de 60% d'éléments grossiers (identiques à Hx2) recouverts par du calcaire secondaire; très vive effervescence à HCl; limite nette et non régulière.

**Ck : > 80cm :** massif; moins dure que le précédent; prise en masse calcaire moins importante que l'horizon sus-jacent; très caillouteux (dépot alluvial et colluvial); éléments grossiers recouverts de calcaire secondaire; taille des éléments grossiers très variables pouvant atteindre 7cm de diamètre; très vive effervescence à HCl.

Photo 1 . Profil 1

Résultats des analyses du profil 1

Les résultats des analyses au laboratoire du profil 1 sont présentés dans le tableau IV

Profil 1		Analyses granulométriques					Conductivité hydraulique		Analyses chimiques							
Horizon (HZ)	Profid des horizons (cm)	Argile (%)	Limons (%)	Sables (%)	Classe texturale (USDA)	EG (%)	K (cm/h)	MO (%)	pH	CaCO <sub>3</sub> (%)	Cations échangeables en (cmol <sup>+</sup> /kg de terre)			CEC (cmol <sup>+</sup> /kg de terre)	CE (ds/m)	ESP (%)
											Ca <sup>++</sup> +Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>			
Ap	0-23	32	35,9	32	LA	27	12	0,21	8,28	11	15,29	1,38	0,43	17,1	1,36	2,5
ABk	23-41	32,5	27	40	LA	76	20,3	0,05	8,16	24	14,83	0,72	1,25	16,8	1,84	7,4
Bkm	41-80	22,5	26	51	L	73	7,71	0,02	8,65	62	7,42	1,33	0,65	9,4	2,24	6,9
Ck	>80	Dépôt alluvial colluvial				77			8,55	46						

Tableau IV . Synthèse des résultats d'analyses du profil 1

### Discussion des résultats du profil 1

La description morphologique et les résultats d'analyses (tableau IV) du profil 1 montrent que ce sol se caractérise par un solum constitué par deux parties distinctes. La partie haute du profil (Ap) est foncée, bien structurée, moyennement caillouteuse (éléments grossier < 30%) et peu calcaire ( $\text{CaCO}_3$  < 12%). Par contre, la partie basse du profil (Bkm) est blanchâtre, massive, très caillouteuse (éléments grossiers > 70%) et très calcaire ( $\text{CaCO}_3$  > 60%). Ce dernier enrobe la charge caillouteuse par des revêtements blanchâtres (photo2). La base de ce profil (Ck) est essentiellement caillouteuse et elle est cimentée par du calcaire dont la proportion reste encore très forte ( $\text{CaCO}_3$  > 45%) mais moins que dans l'horizon Bkm. La figure 8 montre une nette accumulation du carbonate de calcium dans la partie médiane du profil. L'horizon ABk est une transition entre l'horizon de surface Ap et l'horizon de subsurface Bkm. La texture de ce sol est limono-argileuse en surface et sablo-limono-argileuse en profondeur (figure 9). La CEC est moyenne à assez élevée ( $9 < \text{CEC} < 17 \text{ cmol}^+/\text{Kg}$ ) pour ce type de sol et semble suivre les taux d'argile dans le sol. Ce profil n'est ni salé ( $\text{CE} < 2 \text{ dS/m}$ ), ni sodique ( $\text{ESP} < 8\%$ ) et son complexe adsorbant est saturé essentiellement par le calcium et le magnésium. Le taux de matière organique est faible dans le sol ( $\text{MO} < 1\%$ ) et le pH est légèrement alcalin ( $8,2 < \text{pH} < 8,6$ ). La conductivité hydraulique est très élevée ; ceci pourrait être dû, d'une part, au sol tamisé, déstructuré, donc pas de cailloux et, d'autre par au choix de la méthode qui n'est plus valable à une conductivité hydraulique  $> 15 \text{ cm/h}$ .



Photo 2 . Revêtement des cailloux par du  $\text{CaCO}_3$

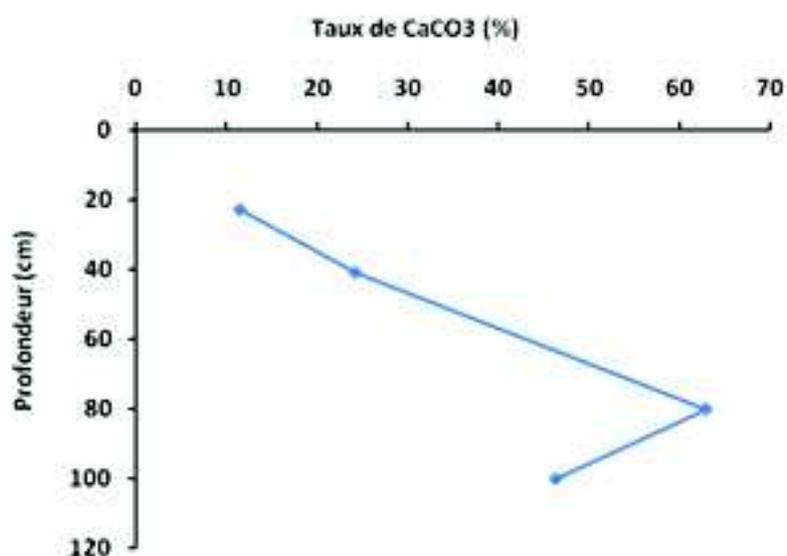


Figure 8 . Profil calcaire du profil 1

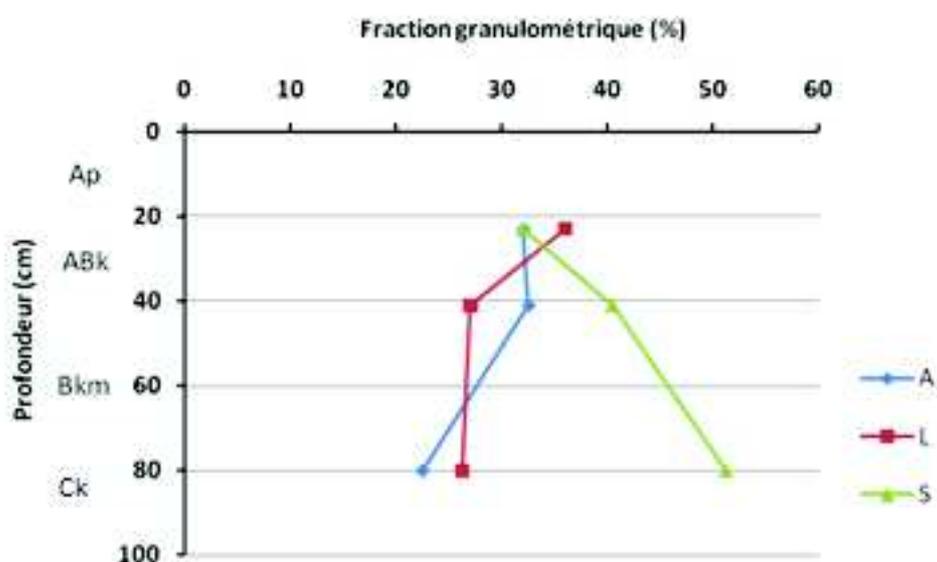


Figure 9. Profil textural du profil 1

#### Classification du profil 1

Le profil 1 contient au moins un horizon d'une épaisseur >15 cm comportant un taux de calcaire supérieur à 15% dans les 100 premiers centimètres. De ce fait, ce sol est un Calcisol.

Il renferme un horizon Bkm d'une épaisseur de 29 cm dont le CaCO<sub>3</sub> ≥ 50% (62.9 %) et donc le préfixe est *hypercalcique*,

Il présente un horizon Ck de plus de 40 % en volume d'éléments grossiers (photo1). Le suffixe est donc squelettique.

Le profil 1 est donc un Hypercalcic Calcisols (Skeletal) selon la WRB (2006).

Il peut être classé comme étant un **Typic Haplocalcid** dans la classification USDA (2009) et comme un **sol brun calcaire à encroûtement calcaire** dans la CPCS (1967).

### 1-1-1-Caractéristiques morphologiques et analytiques du profil 2

Description morphologique du profil 2 (photo3):

Commune : Guellal ; El karia Coordonnées : X = 005° 19' 13".1 Y = 36° 02' 50".4 Z = 873m  
Temps : ciel couvert et pluvieux Terrain : plat - Pente : 1%

Occupation : grandes cultures

Charge de surface : très peu d'éléments grossiers en surface (2 %) de taille de 5 à 10mm



Ap : 0-15cm : frais à humide, couleur à l'état humide 7.5YR 4/4 (marron); structure grumeleuse à subangulaire fine à moyenne; texture argillo-limoneuse; nombreuses racines fines; apparemment organique; peu compact; peu friable; poreux; peu plastique; très meuble; peu d'éléments grossiers (2 à 5%) de forme arrondie de taille < 5mm; vive effervescence à HCl; transition nette.

Bw : 15-45cm : frais; couleur à l'état humide 7.5YR 5/3 (brun jaunâtre); texture limoneuse; structure polyédrique subangulaire; nombreuses racines très fines; apparemment assez organique; compact; poreux; friable; collant; plastique; présence d'éléments grossiers de tailles fines à moyennes (< 5mm) parfois arrondis; vive effervescence à HCl; transition progressive avec l'horizon sous-jacent.

Bk1 : 45-60cm : frais; couleur à l'état humide 7.5YR 6/3 (marron terre); texture argilo-limoneuse; structure massive; poreux; très friable; doux au toucher; collant; plastique; peu compact; très rares racines fines; apparemment non organique; présence d'éléments grossiers très fins de couleur noire; vive effervescence à HCl; transition nette; correspond à un 1<sup>er</sup> niveau de lit encroûté.

Bk2 : 60-80cm : frais; couleur à l'état humide 7.5YR 7/6 (marron clair jaunâtre); texture équilibrée; pas plus dense que l'horizon sus-jacent correspond à un encroûtement massif tufeux avec quelques pseudo mycélium blanchâtres; apparemment non organique; friable; doux; collant; plastique; poreux; s'effrite dans la main; se différencie de l'horizon sus-jacent par la présence d'un lit caillouteux; éléments grossiers enrobés de calcaire et de taille < 1cm et de formes variables; et anguleux quand ils sont noirs; vive effervescence à HCl; transition nette.

Ck : 80-123cm : frais; structure massive à éclat anguleux; couleur 10YR 7/4 (jaune orange); texture argileuse; compact; poreux; charge caillouteuse inférieure à 5%; les éléments grossiers de taille de 5mm à 3cm sont constitués essentiellement de gravier; les cailloux sont noirs et dans la plupart des cas ils sont enrobés de calcaire; présence d'amas blanchâtres sous forme de traînes vermiculaires qui correspondraient à des zones d'accumulation de calcaire (encroûtement); très vive effervescence à l'HCl; transition nette.

C : >123 cm : frais; structure massive; compact; couleur 10YR 7/6 (marron clair jaunâtre); poreux; friable; se distingue par la disparition des traînes blanchâtres; nombreux éléments grossiers de tailles fines et de couleur noire.

Photo 3 . Profil 2

Résultats des analyses du profil 2

Les résultats des analyses au laboratoire sont présentés dans le tableau V

Profil 2		Analyses granulométriques					Conductivité hydraulique	Analyses chimiques								
HZ	Profid des horizons (cm)	Argile (%)	Limons (%)	Sables (%)	Classe texturale (USDA)	EG (%)	K (cm/h)	MO (%)	pH	CaCO <sub>3</sub> (%)	Cations échangeables en (cmol <sup>+</sup> /kg de terre)			CEC (cmol <sup>+</sup> /kg de terre)	CE (dS/m)	ESP (%)
											Ca <sup>++</sup> +Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>			
Ap	0-25	34	32	34	LA	25	11,5	1,69	8,7	29	13,66	1,33	1,31	16,3	1,6	8
Bw	25-45	33,5	31,6	35	LA	27	12	1,02	8,4	29	8,77	2,53	1,33	13,3	3,0	10
Bk1	45-60	36,5	32,3	31,2	LA	26	11,9	0,11	8,3	52	15,12	0,9	0,1	16,1	3,7	0,6
Bk2	60-80	33	18,5	48,5	LAS	20	15,8	0,02	8,6	83	12,57	1,92	1,31	15,8	3,4	8,3
Ck	80-123	40	32,5	27,5	A	16	2	0,3	8,8	57	15,64	0,87	1,89	18,4	2,94	10,3
C	>123	28	21,93	50,07	LAS	14	16,3	0	8,6	50	6,91	1,1	1,09	9,1	2,32	11,9

Tableau V. Synthèse des résultats d'analyses du profil 2

#### Discussion des résultats du profil 2

D'une façon générale, le solum se compose de 2 parties différentes. La partie haute du profil (Ap) est foncée, bien structurée moyennement caillouteuse (éléments grossiers < 26%) et calcaire (CaCO<sub>3</sub> < 30%). La partie d'en dessous (B) est claire, moyennement massive, peu à moyennement caillouteuse (éléments grossiers < 25%) et très calcaire (CaCO<sub>3</sub> > 29%). La figure 10 montre une forte accumulation du carbonate de calcium dans ces horizons, notamment dans l'horizon Bk2 (CaCO<sub>3</sub> > 80%) où la forme d'accumulation est constituée essentiellement par des pseudo-mycéliums blanchâtres. La base de ce profil (Ck) est massive et très calcaire (CaCO<sub>3</sub> > 50%) dont l'accumulation est sous formes d'amas blanchâtres et trainés verticales. L'examen du tableau v indique que la texture de ce sol a tendance à être globalement limono-argileuse dans tout le profil, excepté en Ck où elle est argileuse (figure 11). La CEC est moyenne à élevée (9 < CEC < 18 cmol<sup>+</sup>/Kg) et varie en fonction du taux d'argile dans le sol. Le profile n'est pas salé (CE < 3,7 dS/m) et non sodique (ESP < 12%) et le complexe adsorbant est saturé par le calcium et le magnésium. Le taux de matière organique est faible (MO < 1,9%) et voir même nulle en profondeur et le pH est légèrement alcalin (8,3 < pH < 8,8). La conductivité hydraulique est globalement élevée (K < 17 cm/h) (dû au choix de la méthode).

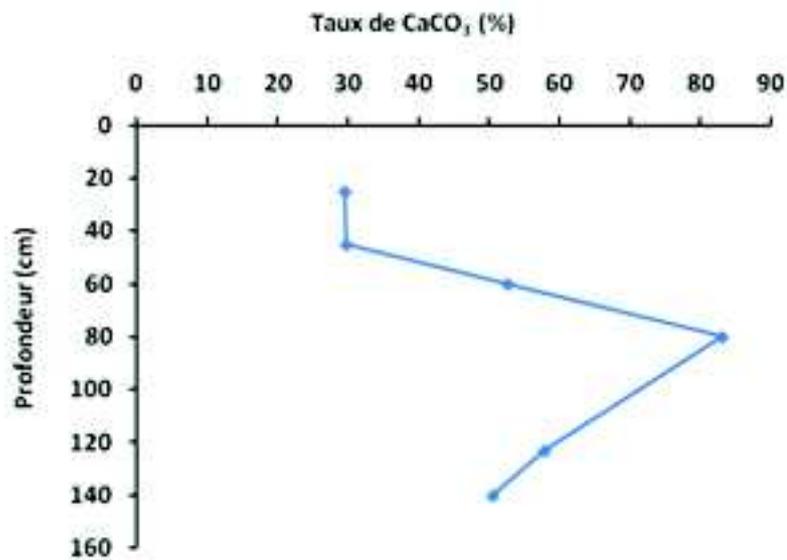


Figure 10. Profil calcaire du profil 2.

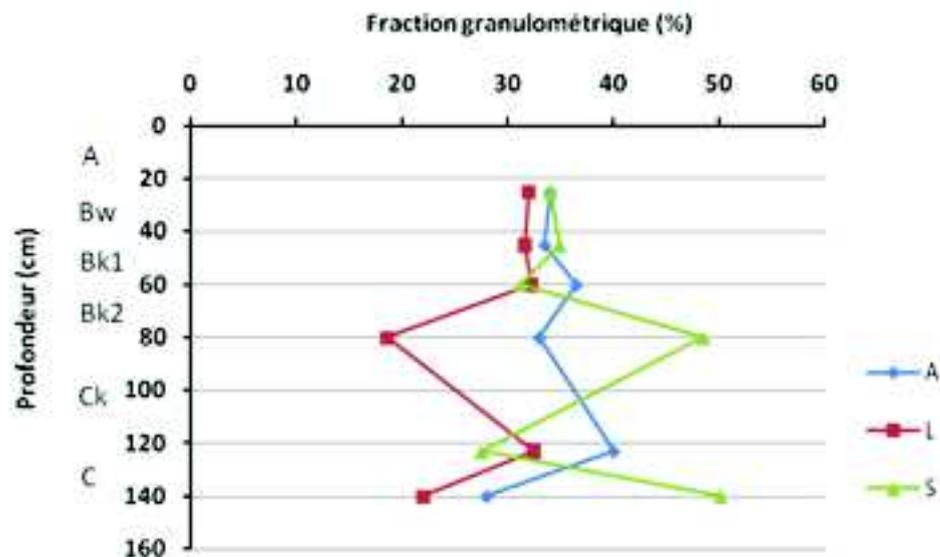


Figure 11. Profil textural du profil 2

#### Classification du profil 2

L'analyse des résultats morphologiques et analytiques (tableau V) montre que tous les horizons de ce profil ont une épaisseur dépassant 15 cm et une teneur en CaCO<sub>3</sub> ≥ 15%. De ce fait, ce sol est donc un Calcisol.

Le profil présente également des horizons (B et C) avec des taux de calcaire élevés (CaCO<sub>3</sub> ≥ 50%) dans les 100 premiers centimètres du sol. Le préfixe retenu est donc hypercalcaire (hc).

De ce fait, le sol 2 est un **Hypercalcaire Calcisol**.

Il correspond à un **Inceptisol (Calcixerept)** de la classification USDA (2009) et à un sol **Brun calcaire à encroûtement calcaire** de la classification CPCS (1967).

### 1-1-2-Caractéristiques morphologiques et analytiques du profil 3

Description morphologique du profil 3 (photo 4) :

**Commune** : Guellal **Coordonnées** : X = 005° 21' 15.3" Y = 36° 02' 06.9" Z = 862m **Temps** : couvert et pluvieux **Terrain** : plat à légèrement vallonné **Pente** : Sud Nord d'environ 2 à 3% **Occupation** : céréaliculture **Charge de surface** : faible (< 2%) de taille de 2 à 3 cm



**Ap** : 0-30cm : frais; couleur à l'état humide 10 YR 5/4 (jaune marron); structure granuleuse subangulaire fine à moyenne; texture argileuse; friable; très peu caillouteux (<1%); dense chevelu racinaire (très fines); organique; poreux; collant; plastique; vive effervescence à HCl; transition nette et régulière.

**Bw1** : 30-42cm : frais; couleur à l'état humide 10 YR 5/4 (jaune marron); structure massive à éclat anguleux qui se décline en une structure polyédrique subangulaire moyenne très peu nette; texture argileuse à argilo-limoneuse; compact; poreux; friable; plastique; pas d'activité biologique; apparemment non organique; pas d'éléments grossiers; très peu de racines fines; vive effervescence à HCl; transition régulière et progressive.

**Bw2** : 42-68cm : frais; couleur à l'état humide 10 YR 6/6 (jaune vif marron); structure massive à éclat anguleux qui se transforme en fin polyèdres anguleux; texture argilo-limoneuse; collant; plastique; compact; très nombreux pores fins; pas de racine; apparemment non organique; pas d'éléments grossiers; vive effervescence à HCl; transition régulière et très progressive.

**Bk1** : 68-100cm : mêmes caractéristiques que l'horizon Bw2 sauf qu'à sa base, il y'a quelques amas friables blancs qui correspondraient à des zones d'accumulation de CaCO<sub>3</sub>; couleur 10YR 6/4 (orange jaunâtre); vive effervescence à HCl; transition nette et régulière.

**Bk2** : 100-116cm : frais; couleur à l'état humide 10 YR 6/8 (orange jaunâtre); texture argilo-limoneuse; structure massive; accumulation calcaire sous forme de fins granules et nodules plus ou moins durcis; compact; collant; non organique; éléments grossiers de tailles  $\leq$  1cm et de formes différentes (angulaires, plates); très fins débris de coquilles blanchâtres; vive effervescence à HCl; présence d'un lit sableux-graveleux (> 5%) à la base; transition nette et régulière.

**Ck** : > 116cm : encroûtement calcaire massif (photo n° 5); frais; compact; couleur 10YR 5/8 (marron jaunâtre); poreux (fins); non organique; pas d'éléments grossiers; présence de taches d'oxydo-réduction de couleur rouille et noire; présence de taches claires de formes différentes d'accumulation de calcaire; vive effervescence à HCl.

Photo 4 . Profil 3

Résultats des analyses du profil 3

Les résultats des analyses du profil 3 sont mentionnés au tableau VI.



Photo 5 . Les taches d'oxydo-réduction des l'horizon Ck

Profil 3		Analyses granulométriques					Conductivité hydraulique	Analyses chimiques								
HZ	Profid des horizons (cm)	Argile (%)	Limons (%)	Sables (%)	Classe texturale (USDA)	EG (%)	K (cm/h)	MO (%)	pH	CaCO <sub>2</sub> (%)	Cations échangeables en (cmol <sup>+</sup> /kg de terre)			CEC (cmol <sup>+</sup> /kg de terre)	CE (ds/m)	ESP (%)
											Ca <sup>++</sup> + Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>			
Ap	0-30	28	44,7	27,2	LA	13	12,5	1,9	8,47	34	9,47	1,38	0,15	11	1,04	1,4
Bw1	30-42	44,5	42,3	13,2	AL	14	2	0,7	8,58	39	16,67	1,97	1,2	19,8	3,7	6
Bw2	42-68	50,5	30,1	19,4	A	-	1,7	0,15	8,42	56	19,8	0,41	2,39	22,6	2,72	10,9
Bk1	68-100	52	27,8	20,2	A	-	1,8	0,03	8,77	52	20,85	0,36	3,89	25	2,24	15,5
Bk2	100-116	6,5	34,7	28,7	LA	29	9,5	0,02	8,58	43	16,14	1,56	0,4	18,5	2,08	2,2
Ck	>116	35	49,8	15,1	L	-	13,7	0,02	8,54	53	16,24	1,61	0,05	17,9	1,6	0,3

Tableau VI . Synthèse des résultats d'analyses du profil 3

#### Discussion des résultats

Le profil 3 se subdivise en 3 parties distinctes. L'horizon de surface (Ap) est foncé, bien structuré, calcaire (CaCO<sub>3</sub> > 33 %) et peu caillouteux (éléments grossier < 16 %). La partie médiane (B) est claire, massive, peu à moyennement caillouteuse (éléments grossier < 30 %) et très calcaire (CaCO<sub>3</sub> > 39 %). La concentration discontinue du calcaire s'accumule sous formes d'amas, de taches et de nodules. La figure 12 indique que le taux de calcaire augmente avec la profondeur, le taux le plus élevé est enregistré pour l'horizon Bw2 (CaCO<sub>3</sub> = 56 %), les accumulations sont en amas friables pour l'horizon Bk1 et en nodules pour l'horizon Bk2. En revanche, la partie basse du profil (Ck) est claire, massive, très calcaire (CaCO<sub>3</sub> > 50 %) et elle se caractérise par la présence des taches d'oxydo-réduction en profondeur (photo 5).

Les résultats d'analyses (tableau VIII) indiquent que la texture de ce sol est globalement limono-argileuse dans l'horizon de surface, argileuse dans les horizons médians (Bw2 et

Bk1) et limoneuse dans ceux de profondeur (figure 13). La CEC est moyenne à très élevée ( $11 < \text{CEC cmol}^+/\text{Kg} < 25$ ) et semble suivre les taux d'argile dans le sol (horizon Bk1). Ce profil n'est pas salin ( $\text{CE dS/m} < 3,8$ ) mais il est par contre sodique ( $\text{ESP} > 15\%$ ) et son complexe adsorbant est saturé par le calcium et le magnésium. Le taux de matière organique est partout faible ( $\text{MO} < 1\%$ ) sauf dans l'horizon de surface où il est moyen ( $\text{MO} = 1,9\%$ ) et le pH est basique ( $8,4 < \text{pH} < 8,7$ ). La conductivité hydraulique de l'horizon de surface (Ap) est assez rapide et elle est assez lente pour les horizons médians (B) où le taux d'argile est assez élevé ( $A > 44\%$ ).

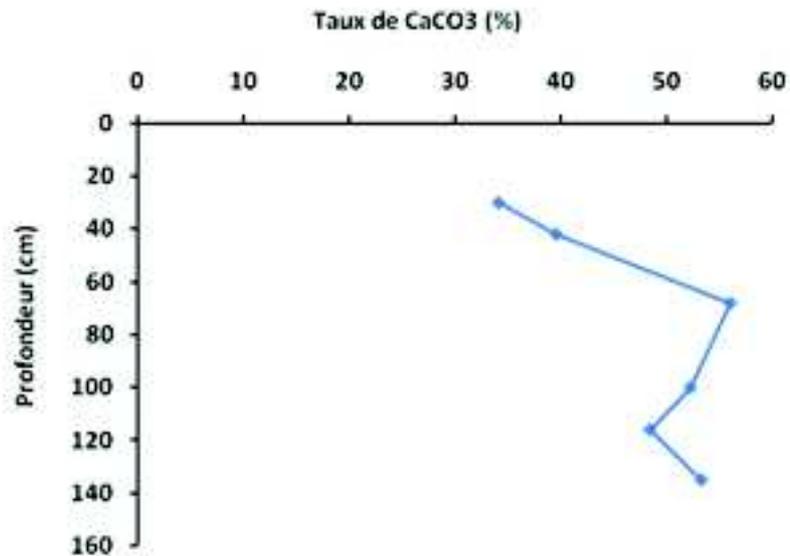


Figure 12 . Profil calcaire du profil 3.

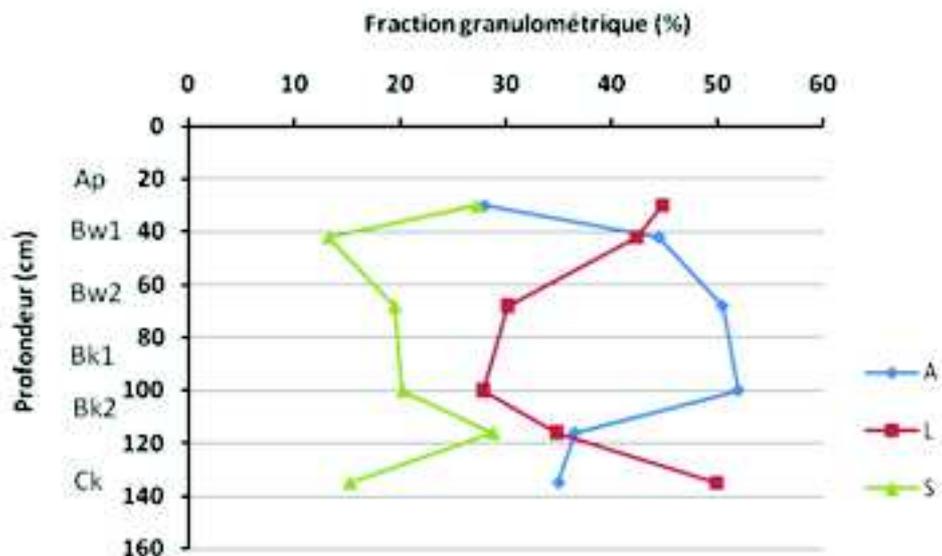


Figure 13 . Profil textural de profil 3

Classification du profil 3

Les horizons de ce profil ont une épaisseur dépassant 15 cm et une teneur en  $\text{CaCO}_3 \geq 15\%$ .

Ce sol peut donc être considéré comme un Calcisol.

Les horizons diagnostiques B et C renferment des taux du  $\text{CaCO}_3 > 50\%$  dans les 100 premiers centimètres du sol. Le préfixe de ces horizons diagnostiques est donc *hypercalcique*.

L'horizon Bk1 se caractérise par un taux de sodium échangeable égale à 15.5% sur le complexe adsorbant, de ce fait, le suffixe est donc *sodique*,

L'horizon de surface (Ap), d'une épaisseur de 30 cm, présente une texture limono-argileuse endéans 1 m de la profondeur du sol d'où le suffixe *siltic* (sl),

L'horizon Bk1 a une texture argileuse, son épaisseur est supérieure à 30cm et se situe entre 50 et 100 cm de profondeur ce qui correspond au suffixe *clayic*.

L'ensemble de ces caractéristiques suggèrent que ce sol est un **Hypercalcic Calcisol (sodic) (Siltic) (Clayic)**.

Selon la classification USDA (2009), il s'agit d'un **Inceptisol (Calcixerept)** et selon la CPCS (1967) d'un sol **Brun calcaire à encroûtement et hydromorphe en profondeur**.

#### 1-1-3-Caractéristiques morphologiques et analytiques du profil 4

Description morphologique du profil 04 (photo 5)

**Commune** : Guidjel **Coordonnées** : X= 005° 23' 32".9 Y= 36° 03' 06.7" Z = 855m **Temps** : couvert **Terrain** : plat à pente légère **Pente** : Sud Nord d'environ 2 à 3% **Occupation** : céréaliculture **Etat de surface** : présence de galeries des rats des champs et de quelques coquilles en surfaces; la charge en éléments grossiers de surface varie entre 20 et 30 % de taille de 1 à 3cm de diamètre de formes anguleuses et parfois arrondies (correspondraient probablement à des éléments issus des labours profonds). La proportion des éléments grossiers de taille arrondie (2 à 3 cm) est inférieure à 2 %. **Occupation** : jachère



**A : 0-25 cm :** frais; couleur à l'état humide SYR 5/4 (marron rougeâtre); structure massive qui se délite en structure polyédrique moyenne peu nette; texture argilo-limoneuse à limoneuse; peu compact; poreux; friable; collant; plastique; présence de quelques racines très fines; apparemment organique; présence de quelques éléments grossiers (2 à 5%); vive effervescence à HCl; mélangé par endroits à l'horizon sous jacent suite aux labours; limite très nette et brutale avec l'horizon sous jacent.

**B1km : 25-40cm :** croûte calcaire massive légèrement feuilletée ; le sommet de la croûte est très dur et de couleur blanche à crème.

**B2km : 40-75cm :** encroûtement calcaire massif et moins dure que la croûte; non feuilleté; présence de quelques taches noirâtres; présence d'un lit (d'environ 10 cm d'épaisseur) d'éléments grossiers (anguleux, parfois arrondis et de couleur noire) discontinu pris en masse par le CaCO<sub>3</sub>; très vive effervescence à HCl; transition nette et progressive.

**Bwk : > 75cm :** encroûtement massif d'aspect tufeux et d'amas friables de formes généralement allongées vers le bas; couleur à l'état humide 7,5YR6/6 (orange); frais; friable; poreux; vive effervescence à HCl; présence de petites taches noirâtres de diamètre inférieur ou égale à 1mm; horizon moins dure que l'horizon sus jacent.

Photo 6 . Profil 4

Résultats des analyses du profil 4

Les résultats des analyses du profil 3 sont mentionnés dans le tableau VII.

Profil 1		Analyses granulométriques					Conductivité hydraulique	Analyses chimiques								
Horizon (HZ)	Profond des horizons (cm)	Argile (%)	Limons (%)	Sables (%)	Classe texturale (USDA)	EG (%)	K (cm/h)	MO (%)	pH	CaCO <sub>3</sub> (%)	Cations échangeables en (cmol <sup>+</sup> /kg de terre)			CEC (cmol <sup>+</sup> /kg de terre)	CE (dS/m)	ESP (%)
											Ca <sup>++</sup> + Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>			
Ap	0-23	32	35,9	32	LA	27	12	0,21	8,28	11	15,29	1,38	0,43	17,1	1,36	2,5
ABk	23-41	32,5	27	40	LA	76	20,3	0,05	8,16	24	14,83	0,72	1,25	16,8	1,84	7,4
Bkm	41-80	22,5	26	51	L	73	7,71	0,02	8,65	62	7,42	1,33	0,65	9,4	2,24	6,9
Ck	>80	Dépôt alluvial colluvial				77			8,55	46						

Tableau VII . Synthèse des résultats d'analyses du profil 4

### Discussion des résultats

Le solum du profil 4 se subdivise en deux grandes parties bien distinctes. La partie supérieure (A) est foncée, peu épaisse (25 cm), massive et très calcaire (CaCO<sub>3</sub> >35 %) (figure 14). La transition vers la partie inférieure (Bkm et Bwk) est très nette et brutale. Cette dernière est blanchâtre à claire, massive à aspect crayeux non dure (Bkm) et tufeux (Bwk), très peu caillouteuse (éléments grossiers <15 %) et très calcaire (CaCO<sub>3</sub> > 60 %). L'accumulation calcaire dans Bwk est sous formes d'amas friables et de trainées verticales. La base de cette horizon (Bkm) est constituée d'un lit de cailloux cimentés par du calcaire dont la proportion est très forte (CaCO<sub>3</sub> > 80 %). L'horizon Bkkm est une croûte calcaire située entre les horizons A et Bkm, de couleur blanche à blanc crème, massive avec quelques taches noires et dures. Elle est d'une épaisseur d'environ 15 cm et très calcaire (CaCO<sub>3</sub> > 83%). La base de cette croûte est un encroûtement pulvérulent tendre de couleur blanche. La surface est une pellicule rubanée (photo 7). Cette couche est fissurée obliquement par endroits.

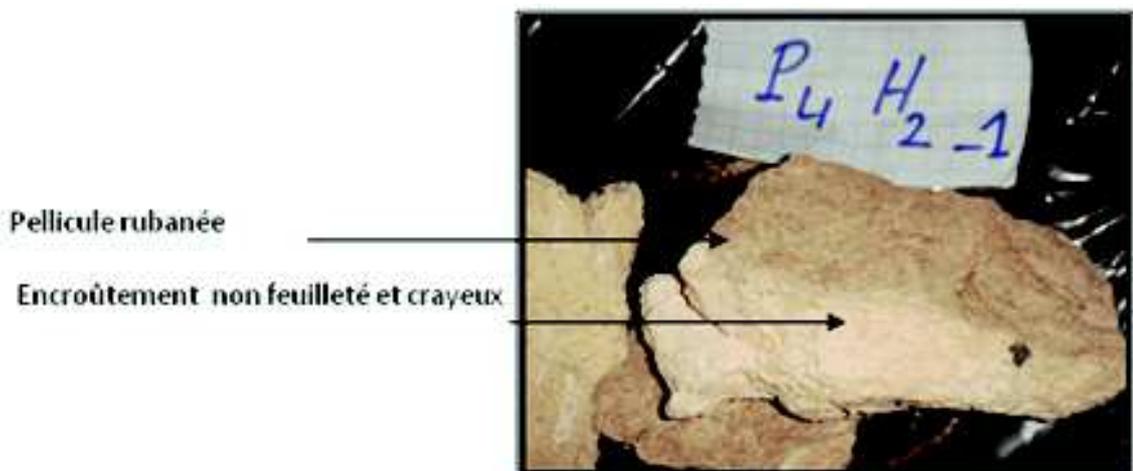


Photo 7 . Croûte calcaire dans l'horizon diagnostique Bkkm du profil 4

La texture de ce sol est limoneuse en surface à limono-argileuse en profondeurs (figure15). L'argile et le limon ont tendance à augmenter avec la profondeur, par contre le sable a tendance à diminuer. La CEC est faible ( $7 < CEC < 10 \text{ cmol}^+/\text{Kg}$ ). Ce profil n'est pas salé ( $CE < 2 \text{ dS/m}$ ) mais il est sodique en profondeur (Bkm et Bwk) ( $ESP > 33 \%$ ) et

son complexe adsorbant est saturé surtout par le calcium et le magnésium à un moindre degré par du sodium. Le taux de matière organique est partout faible ( $MO < 1\%$ ) et le pH est basique ( $8,5 < pH < 8,9$ ). La conductivité hydraulique de ces sols est assez rapide ( $K < 11 \text{ cm/h}$ ), elle ne montre pas de lien avec la texture du sol (dû au choix de la méthode).

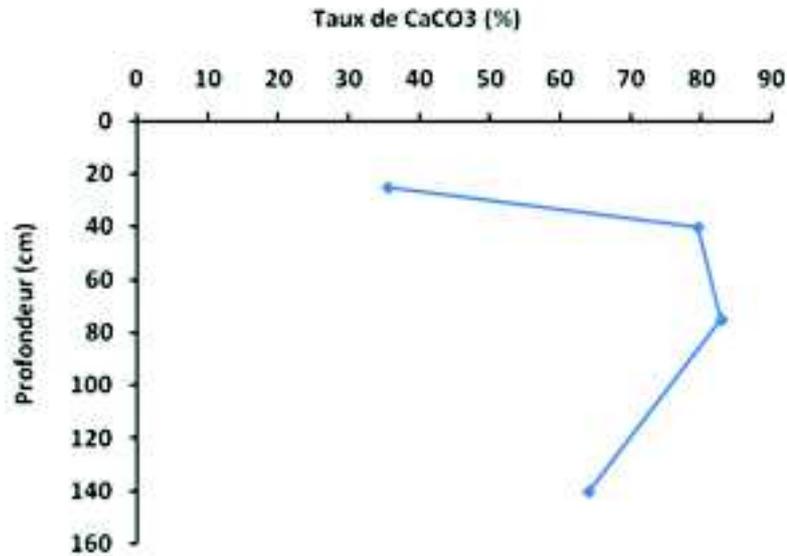


Figure 14. Profil calcaire du profil 4.

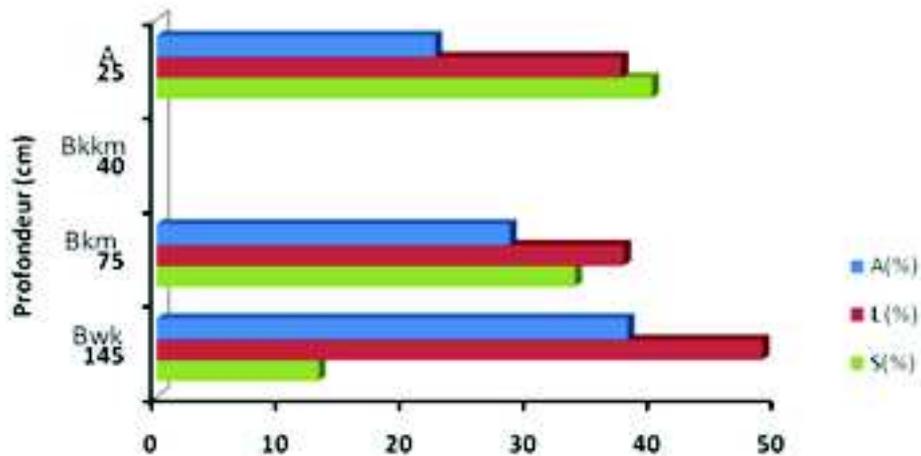


Figure 15. Profil textural du profil 4

#### Classification du profil 4

Le profil 4 comporte au moins un horizon de plus que 15 cm d'épaisseur, le taux de calcaire dépasse 15% et situé à moins de 100 cm de profondeur. Ce résultat confirme que le profil 4 est un Calcisol dans le sens de la WRB (2006).

Les horizons Bkm et Bwk sont plus épais que 15 cm et leurs taux de calcaire dépassent les 50 %. De ce fait, ce Calcisol est un *hypercalcique* (Hc),

L'horizon de subsurface (Bkkm) est caractérisé par la présence d'une croûte indurée dont l'épaisseur est supérieure à 15cm et le taux du CaCO<sub>3</sub>  $\geq 50\%$ . Ce sol se définit donc par un préfixe petrocalcique (Pc).

Les horizons (Bkm et Bwk) présentent des taux de sodium échangeable > 33% à partir de 40 cm de profondeur d'où le suffixe sodique (so).

L'horizon de subsurface (Bkkm) présente une compaction naturelle à une profondeur inférieure à 50 cm et qui constitue un obstacle pour l'enracinement. De ce fait, le suffixe de ce sol est densic (dn).

L'horizon Bwk situé à plus de 70 cm de profondeur a une texture limono-argileuse. Le suffixe de ce sol est donc *siltic* (sl).

L'horizon de profondeur (Bwk) présente une épaisseur d'au moins de 30cm dont la couleur est 7,5 YR 6/6. Le suffixe de ce sol est *chromic* (cr) :

Le profil 4 est donc à un Petrocalcic Hypercalcic Calcisol (Sodic) (Densic) (Siltic) (Chromic). Il peut être classé comme étant un Calcic Lithic Petrocalcid dans la classification USDA (2009) et comme étant un sol brun calcaire à croûte et encroûtement calcaire dans la CPCS (1967).

#### 1-1-4-Caractéristiques morphologiques et analytiques du profil 5

Description morphologique du profil 05 (photo 7)

Commune : Mezloug ; Mariettes Coordonnées : X= 005° 19' 43".8 Y= 36° 05' 21.2" Z = 893m Temps : ciel couvert et pluvieux Terrain : légèrement ondulé Pente : < 3% Occupation : jachère Charge de surface : nombreux cailloux de formes et de dimensions diverses (3 à 4 mm jusqu'à 10 cm).

**Ap : 0-28 cm** : frais; couleur à l'état humide 7.5YR4/4 (marron); texture argileuse à argilo-limoneuse; structure grumeleuse à polyédrique subangulaire fine; très meuble; poreux présence de quelques racines; débris de matières organiques; collant; plastique; friable; peu de cailloux de différentes formes arrondies et anguleuses de tailles variables (quelques mm jusqu'à 3 à 4 cm); très vive effervescence à HCl; transition nette et régulière.

**Bkkm : 28-45** : croûte calcaire feuilletée discontinue et dure ; la surface de la croûte est une pellicule rubanée stratifiée, indurée, lisse et rose ; ; l'épaisseur des feuillets est de 5 à 6 cm par endroit ; ; sa base est constituée par de très nombreux cailloux de formes et de tailles diverses cimentés par le calcaire;; très vive effervescence à HCl ; transition nette.

**Bkm : 45-72** : encroûtement calcaire ; horizon constitué par plus de 70 % d'éléments grossiers de formes et de tailles diverses cimentés et indurés par une couche blanchâtre de calcaire; très vive effervescence à HCl; limite peu nette et irrégulière.

**Ck : >72** : idem que l'horizon Bkm sauf qu'il est moins dur et moins cimenté par le calcaire.



Occupation : jachère

Charge de surface : nombreux cailloux de formes et de dimensions diverses (3 à 4 mm jusqu'à 10 cm).

Ap : 0-28 cm : frais; couleur à l'état humide 7.5YR4/4 (marroc); texture argileuse à argilo-limoneuse; structure grumeleuse à polyédrique subangulaire fine; très meuble; poreux présence de quelques racines; débris de matières organiques; collant; plastique; friable; peu de cailloux de différentes formes arrondies et anguleuses de tailles variables (quelques mm jusqu'à 3 à 4 cm); très vive effervescence à HCl; transition nette et régulière.

Bkkm : 28-45 : croûte calcaire feuilletée discontinue et dure ; la surface de la croûte est une pellicule subassée stratifiée, indurée, lisse et rose ; ; l'épaisseur des feuillet est de 3 à 6 cm par endroit ; ; sa base est constituée par de très nombreux cailloux de formes et de tailles diverses cimentés par le calcaire ; très vive effervescence à HCl ; transition nette.

Bkm : 45-72 : encroûtement calcaire ; horizon constitué par plus de 70% d'éléments grossiers de formes et de tailles diverses cimentés et indurés par une couche blanchâtre de calcaire; très vive effervescence à HCl; limite peu nette et irrégulière.

Ck : >72 : idem que l'horizon Bkm sauf qu'il est moins dur et moins cimenté par le calcaire.

Photo 8 . Profil 5

#### 1-1-4-Caractéristiques analytiques du profil 5

Les caractéristiques analytiques du profil 5 sont indiquées dans le tableau VIII

Tableau VIII . Synthèse des résultats d'analyses du profil 5

Profil 5		Analyses granulométriques					Conductivité hydraulique K (cm/h)	Analyses chimiques			
HZ	Profds des horizons (cm)	Argile (%)	Limons (%)	Sables (%)	Classe texturale (USDA)	EG (%)		MO (%)	pH	CaCO <sub>3</sub> (%)	Cations (cmol <sup>+</sup> /kg) Ca <sup>++</sup> +M <sup>+</sup>
Ap	0-28	28	37,1	34,9	LA	16	11	0,89	8,48	36	8,29
Bkkm	28-45	Croûte							8,83	77	
Bkm	45-72	10,5	11	78,4	SL	80	15	0,02	8,64	51	6,99
Ck	>72	8	8,4	83,6	S	68	20	0,02	8,84	52	11,18

Discussion des résultats

Comme le montre clairement la description morphologique, le profil 5 se subdivise en deux parties bien distinctes. La partie supérieure du profil (Ap) est foncée, peu épaisse (28 cm), bien structurée, peu caillouteuse (éléments grossiers <17 %) et très calcaire (CaCO<sub>3</sub> >35 %). La partie inférieure du profil (Bkm et Ck) est blanchâtre, massive, très caillouteuse (éléments grossiers > 68 %) et très calcaire (CaCO<sub>3</sub> > 51 %). La base de ce profil (Ck) est essentiellement caillouteuse et elle est moins cimentée que Bkm par le calcaire dont la proportion reste très forte (CaCO<sub>3</sub> > 51%). La figure 16 indique que les teneurs en CaCO<sub>3</sub> sont fortes dans l'ensemble du profil, elles varient de 36 % à 77 %. Les horizons Bkkm (CaCO<sub>3</sub> = 77 %) et Bkm (CaCO<sub>3</sub> = 51 %) où l'individualisation du CaCO<sub>3</sub> est forte, présentent des teneurs en calcaire nettement plus grandes que celle de l'horizon de surface (CaCO<sub>3</sub> = 36 %) et dénotent nettement une accumulation du carbonate de calcium dans la partie inférieure du solum. L'horizon Bkkm est un horizon constitué d'une croûte calcaire indurée, massive, de couleur blanchâtre à blanc crème et de plus de 15 cm d'épaisseur (photo 9). La partie supérieure de cette croûte est constituée d'une pellicule rubanée et sa partie inférieure est formée d'un encroûtement calcaire qui enrobe des éléments grossiers.

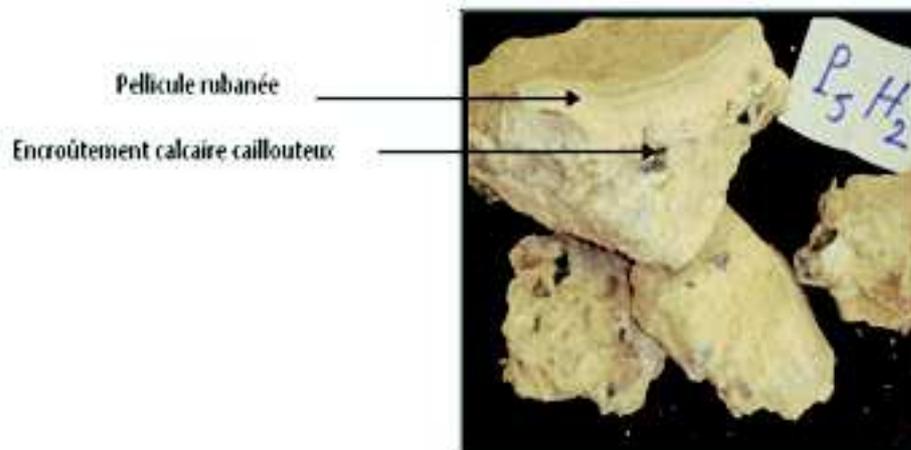


Photo 9. Croûte calcaire de l'horizon Bkkm du profil 5

Le tableau VIII révèle que la texture de ce sol est argileuse en surface et sableuse en profondeurs (figure 17). La CEC est faible ( $7 < CEC < 12 \text{ cmol}^+/\text{Kg}$ ). Ce profil n'est

ni salé ( $CE < 1,5$  dS/m), ni sodique ( $ESP < 12$  %) et son complexe adsorbant est saturé essentiellement par le calcium et le magnésium. Le taux de matière organique est partout faible ( $MO < 1\%$ ) et le pH est dans tout les horizons basique ( $8,4 < pH < 8,8$ ). La conductivité hydraulique de ces sols est assez rapide ( $8 < K < 12$  cm/h) (dû au choix de méthode).

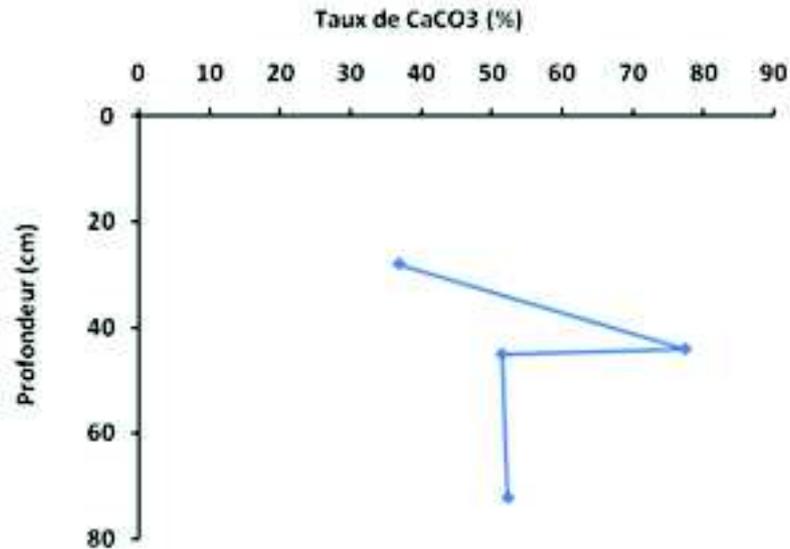


Figure 16 . Profil calcaire du profil 5.

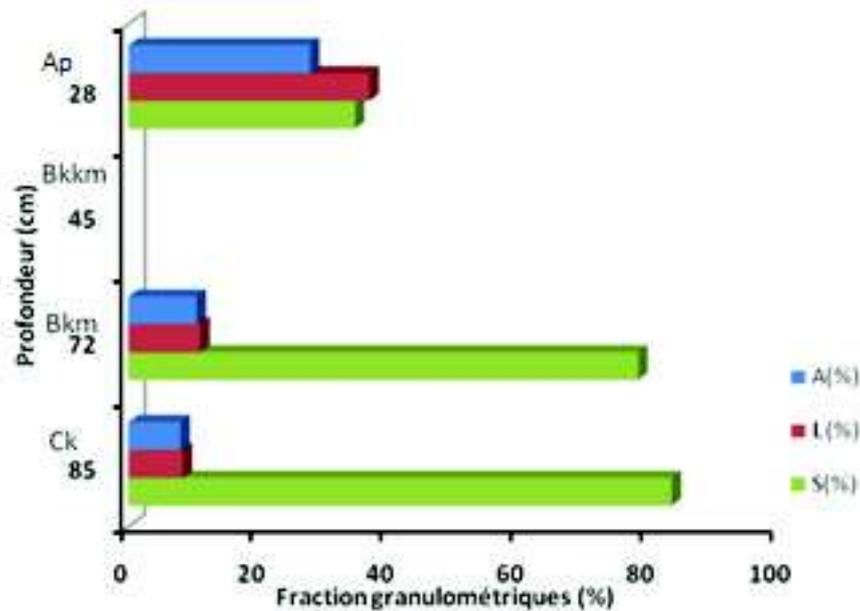


Figure 17 . Profil textural du profil 5

#### Classification du profil 5

Le profil 5 contient au moins un horizon dont le taux de CaCO<sub>3</sub> est supérieur à 15% et dont l'épaisseur dépasse 15cm. Ce sol remplit donc le critère de classification des Calcisols

Les horizons Bkm et Ck dont les taux de CaCO<sub>3</sub> dépassent 50% et les épaisseurs supérieures à 27 cm suggèrent le préfixe *hypercalciq*ue (hc) pour ce sol.

L'horizon Bkkm, induré par le CaCO<sub>3</sub>, dont l'épaisseur est de 18 cm et le taux en CaCO<sub>3</sub> est de 77% donne le préfixe petrocalcique (pc),

L'horizon de subsurface (Bkkm) présente une compaction naturelle située à une profondeur inférieure à 50 cm et qui constitue un obstacle pour la pénétration racinaire Aboutit au préfixe densik (dn).

Les horizons Bkm et Ck ont plus que 40 % en volume d'éléments grossiers (> 50%) et ils se situent à moins de 100 cm de profondeur. Cette caractéristique suggère le préfixe *squelettique* (sk).

Ainsi, le profil 5 est un Petrocalcic Hypercalcic Calcisol (Densic) (Skeletal).

Son équivalent dans la classification USDA (2009) est un Calcic lithicPetrocalcic et dans la CPCS (1967) un sol brun calcaire à croûte et encroûtement calcaire.

## 1-2-Analyse Statistiques

---

A ce niveau, seuls les horizons diagnostiques calciques et hypercalciques sont pris en compte pour l'analyse statistique. Les paramètres étudiés ici sont les paramètres utilisés par la WRB (2006) pour la définition des Calcisols. Ces paramètres sont, en dehors du calcaire, la matière organique (MO), la texture, la conductivité électrique (CE) et la sodicité (ESP). Nous présentons d'abord les statistiques descriptives de l'ensemble de ces paramètres et, ensuite, nous réaliserons des régressions linéaires entre le calcaire et les autres descripteurs des horizons diagnostiques. Seules relations statistiquement significatives seront représentées graphiquement. Les horizons diagnostiques étudiés sont les horizons calciques, hypocalciques et hypercalciques.

### 1-2-1-Les statistiques descriptives

Le tableau IX révèle que les deux principaux critères diagnostiques de l'horizon calcique sont très variables. En effet, les résultats indiquent que l'épaisseur de ces horizons varie entre 15 et 70 cm et que leurs teneurs en calcaire varient entre 24 et 83 %. Les coefficients de variation de ces deux variables se situent entre 32 et 40 % et peuvent donc être considérés comme moyennement forts. Les teneurs de ces horizons en argile, limon et sable sont également très variables. Les teneurs en argile et en limon varient dans le même intervalle et se situent entre 8 et 50 %. En revanche, les taux de sables sont beaucoup plus variables et sont compris entre 13 et 83 %. Ces résultats signifient que les horizons diagnostiques calciques de la région de Sétif sont différemment pourvus en calcaire et que leur texture est très variables ( $34 \% < CV < 50 \%$ ).

Les résultats montrent aussi que ces horizons calciques sont basiques, non salés et pourvus de faibles taux de matière organique. Ces paramètres varient très peu même si les statistiques montrent le contraire. En effet, le pH varie entre 8,2 et 8,9, la CE entre 0,1 et 0,6 dS/m et la MO entre 0 et 1,7 %.

En ce qui concerne la CEC, elle suit apparemment les taux d'argile et elle se situe dans la même gamme de variation que ces derniers ( $CV = 38 \%$ ). Ces horizons calciques sont pourvus d'une CEC faible à moyenne ( $7 < CEC < 25 \text{ cmol}^+/\text{kg}$ ). Ils se caractérisent par une forte variation de l'ESP ( $0,3 < ESP < 38 \%$ ) et de la perméabilité hydraulique d'où des coefficients de variation forts ( $CV > 48 \%$ ) ; Ces horizons peuvent donc être sodiques ou non.

En générale, les horizons calciques des Calcisols de Sétif varient, de par leur morphologie, par leur composition granulométrique, leurs teneurs en calcaire et par

leurs propriétés pédologiques (ESP et MO). Ces horizons peuvent donc être calciques, hypocalciques ou hypercalciques, sodiques ou non, pourvu en MO ou non et argileux-limoneux ou sableux. Ils sont aussi peu perméables à très perméables.

Tableau IX . Statistiques descriptives des horizons diagnostiques des profils étudiés

	Moyenne	Minimum	Maximum	CV
<b>Epaisseur (cm)</b>	27,4	15,0	70,0	46
<b>A (%)</b>	31,4	8,0	52	34
<b>L (%)</b>	31,1	8,4	49	35
<b>S (%)</b>	37,5	13,1	83	50
<b>CaCO<sub>3</sub> (%)</b>	50,4	24,1	83	32
<b>CEC (cmol+/Kg)</b>	13,8	7,6	25,1	38
<b>CE(dS/m)</b>	0,3	0,1	0,6	52
<b>pH</b>	8,6	8,2	8,9	2
<b>MO (%)</b>	0,3	0,0	1,7	162
<b>K (cm/h)</b>	11,2	1,7	20,3	48
<b>ESP %</b>	10,9	0,3	38,0	91

### 1-2-2- Les Corrélations

A ce niveau, nous nous sommes intéressés à étudier uniquement les relations entre les taux de calcaires et les autres paramètres des horizons diagnostiques des Calcisols étudiés. Les résultats (tableau X) révèlent que seuls les taux de MO et le pH ont des relations statistiquement significatives avec les taux de calcaire. En ce qui concerne la relation entre le calcaire et le pH, nous considérons que cette relation n'a pas de sens pédologique précis et ne traduit pas réellement l'effet du carbonate de calcium sur les valeurs du pH. En effet, la gamme de variation du pH est trop restreinte pour mettre en évidence un quelconque effet du calcaire sur sa variation. Par ailleurs, les résultats ont montré que les horizons étudiés sont assez hétérogènes (ESP, MO, Texture...). Cette hétérogénéité peut atténuer ou amplifier l'effet du calcaire sur le pH. Cependant, Djili et Daoud (1999) ont montré que le carbonate de calcium a un effet sur la variation du pH jusqu'à un taux de 2,5 %. Au delà de ce seuil, les teneurs en calcaire n'ont plus aucun effet sur la variation du pH des sols d'Algérie.

En ce qui concerne l'effet du calcaire sur les taux de matière organique, nous pensons que cette relation doit être prise avec précaution car le nombre de couples étudiés est restreint (19 couples) et la majorité des teneurs en MO sont extrêmement faibles et n'obéissent pas à une distribution normale.

\*Corrélations significatives à  $p < 0,05$  Observations N=19

Cette étude a montré que les sols étudiés se caractérisent par trois d'horizons diagnostiques différents : calcique, hypercalcique et petrocalcique. L'accumulation calcaire dans ces horizons peut être diffuse, sous forme d'encroûtement continu ou sous forme de croûte massive et dure comme indiqué par le tableau XI. Cette accumulation est parfois discontinue et s'exprime sous forme de nodules ou d'amas friables. Les résultats des analyses ont montré que les teneurs en calcaire de ces horizons varient entre 24 et 83 % en fonction du type d'horizon. Ainsi, ces taux varient entre 15 et 50 % de CaCO<sub>3</sub> dans les horizons calciques (forme diffuse, amas friable, nodules et traînées verticales), entre 45 et 80 % dans les horizons hypercalciques (encroûtement calcaire) et ils se situent aux alentours de 80 % dans les horizons pétrocalciques (croûte calcaire dure).

Les sols étudiés sont généralement assez profonds (profondeur > 1 m), peu organiques ( $MO < 1,9\%$ ) et pourvus d'une CEC faible à moyenne ( $7 < CEC < 18 \text{ cmole}^+/\text{Kg}$ ). Le calcium et le magnésium sont les cations dominants du complexe adsorbant. Cependant, le sodium prend des proportions importantes dans certains horizons (Bk1 du profil P3 et Bkm et Bwk du profil 4), en particulier les horizons de profondeur où l'ESP peut atteindre 38 % comme c'est le cas du profil P4. Par ailleurs, les taux d'argiles sont généralement assez forts ( $A > 22\%$ ) et peuvent même atteindre de très fortes proportions ( $A = 52\%$ ) dans le profil P3 (Bk1). De même, les profils étudiés se distinguent les uns des autres par leurs caractéristiques spécifiques telles que la texture, la couleur et la profondeur de la croûte calcaire (Bkkm des profils P4 et P5). Cette dernière peut constituer un obstacle physique à la pénétration des racines. Les taches d'oxydoréduction sont une particularité du profil P3 (Ck). Enfin, la charge caillouteuse peut atteindre et dépasser parfois même le taux de 40 %, notamment dans les horizons Ck du profil 1 et Bkm et Ck du profil 5.

Toutes ces spécificités ont engendré des morphologies différentes aux sols étudiés et ont abouti à 5 superpositions différentes :

- Ap/ABk/Bkm/Ck pour le profil P1.
- Ap /Bw/Bk1/Bk2/Ck /C pour le profil P2.
- Ap/Bw1/Bw2/Bk1/Bk2/Ck pour le profil P3.
- A/Bkkm/Bkm/Bwk pour le profil 4.
- A/Bkkm/Bkm/Ck pour le profil 5.

Sur la base de ces caractéristiques pédologiques et superpositions des horizons, les profils étudiés ont permis de reconnaître 5 Calcisols références dans la région de Sétif :

- Petrocalcic Hypercalcic Calcisol (Densic) (Skeletal).
- Petrocalcic Hypercalcic Calcisol (Sodic) (Densic) (Siltic)
- Hypercalcic Calcisol (sodic) (Siltic) (Clayic).
- Hypercalcic Calcisol.
- Hypercalcic Calcisols (Skeletal)

Ces Calcisols références sont illustrés par la figure suivante :

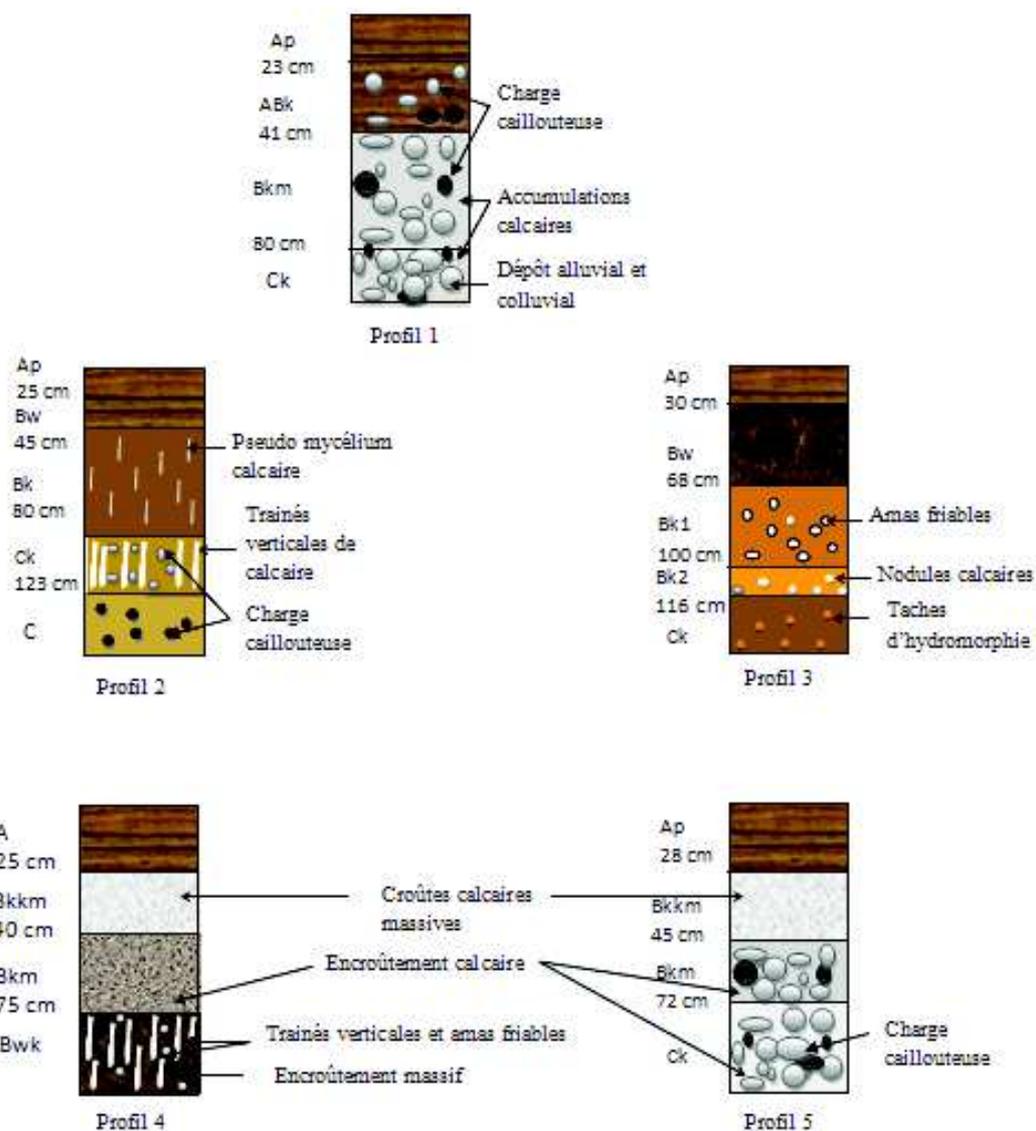


Figure 18 . Schémas des 5 profils étudiés

Horizons diagnostiques	Type de distribution et d'individualisation du CaCO <sub>3</sub> dans les horizons		Propriétés diagnostiques	Épaisseur des horizons diagnostiques	Teneurs en CaCO <sub>3</sub> (%)	Matériaux diagnostiques
Horizons calciques	Distribution diffuse	tous les Hz de surface et quelques Hz de profonds	Forme diffuse	Quelques dizaines de centimètres	Entre 15 et 38%	Tous les matériaux contenant plus de 2% du CaCO <sub>3</sub> -Vive effervescence à - HCl
	Concentrations discontinues	P <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (Bkl); P <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (Bkm); P <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (Bw2)	Accumulation du CaCO <sub>3</sub> sous forme  Amas friables ; granules et/ou nodules plus ou moins durs	Hz B : quelques dizaines de centimètres (> 16cm)	Entre 49 et 53 %	-Vive effervescence à - HCl
Horizons hypercalciques	Concentration continue : encroûtement non feuilleté	P <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (Bkm) P <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (Bkl) P <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (Bk2); P <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (Ck); P <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (Bkm) P <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (Bkm)	Accumulation du CaCO <sub>3</sub> sous forme  Encroûtement massif plus ou moins dur, tuileux ou pas, avec ou sans amas friables	Hz B : quelques dizaines de centimètres ou plus (> 20cm)	Entre 46 et 84 %	-Vive à très vive effervescence à HCl
Horizons perocalciques	Concentration continue : encroûtement feuilleté	P <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (Bkkm); P <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (Bkkm)	Croûte calcaire avec  Pellicules rubanées	- quelques dizaines de centimètres ou plus (> 17cm) - quelques millimètres	Entre 77 et 80 %  > 80 %	-Très vive effervescence à HCl

Tableau XI . Les principaux horizons diagnostiques des profils étudiés de la wilaya de Sétif - description macromorphologique selon la WRB 2006

## 2- Les Calcisols d'Algérie

Les résultats obtenus ici sont le fruit du traitement de la base de données pédologique du Nord de l'Algérie élaborée par Djili (2000).

Sur la base des taux de calcaire total, la profondeur des profils et l'épaisseur des horizons qui sont les critères utilisés par la WRB (2006) pour caractériser les horizons diagnostiques des Calcisols, nous avons retenu, parmi les 1355 profils qui constituent la base de données pédologique, 165 Calcisols et 243 horizons diagnostiques calciques. Ces Calcisols qui sont tous géoréférencés constituent une mini-base de données sur lesquelles les différents traitements seront effectués. Ainsi, c'est sur cette mini-base de données que nous avons effectué les calculs statistiques et recherché les propriétés diagnostiques (texture, salinité, sodicité,...) pour ajouter les préfixe et suffixe des Calcisols références.

### 2-1- Localisation des Calcisols du Nord de l'Algérie

Il s'agit donc des 165 Calcisols (voir annexe 3) que nous avons spatialisé sur un fond géographique de l'Algérie septentrionale « Comgéo »(I.N.C.T., 2000) à l'aide du logiciel Map/info. La carte ainsi obtenue (figure 19) montre que les Calcisols sont très disséminés à travers le pays et ils se localisent surtout dans la frange la plus septentrionale de l'Algérie, les hauts plateaux compris. Les Calcisols sont très peu fréquents et même rares dans les parties présahariennes et sahariennes de l'Algérie. Nous avons par la suite regroupé les Calcisols en 23 Calcisols références en fonction des propriétés diagnostiques de chaque profil.

Cependant, la carte qui est présentée à une très petite échelle comporte de nombreux profils qui se chevauchent du fait que les études qui ont servies à la constitution de la base de données ont été réalisées aux grandes et aux moyennes échelles. Ainsi, la qualité de l'interprétation visuelle se trouve quelque peu altérée. Ceci nous a conduit à présenter les Calcisols références sous forme de classes de fréquences à travers les différentes régions du pays comme indiqué dans le tableau XII.

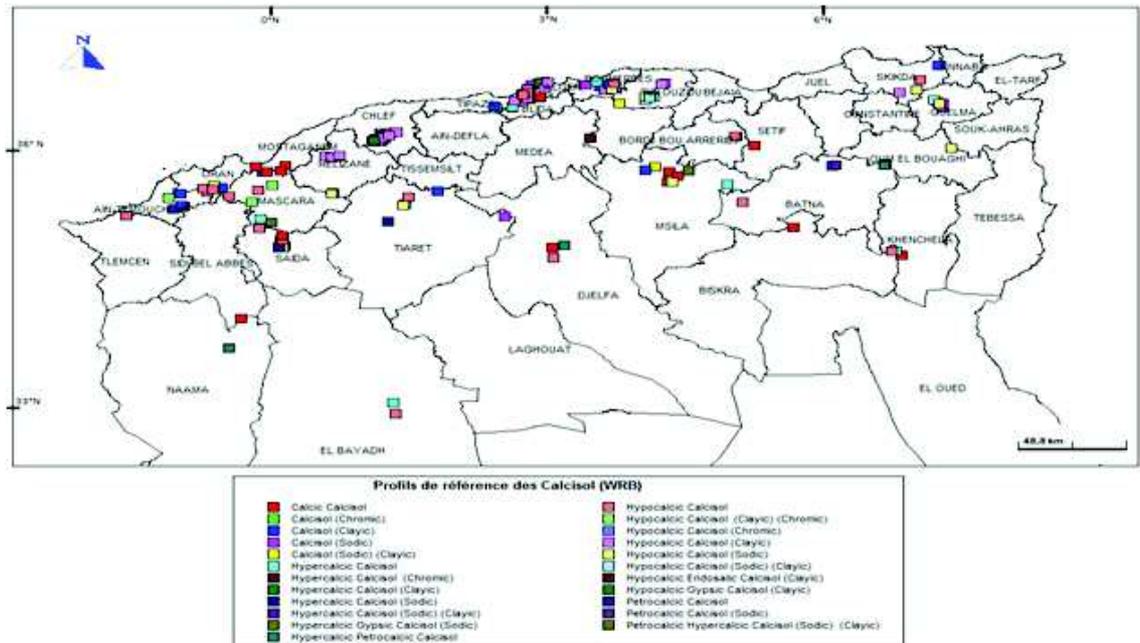


Figure 19 . Localisation des Calcisols références

Tableau XII . Classification et répartition des Calcisols références par région

Calcisols références	Classification WRB	(%)	Régions
Réf 1	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	22	Relizane, Chlef, Blida, Tipaza, Alger, Boumerdes, Tizi ousou, Skikda
Réf 2	Hypocalcic Calcisol	17	Ain Temouchent Massacra, Oran, Saida, Relizane, Chlef, Tiaret, Tipasa, Blida, Boumerdes, Bourdj Bou Arreridj, skikda, Oum El Bouaghi, Batna, Biskra, Djelfa, El Bayadh
Réf 3	Calcic Calcisol	11	Ain Temouchent, Oran, Massacra, Mostaganem, Saida, Chlef, Alger, M'Sila, Djelfa, Setif, Biskra, Sidi Belabbes
Réf 4	Hypocalcic Calcisol (Sodic)	10	Tizi ousou, Oran, Saida, Relizane, Tiaret, Boumerdes, Skikda, Guelma, Oum El Baouaghi, M'sila
Réf 5	Calcisol (Clayic)	10	Ain Temouchent, Oran, Mostaganem, Chlef, Tipasa, Boumerdès M'Sila, Tiaret, Skikda, Batna
Réf 6	Hypercalcic Calcisol	5	Massacra, Tiaret, Tipasa, Blida, Boumerdès, M'sila, El Bayadh
Réf 7	Calcisol (Sodic)	3	Tiaret, Alger, Boumerdès, Tizi ousou, Guelma,
Réf 8	Hypocalcic Calcisol (Sodic) (Clayic)	3	Tizi ousou, Guelma
Réf 9	Hypocalcic Endosalic Calcisol (Clayic)	2	Chlef, El Bayadh
Réf 10	Hypocalcic Calcisol (Clayic) (Chromic)	2	Ain Temouchent, Massacra, Chlef
Réf 11	Calcisol (Sodic) (Clayic)	2	Alger, Tizi ousou, M'sila
Réf 12	Hypercalcic Petrocalcic Calcisol	2	Naama, Djelfa, Ou El Bouaghi, Batna
Réf 13	Hypercalcic Calcisol (Sodic)	2	Saida, Tiaret
Réf 14	Calcisol (Chromic)	1	Chlef
Réf 15	Hypercalcic Calcisol (Clayic)	1	Alger
Réf 16	Hypercalcic Calcisol (Chromic)	1	Médéa
Réf 17	Hypercalcic Gypsic Calcisol (Sodic)	1	M'sila,
Réf 18	Hypercalcic Calcisol (Sodic) (Clayic)	1	Batna
Réf 19	Petrocalcic Calcisol	1	Saida
Réf 20	Petrocalcic Hypercalcic Calcisol (Sodic) (Clayic)	1	Mascara
Réf 21	Petrocalcic Calcisol (Sodic)	1	Saida
Réf 22	Hypocalcic Calcisol (Chromic)	1	Chlef, Blida
Réf 23	Hypocalcic Gypsic Calcisol (Clayic)	1	Chlef

Le tableau XII révèle que les Calcisols les plus répandus sont les Hypocalcic Calcisols (Clayic) (22 %) suivis par les les Hypocalcic Calcisol (17%), les Calcic Calcisols (11%), les les Hypocalcic Calcisol (Sodic) (10 %) et les Calcisols (Clayic) (10 %). Tous les autres Calcisols références sont peu à très peu représentés (1 à 5 %).

Par la suite, nous avons regroupé tous les Calcisols qui ont le même type d'horizon diagnostique pour constituer les grandes références. Les résultats ont montré que les Calcisols références se subdivisent en quatre grandes références :

- Les Hypocalcic Calcisols sont les plus courantes et ils représentent un peu plus de la moitié des Calcisols (58 %). Cette référence se localise essentiellement dans la partie la plus septentrionale de l'Algérie.
- Les Calcic Calcisols sont également (27 %) assez fréquents et constituent presque le un tiers des Calcisols. Cette référence peut se rencontrer aussi bien au nord qu'au sud de l'Algérie du nord.
- Les Hypercalcic Calcisol, avec 13 % de l'ensemble des Calcisols sont quand même assez fréquents et se localisent surtout dans les régions internes du pays.
- Les Petrocalcic Calcisols sont très peu fréquent (3 %) et se localisent surtout dans le milieu semi-aride.

## 2-2-Evaluation statistique de l'horizon diagnostique des Calcisols du nord de l'Algérie

---

### 2-2-1- Les propriétés diagnostiques

Le tableau XIII montre que les deux principales propriétés diagnostiques de l'horizon calcique sont très variables ( $CV > 40\%$ ). En effet, l'épaisseur des horizons varie de 15 à 80 cm et la teneur de  $CaCO_3$  varie de 15% à 89%. Ce résultat signifie que les horizons diagnostiques des Calcisols étudiés se caractérisent par une très grande diversité morphologique et analytique. Ces horizons sont donc très hétérogènes d'où les qualificatifs calcique, hypocalcique, hypercalcique et petrocalcique. De même, ces horizons peuvent n'occuper qu'une fine fraction du solum (15 cm) mais peuvent constituer parfois l'essentiel du profil (80 cm).

Tableau XIII . Statistiques descriptives des critères diagnostiques

Critères	$CaCO_3$ (%)	Epaisseur des horizons (cm)
Maximum	89	80
Minimum	15	15
Moyenne	29	36
C.V%	52	42

### 2-2-2- Les relations entre les taux de calcaire avec les autres paramètres

L'analyse statistique réalisée ici a été effectuée sur l'ensemble des horizons diagnostiques sans tenir compte de leur position dans le profil. Il s'agit en fait de rechercher la corrélation entre les taux de calcaire d'une part et les taux d'argile, les taux de MO, la CE, l'ESP, l'épaisseur de l'horizon diagnostique, les taux de gypse et la forme d'accumulation calcaire d'autre part. Seules les corrélations statistiquement significatives seront représentées graphiquement et leur régression linéaire déterminée.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau XIV.

		Epaisseur des Hz	argile	CEC	MO	calcaire	forme l	ESP	gypse	CE
<b>Calcaire</b>	r	-0,127*	-0,371**	-0,252*	0,141	1	0,481**	0,162	-0,025	-0,012
	P	0,049	0,000	0,022	0,071	.	0,000	0,142	0,928	0,849
	N	242	226	83	164	242	204	83	16	242

\*\* Corrélation est hautement significative à  $p < 0.01$

\* Corrélation est significative à  $p < 0.05$ .

Tableau XIV . Corrélations entre le taux de calcaire et les différentes variables des horizons diagnostiques des Calcisols du Nord de l'Algérie

L'analyse du tableau XIV montre que les corrélations sont statistiquement très hautement significatives ( $p < 0,01$ ) entre les taux de calcaire et les taux d'argile et les formes d'accumulation, significatives ( $p < 0,05$ ) entre les taux de calcaire et l'épaisseur et la CEC et statistiquement non significatives ( $p > 0,05$ ) entre les taux de calcaire et les taux de MO, l'ESP, la CE et les taux de gypse.

#### La relation entre les taux de calcaire et les taux d'argile

Calculée pour 226 couples de données, la relation entre les taux de calcaire et les taux d'argile est négative et statistiquement très hautement significative ( $r = - 0,37$  ;  $p < 0,001$ ). Ce résultat signifie que l'augmentation des taux de calcaire dans les horizons calciques s'accompagne d'une diminution des taux d'argile. La droite de la régression linéaire illustrée par la figure 20 confirme clairement la tendance à la diminution des taux d'argile quand les taux de calcaire augmentent selon l'équation  $A (\%) = - 0,37 CaCO_3 (\%) + 41,31$ . De même, l'hémicorrélation de la figure 21 montre que la quasi-totalité des points se situent au-dessous du segment de droite qui relie les points  $y = 100$  et  $x = 100$ . Ce résultat signifie que ces deux fractions ne peuvent pas cumuler un total supérieur à 100 % et qu'elles appartiennent donc à deux fractions granulométriques différentes. Ce résultat concorde bien avec ceux obtenus par Djili (2000) et Berkal (2006) qui ont trouvé la même hémicorrélation, mais en considérant tous les horizons des profils qu'ils ont étudié. Les 3 ou 4 points qui se situent au-dessus de ce segment de droite correspondent ou bien à des erreurs d'analyse ou bien au fait qu'une partie de leur calcaire est de granulométrie argileuse et donc a été doublement comptabilisée.

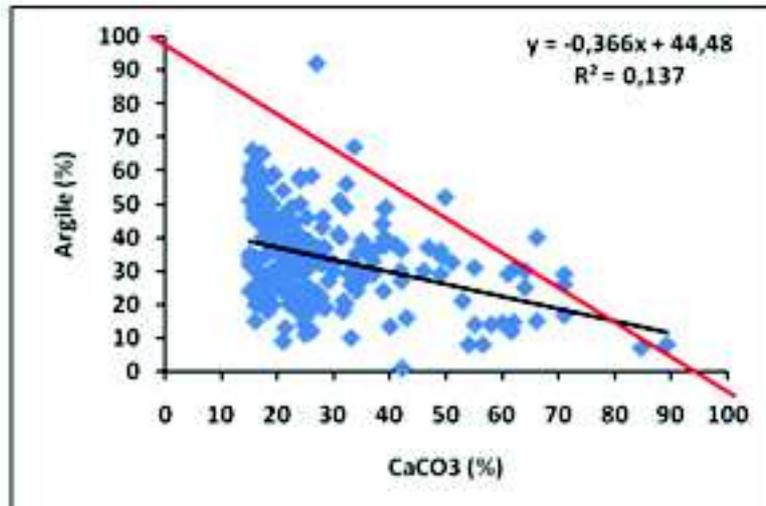


Figure 20. Corrélation entre le taux de calcaire et le taux d'argile

· La relation entre les taux de calcaire et la CEC

La corrélation entre la CEC et le taux de calcaire est significative et négative pour les 83 couples de données ( $r = -0,25$ ,  $p < 0,05$ ). La droite de la régression linéaire indique une légère tendance à la diminution des valeurs de la CEC quand le taux de calcaire augmente (figure 21). Cette tendance est analogue à celle de la relation argile- $\text{CaCO}_3$ . Ce résultat est tout à fait logique quand on sait que la CEC des sols d'Algérie est contrôlée par les taux d'argile (djili, 2000). Ce résultat signifie que, quand les taux de calcaire augmentent considérablement dans les sols, il n'y a plus de place pour l'argile et donc la CEC diminue. L'équation de la régression linéaire entre ces deux paramètres est de type «  $\text{CEC} = -0,165 \text{ CaCO}_3 (\%) + 21,47$  ».

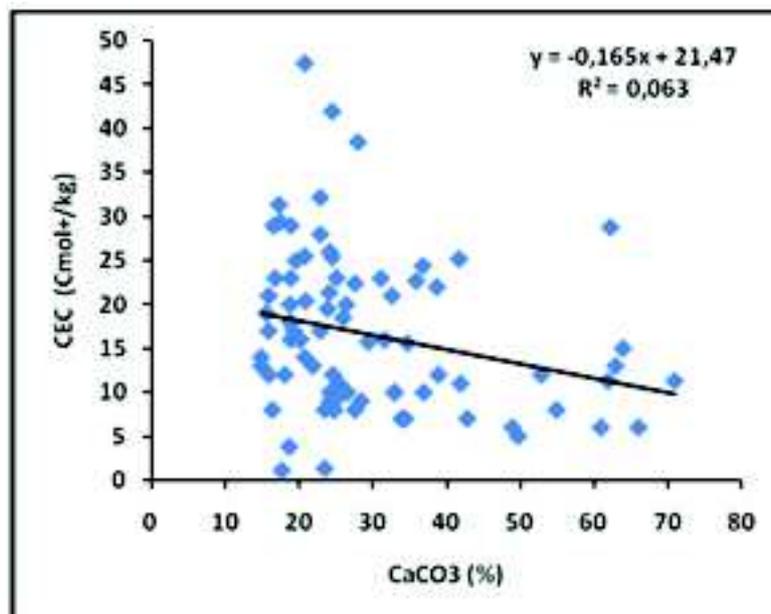


Figure 21. Corrélation entre le taux de calcaire et la CEC

· La relation entre les taux de calcaire et les formes d'accumulations calcaires

Pour les besoins du calcul, nous avons pondéré les formes de l'accumulation calcaire en leur affectant des valeurs chiffrées de 1 (accumulation diffuse) à 9 (dalle calcaire) en passant par les différentes étapes intermédiaires. Les calculs effectués sur cette base pour les 204 couples de données révèlent que la relation entre les taux de calcaires et la forme de l'accumulation qui leur correspond est statistiquement très hautement significative ( $r = 0,48$  ;  $p < 0,001$ ). Cette relation signifie que plus les taux de calcaire sont forts, et plus le calcaire s'individualise dans l'horizon calcaire. Ce résultat est bien illustré par la droite de la régression linéaire (forme =  $0,07 \text{ CaCO}_3 + 0,9765$ ) de la figure 22. Cependant, il faut noter que certains points constituent à notre avis des anomalies comme c'est le cas par exemple des forts taux de calcaire trouvés dans les accumulations diffuses ( $\text{CaCO}_3 = 70\%$ ) ou dans les ammass friables ( $\text{CaCO}_3 = 90\%$ ) ou des valeurs faibles trouvées dans les croûtes calcaires ( $\text{CaCO}_3 = 20\%$ ). Ces valeurs restent très minoritaires et n'ont pas un effet significatif sur la relation étudiée.

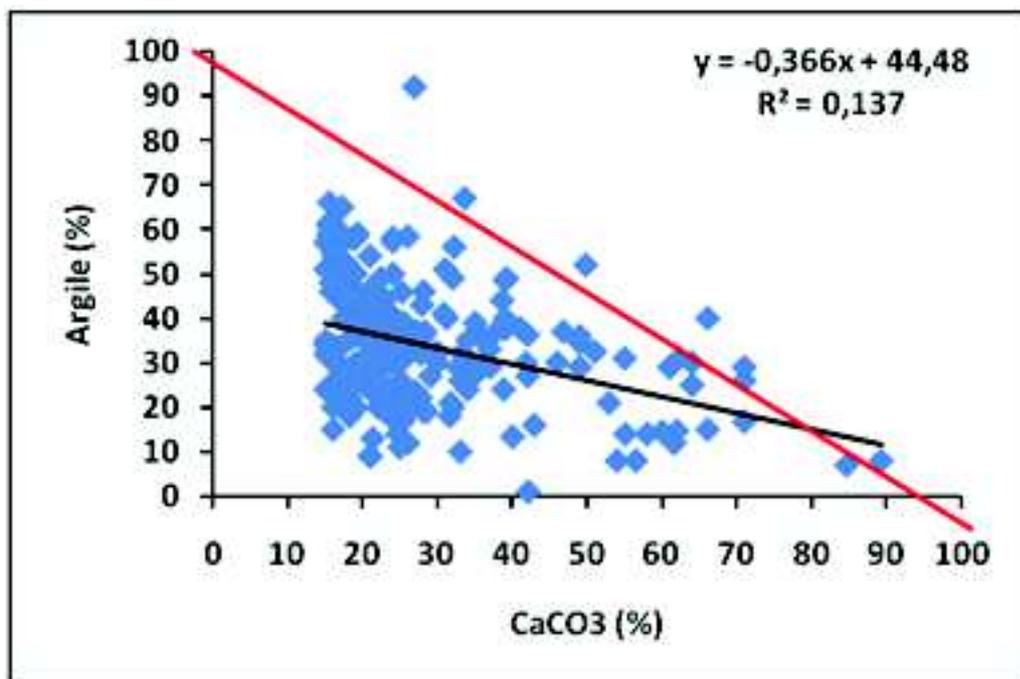


Figure 22. Corrélation entre le taux de calcaire et les formes d'accumulation du calcaire

La relation entre les taux de calcaire et l'épaisseur des horizons

Calculée pour 242 couples de données, la corrélation entre les taux de calcaire et l'épaisseur des horizons est statistiquement significative et négative ( $r = -0,127$  ;  $r < 0,05$ ) mais reste toutefois relativement faible. Cette relation signifie que les horizons calcaires les plus calcaires sont les moins épais. La figure 23 montre bien cette tendance à la diminution des épaisseurs des horizons calcaires quand les taux de calcaire augmentent selon la relation « Épaisseur (cm) =  $-0,183 \text{ CaCO}_3 + 40,736$  ». La figure 24 montre aussi que les épaisseurs des horizons sont très variables jusqu'à un seuil de 40 % environ de calcaire. Au-delà de ce seuil, les horizons calcaires deviennent nettement moins épais. Par ailleurs, nous remarquons qu'à l'exception d'une dizaine de points, tous les autres points se situent au-dessous du segment de droite qui relie l'épaisseur maximale 80 cm et le taux en calcaire maximale 90 %. Ce résultat signifie qu'au-delà d'un certain seuil, le calcaire commence

à s'individualiser sous forme de croûtes calcaires qui, elles, sont généralement moins épaisses que les autres formes d'accumulation calcaire

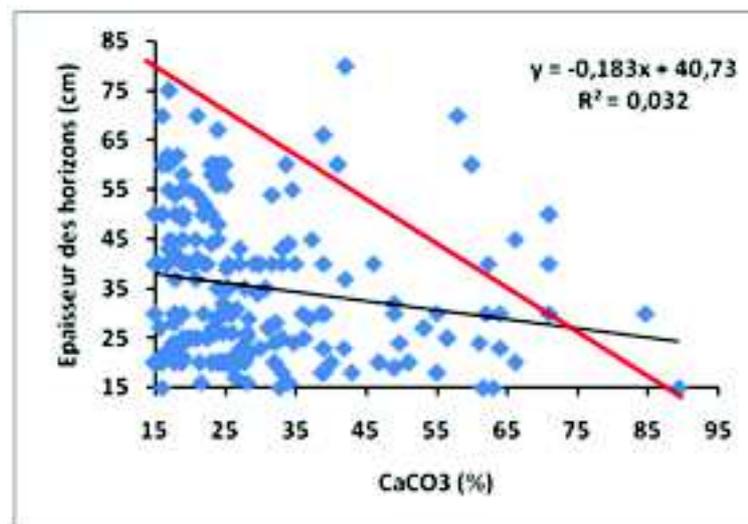


Figure 23. Corrélation entre le taux de calcaire et l'épaisseur des horizons

Relation entre les taux de calcaire et les autres paramètres

Les relations entre les taux de calcaire et les taux de MO, les taux de gypse, l'ESP et la CE sont quand à elles toutes statistiquement non significatives. Il y a lieu de noter que les corrélations avec la CE et les taux de gypse sont négatives. Ce résultat rejoint en partie celui obtenu par Djili (2000) et Berkal (2006). Il signifie aussi que l'augmentation des taux de calcaire dans les horizons diagnostiques calciques engendre une diminution des taux de gypse et des sels solubles.

---

# Conclusion générale

L'identification et la reconnaissance des Calcisols références des hautes plaines sétifiennes d'abord et de ceux de l'Algérie du nord ensuite ont constitué le principal objectif de ce travail.

Les résultats obtenus ont montré que les sols des hautes plaines sétifiennes sont représentés par 5 Calcisols références morphologiquement différents. En effet, ces références se différencient par leurs horizons (horizons calciques, hypercalciques et pétrocalciques) et propriétés diagnostiques (texture, charge caillouteuse, oxydo-réduction, ESP, présence d'un niveau dur à faible profondeur et la couleur). Sur la base de ces critères, les références identifiées sont les Hypercalcic Calcisols (Skeletal), les Hypercalcic Calcisols, les Hypercalcic Calcisols (Sodic) (Siltic) (Clayic), les Petrocalcic Hypercalcic Calcisols (Sodic) (Densic) (Siltic) (Chromic) et les Petrocalcic Hypercalcic Calcisols (Densic) (Skeletal). Les résultats ont montré que les horizons diagnostiques calciques de la région de Sétif sont différemment pourvus en calcaire ( $24 \% < \text{CaCO}_3 < 83 \%$ ) et que leur texture et leur sodicité sont très variables ( $0,3 \% < \text{ESP} < 38 \%$ ). Ces horizons sont généralement basiques ( $8,2 < \text{pH} < 8,9$ ), non salins ( $\text{CE} < 1 \text{ dS/m}$ ) et peu pourvus en matière organique ( $\text{MO} < 1,7 \%$ ).

L'analyse de la base de données pédologique a permis d'identifier 23 Calcisols références du Nord de l'Algérie. Le regroupement de ces références en fonction de leurs horizons diagnostiques a permis de constituer quatre grandes références représentées par les Hypocalcic Calcisols (58 %), les Calcic Calcisols (27 %), les Hypercalcic Calcisols (13 %) les Petrocalcic Calcisols (3 %). Les épaisseurs et les taux de calcaires des horizons diagnostiques sont très variables ( $15 \text{ cm} < \text{épaisseur} < 80 \text{ cm}$  ;  $15 \% < \text{CaCO}_3 < 89 \%$ ).

La spatialisation des Calcisols références a montré que leur distribution dans le nord de l'Algérie est liée au climat. En effet, dans la frange nord où le climat est humide à subhumide, l'accumulation du  $\text{CaCO}_3$  est moins intense d'où la formation des horizons diagnostiques hypocalciques alors qu'en milieu semi-aride et aride, les teneurs en  $\text{CaCO}_3$  sont plus fortes et les individualisations sont plus exprimées d'où la formation d'horizons diagnostiques hypercalciques et pétrocalciques.

L'étude des Calcisols réalisée dans une région très restreinte des hautes plaines sétifiennes a montré que ce type de référence est très diversifié. De ce fait, cette recherche mérite donc d'être poursuivie à une échelle plus large englobant des conditions de pédogenèse locale aussi diversifiées que possible pour identifier un maximum de références. De même, des études plus fines se rapportant à la compréhension des processus physiques et physico-chimiques qui régissent ce type de sols sont à notre avis fortement recommandées. En ce qui concerne la base de données pédologique, il serait utile de constituer une base de données spécifique à ce genre de référence. Toutes ces recommandations permettront de mieux comprendre les processus pédogénétiques impliqués dans la formation des Calcisols et par conséquent, elles permettront de mieux les étudier et de les cartographier et donc de mieux les valoriser.

## Références bibliographiques

- AFNOR, 1996.** Qualité des sols. Recueil de normes françaises. 3<sup>e</sup> ed. Paris – La Défense. 534p.
- AMUNDSON R., CHADWICK O.A., SOWERS J.M., DONNER H.E., 1989.** Soil Evolution Along an altitudinal transect in the Eastern Mojave Desert of Nevada. USA., *Geoderma*, 43, pp. 349-371.
- AUBERT G., 1947** – Les sols à croûtes calcaires. C.R. Conf. Méditer. Montpellier-Alger, Publ. Ass. Franc. ET Sol, Paris, 330-337.
- AYACH N., 1996.** Contribution à la création d'une banque de données pédologiques des sols calcaires de l'Algérie du nord. Mémoire d'ingénieur, INA, Alger. 70 p
- BAIZE D., 2000.** Guide des analyses en pédologie. 2eme Edition, INRA, 223p.
- BATOUCHE, S. LABIODE, H. 1990.** Les sols des hautes plaines Sétifiennes. Inventaire, analyse et synthèse des études pédologiques réalisées dans cette région de 1965 à 1985. Essai de thématization. Thèse, Univ. Sétif. 133p.
- BECHTEL INCORPORATED, 1975.** Développement des ressources en eau et de l'agriculture. USA, rapport final, volume II.
- BENABDI M., 1993.** Etude de l'influence du calcaire sur l'assimilation du phosphore. El harrach, INA, 57p.
- BELOUAM N., 1976.** Caractéristiques macromorphologiques et micropholmogiques de quelques sols à accumulation calcaire du Hodna. Ann. de l'I.N.A. El Harrach, Vol. VI 1, 53-79.
- BERKAL I., 2006.** Contribution à la connaissance des sols de sahara d'Algérie. De la base de données à la valorisation des paramètres pédologiques. Thèse de magistère. ENSA, 103p.
- BESNARD K., 2000.** Evolution physico-chimique des matériaux carbonatés en milieu triphasique. DEA, Hydrologie et hydrogéologie Géostatistique et géochimie. Univ P.M.C Paris-Sud, 48p.
- BOLT G .H., BRUGGENWET, M.G.M. 1976.** Soil chemistry A. basic elements. Elsevier, Amsterdam.
- BOULAIN J. 1961,**Géographie des sols, PUF.
- BRGM, 1997.**Les eaux minérales et le gaz carbonique. Note technique n°10, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Secrétariat d'Etat à l'industrie. 19p.
- BUI E.N., LOEPPERT R. H., WILDING L. P., 1990** – Carbonates phases in calcareoussoils of the Western United States. *Soil Sci. Am. J.*, 54: 39.
- CAILLEAU G., ERIC P., VERRECCHIA, BRAISSANT O. et EMMANUEL, 2009.** The biogenic origin of needle fibre calcite

- CALLOT G., CHAMAYOU H. et DELMAS B., 1980.** Mise en évidence expérimentale des phénomènes de dissolution et reprécipitation simultanées de la calcite. Conséquences pédogénétiques. *Science du Sol*, n° 1, pp. 5-16.
- CALLOT, P., ODONNE, F., DEBROAS, E.-J., MAILLARD, A., DHONT, D., BASILE et C., HOAREAU, G., 2009.** Three-dimensional architecture of submarine slide surfaces and associated softsediment deformation in the Lutetian Sobrarbe deltaic complex (Ainsa, Spanish Pyrenees). *Sedimentology*, 5, 1226-1249.
- CANDY 1., BLACK S. et SELLWOOD B.W., 2004.** Quantifying timescales of pedogenic calcrete formation using U-series disequilibria. *Sedimentary Geology*, 170, pp. 177-187.
- CHAMAYOU H. et LEGROS J. P., 1989.** Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. ACCT-CILF-PUF, 593p.
- CPCS, 1967.** Classification des sols. laboratoire de géologie pédologie de l'E.N.S.A. Paris Grignon, 87p.
- DELMAS A.B., BERRIER J. et CHAMAYOU H., 1987.** Les figures de corrosion de la calcite. Typologie et séquences évolutives. In. *Micromorphologie des sols*, Fedoroff, Bresson et Courty, ed, Ouvrage AFES, pp. 303-308.
- DERCOURT J. et PAQUET J. 1999.** *Géologie Objets et méthodes*. Dunod. 551p
- DJILI K., 1983 .** Cartographie des sols en milieu steppique calcaire. Thèse magister, I.N.A. El Harrach, 100p.
- DJILI K., 2000.** Contribution à la connaissance des sols du Nord de l'Algérie. Thèse doctorat INA. Alger, 243p.
- DJILI K., DAUD Y., AYACHE N., 1999.** Analyse de la distribution du calcaire dans les sols de l'Algérie septentrionale. *Etude et Gestion des Sols*, vol. 6, n° 3, pp. 201-213.
- DUCHAUFOUR P ., 2001.** Introduction à la science du sol. Sol, végétation, environnement. 6<sup>e</sup> édition, DUNOD. Paris, 314 p.
- DURAND R., 1980.** Variations saisonnières de la concentration des solutions et des gaz du sol en milieu crayeux. *Science du Sol*, n° 3, pp. 217-229.
- FAO, 1989.** Carte mondiale des sols. Légende révisée. 125p.
- F.A.O., 2006.** World Reference Base for Soil Resources. FAO, ISRIC and ISSS, Rome.
- GARRELS R.M. et Christ C.L., 1967.** Equilibres des minéraux et de leurs solutions aqueuses. Gauthier Villars, Paris, 355p.
- GERVY R., 1970.** Les phosphates et l'agriculture. Ed. Dunod. Paris. 298p.
- HADJ MILOUD S., 2010.** Morphologie et propriétés des Solonchaks références de la mina. Thèse de magistère, E.N.S.A. El Harrach. 109p.
- HALITIM A. 1988.** Sols des régions arides d'Algérie. OPU. Alger, 384p.
- HALITIM A. , ROBERT M., PEDRO G., 1983.** Etudes expérimentale de l'épigénie silicates en milieux confinés. Caractérisation des conditions de son développement et des modalités de sa mise en jeux. *Sc. Geol. Mini.* PP 63-73.

- ISSS/ISRIC/FAO, 1998.** World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Report 84, FAO, Rome.
- IUSS Working Group WRB, 2007.** World Reference Base for Soil Resources 2006, first update 2007. World Soil Resources Reports n°103. FAO, Rome.
- JAILLARD B., 1984.** Mise en évidence de la néogénèse de sables calcaires sous l'influence des racines: incidence de la granulométrie du sol. *Agronomie*, 4, pp. 91-100.
- JAILLARD B., 1987.** Les structures rhizomorphes calcaires : modèle de réorganisation des minéraux du sol par les racines. Thèse, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 221p.
- LAMOIROUX M., 1970.** Influence des alternances saisonnières sur la dissolution des roches carbonatées en régions méditerranéennes. *Science du Sol*, n° 1, pp 43-52.
- LAOUIA ET VAUDOUR, 1998.** "L'Homme et les Carbonates au Maroc" L actes du Séminaire : Aix-en-Provence, CAGEP-URA 903 CNRS.
- LEGROS J.P., DORIOZ J.M. et PARTY J.P., 1987.** Répartition des milieux calcaires, calciques et acidifiés en haute montagne calcaire humide. Conséquences agronomiques et écologiques. *Doc. Cano. Eco*, Grenoble, XXX: pp. 137-157.
- LEGROS J.P., 2005.** Les Américanistes du Languedoc, Etude et Gestion des Sols, vol. 12, 2, pp. 165-186.
- LEGROS J.P., 2007.** Les grands sols du monde. 1<sup>ère</sup> édition, Presses polytechniques et universitaires romandes. AFES : pp 253-290.
- LOZEL G. ET MATHIEU C., 1990.** Dictionnaire de science du sol. Deuxième édition, Lavoisier, 266p.
- MASON-WILLIAMS M.A., 1961.** Biological aspects of calcite deposition. *Memoria V della Rassegna Speleogica Italiana*, 14p.
- MATHIEU C., 2009** "Les principaux Sols du Monde ou voyage à travers l'épiderme vivant de la planète Terre", préface de Georges Pédro, Edition Lavoisier, coll. Tec et Doc. 231p.,
- MICHAUD A., 2007.** Intéraction entre biodisponibilité, phytotoxicité du cuivre et nutrition en fer de graminées mécanismes physiologiques et rhizosphériques. Thèse, INRA – Montpellier SupAgro. 178p.
- MORSE J.W. et ARVIDSON R.S., 2002.** The dissolution kinetics of major sedimentary carbonate minerals. *Earth-science Reviews*, 58, pp. 51-84.
- MUXART T. et BIROT P., 1977.** L'altération météorique des roches. Pub.n° 4 de Département de géographie de la Sorbonne, 279 p.
- OTI, 1974.** Projet d'étude devant permettre la définition de programmes de rénovation rurale des hautes plaines sétifiennes. *Ingénioros Culsultores*, Madrid. Résumé général, 119p.
- PAQUET H. et RUELLAN A., 1993.** Epigénie et encroûtements calcaires (calcrètes). In Coll. « Sédimentologie et Géochimie de la Surface » à la Mémoire de G. Millot, pp. 19-39.

- 
- PLUMMER N., WIGLEY T. M. L. et PARKHURST D. L.**, 1978. The kinetics of calcite dissolution in CO<sub>2</sub>-water systems at 5° to 60°C and 0.0 to 1.0 atm CO<sub>2</sub>. American Journal of Science, vol. 278, pp 179-216.
- POTTIER L.**, 1986. Etude expérimentale des interactions minéraux – hyphes mycélium. Cas d'un système carbonaté siliceux. Thèse ENSA Montpellier, 130p.
- POUGET M.** 1980. Les sols à croûtes calcaire dans les steppes Algériennes. Quelques aspects morphologiques et esquisses d'une évolution actuelle. Cah, OROSTOM Sec. Pedol. 18,3. 4 235. 236.
- RAHMOUNI A.**, 2010. Morphologie et propriétés des Gypsisols références d'El Hodna. Thèse de magistère, E.N.S.A. El Harrach. 140p.
- RISER, J., BARTINTZEFF J.-M., BONNEFILLE R., FONTUGNE M., GUENDON J.L., GUERIN C., NICOD J., OCCHIETTI S., PATOU-MATHIS M., PAUTREAU J.P., ROUSSEAU D.D., VAUDOUR J.ET VIALOU D.**, 1999. Le Quaternaire. Géologie et milieux naturels. Dunod, Paris, 313p.
- RUELLAN. A.**, 1980. L'accumulation du calcaire dans les sols. Cristallisation, déformation, dissolution des carbonates. Université Bordeaux II, pp 401-411.
- RUELLAN A.**, 1984. Les sols calcaires : les principaux travaux des pédologues français. AFES, livre jubilaire du cinquantenaire, pp. 111-121.
- PANAGOS P.ET VAN LIEDEKERKE M.**, 2008. Soils of the European Union. Institute for Environment and Sustainability. Scientific-Technical Reports, EUR 23439, 85p
- UNITED STATES SALINITY LABORATORY STAFF (USSLS)**. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. US Dept. Agric. Handbook No. 60.
- USDA**, 2009. Keys to Soil Taxonomy. 7th edn. US Dep. Agricult. Nat. Res. Cons. Serv., Washington, DC.
- VOGT T.**, 1979. Microsilicification dans les crêtes calcaires de milieux arides. Quelques remarques. Rech. Geog. A , Strasbourg, n° 12, pp 81.86.
- VOGT T.**, 1984. Croûtes calcaires : type et genèse. Exemple d'Afrique du nord et de France Méditerranéenne. Thèse de doctorat d'Etat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 228p.
- WRB**, 2006. World reference Base For Soil Ressources. Ed. FAO, IUSS, ISRIC, Rapport FAO n°103, Rome, 132 p.
- ZEMOURA A.**, 2005. Etude comparative de quelques méthodes de dosage du phosphore assimilable des sols calcaires en région semi-arides (W.Batna). Thèse de magister. Univ. El Hadj Lakhder de Batna, 118p.

## Annexes

### Annexe 1 : Matrice de corrélations entre le taux de calcaire et les différentes variables des horizons diagnostiques des Calcisols de Sétif

	Epaisseur	A	L	S	CaCO3	pH	CEC	MO
Epaisseur	1,00	0,16	0,36	-0,31	0,29	0,28	-0,22	-0,10
A	0,16	1,00	0,45	-0,85*	0,06	-0,19	0,82*	-0,08
L	0,36	0,45	1,00	-0,85*	-0,11	-0,22	0,11	0,27
S	-0,31	-0,85*	-0,85*	1,00	0,03	0,24	-0,54*	-0,11
CaCO3	0,29	0,06	-0,11	0,03	1,00	0,55*	-0,08	-0,63*
pH	0,28	-0,19	-0,22	0,24	0,55*	1,00	-0,17	-0,09
CEC	-0,22	0,82*	0,11	-0,54*	-0,08	-0,17	1,00	-0,11
MO	-0,10	-0,08	0,27	-0,11	-0,63*	-0,09	-0,11	1,00
CE	-0,15	0,52*	-0,04	-0,28	0,28	-0,20	0,44	-0,26
ESP	0,66*	0,12	0,18	-0,18	0,41	0,35	-0,31	-0,17

\*Corrélations significatives à  $p < 0,05$  Observations N=19

### Annexe 2 Matrice de corrélation entre le taux de calcaire et les différentes variables du Nord de l'Algérie

		épaisseur	argile	CEC	M.O.	calcaire	forme1	VNA
épaisseur	r	1	0,112	0,069	-0,299(**)	-0,127(*)	-0,168(*)	0,004
	P	0	0,093	0,533	0,000	0,049	0,016	0,974
	N	242	226	83	164	242	204	83
argile	r	0,112	1	0,262(*)	-0,010	-0,371(**)	-0,186(*)	0,210
	P	0,093	0	0,023	0,898	,000	0,010	0,071
	N	226	226	75	152	226	191	75
CEC	r	0,069	0,262(*)	1	0,186	-0,252(*)	-0,114	-0,255(*)
	P	0,533	0,023	0	0,138	0,022	0,337	0,020
	N	83	75	83	65	83	73	83
M.O.	r	-0,299(**)	-0,010	0,186	1	0,141	0,091	-0,002
	P	0,000	0,898	0,138	0	0,071	0,301	0,988
	N	164	152	65	164	164	132	65
calcaire	r	-0,127(*)	-0,371(**)	-0,252(*)	0,141	1	0,481(**)	0,162
	P	0,049	0,000	0,022	0,071	0	0,000	0,142
	N	242	226	83	164	242	204	83
forme1	r	-0,168(*)	-0,186(*)	-0,114	0,091	0,481(**)	1	-0,053
	P	0,016	0,010	0,337	0,301	0,000	0	0,654
	N	204	191	73	132	204	204	73
VNA	r	0,004	0,210	-0,255(*)	-0,002	0,162	-0,053	1
	P	0,974	0,071	0,020	0,988	0,142	0,654	0
	N	83	75	83	65	83	73	83
gypse	r	-0,306	0,516(*)	-0,006	0,043	-0,025	-0,068	0,008
	P	0,250	0,049	0,989	0,912	0,928	0,824	0,986
	N	16	15	7	9	16	13	7
CE	r	0,057	0,090	0,079	0,003	-0,012	-0,145(*)	0,277(*)
	P	0,377	0,176	0,477	0,967	,849	0,039	0,011
	N	242	226	83	164	242	204	83

\*\* Corrélation est hautement significative à  $p < 0.01$

\* Corrélation est significative à  $p < 0.05$ .

## Annexe 3 Critères diagnostiques des Calcisols

## Morphologie et propriétés des Calcisols références des hautes plaines sétifiennes

Longitude	Latitude	Classification (WRB)	Critères diagnostiques	
			Ca CO3 (%)	Epaisseurs (cm)
533,5	178,5	Calcisol	33	25
869,8	173,05	Hypercalcic Calcisol	55,1	18
487	217	Calcisol (Sodic)	49,8	24
874,2	168,7	Calcisol	28,1	16
545,5	181	Hypercalcic Petrocalcic Calcisol	58	70
858,45	282,7	Hypercalcic Petrocalcic Calcisol	60	60
633,2	279,1	Calcisol (Sodic) (Clayic)	33,1	43
534,5	165,2	Hypocalcic Calcisol	16	15
704	257,6	Hypercalcic Calcisol	51	20
666,1	274,4	Hypercalcic Gypsic Calcisol (Sodic)	63	15
922,02	302,25	Hypocalcic Calcisol (Sodic)	24,6	32
229,2	89	Calcisol	31,6	40
269,3	186,2	Hypercalcic Calcisol (Sodic)	66,1	20
269,4	186,2	Hypocalcic Calcisol	21,5	16
869,8	173,05	Hypercalcic Calcisol	61,6	15
272,2	280,5	Calcisol	29,6	40
864,4	173,15	Hypocalcic Calcisol	21,3	20
909,8	360,3	Hypocalcic Calcisol (Sodic)	20,9	37
269,3	185,2	Hypocalcic Calcisol (Sodic)	15,7	27
914,4	353,95	Calcisol (Sodic)	36,9	29
912,99	356,7	Hypocalcic Calcisol (Sodic)	24,6	26
906,65	362,95	Hypocalcic Calcisol (Sodic) (Clayic)	20,9	45
268,1	187,1	Calcisol	26,5	17
914,15	358	Calcisol (Sodic)	28,1	26
910	405,75	Calcisol (Clayic)	30,8	35
911,6	358,2	Hypocalcic Calcisol (Sodic)	24,3	20
806,24	280,54	Calcisol (Clayic)	37,2	45
218	52	Hypercalcic Petrocalcic Calcisol	84,7	30
271,3	180,2	Petrocalcic Calcisol	42,9	18
268,84	183,24	Petrocalcic Calcisol (Sodic)	28,5	22
646,1	260,3	Calcisol	27,2	23
810,26	281,48	Hypercalcic Calcisol (Sodic) (Clayic)	62,3	40
656	267,23	Calcisol	26,1	19
857,225	281,65	Hypocalcic Calcisol	21	25
857,22	281,65	Hypercalcic Petrocalcic Calcisol	71	30
647,3	273,4	Calcisol	34,8	24

## Annexe 4 Critères diagnostiques des Calcisols (suite)

Longitude	Latitude	Classification (WRB)	Critères diagnostiques	
			Ca CO <sub>3</sub> (%)	Epaisseurs (cm)
647,3	273,4	Calcisol	34,8	24
266,8	178,05	Hypocalcic Calcisol (Sodic)	16,5	22
624,5	275	Calcisol (Clayic)	30	40
270,8	177,8	Hypocalcic Calcisol (Sodic)	27,7	20
266,9	179,6	Hypercalcic Calcisol (Sodic)	61	24
650,1	260	Hypocalcic Calcisol (Sodic)	23	20
259,5	209,1	Petrocalcic Hypercalcic Calcisol (Sodic) (Clayic)	55	30
270,7	187,8	Hypocalcic Calcisol	19	24
269,4	192,3	Calcisol	39	18
421,5	248,7	Calcisol (Clayic)	35	40
768,2	203,8	Calcisol	25	20
210	252	Calcisol (Clayic)	36	30
250,75	273,8	Calcisol (Clayic)	25,5	35
196,15	247,4	Hypocalcic Calcisol	20	25
247,4	202,1	Hypocalcic Calcisol	17,2	45
248,25	213,95	Hypercalcic Calcisol	56,5	25
192	251	Hypocalcic Calcisol	24	20
254,85	272,5	Calcisol	28,3	29
117,4	218,6	Hypocalcic Calcisol	15	20
218,6	242	Hypocalcic Calcisol	18,6	21
246,95	249	Hypocalcic Calcisol	22,4	40
268,7	274,95	Calcisol	36,2	25
244	279,8	Calcisol	32,2	28
170	245	Calcisol (Clayic)	39	66
158,25	240,6	Hypocalcic Calcisol (Clayic) (Chromic)	24,4	20
240,6	234,3	Hypocalcic Calcisol (Clayic) (Chromic)	22,8	26
260	256,7	Hypocalcic Calcisol (Clayic) (Chromic)	21	25
203	256	Hypocalcic Calcisol (Sodic)	23	50
173	229,75	Calcisol	32	24
202	250	Hypocalcic Calcisol	19	21
171,75	230,1	Calcisol (Clayic)	46	40
164,45	226,5	Calcisol (Clayic)	39,2	30
365,4	320,05	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	22	52
360,5	314,7	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	24	67

## Annexe 5 Critères diagnostiques des Calcisols (suite)

## Morphologie et propriétés des Calcisols références des hautes plaines sétifiennes

Longitude	Latitude	Classification (WRB)	Critères diagnostiques	
			Ca CO3 (%)	Epaisseurs (cm)
365,48	321	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	21	70
360,64	313,08	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	18	42
624,5	362,2	Hypocalcic Calcisol (Sodic) (Clayic)	16,9	40
380	-30	Hypocalcic Endosalic Calcisol (Clayic)	19,1	50
366,09	321,31	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	21	70
361,24	313,83	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	21	54
513,5	380,7	Calcisol	42,1	80
579	379,2	Calcisol (Clayic)	38,6	30
380,5	-30,5	Hypocalcic Calcisol	18,3	62
318,8	290,96	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	16	60
311,85	291,65	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	19	58
519,86	383	Calcisol (Sodic) (Clayic)	26,6	31
363,52	314,21	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	16	70
369,21	318,47	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	23	60
364,18	312,9	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	17	55
364,12	314,48	Hypocalcic Endosalic Calcisol (Clayic)	22	50
643,9	383,2	Calcisol (Sodic)	32,7	15
513,1	381,22	Calcisol (Sodic)	31,7	54
371,2	319,17	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	18	54
586	375	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	15,3	20
372,12	318,51	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	20	40
366,22	311,5	Hypocalcic Calcisol (Clayic) (Chromic)	17	43
640	382	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	20	55
521,1	383,09	Hypercalcic Calcisol (Clayic)	66,1	45
364,23	311,58	Calcisol (Clayic)	34	44
511,2	363,6	Hypocalcic Calcisol (Chromic)	16,9	62
503,7	360,1	Hypocalcic Calcisol	22	40
363,96	310,52	Hypocalcic Calcisol (Chromic)	19	49
509,6	369,9	Hypocalcic Calcisol	18	30
367,05	318,34	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	24	48
364,68	312,6	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	21	41
628,4	365,2	Hypocalcic Calcisol (Sodic)	15	20

## Annexe 6 Critères diagnostiques des Calcisols (suite)

Longitude	Latitude	Classification (WRB)	Critères diagnostiques	
			Ca CO3 (%)	Epaisseurs (cm)
364,6	311,8	Hypocalcic Calcisol (Clayic) (Chromic)	24	56
632	366,1	Hypocalcic Calcisol (Sodic) (Clayic)	16	50
520,7	365,8	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	19	30
373,78	320,22	Calcisol (Clayic)	27	43
369,42	314,29	Calcisol (Chromic)	41	60
629,8	367,4	Hypocalcic Calcisol (Sodic) (Clayic)	22	30
521,58	383,25	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	17,8	30
509,7	365,7	Hypocalcic Calcisol	15	20
375,93	321,55	Hypocalcic Calcisol	25	56
624,1	366,2	Hypocalcic Calcisol (Sodic)	19	25
526,2	377,5	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	24,9	60
521,7	366,7	Calcisol	33	40
379,32	322,2	Hypocalcic Calcisol	24	60
363,7	310,78	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	16	50
378,9	-17,9	Hypercalcic Calcisol	89,3	15
325,08	292,25	Hypocalcic Calcisol	17,3	22
360,04	311,16	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	17	75
628,4	365,2	Hypocalcic Calcisol (Sodic) (Clayic)	20,2	25
594,8	378	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	19,3	40
325,38	293,09	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	18,5	41
367,52	317,13	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	24	45
494	353	Calcisol (Clayic)	49	30
366,99	316,87	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	24	57
478,4	353,8	Hypercalcic Calcisol	71	40
367,27	315,79	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	24	58
358,62	311,49	Calcisol	27	40
599,6	358,1	Calcisol (Sodic) (Clayic)	25,5	30
494	354,1	Hypercalcic Calcisol	71	50
381,59	322,97	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	18	37
576,4	385,2	Hypercalcic Calcisol	64	30
358,08	312,32	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	19	45
510	377,7	Calcisol (Sodic) (Clayic)	34,5	55
509,4	364,8	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	24,7	30
359,44	312,94	Hypocalcic Gypsic Calcisol (Clayic)	23	58

## Annexe 7 Critères diagnostiques des Calcisols (suite)

## Morphologie et propriétés des Calcisols références des hautes plaines sétifiennes

Longitude	Latitude	Classification (WRB)	Critères diagnostiques	
			Ca CO3 (%)	Epaisseurs (cm)
509,2	376,2	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	15,4	40
496,9	361,9	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	19	50
872,3	372,8	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	15	50
503,22	370,35	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	20,3	40
476,2	355,6	Calcisol (Clayic)	39	40
712	317	Hypocalcic Calcisol	31	27
506,2	371,4	Hypocalcic Calcisol	23,1	60
509,6	372,3	Hypocalcic Calcisol	23,4	20
529,8	384	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	18,8	35
585,8	375,6	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	15,7	20
711	317	Hypocalcic Calcisol	18	20
505,4	368,25	Hypocalcic Calcisol	24,9	25
584,5	376,8	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	17,1	20
374,12	318,48	Hypocalcic Calcisol (Clayic)	15,7	57
588,2	382,5	Calcisol (Clayic)	27,9	30
591,3	376,2	Hypocalcic Calcisol (Sodic)	24,3	50
593,2	383,5	Hypocalcic Calcisol	22,4	20
889,5	375,2	Hypocalcic Calcisol (Sodic)	16	60
892,1	387,5	Hypocalcic Calcisol	16	30
390,5	232,9	Hypercalcic Calcisol	54	50
393,45	241,6	Hypocalcic Calcisol	20,9	20
373,23	210,7	Hypercalcic Calcisol (Sodic)	52,9	50
730	305	Calcisol	25,6	15
387,5	230	Hypocalcic Calcisol (Sodic)	23,6	30
319,1	246,2	Hypocalcic Calcisol	19,7	21
566,1	381,2	Calcisol (Sodic)	29,5	47
570,8	315,77	Hypercalcic Calcisol (Chromic)	67,7	25
319,5	246,2	Hypocalcic Calcisol (Sodic)	17,6	25
318,1	245,75	Hypocalcic Calcisol (Sodic)	24,2	27
719,2	235,2	Hypocalcic Calcisol	23	15