

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE EL-HARRACH - ALGER
En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Sciences Agronomiques
Ecole doctorale : Science du sol

Les Vertisols références de la Mitidja

Présenté par :

CHEGGA Abdellah

Directeur de thèse : DJILI K. Professeur
10/06/2012

Président du jury : DAOUD Y. Professeur *Examineurs* : DRIDI B. Maître de conférence GAOUAS A.
Maître Assistant

Table des matières

Dédicace . . .	5
Remerciements . . .	6
ص خ ل م ل ا . . .	7
Résumé . . .	8
Abstract . . .	9
Liste des abréviations . . .	10
Introduction générale . . .	13
Chapitre I Synthèse bibliographique . . .	15
Introduction . . .	15
1-Pédogénèse des Vertisols . . .	15
1.1. Facteurs de formation des Vertisols . . .	15
2. Processus de formation des Vertisols . . .	17
3. Genèse des Vertisols . . .	17
4. Les modèles pédogénétiques . . .	18
5. Propriétés des Vertisols . . .	20
5.1. Les propriétés morphologiques . . .	20
5.2. Les propriétés minéralogiques . . .	24
5.3. Les propriétés chimiques des Vertisols . . .	25
5.4. Les propriétés physiques . . .	26
5.5. Le fonctionnement hydrique . . .	30
6. Micromorphologie des Vertisols . . .	32
7. Distribution des Vertisols dans le monde . . .	33
8. Les Vertisols en Algérie . . .	34
8.1. Les Vertisols de la Mitidja . . .	34
9. Classification des Vertisols . . .	34
9.1. La classification française CPCS (1967) . . .	35
9.2. La classification américaine (USDA, 1999) . . .	35
9.3. La classification FAO (2006) . . .	35
10. Problème de classification des Vertisols . . .	36
Chapitre II : Matériel et méthodes . . .	38
1. les Vertisols de la Mitidja . . .	38
1.1. Choix du site et méthodes d'échantillonnage . . .	39
1.2. Méthodes d'analyses . . .	40
1.3. Analyse du complexe argilo-humique . . .	41
1.4. Traitements des données . . .	45
1.5. Suivi des fentes de retrait et du microrelief gilgaï . . .	45
2. Identification des Vertisols références . . .	47
2.1. Acquisition de données . . .	47
2.2. Saisie des données . . .	49
2.3. Détermination des profils références des Vertisols selon la WRB (FAO, 2006) . . .	50

2.4. Traitements des données . . .	50
Chapitre III : Résultats et discussion . . .	52
1 Les Vertisols de la zone d'études . . .	52
1.1. Caractéristiques morphologiques et analytiques des sols de la zone d'étude . . .	52
1.2. Caractéristiques et propriétés physiques des profils . . .	67
1.3. Analyse du complexe argilo-humique . . .	78
1.4. Profils hydriques . . .	91
1.5. Les fentes de retrait . . .	94
1.6. Le microrelief gilgai . . .	100
1.7. Relations entre le taux d'argile et les autres paramètres . . .	102
2. Les Vertisols d'Algérie . . .	107
2.1. Le taux de remplissage . . .	108
2.2. Les Vertisols références de l'Algérie selon WRB (FAO, 2006) . . .	109
2.3. L'analyse de données . . .	112
2.4. Les corrélations . . .	125
3-Synthèses des résultats . . .	133
Conclusion générale . . .	137
Références Bibliographiques . . .	139
Annexe . . .	146
Annexe 1 . . .	146
ANNEXE 2 . . .	146
ANNEXE 3 . . .	147
Annexe 4 . . .	147
Annexe 4 . . .	148
Annexe 4 . . .	148
Annexes 5 . . .	149
Annexes 5 (suite) . . .	150
Annexe 6 . . .	151
Annexe 6 (suite) . . .	151
Annexe 6 (suite) . . .	152
Annexe 6 (suite) . . .	152

Dédicace

Je dédie ce travail A la mémoire de mon père, que Dieu tout puissant lui accorde sa sainte miséricorde et l'accueille en son vaste paradis. A ma mère, c'est grâce à elle que je suis arrivé à ce stade. Elle n'a jamais cessé de m'encourager et de me motiver. Si je dois consacrer toute ma vie pour elle je ne peux rendre ce qu'elle m'a fait. A mes frères et ma sœur. A mes cousins et mes cousines. A toute ma famille. A tous mes amis. A tous ceux et toutes celles qui me connaissent et qui m'aiment.

Remerciements

Que Dieu soit loué, que grâce à lui, je suis arrivé à ce niveau d'étude et qui m'a aidé dans la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent

A

- Monsieur **DJILI K.**, Professeur au département de science du sol à l'ENSA, mon promoteur, qui, malgré les conditions difficiles de travail et la surcharge de son emploi du temps, m'a guidé pas à pas dans le présent travail en me prodiguant directives et recommandations. Grâce à son aide et sa lucidité, j'ai pu réaliser l'objectif fixé dans cette recherche ;
- Monsieur **DAOUD Y.**, Professeur au département de science du sol à l'ENSA, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury. Je le prie également d'accepter le témoignage de ma reconnaissance pour tous les conseils scientifiques au cours de la réalisation de ce travail ;
- Monsieur **DRIDI B.**, Maître de conférence A au département science du sol à l'ENSA, et Monsieur **GAOUAS A.**, Maître assistant A au département science du sol à l'ENSA, je les remercie vivement d'avoir accepté de juger ce travail ;
- Mes collègues **BEN ZAHIA Z.** et **ZANDAH K.** pour leur disponibilité et leur immense contribution ;
- Monsieur **OULD FERROUKH M.E.H**, Maitre assistant A au département de science du sol à l'ENSA, pour sa patience, son aide et ses conseils ;
- **Ma mère** pour ses encouragements et ses prières ;
- **Mes oncles** (Mohammed, Ahmed, Abdennour, Boudjemâa, Abdelkader et Abderrahamne) pour leur soutien et leur aide ;
- L'ensemble des enseignants et du personnel du département de science du sol de l'ENSA, en particulier Melle **LARBI F.** et M^r. **LABADI R.** pour leur immense aide ;
- Mlle **RAHALI F.**, Ingénieur au département de science du sol à l'ANRH et Mlle **Fella** bibliothécaire au département de science de sol à l'ANRH, pour leur aide.

ص خ ل م ا

هذا العمل يركز على دراسة التربة المنقلبة (Vertisols) المرجعية في سهل متيجة والجزائر. فيما يتعلق Vertisols سهل متيجة، درسنا 3 Vertisols تقع في منطقة الكاليتوس. أظهرت النتائج أن هذه التربة تشكل مرجعين Vertisols حسب WRB (FAO، 2006) Haplic Vertisols eutric و Gleyic Vertisols eutric. وقد أظهر الوصف المورفولوجي ان هذه التربة تتميز بوجود slickensides، تشققات واسعة و عميقة التعمق. أظهرت نتائج المختبر أن هذه التربة طينية جدا وتحتوي على الطين المنتفخ. هذه الطين لها تأثير قوي على CEC، السلوك الميكانيكية، والمائية. وبالفعل، فإن الكثافة عالية، مؤشر COLE مرتفع، ومؤشر اللدونة يتراوح ما بين 14 و 46% ومحتويات المياه مرتفعة لمختلف pF المقاسة.

بخصوص قاعدة البيانات، قمنا بإنشاء قاعدة بيانات للمراجع Vertisols وفق تصنيف WRB (FAO، 2006)، الذي يحتوي على 133 مقطع تربة. توزيع هذه التشكيلات غير متجانسة وتقع في الجزء الشمالي من البلاد. التعرف على جميع تلك Vertisols بواسطة البادئات النوعية واللواحق يمكن من تحديد 82 مجموعات من المراجع. استخدام البادئات فقط يمكن من تحديد 16 مجموعة من المراجع. الأكثر شيئا هي calcic، grumic، gleyic، mollic، gypsic و mazic. أظهرت النتائج وجود ارتباط بين نسبة طين الطبقات vertiques والمعاملات لدرجة الحموضة، درجة الملوحة، الكلس، نسبة الصوديوم المتبادل، نسبة محتوى المياه في 3 pF.

الكلمات المفتاح:

Vertisols مرجعية، سهل متيجة، CEC، COLE، طين، المركب الطيني العضوي، قاعدة بيانات التربة.

Résumé

Ce travail a porté sur l'étude des Vertisols références dans la plaine de la Mitidja et dans l'Algérie.

En ce qui concerne les Vertisols de la Mitidja, nous avons étudié trois Vertisols situés dans la région des Eucalyptus. Les résultats ont montré que ces trois Vertisols constituent deux groupes références selon la WRB (FAO, 2006), les Gleyic Vertisols eutric et les Haplic Vertisols eutric. La description morphologique a montré que ces sols se caractérisent par la présence de faces de glissement, de fentes de retrait larges et profondes et par l'hydromorphie. Les résultats des analyses au laboratoire ont révélé que ces sols sont très argileux et contiennent des argiles gonflantes. Ces argiles gonflantes caractérisent essentiellement les argiles fines qui ont un fort effet sur la CEC, le comportement mécanique, hydrique et physique de ces sols. La densité apparente et l'indice COLE sont élevés, l'indice de plasticité varie entre 14 et 46 % et les teneurs en eau sont fortes pour les différents pF mesuré.

En ce qui concerne la base de données, nous avons construit une base de données pédologique des Vertisols références selon la WRB (FAO, 2006) dans laquelle nous avons sélectionné 133 profils. La distribution spatiale de ces profils est hétérogène et ils sont localisés dans la partie nord du pays. Le regroupement de ces Vertisols par les qualificatifs préfixes et suffixes a permis d'identifier 82 groupes de références. L'utilisation des qualificatifs préfixes a permis de déterminer 16 groupes de références. Les préfixes les plus courants sont calcic, grumic, gleyic, mollic, gypsic et mazit.

Les corrélations entre les taux d'argiles des horizons vertiques et les paramètres pédologiques (le pH, la CE, le calcaire total, l'ESP, et le taux d'humidité au pF 3) sont significative à hautement significatives.

Mots clés : Vertisols références, Mitidja, WRB, Argile, CEC, complexe argilo-humique, COLE, Base de données pédologique.

Abstract

This work concerned the study of Vertisols references in the Mitidja plain and in Algeria. Regarding Vertisols of Mitidja, we studied three Vertisols located in the region of Eucalyptus. The results showed that these three soils constitute two Vertisols references according to WRB (FAO, 2006) the Gleyic Vertisols eutric and Haplic Vertisols eutric. The morphological description has shown that these soils are characterized by the presence of slickensides, of shrinkage cracks wide and deep and hydromorphy processes. The results of laboratory analyzes showed that these soils are very clayey and contain swelling clays. These clays characterize essential fine clays and have a strong effect on the CEC, the mechanical behavior, physical behavior and hydric behavior. The bulk density is high, COLE index is high, the plasticity index varies between 14 and 46% and water contents are high for various pF measured.

Regarding the soil database, we built a soil database of Vertisols references according to WRB (FAO, 2006), which 133 profiles complied. The distribution of these profiles is heterogeneous and they are located in the northern part of the country. The grouping of these Vertisols by qualitative prefixes and suffixes identified 82 groups of references. The use of qualitative prefixes has identified 16 groups of references. The most common prefixes are calcic, grumic, gleyic, mollic, gypsic and masic.

The between the rate of clay vertic horizons and soil parameters (pH, CE, carbonate calcium, ESP, and the rate of moisture pF 3) is significant to highly significant.

Key words: Vertisols références, Mitidja, WRB, Clay, CEC, Clay-organic complex, COLE, Soil Database.

Liste des abréviations

A.N.R.H. : Agence nationale des ressources hydrauliques

ACP : Analyse de composantes principales

AF : Acide fulvique libre

Af: Argile fine ($< 0,2 \mu\text{m}$)

AFL: Acide fulvique lié

AFT: Acide fulvique total (AF + AFL)

Ag: Argile grossière ($0,2 \mu\text{m} < \text{Ag} < 2 \mu\text{m}$)

AH: Acide humique

At: Argile totale ($< 2 \mu\text{m}$)

C : Clay

C % : Carbone organique

CaCO₃ : Calcaire (Carbonate de calcium)

CaCO₃Af : Calcaire total lié à l'argile fine

CaCO₃Ag : Calcaire total lié à l'argile grossière

CaCO₃t : Calcaire total de l'échantillon entier

CE : Conductivité électrique (dS/M)

CEC : Capacité d'échange cationique

CECAf : Capacité d'échange cationique de l'argile fine

CECAg : Capacité d'échange cationique de l'argile grossière

CECt: Capacité d'échange cationique totale de l'échantillon entier

COLE : Coefficient d'extensibilité linéaire

CPCS : Commission de Pédologie et Cartographie des Sols

CV. : Coefficient de variation

Da : Densité apparente

Dr : Densité réelle

E.N.S.A. : Ecole nationale supérieure agronomique

Ec-Type : Ecart type

ESI : Indice de gonflement-retrait

ESP : Taux de sodium échangeable

FAO : Food Agricultural Organisation

H% : Taux d'humidité

H1 : Horizons de surface

H2 : Horizons de subsurface
HCl : Acide chlorhydrique
Hcr : Taux d'humidité à la capacité de rétention a pF3
Hp : Horizons de profondeur
Hpf : Taux d'humidité au point de flétrissement
I.N.C.T. : Institut national de cartographie et télédétection
I.S.R.I.C : International soil reference and information centre
IP : Indice de plasticité
Is : Indice d'instabilité structurale
K : Coefficient de la conductivité hydraulique
LE : Extensibilité linéaire
LEP : Pourcentage extensibilité linéaire (COLE x 100)
LF : Limon fin
LG : Limon grossier
LL : Limites de liquidité
LP : Limites de plasticité
MO : Matière organique
MOAf : Matière organique liée à l'argile fine
MOAg : Matière organique liée à l'argile grossière
MOt : Matière organique totale de l'échantillon entier
N% : Taux d'azote
P1 : Profil 1
P2: Profil2
P3: Profil3
pH : Potentiel hydrogène
PVC : Pourcentage de changement volumétrique
RUp : Réserve utile pondérale
S : Somme des bases échangeables
SC: Silty clay
SF: Sable fin
SG: Sable grossier
SL : Limite de retrait
SR : Rapport de retrait
TMA: Analyse thermomécanique

U.S.S.L: United States Salinity Laboratory

USDA: United State Department of Agriculture

V% : Taux de saturation

WRB : World Reference Base

Introduction générale

Les Vertisols sont des sols riches en argiles gonflantes. Cette caractéristique leur confère des propriétés particulières qui se traduisent par l'apparition de fentes de retrait lors des saisons sèches et par une augmentation du volume quand ils sont humides. De ce fait, il se crée un mouvement de vertisolisation qui aboutit au brassage des horizons, à l'apparition des faces de glissement et à la formation d'un microrelief gilgaï (Boulaine, 1978 ; USDA, 1999 ; Duchaufour, 2001). Les Vertisols se caractérisent aussi par une couleur brune à cause de la maturité de la fraction organique bien évoluée et de leur complexe argilo-humique très stable (Boulaine, 1978 ; Duchaufour, 1977).

Les Vertisols sont des sols qui peuvent avoir en fonction du climat et des conditions locales de la pédogenèse des pH acides, neutres ou basiques (Srivastava *et al.*, 2002). Dans ce sens, ils peuvent être bien fournis en calcaire primaire ou secondaire (Srivastava, 2002). Ils se caractérisent aussi par une capacité d'échange cationique généralement forte générée surtout par les argiles fines (Ahmad et Mermut, 1996). Leur capacité de rétention d'eau est forte mais leur perméabilité et conductivité hydraulique sont faibles (Bouma et Loveday, 1988). Sur le plan agronomique, ce type de sol est bien connu pour ses excellentes propriétés chimiques, mais aussi pour ses caractéristiques physiques médiocres (Duchaufour, 1977).

Dans le monde, la superficie des Vertisols est estimée à environ 335 millions d'hectares (FAO, 2006). Les Vertisols se trouvent partout sauf dans les régions polaires (USDA, 1999). En Algérie, les études cartographiques des sols et les études agropédologiques (Ecrément, 1971 ; Ould Ferroukh, 1994 ; Djili, 2000) ont signalé la présence des Vertisols un peu partout, sauf dans les régions sahariennes. Ce type de sol est particulièrement abondant dans la plaine de la Mitidja où il couvre une superficie d'environ 6300 hectares, soit 6 % de la surface totale (Ecrément, 1971 ; Ould Ferroukh, 1994 ; Raïssi, 1997).

Les Vertisols d'Algérie n'ont jamais fait l'objet d'une étude typologique particulière en vue de les rattacher aux principales références dans un système de classification international donné, en particulier celui de la FAO (2006). Aussi, le présent travail est une contribution à une meilleure connaissance des Vertisols d'Algérie à travers leur caractérisation morphologique et analytique, la détermination de leurs principales références selon la classification WRB (FAO, 2006) et leur localisation. Il s'agit également de retrouver d'éventuels relations entre les horizons diagnostiques de ces sols et les autres paramètres pédologiques. Cette étude est réalisée dans un premier temps dans un contexte local (la plaine de Mitidja). A cette échelle, cette étude s'intéresse aux principales caractéristiques morphologiques et analytiques de trois Vertisols qui permettent de les classer dans les systèmes CPCS (1967), USDA (1999) et WRB (FAO, 2006). Un intérêt particulier sera accordé à l'étude de leur complexe argilo-humique et à certaines de leurs propriétés physiques. Le tout est complété par un suivi in situ de l'évolution des fentes de retrait en fonction de l'humidité du sol. Dans un deuxième temps, nous avons construit une base de données pédologiques relative aux Vertisols. Cette base de données a pour objectif de déterminer et spatialiser les Vertisols références de l'Algérie selon le système de classification WRB (FAO, 2006).

Le présent document est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre consiste en une synthèse des connaissances sur les Vertisols. Le deuxième chapitre est une présentation du milieu naturel et de la méthodologie et des techniques utilisées. Dans le troisième chapitre, nous présentons et discutons les résultats. Le document se termine par une conclusion générale qui reprendra les principaux résultats obtenus.

Chapitre I Synthèse bibliographique

Introduction

Le terme « vertisol », dérivé du mot latin « verito », signifie brasser et retourner. Il a été proposé pour la première fois en 1956 par LEHAM, en remplacement du terme «TERRASOL» et sera adopté par la suite par Soil Taxonomy (Dudal et Eswaran, 1988). En effet, la 7ème approximation (Soil Taxonomy) proposa le terme de vertisol en 1960 dans la classification des sols de l'USDA. Ce terme fut repris en France par la CPCS en 1967 (Dudal, 1967 ; Paquet, 1970). Selon Dudal et Eswaran (1988), les Vertisols ont plus de 50 dénominations à travers le monde dont les plus connus sont les termes Regur (Inde), Adobe (Etats-Unis, Philippines), Gilgai (Australie), Margalite (Indonésie), Tirs (Maroc), Black Clays, Black Cracking Clays, Black Cotton Soils et Dark Clay Soils (Est anglophone et Afrique du Sud), Dian Pere (Afrique Occidentale Francophone), Firki (Nigéria), Makande (Malawi), Mbuga (Tanzanie), Mourcis (Mali) ou encore Badobes et Teen Suda (Sudan).

Selon Boulaine (1978), l'ordre des Vertisols à été créé pour regrouper les sols argileux qui, suivant les saisons, se gonflent ou se rétractent et qui montrent de larges et profondes fentes de retrait en périodes sèches. Ces sols sont de couleur foncée et ils sont riches en argiles gonflantes. Ils se caractérisent par une évolution particulière de la matière organique (maturation) et par un complexe d'altération (formation d'argiles gonflantes) conditionné par de forts contrastes saisonniers, et par l'abondance des cations alcalino-terreux (Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺).

1-Pédogénèse des Vertisols

La formation de Vertisols dépend de leur texture lourde, de la dominance des argiles gonflantes et du cycle d'humectation-dessiccation Hubble (1984).

1.1. Facteurs de formation des Vertisols

1.1.1. Le climat

Les Vertisols se rencontrent dans les zones méditerranéennes et tropicales sèches où le climat est relativement chaud avec une alternance d'une saison sèche de 4 à 8 mois et d'une saison humide le reste de l'année (Dudal, 1967 ; Duchaufour, 2001; Legros, 1996). Ils correspondent aux isohyètes comprises entre 500 et 1000 mm mais on peut les rencontrer aussi dans des régions où les précipitations atteignent 3000 mm (Thaïlande) (FAO, 2006). En Europe, ils sont bien représentés dans les régions danubiennes et, en Afrique, on les rencontre dans les régions méditerranéennes et tropicales (Duchaufour, 1977).

1.1.2. La topographie

Les études ont montré que les Vertisols se forment généralement dans des endroits de faible pente (ne dépassent pas 5%) (Mermut et al., 1996). Cependant, Dudal (1967) n'exclut pas la possibilité de les trouver dans des pentes atteignant jusqu'à 15%.

Ces sols sont considérés comme des sols de bas de pente pour deux raisons :

- Les solutions chargées de SiO_2 se rassemblent en particulier s'il n'y a pas d'axe de drainage (cuvettes fermées), ce qui favorise la néogénèse des argiles 2 /1.
- Les cuvettes sont des lieux où peuvent s'accumuler des argiles par décantation de la charge solide des plans d'eau.

En général, les Vertisols sont enrichis par les argiles d'altération ou par des apports latéraux des pentes avoisinantes. Nous citons l'exemple d'une chaîne de sols sur pente basaltique (figure 1) dans laquelle l'acidité des sols décroît du haut vers le bas de la pente et où les éléments SiO_2 , Ca^{++} et Mg^{++} entraînés vers le bas interviennent dans la néoformation des argiles. La richesse en argiles et l'hydromorphie sont, par contre, croissantes (Duchaufour, 1970).

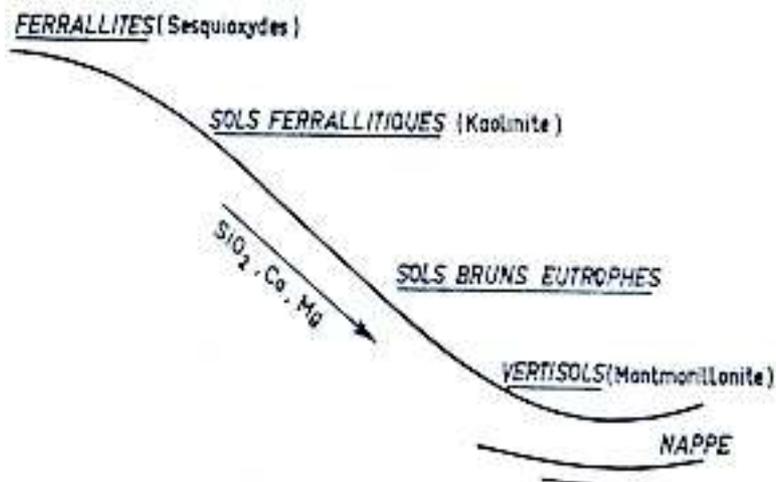


Figure 1. Chaîne de sols sur pente basaltique (région tropicale humide, à saison sèche) (Duchaufour, 1970)

Un autre exemple est celui d'une chaîne de sol formée sur marne (figure 2) où les argiles les plus fines, héritées du matériau situé à l'amont, s'accumulent et comblent la dépression au pied de la pente (Duchaufour, 1977).

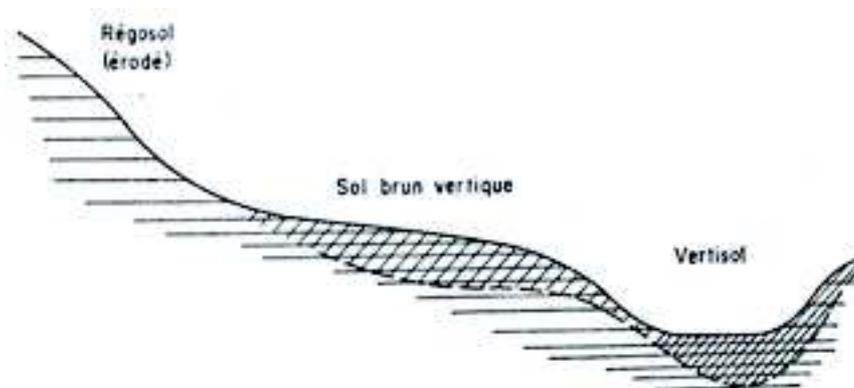


Figure 2. Chaîne de sols sur marne (climat méditerranéen, Espagne) (Duchaufour, 1977)

1.1.3. La roche mère

Les Vertisols se forment souvent sur des matériaux riches en bases et en SiO_2 comme les basaltes qui donnent des smectites par altération in situ en climat sec (Hussein et Adey, 1995), les marnes (Dell'Abate et al., 2002), les roches volcaniques basiques (Blanchart et al., 2000), les alluvions argileuses et calcaires (Ould Ferroukh, 1994) ou comme les roches calcaires (Drieses et al., 2003).

Bühmann et Schoeman (1995) ont remarqué que les Vertisols en Afrique du Sud se forment sur de nombreuses roches mères diversifiées comme la dolérite, le gabbro, la diabasse, la diorite, la rhyodacite, le gneiss, les colluvions, les alluvions et les roches sédimentaires.

En milieu semi-aride, les Vertisols se développent dans des zones riches en Ca^{++} , Mg^+ et en silice qui favorisent la formation de matériaux basiques (Bühmann et Schoeman, 1995). En milieu humide, ces sols sont souvent associés aux matériaux argileux (marne, dépôt alluvial) (Ahmad, 1988 in Bühmann et Schoeman, 1995). Par ailleurs, Recio Espejo et al. (1992), en étudiant les relations géochimiques dans les Vertisols d'un bassin fermé de l'Espagne, ont montré que les horizons ont la même distribution de taille des particules et des taux d'argile.

2. Processus de formation des Vertisols

Les processus qui mènent à la formation des Vertisols sont ceux qui commandent la formation et la stabilité des smectites dans le sol (Eswaran et al., 1988). Les forts contrastes saisonniers provoquent une alternance de saturation par l'eau et de dessiccation complète des profils, ce qui a une triple conséquence sur la pédogénèse (Duchaufour, 2001). La néoformation des argiles 2/1 est favorisée. La minéralisation des fractions organiques les plus labiles est accélérée mais à l'inverse, l'humification biologique se prolonge par un processus de maturation des fractions les plus stables qui acquièrent une couleur noire. Il peut y avoir une décarbonatation partielle ou complète et les horizons humifères sont accompagnés d'une précipitation des carbonates entraînés en C (horizon Cca). Les trois processus sont complétés par une homogénéisation profonde de l'horizon A1 qui prend parfois l'allure d'un horizon (B) structural.

Selon Hubble (1984), la majorité des Vertisols présentent cinq processus pédogénétiques : Les mouvements de gonflement et de retrait qui provoquent l'apparition des surfaces polies et striées appelées « Slickensides » ou « faces de glissement », la formation des reliefs « gilgai », l'homogénéisation du profil, la formation du complexe organo-minéral et la précipitation et redistribution de certains éléments.

3. Genèse des Vertisols

Les Vertisols constituent une classe de sols typiquement intrazonaux (Dudal, 1967), ils sont localisés dans des zones climatiques à climat très contrastés, mais ils nécessitent, pour atteindre leur plein développement, la présence de conditions particulières de station (topographie, matériau parental). Selon Podwojewski (1994) in Legros (1996), la formation d'un vertisol nécessite entre 20 000 et 60 000 ans. Les auteurs anglosaxones estiment que les sols nécessitent 40 000 ans pour obtenir des caractères vertiques (Legros, 1996).

La formation des Vertisols résulte de l'héritage (Boulaine, 1978) dans les climats à saisons contrastées ou de la néoformation dans les zones humides (Nordt et al., 2004).

Les Vertisols peuvent se former in situ par la transformation et le développement d'un solum (Vertisols autochtones) comme ils peuvent se former à partir d'un sédiment composé de matériaux qui peuvent produire les propriétés vertiques (Vertisols allochtones). Ce dernier est géographiquement plus étendu et occupe les parties les plus basses du paysage.

Nettleton et al. (1969) et Buol et al. (1980) in Mermut et al. (1988) ont montré que des sols enrichis en argile par illuviation (horizon argilique) et par néoformation d'argile in situ pourraient développer le pouvoir de rétrécir et de gonfler et d'évoluer en des Vertisols. Les différentes étapes de la formation des Vertisols sont illustrées par la figure 3 (Dudal et Eswaran, 1988).

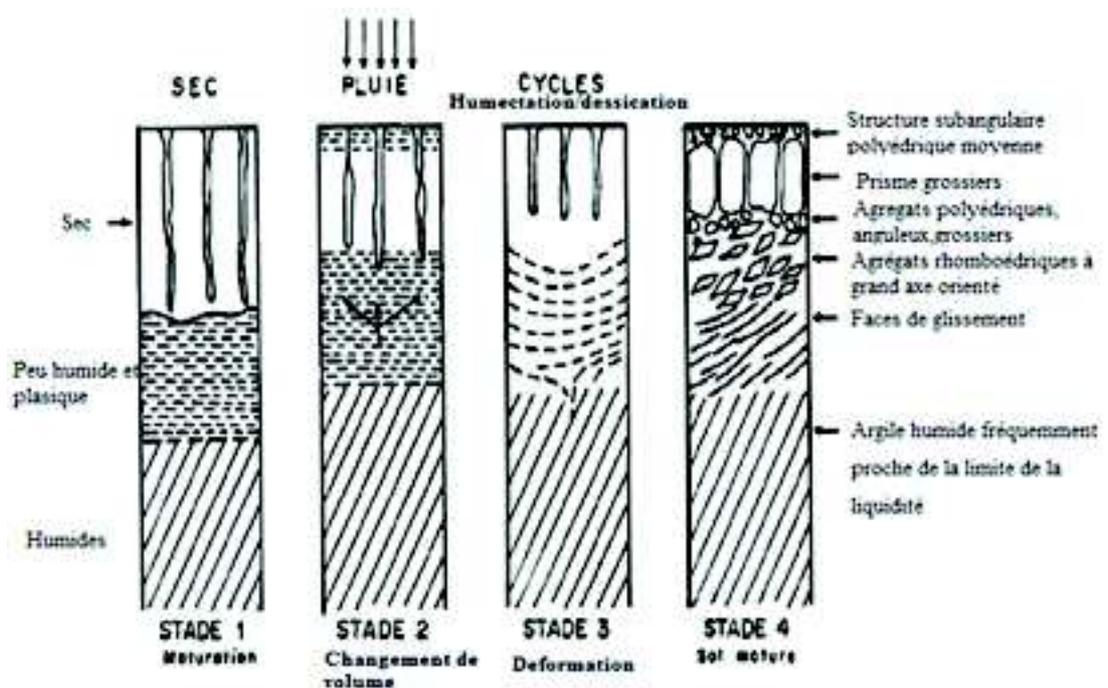


Figure 3. Etapes de formation des Vertisols (Dudal et Eswaran, 1988)

4. Les modèles pédogénétiques

Les mouvements vertiques causés par les alternances de gonflement et de retrait influencent la genèse des Vertisols. Wilding et Tessier (1988) ont proposé deux modèles théoriques de la genèse des Vertisols, le modèle de pédoturbation et le modèle mécanique.

Le modèle de pédoturbation

En période sèche, de larges fentes de retrait se forment. Au retour des pluies, l'eau s'infiltré préférentiellement dans ces fentes, ce qui provoque un gonflement localisé des argiles, les fortes pressions qui en résultent, expliquent la formation des microreliefs gigaï et des slickensides (figure 4). Le modèle mécanique

Au cours du gonflement, les éléments structuraux peuvent glisser les uns sur les autres et provoquer l'apparition des faces de glissement qui correspondent à des lignes de fracture (figure 5).

Ce modèle a été testé par Nordt et al. (2004) pour expliquer les propriétés des Vertisols telles que les fentes de retrait, les slickensides, la libération du fer par altération et la formation d'un horizon calcique en profondeur dans des zones humides.

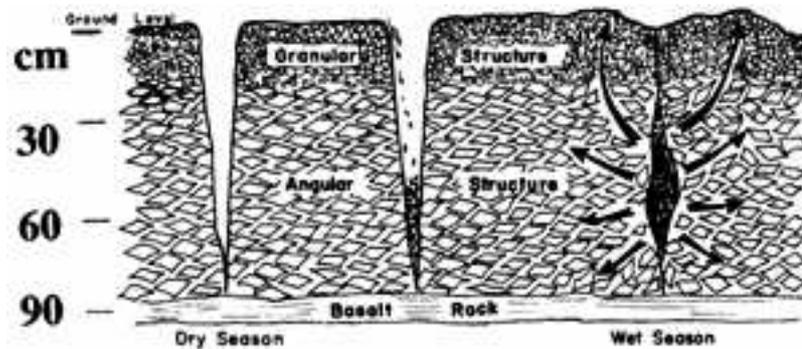


Figure 4. Modèle de pédoturbation (Wilding et Tessier, 1988)

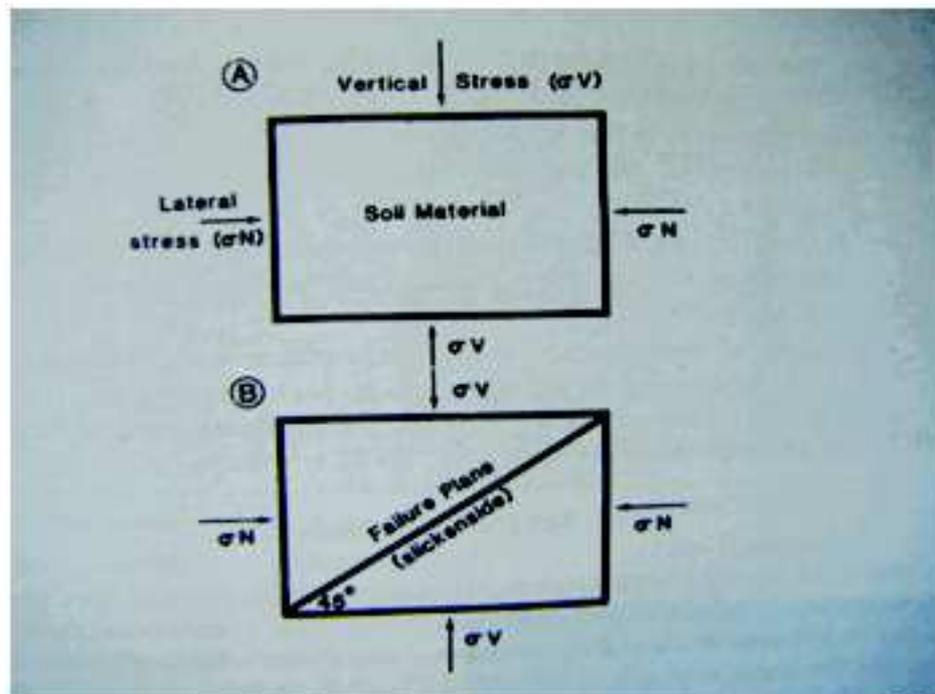


Figure 5. Modèle mécanique (Wilding et Tessier, 1988)

5. Propriétés des Vertisols

5.1. Les propriétés morphologiques

5.1.1. La couleur

Selon Dudal (1967), les Vertisols sont généralement de couleur sombre, le plus fréquemment dans les gammes 2,5 Y et 10 YR, mais on peut les rencontrer avec une coloration brunâtre ou brun-rougeâtre selon leur composition minéralogique, l'humidité et le matériau parental associé. La coloration noire, malgré la teneur faible en matière organique, est attribuée à la formation d'un complexe (le chélate) entre les colloïdes organiques et la smectite. L'absence de coloration noirâtre serait due à la teneur forte en montmorillonite, l'état de drainage et à la quantité d'oxyde de fer hydraté (oxyde de fer jaune) (Dudal et Eswaran, 1988).

5.1.2. Les horizons

Les Vertisols ont un profil de type **A(B)C**, ils manquent d'horizons distincts, ils présentent un horizon superficiel foncé **A₁** qui passe progressivement vers un horizon **C** (CPCS, 1967). L'horizon **A₁** se subdivise en deux ou trois sous-horizons qui se différencient par une ou deux caractéristiques comme la couleur, la structure ou la consistance. L'horizon AC est un horizon de transition, il peut être absent dans certains profils. Cet horizon, dans la majorité des cas, est considéré comme un horizon B ou **A₃**. L'horizon C est un horizon d'altération qui peut être autochtone ou formé à partir des sédiments non consolidés. De plus, dans certains profils, on peut rencontrer des horizons d'accumulation de carbonates et des horizons de gley (Dudal, 1967).

5.1.3. Le microrelief Gilgai

Les alternances de dessiccation et d'humectation des argiles provoquent un gonflement localisé des argiles d'où résultent de petites buttes et de dépressions appelées « Gilgai » (Wilding et Tessier, 1988 ; Deckers et *al.*, 2001). Le microrelief gilgai n'est pas observé toujours dans les Vertisols. Il est accompagné avec un déplacement vertical de 10 jusqu'à 25 cm (Mukanda et Mapiki, 2001). L'espacement latéral entre un creux et une bosse peut atteindre de 2 à 7 m (Driese et *al.*, 2000). Il est constitué de trois éléments, les « micrlows » (creux), les « microhighs » (bosses) et la zone intermédiaire « microslope » (figure 6). La forme de microrelief gilgai est liée à la fréquence et au degré du cycle de dessiccation-rehumectation de sol (Wilding et Tessier, 1988). Hallsworth et *al.* (1955) in Mermut et *al.* (1996) ont décrit six types de gilgai (rond « normal », « en cuve », « caillouteux », « ondulé », en trou et linéaire).

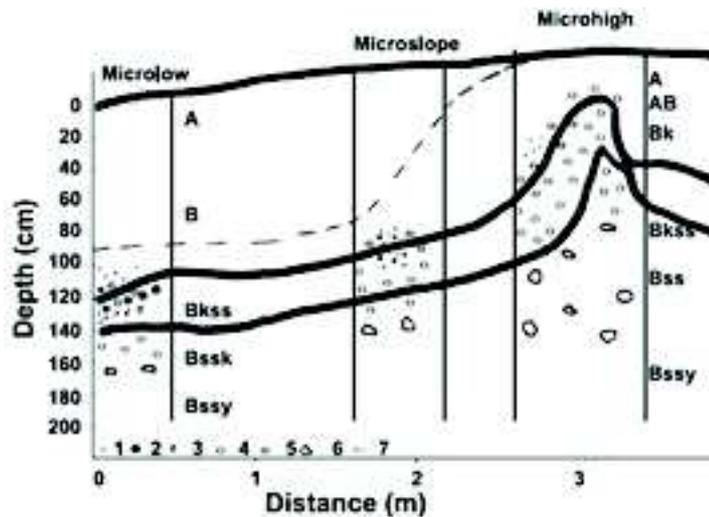


Figure 6. Schéma d'un vertisol avec microrelief gilgai (Kovda et al., 2003)

Plusieurs travaux ont montré la différence des paramètres physiques, chimiques et biologiques des microhighs et des microlows de gilgai. Selon Nordt et al. (2004), les horizons de microlow sont plus organiques, plus sombre, riches en concrétion de fer et de manganèse et décarbonatés en surface. Driese et al. (2000) ont montré que les éléments de microrelief gilgai sont différents pédogénétiquement. Dans les microlows, les éléments échangeables (Na^+ , K^+ , Ca^{++} et Mg^{++}) sont transportés sous forme solide ou en solution afin de précipiter sous forme de calcaire ou de gypse en profondeur. Comparativement aux microhighs, il y a une forte mobilité des éléments traces comme Co, Cr, Cu, et Mn. Dans les horizons de microlow, les nodules calcaires se déplacent latéralement et verticalement vers le haut de microhigh le long des slickensides. Ce déplacement favorise la formation des microhighs (Miller et al., 2007). Les nodules subissent un frottement lors de leur transport, ce qui explique que les nodules de microhigh sont plus petits que ceux de microlows (Kovda et al., 2003). Kovda et al. (2006) ont décrit des nodules de 10 à 15 mm de diamètre dans les horizons de microlow et des nodules avec un diamètre qui varie entre 1 et 6 mm dans les horizons de microhigh.

5.1.4. Les faces de glissement « Slickensides »

La présence des slickensides est un critère fondamental pour définir les Vertisols (CPCS, 1967 ; WRB (FAO, 2006); USDA, 2010) du fait qu'ils sont le témoignage de l'existence des mouvements verticaux (Wilding et Tessier, 1988 ; Ahmed et Mermut, 1996 ; Paik et Lee, 1998 ; Driese et al., 2003). Dans les Vertisols de gilgai, les slickensides les plus développés se trouvent dans la zone intermédiaire (microslope), car cette dernière subit une grande variation d'humidité (Miller et al., 2007). Dans les autres Vertisols, les slickensides se situent surtout à la base de l'horizon (B) (Dudal, 1967 ; Duchaufour, 1977). Ils se trouvent à une profondeur comprise entre 50 et 125 cm, mais rarement au-dessus de 50 cm (Mermut et al., 1996). Lors du gonflement, le sol subit un stress vertical et un autre latéral (figure 5). Les slickensides correspondent à des lignes de fracture avec un angle théorique de 45° , l'argile se trouve lissée sur ces lignes de cassures car ses particules s'orientent parallèlement aux plans de glissement (Wilding et Tessier, 1988). A cause des mouvements obliques ($20\text{-}30^\circ$ par rapport au plan horizontal), les faces des agrégats sont striées et brillantes et à orientation oblique (Deckers et al., 2001 ; Driese et al., 2003) (photo 1).

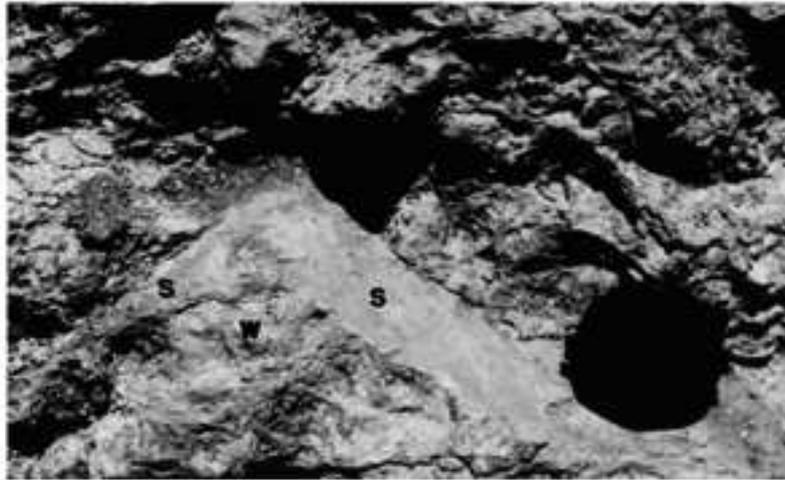


Photo 1. *Slickensides obliques avec des faces striées et brillantes (Driese et al., 2003)*

5.1.5. Les fentes de retrait

En périodes sèches, les Vertisols ont des fissures larges et profondes à cause de leurs potentialités de gonflement et de retrait (Hati et al., 2006). Selon Baize et Jabiol (1995), sur le terrain, les fentes de retrait sont décrites comme étant des macrofissures qui coupent plusieurs horizons et méritent une description spéciale (profondeur atteinte ; largeur en surface ; écartement et forme du réseau). Ces fentes de retrait s'observent dans les Vertisols et les sols vertiques. Elles contribuent au développement des Vertisols, leurs intensités dépendent du taux d'argile dans le sol et du régime hydrique (Elias, 2001).

Taboada (2003) in Bégin et Naud (2007) résume les processus qui interviennent lors du dessèchement et de l'humidification des sols gonflants en deux phases. Lors de la première phase, le gonflement s'effectue en trois dimensions (figure 7a) et lors de la deuxième phase, lorsque les fentes de retrait sont refermées, le gonflement s'effectue en une dimension (figure 7b), provoquant une élévation du niveau du sol.

Les étapes de fissuration de l'argile ont été décrites par Konrad et Ayad (1997) (figure 8) qui ont tenu compte de l'évolution de la teneur en eau, du tassement, de la succion en fonction de la profondeur, de la température et de l'humidité relative à la surface du sol.

Selon Bégin et Naud (2007), quatre facteurs peuvent permettre de déterminer les zones agricoles sensibles à l'apparition des fentes de retrait (figure 9):

- Le facteur pédologique contient trois classes. La classe la plus sensible contient les sols qui ont des taux d'argile de plus de 35 % (argileux très fin et argileux fin), la classe de sensibilité moyenne qui comprend les sols ayant des taux d'argile qui se situent entre 18 % et 35 % et les sols non sensibles qui ont des teneurs en argile inférieures à 18 %.
- Le facteur agroclimatique correspond aux surplus ou au déficit en eau (en mm) subi par les végétaux.
- L'utilisation du sol qui se traduit par le niveau de couverture végétale du sol contribue à l'assèchement ou non du sol.
- La période de l'année correspondant à la période de sécheresse.

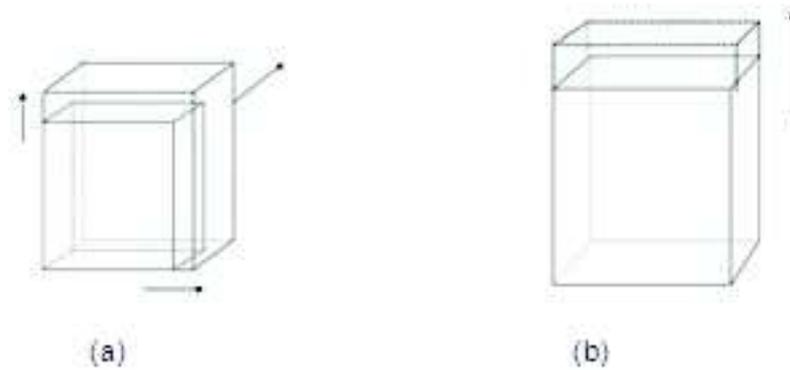


Figure 7. (a) Expansion en 3 dimensions. (b) Expansion en 1 dimension (Taboada, 2003)

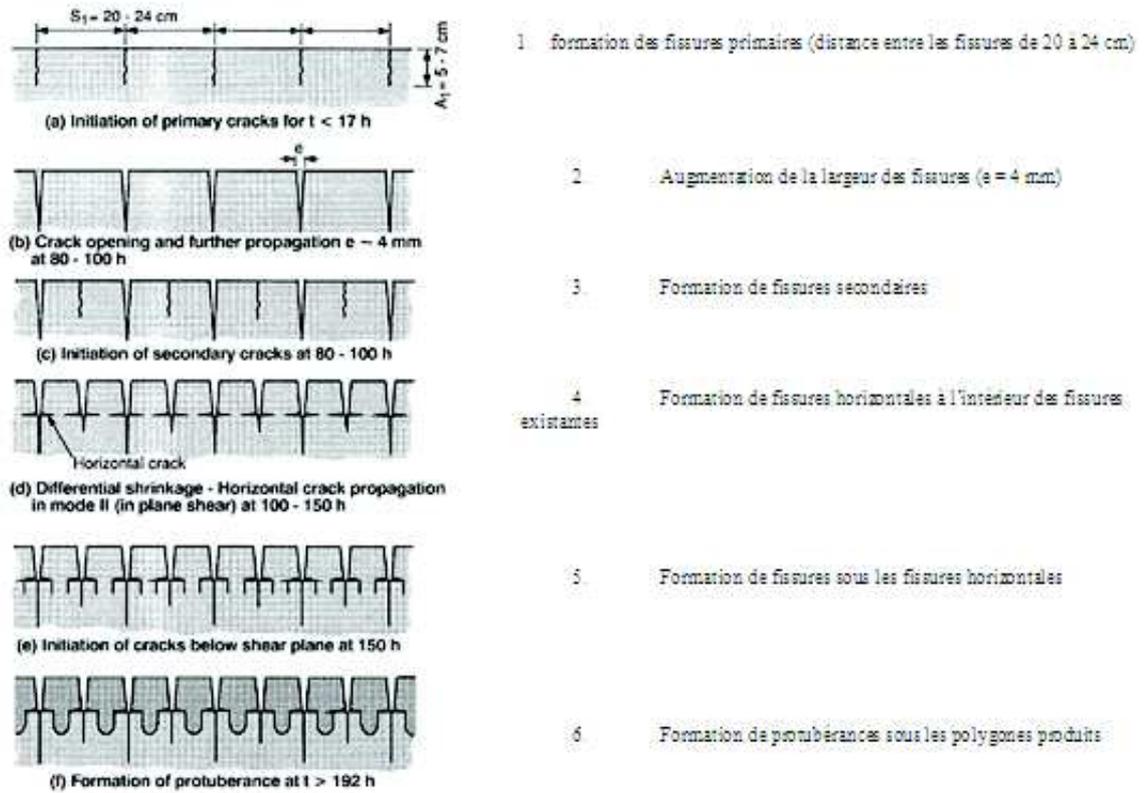


Figure 8. Les étapes de fissuration d'une argile (Konrad et Ayad, 1997)

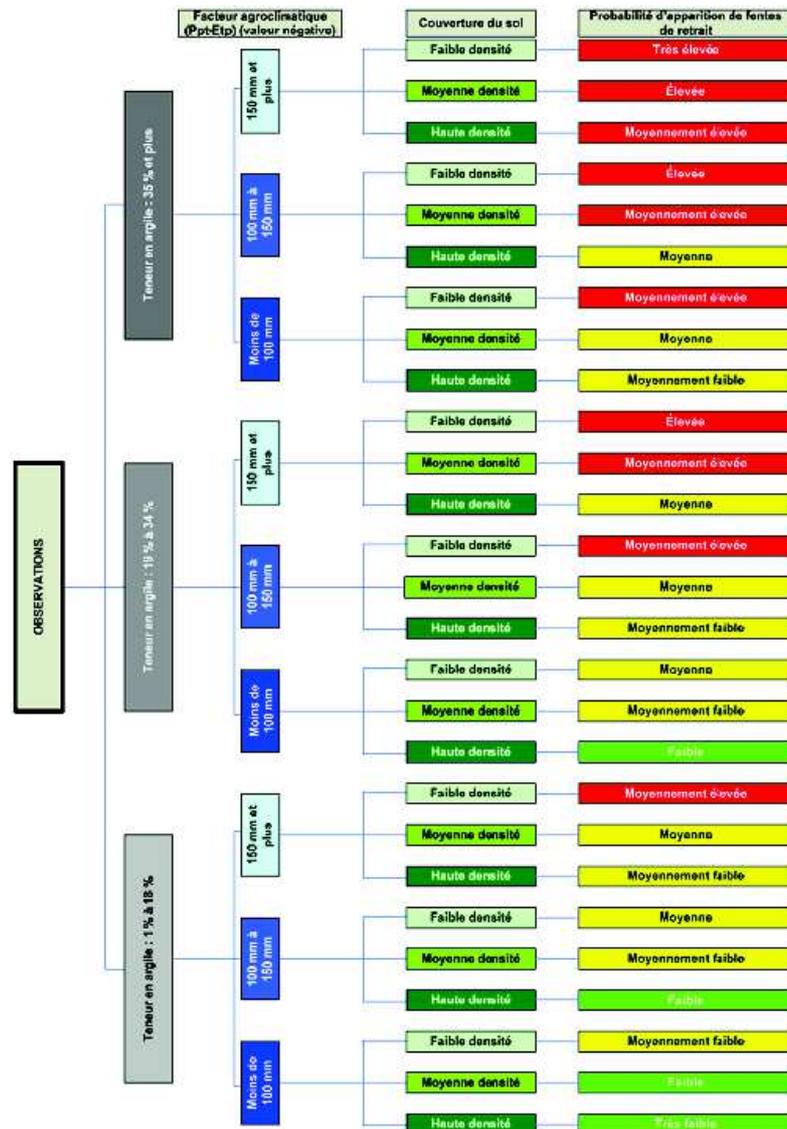


Figure 9. Schématisation du risque d'apparition de fentes de retrait (Bégin et Naud, 2007)

5.2. Les propriétés minéralogiques

Du point de vue minéralogique, de nombreuses études ont signalé la dominance des smectites dans les Vertisols (Kapur *et al.*, 1997; Astatke et Saleem, 1998 ; Tang *et al.*, 2010). Ces argiles sont issues d'une transformation ou d'une néoformation dans les cuvettes (Nordt *et al.*, 2004). Selon Pal *et al.* (2006), l'étude minéralogique fine des Vertisols montre que les smectites représentent plus de 50 % de la fraction grossière et 90 % de la fraction fine. Dans une autre étude, Pal *et al.* (2001) ont montré que les smectites représentent plus de 90 % de la fraction argileuse fine (< 0,2 µm), 33-58 % de la fraction argileuse grossière et moins de 10 % du limon fin. Par ailleurs, plusieurs auteurs ont noté la présence de la kaolinite en deuxième position. On peut rencontrer d'autres minéraux micacés comme les vermiculites (Pal *et al.*, 2006) et les illites (Khresat et Taimeh, 1998), des argiles interstratifiées illite/smectites (Bühman et Schoeman, 1995) ou de type kaolinite /smectites (Yerima *et al.*,

1989). Khresat et Taimeh (1998) ont montré aussi que les inter-stratifiés augmentent selon la profondeur, alors que la kaolinite décroît vers le bas.

Les smectites confèrent aux Vertisols ses propriétés de gonflement. La transformation des smectites en kaolinite explique la transition entre les propriétés vertiques et non vertiques des sols (Bühmann et Schoeman, 1995).

5.3. Les propriétés chimiques des Vertisols

5.3.1. Le pH

Le pH des Vertisols peut être acide, neutre ou alcalin (Srivastava et *al.*, 2002). Du fait que les matériaux parentaux calcaires ou riches en base et/ou en silice sont altérés pour former les smectites, la majorité des Vertisols sont donc neutres ou alcalins. Les Vertisols acides sont développés sur des matériaux parentaux près des franges côtières. Une décarbonatation du profil dans un climat humide, des conditions de lixiviations continues ou la ferrolyse peuvent contribuer à l'acidification des Vertisols. Les propriétés physico-chimiques des Vertisols sont plus stables dans les pH proches de la neutralité ; lorsque le pH augmente ou diminue, il favorise la dégradation de ces sols. Le pH alcalin est le résultat de l'augmentation des ions Na^+ et les ions de carbonates dans la solution du sol (Coulombe et *al.*, 1996).

5.3.2. La Capacité d'échange cationique et les bases échangeables

Les Vertisols ont habituellement une capacité d'échange cationique relativement élevée, elle correspond à la CEC des montmorillonites ou des beidellites (Bouadib et *al.*, 1991). Étant donné que les particules de smectite ont théoriquement une CEC supérieure à 100 $\text{Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$ d'argile, la diminution de la CEC peut être due aux taux faibles en smectite, à la présence des minéraux de faible CEC, aux faibles taux en matière organique ou à la minéralogie héritée (Coulombe et *al.*, 1996). Indépendamment de la CEC, les cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ dominent généralement le complexe d'échange des Vertisols (Speirs, 2006). Les Vertisols fortement structurés ont habituellement un complexe d'échange dominé par Ca^{2+} et Mg^{2+} (Hubble, 1984).

5.3.3. Le complexe argilo-humique

La couleur des Vertisols est généralement assez sombre, voire parfois noire. Cette couleur est due non pas à l'accumulation de la matière organique, mais plutôt à une fixation de petites quantités de celle-ci sur l'argile par un phénomène dans lequel le type d'argile et le fer semblent jouer un rôle important (Boulaine, 1978).

Dans les Vertisols, la formation du complexe argilo-humique confère au sol une coloration foncée et affecte les propriétés morphologiques, physico-chimiques, biologiques et biochimiques (Dell'Abate et *al.*, 2002). C'est cette matière organique très condensée qui contracte avec les montmorillonites des liaisons très solides par l'intermédiaire du fer. Le rapport C/N varie de 10 à 14 en général. A cause de la forte relation entre la matière organique et les argiles, pour éliminer environ 90% du carbone initialement présent, il faut jusqu'à 72 heures de traitements renouvelés à l'eau oxygénée à 50 degrés (Hyeong et Cpuano, 2000 in Legros, 1996).

· La matière organique

Selon Marinari et *al.* (2010), les taux de carbone total et de carbone humifié diminuent en profondeur, la forte teneur en montmorillonite reflète la polycondensation de la matière organique et la formation du complexe organo-minéral stable.

En surface, la matière organique subit un turnover rapide, par contre, elle nécessite beaucoup plus de temps dans les horizons de profondeur en fonction des conditions de l'environnement et des pratiques de l'aménagement (Coulombe et *al.*, 1996 in Dell'Abate et *al.*, 2002).

D'après Duchaufour (1977), la quantité totale de matière organique est de l'ordre de 2%, donc assez faible, mais la polymérisation de l'humus est très poussée et les noyaux phénoliques sont prépondérants et les chaînes aliphatiques peu développées. Les acides fulviques sont en faible proportion et dans les acides humiques ce sont les acides gris qui dominent (> 80%). Cependant, Arai et *al.* (1996) ont trouvé une forte proportion d'acides fulviques (70%) dans les Vertisols qu'ils ont étudiés. C'est le fer qui constitue avec la matière organique très polymérisée des liaisons spéciales. Il est intégré dans les molécules d'acide humique gris ou d'humine et il se trouve sous une forme peu soluble. Malgré des teneurs importantes (2 à 6%), ce fer est très difficilement extractible.

L'association étroite des minéraux argileux avec la matière organique suggère que cette dernière puisse affecter les propriétés physiques du sol, en particulier la microstructure et la stabilité globale (Ristori et *al.*, 1992).

- La fraction argileuse des Vertisols

La teneur en argile des Vertisols joue un rôle important sur les caractéristiques structurales. En effet, des taux élevés en argile totale engendrent une plus grande cohésion des particules et la formation d'éléments structuraux plus larges (McGarry, 1996). La fraction d'argile est composée d'une couche de particules de différentes tailles rassemblées pendant la sédimentation et/ou l'altération. ¶ Dans cette fraction, l'argile fine (< 0.2 µm) peut constituer plus de 80 % de l'argile totale (< 2µm) (Ahmad, 1983 in Ahmad, 1996). Cette contribution diffère selon la composition minérale et les conditions de dépôt (Speirs, 2006).

La capacité des Vertisols de se rétrécir et de gonfler a été liée aux proportions de l'argile fine. Anderson et *al.* (1973) ont constaté que les plus petites particules d'argile ont une plus grande superficie par rapport au volume, permettant aux particules de s'adapter plus étroitement après dessiccation et donnant une plus grande potentialité d'adsorption de l'eau. Par conséquent, les sols qui contiennent de grandes proportions d'argile fine ont une capacité plus grande de gonfler que les sols qui contiennent de grandes quantités de phyllosilicates bruts.

5.4. Les propriétés physiques

5.4.1. La structure

La structure interne des sols argileux est liée à certaines caractéristiques telles que :

- La conductivité hydraulique (Romero et *al.*, 1999).
- Les déformations volumiques lors de la consolidation (Tessier et *al.*, 1992 in Nowamooz, 2007).
- Les propriétés de la courbe de rétention (Simms et Yanfaul, 2005).

La structure des Vertisols est une caractéristique temporelle, liée aux conditions climatiques et aux propriétés physicochimiques de ces sols. La structure est très développée dans tous les horizons. Dudal et Eswaran (1988) résument les différentes structures de profil en cinq zones ou horizons selon l'évolution pédogénétique de ces sols (figure 10) :

Zone 1 : 0-25 cm caractérisée par de larges fentes de retrait qui délimitent entre elles des prismes qui ont une taille moyenne de 30 cm.

Zone 2 : représente de 10 à 30 cm d'épaisseur, a une structure très grossière angulaire et compacte, dans certains cas les fentes verticales déterminent une structure prismatique grossière.

Zone 3 : l'épaisseur varie entre 10 cm à 1 m. elle se caractérise par des fissures obliques qui délimitent entre elles des agrégats anguleux striés avec des faces brillantes.

Zone 4 : se caractérise par des slickensides (face de glissement) bien développées avec une épaisseur de 25 cm à 1 m. Les peds sont plus grossiers et peuvent atteindre une surface de 2000 cm².

Zone 5 : se décrit au-dessous la zone 4 ou de la zone 3 selon l'évolution du sol. Elle subit une grande variation d'humidité. Elle se caractérise par une structure massive. En milieu aride ou semi-aride, elle se caractérise par une accumulation de calcaire ou de gypse.

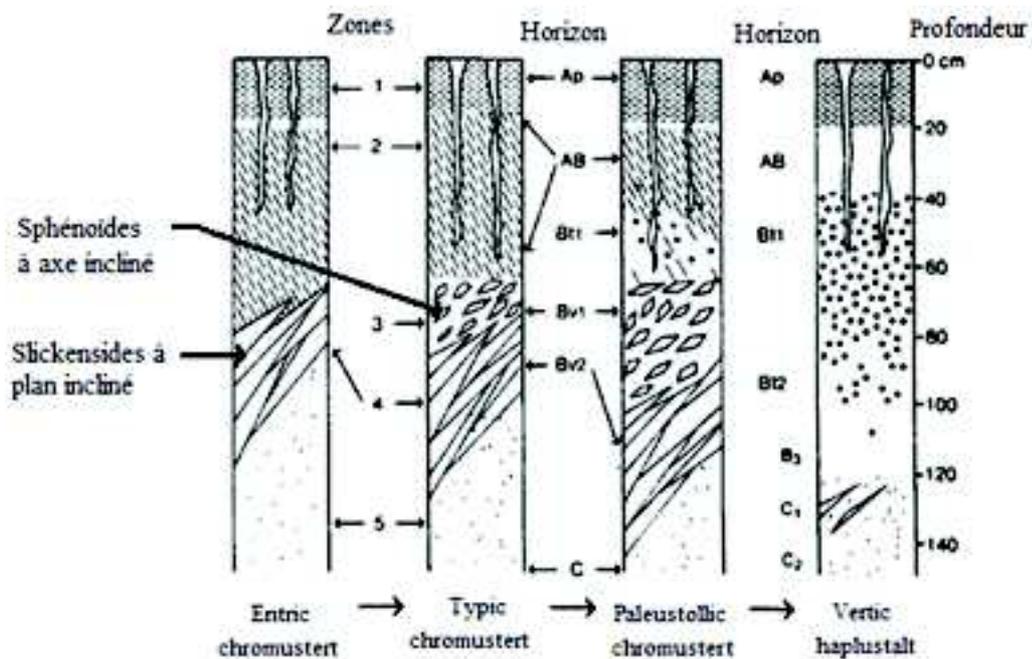


Figure 10. Différenciation morphologique d'une séquence des Vertisols (Dudal et Eswaran, 1988)

En surface, les Vertisols sont plastiques et collants à l'état humide, par contre à l'état sec, leur structure superficielle est finement polyédrique (**self-mulching**). Ils sont compacts et leur teneur en eau utilisable est faible pendant la saison sèche mais élevée en période humide (Dudal, 1967).

5.4.2. Le retrait et le gonflement

A cause des teneurs élevées en argiles gonflantes des Vertisols, les variations d'humidité provoquent le retrait ou le gonflement du sol. Dasog et Shashidhara (1993) in Mermut et al. (1996) montrent que le volume et l'intensité des fentes de retrait dépendent du climat et des techniques d'aménagement. Par exemple, Favre et al. (1997) ont observé des fentes de retrait larges de 0,01 à 0,02 m et profondes de 0,3 m dans les Vertisols de la vallée du Sénégal.

a-Mesure du gonflement-retrait sur échantillon

- Le coefficient d'extensibilité linéaire

Le coefficient d'extensibilité linéaire (COLE) est défini à l'échelle d'un agrégat pour mesurer le retrait d'un échantillon de sol par la formule:

$$\text{COLE} = (\text{longueur en humide} - \text{longueur en sec}) / \text{longueur en sec}$$

L'état humide se définit à la capacité au champ et l'état sec au point de flétrissement (Hajek, 1979).

On peut déterminer l'indice COLE par l'analyse thermomécanique (TMA), pourcentage de changement volumétrique (PVC), rétrécissement inter lamellaire qui est déterminé par analyse de diffraction aux rayons X et à partir de l'expression rétrécissement du sol au champ (**Karathanasis et Hajek, 1985**) .

Le coefficient d'extensibilité linéaire (COLE) est employé comme critère pour différencier des sous-groupes typiques vertiques (Hajek, 1979). Il est également utilisé lors des études de genèse et de caractérisation du sol (**Franzmeier et Ross, 1968 ; Hallberg, 1977**).

A partir de l'indice COLE, on peut définir l'extensibilité linéaire (LE) en multipliant le coefficient COLE par l'épaisseur de l'horizon. Selon National Soil Survey Laboratory (1997) in Thomas et al. (2000) les classes de LEP (pourcentage d'extensibilité linéaire) sont définies comme suit : **Bas** (LEP < 3%, COLE < 0.03) ; **modéré** (LEP 3-6%, COLE 0.03-0.06) ; **haut** (6-9%, COLE 0.06-0.09) ; et **très haut** (LEP > 9%, COLE > 0.09).

Dans les sols argileux riches en montmorillonite, l'indice COLE s'étend de 0.03 à 0.18, et le PVC s'étend de 1.5 à plus de 9.0 (Franzmeier et Ross, 1968). Pour un horizon argilique, l'indice COLE dépasse 0,06 (FAO, 2006).

Une étude effectuée sur des échantillons provenant des profils « d'Usterts » et de « Torrerts » du Soudan, d'Arizona et du Nouveau-Mexique a montré une forte corrélation entre l'indice COLE et le pourcentage d'argile fine (Anderson et al., 1973).

Par ailleurs, Thomas et al. (2000), sur la base d'une modélisation d'un indice de gonflement, trouvent une corrélation positive entre le potentiel de gonflement-retrait et les argiles gonflantes de type 2/1, la CEC et la limite de liquidité selon l'équation :

$$\text{ESI-1} = \text{Swelling 2:1} + \text{Swell index} + \text{liquid limit} + \text{CEC}$$

- ESI-1 > 500 indique que le potentiel de gonflement-retrait est élevé à très élevé.
- ESI-1 < 500 décrit que le sol a un potentiel de gonflement-retrait moyen à élevé.

L'indice de retrait est mesuré directement par le potentiel de gonflement-retrait. L'indice COLE est employé pour calculer directement des paramètres standards comme la limite de retrait (SL), le rapport de retrait (SR) et le pourcentage de changement volumétrique (VC) (Hallberg, 1977).

b-Mesure du gonflement-retrait au terrain

Les fentes de retrait délimitent entre eux des unités structurales. Pour suivre le développement de ces éléments, on installe un dispositif métallique avec des dimensions connues, enfoncé dans le sol jusqu'à 20 cm de profondeur. On humidifie le sol uniformément. Durant la période de dessiccation, à l'aide un fil de fer (2 mm de diamètre), on mesure la profondeur des fentes, ainsi, on peut calculer la surface des unités structurales et la surface des fentes par rapport à la surface totale par l'analyse des photographies.

Une autre méthode in situ consiste à couvrir la parcelle à suivre par un film blanc de polyéthène à 15 cm environ au-dessus du dispositif précédent, ensuite on photographie le développement des fentes en fonction du taux d'humidité pour calculer la surface des fentes, la surface et la surface moyenne des unités inter-structurales des fentes. La profondeur des fentes est mesurée à l'aide d'un fil de fer (Srivastava et al., 1989).

5.4.3. La courbe de retrait

Dans les sols argileux, les phénomènes de dessiccation et d'humectation provoquent des variations de volume importantes et non-uniformes avec le changement de leur teneur en eau. Par conséquent, dans les périodes sèches, il y aura une formation des fentes de retrait qui s'ouvrent et se referment périodiquement (Voltz et Cabidoche, 1995). L'étude des caractéristiques géométriques du retrait-gonflement des Vertisols se base sur la courbe de retrait (Soil Shrinkage Characteristic Curve) qui définit la relation entre le volume spécifique des mottes par unité de masse du sol et la teneur en eau (Cescimanno et Provenzano, 1999) (figure 11).

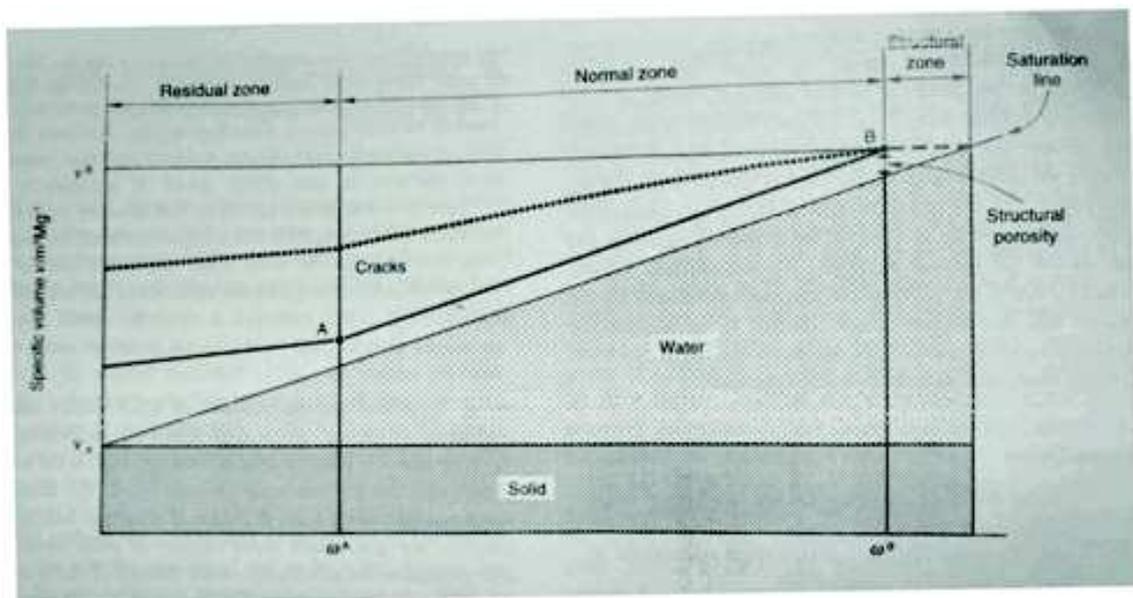


Figure 11. Courbe de retrait (modèle à trois droites) (Cescimanno et Provenzano, 1999)

On détermine la courbe de retrait par la variation du volume de l'échantillon en utilisant la méthode à la paraffine, au pétrole, au mercure ou au toluène (Cornelis et al., 2006).

Il existe plusieurs modèles pour interpréter la courbe de retrait :

1. Modèle logistique : il représente la courbe de retrait par une courbe continue en forme de « S » avec un aplatissement progressif du rapport dans les deux extrémités, ces dernières déterminent entre elles la zone normale du rétrécissement .
2. Modèle de Kim (1992) qui explique, par des fonctions linéaires et exponentielles, les mouvements verticaux de rétraction qui sont dus à la gravité des particules du sol. Le model représente le retrait normal par une fonction linéaire, le retrait résiduel et le zéro retrait par des fonctions exponentielles. Le retrait résiduel n'est pas considéré.
3. Modèle à trois droites qui distingue trois zones de rétrécissement (1) zone structurale, (2) zone normale et (3) zone résiduelle.

- Zone structurale :

C'est le retrait structural. Dans un premier temps l'eau se retire des fissures et des pores grossiers puis elle sera par la suite remplacée par l'air. Les mesures intéressent les petits agrégats du sol qui sont le plus souvent non fissurés. Donc le modèle est réduit aux deux droites.

- Zone normale

C'est le retrait normal. Dans cette phase une réduction de la teneur en eau par dessèchement entraine une réduction du volume de l'échantillon sans augmentation de la quantité de l'air.

- Zone résiduelle

Le volume total de l'échantillon reste fixe car le matériel a perdu toute la possibilité de retrait supplémentaire et l'eau est remplacée par de l'air. Le début de cette phase se caractérise par le point d'entrée d'air.

1. Modèle exponentiel : il est appelé modèle XP. Il permet de calculer le volume de micro et macropores. De plus, on peut étudier les propriétés de gonflement des argiles sans extraction. Les différentes phases de dessèchement sont illustrées par la figure 12.

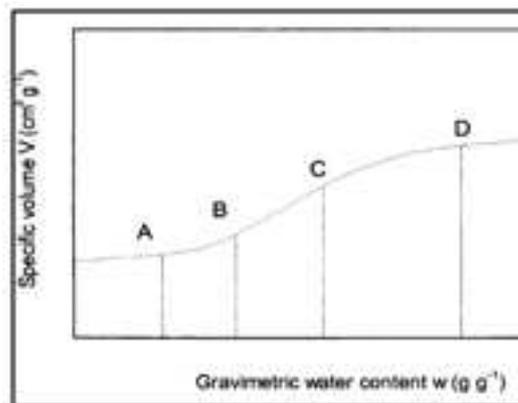


Figure 12. Courbe de retrait (modèle XP) (Boivin et al., 2004)

A : limite de retrait C : limite de macroporosité

B : point d'entrée d'air D : maximum de gonflement

5.5. Le fonctionnement hydrique

L'organisation bimodale de la porosité très marquée (micropores intramassifs et macrofissures) confère aux Vertisols une dynamique d'infiltration double : rapide à travers les fentes de retrait et lente dans les massifs à porosité fine (Ney, 1987) (figure 13) :

- En période humide, les fissures se referment en surface, il y aura une diffusion lente à travers la porosité fine. Une fois le sol saturé, la distribution de l'eau devient régulière et homogène.
- En période sèche, il se forme des grumeaux anguleux qui forment une couche dure « self-mulching » conduisant à la réduction de l'évaporation du sol.

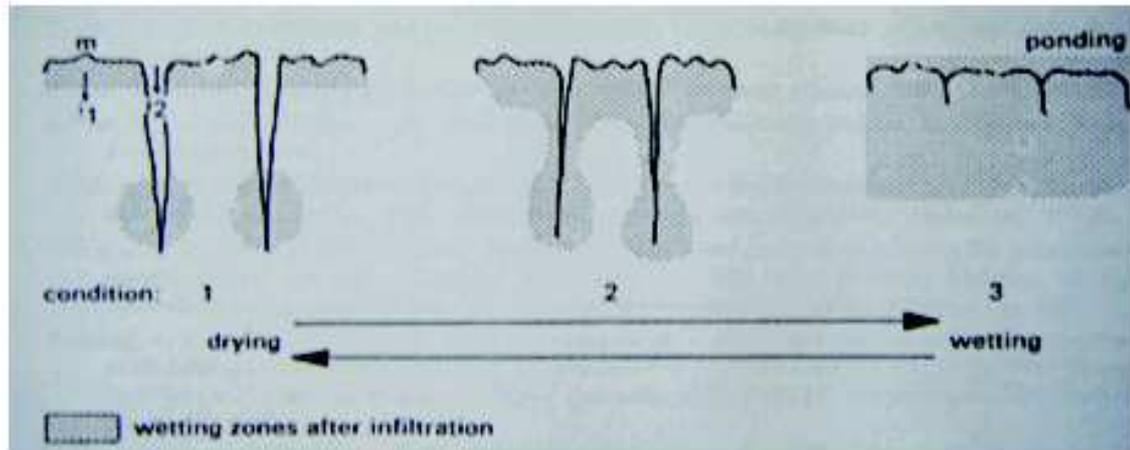


Figure 13. Schéma montrant les effets de l'humectation-dessiccation sur la fissuration des sols argileux (Bouma et Loveday, 1988)

5.5.1. Modélisation du fonctionnement hydrique

Dans les Vertisols, le système de porosité se représente en trois compartiments différents par leur géométrie (Cabidoche et Ozier-Lafontaine, 1995 in Cabidoche et al., 2000) :

- La porosité matricielle (taille de 0,1 à 1 μ m), toujours saturée par l'eau, peu disponible pour la plante, dont le volume est conditionné par le mode d'assemblage des particules d'argile et par sa déformation lors des phases d'humectation et de dessiccation.
- La porosité macro-fissurale (large de plusieurs centimètres, profonde de plus de un mètre en période sèche), elle est la conséquence macroscopique de la dessiccation entraînant une diminution de la porosité matricielle (retrait matriciel), et de l'ouverture de large fissures délimitant des prismes larges de plusieurs décimètres. Les macro-fissures jouent un rôle essentiel dans l'aération et dans l'infiltration.
- La porosité structurale à l'intérieur des ces prismes (taille de 10 μ m à 1 mm), qui constitue le réservoir d'eau facilement utilisable par les plantes.

Pour la précision, le système de porosité a inclut un quatrième compartiment virtuel, au-dessus du sol, associé à la subsidence qui représente la diminution d'épaisseur des couches de sol (pour compenser le retrait matriciel) (figure 14).

L'infiltration privilégiée dans les macro-fissures provoque une réhumectation matricielle qui se traduit par une distribution hétérogène de l'eau. Lors de dessiccation, la perte d'eau concerne d'abord les pores structuraux ce qui provoque peu de retrait (retrait structural). Ensuite, lorsque la porosité structurale est vidée, la perte d'eau matricielle provoque un retrait équivalent en volume (retrait normal). A la fin du retrait normal il

Il y aura une homogénéisation des rapports eau matricielle /solide et une hétérogénéité des subsidences/volumes de macro-fissures. Ces propriétés des Vertisols posent des problèmes d'estimation en solide, en eau et des épaisseurs à un instant donné à cause de leur variation anisotrope (Cabidoche et Voltz, 1995).

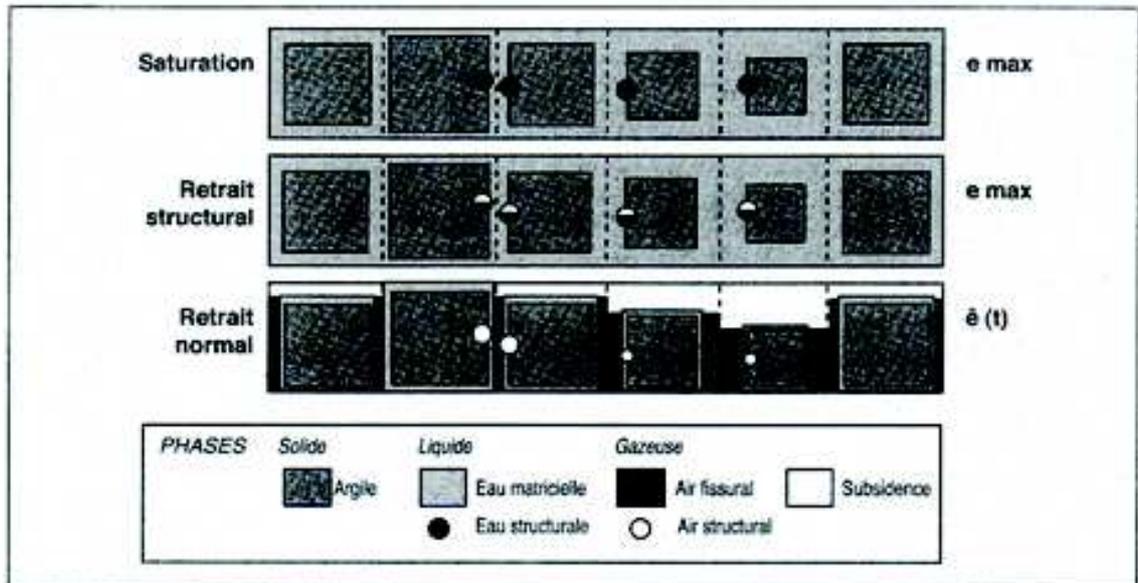


Figure 14. Représentation schématique des volumes des trois phases et des déformations des trois compartiments de porosité d'une couche de Vertisols (Cabidoche et al., 2000)

6. Micromorphologie des Vertisols

L'étude micro-morphologique des Vertisols sert à comprendre le gonflement-retrait des argiles ainsi que la déformation de la matrice (Dalrymple et Jim, 1984; Blokhuis et al., 1990) in Hussein et Adey (1998). Cependant, cette technique est limitée parce qu'il est très difficile de sécher le sol sans voir le rétrécissement du sol (Eswaran et al., 1988 in Mermut et al., 1996).

Les Vertisols ont une densité de masse élevée à cause de leur teneur en argile. Les argiles sont orientées et striées et d'apparence anisotrope. L'arrangement des argiles dans la matrice forme des quasi-cristaux. Les Vertisols possèdent une porosité élevée avec une dominance des vides composés et les inter-agrégats ont des vides planaires (figure 15). La distribution relative des fractions grossières et fines est porphyrique à cause de la continuité de la matrice fine. La structure des fractions fines varie entre mosaïque et strié (Hussein et Adey, 1998).

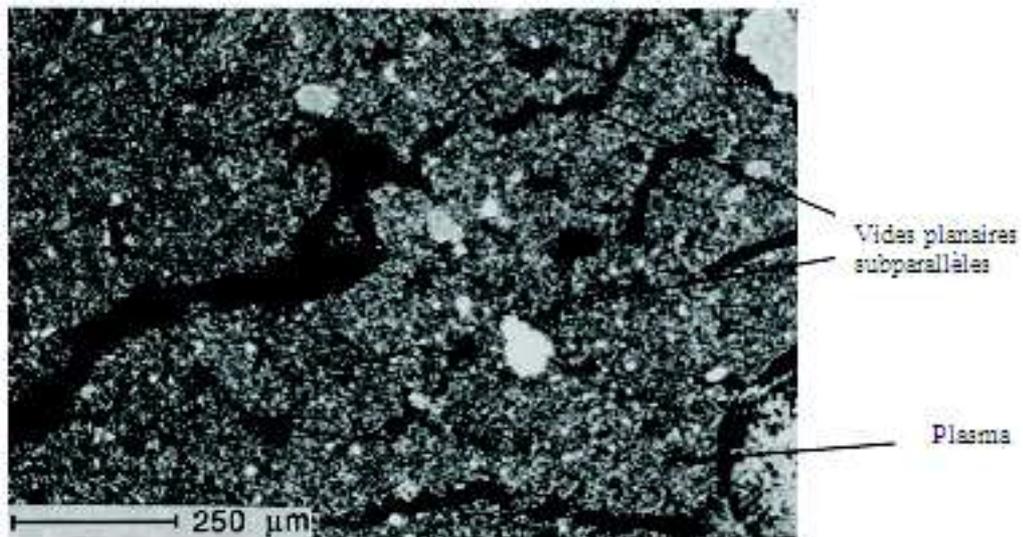


Figure 15. Vides planaires interconnectés (Mermut et al., 1996)

7. Distribution des Vertisols dans le monde

Les Vertisols se localisent dans les régions tropicales, subtropicales et tempérées chaudes (Dudal, 1967). On les trouve dans les régions de formation des smectites (Bühmann et Schoeman, 1995). Ils sont abondants dans les zones où il y a une alternance de saisons sèches et de saisons humides. La FAO estime actuellement la surface des Vertisols à 335 millions d'hectares, soit 2,5% de la surface de la terre (Legros, 1996 ; FAO, 2006). Selon FAO (2006), les Vertisols se rencontrent surtout en Inde (72 millions d'hectares), en Australie (71 millions d'hectares), au Soudan (63 millions d'hectares), au Tchad (16 millions d'hectares) et en Ethiopie (13 millions d'hectares).

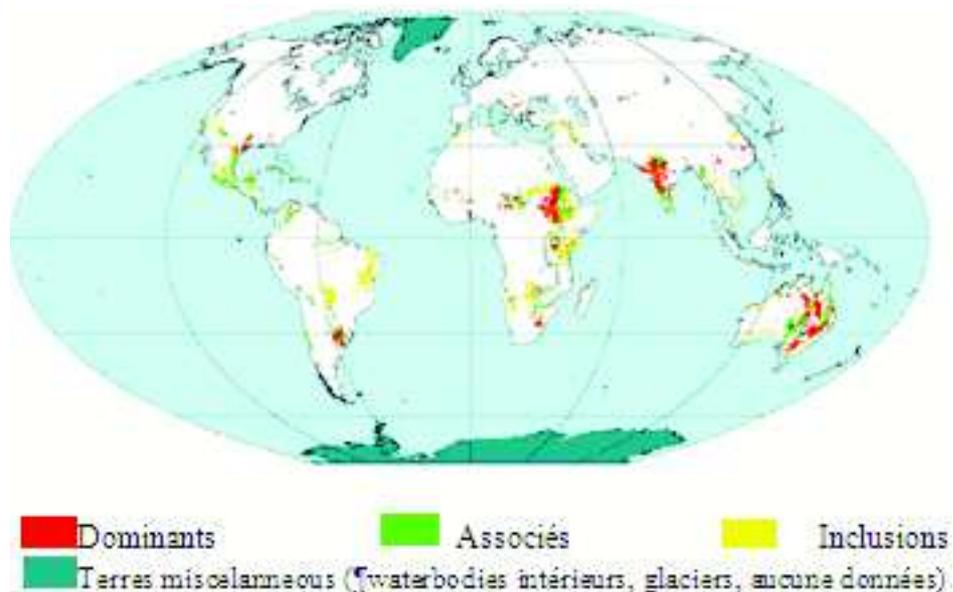


Figure 16. Distribution des Vertisols

Basé sur la carte de sol de WRB et de FAO/Unesco du monde

Source : FAO-GIS, 1998.

8. Les Vertisols en Algérie

De nombreuses études réalisées ont signalé la présence de Vertisols en Algérie, dont la plupart est située dans les plaines alluviales comme c'est le cas des plaines alluviales du Cheliff et des hautes plaines sétifiennes et constantinoises (Boulaine, 1957 in Ould Ferroukh, 1994 ; Daoud, 1993) et de la Mitidja (Ecrement, 1971 ; Ould Ferroukh, 1994).

8.1. Les Vertisols de la Mitidja

Les Vertisols de la Mitidja couvrent une superficie totale d'environ 6300 hectares, soit environ 6 % de la surface totale de cette plaine et sont répartis globalement dans ses parties Est et Ouest (Ecrement, 1971). On y distingue trois groupes selon C.P.C.S (1967) (Ould Ferroukh, 1994) :

1. Groupe des Vertisols à drainage externe nul ou réduit et à structure anguleuse sur au moins les 15 cm supérieurs.
2. Groupe des Vertisols à drainage externe possible à structure arrondie sur au moins les 15 cm supérieurs.
3. Groupe des Vertisols à drainage externe possible à structure anguleuse sur au moins les 15 cm supérieurs.

Selon ANRH (1970), 87,5 % des Vertisols se localisent dans la partie Est (Meftah, Dar El Beida et Sidi Moussa). Ils se caractérisent par une forte teneur en argile, une forte compacité et une couleur généralement foncée. Ils présentent une structure massive anguleuse en surface et polyédrique anguleuse prismatique à prismatique cubique en profondeur avec apparition des slickensides. Le taux de calcaire est faible (< 7 %). Le taux de matière organique décroît avec la profondeur et la capacité d'échange cationique est importante.

Du point de vue minéralogique, les Vertisols de la Mitidja sont dominés par des argiles interstratifiées gonflantes de type illite-smectite (50 à 55 %), l'illite constitue 30 à 35 % et de kaolinite qui représente 15 à 20 %. Ceci est confirmé par les valeurs élevées de la CEC qui sont de l'ordre de 60 à 70 $\text{Cmol}^+ / 100\text{g}$ d'argile (Ould Ferroukh, 1994).

En étudiant le comportement hydrique des Vertisols de la Mitidja Est, Dridi et *al.* (2010) ont remarqué que les teneurs en eau élevées sont obtenues avec les agrégats millimétriques car ils sont constitués essentiellement par des micropores, tandis que les agrégats centimétriques sont essentiellement constitués par des macro-pores qui présentent une grande variation volumique.

9. Classification des Vertisols

Dans le cadre de cette étude, nous utiliserons trois systèmes de classification (CPCS, 1967 ; USDA, 1999 et WRB (FAO, 2006) pour classer les Vertisols.

9.1. La classification française CPCS (1967)

Les Vertisols sont des sols qui ont :

- Un profil de type A(B)C , A(B)gC et A(B)Cg, plus ou moins homogénéisé (ne se différencie que par la structure).
- Grandes fentes de dessiccation et structure polyédrique à prismatique grossière, au moins en (B).
- Dominance d'argiles gonflantes (35 à 40%) avec une CEC qui est d'environ 35 à 40 $\text{Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$ et des mouvements internes exprimés par le microrelief «gilgai» et les effondrements.
- Couleur foncée due en partie à leur matière organique bien polymérisée.

La classification CPCS (1967) est une classification morphopédogénétique hiérarchisée selon un système pyramidal. La classe des Vertisols est subdivisée en deux sous classes, les Vertisols à drainage externe nul ou réduit et les Vertisols à drainage externe possible. Ces sous classes se subdivisent en groupes selon le type de structure (anguleuse, arrondie). Les sous groupes se distinguent par l'intensité du processus d'évolution du sol tel que l'hydromorphie, les mouvements verticaux, l'halomorphie, ...etc.

9.2. La classification américaine (USDA, 1999)

Les Vertisols sont des sols minéraux qui ont tous les caractères suivants :

- La présence d'un horizon de 25 centimètres d'épaisseur ou plus situé dans les 100 premiers centimètres du sol et qui contient des faces de glissement (slickensides) obliques inclinées de 10 à 60 degrés par rapport à l'horizontal.
- La terre fine de l'horizon A ou de la couche de surface jusqu'à 18 cm de profondeur contient au moins 30 % d'argile. La terre fine de la couche située entre 18 et 50 cm ou entre 18 cm et un contact dense, lithique, ou paralithique, un duripan, ou a horizon petrocalcique s'il est plus superficiel doit contenir au moins 30 % d'argile.
- Des fentes qui s'ouvrent et se ferment périodiquement.

La soil taxonomy (USDA, 1999) est une classification morphoanalytique hiérarchisée selon un système pyramidal. Selon la clé de la soil taxonomy (USDA, 2010), l'ordre des Vertisols se subdivise en six sous ordres selon le pédoclimat (régime d'humidité et régime de température). Ces sous ordres sont les Aquerts, Cryerts, Xererts, Torrerts, Usterts et les Uderts.

Exemple : sous ordre des Xererts.

Selon les horizons diagnostiques (horizon de surface et de subsurface et d'autres critères diagnostiques) on subdivise les Xererts en trois groupes (Durixererts, Calcixererts et Haploxererts). Les groupes se subdivisent en sous groupes comme par exemple Aquic Haploxererts.

9.3. La classification FAO (2006)

Selon WRB (FAO, 2006), le groupe des Vertisols est représenté par les sols ayant :

- Un horizon vertique situé dans les 100 premiers cm du sol; et
- après mélange des 20 cm supérieurs, ils ont 30 % ou plus d'argile dans tous les horizons jusqu'à 100 cm au moins de profondeur, ou jusqu'à une couche en contraste (contact lithique ou paralithique, horizon pétrocalcique, pétrodurique ou pétrogypsiq, discontinuité sédimentaire, etc.) située entre 50 et 100 cm; et
- des fentes de retrait qui s'ouvrent et se ferment périodiquement.

- Un horizon vertique

L'horizon vertique est un horizon subsuperficiel argileux qui, suite à des contractions et gonflements répétés, présente des peds polis et rayés en surface (faces de glissements), ou des agrégats structuraux en fuseaux ou parallépipédiques.

- Critères diagnostiques d'un horizon vertique

Un horizon vertique doit avoir:

1. 30 pourcent ou plus d'argile sur toute son épaisseur; et
2. des agrégats structuraux en fuseaux ou parallépipédiques dont l'axe longitudinal est incliné de 10 à 60° par rapport à l'horizontale; et
3. des faces de glissement qui se recoupent; et
4. une épaisseur d'au moins 25 cm.

Dans cette classification, on utilise les horizons diagnostiques, le matériel diagnostique et les propriétés diagnostiques pour la distinction des différentes catégories inférieures.

Les **unités** des Vertisols sont désignés par l'addition des qualificatifs importants (préfixes) et / ou des qualificatifs moins importants (suffixes). Les unités des Vertisols désignent des propriétés chimiques (thionique ; salic ; gypsique ; gypsiric ; calcic ; calcaric ; manganic ; ferric ; eutric ; mesotrophique ; humic ; gleyic ; et stagnique), des propriétés physiques (duric ; grumic ; mazic) et de la couleur (pellic ; chromic et albic). Les qualificatifs grumic, mésotrophique, pellic et mazic sont spécifiques aux Vertisols.

Exemple : un Vertisol hydromorphe qui se caractérise par un complexe saturé (Gleyic Vertisols eutric).

10. Problème de classification des Vertisols

Les Vertisols sont des sols à pédoclimat contrasté. Ce pédoclimat favorise le processus de vertisolisation et mélanisation. De ce fait, les Vertisols ressemblent aux sols mélanisés tels que les chernozems, les kastanozems et les phaeozems (Duchaufour, 2001).

Yerima et *al.* (1987) ont trouvé une difficulté pour classer les Vertisols en association avec les mollisols à cause de la variation de l'épaisseur des cendres volcaniques. Pour résoudre ce problème, ils se sont basés sur la potentialité de gonflement et de rétraction.

Selon Duchaufour (1977), il existe trois types de Vertisols intergrades :

1. Sols vertiques intergrades :

- Caractères vertiques peu marqués :
 - Sols bruns vertiques polycycliques.
 - Pélosols vertiques
- Caractères vertiques marqués :
 - Sols alluviaux vertiques.
 - Sols bruns calcaires vertiques.
 - Sols marrons et fersialitiques vertiques.
 - Brunizems vertiques.

1. Sols bruns eutrophes tropicaux vertiques.
2. Sols vertiques dégradés par acidification ou hydromorphie.

Selon WRB (FAO, 2006), les Vertisols intergrades sont reconnus par des qualificatifs suivants :

1. thionique intergrade avec les Gleysols sulfatés acides et avec les Fluvisols.
2. salique intergrade avec le groupe de référence des Solonchaks.
3. natrique intergrade avec le groupe de référence des Solonetz.
4. gypsique intergrade avec le groupe de référence des Gypsisols.
5. durique intergrade avec le groupe de référence des Durisols.
6. calcique intergrade avec le groupe de référence des Calcisols.

Chapitre II : Matériel et méthodes

L'objectif de cette étude est de déterminer et caractériser les Vertisols références en Algérie. La démarche adoptée dans ce travail est effectuée en deux phases :

- Dans un premier temps, nous avons étudié en détails 3 Vertisols de la Mitidja pour rechercher à quelles références ils se rattachent selon le système WRB (FAO, 2006).
- Dans le deuxième, nous avons construit une base de données pédologiques des Vertisols d'Algérie pour identifier des Vertisols références selon le système de classification WRB (FAO, 2006).

1. les Vertisols de la Mitidja

Les sols étudiés se situent dans la région des Eucalyptus, au sud est de la wilaya d'Alger. Cette région appartient à la plaine de la Mitidja (image 1).

La Mitidja est une plaine de 100 Km de longueur et 20 Km en moyenne de largeur. Elle est limitée par l'Atlas Tellien au sud et les rides Sahéliennes au nord d'altitude peu élevée atteignant 60 m en moyenne. Cette vaste plaine sublittorale est bordée à l'est par un massif montagneux (Bou Zegza) qui constitue une série de collines situées entre Boudouaou et Boumerdès. Cet ensemble de montagnes et de collines encadre la plaine et lui laisse peu d'accès vers la mer, à l'exception d'un couloir assez large formé par l'oued Réghaïa. Dans la partie occidentale de l'Atlas blidéen, les collines du Sahel entrent en contact avec le massif montagneux du Chenoua. La région d'étude est caractérisée par une formation continentale de marnes jaunes collantes, d'argiles graveleuses, d'alluvions ainsi que de quelques lits de graviers, grés et sables (Mutin, 1977).

Selon les données climatologiques de Seltzer (1946), le climat de la région d'étude est de type méditerranéen appartenant à l'étage bioclimatique subhumide. Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (figure 17) calculé pour la période allant de 1984 à 2008, montre l'existence d'une saison humide et relativement froide qui s'étend sur sept (07) mois (2^{ème} quinzaine de Septembre au mois d'Avril) et d'une saison sèche et chaude dans le reste de l'année. En ce que concerne le pédoclimat, selon les travaux de Newhall (1976), le régime de

température est de type thermique et le régime hydrique est de type xérique.

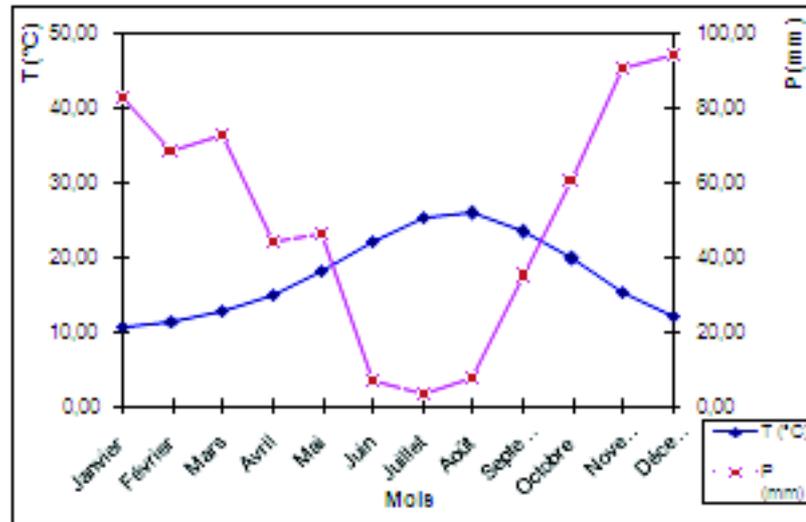


Figure 17. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен pour EL-Harrach (1984-2008)

1.1. Choix du site et méthodes d'échantillonnage

La carte pédologique de la Mitidja (Ecrement, 1971) et notre propre investigation nous ont permis d'inventorier et de retenir trois stations caractérisées par des Vertisols. L'implantation de ces profils a été faite sur le fait qu'ils sont peu distants les uns des autres et sur la facilité d'accès au site des profils. Ils se situent tous sur des terrains agricoles.

Les trois profils ont fait l'objet de prélèvements à la tarière par couches de 20 cm jusqu'à 120 cm de profondeur en vue d'analyse au laboratoire. Ainsi, 18 échantillons à analyser ont été prélevés. Ces prélèvements à la tarière ont été effectués le 10 mars 2011. Un deuxième échantillonnage des agrégats pour les 3 premières couches du sol (chaque 20 cm) a été effectué le 28 juin 2011 en creusant des mini profils. La description morphologique a été réalisée le 12 juillet 2011 pour permettre au sol d'être sec et aux fentes de retrait de mieux s'exprimer. La localisation des profils est présentée par l'image 1. Les coordonnées géographiques de ces profils sont :

- **P 1** : Latitude (N) 36° 39' 46,9'' ; Longitude (E) 3° 10' 26,9'' ; Altitude 22 cm.
- **P 2** : Latitude (N) 36° 39' 26,1'' ; Longitude (E) 3° 9' 43,7'' ; Altitude 40 cm.
- **P 3** : Latitude (N) 36° 39' 36,2'' ; Longitude (E) 3° 10' 3,9'' ; Altitude 37 cm.



Image 1. Localisation des profils (extraite de Google Earth Mars 2012).

1. 2. Méthodes d'analyses

Chaque échantillon de sol est mis dans un sac en plastique qui porte un code relatif à l'horizon et au profil auquel il se rattache. Les échantillons, une fois séchés à l'air libre, broyés puis tamisés à 2 mm, ont subi une série d'analyses physiques, chimiques et biologiques au laboratoire du département de science du sol (ENSA). Les analyses effectuées au laboratoire et leurs méthodes sont présentées dans le tableau 1.

Analyses		Méthodes
Calcaire total (%)		Méthode volumétrique au calcimètre de Bernard
pH		Méthode potentiométrique sur un rapport terre /eau de 1/2,5
CE (dS/m)		Méthode électrique sur extrait dilué 1/5
CEC et bases échangeables (Cmol.kg ⁻¹)		La CEC : méthode Bower à l'acétate de sodium à pH 8,2 - Saturation par acétate de sodium à pH 8,2 - Lavage par l'éthanol - Déplacement par acétate d'ammonium à pH 7 Les bases échangeables : - Na ⁺ et K ⁺ lectures par spectrophotomètre à flamme - La somme de Mg ⁺⁺ et Ca ⁺⁺ obtenus par différence par rapport à la CEC
Bilan ionique (meq/l)	Les cations Ca ⁺⁺ , Na ⁺ et K ⁺	Photométrie à flamme
	Le cation Mg ⁺⁺	Spectrophotométrie d'absorption atomique
	Les sulfates	Précipitation au chlorure de baryum puis dosage par turbidimétrie
	Les chlorures	Méthode titrimétrique en utilisant le nitrate d'argent
	Les bicarbonates	Obtenues par différence
Carbone organique (%).		Analyse du carbone organique par la méthode ANNE
Fractionnement de la matière organique (MO libre %, AF %, AH %, Humine %)		Dabin 1971
Granulométrie		Méthode de sédimentation à la pipette de Robinson.
Densité apparente.		Méthode au pétrole
Rétention en eau (pF)		Presse à plaque
Densité réelle		Pycnomètre à eau
Conductivité hydraulique (cm h).		Méthode HENIN
Limite d'Atterberg		Méthode d'Atterberg
Coefficient de l'extensibilité linéaire (COLE)		USDA 1999

Tableau 1. Analyse de laboratoire et leurs méthodes

Pour chaque analyse du sol, nous avons effectué trois répétitions. Pour l'analyse de la densité apparente et l'indice de COLE, nous nous sommes limités aux trois couches de surface (0-60 cm). De même, pour la perméabilité hydraulique nous nous sommes limités uniquement aux horizons de surface. L'indice de COLE est déterminé au niveau d'un agrégat par la formule (USDA, 1999):

$$\text{COLE} : (\text{longueur en humide} - \text{longueur en sec}) / \text{longueur en sec}$$

L'état humide se définit à une succion de 1/3 bar et l'état sec après séchage de 24 h à l'étuve à 105°C.

1.3. Analyse du complexe argilo-humique

Pour étudier le complexe argilo-humique, nous sommes passés par trois étapes principales, (a) prélèvement de l'argile à partir des échantillons de sol, (b) séparation de l'argile fine de

l'argile grossière et (c) détermination de la CEC, des taux de calcaire et de matière organique des deux fractions argileuses.

1.3.1 Le prélèvement de l'argile (argile < 2 µm)

Nous précisons ici qu'il s'agit de l'argile granulométrique, c'est-à-dire de l'ensemble des particules qui ont un diamètre inférieur à 2 µm. Cette fraction peut renfermer, entre autre, des argiles minéralogiques, des débris de quartz très fins, de la silice plus ou moins hydratée, des oxydes de fer et d'aluminium et des cristaux de calcaire très fins ainsi que de la matière organique. Cette fraction est appelée communément colloïde du sol.

Cette étape a été effectuée sur une prise de terre de 20 grammes. Après avoir dispersé les argiles avec du pyrophosphate de sodium (10 ml) auquel on a ajouté 1 ml d'ammoniac, l'échantillon a été agité pendant 2 heures puis transvasé dans des allonges de 1 000 ml et complété avec de l'eau distillée.

La fraction argileuse est prélevée à une profondeur bien précise calculée en fonction du temps de décantation et de la température ambiante selon le principe de la loi de Stock. Pour augmenter le rythme de prélèvement et donc la quantité d'argile prélevée, nous avons joué sur le temps de décantation et donc sur la profondeur de prélèvement selon le principe ci-dessous :

Si, par exemple, la température de l'air ambiant est de 20 C°, la profondeur de prélèvement est de 10 cm après 8 h de décantation. Si on veut effectuer un prélèvement après X h de décantation, la profondeur de prélèvement y (cm) sera alors calculée selon la règle de trois :

$$y \text{ cm} = \frac{x \text{ h} \cdot 10 \text{ cm}}{8 \text{ h}}$$

Les argiles ont été prélevées à l'aide d'un siphon recourbé en son extrémité pour ne pas aspirer de solution située à une profondeur plus grande que celle désirée (Photo 2.a et 2.b).



Photo 2.a. Siphon ayant servi au prélèvement des argiles



Photo 2.b. Prélèvement de l'argile totale

1.3.2. Fractionnement des argiles

Les argiles ont été ensuite fractionnées en argile grossière (0.2-2 μm) et en argile fine (< 0.2 μm) à l'aide d'une centrifugeuse selon le procédé de l'ISRIC (2002). Le procédé consiste à introduire dans des tubes la suspension contenant de l'argile à l'aide d'une pipette. On agite très énergiquement ces tubes puis on laisse reposer pendant une heure. Par la suite, on transfère la suspension dans des godets de la centrifugeuse qu'on fait tourner à une vitesse de 1800 t/mn pendant une durée en fonction de la température comme indiqué dans le tableau 2.

Température °C	1800 rpm min	2500 rpm min	Température °C	1800 rpm min	2500 rpm min	Température °C	1800 rpm min	2500 rpm min
20	32.0	16.5	27	27.0	14.0	34	23.0	12.0
21	31.0	16.1	28	26.5	13.5	35	22.5	11.8
22	30.0	15.7	29	26.0	13.3	36	22.0	11.5
23	29.5	15.3	30	25.0	13.0	37	22.0	11.3
24	29.0	15.0	31	24.5	12.8	38	21.5	11.1
25	28.0	14.6	32	24.0	12.5	39	21.0	10.9
26	27.5	14.2	33	23.5	12.3	40	20.5	10.6

Tableau 2. Vitesse de Centrifugation et temps de rotation en fonction de la température pour la détermination de la fraction fine de l'argile < 0.2 μm (ISRIC, 2002)

Une fois la séparation accomplie, les argiles fines et les argiles grossières sont déposées dans des capsules en céramique et séchées dans une étuve à 60 °C pour éviter toute modification de la nature des argiles et préserver la matière organique (Photo 3.a ; Photo 3.b).

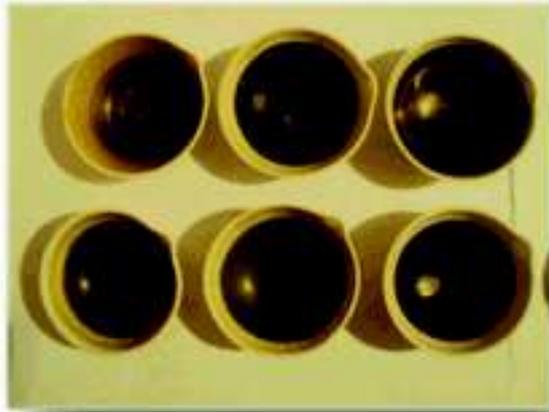


Photo 3.a. Argiles fines après séchage



Photo 3.b. Argiles grossières après séchage

Après le séchage, l'argile est récupérée et bien broyée dans un mortier en céramique (Photo 4.a ; Photo 4.b).



Photo 4.a. Argiles grossières après broyage



Photo 4.b. Argiles fines après broyage

1.3.3. Analyses chimiques réalisées sur la fraction argileuse

Les analyses et les méthodes d'analyses effectuées sur les 2 fractions argileuses sont indiquées dans le tableau 3.

Tableau 3. Analyses et méthodes d'analyse effectuées sur les argiles

Analyse	Méthode
Carbone organique	Méthode ANNE
Matière organique	C% *1,72
Calcaire totale	Méthode volumique avec le calcimetre de BERNARD
CEC	Méthode Bower centrifugation à l'acétate de sodium

1.4. Traitements des données

À partir des résultats morphologiques et analytiques obtenus, nous avons classés les profils étudiés dans le système de classification WRB (FAO, 2006).

A cause de son effet sur les propriétés pédologiques et agronomique des Vertisols, nous avons étudié les corrélations linéaires éventuelles entre le taux d'argile et les différents paramètres pédologiques analysés. Les calculs statistiques ont été effectués par le logiciel Statistica 5.

1.5. Suivi des fentes de retrait et du microrelief gilgai

Pour suivre l'évolution des fentes de retrait, du microrelief et des taux d'humidité, nous avons choisi délibérément la parcelle du profil 3 qui ne risque pas d'être irriguée ou d'être humidifiée en profondeur par les eaux d'irrigation des parcelles mitoyennes. Pour ce faire, nous avons confectionné un dispositif qui nous permet d'effectuer les mesures sur une station de 1 m² (photo 5). Les mesures ont été réalisées sur 3 stations distantes de 20 m environ les unes des autres. Chaque station a fait l'objet de 6 mesures effectuées entre Avril à Juillet.

Les mesures ont été effectuées par un double décimètre pour la largeur des fentes et par un fil de fer de 2 mm de diamètre pour la profondeur des fentes.

Ensuite chaque station a été photographiée. Les photos de chaque station sont par la suite intégrées dans le logiciel Surfer pour dessiner et mieux restituer le développement des ces fentes.



Photo 5. Dispositif de suivi des fentes de retrait

Le suivi du microrelief gilgai a été effectué parallèlement au suivi des fentes et du profil hydrique du sol. Il s'agissait de mesurer à l'aide d'une règle la dénivellation entre les microhighs et les microlows en mettant une règle en bois au-dessus de deux composantes microhighs comme le montre la photo 6 et de la figure 18. Les résultats obtenus ont fait l'objet de calculs statistiques.



Photo 6. Dispositif de mesure du microrelief gilgai au terrain

$$V\% = (\text{la somme des cations échangeables} / \text{CEC}) * 100$$

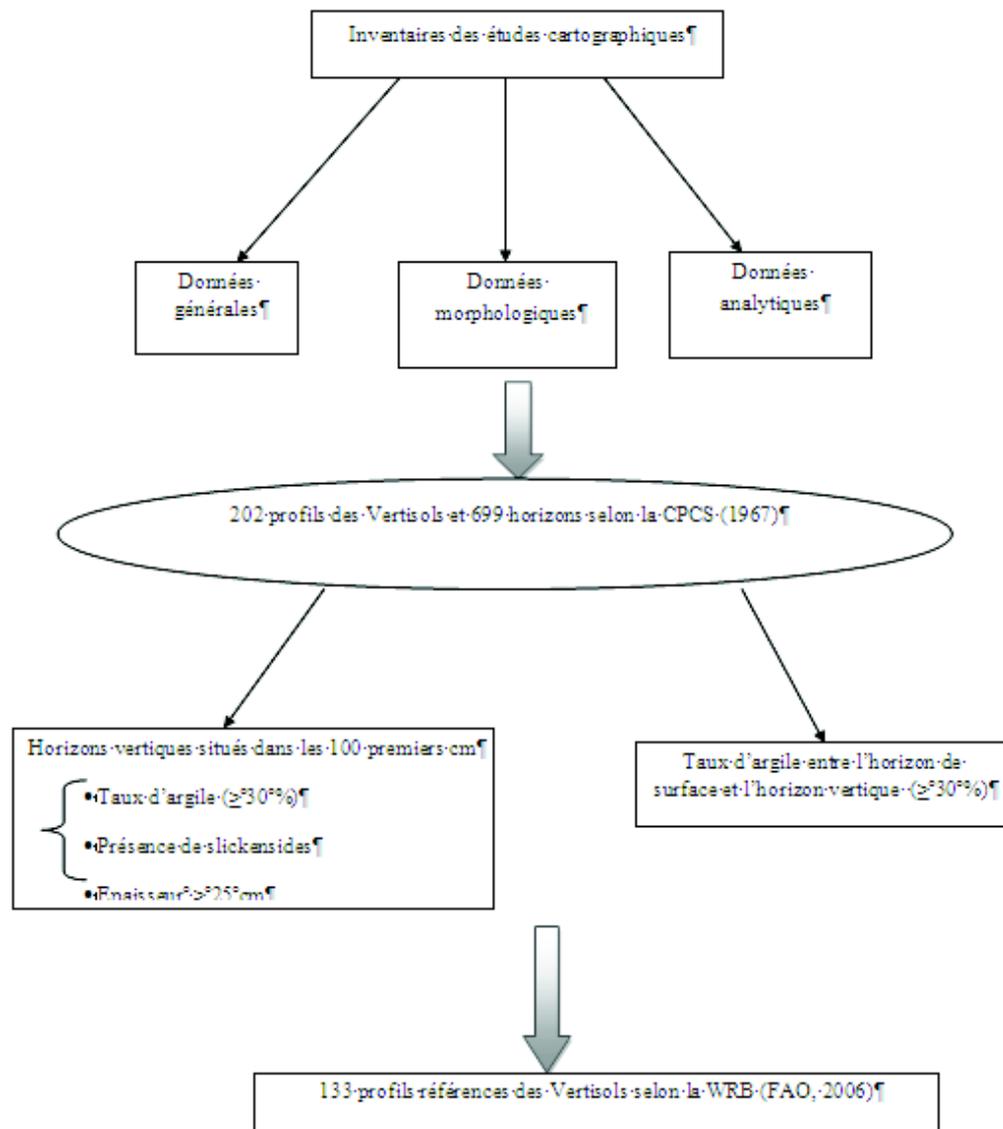


Figure 19. Méthodologie de construction de la base de données des Vertisols références

La zone d'étude	Auteur	Année d'étude	Echelle d'étude	Nombre de profils
Annaba (plaine de Annaba)	BOUFELOUSSA C.	2000	1/20 000	26
Annaba (Fezzara)	LEZZAR M.E.H	1981	1/50 000	3
Annaba/ Skikda	B.E.M.H	2004	1/20 000	17
Bama	LOUYOT J.	2000	1/8 000	36
Constantine	ZAKHARKOV P.	1980	1/100 000	7
Guelma (plaine alluviale de Guelma)	LEZZAR M.E.H.	1997	1/20 000	13
Média	POUGET M.	1973	1/50 000	8
Média (Ain Boucif)	OULD FERROUKH M.E.H	1988	1/20 000	2
Média (Souagui)	TARZI K.	1987	1/50 000	1
Média (Ben Chicac)	DJEHRANI K.	1985	1/20 000	1
Mitidja	ECREMENT Y.	1971	1/50 000	19
Mitidja	OULD FERROUKH M.E.H	1994	1/50 000	3
Mostaganem	DJEBABA M.	1999	1/20 000	7
Sahel Algérois	IFTEN L.	1999	1/20 000	12
Moyen Chélif	BLIET L.	1972	1/ 50 000	6
M'leta	HAMMOUM A.	2005	1/25 000	29
M'leta Tlelat	BENSAIDA, TREA BENYAMINA K. et MALEVANTCHOUK A.	1974	1/50 000	8
Lac Oubeira	DJELLAL M.	1993	1/20 000	1
Boumerdes (Zemmouri, Corso)	KRIBAA M.	1983	1/25 000	1
Mascara	HANDI AISSA B.	1988	1/20 000	1
Boumerdes (Tnenia)	REGUEG-YASSAAD H.A	1984	1/25 000	1

Tableau 4. Répartition cartographique des profils de la base de données

2.2. Saisie des données

La saisie des données a été réalisée à l'aide d'un système de gestion d'une base de données ACCESS. Par la suite, les informations sont exportées sous forme de fichier *.xls en vu de leur traitement statistique. Le choix de EXCEL se justifie grâce à sa puissante fonction « Filtre » et sa compatibilité avec les logiciels de traitements statistiques et de cartographie, en particulier Map/Info. La base de données construite se compose de 202 profils et 699 horizons. Les 202 profils sont projetés sur la carte d'Algérie à l'aide du logiciel « MapInfo 8 » sur un support Comgéo (INCT, 2000). Le système de projection utilisé est le système Lambert Algérie Nord (figure 20).

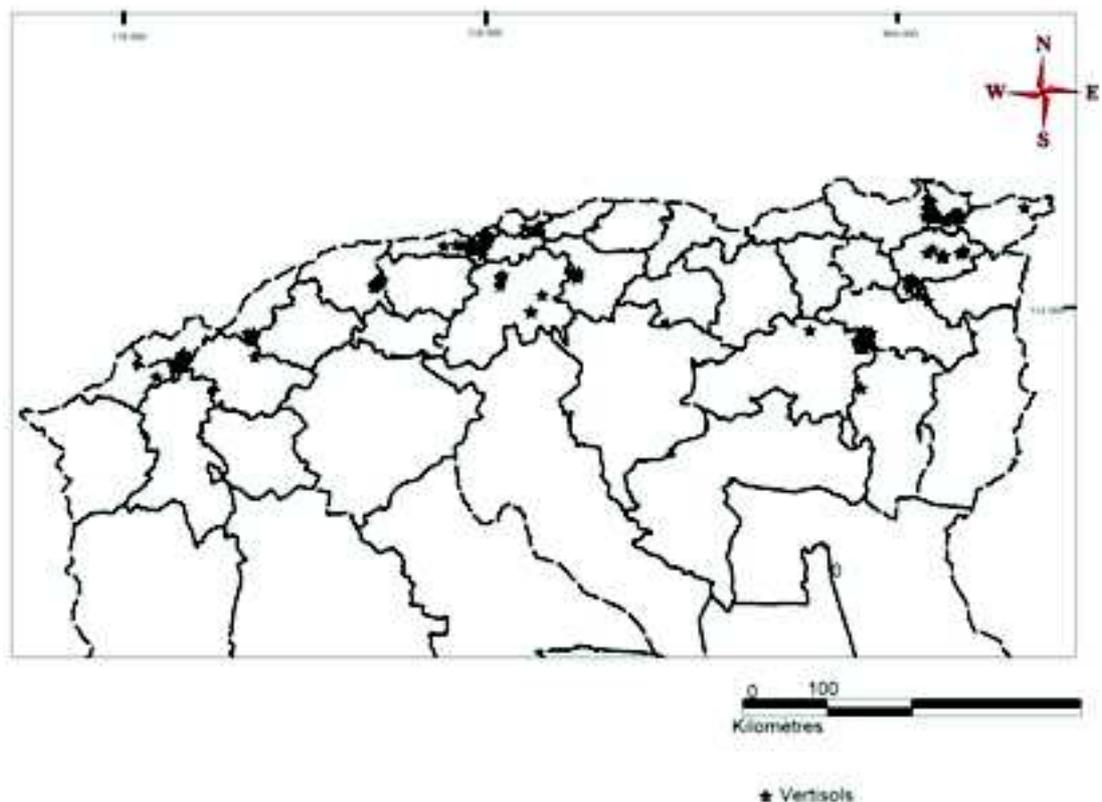


Figure 20. Carte de localisation de Vertisols selon CPCS (profils d'étude).

2.3. Détermination des profils références des Vertisols selon la WRB (FAO, 2006)

Dans cette phase, nous avons recensé les Vertisols de la base de données qui répondent à la définition des Vertisols selon le système de classification WRB (FAO, 2006). Ce dernier exige la présence de l'horizon vertique dans les 100 premiers cm du sol, un taux d'argile $\geq 30\%$ et la présence de fentes de retrait. Le critère fente de retrait a sérieusement omis, car la présence et l'absence de ce critère sont liées à l'humidité du sol lors de la description du profil. Le recensement s'est basé sur la classification française (CPCS, 1967) qui prend en considération la présence de fentes de retrait comme critère pour définir un Vertisol.

La combinaison entre les différents critères de classification a été réalisée par la fonction « filtre » du logiciel EXCEL qui permet de n'afficher que les lignes qui répondent aux critères de recherche spécifiés et masque celles qui ne répondent pas à la requête spécifiée. Le résultat de la requête est par la suite intégré dans MapInfo pour le projeter sur la carte de l'Algérie. Parmi les 202 profils de la base de données, seuls 133 profils répondent à la définition des Vertisols selon la classification WRB (FAO, 2006).

2.4. Traitements des données

Les informations dans une base de données pédologiques se subdivisent en deux catégories, les données quantitatives (données analytiques) et les données qualitatives (données morphologiques).

2.4.1. Les données qualitatives

La distribution des paramètres pédologiques morphologiques pour les horizons de surface (H1), de subsurface (H2) et de profondeur (H3, H4, H5, H6) est présentée sous forme d'histogrammes.

2.4.2. Les données quantitatives

Les différents calculs sont réalisés par les logiciels EXCEL, STATISTICA 8, et ORIGIN 5.0. Les calculs sont faits pour les 133 profils et pour chaque catégorie d'horizons.

Les variables étudiées ici sont le pH, la CE, le taux d'argile (%), le taux de carbone organique (‰), le calcaire total (%), la CEC, l'ESP, le pF_{4,2} et le pF₃. Le choix de ces paramètres se justifie par leur importance dans les classifications.

- **Statistiques descriptives** : pour ce traitement, l'opération est réalisée d'abord pour l'ensemble des profils et ensuite pour chaque catégorie d'horizons (H1, H2 et Hp). Ici, il s'agit de déterminer les paramètres statistiques de tendance centrale et de dispersion.
- **Comparaison des moyennes** : la comparaison des moyennes est faite entre catégorie d'horizons, pris deux à deux. Elle est calculée entre les horizons de surface (H1) et de subsurface (H2), entre les horizons de surface (H1) et de profondeur (HP) et entre les horizons de subsurface (H2) et de profondeur (HP). Elle est réalisé par le test de Student par le logiciel « Origin 5.0 ».
- **Corrélations entre les variables** : l'étude des relations est un caractère essentiel de la pédologie (Boulaine, 1980) ainsi que pour vérifier la qualité de l'information (Legros et al., 1992). Dans notre étude, on s'est basé sur la régression simple et la régression multiple. Pour ce traitement, nous avons étudié les relations des taux d'argile des horizons diagnostiques (horizons vertiques) aux autres paramètres pédologiques des mêmes horizons.
- La régression simple

Ici, il s'agit d'étudier les corrélations entre les taux d'argile et les autres paramètres pédologiques. Pour chaque corrélation étudiée, le taux d'argile représente la variable indépendante, tandis que le reste des paramètres constituent les variables dépendantes.

- La régression multiple

Dans cette étude, nous avons choisi des modèles de prédiction des taux d'argile en fonction des variables indépendantes. Le choix des paramètres s'est basé sur l'analyse des composantes principales (ACP). La sélection des équations de régression est effectuée par rapport au coefficient de régression multiple et aux valeurs des résidus.

Chapitre III : Résultats et discussion

Ce chapitre comporte deux volets distincts que nous présentons de la manière suivante :

- Le premier volet est réservé à la présentation et la discussion des paramètres morphologiques et analytiques des 3 Vertisols étudiés.
- Le deuxième volet est réservé à présenter et discuter la base de données pédologiques des Vertisols d'Algérie.

1 Les Vertisols de la zone d'études

Dans ce volet, nous présentons d'abord les caractéristiques morphologiques et analytiques des 3 Vertisols étudiés que nous classons selon la classification WRB (FAO, 2006), USDA (1999) et CPCS (1967). Par la suite, nous discutons les caractéristiques et propriétés physiques de ces Vertisols. Nous concluons ce volet par une analyse détaillée du complexe adsorbant.

1.1. Caractéristiques morphologiques et analytiques des sols de la zone d'étude

1.1.1. Le profil 1

- Les données générales
 - Date de description : 12/07/2011.
 - Localisation : Commune des Eucalyptus (El Harrach) (image 2).
 - Temps : Ensoleillé.
 - Géomorphologie : Relief plat (plaine).
 - Drainage externe : mauvais.
 - Pente : 0%
 - Aspect de surface : Fentes de retrait (2-4 cm de large) (Photo 7.a).
 - Culture : Arbres fruitiers.
 - Roche mère : Alluvions anciennes.
 - Coordonnées : Latitude : 36° 39' 46,9'' ; Longitude : 3° 10' 26,9''
 - Altitude : 22 m.



Image 2. Localisation de profil 1

Description morphologique

A_p 0-20 cm : Horizon labouré ; sec ; non fragile ; très compact ; poreux ; couleur à l'état humide 2,5 Y 4/2 (dark grayish yellow) ; texture argileuse ; structure polyédrique angulaire moyenne à grossière nette ; collant ; plastique ; pas d'éléments grossiers ; quelques artefacts ; vive effervescence à l'HCl ; fentes de retrait de 0,5 à 1,5 cm de largeur distantes de 10 à 20 cm ; transition progressive.

B_g 20-65 cm : Sec ; non fragile ; compact ; nombreux pores fins ; couleur à l'état humide 5 Y 4/2 (grayish olive) ; texture argileuse ; structure polyédrique angulaire grossière nette (Photo 7.b) ; collant ; plastique ; rares éléments grossiers de taille 2-3 mm ; taches d'hydromorphie noirâtres ; vive effervescence à l'HCl ; présence des fentes de retrait de 0,5 à 1 cm de largeur, distantes de 20 cm ; transition progressive.

B_{gss} 65-95 cm : Frais ; non friable ; compact ; poreux ; couleur à l'état humide 5 Y 5/3 (grayish olive) ; texture très argileuse ; structure polyédrique angulaire à prismatiques très grossière nette (photo 7.c) ; très collant ; très plastique ; rares éléments grossiers de 2 à 3 mm ; présence abondante des concrétions ferro-manganiques ; très faible effervescence à l'HCl ; très nombreuses fentes de retrait fines (1 mm de largeur) ; très nombreuses faces de glissement ; transition progressive.

C_{gss} > 95 cm : Frais ; peu friable ; compact ; rares pores très fins ; couleur à l'état humide 5Y 4/2 (grayish olive) ; texture très argileuse ; structure massive à éclats anguleux à prismatique très grossière ; très collant ; très plastique ; pas d'éléments grossiers ; très nombreuses concrétions ferro-manganiques ; pas d'éléments grossiers ; très faible réaction à l'HCl ; très nombreuses faces de glissement.

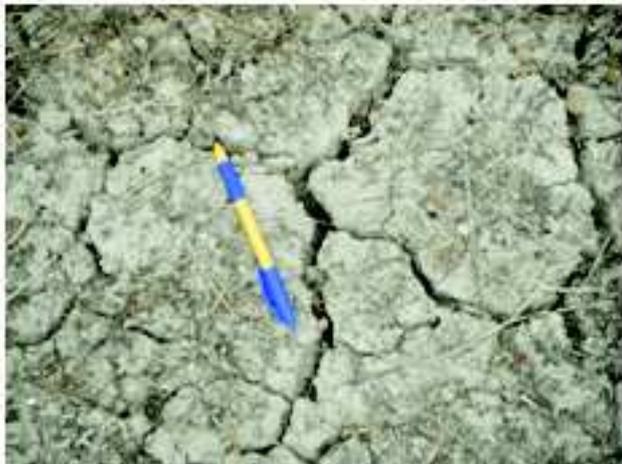


Photo 7.a. Fentes de retrait en surface



Photo 7.b. Slickensides



Photo 7.c. Profil pédologique de P1

· Résultats des analyses

Les résultats des analyses physico – chimiques sont rapportés dans le tableau 5.

Profondeur (cm)		0 - 10	10 - 65	65 - 95	> 95
Horizon		Ap	Bg	Bg _{ss}	Cg _{ss}
Granulométrie (%)	A	61,6	59,4	61,7	56,3
	LF	25,3	30,5	27,7	25,7
	LG	5,5	2,7	1,8	3,2
	SF	4,8	3,7	4,3	6,9
	SG	1,7	<1	<1	1
Triangle textural USDA		C	C	C	C
Argile fine (%)		24	26,5	27,7	26,5
(Argile fine / At) (%)		43	48	49	54
Rétention en eau (%)	H _{er} pF3	40	38,7	40,3	35,3
	H _{pf} pF4,2	34,7	33	35,3	29,1
	RU	5,2	5,5	4,9	6,1
Bases échangeables (Cmol ⁺ . Kg ⁻¹)	Ca ⁺⁺ et Mg ⁺⁺	28	27	28	29
	Na ⁺	0,5	0,4	0,4	0,4
	K ⁺	0,7	0,3	0,1	0,1
S (Cmol ⁺ . Kg ⁻¹)		29,3	27,7	28,5	29,5
CEC (Cmol ⁺ . Kg ⁻¹)		29,3	27,7	28,5	29,5
V(%) = (S/CEC) × 100		100	100	100	100
CaCO ₃ total (%)		3	5	5	3
pH eau, (2/5)		8	7,9	7,8	7,7
CE(dS /m),(1/5)		0,3	0,3	0,3	0,4
Matière organique (%)		4	3	2	1
Bilan ionique (még /l)	SO ₄ ⁻	0,8	0,8	0,9	0,8
	HCO ₃ ⁻	6,0	5,6	2,3	1,3
	Cl ⁻	0,5	0,95	1,5	1,8
	Ca ⁺⁺	1,3	0,4	0,2	0,1
	Mg ⁺⁺	11,4	6,4	1,7	1,1
	Na ⁺	2,7	2,7	3,1	3,0
	K ⁺	8,1	2,3	0,6	0,4

Tableau 5. Résultats des analyses de P1

Discussion et classification

Le profil P1 se caractérise particulièrement par ses teneurs élevées en argile (A % > 50) ce qui s'est traduit sur le plan morphologique par une forte compacité des horizons et par la présence de fentes de retrait larges (> 1 cm) et profondes (> 50 cm) et par de nombreuses faces de glissement en profondeurs (Bg_{ss} et Cg_{ss}). Ces caractéristiques suggèrent que les argiles qui composent ce sol sont gonflantes. Ces forts taux d'argile seraient à l'origine d'une faible conductivité hydraulique dont les conséquences sont l'apparition d'une hydromorphie qui se manifeste par des taches d'oxydo-réduction dans B g et des concrétions ferromanganiques dans B2g_{ss} et surtout en Cg_{ss}. Ce sol se caractérise aussi par des taux de matière organique relativement moyens et qui décroissent très progressivement du haut (MO % = 3,9) vers le bas (MO % = 1,6) du profil ce qui suggère une certaine homogénéisation de ce paramètre, en particulier dans les horizons A et B. Cependant, le complexe adsorbant est néanmoins faible (autour de 30 Cmol⁺. Kg⁻¹) comparativement aux teneurs en argile et MO de ce profil. Ce résultat signifierait qu'une partie de la fraction inférieure à 2 microns ne serait pas concernée par le phénomène d'échange. Cette CEC concorde bien avec les teneurs en argiles fines (< 0,2µm) qui seraient constituées

de montmorillonite ($\approx 100 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$). Enfin, ce profil se caractérise par un complexe adsorbant dominé par le calcium et le magnésium, des taux de calcaire faible (3 à 5 %) et par un pH légèrement alcalin dans l'ensemble du profil. La conductivité électrique est partout faible.

Classification du profil

- La classification WRB

Le profil P 1 possède les critères diagnostiques suivants :

- Un horizon vertique situé entre 65 et 90 cm de profondeur qui répond aux critères diagnostiques en matière de taux d'argile élevé ($> 30 \%$), présence des faces de glissement avec une épaisseur supérieure à 25 cm.
- Un taux d'argile entre l'horizon de surface et l'horizon vertique supérieure à 30 %. En effet, l'horizon de surface a un taux d'argile de 62 % et l'horizon Bg a un taux de 59 % d'argile.
- Présence de fentes de retrait.

Donc notre sol est un Vertisol.

- Le profil est caractérisé aussi par une présence de signes d'hydromorphie (concrétions ferromanganiques) et par un taux de saturation en base échangeable supérieur à 75 %.

De ce fait le profil 1 est classé comme : **Gleyic Vertisols eutric**.

- La classification CPCS

Classe : Vertisols.

Sous classe : à drainage externe nul ou réduit.

Groupe : à structure anguleuse sur au moins les 15 cm supérieure.

Sous groupe: Hydromorphe.

- **La classification USDA**: fine clay thermic Aquic Haploxererts.

1.1.2. Le Profil 2

Ce profil se situe dans un verger de poirier (image 3).

Les données générales

Date de description : 12/07/2011.

Localisation : Commune des Eucalyptus.

Temps : Ensoleillé

Géomorphologie : Relief plat (plaine).

Drainage externe : Mauvais.

Pente : 0%.

Aspect de surface : Terrain travaillé.

Roche mère : Alluvions

Coordonnées : Latitude : 36° 39' 26,1''; Longitude : 3° 9' 43,7''

Altitude : 40 m.



Image 3. Localisation de profil 2

Description morphologique

A_p 0-12 cm : Horizon labouré ; sec ; non fragile ; très compact ; nombreux pores moyens à grossiers ; couleur à l'état humide 10 YR 4/3 (dark brown) ; texture argileuse ; structure polyédrique sub-angulaire moyenne nette ; collant ; plastique ; pas d'éléments grossiers ; vive effervescence à l'HCl ; fentes de retrait de 0,5 à 3 cm de largeur (Photo 8.a), distantes de 20 cm environ ; transition nette.

B_{ss} 12-60 cm : Sec ; non fragile ; compact ; nombreux pores fins ; couleur à l'état humide 2,5 Y 4/2 (dark grayish yellow) ; texture argileuse ; structure prismatiques grossière nette ; collant ; plastique ; pas d'éléments grossiers ; vive effervescence à l'HCl ; traversé par des fentes de retrait de 0,5 à 1 cm de large, distantes de 20 cm ; présence des faces de glissement obliques (Photo 8.b) ; transition progressive.

B_{gss} 60-90 cm : Sec ; non fragile ; compact ; nombreux pores très fins ; couleur à l'état humide 2,5 Y 4/3 (olive brown) ; texture argileuse ; structure prismatique très grossière nette (Photo 8.c) ; collant ; plastique ; quelques racines grossières de poirier ; quelques taches d'oxydo-réduction ocres et noires ; pas d'éléments grossiers ; vive effervescence à l'HCl ; présence des fentes de retrait très fines (1-2 mm de large) distantes de 20 cm ; présence de slickensides ; transition progressive.

C_g > 90 cm : Frais ; peu friable ; compact ; poreux ; couleur à l'état humide 2,5 Y 4/2 (dark grayish yellow) ; texture argilo-limoneuse ; structure massive à éclats anguleux ; collant ; plastique ; pas d'éléments grossiers ; nombreuses taches d'oxydo-réduction ocres ; pas d'éléments grossiers ; vive effervescence à l'HCl.



Photo 8.a. Fente de retrait de l'horizon de surface



Photo 8.b. Slikenside à 60 centimètre de profondeur



Photo 8.c. Profil pédologique de P 2

Résultats des analyses

Les résultats des analyses du profil P2 sont indiqués dans le tableau 6.

Profondeur (cm)		0 - 12	12 - 60	60 - 90	> 90
Horizon		Ap	Bss	Bgss	Cg
Granulométrie (%)	A	53,4	51,5	40,3	44,9
	LF	31,8	34,8	25,8	38,1
	LG	3,3	3,7	8,8	5,2
	SF	4,8	4,4	12,8	3,6
	SG	3,2	4,3	9,2	1,1
Triangle textural USDA		C	C	C	S.C
Argile fine (%)		27,5	29,7	21,2	27
(Argile fine / At) (%)		57	61	56	63
Rétention en eau (%)	Hcr pF3	44,8	37,04	32,22	29,02
	Hpf pF4,2	40,23	32,48	27,62	25,55
	RU	4,61	4,54	4,59	3,47
Bases échangeables (Cmol ⁺ . Kg ⁻¹)	Ca ⁺⁺ et Mg ⁺⁺	26,9	25,8	27	25,7
	Na ⁺	0,4	0,4	0,3	0,2
	K ⁺	0,2	0,1	0,2	0,4
S (Cmol ⁺ . Kg ⁻¹)		27,5	26,3	27,5	26,3
CEC (Cmol ⁺ . Kg ⁻¹)		27,5	26,3	27,5	26,3
V(%) = (S/CEC)×100		100	100	100	100
CaCO ₃ total (%)		8	8	14	17
pH eau, (2/5)		7,7	7,8	7,9	8
CE(dS /m).(1/5)		0,2	0,2	0,2	0,3
Matière organique (%)		4,2	2,5	1,5	1,1
Bilan ionique (még /l)	SO ₄ ²⁻	0,7	0,7	0,7	0,8
	HCO ₃ ⁻	5,5	2,4	1	0,5
	Cl ⁻	0,4	0,2	0,4	0,7
	Ca ⁺⁺	0,5	0,2	0,1	< 0,1
	Mg ⁺⁺	7,2	2,6	0,6	0,1
	Na ⁺	1,5	1,4	1,6	1,7
	K ⁺	2,5	0,9	0,2	< 0,1

Tableau 6. Résultats des analyses de P2

Discussion et classification

Ce sol se caractérise par de forts taux d'argile dans les horizons A et Bss (A % > 50) et même dans les horizons Bgss et Cg (A% > 40). Cette texture argileuse du profil explique la compacité du profil, la présence de nombreuses fentes de retrait larges (0,5 à 3 cm) et profondes (plus de 50 cm) (Photo 8.c) et la formation des nombreuses faces de glissement en B. La CEC est assez bonne (27 Cmol⁺.Kg⁻¹) et correspond bien aux taux d'argile fine (27 %). Si tel est le cas, les argiles seraient des montmorillonites. Les taux de matière organique sont assez forts en A (MO % ≈ 4) et relativement moyens en profondeur (MO % ≈ 1) ce qui témoigne d'un certain brassage dans le profil de cet élément. Ce sol se caractérise aussi par les taches d'oxydoréduction à partir de 60 cm de profondeur. Les taux de calcaire sont assez faibles dans la première partie du solum (CaCO₃ ≈ 7 %) et moyens en profondeur (CaCO₃ ≈ 14 %). Le complexe adsorbant est saturé par Ca et Mg, le pH est partout légèrement basique (7,7 < pH < 8) et la conductivité électrique est négligeable (CE < 0,3 dS/m).

Classification du profil

La classification WRB

Le profil se caractérise par la présence d'un horizon vertique situé entre 12 et 90 cm de profondeur et qui possède les critères diagnostiques suivants :

- Un taux d'argile supérieur à 30 %.
- Présence des faces de glissement.
- Une épaisseur supérieure à 25 cm.

Par ailleurs, le P 2 a un taux d'argile entre l'horizon de surface et l'horizon vertique de 53 % (> 30 %). Il se caractérise aussi par des fentes de retrait. Ce profil répond donc à la définition des Vertisols selon le système de classification WRB (FAO, 2006).

Le profil est caractérisé également par l'hydromorphie et par un complexe adsorbant saturé en bases échangeables.

De ce fait le profil est classé comme **Gleyic Vertisols eutric**.

- La classification CPCS

Classe : Vertisols.

Sous classe : à drainage externe nul ou réduit.

Groupe : à structure anguleuse sur au moins les 15cm supérieure.

Sous groupe: Hydromorphe.

- **La classification USDA**: very fine clay, thermic Aquic Haploxererts.

1.1.3. Le profil 3

Le profil se situe dans un terrain agricole en jachère depuis plusieurs années (image 4).

Données générales

- Date de description : 12/07/2011
- Localisation : Commune des Eucalyptus
- Temps : Ensoleillé.
- Géomorphologie : Relief plat (plaine).
- Drainage externe : Mauvais.
- Pente : 0%.
- Aspect de surface : Fentes de retrait (1-5 cm de large) (Photo 9.a).
- Roche mère : Alluvions anciennes.
- Coordonnées : Latitude : 36° 39' 2''; Longitude : 3° 10' 3,9''.
- Altitude : 37 m.



Image 4. Localisation de profil 3

Description morphologique

A_p 0-20 cm : Sec ; non fragile ; très compact ; nombreux pores très fins ; couleur à l'état humide 2,5 Y 4/2 (dark grayish yellow) ; argileux ; structure polyédrique angulaire grossière peu nette ; fentes de retrait très larges (jusqu'à 3 cm de largeur) ; racines peu nombreuses ; plastique ; collant ; pas d'éléments grossiers ; vive effervescence à l'HCl ; transition progressive.

B1 20-45 cm : Sec ; non fragile ; compact ; nombreux pores très fins ; couleur à l'état humide 2,5 Y 4/2 (dark grayish yellow) ; argileux ; structure polyédrique angulaire grossière nette ; racines à pénétration quelconque ; plastique ; collant ; pas d'éléments grossiers ; vive effervescence à l'HCl ; fentes de retrait de 1 à 2 mm jusqu'à 1,5 cm de largeur distantes de 15 à 30 cm ; transition progressive.

B2 45-90 cm : Sec ; non fragile ; compact ; poreux ; couleur à l'état humide 2,5 Y 4/3 (olive brown) ; argileux ; structure prismatique moyenne à grossière nette (Photo 9.c) ; quelques racines à pénétration verticale entre les peds ; plastique ; collant ; pas d'éléments grossiers ; vive effervescence à l'HCl ; fentes de retrait de 2 à 3 mm à 1 cm de largeur distantes de 20 cm environ ; transition progressive.

Bss1 90-120 cm : Sec ; non fragile ; compact ; poreux ; couleur à l'état humide 2,5 Y 5/3 (yellowish brown) ; argileux ; structure polyédrique grossière nette ; plastique ; collant ; pas d'éléments grossiers ; vive effervescence à l'HCl ; fentes de retrait de 2 à 3 mm distantes de 15 à 20 cm ; quelques faces de glissement à la base de l'horizon (Photo 9.b) ; transition progressive.

Bss2 120-130 cm : Sec ; non fragile ; compact ; pores très fins ; couleur à l'état humide 2,5 Y5/3 (yellowish brown) ; argileux ; structure prismatique très grossière très nette ; plastique ; collant ; pas d'éléments grossiers ; vive effervescence à l'HCl ; fentes de retrait

2-3 cm de large distantes de 20 cm ; nombreuses faces de glissement bien développées ; transition progressive.

C_{gss} >130 cm : Sec ; non fragile ; compact ; couleur à l'état humide 2,5 Y 5/4 (yellowish brown) ; argileux ; structure massive à éclat anguleux ; plastique ; collant ; pas d'éléments grossiers ; très forte effervescence à l'HCl ; nombreuses concrétions ferromanganiques fines ; nombreuses taches ocres ; taches blanchâtres ; présence des faces de glissement très nettes et bien développées.

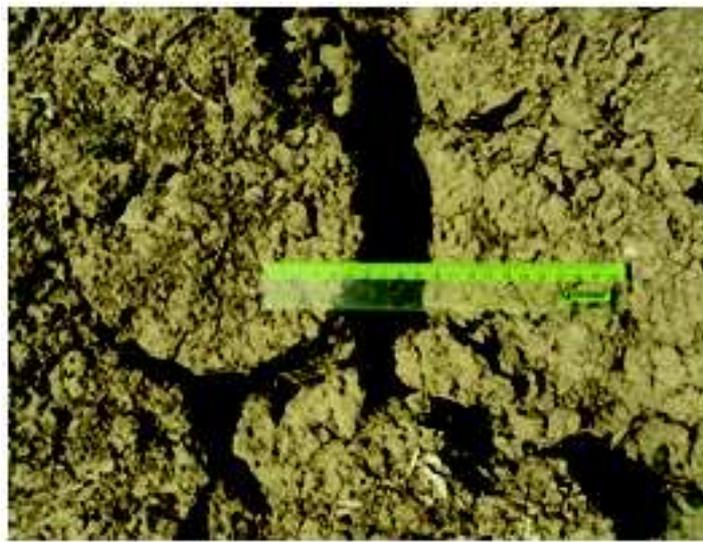


Photo 9.a. Fente de retrait en surface



Photo 9.b. Slickensides à 90 cm de profondeur

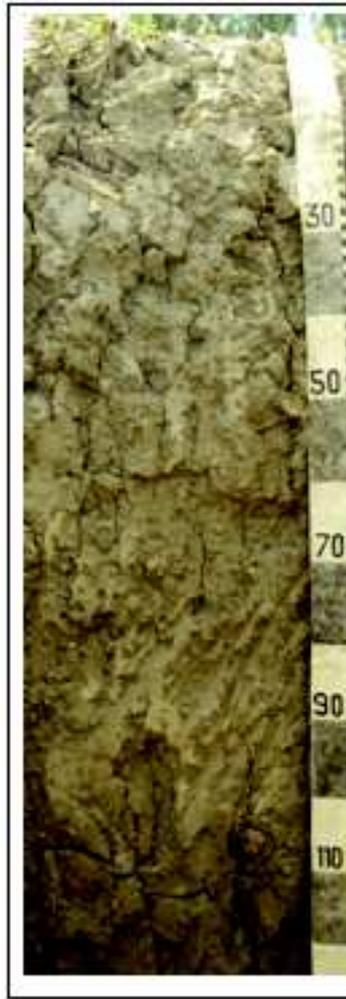


Photo 9.c. Profil pédologique de P 3

Les résultats des analyses physico-chimiques sont présentés dans le tableau 7. Il y a lieu de rappeler que les horizons Bss2 et Cgss situés à plus de 120 cm de profondeur n'ont pas fait l'objet d'analyse du fait que les échantillons préalablement prélevés l'ont été fait avec une tarière de 120 cm.

Profondeur (cm)		0 - 20	20 -45	45 - 90	90 -120	120- 130	>130
Horizon		Ap	B1	B2	Bss1	Bss2	Cgss
Granulométrie (%)	A	49,9	40,1	50,5	58,4	-	-
	LF	36,9	49,5	39,5	30,5	-	-
	LG	2,7	2,5	3,8	3,2	-	-
	SF	3,9	4,6	1,8	<1	-	-
	SG	1,3	3,3	<1	1,5	-	-
Triangle textural USDA		S.C	S. C	S. C	C	-	-
Argile fine (%)		23,5	23,5	22,5	35,5	-	-
(Argile fine / At) (%)		51	69	48	65	-	-
Rétention en eau (%)	Hcr pF3	39,7	34,9	32	33,6	-	-
	Hpf pF4,2	34,8	30,2	27,7	30,1	-	-
	RU	4,8	4,6	4,3	3,5	-	-
Bases échangeables (Cmol ⁺ . Kg ⁻¹)	Ca ⁺⁺ et Mg ⁺⁺	30,6	25,5	26,6	28,4	-	-
	Na ⁺	0,5	0,3	0,2	0,2	-	-
	K ⁺	0,5	0,4	0,3	0,4	-	-
S (Cmol ⁺ . Kg ⁻¹)		31,6	26,2	27,1	29	-	-
CEC (Cmol ⁺ . Kg ⁻¹)		31,6	26,2	27,1	29	-	-
V (%) = (S/CEC)×100		100	100	100	100	-	-
CaCO ₃ total (%)		5,2	5,2	9,5	7,4	-	-
pH eau, (2/5)		7,80	7,87	7,6	7,75	-	-
CE(dS /m),(1/5)		0,1	0,1	0,8	0,5	-	-
Matière organique (%)		2	1,8	1,2	1,8	-	-
Bilan ionique (még /l)	SO ₄ ⁻	0,7	0,7	1,5	1,4	-	-
	HCO ₃ ⁻	1,4	0,2	1,4	1,8	-	-
	Cl ⁻	0,1	0,3	0,3	0,2	-	-
	Ca ⁺⁺	0,2	0,1	0,2	0,1	-	-
	Mg ⁺⁺	1,8	0,6	2,9	2,4	-	-
	Na ⁺	0,8	0,8	1,2	1,8	-	-
	K ⁺	0,6	0,2	1	0,8	-	-

Tableau 7. Résultats des analyses de P3

Discussion et classification

Ce sol se caractérise par des teneurs assez fortes en argile avec des taux qui se situent entre 40 et 50 % dans les premiers 100 cm du profil et qui atteignent presque 60 % en profondeur. La texture dominée par les argiles explique en partie la compacité de ce sol qui se caractérise également par des fentes de retrait très larges en surface (3 cm et plus) et de plus de 1 cm dans la partie médiane du profil. Le bas du profil qui est très argileux se caractérise par la présence de nombreuses faces de glissement. Ces caractéristiques suggèrent la présence d'argile gonflante dans ce sol. Dans ce sens, on remarque que les valeurs de la CEC concordent assez bien avec les taux d'argile fine qui représentent 50 à 70 % de l'argile totale. Les taux de matière organique sont moyens en surface (MO ≈ 2,5 %) et légèrement plus faibles en profondeur (MO ≈ 1,8 %) ce qui dénote un certain brassage dans le profil des constituants de ce sol. Ce sol se caractérise également par une hydromorphie qui se manifeste à sa base par la présence de nombreuses taches ocres et par des concrétions ferro-manganique noires. Ce profil est peu calcaire

(5 % < CaCO₃ < 10 %), légèrement basique (pH ≈ 7,8) et non salé (CE < 1,73 dS/m). Le complexe adsorbant est saturé en calcium et en magnésium.

Classification du profil

- La classification WRB :

Ce profil présente un horizon vertique qui débute à partir de 90 cm de profondeur avec des propriétés diagnostiques suivantes :

- Un taux d'argile supérieur à 30 %.
- Présence des faces de glissement.
- Une épaisseur de 30 cm.

Contrairement aux deux précédents profils, ce profil est dépourvu de propriétés diagnostiques. De ce fait, on a utilisé le préfixe Haplic. L'analyse du complexe adsorbant indique qu'il est saturé en bases échangeables (eutric).

Donc le profil est classé comme : **Haplic Vertisols eutric**.

- La classification CPCS

Classe : Vertisols.

Sous classe : à drainage externe possible.

Groupe : à structure anguleuse sur au moins les 15 cm supérieure.

Sous groupe : Hydromorphe en profondeur.

- **La classification USDA**: fine clay thermic Typic Haploxerexts

Conclusion :

En conclusion, les Vertisols étudiés ont un profil de type Ap/B/Bss/Cgss, Ap/Bss/Bgss/Cg ou Ap/Bg/Bgss/Cgss. Ils se caractérisent par la présence des fentes de retrait larges qui atteignent 4 cm de largeur en surface et plus de 50 cm de profondeur. Ces sols sont caractérisés par la présence des slickensides et l'hydromorphie qui est accentuée en profondeur et traduit par la présence de taches d'oxydoréduction et par des concrétions ferro-manganiques noirâtres. Ces Vertisols sont moyennement pourvus en matière organique surtout dans l'horizon de surface (2 % en moyenne). Les analyses en laboratoire révèlent que le pH est légèrement alcalin, les taux du calcaire total varient entre 3 et 17 % et la CE est négligeable. L'analyse granulométrique indique que les taux d'argiles sont forts (50 % en moyenne), les taux d'argiles fines constituent près de 50 % des taux d'argile total. La CEC est bonne (26 Cmol⁺.kg⁻¹ en moyenne) et concorde bien avec les taux d'argiles fines. Par ailleurs, le complexe adsorbant est saturé par les alcalinoterreux. La classification des sols WRB (FAO, 2006) indique deux groupes de Vertisols références, les Haplic Vertisols eutric et les Gleyic Vertisols eutric.

1.2. Caractéristiques et propriétés physiques des profils

A ce niveau de la discussion, nous présentons les résultats de l'étude des paramètres physiques des profils. Les paramètres étudiés sont la texture, les teneurs en eau à différents pF, la densité apparente et la densité réelle, la porosité totale, les limites d'Atterberg, la conductivité hydraulique et l'indices COLE.

1.2.1. La texture

Les résultats obtenus révèlent que les teneurs en argile des sols étudiés concordent bien avec ceux des Vertisols dans le monde. En effet, Khresat et Taimeh (1998) indiquent que les Vertisols renferment généralement des taux d'argiles néoformées ou héritées compris entre 30 et 80 %.

Le Profil P1

Les résultats du profil P1 relatifs à la granulométrie sont consignés dans le tableau 8.

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart type	CV(%)
A (%)	59	52	63	3,7	6
Lf (%)	27	25	30	2,2	8
Lg (%)	3	1	5	1,6	53
Sf (%)	4	3	6	1,2	26
Sg (%)	0	0	1	0,5	66

Tableau 8. Statistiques descriptives de la granulométrie de P1

La composition granulométrique est pratiquement constante dans l'ensemble du profil. Ce résultat est conforté par les faibles valeurs du coefficient de variation, en particulier pour la fraction granulométrique la plus fine (argile et limon fin) ($6 < CV \% < 8$) qui est la plus dominante et qui représente environ 90 % du total. Cependant, le sol reste partout très argileux ($A > 50 \%$). La fraction granulométrique la plus grossière, malgré des CV assez forts, varie en réalité très peu dans le profil (figure 21), les différences entre les minima et les maxima n'étant que de quelques pourcents.

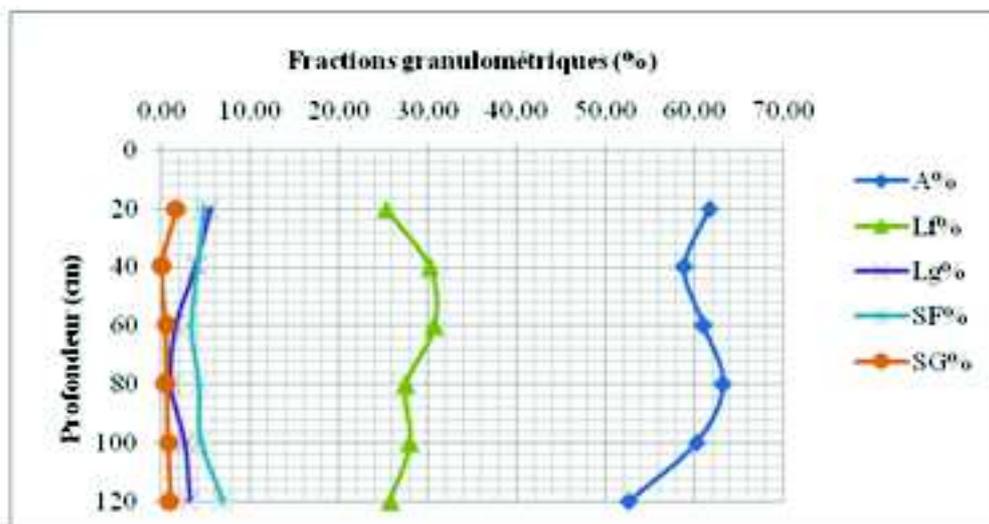


Figure 21. Répartition des fractions granulométriques dans le profil 1

Le Profil P2

Les résultats relatifs au profil P2 sont présentés dans le tableau 9.

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart type	CV(%)
A (%)	47	29	53	8,9	19
Lf (%)	31	22	38	5,7	17
Lg (%)	5	3	14	4,2	74
Sf (%)	6	3	16	4,8	70
Sg (%)	4	0	13	4,9	116

Tableau 9. Statistiques descriptives de la granulométrie de P2

Il y a lieu de noter que les résultats obtenus pour P2 sont analogues à ceux du profil P1. En effet, ce profil est dominé par la fraction fine argile et limon fin qui représente à elle seule environ 80 % de l'ensemble des fractions granulométriques (tableau 9). La seule différence réside dans le fait que les taux d'argile de ce profil diminuent subitement dans la couche 80-100 cm pour augmenter ensuite en profondeur (figure 22). De même, comme pour le profil P1, les taux des limons grossiers et des sables varient peu dans le profil même si leurs CV sont forts (figure 22).

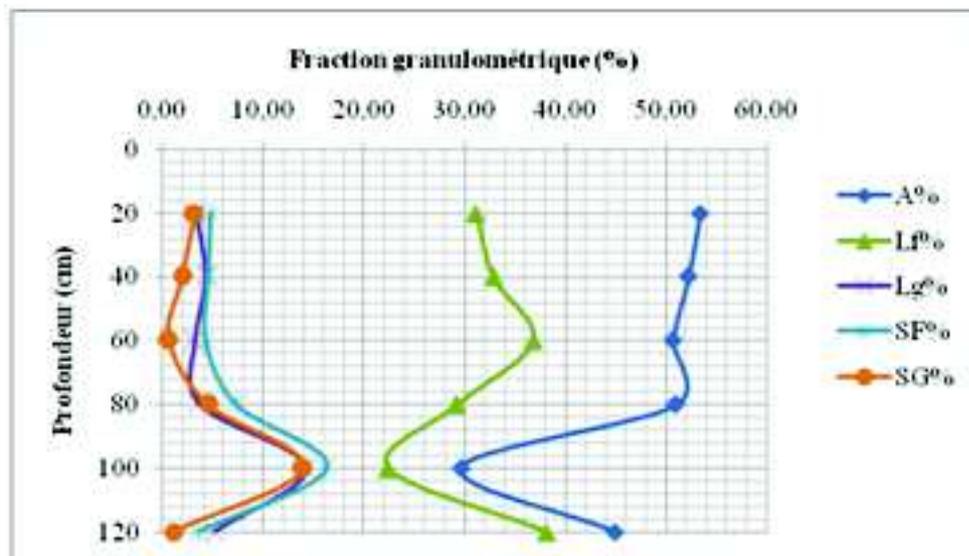


Figure 22. Répartition des fractions granulométriques dans le profil 2

Le profil P3

Le tableau 10 synthétise les statistiques descriptives des fractions granulométriques du profil P3.

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart type	CV(%)
A (%)	48	40	58	7,1	14
Lf (%)	41	30	53	7,9	19
Lg (%)	2	1	3	0,8	35
Sf (%)	2	0	7	2,6	89
Sg (%)	1	0	6	2,1	119

Tableau 10. Statistiques descriptives de la granulométrie de P3

Ce profil ne se distingue guère du profil P1. En effet, il est partout très argileux (40 % < A < 60 %), et la somme argile et limon fin représente à elle seule environ 90 % des fractions granulométriques (tableau 10). Les taux de limon grossier et de sable fin et sable

grossier sont pratiquement constants dans le profil malgré des coefficients de variation forts (figure 23).

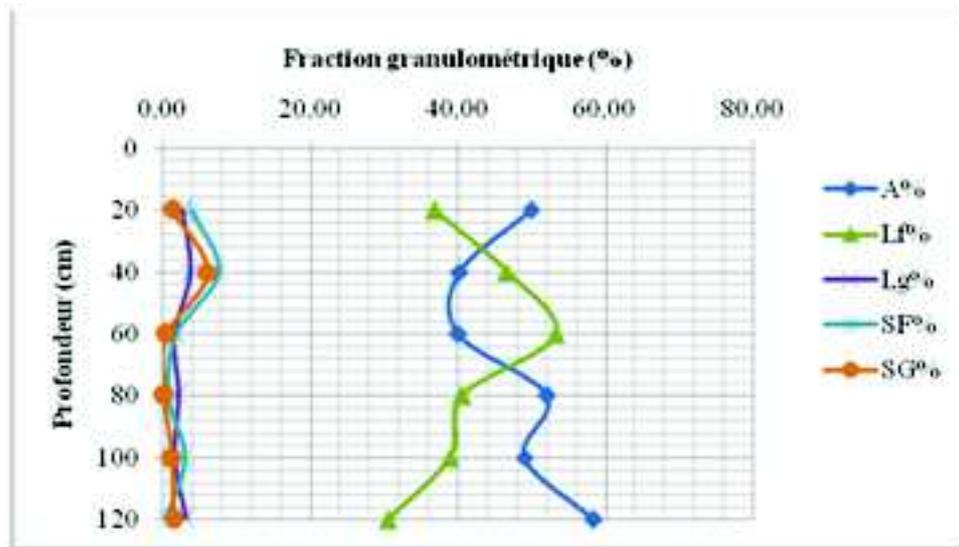


Figure 23. Répartition des fractions granulométriques dans le profil 3

1.2.2. Densité apparente, densité réelle et porosité totale

Les valeurs de la densité apparente, de la densité réelle et de la porosité totale des trois profils sont portées dans le tableau 11. Nous rappelons que ces trois paramètres n'ont été mesurés que pour les couches 0-20 cm, 20-40 cm et 40-60 cm.

Profil	Dr	Da	Pt (%)	Profil	Dr	Da	Pt (%)	Profil	Dr	Da	Pt (%)
(1)				(2)				(3)			
20 cm	2,5	1,8	28	20 cm	2,3	1,6	31	20 cm	2,3	1,6	30
40 cm	2,4	1,8	25	40 cm	2,4	1,7	27	40 cm	2,4	1,7	29
60 cm	2,4	1,8	25	60 cm	2,4	1,7	26	60 cm	2,4	1,7	30

Tableau 11. Densité réelle, densité apparente et porosité totale des profils

L'analyse statistique des résultats consignés dans le tableau 11 est présentée dans le tableau 12.

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart type	CV(%)
Da	1,7	1,6	1,8	0,07	3
Dr	2,4	2,3	2,5	0,1	4
Pt (%)	28	25	31	3,4	12

Tableau 12. Statistiques descriptives de la Da, Dr et de la porosité

Les résultats montrent que la densité apparente est partout forte ($1,6 < Da < 1,8$) et que la densité réelle est moyenne ($2,3 < Dr < 2,5$). Ce résultat signifie que les sols étudiés sont plutôt tassés ce qui explique leur faible porosité ($25 \% < Pt < 31 \%$) malgré leur texture très argileuse. Il y a lieu de mentionner que le profil P1 est plus tassé que les profils P2

et P3 (figure 24). De même, le profil P 1 se distingue par le fait que sa densité apparente est pratiquement constante dans les trois couches de sol étudiées à l'inverse des deux autres profils qui semblent mieux structurés et plus poreux en surface. Cependant, les CV de ces paramètres sont très faibles (tableau 12) ce qui suggère que ces indicateurs sont homogènes dans les 60 premiers centimètres du profil.

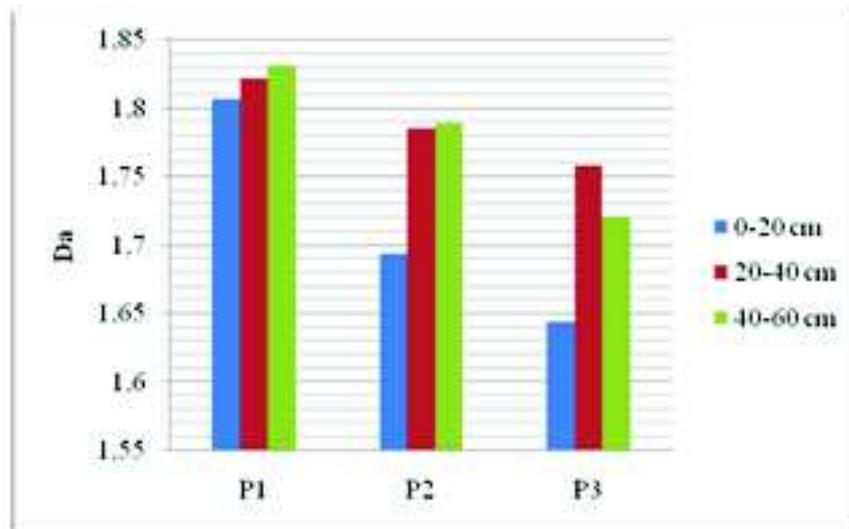


Figure 24. Variation de la densité apparente dans les P1, P2 et P3

1.2.3. La conductivité hydraulique

Les valeurs de la conductivité hydraulique des profils P1, P2 et P3 sont présentées dans le tableau 13. Nous rappelons que ce paramètre n'a été mesuré que pour les horizons de surface et sur des échantillons remaniés.

Profils	K (cm/h)	Classement de la vitesse de filtration selon Mathieu et Pieltain (1998)
P1	1,1	Assez lente
P2	1,2	Assez lente
P3	1,3	Assez lente

Tableau 13. Valeurs de la conductivité hydraulique de P1, P2 et P3

Le tableau 13 indique que la conductivité hydraulique varie entre 1,1 et 1,3 cm/h ce qui la place dans la catégorie « assez lente » selon les normes citées par Mathieu et Pieltain (1998). Ce résultat peut être expliqué par les fortes teneurs en argile de ces sols qui limitent la circulation de l'eau dans le sol, surtout si les argiles sont gonflantes comme c'est le cas des sols étudiés.

1.2.4. Teneur en eau à différents potentiels

Les teneurs pondérales en eau aux différents potentiels sont mentionnées dans les tableaux 1, 2 et 3 de l'annexe 1. Nous avons mesuré pour chaque couche du sol les teneurs en eau à différents potentiels entre l'état de saturation et le point de flétrissement. Ceci nous permettra d'une part d'évaluer les teneurs en eau à différents potentiels et, d'autre part,

de construire les courbes $pF = f(H \%)$. Nous présenterons successivement les données du profil P1, puis celles de P2 et, en fin, celles du P3.

- Le Profil P1

Les résultats relatifs au profil P1 sont indiqués dans le tableau 14.

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart type	CV(%)
H(%) pF 0	86	79	101	7,9	9
H(%) pF 1.9	45	41	50	3,2	7
H(%) pF 2.5	42	39	48	3,0	7
H(%) pF 3	38	35	43	2,6	6
H(%) pF 3.5	37	33	41	2,9	7
H(%) pF4.2	33	29	37	2,9	8

Tableau 14. Statistiques descriptives des teneurs en eau à différents potentiels de P1

L'observation du tableau 14 suggère deux remarques principales :

- Quel que soit le pF considéré, les teneurs en eau sont fortes et varient très peu dans le profil. Ce résultat est confirmé par les coefficients de variation qui sont tous faibles ($CV < 9 \%$). Ceci serait en relation avec les fortes teneurs en argile qui, elles aussi, sont homogènes dans le profil.
- Les teneurs moyennes décroissent brutalement entre le pF0 et le pF1,9 puis diminuent très progressivement jusqu'au pF4,2. Ce résultat signifie qu'il existe deux types de porosité dans ce genre de sol. Il y a, d'une part des pores qui se vident très rapidement et qui sont très sensibles à la variation du pF. Ce type de porosité serait constitué de macropores qui se vident très rapidement quand on passe du pF0 au pF1,9. Par la suite, la vidange devient très progressive et très peu sensible aux variations des potentiels quand on passe progressivement du pF1,9 au pF4,2 en passant par les pF2,5, pF3 et pF3,5 et ce quelle que soit la couche de sol considérée comme le montre la figure 25. Ceci signifie que cette porosité qui se vide très lentement et difficilement serait constituée surtout de micropores. Les forts taux d'argiles de ce sol et sa densité apparente qui est également assez élevée confortent cette hypothèse.

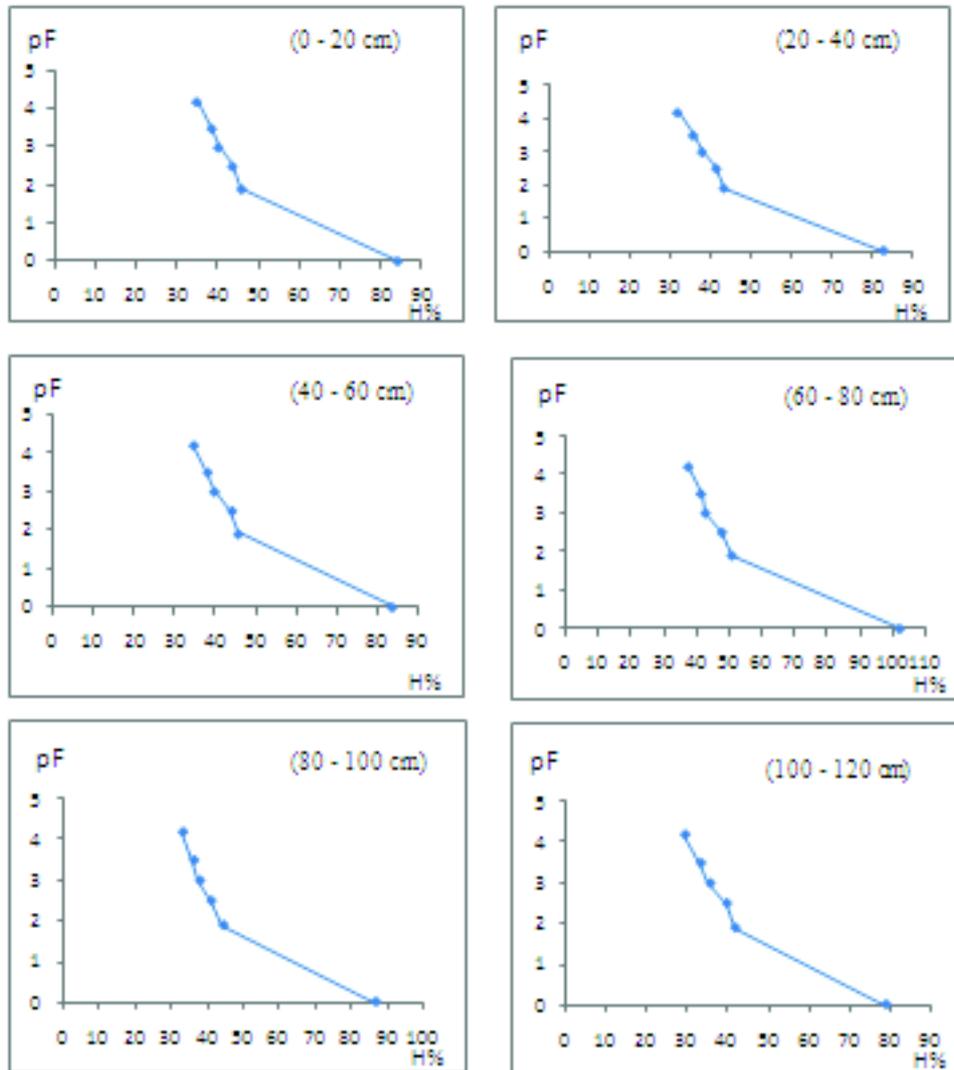


Figure 25. Courbe pF en fonction des taux d'humidité de P 1

Les profils P 2 et P 3

Les profils P 2 (tableau 15, figure 26) et surtout P 3 (tableau 16, figure 27) se comportent, à quelques détails près, exactement de la même manière que le profil P1 et suggèrent donc les mêmes remarques et conclusions. En effet, les teneurs en eau sont toutes très élevées quel que soit le potentiel considéré et sont constantes dans le profil. On remarque une vidange très rapide entre le pF0 (H% environ 80 %) et le pF1,9 (H% environ 40 %) qui se stabilise ensuite et qui devient nettement moins importante quand on passe progressivement aux pF2,5, pF3 et pF4,2.

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart type	CV(%)
H(%) pF 0	76	57	90	11,5	15
H(%) pF 1.9	41	30	50	7,0	17
H(%) pF 2.5	39	28	48	7,1	18
H(%) pF 3	35	25	44	6,9	19
H(%) pF 3.5	33	24	43	6,8	20
H(%) pF4.2	31	21	40	6,6	21

Tableau 15. Statistiques descriptives des teneurs en eau à différents potentiels de P2

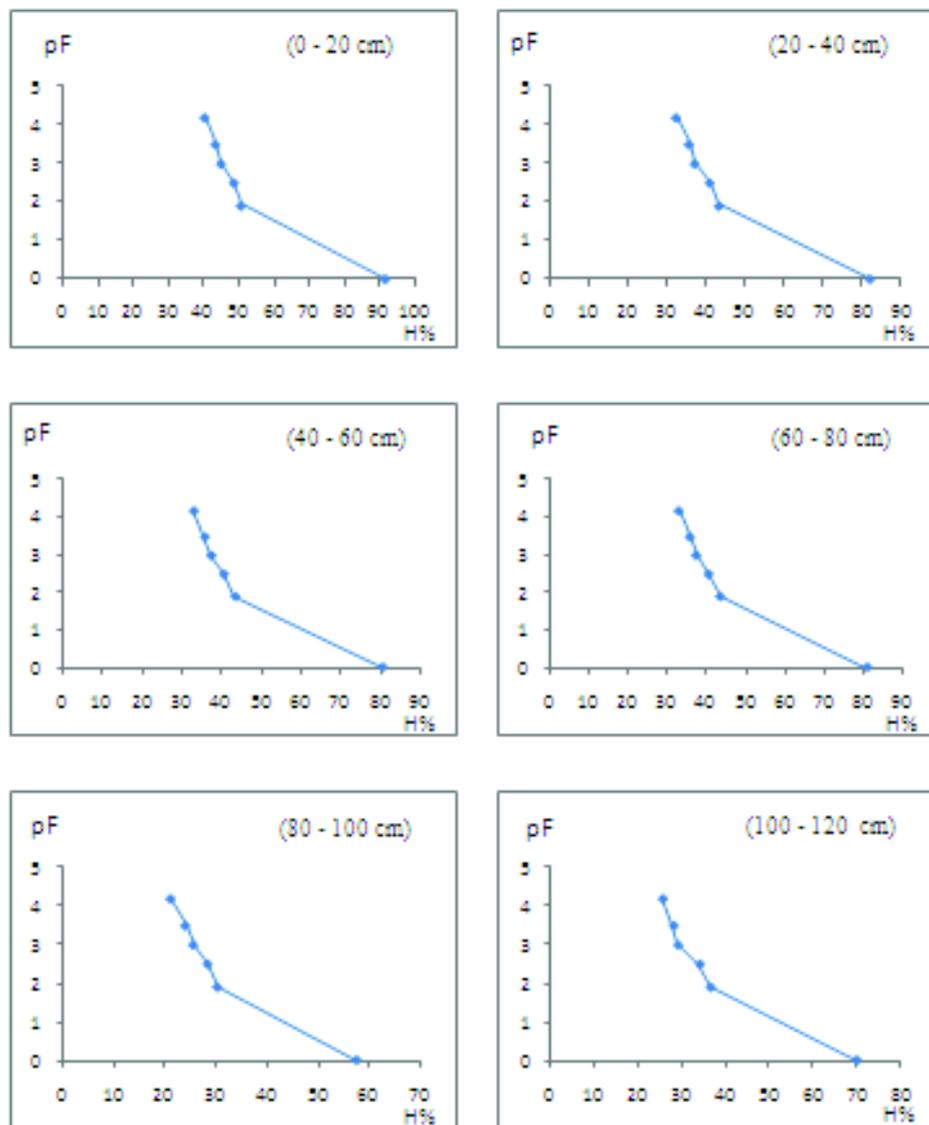


Figure 26. Courbes pF en fonction des taux d'humidité de P2

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart type	CV(%)
H(%) pF 0	84	74	101	9,3	11
H(%) pF 1.9	43	41	48	2,6	6
H(%) pF 2.5	38	34	44	3,5	9
H(%) pF 3	34	31	39	2,9	8
H(%) pF 3.5	33	29	37	2,7	8
H(%) pF 4.2	30	27	34	2,6	8

Tableau 16. Statistiques descriptives des teneurs en eau à différents potentiels de P3

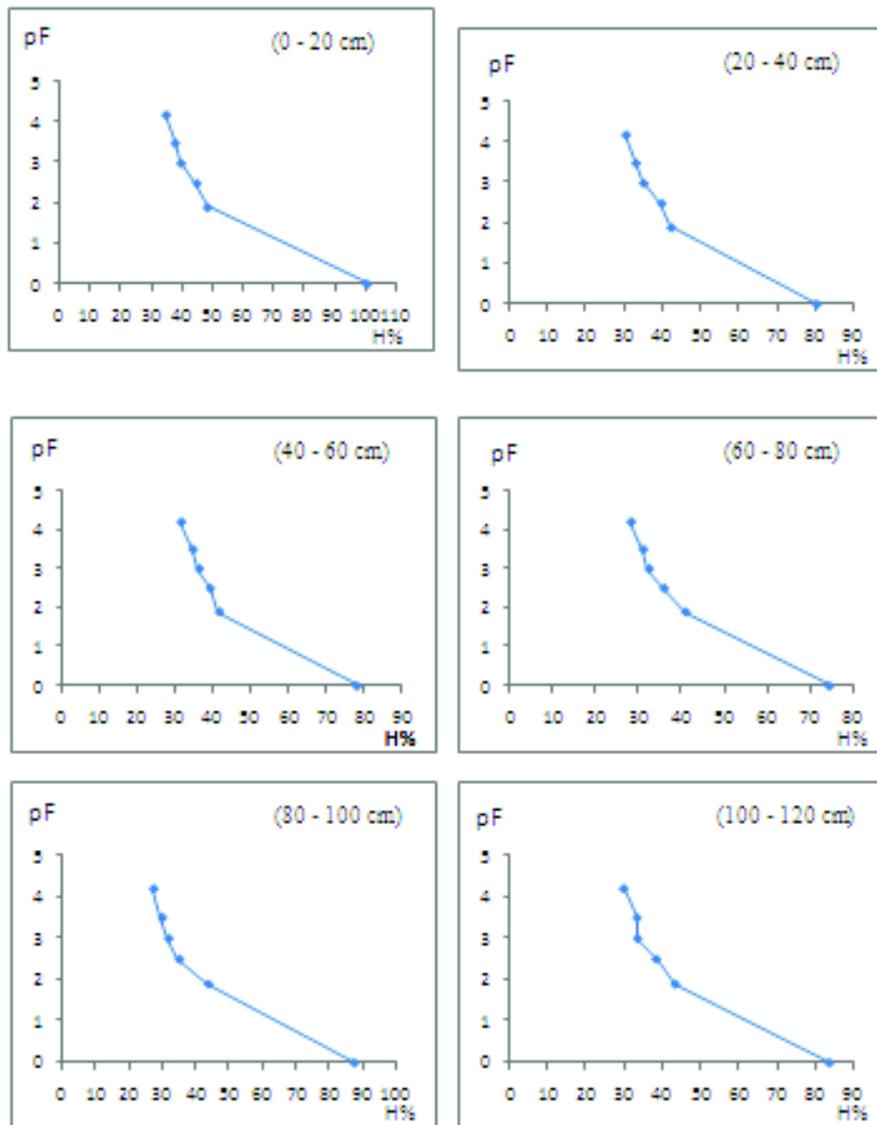


Figure 27. Courbes pF en fonction des taux d'humidité de P3

1.2.5. Les limites et indice d'Atterberg

Les données des teneurs en eau des limites d'Atterberg et d'indice de plasticité des profils P1, P2 et P3 sont présentés dans le tableau 17.

Profils		LL (%)	LP(%)	IP(%)	Classement de Brumister	Selon l'échelle (Kheyar, 1986)
P1	20 cm	58	28	29	Plasticité	Elevée
	40 cm	61	29	31	Plasticité	Elevée
	60 cm	70	28	42	Plasticité	Elevée
	80 cm	65	36	29	Plasticité	Elevée
	100 cm	60	22	37	Plasticité	Elevée
	120 cm	60	22	38	Plasticité	Elevée
P2	20 cm	50	29	21	Plasticité	Elevée
	40 cm	50	30	20	Plasticité	Elevée
	60 cm	53	24	28	Plasticité	Elevée
	80 cm	47	26	20	Plasticité	Elevée
	100 cm	33	18	14	Plasticité	moyenne
	120 cm	37	20	16	Plasticité	moyenne
P3	20 cm	47	27	20	Plasticité	moyenne
	40 cm	46	24	46	Plasticité très	Elevée
	60 cm	46	26	19	Plasticité	moyenne
	80 cm	50	21	28	Plasticité	Elevée
	100 cm	50	22	27	Plasticité	Elevée
	120 cm	47	27	19	Plasticité	moyenne

Tableau 17. Les limites et indice d'Atterberg des profils P1, P2 et P3

L'observation du tableau 17 révèle que les sols étudiés sont pourvus d'une plasticité moyenne à très élevée. En effet, les indices de plasticité (IP %) sont tous compris entre 14 et 46 %. Ce résultat concorde bien avec la texture et la description morphologique de ces sols. En ce qui concerne les teneurs en eau aux limites de liquidité (LL %) et de plasticité (LP %), les résultats (tableau 18) indiquent que ces paramètres varient très peu dans un même profil (CV < 20 %) et même entre les profils où les moyennes de LL se situent entre 48 et 62 % et de LP entre 25 et 27 %.

		Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart type	CV(%)
P1	LL(%)	62	58	70	4,5	7
	LP (%)	27	22	36	5,2	18
P2	LL(%)	52	33	70	9,3	17
	LP (%)	26	18	36	4,2	16
P3	LL(%)	48	46	50	1,9	4
	LP (%)	25	22	27	2,4	9

Tableau 18. Variation des limites d'Atterberg des profils étudiés

Ces résultats sont bien illustrés par les figures 28 et 29 qui montrent que LL et LP sont relativement homogènes dans le profil et entre profils. Cependant, la figure 28 montre aussi que les LL du profil P 1 sont très légèrement plus fortes que celles de P 2 et P 3.

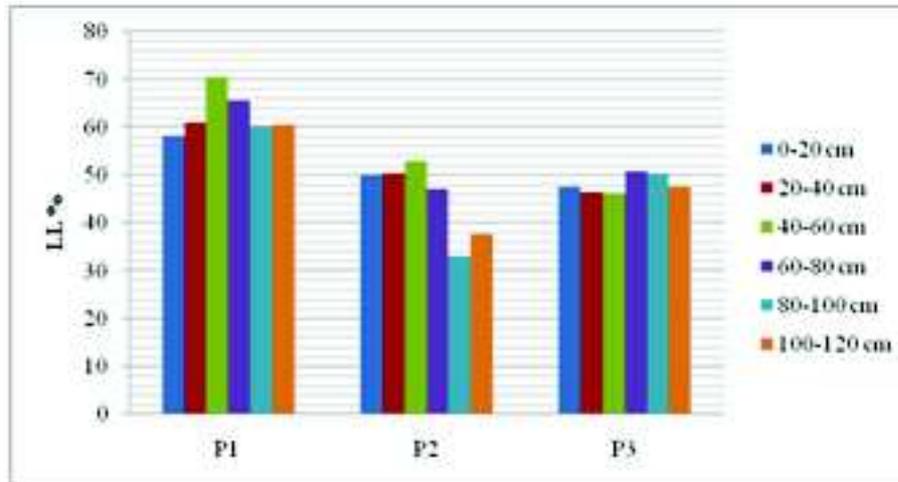


Figure 28. Les limites de liquidité des profils étudiés

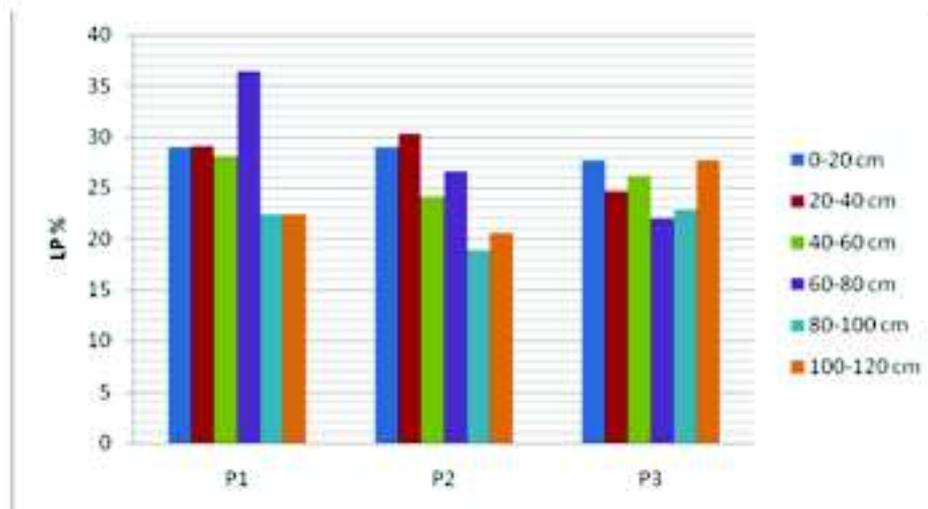


Figure 29. Les limites de plasticité des profils P1, P2 et P3

1.2.6. Le coefficient d'extensibilité linéaire (COLE)

Les résultats relatifs au coefficient COLE des trois premières couches de surface sont reportés dans le tableau 19.

Profils		COLE	Classes de gonflement retrait selon National Soil Survey Laboratory (Thomas et al., 2000)
P1	20 cm	0,3	Très élevée
	40 cm	0,28	Très élevée
	60 cm	0,31	Très élevée
P2	20 cm	0,45	Très élevée
	40 cm	0,38	Très élevée
	60 cm	0,37	Très élevée
P3	20 cm	0,48	Très élevée
	40 cm	0,41	Très élevée
	60 cm	0,39	Très élevée

Tableau 19. Résultats du coefficient COLE des profils étudiés

Le tableau 19 révèle que les valeurs du coefficient COLE sont peu variables ($0,28 < \text{COLE} < 0,48$) et qu'elles placent les sols étudiés dans la classe de « gonflement-retrait » très élevée (National Soil Survey Laboratory, 1997 in Thomas et al., 2000). Ce résultat concorde bien avec les caractéristiques morphologiques et analytiques des sols étudiés. En effet, P1, P2 et P3 se caractérisent tous par la présence de fentes de retrait très larges et par la présence de slickensides en profondeur. De même, ces sols sont très argileux et seraient constitués d'argiles gonflantes type smectites du fait que la CEC de ces sols coïncide avec les taux d'argile fine pour ce type d'argile ($\text{CEC} \approx 100 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1} \text{ argile}$).

Conclusion

En conclusion, les résultats ont montré que les Vertisols étudiés sont très argileux. La densité apparente est très élevée ($1,6 < d_a < 1,8$). Ces sols sont caractérisés par une faible conductivité hydraulique ($1,1 < K_{cm} < 1,3$). Ils sont caractérisés également par une plasticité moyenne à élevée ($14 \% < \text{IP} \% < 46\%$). Par ailleurs, l'indice COLE est très fort et indique que les sols étudiés ont une capacité de gonflement-retrait très élevée ($0,28 < \text{COLE} < 0,48$).

1.3.Analyse du complexe argilo-humique

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats des analyses des deux principales fractions qui constituent le complexe adsorbant, à savoir l'argile et la matière organique. En ce qui concerne la fraction argileuse dans le sens granulométrique du terme, nous présentons ses teneurs totale ($\emptyset < 2 \mu\text{m}$), grossière ($0,2 \mu\text{m} < \emptyset < 2 \mu\text{m}$) et fine ($\emptyset < 0,2 \mu\text{m}$) dans la fraction fine du sol ainsi que les teneurs de MO, CaCO_3 et de la CEC qui leurs sont associées. En ce qui concerne la matière organique totale (MOt), nous présentons les résultats de son fractionnement en MO fraîche, humine, acides fulviques et acides humiques. Pour chaque profil, nous effectuons une description statistique des données et, ensuite, nous discutons la variation des paramètres étudiés dans le profil.

1.3.1. Le profil P1

L'analyse statistique des données est présentée dans le tableau 20.

Tableau 20. Statistiques descriptives des paramètres étudiés de P1

Paramètre	Moyenne	Minimum	Maximum	Ec-Type	CV%
At %	59	52	63	3,71	6
Af %	26	24	29	1,70	6
Ag %	33	26	37	4, 3	13
CaCO ₃ t %	4,2	2,6	5,7	1,27	30
CaCO ₃ Ag %	2,2	1,17	4,53	1,24	55
CaCO ₃ Ag %/100g sol	0,76	0,36	1,62	0,46	60
CECt (Cmol ⁺ .kg ⁻¹)	28,56	27,53	29,50	0,84	2,94
CEC Af (Cmol ⁺ .kg ⁻¹)	131	125	145	7,64	6
CEC Ag (Cmol ⁺ .kg ⁻¹)	113	103	120	6,25	5
MOt %	2,64	1,66	3,95	0,81	31
MO FF %	1,9	1,6	2,4	0,28	15
MO FG %	2,2	1,6	2,5	0,35	16
MO Af %/100g sol	0,50	0,42	0,60	0,07	14,13
MO Ag %/100g sol	0,74	0,43	0,94	0,19	25,08
HUMINE ‰	25,6	13,0	35,80	11,59	45
AH ‰	1,8	1,4	2,1	0,38	22
AFT ‰	3,8	2,2	4,8	1,43	37
AFL ‰	3,4	1,7	4,4	1,46	43

Distribution des fractions argileuses dans le profil

Le profil P1 se caractérise par de très forts taux d'argile (At = 59 % en moyenne) compris entre 52 et 63 %. Ce résultat signifie que ce profil est partout argileux et que ce paramètre varie très peu dans le profil (CV = 6 %) comme le montre la figure 30. Les taux de l'argile fine Af constituent en moyenne 45 % de la fraction argileuse totale. De ce fait, on peut dire que Af et Ag se partagent équitablement les taux d'argile de ce profil avec une très légère prédominance de Ag sur Af. La figure 30 montre également que la distribution dans le profil de Ag est similaire à celle de At (argile totale). En revanche, la diminution des taux de Ag dans le profil s'accompagnent d'une augmentation des taux de Af, résultat tout à fait logique, la somme des deux ne pouvant dépasser 100 % de At.

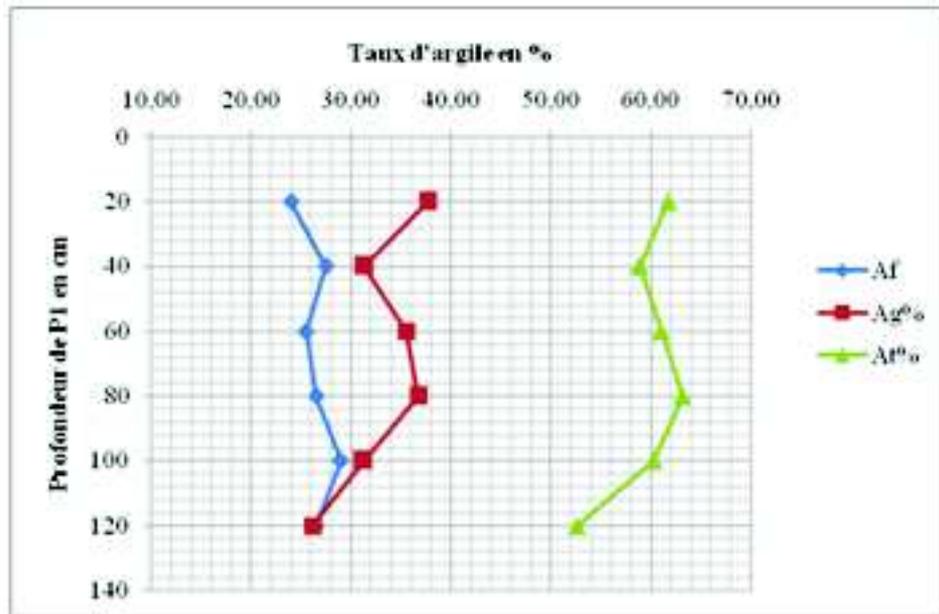


Figure 30. Distribution des taux d'argile dans le profil P1

Distribution de la fraction organique dans P1

Les taux de MO totale sont assez appréciables par rapport à ce type de sol. En effet, avec une teneur moyenne de 2,6 % dans le sol, les taux de MOt varient de 1,6 % à la base du profil à environ 4 % à sa surface (tableau 20). Les résultats montrent aussi que les taux de matière organique liée à l'argile varient entre 0,4 et 0,6 % pour Af et entre 0,4 et 0,9 pour Ag. Il est intéressant de noter que la MO liée à l'argile représente environ 40 % de la fraction organique totale du sol dans la couche 0-40 cm et entre 50 et 60 % dans les couches de profondeur. Ce résultat est bien illustré par la figure 31.

Le reste de la matière organique (entre 50 % en profondeur et 60 % en surface) n'entre pas dans la constitution du complexe argilo-humique. Par ailleurs, la figure 31 montre aussi que la MO liée à l'argile est homogène dans le profil avec un très léger avantage de la MO liée à Ag par rapport à celle liée à Af.

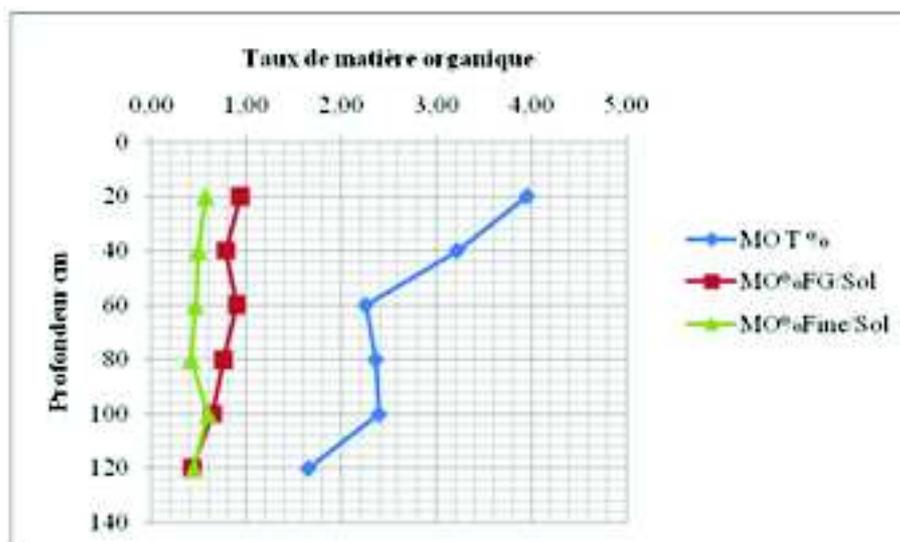


Figure 31. Distribution des taux de MO dans le profil P1

Le fractionnement de la matière organique totale en acides fulviques totaux (AFT) et liés (AFL), en acide humiques (AH) et en humines révèle que cette dernière se distribue dans le profil d'une façon analogue à celle de la MOt (figure 32) avec des teneurs relativement fortes qui varient entre 13 et 35 ‰ (tableau 20). Les teneurs en AFT, AFL et AH sont relativement faibles (< 5 ‰) et sont homogènes dans le profil. La figure 32 révèle que la distribution des AH se fait d'une façon inverse par rapport à celle des AF.

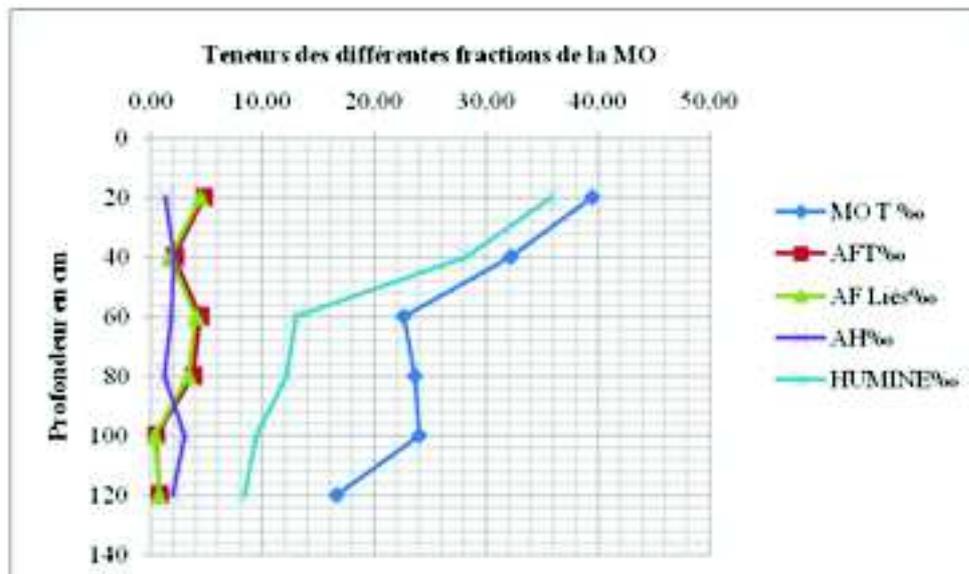


Figure 32. Distribution des taux de MOt, AFT, AFL, AH et de l'Humine dans le profil P1

Distribution de la CEC dans P1

Les valeurs de la CECt sont homogènes dans le profil ($27 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1} < \text{CECt} < 29 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$) comme l'indiquent le tableau 20 et la figure 33. Ce résultat ne traduit pas convenablement la CEC de l'argile de ce type de sol et semble sous estimer ses valeurs. Cependant, la détermination de la CEC des Af ($125 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1} < \text{CEC} < 145 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$) et des Ag ($110 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1} < \text{CEC} < 120 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$) montre que ces argiles sont constituées essentiellement de smectites gonflantes. La figure 33 montre aussi que la CEC des Af et Ag est constante dans le profil avec un léger avantage de la CEC des Af sur celle des Ag.

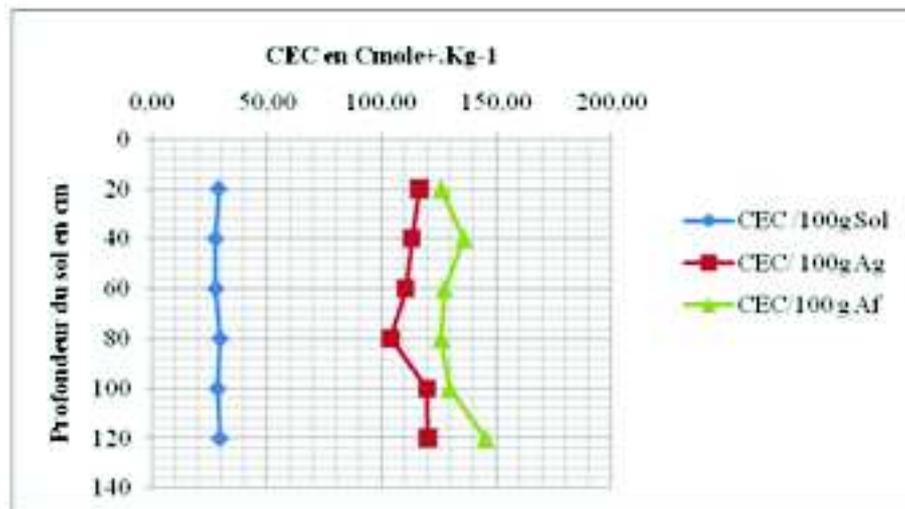


Figure 33. Distribution des taux de CEC dans le profil P1

Distribution des taux de calcaire dans P1

D'une façon globale, les taux de calcaire dans le profil sont faibles ($2 < \text{CaCO}_3\% < 5$) (tableau 20) et concordent avec les teneurs de la majorité des Vertisols. La figure 34 montre que les horizons médians sont légèrement mieux pourvus en calcaire que les horizons de surface et de profondeur.

Les résultats (tableau 20) révèlent aussi que les argiles fines sont complètement dépourvues de calcaire ($\text{CaCO}_3 = 0\%$) et que les teneurs en cet élément qui sont liées aux argiles grossières sont extrêmement faibles ($0,3\% < \text{CaCO}_3\% < 1,6\%$). Ce résultat signifie que le carbonate de calcium de ce sol serait plutôt lié aux fractions limoneuses et sableuses.

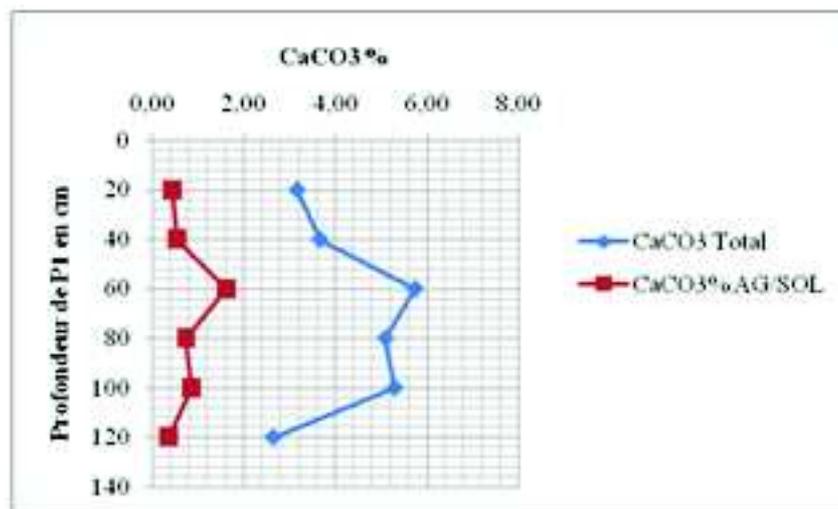


Figure 34. Distribution des taux de calcaire dans le profil P1

Au total, le profil P1 se caractérise par de très forts taux d'argile dont la moitié environ est constituée d'argile fine (Af). P1 est relativement riche en MOt dont la moitié est liée à la fraction argileuse. Les humines représentent la plus forte proportion de cette MOt. Les taux de calcaire sont faibles et l'argile serait de type smectite gonflante.

1.3.2. Le profil P2

L'analyse statistique des données du profil P2 est présentée dans le tableau 21.

Tableau 21. Analyse statistique des différents paramètres du profil P2

Paramètre	Moyenne	Minimum	Maximum	Ec-Type	CV%
At %	47	29	53	8,97	19
Af %	26	17	30	4,83	18
Ag %	21	13	26	4,96	24
CaCO ₃ t %	11,44	7,52	17,59	4,84	42
CaCO ₃ Ag %	3,92	1,16	7,92	2,68	68
CaCO ₃ Ag %/100g sol	0,74	0,25	1,42	0,39	53
CECt (Cmol ⁺ /kg)	27	25	29	1,33	5
CEC Af (Cmol ⁺ /kg)	77	63	93	12,90	17
CEC Ag (Cmol ⁺ /kg)	40	31	46	5,49	14
MOT %	2,26	1,13	4,20	1,21	54
MO FF %	1,79	1,19	3,17	0,72	40
MO FG %	1,69	0,79	2,75	0,70	41
MO Af %/100g sol	0,47	0,26	0,87	0,22	45
MO Ag %/100g sol	0,37	0,14	0,71	0,21	57
HUMINE ‰	11,89	6,63	18,66	4,28	36
AH ‰	0,95	0,75	1,13	0,13	14
AFT ‰	3,79	2,48	5,48	1,17	31
AFL ‰	3,82	2,17	5,4	1,61	42

Distribution des fractions argileuses dans P2

Le profil P 2 se caractérise par de très forts taux d'argile (At = 47 % en moyenne) compris entre 30 et 53 %. Ce résultat signifie que ce profil est partout argileux même si ce paramètre varie plus ou moins dans le profil (CV = 19 %) comme le montre la figure 35. En effet, cette figure montre que les taux d'argile sont forts et constants jusqu'à une profondeur de 80 cm à partir de laquelle ils chutent brusquement (A% = 30 %) pour reprendre légèrement par la suite.

Les taux de l'argile fine Af constituent en moyenne 55 % de la fraction argileuse totale. De ce fait, on peut dire que Af et Ag se partagent équitablement les taux d'argile de ce profil mais contrairement au profil P1 avec une légère prédominance de Af sur Ag. La figure 35 montre également que la distribution dans le profil d'Af est similaire à celle d'At (argile totale). Comme pour P1, la diminution des taux d'Af dans le profil s'accompagnent d'une augmentation des taux d'Ag, la somme des deux ne pouvant dépasser 100 % d'At.

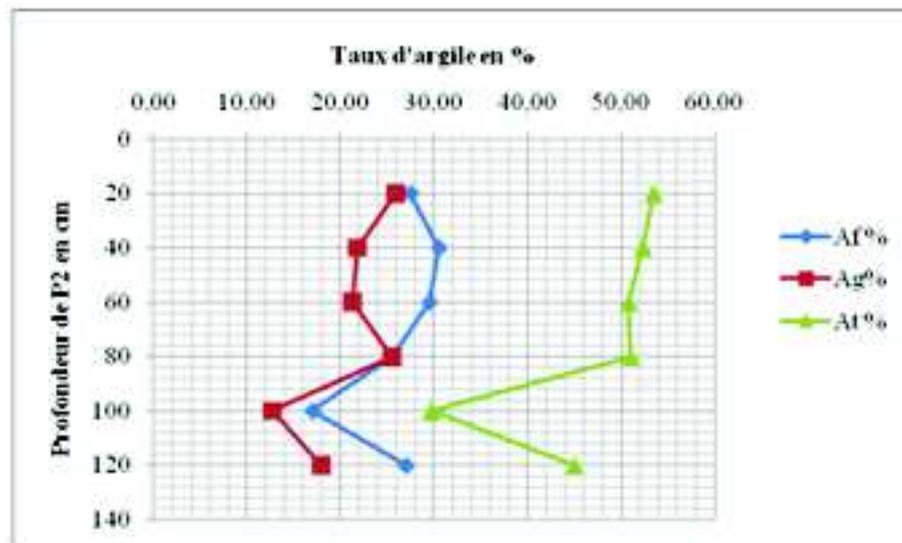


Figure 35. Distribution des taux d'argile dans P 2

Distribution de la fraction organique dans P2

Le profil renferme des teneurs en matière organiques légèrement élevées en comparaison avec ce type de sol. L'activité culturale (décomposition des racines ; apport de matière organique) paraît être à l'origine de cet enrichissement en matière organique. Quantitativement, les valeurs de MOt sont comprises entre 1,13 % à la base du profil et 4,2 % en surface, avec une teneur moyenne de 2,26 % (tableau 21 ; figure 36). Les résultats montrent également que les taux de matière organique liée à l'argile varient entre 0,3 et 0,9 % pour Af et entre 0,4 et 0,7 % pour Ag. Par ailleurs, la figure 36 révèle que la MO liée à l'argile représente environ 35 % de la fraction organique totale du sol dans la couche 0-40 cm et entre 40 et 50 % dans les couches de profondeur sauf dans la couche 80-100 cm où elle n'est que de 32 %. Le reste de la matière organique (entre 50 % en profondeur et 65 % en surface et dans la couche 80-100 cm) n'entre pas dans la constitution du complexe argilo-humique. De même, la figure 36 montre aussi que la MO liée à l'argile est homogène dans le profil avec un très léger avantage de la MO liée à Af par rapport à celle liée à Ag

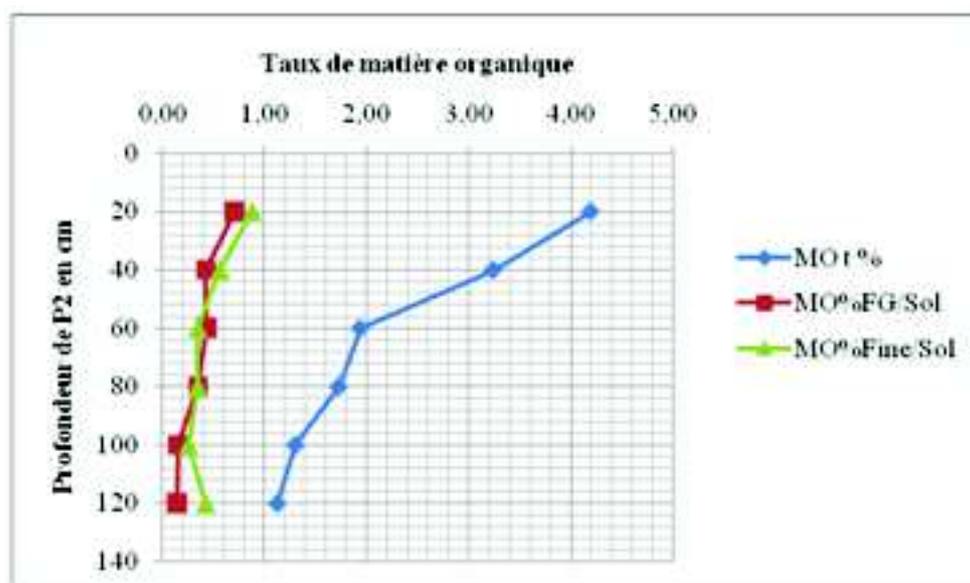


Figure 36. Distribution des taux de MO dans le profil P 2

Le fractionnement de la matière organique totale en acides fulviques totaux (AFT) et liés (AFL), en acides humiques (AH) et en humines révèle que cette dernière se distribue dans le profil d'une façon analogue à celle de la MOt (figure 37) avec des teneurs relativement fortes qui varient entre 6,63 et 18,66 ‰ (tableau 21). Les teneurs en AFT, AFL et AH sont relativement faibles (< 5 ‰) et sont homogènes dans le profil. La figure 37 révèle que la distribution des AH est plus ou moins constante dans le profil.

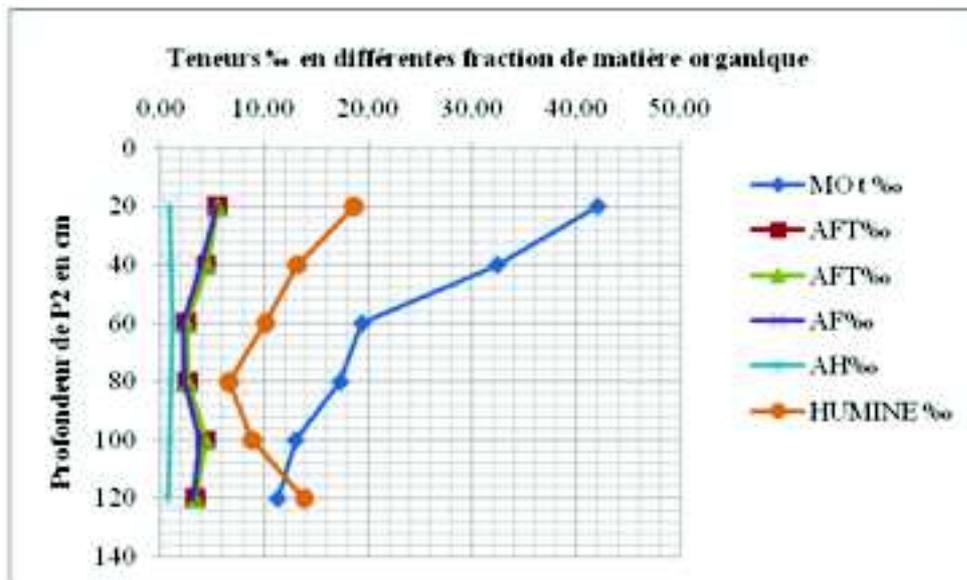


Figure 37. Distribution des taux de MOt, AFT, AFL, AH et de l'Humine dans le profil P 2

Distribution de la CEC dans P2

Les valeurs de la CECt sont homogènes dans le profil ($25 \text{Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1} < \text{CECt} < 29 \text{Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$) comme l'indiquent le tableau 21 et la figure 38. Ce résultat ne traduit pas convenablement la CEC de l'argile de ce type de sol et semble sous-estimer ses valeurs. La détermination de la CEC des Af ($63 \text{Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1} < \text{CECAf} < 93 \text{Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$) et des Ag ($31 \text{Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1} < \text{CECAg} < 46 \text{Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$) signifierait qu'une partie des argiles fines Af seraient des argiles gonflantes type smectite et qu'une autre partie serait des interstratifiées de type illite-smectite alors que les argiles grossière Ag seraient des interstratifiées type illite-smectite. La figure 38 montre aussi que la CEC des Ag est constante dans le profil. La CEC des Af est au maximum dans la couche 0-40 cm puis elle diminue jusqu'à 60 cm ($\text{CECAf} = 62,92 \text{Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$), niveau à partir duquel elle augmente vers la profondeur jusqu'à 100 cm pour chuter encore légèrement par la suite. La CEC de Ag est constante dans le profil et elle est nettement plus faible que celle de Af. Ce résultat pourrait signifier que les argiles de Ag seraient des illites, mais il peut signifier aussi qu'une partie de Ag serait constituée d'éléments dépourvus de charges d'échange (calcaire, silice microdivisée...).

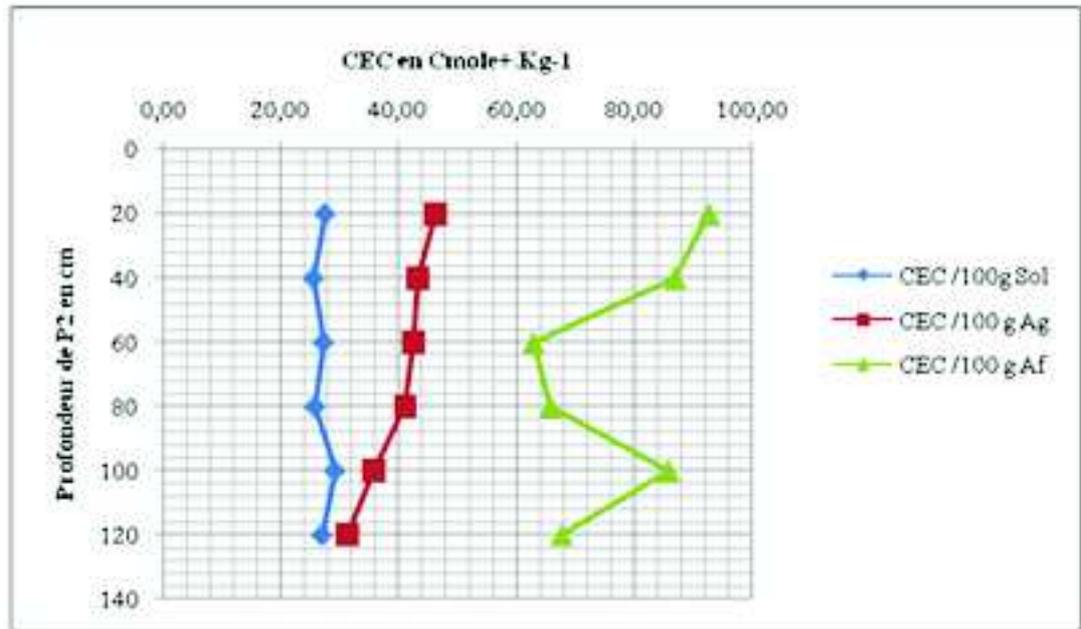


Figure 38. Distribution des taux de CEC dans P 2

Distribution des taux de calcaire dans P2

Globalement, les taux de calcaire dans le profil sont assez élevés ($7 < \text{CaCO}_3\text{t} \% < 18$) (tableau 21) et ne concordent pas bien avec ceux de la majorité des Vertisols et qui sont faibles. La figure 39 montre que les horizons de profondeur sont mieux pourvus en calcaire (17 %) que ceux de surface (8 %).

Les résultats (tableau 21) révèlent aussi que les argiles fines sont dépourvues complètement de calcaire ($\text{CaCO}_3\text{Af} = 0\%$) et que les teneurs en cet élément qui sont liées aux argiles grossières sont extrêmement faibles ($0,25\% < \text{CaCO}_3\text{Ag} < 1,42\%$). Comme pour P1 ce résultat signifie que le carbonate de calcium du profil P2 serait lié aux fractions limoneuses et sableuses.

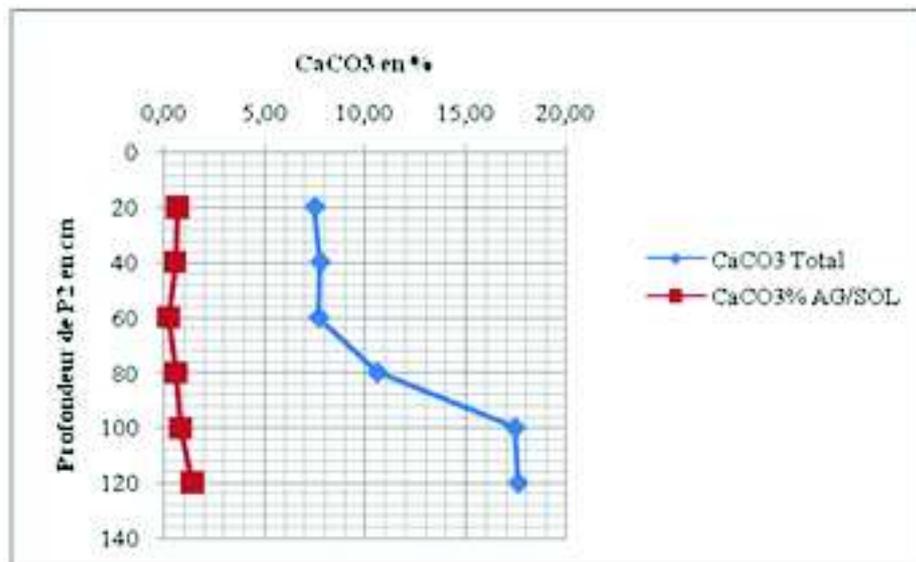


Figure 39. Distribution des taux de calcaire dans P 2

En conclusion, P2 se caractérise par de très forts taux d'argile dont plus de la moitié est constituée d'argiles fines (Af). La fraction argileuse serait constituée d'argile gonflante smectitique et par des interstratifiées type illite -smectite. P2 est également relativement riche en MOt dont 40 % sont liés aux argiles. La décomposition de cette MOt fournit essentiellement de l'humine. Les taux de calcaire sont assez élevés mais seulement moins de 1 % est lié aux argiles grossières Ag au moment où les argiles fines Af en sont complètement dépourvues.

1.3.3. Le profil P3

L'analyse statistique des données du profil P3 est présentée dans le tableau 22.

Tableau 22. Analyse statistique des différents paramètres étudiés de P3

Paramètre	Moyenne	Minimum	Maximum	Ec-Type	CV%
At %	48	40	58	7,10	15
Af %	25	22	36	5,20	21
Ag %	23	14	29	5,62	24
CaCO3t %	8,01	5,19	10,49	2,23	28
CaCO3 Ag %	2,63	1,58	3,69	0,83	32
CaCO3 Ag %/100 g sol	0,60	0,42	1,08	0,25	42
CECt (Cmol ⁺ .kg ⁻¹)	29	26	32	2,01	7
CEC Af (Cmol ⁺ .kg ⁻¹)	80	60	105	16,18	20
CEC Ag (Cmol ⁺ .kg ⁻¹)	41	36	46	3,70	9
MOt %	1,66	1,02	2,50	0,51	31
MO FF %	1,46	0,90	2,27	0,58	39
MO FG %	1,60	1,00	2,75	0,62	39
MO Af %/100g sol	0,37	0,20	0,54	0,14	39
MO Ag %/100g sol	0,37	0,25	0,73	0,18	49
HUMINE ‰	12,17	6,86	18,46	4,39	36
AH ‰	1,33	0,98	1,65	0,26	20
AFT ‰	1,85	0,83	2,85	0,85	52
AFL ‰	1,7	0,82	2,32	0,78	46

Distribution des fractions argileuses dans P3

Avec des taux d'argile compris entre 40 et 58 %, on peut considérer que le profil P3 est très argileux (At = 48 % en moyenne). Ce profil est partout argileux (figure 40) et les taux d'argile varient peu dans le profil (CV = 15 %) comme l'indique le tableau 22. Les taux de l'argile fine Af constituent en moyenne 52 % de la fraction argileuse totale. De ce fait, on peut dire qu'Af et Ag se partagent équitablement les taux d'argile de ce profil avec un très léger avantage des Af sur les Ag. La figure 40 montre aussi que la distribution dans le profil d'Ag ne se différencie d'At (argile totale) que dans la couche supérieure à 100 cm de profondeur. Comme pour les autres profils, la diminution des taux d'Ag dans le profil s'accompagne d'une augmentation des taux d'Af.

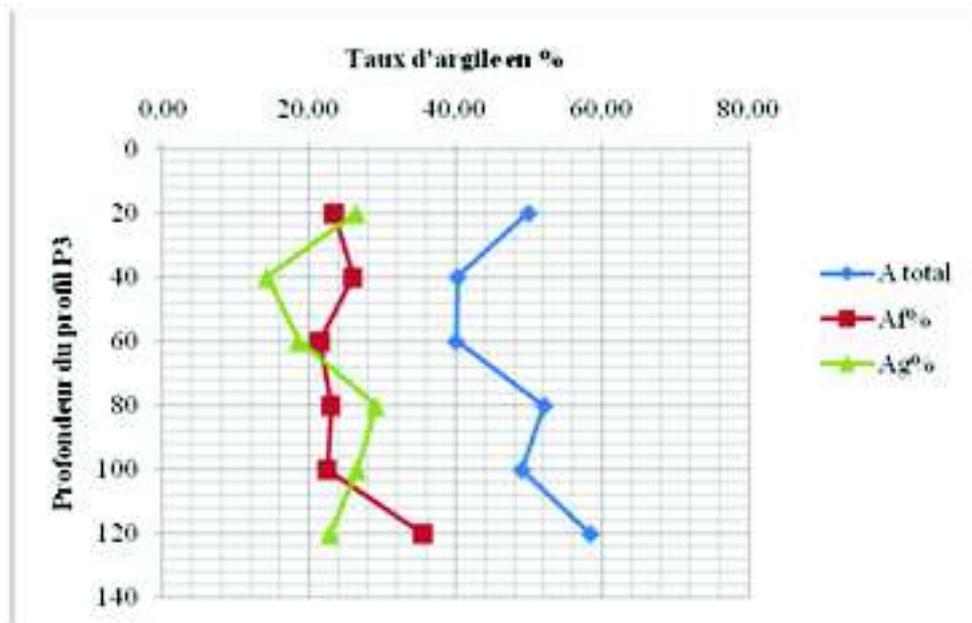


Figure 40. Distribution des taux d'argile dans P 3

Distribution de la fraction organique dans P3

Les taux de MOT s'accordent avec ceux de la bibliographie pour ce type de sol, ils sont en moyenne d'environ 2 % et varient entre 1% à la base du profil et environ 2,5 % en sa surface (tableau 22; figure 41). Les taux de matière organique liée à l'argile varient entre 0,2 et 0,54 % pour Af et entre 0,25 et 0,73 % pour Ag. Il est intéressant de noter que cette MO liée à l'argile représente environ 40 à 50 % de la fraction organique totale du sol à l'exception de la couche 60-80 cm où elle est d'environ 60 %. Ce résultat est bien illustré par la figure 41. De ce fait, on peut considérer que le reste de la matière organique ne concerne pas le complexe argilo-humique. Par ailleurs, la figure 41 montre aussi que la MO liée à l'argile est homogène dans le profil avec un léger avantage de la MO liée à Af par rapport à celle liée à Ag.

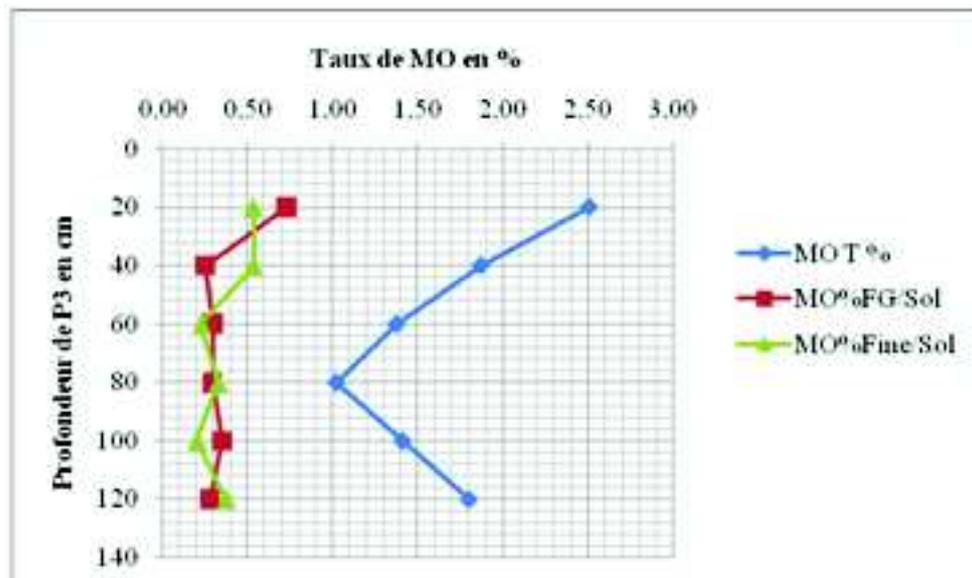


Figure 41. Distribution des taux de MO dans P 3

Le fractionnement de la matière organique totale en acides fulviques totaux (AFT) et liés (AFL), en acides humiques (AH) et en humine révèle que cette dernière se distribue dans le profil d'une façon approximativement analogue à celle de la MOt (figure 42) avec des teneurs relativement fortes qui varient entre 7 et 19 ‰ (tableau 22). Les teneurs en AFT, AFL et AH sont relativement faibles (< 3 ‰) et sont homogènes dans le profil. La figure 42 révèle que la distribution des AH se fait d'une façon inverse par rapport à celle des AF.

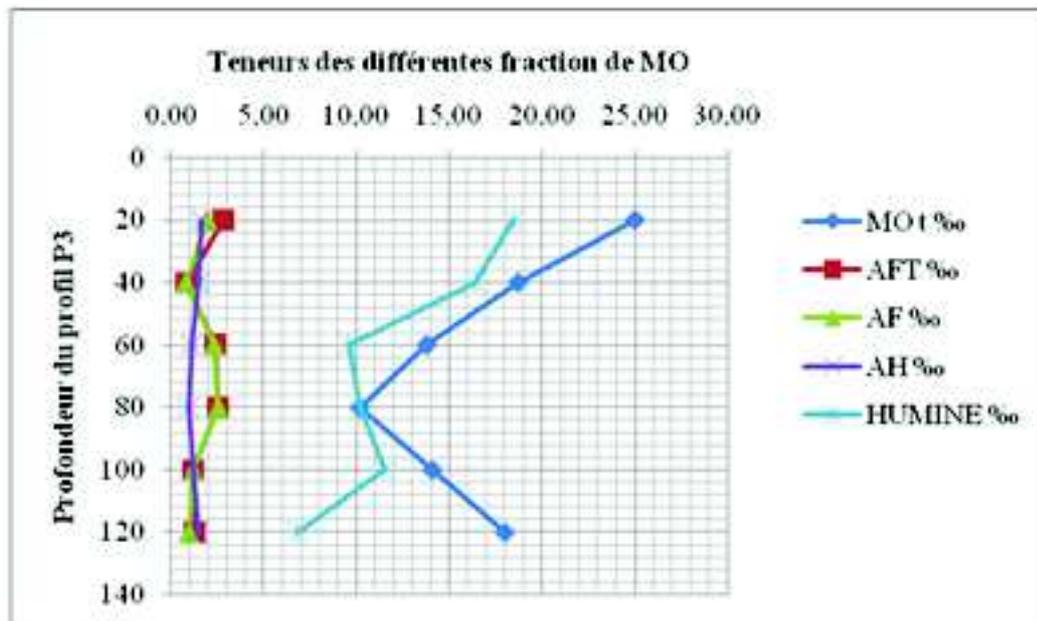


Figure 42. Distribution des taux des différentes fractions de MOt dans P 3

Distribution de la CEC dans P3

Si on considère le taux élevé de la fraction colloïdale, on peut dire que la CECt de ce sol est sous estimée ($26 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1} < \text{CECt} < 32 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$) pour ce genre de sol. La CECt est homogène dans le profil comme l'indiquent le tableau 22 et la figure 43. Il y a lieu de noter que la CEC des Ag oscille autour de $40 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$ et qu'elle est juste un peu plus forte que celle de la CEC de la terre fine. Ce résultat signifie que les Ag seraient de type illitique à moins que cette fraction granulométrique (Ag) renferme, en plus du calcaire ($\approx 1 \%$), des constituants à pouvoir d'échange nul ou très faible. En revanche, la CEC des Af ($60 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1} < \text{CECAf} < 105 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$) concorde bien avec la nature de ce sol et suggère que les argiles fines sont de type smectite gonflant. Au total, ce résultat peut suggérer aussi que les argiles de ce sol ne sont pas constituées uniquement de smectites gonflantes mais peuvent l'être aussi par des argiles interstratifiées type illite-smectitique. La figure 43 montre aussi que la CEC des Af et Ag est constante dans le profil avec un avantage de la CEC des Af sur celle des Ag.

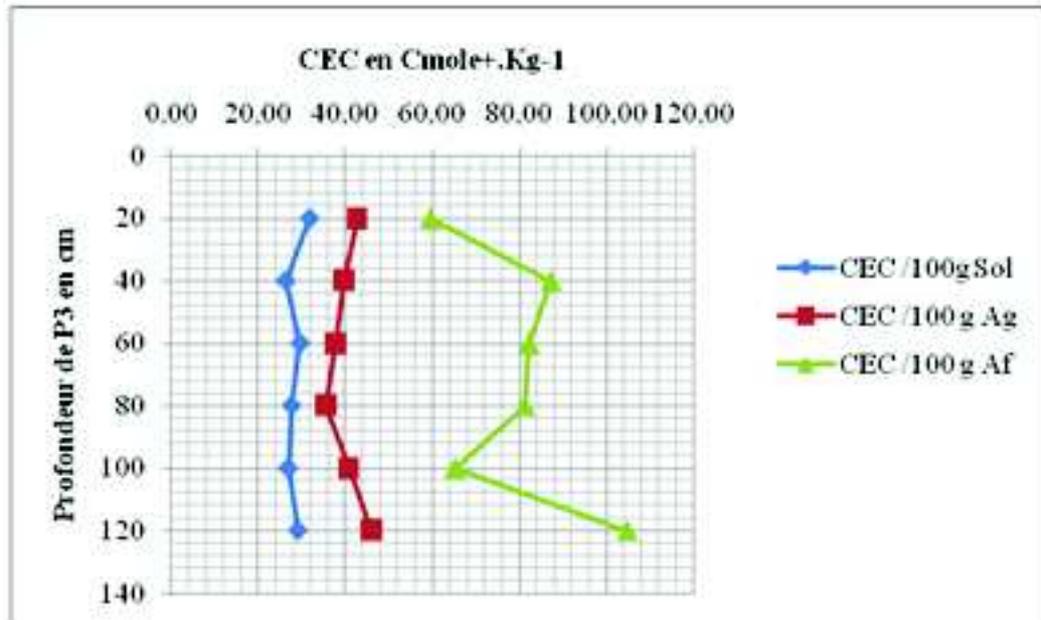


Figure 43. Distribution des taux de CEC dans P 3

Distribution des taux de calcaire dans P3

D'une façon générale, les taux de calcaire dans le profil sont faibles à moyens ($5 < \text{CaCO}_3\% < 10$) (tableau 22) et concordent avec les teneurs de la majorité des Vertisols. La figure 44 montre que les horizons médians sont mieux pourvus en calcaire que les horizons de surface et de profondeur.

Les résultats (tableau 22) révèlent aussi que les argiles fines sont complètement dépourvues de calcaire ($\text{CaCO}_3\text{Af} = 0\%$) et que les teneurs en cet élément qui sont liées aux argiles grossières sont extrêmement faibles ($\text{CaCO}_3\text{Ag} < 1\%$). Ce résultat signifie que le carbonate de calcium de ce sol serait plutôt lié aux fractions limoneuses et sableuses.

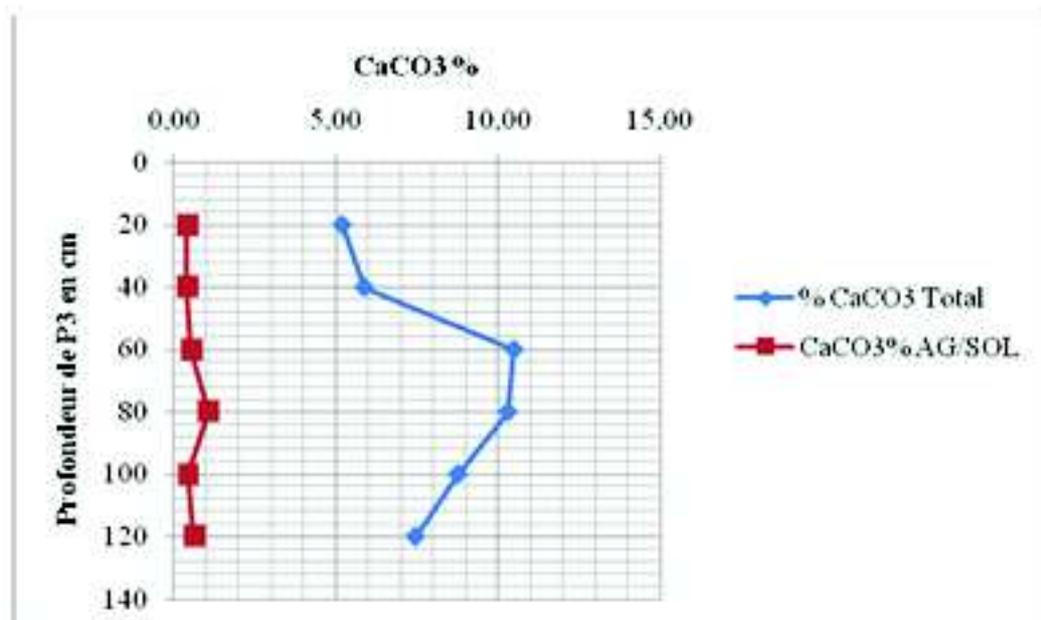


Figure 44. Distribution des taux de calcaire dans P3

Le P3 se caractérise par de très forts taux d'argile repartis d'une façon homogène dans le profil. Comme pour les deux autres sols, les Af constituent environ 50 % de At. Les argiles fines Af seraient constituées essentiellement par des smectites gonflantes alors que les argiles grossières seraient des interstratifiées de type illitique smectitique. Ce sol est riche en MO dont la moitié environ est liée aux argiles. La MO humifiée est constituée essentiellement d'humine. Les taux de calcaire total de la terre fine sont faibles, ils sont très faibles dans les Ag et nuls dans les Af.

Conclusion

L'analyse du complexe argilo-humique a montré que la distribution des argiles est homogène dans le profil. Les argiles fines sont dépourvues de calcaire et elles seraient de type smectitique. En revanche, les argiles grossières contiennent des traces de calcaire et elles seraient de type interstratifié illite-smectite. La matière organique liée à la fraction colloïdale est très faible et elle contribue très peu à la CEC. Le fractionnement de la matière organique a révélé une prédominance d'humine.

1.4. Profils hydriques

Nous rappelons qu'à ce niveau, seule la station P3 a été étudiée. Ceci se justifie par le fait que cette station est en jachère depuis plusieurs années et par le fait qu'elle ne risque pas d'être humectée par des eaux d'irrigation provenant de parcelles mitoyennes.

Les prélèvements des échantillons de P3 ont été réalisés entre le 11 mars (période humide) et le 12 juillet (période sèche). Les 7 profils hydriques correspondants aux différentes dates de prélèvement sont représentés par la figure 45. Il y a lieu de noter que plusieurs événements pluviométriques ont caractérisé cette période comme indiqué dans le tableau 23.

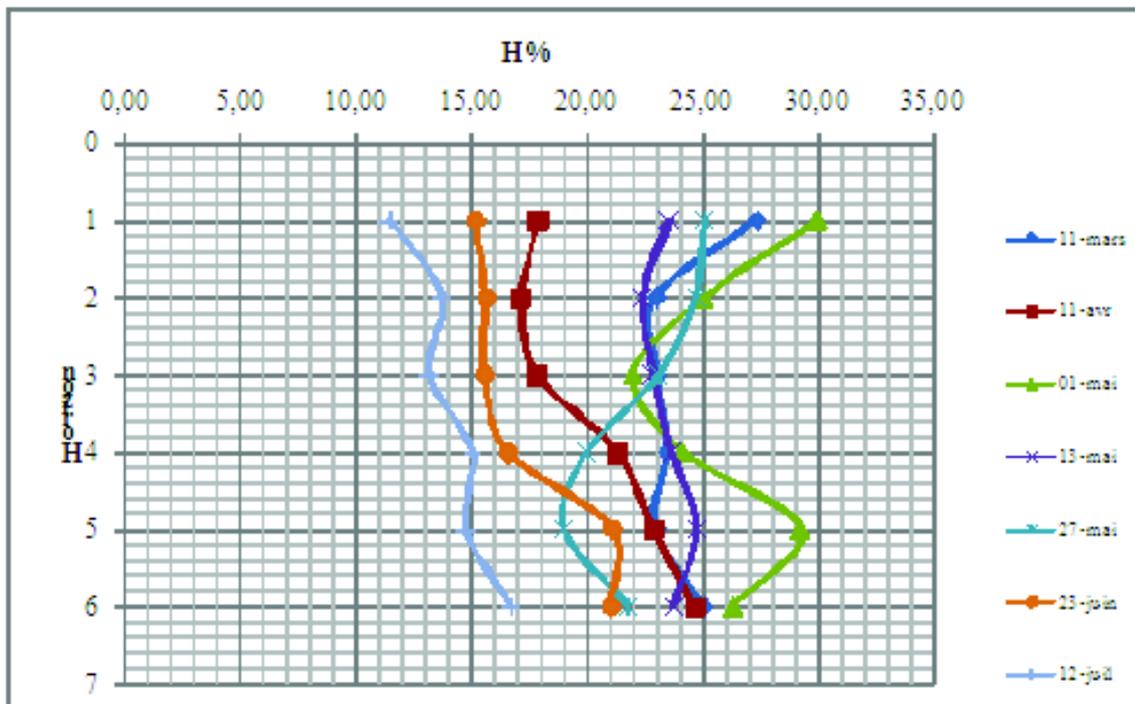


Figure 45. Profils hydriques de profil 3

L'analyse de la figure 45 suggère les remarques et les conclusions suivantes :

- Le profil 11 mars (profil de référence) est plus humide en surface ($H \% = 27 \%$) qu'en subsurface ($H \% = 23 \%$) et qu'en profondeur ($H \% = 25 \%$). On peut considérer que d'une façon globale, la teneur en eau dans le profil est assez homogène, l'écart entre le sommet et la base n'étant que de 2 % uniquement. Cet écart est de 4 % entre H1 et H2 ce qui signifie qu'il avait probablement plu lors des journées précédentes le prélèvement des échantillons.
- Le profil du 11 avril est singulièrement différent du premier. En effet, ce profil correspond à une période de dessèchement (il n'a pas plu entre le 11 mars et le 11 avril). Ce profil est nettement plus humide en profondeur ($H \% = 27 \%$) qu'en surface ($H \% = 18 \%$). Ce résultat signifie que le dessèchement affecte beaucoup plus rapidement les horizons de surface que les horizons de profondeur. Le fort potentiel matriciel dû à la texture argileuse de ce sol joue donc un rôle important dans la remontée capillaire. Par ailleurs, il y a lieu de noter que P3 a perdu lors de cette période (11 mars au 11 avril) environ 10 % de son eau en surface. Cette perte en eau devient de moins en moins importante en profondeur. A 120 cm de profondeur, les teneurs en eau n'ont pratiquement pas changées entre ces deux périodes.
- Le profil du 1^{er} mai qui a reçu une quantité d'eau cumulée (58 mm) (tableau 23) est nettement plus humide que le profil précédent dans les 100 premiers cm du profil. A 120 cm de profondeur, les teneurs en eau sont sensiblement les mêmes pour les deux profils. Ce profil se caractérise également par son hétérogénéité. En effet, ses taux d'humidité qui sont assez forts en surface ($H \% = 30 \%$) décroissent assez rapidement jusqu'à 60 cm de profondeur ($H \% = 22 \%$). A partir de là, les taux d'humidité vont augmenter de nouveau ($H \% = 29 \%$) jusqu'à 100 cm de profondeur. Ce comportement complexe de ce profil serait lié aux fentes de retrait. Ce profil aurait été humecté selon deux processus différents. Dans la première partie du solum jusqu'à 60 cm de profondeur, l'humectation du profil serait causée par l'infiltration des eaux à partir de la surface. L'humectation de la partie inférieure du solum serait due à des eaux se sont infiltrées directement par les fentes de retrait et qui auraient réhumecté le sol à ce niveau (figure 46).
- Le profil du 13 mai n'a reçu que 3 mm de pluie en 13 jours (tableau 23). Il était en phase de dessèchement depuis déjà 10 jours. De ce fait, il est légèrement plus sec que le précédent et l'eau a eu le temps de se redistribuer dans le sol. Ce phénomène explique donc son homogénéité en fonction de la profondeur. Cependant, les écarts des taux d'humidité sont plus forts en surface (7 %) qu'en profondeur (3 %).
- Le profil du 27 mai a subi entre le 19 et le 22 mai 57 mm de pluie mais il a ressuyé pendant 5 jours (tableau 23). Son hétérogénéité serait liée aux fentes de retrait (figure 46).
- Par la suite, il est tombé 18 mm de pluie le 6 juin et depuis, il n'a pratiquement pas plu (tableau 23). Ceci explique les faibles teneurs en eau du sol le 23 juin et surtout le 12 juillet. Il y a lieu de noter qu'entre le 27 mai et le 23 juin, le sol a perdu 10 % d'eau en surface et environ 2 % en profondeur. La dessiccation est donc plus importante en surface qu'en profondeur. Le profil du 12 juillet est analogue à celui du 23 juin mais les teneurs en eau y sont nettement plus faibles, même en profondeur où elles sont passées de 21 % à 17 %.

Au total, il ressort clairement que les variations des taux d'humidité sont nettement plus fortes en surface qu'en profondeur. Cette variation est de l'ordre de 15 % en surface et de 5 % uniquement en profondeur et ce durant la période comprise entre le 11 mars et le 23 juin. Ce résultat signifie que le cumul des pluies orageuses qui sont tombées lors de cette période (100 mm environ) ont eu très peu d'effet sur la couche située à 120 cm de profondeur. Le fort potentiel matriciel de ces sols et les fortes ETP ont probablement contribué d'une façon significative à la dynamique de l'eau de ce sol. Le 12 juillet, c'est-à-dire après une longue période de dessiccation, le sol s'est encore asséché mais d'une manière constante avec les mêmes pertes en eau en surface et en profondeur (3 à 4 %).

On peut schématiser le processus de la réhumectation du profil par la figure 46.

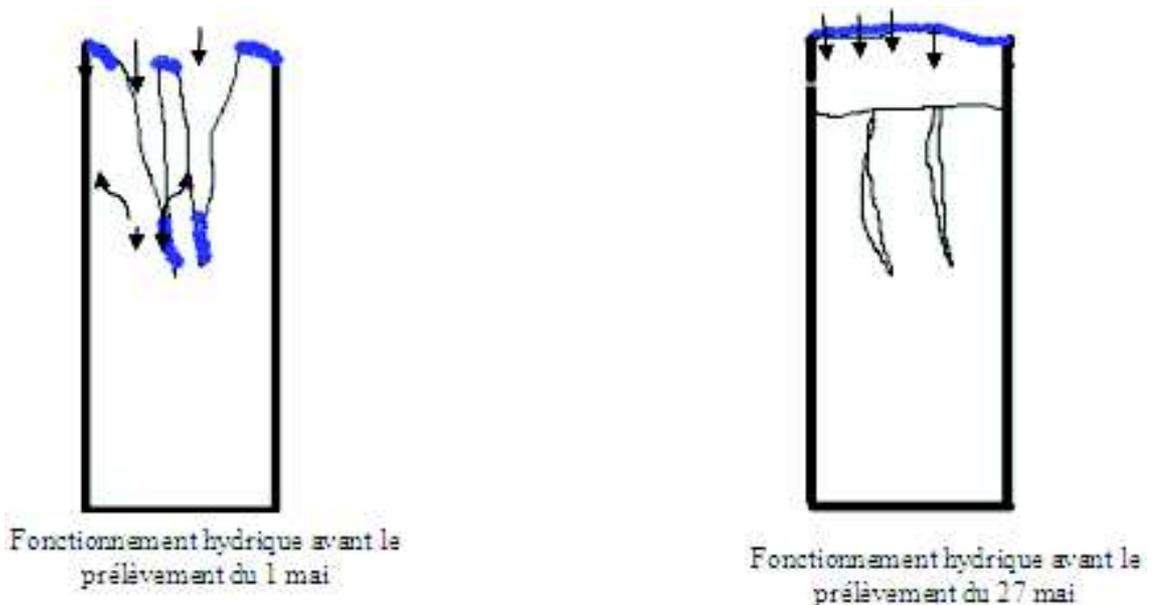


Figure 46. Schéma de fonctionnement hydrique du profil

Enfin, la figure 45 suggère deux modèles de profils hydriques, un modèle de dessiccation et un modèle de réhumectation.

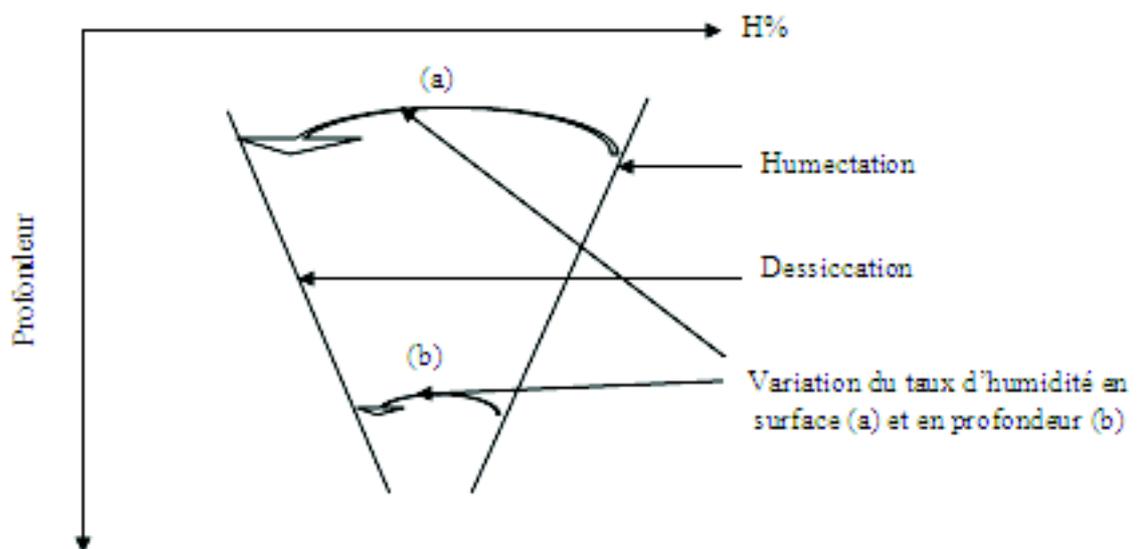


Figure 47. Le comportement du profil hydrique lors des périodes humide et sèche

Date	Précipitation (mm)
24-4	17
25-4	13,9
26-4	10,8
30-4	17
03-5	3
18-5	5
19-5	21
20-5	22
21-5	11
22-5	5,2
31-5	1
1-6	1
6-6	18

Tableau 23. Données des précipitations en mm de la station météorologique de l'ENSA pour la période (Avril-Juin)

1.5. Les fentes de retrait

La mesure in situ des fentes de retrait (surface, volume, largeur et profondeur) est limitée car elle dépend de plusieurs facteurs comme leur localisation sur le microrelief, l'irrigation, les cultures installées et des techniques d'aménagement (Kishné et al., 2009). Elle peut être effectuée dans un cycle annuel (Dosag et al., 1988) ou pluriannuel (Cheng et Pettry, 1993).

En ce qui nous concerne, nous avons effectué une série de mesures de largeurs et de profondeurs des fentes de retrait durant la période comprise entre avril et juillet 2011.

Les mesures ont été effectuées sur 3 stations de 1 m² chacune. Il y a lieu de noter que durant cette période, il y a eu des événements pluvieux orageux épisodiques. De ce fait, les mesures n'ont pas été effectuées dans des conditions constantes d'humidification ou de dessiccation.

1.5.1. La largeur des fentes de retrait

Le développement des fentes de retrait pour les 3 stations est schématisé par les figures 48 a, b, c. On note que malgré les perturbations causées par les pluies tardives, l'évolution des largeurs de fentes de retrait est clairement mise en évidence. En période humide, la surface du sol apparaît en structure massive avec de fines fissures, en période sèche, le sol est bien structuré avec formation de larges fentes de retrait. De ce fait, pour mieux interpréter les résultats, nous présenterons les schémas de l'évolution de la largeur des fentes en fonction du taux d'humidité de surface.

L'analyse des figures 48 a, b, c font apparaître grossièrement une grande ressemblance de l'évolution des fentes de retrait entre les trois stations. En effet, l'évolution de ces fentes dépend des événements pluvieux. Ces figures peuvent représenter deux comportements. On peut regrouper les différents états structuraux de la surface en état d'un sol massif avec des fentes fines (les observations du 01 et 27 Mai), et un état structuré du même sol en se desséchant (les observations du 11 avril, du 13 Mai, du 23 Juin et du 12 Juillet).

· Etat massif (les observations du 01 Mai et du 27 Mai) :

Sous l'effet des pluies, une partie de l'eau percole à travers l'horizon de surafec et une autre partie pénètre à travers les fentes ouvertes pour humidifier les horizons de subsurface. Ce phénomène engendre un gonflement des argiles qui se traduit par la fermeture des fentes de retrait. Dans ce cas, on part d'un état initial où se développent de fines fissures de 1 à 5 mm de largeur et inférieure à 1 cm de profondeur. Elles se regroupent pour constituer des mottes de grosses dimensions (photo 4).



Photo 10.Etat de surface en structure massif

Etat structuré (les observations du 11 avril, du 13 Mai, du 23 Juin et du 12 Juillet)
(photo 5).

Le sol commence à se fragmenter par formation de fissures moyennes qui varient entre 5 mm et 3,5 cm de largeur avec des profondeurs qui varient de 6 cm à 42 cm.

On peut conclure que la fissuration s'est faite en deux étapes (1) formation des fissures fines et (2) formation des fissures larges et très lâches délimitant de gros blocs d'environ 20 cm à 40 cm. Ce résultat concorde bien avec celui de Hallaire (1988) qui résume le retrait du sol en deux phases. D'abord, le sol se fragmente en petits agrégats par de fines et nombreuses fissures et la taille de la motte se rapproche du ped. Ensuite, formation de larges fentes limitant des massifs de sol compacts et peu poreux (la prise en masse), ainsi la taille du ped

est plus grande que celle de la motte.

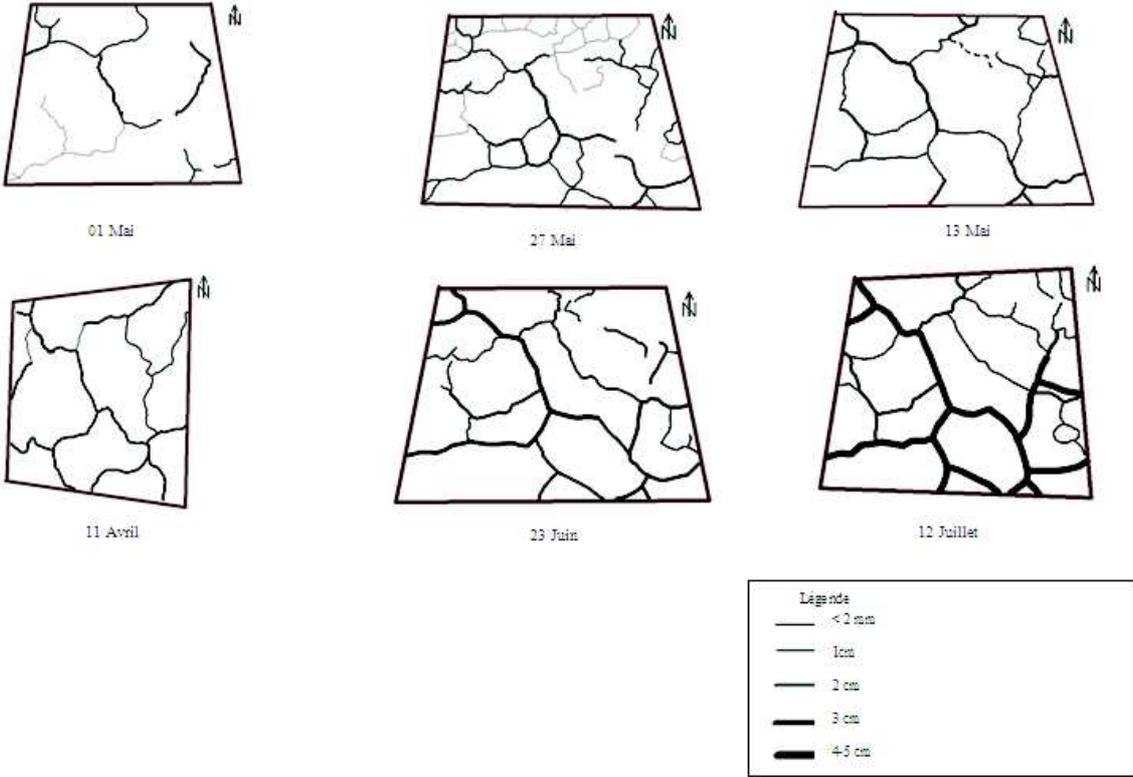


Figure 48 a. Schéma de l'évolution de la largeur des fentes de la station 1

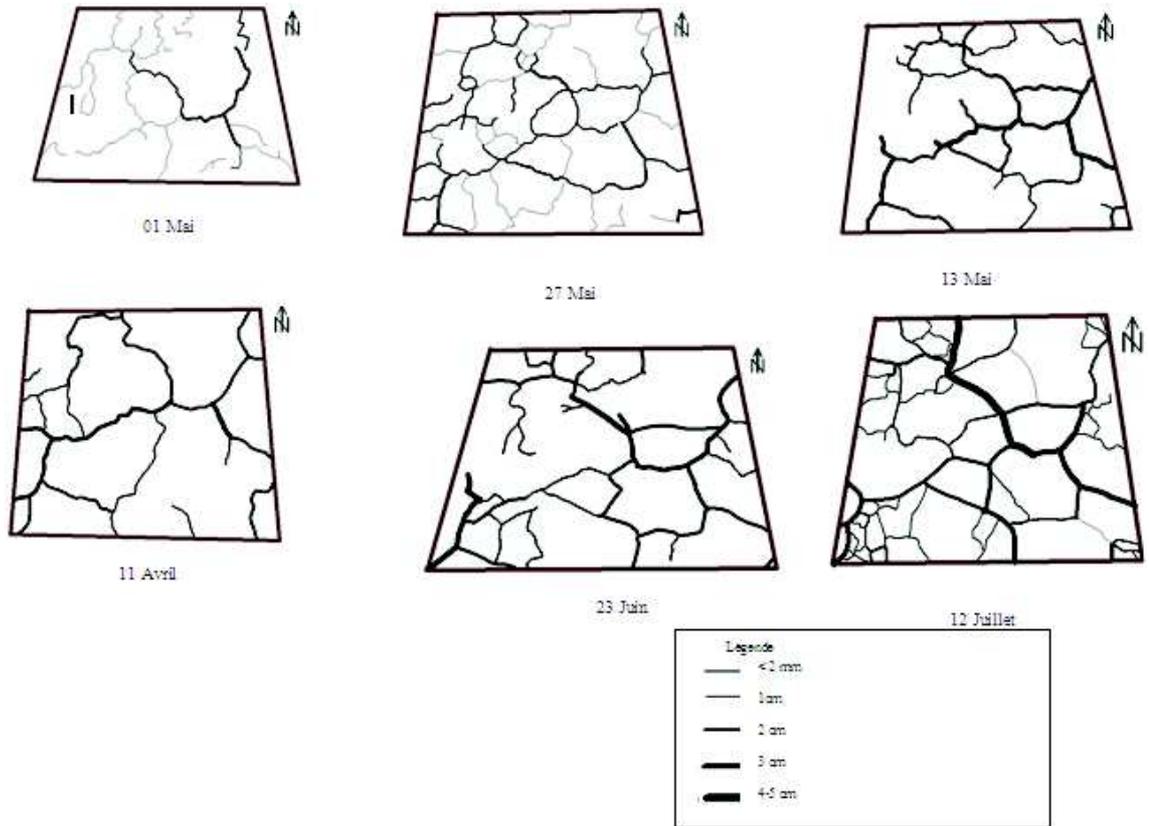


Figure 48 b. Schéma de l'évolution de la largeur des fentes de la station 2

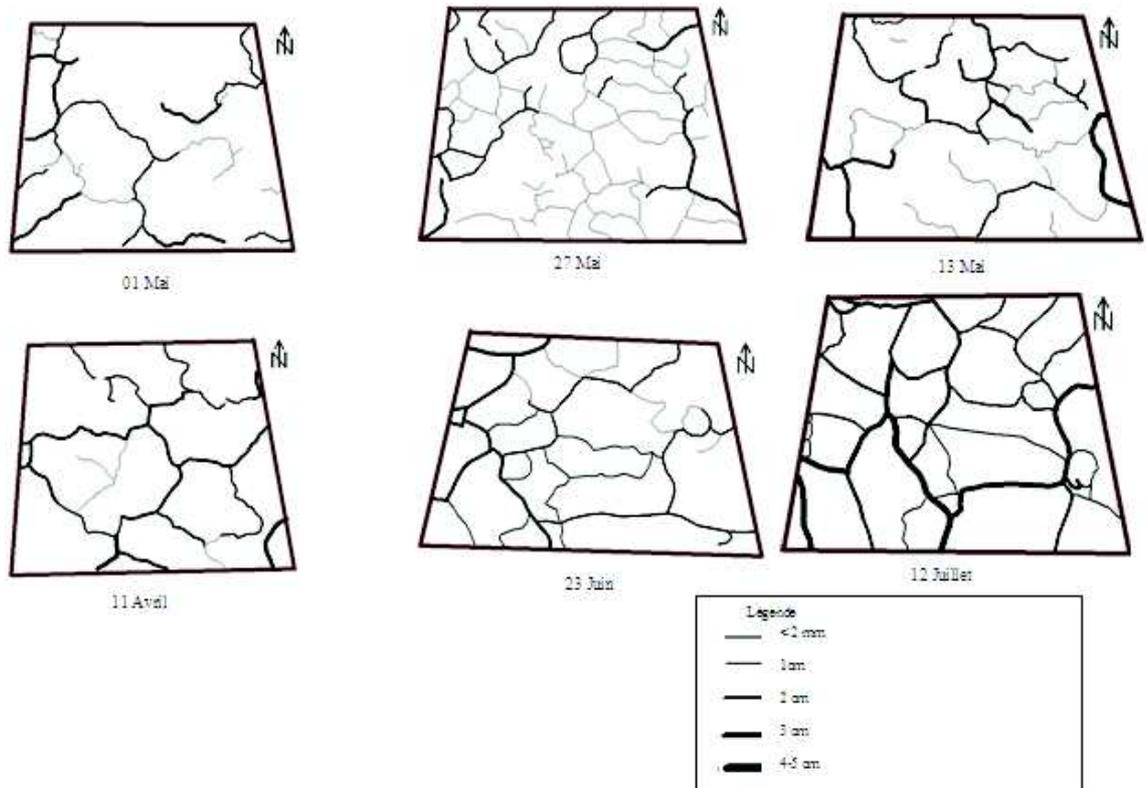


Figure 48 c. Schéma de l'évolution de la largeur des fentes de la station 3

1.5.2. Relation entre la largeur des fentes et le taux d'humidité de surface

La relation entre les largeurs des fentes de retrait et les taux d'humidité des horizons de surface est illustrée par la figure 49.

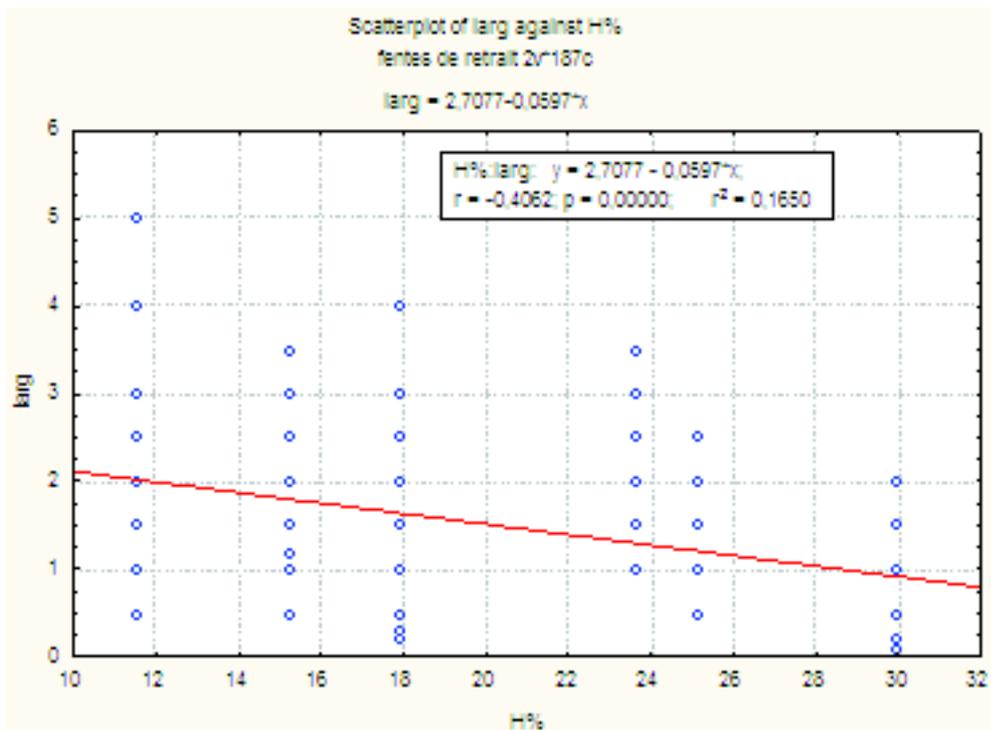


Figure 49. Relation linéaire entre les largeurs des fentes de retrait et les taux d'humidité des horizons de surface

La relation entre les largeurs des fentes de retrait et les teneurs en eau pondérales des horizons de surface est statistiquement négative et très hautement significative ($p \leq 0,001$). L'allure de la droite de régression montre que la largeur de la fente de retrait diminue quand le taux d'humidité augmente. L'équation de la régression est de type : **Larg (cm) = 2,7077 - 0,0597 H%**.

1.5.3. Relation entre la profondeur de fentes et le taux d'humidité

La relation entre les profondeurs des fentes de retrait et les taux d'humidité est statistiquement très hautement significative ($r = 0,54$; $p < 0,001$). Ce résultat confirme que les taux d'humidité ont un effet sur les profondeurs des fentes. La figure 50 indique que les profondeurs des fentes de retrait diminuent avec l'augmentation des taux d'humidités des horizons. L'équation de la régression est de type **Prof (cm) = 37,2142 - 1,0619 H%**.

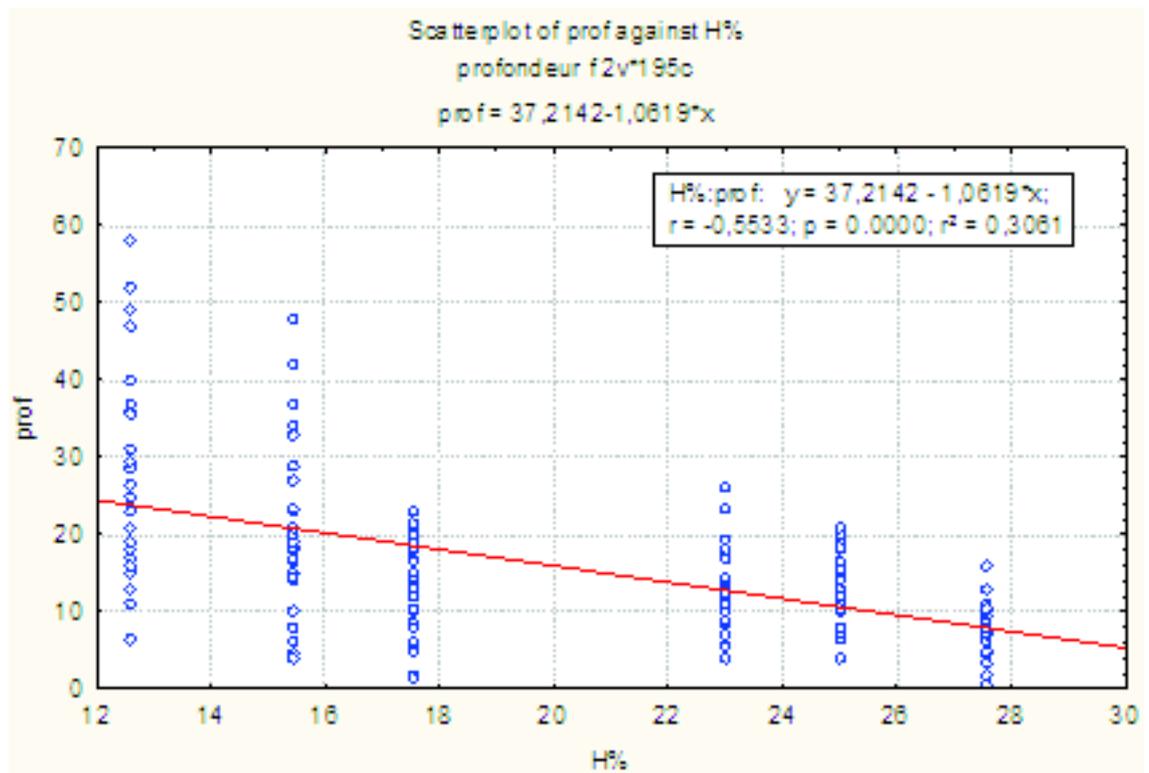


Figure 50. Relation linéaire entre les profondeurs des fentes de retrait et les taux d'humidité

1.6. Le microrelief gilgaï

Parallèlement à l'étude in situ des fentes de retrait, nous avons réalisé également un suivi de l'évolution du microrelief gilgaï. Il s'agit en fait de mesurer la dénivelée entre le haut (sommet de la bosse ou microhigh) et la base (creux ou microlow) du microrelief. Pour cela, nous avons déposé une règle sur 2 bosses adjacentes et mesuré la dénivelée avec un double décimètre (photo 6).

Les résultats obtenus (figure 51 et photo 6 a, b, c) montrent que la dénivelée moyenne varie entre 3,9 et 4,7 cm selon la période de mesure.

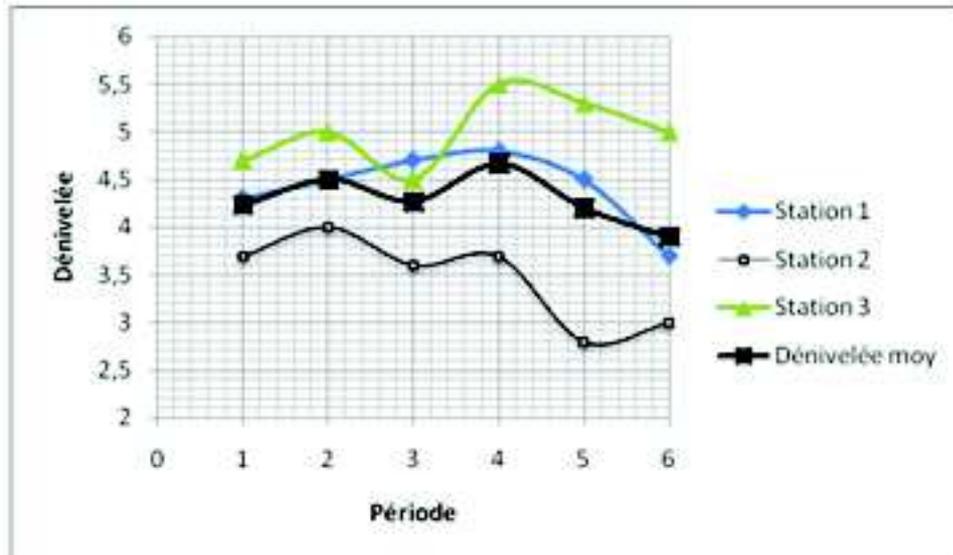


Figure 51. La variation de la dénivelée entre la bosse et la base du microrelief gilgai



Photo 12 a. Mesure la dénivelée pour la Station 1



11 Avril



01 Mai



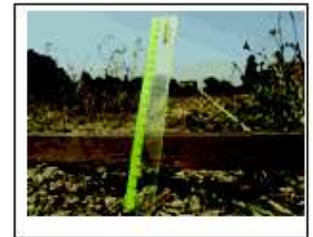
13 Mai



27 Mai



23 Juin



12 Juillet

Photo 12b. Mesure la dénivelée pour la Station 2



11 Avril



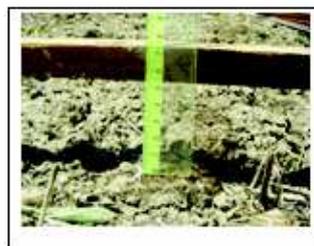
01 Mai



13 Mai



27 Mai



23 Juin



12 Juillet

Photo 13 c. Mesure la dénivelée pour la Station 3

Nous pensons que cette faible variation est provoquée uniquement par le gonflement des argiles des horizons de surface. En effet, nous avons montré précédemment que la variation des taux d'humidité des horizons de profondeur (zone des slickensides) est relativement faible pour provoquer un quelconque mouvement de sol.

1.7. Relations entre le taux d'argile et les autres paramètres

A ce niveau, nous recherchons les relations statistiques éventuelles entre les taux d'argiles et quelques paramètres analytiques pour l'ensemble des échantillons (18).

Le tableau 24 représente la matrice de corrélation entre les taux d'argile et les paramètres analytiques. Ce tableau révèle que les taux d'argile sont corrélés positivement avec les taux d'argile fine ($r = 0,57$), de l'argile grossière ($r = 0,89$), de la matière organique ($r = 0,51$), des différents pF (0, 1,9, 2,5, 3, 3,5, 4,2) ($0,65 < r < 0,72$), de la limite de liquidité ($r = 0,83$) et de la limite de plasticité ($r = 0,62$). Par ailleurs, les taux d'argile sont inversement proportionnels aux taux du calcaire total ($r = -0,71$). Toutes ces relations sont statistiquement significatives ($p < 0,005$) à hautement significatives ($p < 0,01$).

1.7.1. Relation Argile-matière organique

La figure 52 montre une relation positive et significative ($r = 0,51$; $p < 0,05$) entre les taux d'argile et les taux de la matière organique. La droite de régression est de type:

$$MO\% = -0,6678 + 0,0551 A\%.$$

La distribution du nuage de point indique que les échantillons les plus argileux sont les plus organiques. De nombreux travaux ont montré que la matière organique est fortement liée à la fraction fine du sol (Brogowsky et al., 1992 ; Toit et Preez, 1993) in (Djili, 2000).

	A%	Af %	Ag%	CEC Cmol+ Kg	MO%	CaCO3 tot%	PH	CE (dS/m)	pF 0	pF 1,9	pF 2,5	pF 3	pF 3,5	pF 4,2	LL%	LP%	COLE	Dr	Da
r	1,0000	,5727	,89	,0328	,5155	-,7016	-,0714	,0820	,6486	,7212	,6718	,6650	,6577	,6647	,8295	,6182	-,6107	,2693	,3239
Nbr échl	N=18	N=18	N=18	N=18	N=18	N=18	N=18	N=18	N=18	N=18	N=18	N=18	N=18	N=18	N=18	N=18	N=9	N=9	N=9
p	p=---	p=0,13	p=0,001	p=0,397	p=0,029	p=0,001	p=,778	p=,746	p=0,004	p=0,001	p=0,002	p=0,003	p=0,002	p=0,003	p=0,000	p=0,006	p=0,031	p=0,433	p=,148

Tableau 24. Matrice de corrélation entre les taux d'argile et les paramètres pédologiques

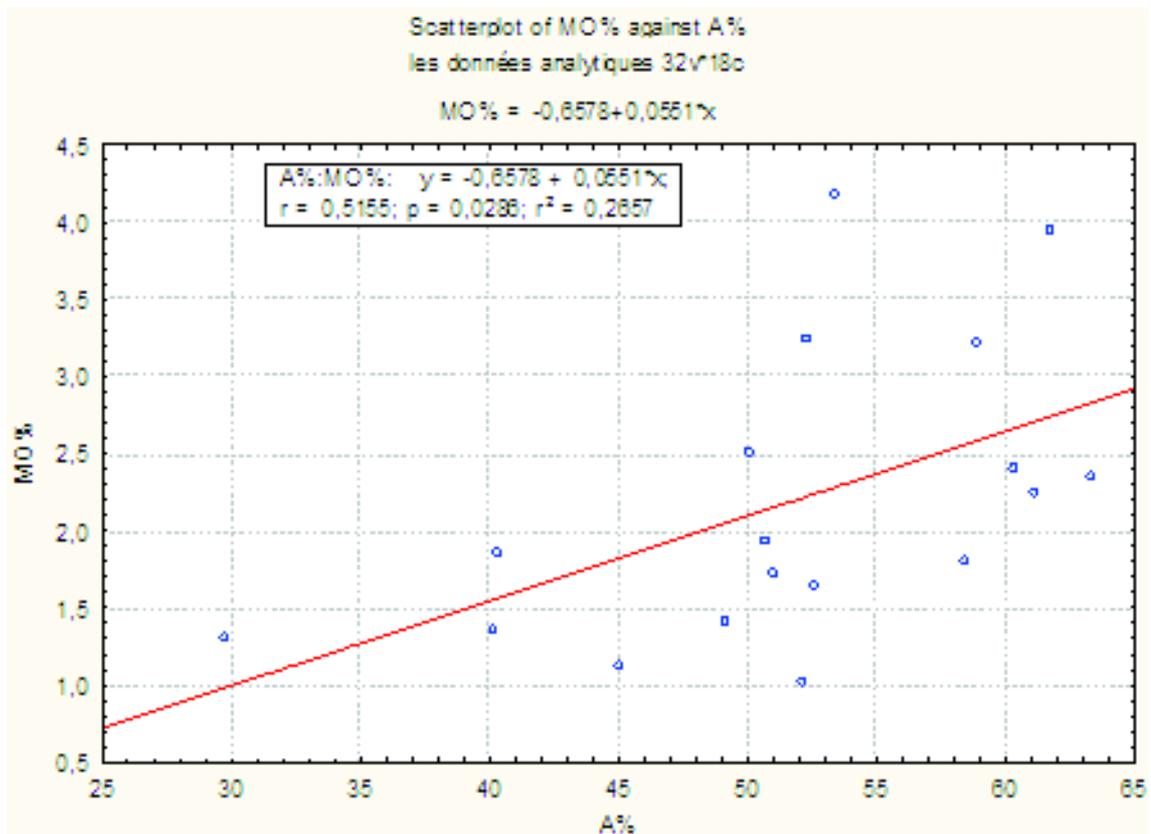


Figure 52. Relation linéaire entre les taux d'argile et la matière organique

1.7.2. Relation Argile-calcaire total

La relation entre les taux d'argile et les taux de calcaire total est illustrée par la figure 53 qui montre que les échantillons les plus argileux sont les moins calcaires selon l'équation $\text{CaCO}_3 \text{ tot\%} = 25,4624 - 0,3399 \text{ A\%}$. La relation entre les deux fractions est assez forte ($r = 0,70$; $p = 0,001$), mais elle est plus forte pour les taux d'argile $> 48 \%$. Ce résultat concorde avec celui de Djili (2000) pour les sols du Nord d'Algérie et de Salah (2011) pour les Calcisols d'Algérie.

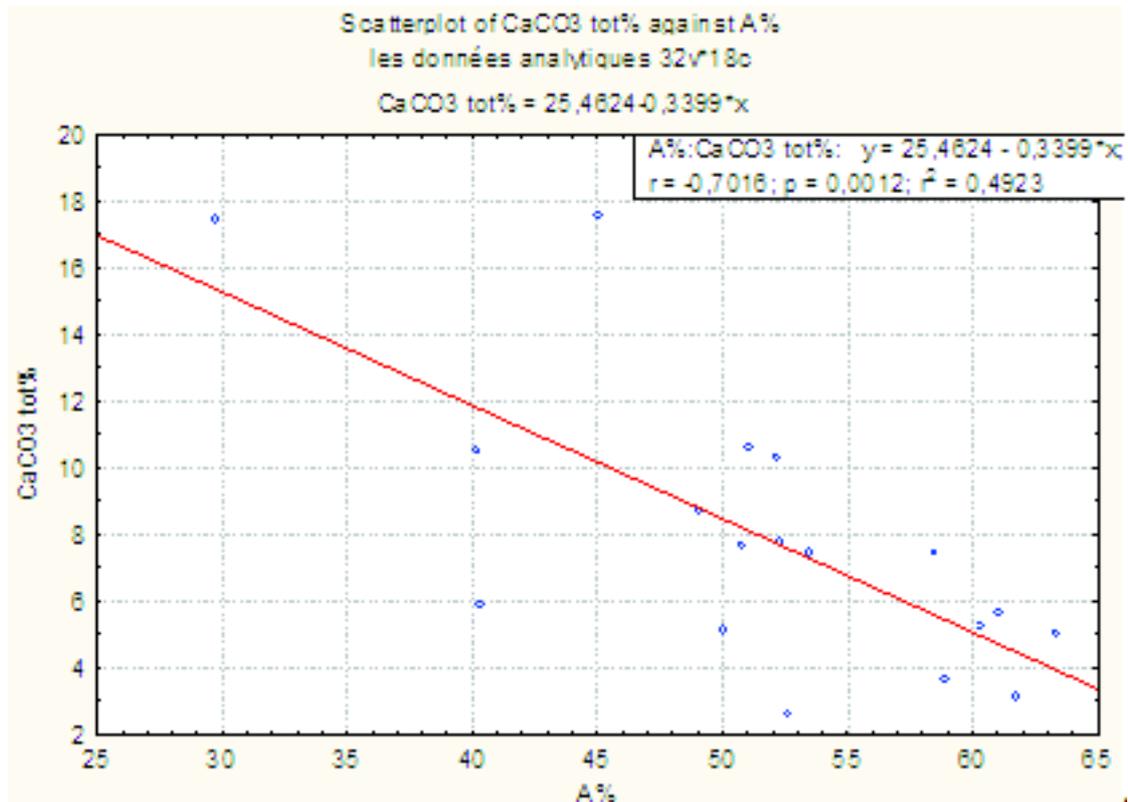


Figure 53. Relation linéaire entre les taux d'argile et les taux de calcaire total

1.7.3. Relation argile-limite de liquidité

Le taux d'humidité à la limite de liquidité a une tendance d'augmenter quand les taux d'argile augmentent. L'allure de la droite de prédiction de la figure 54 confirme cette relation. La distribution du nuage de points montre que la relation est forte ($r = 0,83$; $p < 0,001$). L'équation de régression est $\text{LL \%} = 5,8366 + 0,8873 \text{ A\%}$. Ce résultat concorde avec celui de Bensaad (2008) pour le même type de sol.

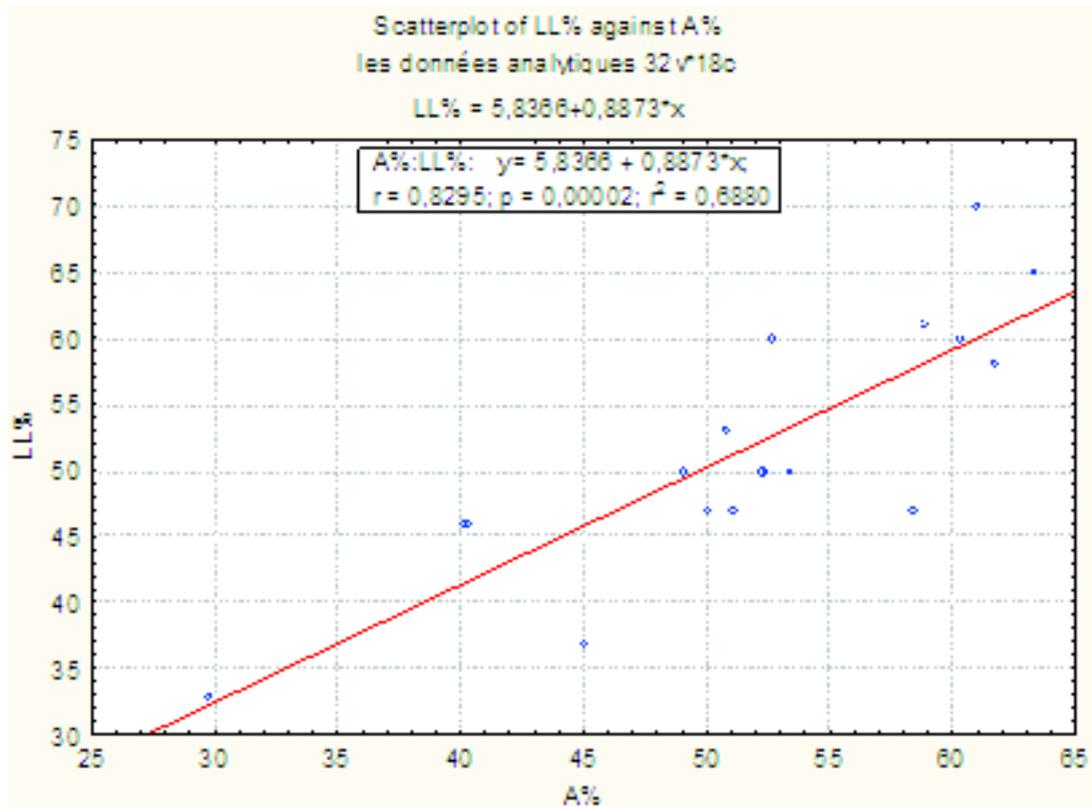


Figure 54. Relation linéaire entre les taux d'argile et la limite de liquidité

1.7.4. Relation argile-limite de plasticité

La relation linéaire entre les taux d'argile et la limite de plasticité est illustrée par la figure 55. En effet, les taux d'humidité aux limites de plasticité sont influencés par les taux d'argile. La relation entre les deux paramètres est positive et hautement significative ($r = 0,62$; $p = 0,0062$). La distribution du nuage de points montre qu'aux forts taux d'argile, les taux d'humidité aux limites de plasticité sont élevés. L'équation de régression est **LP % = 9,6369 + 0,3071 A%**. Ce résultat concorde bien avec celui de Bensaad (2008) qui a trouvé un coefficient de corrélation de 0,65, mais qui a conclu que la relation est moins étroite pour les taux d'argile supérieure 40 %.

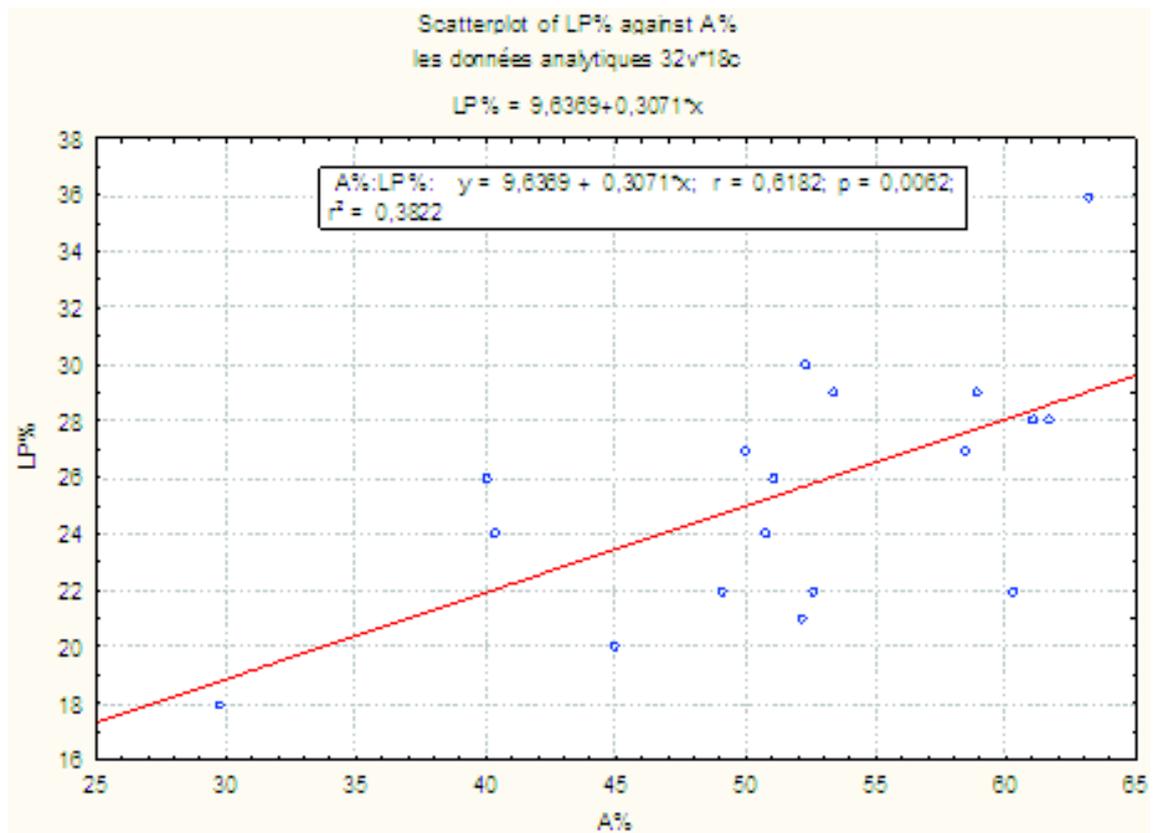


Figure 55. Relation linéaire entre les taux d'argile et la limite de plasticité

1.7.5. Relation argile-pF

La relation entre les taux d'argile et les teneurs en eau est positive et hautement significative ($0,66 < r < 0,72$; $p < 0,01$). Ce résultat signifie que l'augmentation des taux d'argile dans le sol s'accompagne d'une augmentation de la teneur en eau quel que soit le potentiel considéré. Ce résultat est bien illustré par le nuage des points de la figure 56 qui montrent que l'augmentation des taux d'argile des Vertisols étudiés s'accompagne par une augmentation des teneurs en eau selon la droite de régression linéaire $H\% = 0,388 A\% + 23,25$ pour le pF1,9 par exemple. La variation des taux d'argile explique 52 % et 42 % des variations des teneurs en eau respectivement pour les forts potentiels (pF1,9) et bas potentiels (pF4,2).

Ce comportement peut être expliqué par le fait qu'aux hauts potentiels, l'essentiel de l'eau est retenue par la macroporosité du sol résultant de l'assemblage des particules du sol, alors qu'au bas potentiels, l'eau est retenue principalement à la surface de l'argile et par la microporosité développée entre les particules fines tassées.

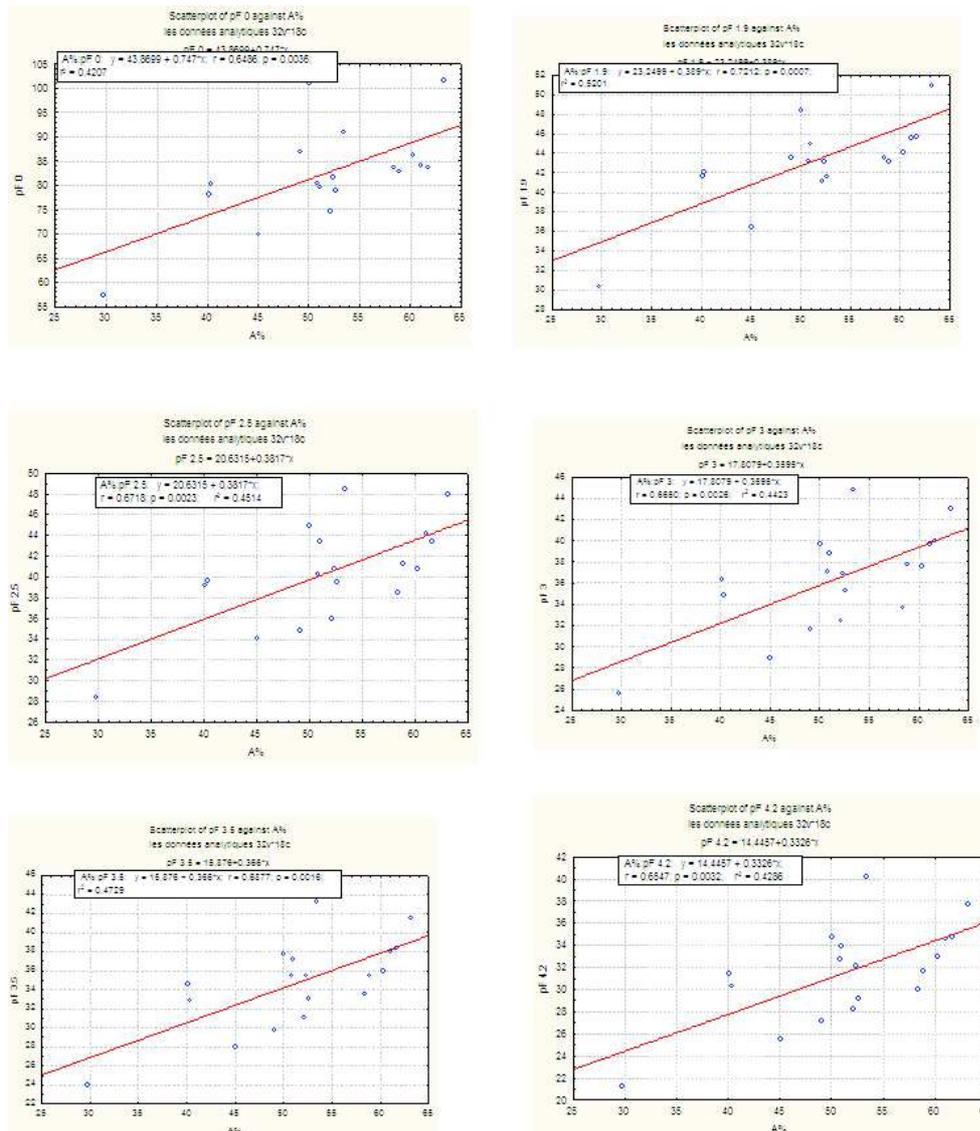


Figure 56. Relation entre les taux d'argile et le pH

2. Les Vertisols d'Algérie

L'objectif de cette partie est d'introduire et localiser les Vertisols références de l'Algérie selon le système de classification WRB (FAO, 2006). Nous présentons d'abord la structure de la base de données des Vertisols recensés et, ensuite, les Vertisols références identifiés selon la classification WRB (FAO, 2006) que nous géoréférençons dans la carte d'Algérie. Pour conclure, nous présenterons les différentes statistiques descriptives de quelques paramètres pédologiques.

Le recensement des Vertisols a permis de construire une base de données constituée de 699 horizons appartenant à 202 profils et 33 variables dont 25 sont quantitatives.

2.1. Le taux de remplissage

Les résultats sont présentés dans les tableaux 25 et 26 respectivement pour les données qualitatives et les données quantitatives. Les variables sont listées par ordre décroissant de leurs taux de remplissage. On se basera sur les normes présentées par Djili (2000) pour interpréter les différents taux de remplissage.

2.1.1. Les données qualitatives

L'analyse du tableau 25 révèle qu'à l'exception de la présence de fentes de retrait qui est insuffisamment renseignée (22 %), les autres variables sont relativement bien ou très bien renseignées. Le paramètre descripteur « fentes de retrait » est essentiel pour définir un vertisol, mais si le sol est humide lors de la description, la description des fentes de retrait ne peut pas être déterminée. Ce paramètre est insuffisamment renseigné à cause probablement de la période de description (humide).

Tableau 25. Taux de remplissage des données qualitatives

Variables	Nombre d'horizons renseignés	Taux de remplissage (%)
Pluviométrie	699	100
Faces de glissement	699	100
Pente	689	98,57
Texture	670	95,85
Structure	666	95,28
Couleur	640	91,56
Test à l'HCl	599	85,69
Fente de retrait	155	22,17

2.1.2. Les données quantitatives

Le tableau 26 nous montre que :

- 7 variables (CaCO_3 % ; A % ; Lf % ; Lg % ; Sf % ; Sg % ; pH) sont très bien renseignées, elles ont un taux de remplissage supérieur à 93 %.
- 7 variables (CE; C %; N %; Na^+ ; K^+ ; CEC ; ESP) sont relativement bien renseignés, avec un taux de remplissage compris entre 71 % et 87 %.
- 4 variables (Mg^{++} ; MO % ; Ca^{++} ; C/N) sont moyennement renseignés. Le taux de remplissage est compris entre 52,5 % et 66 %.
- 7 variables (pF 4,2 ; pF 3 ; pF 2,5 ; densité réelle ; Is ; K (cm/h) ; densité apparente) sont insuffisamment renseignés (13 à 32 %).

Tableau 26. Taux de remplissage des données quantitatives

Variabes	Nombre d'horizons renseignés	Taux de remplissage
CaCO ₃ %	699	100
A %	665	95,13
Lf %	665	95,13
Lg %	665	95,13
Sf %	665	95,13
Sg %	665	95,13
pH	651	93,13
CE	606	86,68
C ‰	603	86,26
N %	533	76,25
Na ⁺	500	71,53
K ⁺	500	71,53
CEC Cmol ⁺ . Kg ⁻¹	498	71,24
ESP	496	70,96
Mg ⁺⁺	463	66,24
MO %	457	65,38
Ca ⁺⁺	452	64,66
C/N	367	52,50
pF 4,2	221	31,62
pF 3	221	31,62
pF 2,5	218	31,19
Densité réelle	204	29,18
Instabilité structural (Is hénin)	142	20,31
Indice K hénin (cm/h)	98	14,02
Densité apparente	90	12,87

D'après ces résultats, il ressort que, mis à part le paramètre « fentes de retrait » qui est insuffisamment renseigné, les paramètres essentiels pour classer des Vertisols tels que le taux d'argile, les slickensides et la structure sont très bien renseignés.

2.2. Les Vertisols références de l'Algérie selon WRB (FAO, 2006)

Ici, il s'agit de déterminer les deux niveaux de la WRB (FAO, 2006) pour les 202 Vertisols recensés. Dans un premier temps, nous déterminons le grand groupe de Vertisols. Dans un deuxième temps, nous qualifions et précisons le classement en ajoutant les préfixes et les suffixes.

En se basant sur les critères diagnostiques de la WRB (FAO, 2006), l'identification des Vertisols références selon la méthodologie adoptée (figure 19) nous a permis de reconnaître 133 groupes de Vertisols références sur un effectif de 202 profils de Vertisols reconnus selon la classification CPCS.

Pour identifier le niveau inférieur, la combinaison entre les qualitatifs (tableau 28) a permis de déterminer 82 groupes références. Ces 82 groupes références sont présentés dans l'annexe 6.

Du fait que le préfixe est ajouté pour préciser le classement et le suffixe pour préciser un caractère en détail, nous avons adopté une démarche pour réduire le nombre de groupes en utilisant uniquement les préfixes. Cette méthode a permis d'aboutir à 16 groupes de Vertisols références (tableau 27). La localisation de ces références est présentée par la figure 57.

Les suffixes qui caractérisent les 82 groupes de sols des Vertisols sont *calcaric*, *humic*, *hyposalic*, *hyposodic*, *pellic* et *chromic*. Les suffixes *calcaric*, *hyposalic* et *hyposodic* sont les plus courants. Du fait que le complexe adsorbant est partout saturé, le suffixe « Eutric » se trouve dans toutes les références des Vertisols. La détermination d'une référence peut être obtenue par un seul suffixe « eutric », par deux suffixes comme « calcaric, hyposodic », par trois suffixes comme « calcaric, hyposalic, hyposodic » ou par l'utilisation de quatre suffixes « calcaric, humic, hyposalic, hyposodic »).

La détermination des 16 Vertisols références est faite par rapport aux préfixes *Calcic*, *Grumic*, *Gleyic*, *Mollic*, *Gypsic* et *Mazic*. Chaque référence peut être déterminée par un, deux au trois préfixes. En effet, nous pouvons trouver une référence avec un seul préfixe comme Calcic Vertisols, avec deux préfixes comme Gleyic Mollic Vertisols et d'autres avec trois préfixes comme Gleyic Gypsic Calcic Vertisols.

Tableau 27. Les 16 groupes de sols référence des Vertisols de l'Algérie et leurs répartitions

Vertisols références	Classification WRB	Nombre de profils	Régions
1	Grumic Mollic Vertisols	29	Batna, Mitidja
2	Calcic Vertisols	21	Annaba, Skikda, M'leta
3	Haplic Vertisols	20	Annaba, Batna, Mitidja, Guelma
4	Grumic Gleyic Vertisols	12	Annaba, Skikda, Mitidja, M'leta-Tlélalt, Guelma
5	Gleyic Calcic Vertisols	10	Annaba, M'leta, M'leta Tlélalt, Mostaganem, Tipaza
6	Grumic Calcic Vertisols	7	Annaba, Skikda, M'leta, Mostaganem
7	Grumic Gleyic Calcic Vertisols	6	Mitidja, M'leta Tlélalt, Mostaganem
8	Gleyic Vertisols	6	Mitidja
9	Gleyic Mollic Vertisols	5	Mitidja, Média, Moyen Chélif
10	Grumic Calcic Vertisols	4	Annaba Skikda, Mitidja, M'leta, Constantine
11	Gleyic Mollic Calcic Vertisols	4	Moyen Chélif, Tipaza
12	Mazic Vertisols	3	Annaba Skikda, Guelma
13	Gleyic Gypsic Calcic Vertisols	3	M'leta Tlélalt
14	Gypsic Calcic Vertisols	1	M'leta
15	Grumic Mollic Gypsic Calcic Vertisols	1	Moyen Chélif
16	Gleyic Mollic Calcic Vertisols	1	Moyen Chélif, Tipaza

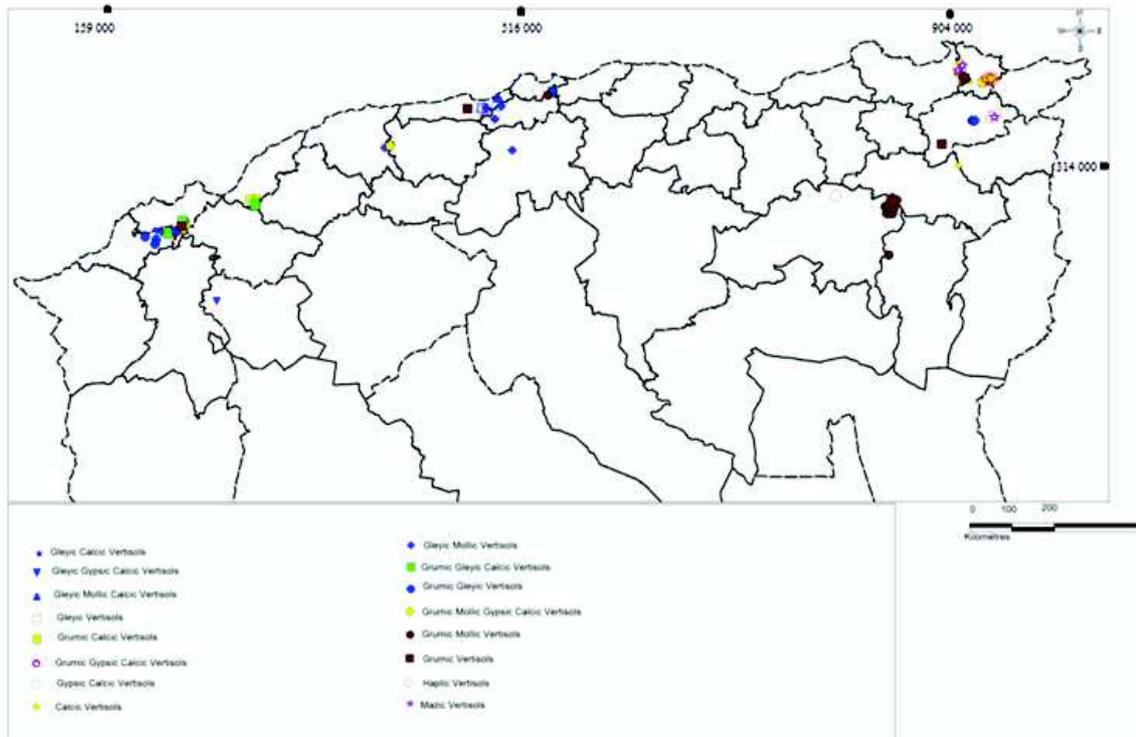


Figure 57. Vertisols références de l'Algérie

L'analyse de la figure 57 révèle que les 133 profils se localisent dans la partie nord avec une distribution hétérogène. Les 16 groupes références des Vertisols sont localisés dans trois zones principales :

1. Zone 1 : les régions de Annaba, Skikda, Guelma et Batna
2. Zone 2 : les régions du Sahel algérois, Mitidja et Médéa
3. Zone 3 : les régions de plaine de Chélif, M'leta et Tlétlat

Cette distribution semble être liée au climat, car tous ces Vertisols se localisent dans l'étage bioclimatique Sub-humide.

La figure 57 indique également que

- les propriétés « Gleyic » sont localisées essentiellement dans la zone 2 et 3
- les propriétés « Mollic » sont localisées essentiellement au sud de la zone 1
- les propriétés « Grumic » sont localisées essentiellement au nord de la zone 1 et la zone 3.

Qualitatif	Définition
Préfixes	
Grumic	Horizon de surface à mulch, ayant une couche de surface dont l'épaisseur est d'au moins 3 cm à structure forte plus fine que granulaire très grossière.
Mazic	Ayant une structure massive et une consistance dure à très dure dans les 20 cm supérieurs du sol.
Gleyic	Présentant un modèle de couleurs gleyiques (ayant un hue Munsell plus rouge que 2,5 Y)
Mollic	Horizon mollique (du L. <i>mollis</i> , doux) est un horizon de surface bien structuré, de couleur foncée, dont la saturation en bases est élevée et la teneur en matière organique modérée à élevée.
Gypsic	Est un horizon non cimenté contenant des accumulations secondaires de gypse sous différentes formes avec une épaisseur d'au moins 15 cm.
Calcic	Ayant un horizon calcique ou des concentrations de carbonates secondaires entre 50 et 100 cm de profondeur.
Suffixes	
Calcaric	Calcaire au moins entre 20 et 50 cm de profondeur.
Humic	Plus de 1 pourcent (en poids) de carbone organique dans la fraction terre fine jusqu'à 50 cm de profondeur.
Hyposodic	Ayant plus de 6 % de ESP dans au moins un sous horizon de plus de 20 cm d'épaisseur endéans les 100 premiers cm du sol.
Hyposalic	Ayant une conductivité électrique de l'extrait à saturation supérieure à 4 dS/m dans au moins un sous-horizon situé endéans les 100 premiers cm du sol.
Eutric	Ayant un taux de saturation en bases égal ou supérieur à 75 pourcent.
Pallic	Ayant dans les 30 cm supérieurs de la matrice du sol une valeur Munsell, à l'état humide, de 3,5 ou moins et un chroma de 1,5 ou moins.
Chromic	Ayant un horizon B dans lequel la majeure partie a un hue Munsell de 7,5YR et un chroma, à l'état humide, supérieur à 4, ou un hue plus rouge que 7,5YR.

Tableau 28. Les qualitatifs (préfixes et suffixes) utilisés

2.3. L'analyse de données

2.3.1. Les données qualitatives

Dans ce qui suit, nous présentons quelques données morphologiques sous forme d'histogrammes de fréquence pour chaque catégorie d'horizons (H1, H2 et Hp). Dans la présente étude nous avons réalisé la fréquence de distribution de la structure, des faces de glissement, de l'hydromorphie et pour deux données générales qui sont la pente et le matériau parental. Les calculs sont effectués pour 133 horizons de surface, 133 horizons de subsurface et 200 horizons de profondeur. Il y a lieu de rappeler que les horizons de profondeur représentent tous les horizons qui se situent au-dessous des horizons de subsurface.

2.3.1.1. La pente

La topographie est un élément important pour comprendre la génèse du sol et ses relations avec les sols voisins (Baize et Jabiol, 1995). Dans notre cas, la pente est très bien renseignée (98,57 %). L'analyse de la figure 58 révèle que les Vertisols étudiés sont situés dans des terrains plats ou de faibles pentes. En effet, 81 % des Vertisols étudiés se situent dans des terrains plats, 10 % dans des pentes de 0 à 2 % et 9 % de ces sols se localisent dans des pentes de 2 à 5 %. Cette topographie correspond généralement aux bas-fonds là où les matières érodées et les sédiments des alluvions se déposent. Ces sols se caractérisent par une texture argileuse et une grande profondeur.

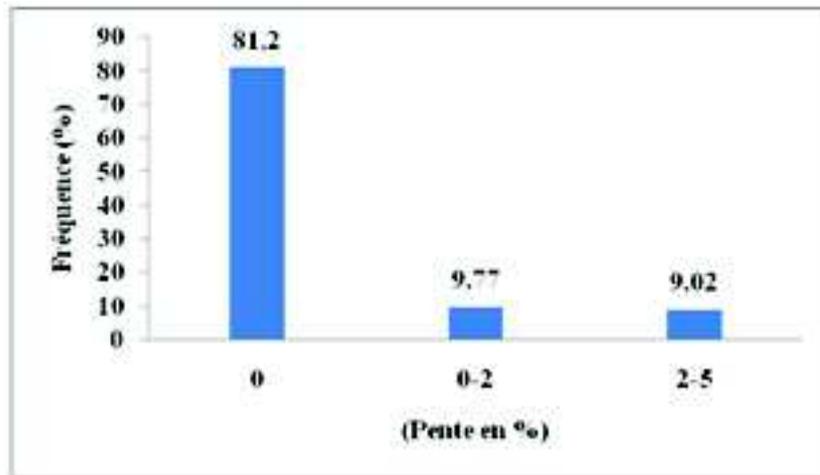


Figure 58. Fréquence des pentes

2.3.1.2. Le matériau parental

La fréquence des différents matériaux parentaux des Vertisols recensés est illustrée par la figure 59.

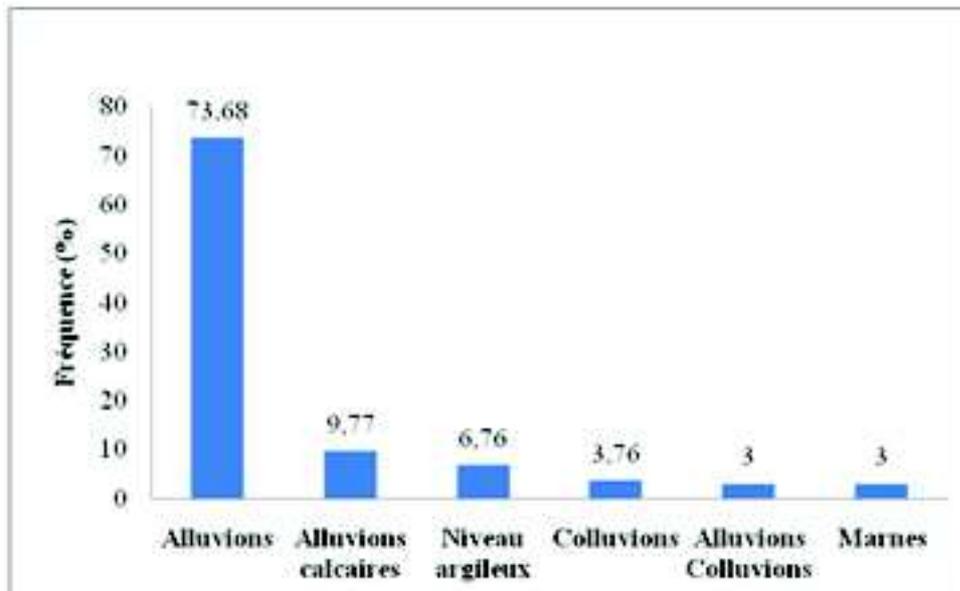


Figure 59. Fréquence des matériaux parentaux

Les Vertisols étudiés ont des origines différentes. En effet, la figure 59 laisse apparaître six matériaux parentaux qui sont des alluvions, des alluvions calcaires, des niveaux

argileux, ainsi que des colluvions, des alluvions-colluvions et des marnes. Les alluvions sont les plus fréquents (73,68 %), les alluvions calcaires se situent en deuxième position (9,77 %), les alluvions-colluvions, les colluvions et les marnes sont les moins fréquents. La grande diversité des Vertisols étudiés (82 Vertisols références) est marquée par la grande diversité des matériaux parentaux.

2.3.1.3. L'hydromorphie

La figure 60 montre que les Vertisols étudiés sont affectés par l'hydromorphie. En effet, l'hydromorphie affecte surtout les horizons de profondeur (21 %) ensuite les horizons de subsurface (6 %) et enfin les horizons de surface (5 %). Ceci s'expliquerait par le fait que les Vertisols étudiés se situent en bas de pente là où les eaux de ruissellement stagnent à cause de la faible perméabilité de ces sols due à leurs forts taux d'argile.

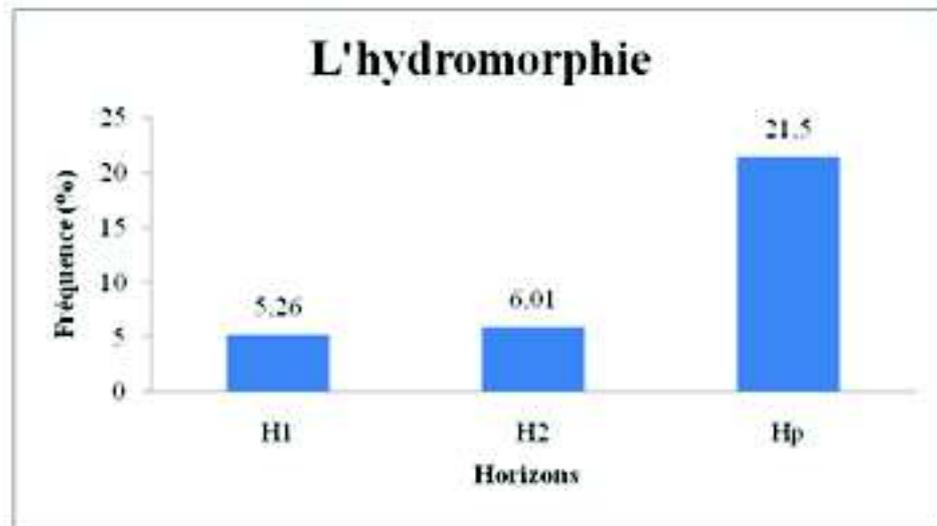


Figure 60. Fréquence de l'hydromorphie par catégorie d'horizons

2.3.1.4. Les faces de glissement

La figure 61 indique que les faces de glissement (Slickensides) se trouvent principalement dans la partie médiane et inférieure des profils. En effet, les mouvements verticaux caractérisent 81 % des horizons de subsurface et 61% des horizons de profondeur. Les horizons verticaux se situent donc principalement dans les horizons de subsurface et de profondeur et concordent bien avec la littérature internationale. Les 3 % des slickensides qui caractérisent les horizons de surface, représentent uniquement les horizons qui sont suffisamment profonds.

D'après Mermut et *al.* (1996), dans les zones semi-arides, il est fréquent d'observer les slickensides dans des profondeurs comprises entre 22 et 65 cm. Par ailleurs, dans les zones subhumides et humides, on les trouve dans des profondeurs comprises entre 31 et 105 cm.

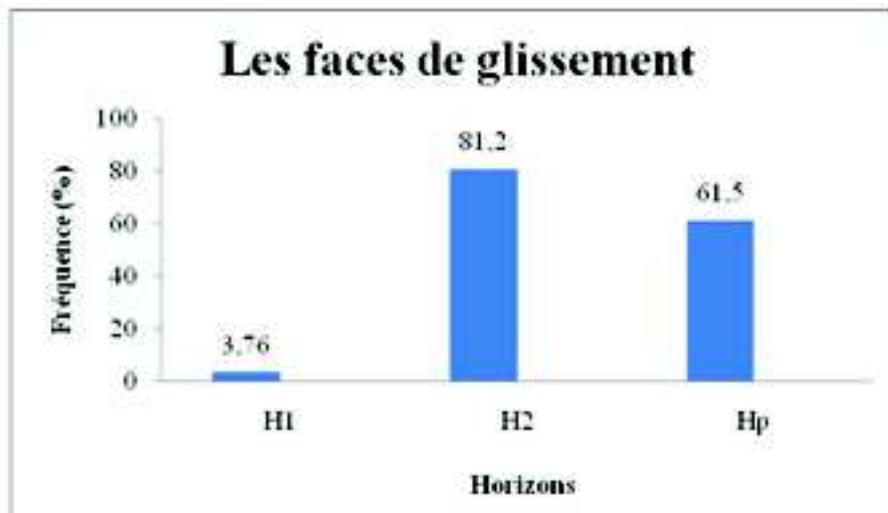


Figure 61. Fréquence de faces de glissement par catégorie d'horizons

2.3.1.5. La structure

La figure 62 présente les différentes structures des horizons des Vertisols étudiés.

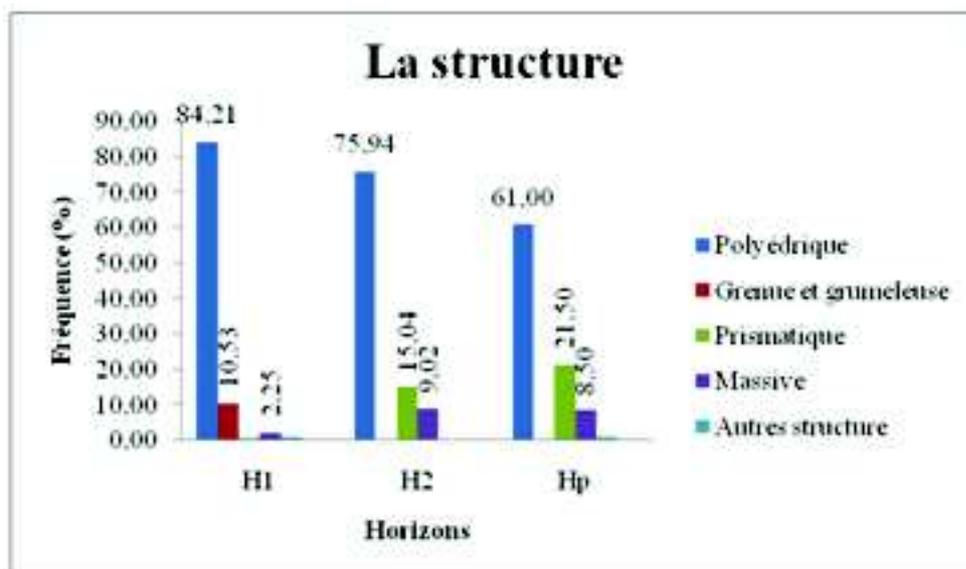


Figure 62. Fréquence de la structure

La figure 62 fait apparaître quatre structures principales : une structure polyédrique, une structure grenue et grumeleuse, une structure prismatique et une structure massive.

La figure 62 montre également que :

- La structure polyédrique est la plus répandue dans les Vertisols étudiés. Elle représente respectivement 84 %, 76 % et 61 % des horizons de surface de subsurface et de profondeur.
- La structure prismatique caractérise uniquement les horizons de subsurface (15,04 %) et de profondeur (21,50 %).
- La structure massive caractérise surtout les horizons de profondeur (8,50 %) ensuite de subsurface (9,02 %) et enfin les horizons de surface (2,25 %).

- La structure grenue et grumeleuse caractérise uniquement les horizons de surface (10,53 %).

Par ailleurs, nous avons recensé d'autres structures comme la structure nuciforme dans les horizons de surface et la structure en plaquettes dans les horizons de profondeur.

2.3.2. Les données quantitatives

Il s'agit, dans un premier temps, de présenter les résultats des statistiques descriptives des différentes variables de la base de données (A%, C %, CaCO₃ %, CEC, ESP, CE, pH, pF 3 et pF 4,2) pour les 133 profils et les catégories d'horizons. Dans un deuxième temps, nous présentons les corrélations simples et multiples de la variable « taux d'argile » uniquement pour les horizons diagnostiques vertiques de la base de données. Les résultats sont portés dans les tableaux 1,2 et 3 de l'annexe 5

2.3.2.1. L'argile

L'étude a porté sur 133 profils et 450 horizons dont 133 horizons de surface, 133 de subsurface et 184 de profondeur.

- Les profils

La figure 63 montre que les Vertisols étudiés ont un taux moyen d'argile de 49 %. Le taux minimal est de 28 % alors que le taux maximal est de 74 %. La figure 63 montre également que 75 % des Vertisols étudiés ont des taux d'argile supérieurs à 42 % et 50 % de ces Vertisols ont des taux supérieurs à 47 %. Le coefficient de variation est moyen, il est de l'ordre de 18 %. Ces résultats indiquent que ces Vertisols sont très fortement argileux (> 40 %) selon les classes proposés par Djili (2000).

- Les horizons

Les taux moyens sont respectivement de 47 %, 50 % et 48 % pour les horizons de surface de subsurface et de profondeur, ils sont égaux aux médianes. En outre, 75 % des horizons ont un taux supérieur à 40 % en surface, à 43 % en subsurface et à 41 % en profondeur. Donc, les différents quartiles montrent que les horizons de subsurface sont légèrement plus argileux que ceux de profondeur qui eux même sont plus argileux que ceux de surface (H2> H p> H1). Le test de comparaison des moyennes (tableau 29) révèle que les différences entre les horizons de surface et ceux de subsurface sont très hautement significatives. En revanche, les différences sont non significatives entre les horizons de surface et ceux de profondeur et entre les horizons de subsurface et ceux de profondeur. Il y a lieu d'indiquer que, à l'exception des minima et les maxima, les autres valeurs des quartiles sont analogues (2 à 3 % de différence).

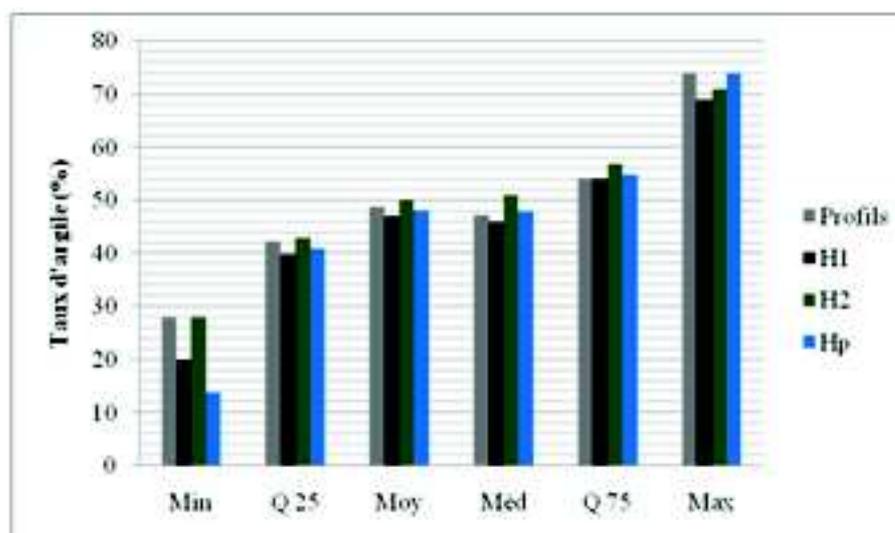


Figure 63. Les paramètres statistiques du taux d'argile dans les profils et dans les horizons

Tableau 29. Comparaison des moyennes de l'argile

	H1-H2	H1-H3	H2-H3
t	-5,30051	1,11603	-1,65917
p	4,35363E-7	0,26521	0,09803
Signification	S.	N.S	N.S

2.3.2.2. La capacité d'échange cationique

Les échantillons proviennent d'un effectif de 133 profils et 326 horizons dont 103 horizons de surface, 103 horizons de subsurface et 120 horizons de profondeur.

· Les profils

L'analyse de la figure 64 révèle que la CEC des Vertisols étudiés varie entre 14 et 52 $\text{Cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$. La figure 64 indique également que 75 % des Vertisols étudiés ont une CEC supérieure à 23 $\text{Cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ et que 25 % des Vertisols ont une CEC supérieure à 33 $\text{Cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$. La CEC moyenne est de 30 $\text{Cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ et elle est très proche à la médiane (28 $\text{Cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$). Ces résultats indiquent que les Vertisols étudiés ont une CEC forte. La variabilité de ce paramètre est moyenne (CV = 24 %).

· Les horizons

La figure 64 révèle que la CEC des Vertisols étudiés varie entre 11 et 52 $\text{Cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ en surface, entre 14 et 55 $\text{Cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ en subsurface et entre 9 et 50 $\text{Cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ en profondeur. La moyenne est de 28 $\text{Cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ de terre environ pour tous les horizons. Les quartiles révèlent que 50 % des échantillons ont une CEC supérieures à 28 $\text{Cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ et que 25 % ont une CEC supérieure à 23 $\text{Cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$. Ces taux reflètent les teneurs élevées en argiles qui ont un effet déterminant sur la CEC. La comparaison des moyennes prises deux à deux

(tableau 30) indique que les différences sont non significatives, donc les Vertisols étudiés ont une CEC élevée et homogène dans le profil.

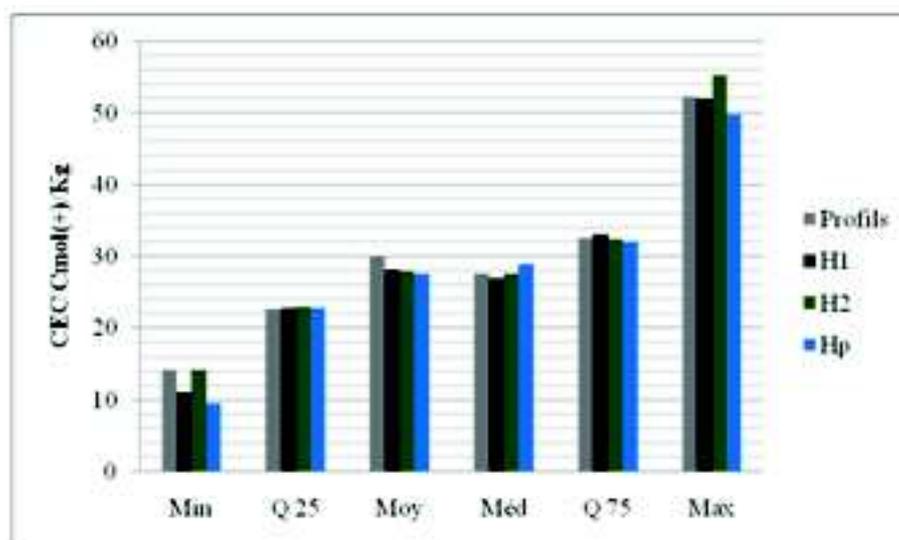


Figure 64. Les paramètres statistiques de la CEC dans le profil et les horizons

Tableau 30. Comparaison des moyennes de la CEC

	H1-H2	H1-H3	H2-H3
t	0,46107	-0,44605	-0,22059
p	0,64566	0,65598	0,8256
Signification	N.S.	N.S.	N.S.

2.3.2.3. Le calcaire total

La figure 65 présente le résultat des paramètres statistiques concernant le calcaire total. Les calculs concernant le calcaire total ont porté sur 133 profils et 466 horizons dont 133 horizons de surface, 133 horizons de subsurface et 200 horizons de profondeur.

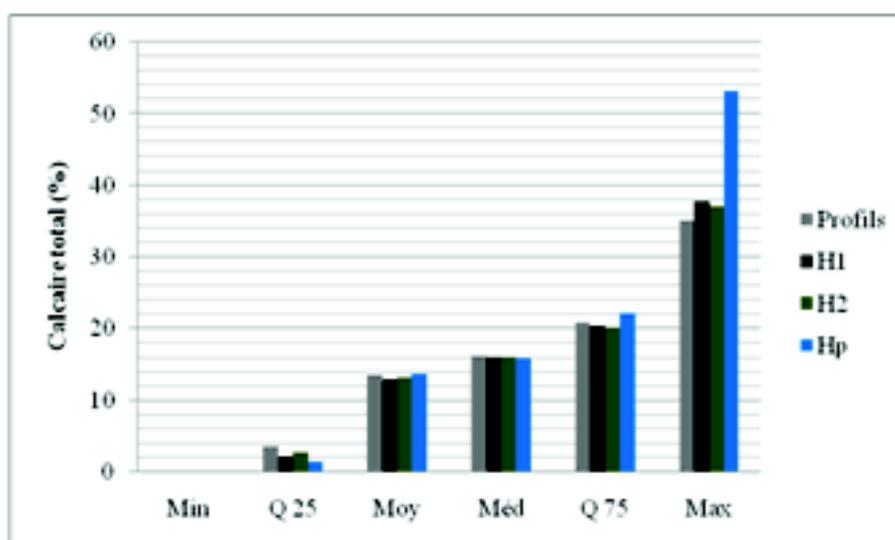


Figure 65. Les paramètres statistiques du calcaire total dans le profil et les horizons

· Les profils

Le taux moyen de calcaire total est de 13 %. Les valeurs extrêmes se situent entre 0 et 35 % d'où un CV (85 %) très élevé. La figure 65 révèle que la moitié des Vertisols ont des taux inférieurs à 16 %, 75 % des Vertisols étudiés ont des taux inférieurs à 21 %. Ces résultats indiquent que les Vertisols étudiés sont faiblement à moyennement pourvus en calcaire.

· Les horizons

La figure 65 révèle que, quelle que soit la catégorie d'horizons, les taux en calcaire total sont très variables. Ils varient de 0 % à 35 % en surface, de 0 % à 38 % en subsurface et de 0 % à 53 % en profondeur. Le coefficient de variation est de 75 % pour les horizons de surface et de subsurface et de 84 % pour les horizons de profondeur. Les quartiles montrent que 75 % des horizons ont des taux de calcaire inférieurs à 20 % et que 50 % des taux inférieurs à 16 %. Les résultats indiquent aussi que le taux moyen de calcaire total est homogène dans le profil (13 % environ quel que soit l'horizon considéré). Cette homogénéité est confirmée par le test de comparaison des moyennes (tableau 31). Ces taux de calcaire seraient liés aux matériaux parentaux (alluvions calcaires).

Tableau 31. Comparaison des moyennes du calcaire total

	H1-H2	H1-H3	H2-H3
t	-1,1546	0,61446	0,3081
p	0,2502	0,53931	0,75819
Signification	N.S.	N.S.	N.S.

2.3.2.4. Le carbone organique

Les calculs des paramètres statistiques concernant le carbone organique ont porté sur un effectif de 133 profils et 416 horizons dont 127 horizons de surface, 127 horizons de subsurface et 162 horizons de profondeur (figure 66).

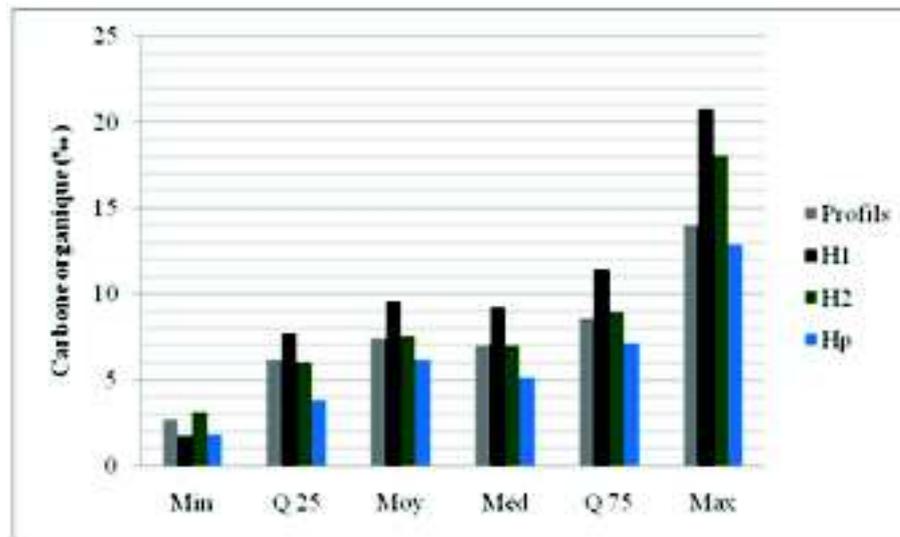


Figure 66. Les paramètres statistiques du carbone organique (‰) dans le profil et les horizons

· Les profils

Le taux du carbone total des Vertisols étudiés varie entre 2,7 ‰ et 14 ‰, d'où une variabilité moyenne de ce paramètre (CV = 40 %). La figure 66 révèle que 75 % des Vertisols étudiés ont un taux de carbone organique inférieur à 8,55 ‰ et 50 % de ces Vertisols ont un taux inférieur à 7 ‰. Ces résultats indiquent que les 133 Vertisols sont peu pourvus en constituants organiques et concordent assez bien avec la bibliographie.

· Les horizons

D'après la figure 66, les horizons de surface ont des taux de carbone organique qui varient entre 1,7 ‰ et 28 ‰, les horizons de subsurface ont des taux compris entre 3,1 ‰ et 18,1 ‰, tandis que les horizons de profondeur ont des taux de carbone organique qui varient entre 1,8 ‰ et 12,9 ‰. En moyenne, le taux est de 9,56 ‰ en surface, de 7,53 ‰ en subsurface et de 6,13 ‰ en profondeur. On remarque aussi que les taux moyens sont proches aux médianes. En effet, 50 % des échantillons ont des taux de carbone organique inférieurs à 9,2 ‰, 7 ‰ et 5,14 ‰ respectivement dans les horizons de surface, de subsurface et de profondeur. Ces résultats indiquent une légère diminution des teneurs du carbone de haut vers le bas du profil. La comparaison des moyennes entre les horizons montre que les différences sont hautement significatives (tableau 32). Ce résultat confirme la diminution des taux du carbone de haut vers le bas, mais la différence reste assez faiblement (d'ordre 1 à 2 ‰) à cause des mouvements vertiques qui homogénéisent le profil. Le coefficient de variation est modéré pour les horizons de surface (CV= 31 %) et de subsurface (CV= 29), par contre il est très fort pour les horizons de profondeur (CV= 95 %).

Tableau 32. Comparaison des moyennes du carbone organique (‰)

	H1-H2	H1-H3	H2-H3
t	9,9437	-6,2917	-2,71841
p	8,11955E-18	1,11412E-9	0,00694
Signification	S.	S.	S.

2.3.2.5. Le pH

Les calculs des paramètres statistiques concernant le pH pour 133 profils et 442 horizons (132 de surface, 132 de subsurface et 178 de profondeur) sont illustrés par la figure 67.

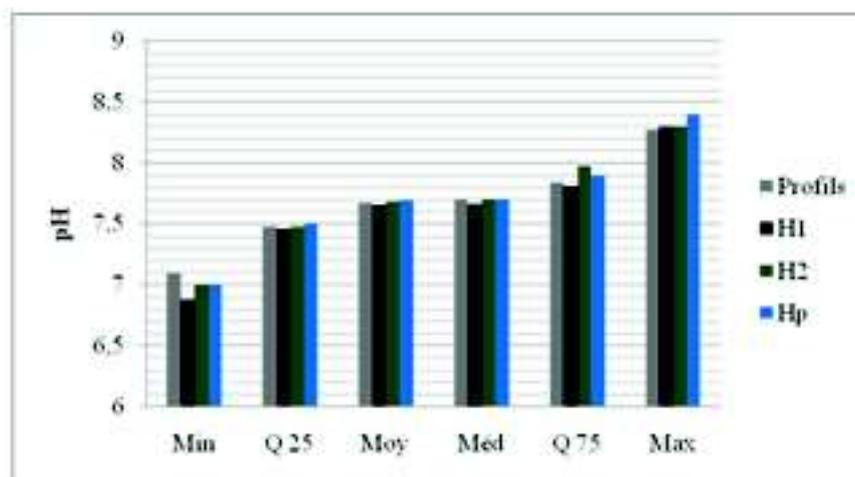


Figure 67. Les paramètres statistiques du pH dans le profil et les horizons

· Les profils

Les 133 Vertisols ont des pH qui oscillent entre 7,1 et 8,27 avec une moyenne de 7,67 très proche de la médiane (7,70). Le coefficient de variation est de 3 %, il y a donc une faible variabilité de ce paramètre. Les résultats révèlent aussi que 75 % des Vertisols étudiés sont caractérisés par un pH supérieur à 7,5. Le pH est légèrement basique et peut être expliqué par la présence du calcaire dont la teneur moyenne est de 13 %. Ces résultats concordent bien avec la littérature, les Vertisols neutres et alcalins sont les plus connus. Ceci est dû au fait que beaucoup d'entre eux sont dérivés de matériaux parentaux calcaires ou riches en bases (Coulombe et *al.*, 1996).

· Les horizons

La figure 67 montre également que le pH est homogène dans le profil. En effet, le pH des horizons de chaque catégorie varie entre 6,9 et 8,4 environ. Les quartiles pour chaque catégorie d'horizons sont égaux. 50 % des horizons étudiés (H1, H2 et Hp) ont un pH supérieur à 7,65. La moyenne est de 7,65 pour les horizons de surface, de 7,68 pour les horizons de subsurface et de 7,69 pour les horizons de profondeur. Le test de comparaison des moyennes montre que la différence est non significative entre les horizons de surface et ceux de profondeur et entre les horizons de subsurface et ceux de profondeur. En revanche, la différence est significative entre les horizons de surface et ceux de subsurface (tableau 33).

Tableau 33. Comparaison des moyennes du pH

	H1-H2	H1-H3	H2-H3
t	-2,27775	1,22126	0,3404
p	0,02429	0,2229	0,73378
Signification	S.	N.S.	N.S.

2.3.2.6. La conductivité électrique

La figure 68 présente les calculs des paramètres statistiques concernant la conductivité électrique. L'étude a porté sur un effectif de 127 horizons de surface, 127 horizons de subsurface et 176 horizons de profondeur.

· Les profils

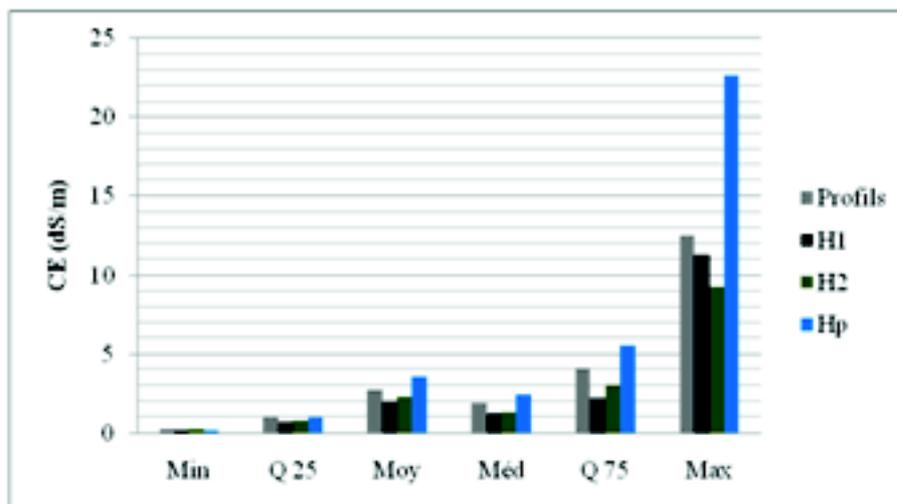


Figure 68. Les paramètres statistiques de la CE dans le profil et les horizons

Les valeurs de la conductivité électrique varient entre 0,2 et 12,51 dS/m avec une moyenne de 2,7 dS/m. les quartiles indiquent que 50 % des Vertisols étudiés ont une CE inférieure à 1,9 dS/m et que 75 % de ces sols ont une CE inférieure à 4,1 dS/m. Ces résultats indiquent que les Vertisols étudiés présentent une faible salinité U.S.S.L (1954). Par ailleurs, le coefficient de variation est de 87 % et témoigne d'une forte variabilité de ce paramètre.

Les horizons

La CE varie de 0,13 à 11,25 dS/m, de 0,2 à 9,25 dS/m et de 0,16 à 22,68 dS/m respectivement pour H1, H2 et Hp. La conductivité électrique est donc très variable (> 100 %). Si on tient la valeur de 4 dS/m comme étant la limite entre les horizons salins et les horizons non salins, les résultats indiquent que 75 % des horizons de surface et de subsurface sont non salins. Les médianes révèlent que 50 % des horizons ont une CE inférieure 4 dS/m pour chaque catégorie d'horizons. Les moyennes indiquent que les horizons de subsurface (2,3 dS/m) et de profondeur (3,53 dS/m) sont plus salins par rapport à ceux de surface (1,97 dS/m). Le test de comparaison des moyennes indique que les différences sont significatives entre les horizons (tableau 34). Globalement, les horizons des 133 Vertisols ont une faible salinité (U.S.S.L, 1954) et le profil salin moyen est de type descendant.

Tableau 34. Comparaison des moyennes de la CE

	H1-H2	H1-H3	H2-H3
t	-2,74388	4,37486	3,22708
p	0,00704	1,69488E-5	0,00139
Signification	S.	S.	S.

2.3.2.7. Le taux de sodium échangeable

La figure 69 présente les calculs des paramètres statistiques concernant le taux de sodium échangeable. Les calculs ont porté sur 133 profils et 326 horizons dont 103 horizons de surface, 103 horizons de subsurface et 120 horizons de profondeur.

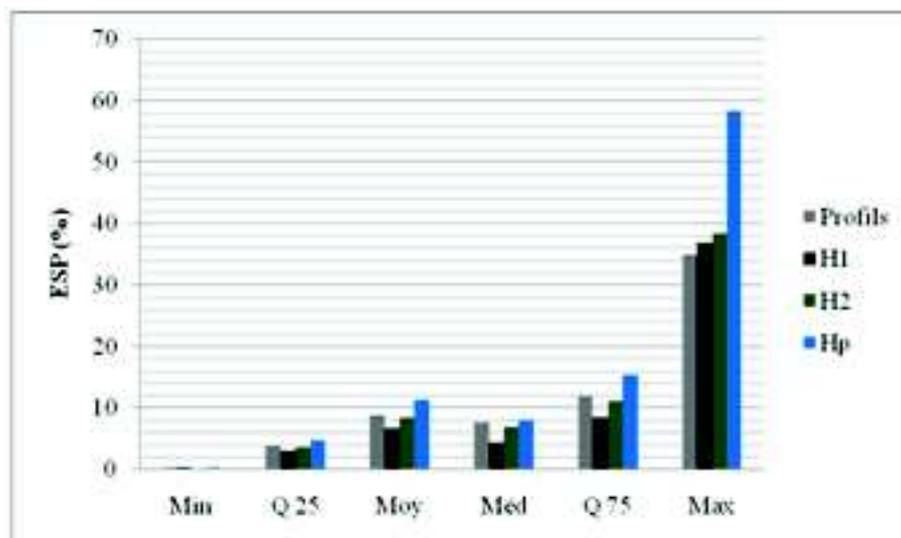


Figure 69. Les paramètres statistiques du taux de sodium échangeable dans le profil et les horizons

· Les profils

Les valeurs de l'ESP pour les 133 Vertisols sont comprises entre 0 et 35 %, elles traduisent une forte variabilité de ce paramètre (CV = 75 %). Selon la classification de la sodicité (U.S.S.L, 1954), 75 % des Vertisols étudiés sont non sodiques (ESP < 15 %). Il ressort aussi que la moyenne de l'ESP est de 9 %.

· Les horizons

L'analyse de la figure 69 indique que quelle que soit la catégorie d'horizons, les valeurs de l'ESP varient de la classe non sodique vers la classe excessivement sodique. En effet, le taux minimal est inférieur à 1 % pour chaque catégorie d'horizon, tandis que le taux maximal est de 35 % pour les horizons de surface, de 37 % pour les horizons de subsurface et de 58 % pour les horizons de profondeur. Les quartiles révèlent que 75 % des horizons ont un ESP inférieur à 8 % en surface, 11 % en subsurface et 15 % en profondeur. La comparaison des moyennes prises deux à deux indique que les différences sont significatives (tableau 35). Ce résultat indique que d'une façon globale, il y a un léger accroissement de la sodicité du haut vers le bas du profil (profil sodique moyen descendant). Par ailleurs, le coefficient de variation est supérieur à 80 %. Ce résultat confirme celui de Djili (2000) qui a montré que 75 % des sols du Nord d'Algérie sont faiblement à très faiblement sodiques avec une légère augmentation de la sodicité en profondeur, et de Touaf (2002) qui a montré que la majorité des sols du Nord d'Algérie sont peu ou non sodiques.

Tableau 35. Comparaison des moyennes des ESP

	H1-H2	H1-H3	H2-H3
t	-3,21123	4,19276	2,47762
p	0,00174	3,92187E-5	0,01394
Signification	S.	S.	S.

2.3.2.8. La rétention en eau à pF 4,2

L'étude a porté sur 133 profils et 177 horizons dont 57 horizons de surface et de subsurface et 63 horizons de profondeur. Comparativement aux autres paramètres étudiés, le nombre d'horizons analysés est réduit, ceci est dû à la difficulté d'analyse et à l'objectif de l'étude concernée.

· Les profils

L'analyse de la figure 70 fait ressortir que l'humidité au point de flétrissement permanent varie entre une valeur minimale de 12 % et une valeur maximale égale à 29 %, la moyenne étant de 19 %. Les quartiles indiquent que 75 % des Vertisols étudiés ont une humidité pondérale à pF 4,2 supérieure à 20 %. Ces résultats sont analogues à ceux de Zemmouri (2006) qui a trouvé une humidité pondérale à pF 4,2 moyenne (17,11 %) pour des textures argileuses dans les Vertisols de la Mitidja (154 horizons). Par ailleurs ce paramètre est faiblement variable (CV = 20 % environ).

· Les horizons

La figure 70 indique également que les taux d'humidité varient entre 9 % et 30 % en surface, entre 9 % et 31 % en subsurface et entre 9 % et 32 % en profondeur. En moyenne, le taux d'humidité au pF 4,2 est de 18 %, 19 % et 19 % pour respectivement H1, H2 et Hp. Les taux moyens diffèrent très peu de ceux de la médiane. Il ressort aussi que 75 % des échantillons ont un taux d'humidité supérieur à 16 %. La comparaison des moyennes révèle que la

différence entre les horizons de surface et de subsurface est très hautement significative. Par contre, la différence est non significative entre les horizons de surface et celles de profondeur et entre les horizons de subsurface et ceux de profondeur (tableau 36).

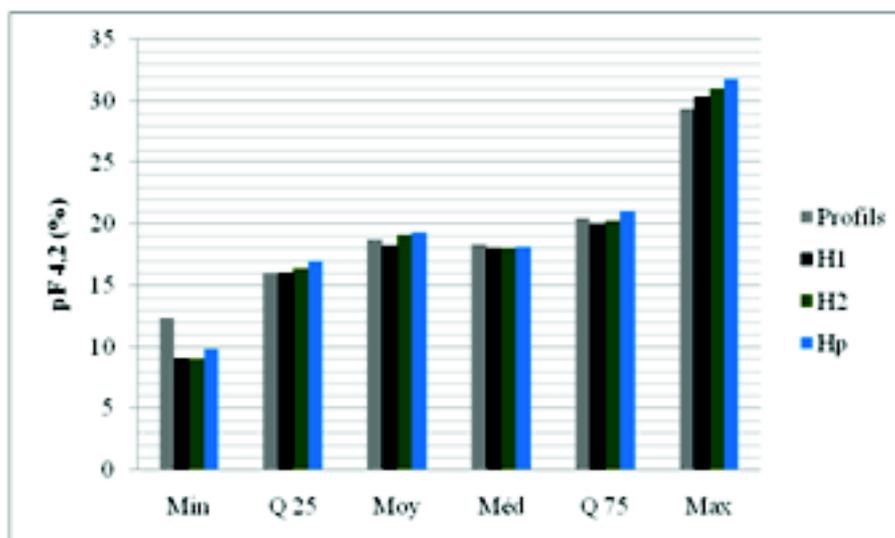


Figure 70. Les paramètres statistiques de capacité de rétention en eau à pF 4,2

Tableau 36. Comparaison des moyennes de la rétention en eau à pF 4,2

	H1-H2	H1-H3	H2-H3
t	-3,24594	1,21886	0,08764
p	0,00193	0,22523	0,9303
Signification	S.	N.S.	N.S.

2.3.2.9. La rétention en eau à pF 3

La figure 71 présente les différents calculs statistiques concernant l'humidité pondérale au pF 3.

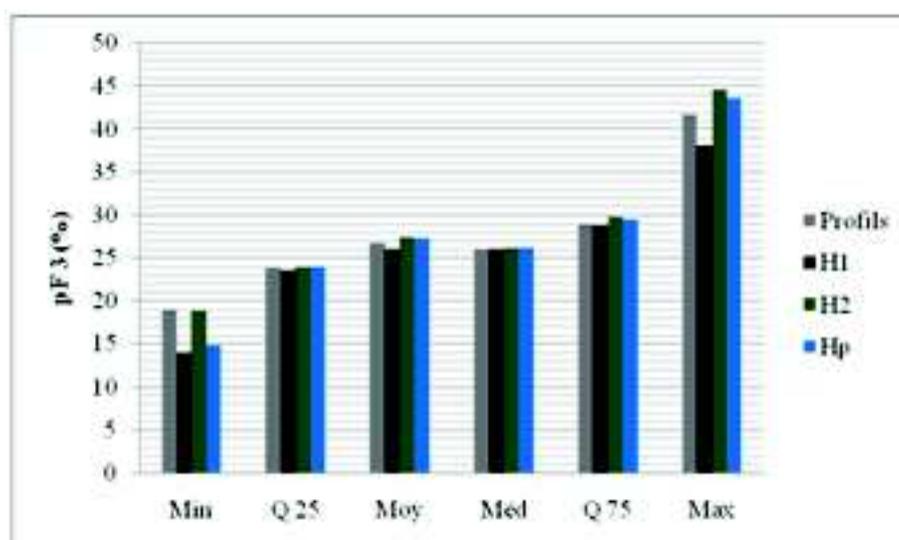


Figure 71. Les paramètres statistiques de capacité de rétention en eau à pF 3

- Les profils

L'examen de la figure 71 révèle que l'humidité pondérale à la capacité de rétention (pF 3) est comprise entre 19 et 42 % avec une moyenne de 27 % pour les 133 profils. Il ressort que 75 % des Vertisols étudiés ont une humidité pondérale supérieure à 24 % au pF 3.

- Les horizons

Le taux d'humidité moyen est autour de 27 % pour chaque catégorie d'horizons. Les quartiles révèlent que quelle que soit la catégorie d'horizons, 50 % des échantillons ont un taux d'humidité pondérale à la capacité de rétention (pF 3) supérieur à 26 % et que 75 % des échantillons ont un taux supérieur à 23 %.

La comparaison des moyennes indique que les différences sont non significatives entre les catégories des horizons prises deux à deux (tableau 37).

Ces résultats révèlent que la teneur en eau est moyenne à cause des taux élevés d'argile et sa distribution dans le profil. Ce paramètre est faiblement variable dans l'espace (CV = 17 %). De même, la variabilité de ce paramètre est faible au sein des horizons, le coefficient de variation est inférieur à 20 % pour toutes les catégories d'horizons. Ces résultats confirment celui de Zemmouri (2006) qui a trouvé une teneur moyenne de 23 % déterminée sur un effectif de 111 horizons de Vertisols.

Tableau 37. Comparaison des moyennes de la rétention en eau à pF 3

	H1-H2	H1-H3	H2-H3
t	-1,34944	0,10994	-0,15615
p	0,18304	0,91265	0,87619
Signification	N.S.	N.S.	N.S.

2.4. Les corrélations

A ce niveau, l'étude statistique n'a porté que les 138 horizons diagnostiques vertiques. Il s'agit d'étudier la relation entre les taux d'argile et quelques paramètres pédologiques (pH, CE, C%, CaCO₃%, CEC, ESP, pF 3 et pF 4,2).

2.4.1. Les corrélations simples

Le tableau 38 représente la matrice de corrélation simple entre les taux d'argile et quelques paramètres pédologiques pour les 138 horizons vertiques.

L'analyse du tableau 38 révèle que les taux d'argile sont corrélés positivement avec la CE ($r = 0,22$) et le taux de calcaire total ($r = 0,24$) et l'ESP ($r = 0,42$). Par ailleurs, ces taux sont inversement proportionnels au pH ($r = -0,29$) et aux taux d'humidité au pF 3 ($r = -0,29$). Toutes ces relations sont statistiquement significatives à hautement significatives. Cependant, la corrélation au carbone organique, la CEC et les taux d'humidité au pF 4,2 n'est pas statistiquement significative.

Tableau 38. Matrice de corrélation entre le taux d'argile et les paramètres étudiés pour les horizons vertiques

	pH	CE	C‰	CaCO ₃ %	CEC Cmol + .kg ⁻¹	ESP	pF 4,2	pF 3
A%	-,2868	,2178	,0326	,2446	,1530	,4237	-,1749	-,2921
	N=135	N=129	N=129	N=138	N=102	N=102	N=58	N=50
	p=,001	p=,013	p=,714	p=,004	p=,125	p=,000	p=,189	p=,040

2.4.1.1. Le taux d'argile-CE

La relation entre le taux d'argile et la CE est positive et statistiquement significative ($p < 0,05$; $r = 0,22$) comme le montre la figure 72. L'équation de régression obtenue est la suivante :

$$CE = 0,43 + 0,06 A \%$$

Ce résultat concorde bien avec celui de Touaf (2002) qui a montré une corrélation positive et très hautement significative entre le taux d'argile et la conductivité électrique pour les sols du Nord de l'Algérie. Sur la base de ce résultat, les horizons vertiques les plus argileux sont plus salins, mais il faut noter que la majorité de ces horizons ont une CE inférieure à 4 dS/m. L'analyse du nuage de points montre que pour un même taux d'argile, il y a des valeurs de CE différentes. Ceci est confirmé par un faible coefficient de corrélation. Ceci peut s'expliquer par les conditions du milieu (présence de la nappe, évaporation intense). Selon Daoud (1993), les fortes teneurs en argiles, en particulier les argiles fines, et l'absence d'un réseau de drainage provoquent l'accumulation des sels apportés par les eaux d'irrigation en raison de leur forte capacité de rétention en eau.

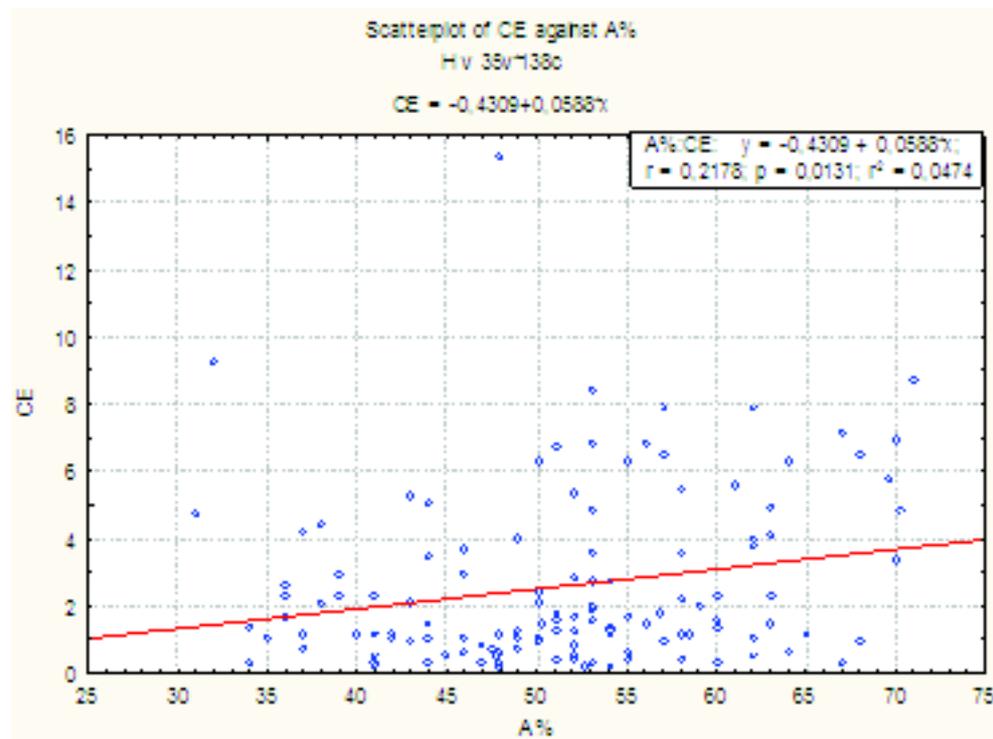


Figure 72. Corrélation entre le taux d'argile et la CE

2.4.1.2. Le taux d'argile-ESP

La figure 73 montre que la corrélation entre les taux d'argile et les taux de sodium échangeable est positive et très hautement significative ($r = 0,42$; $p < 0,001$). L'équation

de régression est de type $ESP = 8,69 + 0,34 A\%$. Par ailleurs, Touaf (2002) a montré que l'augmentation de la salinité dans les sols du Nord d'Algérie induit la sodicité. De plus, ces Vertisols se localisent dans des milieux fermés (mauvais drainage), ce qui explique l'augmentation du taux de sodium échangeable en fonction du taux d'argile.

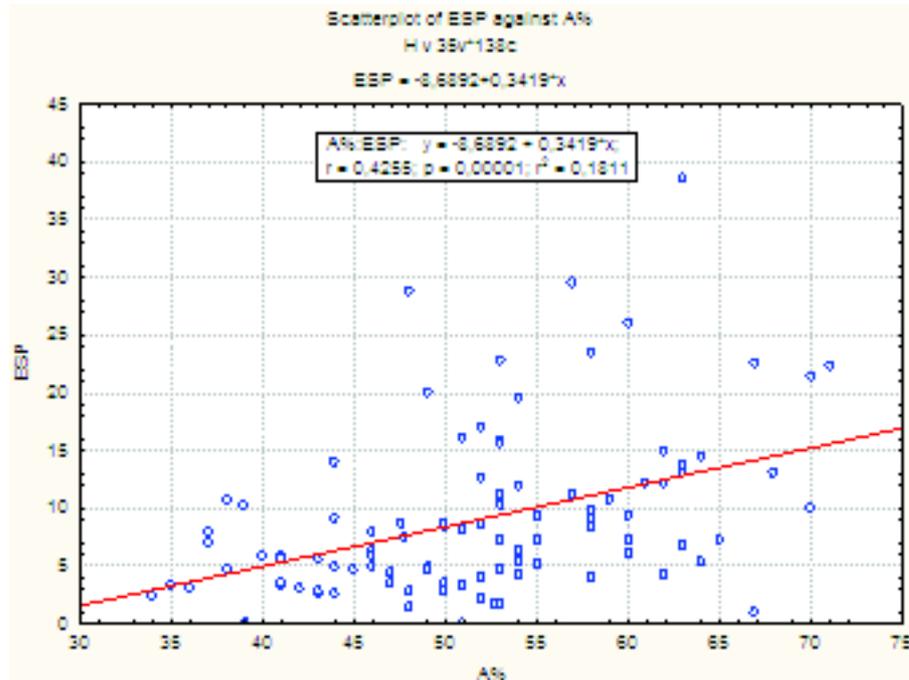


Figure 73. Corrélation entre le taux d'argile et le taux de sodium échangeable

2.4.1.3. Le taux d'argile- $CaCO_3\%$

La figure 74 illustre la relation linéaire entre les taux d'argile et le calcaire total des horizons vertiques.

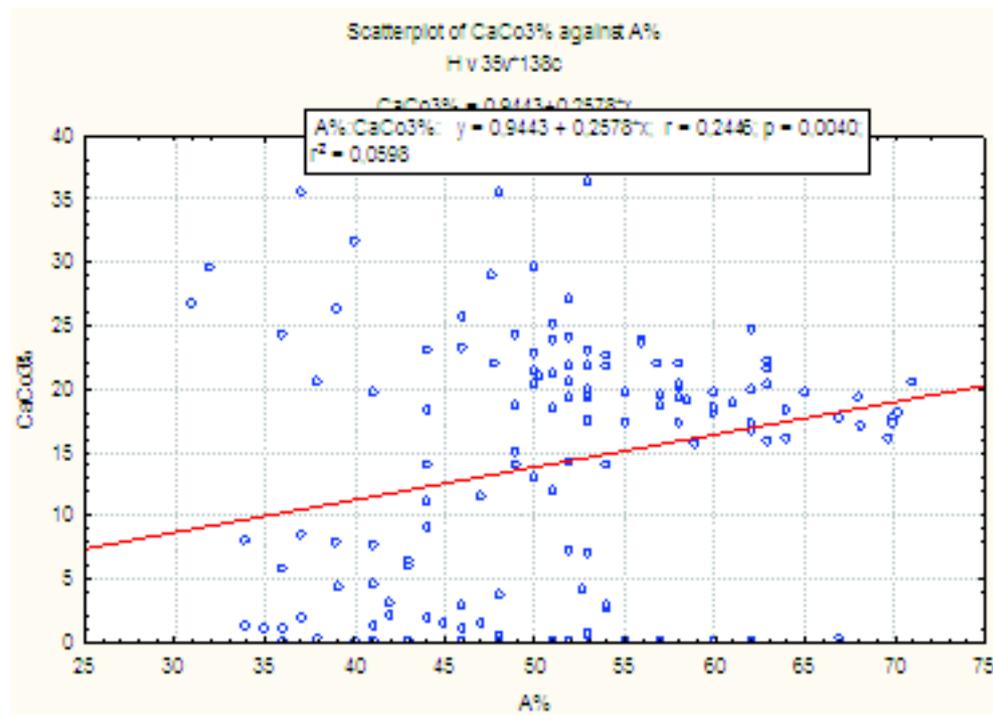


Figure 74. Corrélation entre les taux d'argile et les taux de calcaire total

L'analyse de la figure 74 montre qu'il y a une tendance à l'augmentation des taux de calcaire quand les taux d'argile augmentent avec une relation hautement significative ($r = 0,24$; $p = 0,004$). L'équation de la régression est de type **CaCO₃ % = 0,9443 + 0,2578 A %**. Cependant, le nuage de points montre qu'aux forts taux d'argile peuvent correspondre de faibles taux de calcaire total quand on dépasse le seuil de 15 %. Ce phénomène est illustré par la figure 75 dont le coefficient de corrélation montre une relation très hautement significative ($r = -0,56$; $p < 0,001$). L'équation de la régression linéaire est de type **CaCO₃ % = 36,7921 - 0,2821 A %**. Sur la base de ces résultats, on déduit que les horizons vertiques les plus argileux sont les plus pourvus en calcaire, mais lorsque le taux de calcaire augmente dans le sol ($\text{CaCO}_3 \% \geq 15 \%$), le taux d'argile diminue. Ce résultat rejoint celui de Djili (2000) qui a mis en évidence une corrélation négative entre les taux d'argile et le taux de calcaire total pour les sols du Nord de l'Algérie.

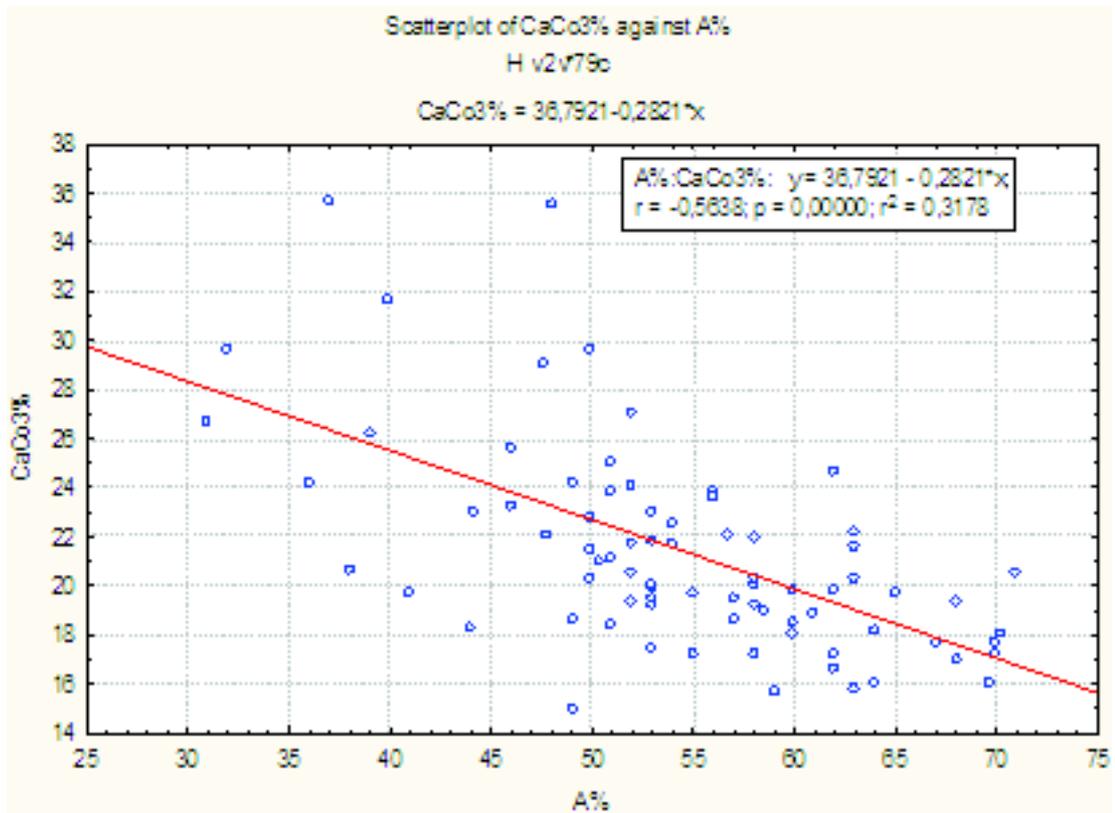


Figure 75. Corrélation entre les taux d'argile et les taux de calcaire total supérieurs à 15 %

2.4.1.4. Le taux d'argile-pF 3

La corrélation entre les taux d'argile et les teneurs en eau au pF 3 des horizons vertiques est illustrée par la figure 76.

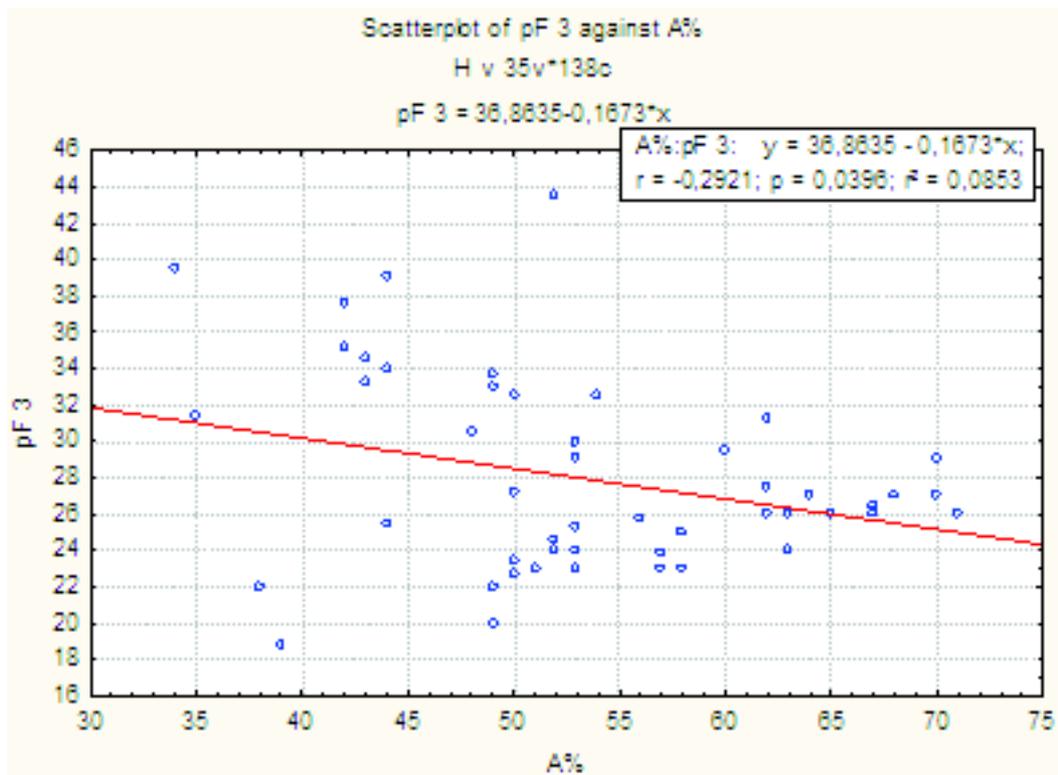


Figure 76. Relation entre les taux d'argile et la teneur en eau à pF 3

La courbe de tendance révèle une diminution progressive de l'humidité quand les taux d'argile augmentent. La figure 76 fait ressortir un nuage de points plus ou moins dispersé mais la relation est négative et statistiquement significative ($r = -0,29$; $p = 0,04$). La droite de régression est de type **pF 3 = 36,8635 – 0,1673 A%**. Ce résultat est en contradiction avec la littérature. On sait que le taux d'argile et leur minéralogie, en particulier le pourcentage des argiles gonflantes, ont un effet positif sur la rétention en eau (Duchaufour, 1995). De plus, Zemmouri (2006) a montré le rôle important de la fraction fine du sol (argile et limon fin) dans la rétention de l'eau aux bas potentiels pour des Vertisols de la Mitidja. Ce phénomène est bien illustré par la figure 77 qui indique que les horizons vertiques les plus argileux ont les teneurs en eau les plus élevées à pF 3, mais la relation est non significative. Ce phénomène serait lié aux caractéristiques du milieu. Ainsi, Ceci peut être expliqué par le fait que les horizons vertiques les plus argileux seraient les plus tassés.

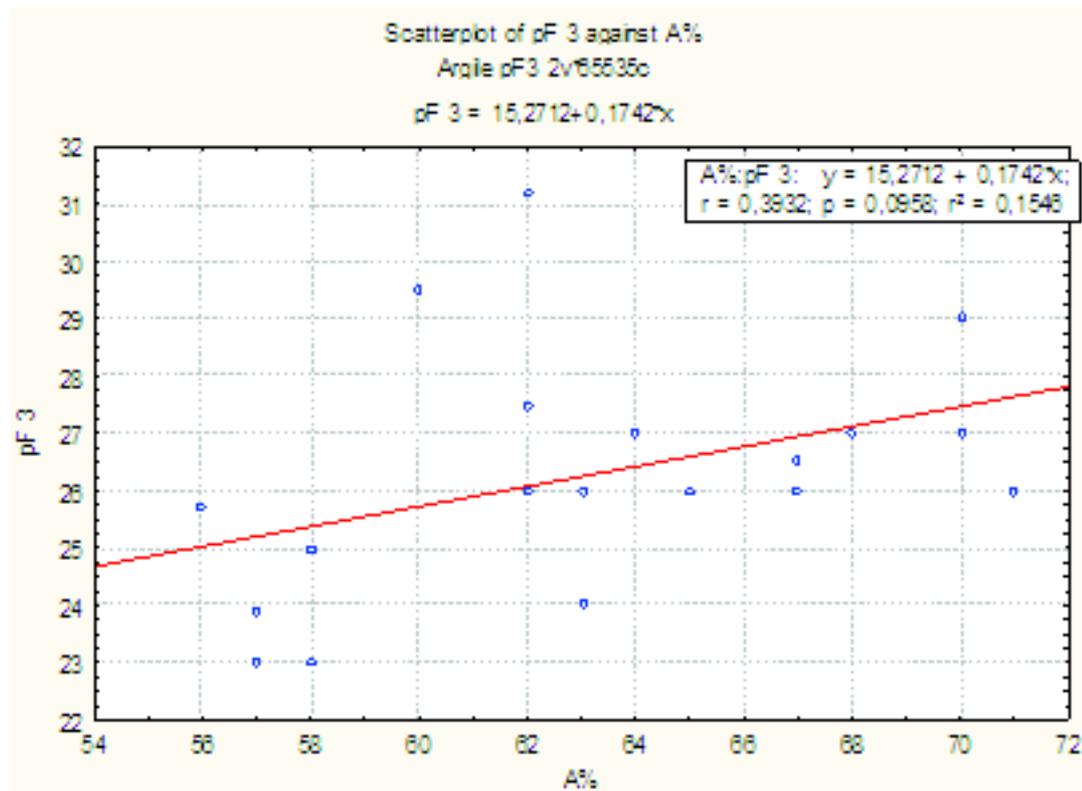


Figure 77. Relation entre les taux d'argile supérieurs à 55 % et la teneur en eau à pF 3

2.4.2 Les régressions multiples

Pour effectuer des prédictions des taux d'argiles (variable dépendante) en fonction des paramètres pédologiques (variables indépendantes), nous nous sommes basé sur deux étapes :

- Analyse en composantes principales (ACP) pour choisir les variables indépendantes.
- Sélectionne de l'équation de régression la plus significative (R^2 le plus élevé).

2.4.2.1. : L'analyse en composantes principales

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode d'analyse de données multi-variées et quantitatives. Elle permet de décrire et d'explorer les relations qui existent entre plusieurs variables simultanément. Cette méthode nous a permis de déterminer les variables qui sont en relation avec les taux d'argile selon le plan factoriel (1-2) (figure 78).

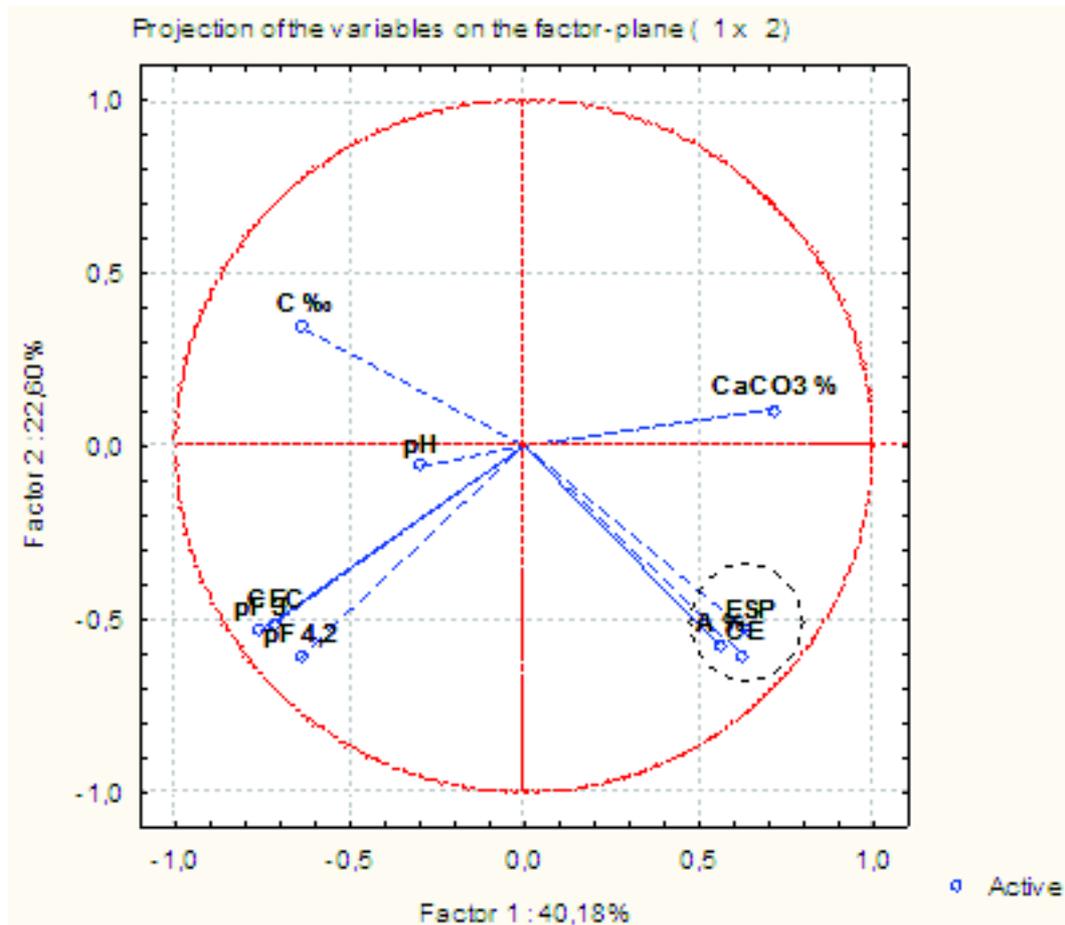


Figure 78. Corrélation entre les variables sur le plan 1-2

L'analyse de la figure 78 révèle que le plan formé par les deux axes explique 62,78 % de la variance totale (F1 explique 40,18 % de la variation totale et F2 explique 22,60 % de la variation totale). A l'exception du pH, les autres variables sont bien représentées car elles sont proches de la circonférence. Le taux d'argile est corrélé avec la CE, l'ESP et le taux de calcaire total.

2.4.2.2 :Détermination de l'équation de la corrélation multiple

Le résultat de l'ACP sert à construire des fonctions de pédotransfert des taux d'argile. Donc la CE, le taux du calcaire et le taux de sodium échangeables sont considérés comme des variables indépendantes et le taux d'argile comme une variable dépendante.

Le traitement a été effectué à partir de 96 horizons vertiques. Le résultat des calculs et les équations de régressions multiples sont présentés dans le tableau 39.

Equation d'études	Equations de régressions	r	R ²	p
CE, ESP	A%= 0,27 CE+ 0,43 ESP +47,37	0,41	0,17	< 0,001
CE, CaCO ₃	A%= 0,87 CE +0,21 CaCO ₃ % + 46,68	0,37	0,14	< 0,001
ESP, CaCO ₃	A%= 0,16 CaCO ₃ % +0,43 ESP + 45,68	0,44	0,19	< 0,001
ESP, CE, CaCO ₃	A%= 0,24 CE +0,16 CaCO ₃ % +0,37 ESP + 45,58	0,44	0,19	< 0,001

Tableau 39. Résultats de régressions multiples

Le tableau 39 révèle que toutes les combinaisons sont des relations très hautement significatives. L'équation de la régression multiple retenue est celle qui présente le coefficient de détermination (R^2) le plus élevé. Donc, l'équation f (ESP, CaCO_3) ($R^2=0,44$) et f (ESP, CaCO_3 , CE) ($R^2=0,44$) sont les plus intéressantes. Il ressort que la CE n'a pas amélioré la prédiction des taux d'argile (tableau 40 et 41). De ce fait, le modèle sélectionné est

	Observed	Predicted	Residual	Standard	Standard	Std.Err.	Mahalanobis	Deleted	Cook's
Minimum	34,00000	46,13680	-17,2908	-1,57044	-2,20399	0,813977	0,03998	-18,6928	0,000006
Maximum	71,00000	65,77483	20,8632	3,66073	2,66176	3,442524	17,33578	21,7963	0,142189
Mean	52,03229	52,03229	0,0000	0,00000	0,00000	1,304336	1,97917	-0,0552	0,011885
Median	52,00000	51,87330	-0,6992	-0,04235	-0,08921	1,166680	1,11534	-0,7103	0,004776

Tableau 40. Valeurs prévues et résidus de la régression multiple pour la fonction de pédotransfert $A \% = f(\text{ESP}, \text{CaCO}_3)$

$$A\% = 0,16 \text{ CaCO}_3 \% + 0,43 \text{ ESP} + 45,68$$

Ce modèle signifie que le taux d'argile des horizons vertiques est caractérisé par le taux du calcaire total et le taux de sodium échangeable. D'autre part, l'effet de l'ESP est plus important que celui du calcaire total (tableau 42).

	Observed	Predicted	Residual	Standard	Standard	Std.Err.	Mahalanobis	Deleted	Cook's
Minimum	34,00000	46,05361	-16,9465	-1,57846	-2,15495	0,876927	0,19173	-18,9786	0,000000
Maximum	71,00000	64,51511	20,9464	3,29565	2,66359	4,665380	32,44630	21,8900	0,512477
Mean	52,03229	52,03229	0,0000	0,00000	0,00000	1,484739	2,96875	-0,0907	0,014790
Median	52,00000	51,89140	-0,4880	-0,03720	-0,06206	1,390163	1,97916	-0,4964	0,004217

Tableau 41. Valeurs prévues et résidus de la régression multiple pour la fonction de pédotransfert $A \% = f(\text{ESP}, \text{CaCO}_3, \text{CE})$

Variables	Equation de régressions simples	r	R^2
CE	$A\% = -2,0912 + 0,089 \text{ CE}$	0,30	0,09
ESP	$A\% = -8,0811 + 0,3323 \text{ ESP}$	0,40	0,16
CaCO_3	$A\% = -0,2937 + 0,2938 \text{ CaCO}_3 \%$	0,26	0,07

Tableau 42. Résultats de régression simples

3-Synthèses des résultats

Le travail réalisé a porté sur deux volets principaux. Dans le premier, il s'agit d'identifier et d'étudier les Vertisols références de la Mitidja. Dans le deuxième, il s'agit de construire une base de données pédologique et d'identifier les Vertisols références de l'Algérie.

En ce qui concerne le premier volet la description morphologique a montré que les trois Vertisols étudiés ont une même morphologie générale. Les trois sols ont un horizon de surface avec une structure polyédrique grossière, des horizons médians avec une structure polyédrique grossière à prismatique et un horizon de profondeur (horizon C) avec une structure massive. Ils sont argileux, très plastiques et compacts. Ces sols se caractérisent par deux processus pédogénétiques, la vertisolisation et l'hydromorphie. En

effet, ils comportent tous des fentes de retraits larges (jusqu'à 4 cm de largeur en surface) et profondes (plus de 50 cm), de nombreuses faces de glissement obliques (slickensides) et des signes d'hydromorphie (taches d'oxydo-réduction, concrétions ferromanganiques) en profondeur. Selon la classification CPCS (1967) (classification morphogénétique), ces caractéristiques suggèrent que ces sols sont des Vertisols hydromorphes à drainage externe nul ou réduit de type Ap/Bss(g)/Cg(ss).

Les analyses au laboratoire ont montré que la texture est dominée par les argiles (29 % < Argile < 63 %) et les limons fins (22% < Limon fin < 53 %) ce qui leur a conféré une CEC assez élevée de l'ordre de $26 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$. Les résultats ont montré aussi que ces sols sont légèrement basiques ($7,4 < \text{pH} < 8$) et sont moyennement pourvus en matière organique (1 % < MO % < 4%), notamment dans leurs horizons de surface (MO \approx 3 %). Ils sont peu à moyennement calcaire (3 % < CaCO_3 % < 17 %). Le complexe adsorbant est saturé par les ions Ca^{++} et Mg^{++} . La CE est négligeable (CE < 0,5 dS/m).

Les analyses ont montré également que la densité apparente des sols étudiés est assez forte ($1,6 < d_a < 1,8$) ce qui explique les faibles porosités ($25 < \text{Pt}\% < 31$). La conductivité hydraulique est assez lente ($1,1 < K \text{ cm/h} < 1,3$) à cause des forts taux d'argile. En ce qui concerne les propriétés hydriques, les résultats ont montré que, quel que soit le pF considéré, les teneurs en eau sont fortes et varient très peu dans le profil. Le sol perd très vite son eau quand on passe du pF0 au pF1,9. Ici, il s'agit des macropores qui se vident très rapidement. En revanche, la vidange est très progressive et très peu sensible aux variations des potentiels quand on passe progressivement du pF1,9 au pF4,2. La gamme de pores concernée par ce phénomène serait constituée surtout de micropores. Les forts taux d'argiles de ce sol et sa densité apparente élevée confortent cette hypothèse. En ce qui concerne les propriétés mécaniques des sols étudiés, les limites d'Atterberg montrent que ces sols se caractérisent par une plasticité moyenne à élevée. Par ailleurs, l'indice COLE est élevé ($0,28 < \text{COLE} < 0,48$) ce qui indique que ces Vertisols ont une potentialité de gonflement et de retrait très élevée.

L'analyse du complexe argilo-humique a révélé que la distribution des taux d'argile est homogène dans le profil avec un partage équitable entre les taux d'argiles fines et d'argiles grossières. Les argiles fines sont complètement dépourvues de calcaire et leur CEC est d'environ $100 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$ et qui seraient donc de type smectitique. En revanche, les argiles grossières contiennent du calcaire mais à des taux très faible ce qui contribue probablement à la diminution de leur CEC qui serait, d'après les résultats obtenus, de types illitique-smectitique. Les résultats ont montré aussi que les taux de matière organique sont moyens et que leur distribution est homogène dans le profil. La MO liée à la fraction colloïdale est très faible et elle contribue très peu à la CEC. Le fractionnement de la matière organique a montré que l'humine est la fraction organique la plus dominante. Les taux de calcaire dans la fraction colloïdale sont extrêmement faibles et ils se situent majoritairement dans les fractions granulométriques limoneuses ou plus grossières.

Les statistiques ont montré que les teneurs en eau et les propriétés mécaniques des Vertisols étudiés sont influencés par les taux d'argiles. En effet, les taux d'argiles sont significativement corrélés aux différents pF mesurés ($p < 0,01$) et aux limites d'Atterberg ($p < 0,01$). Par ailleurs, les taux d'argiles sont proportionnels à la matière organique et inversement proportionnels aux taux du calcaire total.

Le suivi de l'évolution des fentes de retrait au terrain a révélé que le sol étudié a une potentialité de gonflement-retrait élevée. En effet, la formation des fentes de retrait est liée

aux taux d'humidité. En période humide, nous avons observé la formation de fissures fines (2 mm de largeur) alors qu'en période sèche, nous avons remarqué la formation de fentes larges qui atteignent une largeur de 5 cm et une profondeur de plus de 50 cm. Ces résultats sont confirmés par l'indice COLE et la CEC des argiles, en particulier les argiles fines, qui montrent la présence des argiles de caractère gonflant. Par ailleurs, les statistiques ont montré l'influence des taux d'humidité sur la formation de ces fentes de retrait. En effet, la corrélation est très hautement significative entre les taux d'humidité d'un part et les largeurs et les profondeurs des fentes de retrait d'autre part. En revanche, le suivi du microrelief gilgai a montré que la variation des horizons de surface est très faible. Ceci serait dû à la quantité de pluie tombée pendant la période de suivi et qui n'a pas été suffisante pour humidifier les horizons vertiques pour provoquer des mouvements vertiques. Ceci est bien confirmé par le suivi du profil hydrique qui a montré que les variations des taux d'humidité sont plus fortes en surface (15 %) qu'en profondeur (5%). D'autre part, l'étude de profil hydrique a indiqué que le fonctionnement hydrique est conditionné par les caractéristiques des argiles gonflantes.

D'après tous ces résultats, les trois sols étudiés sont regroupés en deux références selon le système de classification WRB (FAO, 2006), (1) Gleyic Vertisols eutric (P1 et P2) et (2) Haplic Vertisols eutric (P3).

En ce qui concerne le deuxième volet de cette recherche, la construction de la base de données des Vertisols références, nous nous sommes basé sur les critères diagnostiques de la WRB (FAO, 2006). En effet, 202 profils des Vertisols selon CPCS (1967) ont été intégrés dans un logiciel Excel pour les besoins des requêtes. Ceci a permis de déterminer 133 Vertisols références selon le système de classification WRB (FAO, 2006). La qualification de ces 133 Vertisols références a permis de déterminer 82 groupes références. L'utilisation des préfixes a permis de déterminer 16 groupes références. Les suffixes *calcaric*, *hyposalic* et *hyposodic* sont les plus courants. Ainsi, le suffixe *eutric* caractérise tous les groupes. Les préfixes qui caractérisent les 16 groupes sont *calcic*, *grumic*, *gleyic*, *mollic*, *gypsic* et *mazic*. La spatialisation de ces 16 groupes des Vertisols références a indiqué que ce type de sol se localise dans la partie nord avec une distribution hétérogène. Elle a montré aussi que les propriétés « Gleyic » se localisent essentiellement dans la partie centre et ouest (Sahel, Mitidja, Médéa, plaine de Chélif, M'leta et Tlélât), que les propriétés « Mollic » se situent essentiellement dans la partie est-sud (Guelma et Batna) et que les propriétés « Grumic » se trouvent essentiellement dans la partie est et ouest (Annaba, Skikda, Guelma, Batna, plaine de Chélif, M'leta et Tlélât).

Le calcul des fréquences de distribution pour les 133 Vertisols a révélé que 81 % de ces Vertisols sont situés dans des terrains plats ou de faibles pentes et que 74 % sont développés sur des alluvions. Par ailleurs, l'hydromorphie affecte beaucoup plus les horizons de profondeur (21 %) que de subsurface (6 %) ou de surface (5 %). Les slickensides caractérisent surtout les horizons de subsurface (81 %) et de profondeur (61 %). En ce qui concerne la fréquence de distribution de la structure, le calcul a montré que les structures polyédrique et prismatique sont les plus courantes. En effet, la structure polyédrique caractérise 84 % des horizons de surface, 76 % des horizons de subsurface et 61 % des horizons de profondeur. Pour la structure prismatique, elle caractérise 15 % des horizons de subsurface et 21 % des horizons de profondeur.

Les résultats obtenus ont montré aussi que les 133 Vertisols étudiés sont très argileux (49 % en moyenne), faiblement à moyennement pourvus en calcaire (< 21 %), peu pourvus en carbone organique (0,7 % en moyenne), légèrement basiques (7,67 en moyenne) et qu'ils ont en moyenne une CEC de $30 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$. Les résultats ont montré également que la CE est inférieure à 4 dS/m pour 75 % des ces Vertisols mais avec un coefficient de

variation très élevée (CV = 87 %). Ils sont faiblement à très faiblement sodiques et 75 % de ces Vertisols ont des ESP inférieurs à 9 %. Les teneurs en eau à pF 3 et pF 4,2 sont élevées, elles sont en moyenne respectivement égales à 27 % et 19 %.

Les traitements statistiques sont également réalisés pour les catégories d'horizons (les horizons de surface (H1), les horizons de subsurface (H2) et les horizons de profondeur (Hp)). Les résultats ont montré que, mis à part les minima et les maxima, la différence entre les quartiles est de l'ordre de quelques pourcents qui traduit une homogénéisation des profils. En effet, les résultats ont indiqué que les taux d'argile sont en moyenne de 47 %, 50 % et 48 % respectivement pour les H1, H2 et Hp. La CEC est en moyenne de $28 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$ pour chaque catégorie d'horizons. Les valeurs du calcaire totale est autour de 13 %. En moyenne les horizons de surface sont légèrement plus organiques (0,9 %) que ceux de subsurface (0,7 %) ou de profondeur (0,6 %). La CE est inférieure à 4 dS/m pour chaque catégorie d'horizons. L'ESP est inférieur à 11 %. Enfin, les teneurs en eau sont en moyenne égales à 19 % à pF 4,2 et à environ de 27 % à pF 3.

Les statistiques ont montré également que, les taux d'argiles des horizons diagnostiques (138 horizons) sont significativement corrélés au pH ($r = -0,29$; $p = 0,01$), à la CE ($r = 0,22$; $p < 0,05$), au calcaire total ($r = 0,24$; $p < 0,01$), à l'ESP ($r = 0,42$; $p < 0,001$) et à la rétention en eau à pF 3 ($r = -0,29$; $p < 0,05$). Par ailleurs, l'application de la régression multiple a indiqué que les taux d'argiles des horizons vertiques sont liés aux taux du calcaire total et l'ESP.

Conclusion générale

L'objectif principal de travail est d'étudier les Vertisols références. Pour ce faire, nous avons, d'abord caractérisé et classé trois Vertisols dans la plaine de la Mitidja. En second lieu, nous avons construit une base de données pédologique des Vertisols références d'Algérie selon la classification WRB (FAO, 2006).

Les Vertisols références étudiés sont de type Ap/Bg/Bgss/Cgss, Ap/Bss/Bgss/Cg ou Ap/B/Bss/Cgss. La description morphologique a montré que les trois Vertisols sont très argileux, collants et très plastiques. Ceci est confirmé par l'analyse granulométrique qui a montré que les teneurs en argiles peuvent atteindre des taux supérieurs à 60 %. La présence des faces de glissement et des fentes de retrait conforte ce résultat.

Les teneurs élevées en fractions argileuses et leur caractère de gonflement influencent le comportement mécanique et hydrique de ces sols étudiés. En effet, les valeurs des limites d'Atterberg et de l'indice de plasticité sont très élevées. De plus, les valeurs de l'indice COLE confirment une présence de taux élevés d'argiles gonflantes. Ceci explique la forte teneur en eau aux différents pF.

L'étude du complexe argilo-humique a montré qu'il ya un phénomène d'homogénéisation du profil. Les résultats ont montré que la distribution des argiles est homogène dans le profil. Les résultats ont montré également que ces trois Vertisols ont une forte CEC (en moyenne $26 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$) qui est due essentiellement aux argiles fines qui sont de type smectitique. La MO contribue très peu à la CEC et la MO liée à la fraction colloïdale est très faible.

Le suivi des fentes de retrait et du microrelief gilgai au terrain a mis en évidence l'influence des taux d'humidité sur les largeurs et les profondeurs des fentes de retrait. Il a montré aussi que la variation d'humidité est plus importante en surface qu'en profondeur. Les résultats ont montré également que la variation du microrelief gilgai est très faible.

Selon la classification WRB (FAO, 2006) les trois Vertisols constituent deux groupes références Haplic Vertisols eutric et Gleyic Vertisols eutric.

Concernant la base de données pédologique, nous avons construit une base de données relative aux Vertisols références de 133 profils. Les résultats ont montré que ces Vertisols sont développés essentiellement sur des alluvions. Ils se trouvent dans des pentes nulles ou très faibles. L'hydromorphie caractérise essentiellement les horizons de subsurface et de profondeur.

Les 133 profils sont très argileux ($28 \% < A\% < 74\%$). La CEC varie entre 14 et $52 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$. Ils sont peu calcaires (CaCO_3 % moyenne = 13 %) et peu pourvus en MO (MO % moyenne = 0,7 %). Le pH est alcalin. La CE est très variable dans l'espace ($0,2 \text{ dS/m} < \text{CE} < 12,5 \text{ dS/m}$). Ils sont peu ou non sodiques (ESP moyenne = 8 %). Les taux moyens d'humidité au pF 3 et pF 4,2 sont respectivement de 27 % et 19 %. Par ailleurs, les taux d'argiles des horizons vertiques sont corrélés positivement au taux de calcaire, à la CE et au taux de sodium échangeable. Par contre, ils sont corrélés négativement aux taux d'humidité au pF 3. Pour ce qui est des régressions multiples, les résultats ont indiqué

que les taux d'argiles des horizons diagnostiques sont liés aux taux de calcaire total et aux taux de sodium échangeable.

La qualification des 133 Vertisols références a permis de déterminer 82 groupes références. L'utilisation uniquement des préfixes a permis de déterminer 16 groupes références. Les préfixes qui caractérisent les 16 groupes références sont calcic, grumic, gleyic, mollic, gypsic et mazic. La spatialisation de ces 16 groupes références a indiqué que leur distribution est hétérogène et ils sont localisés dans la partie nord du pays.

Cette étude constitue une contribution à la connaissance des Vertisols d'Algérie. Pour mieux comprendre la pédogénèse de ces sols, nous préconisons d'étudier des Vertisols dans des zones environnementales différentes et d'étudier leur minéralogie et micromorphologie. Pour le suivi des fentes de retrait, il serait utile de quantifier l'évolution de ces fentes dans un cycle annuel en suivant le développement des largeurs et des profondeurs des mêmes fentes.

Il serait également utile d'enrichir de données par d'autres Vertisols avec une distribution spatiale homogène pour permettre mieux évaluer leurs caractéristiques et donc de compléter les différentes références et de choisir leurs paramètres de cartographie les plus pertinents.

Références Bibliographiques

- A.N.R.H., 1970.** Etude agro-pédologique de la Mitidja Est, échelles 1/ 20 000.
- Ahmad N., 1996.** Occurrence and distribution of Vertisols. In: Vertisols and technologies for their management. Development in Soil Science 24, Elsevier, pp. 1-36.
- Anderson J. U., Elfadil F. K., Connor G. A. O, 1973.** Factors Affecting the Coefficient of Linear Extensibility in Vertisols. Soil Science Society of America Journal, V. 37, pp. 296-299.
- Arai S., Hatta T., Tanaka U., 1996.** Characterization of the organic components of an Alfisol and a Vertisol in adjacent locations in Indian semi-arid tropics using optical spectroscopy, ^{13}C NMR spectroscopy, and ^{14}C dating. Geoderma, V.69, p.p.59-70.
- Astatke Abiye, Mohamed Saleem M.A., 1998.** Effect of different cropping options on plant-available water of surface-drained Vertisols in the Ethiopian highlands. Agricultural Water Management, V.36, p.p.111-120.
- Baize D., Jabiol B., 1995.** Guide pour la description des sols. INRA Éditions, France, 374 p.
- Bégin P., Naud D., 2007.** Fentes de retrait du sol et amas de fumier. Revue de littérature. Agriculture, Pêcheries et Alimentation, Québec, 33 p.
- Bensaad H., 2008.** Caractérisation de quelques sols de la région d'Alger par les limites d'Atterberg. Mém. Ing., INA, Alger, 55 p.
- Bensaid A., Malevantchouk A., Trea Benyamina K., 1974.** Etude agro-pédologique de la plaine de la M'eltha- Tlelat. Echelle 1/50 000.
- Blanchart E., Achouak W., Albercht A., 2000.** Déterminants biologiques de l'agrégation dans les Vertisols des Petites Antilles. Etude et gestion des sols, V. 7, n 4, pp. 329-352.
- Bliet L., 1972.** Périmètre du moyen Chélif : Etude agro-pédologique de la plaine de Warnier. Echelle 1/50 000.
- Boivin P., Garnier P., Tesier D., 2004.** Relationship between clay content, clay type, and shrinkage properties of soil samples. Soil Sci. Soc. Am. J., V. 68, pp. 1145-1153.
- Bouabid R., Badraoui M., Bloom R., 1991.** Potassium fixation and charge characteristics of soil clays. Soil Sci. Am. J., V. 55, pp. 1493-1498.
- Boufeloussa C., 2000.** Etude agro-pédologique de la plaine de Annaba ouest. Echelle 1/20 000.
- Boulaine J., 1978.** Les Vertisols des bassins tertiaires méditerranéens et leur érosion. Options méditerranéens, n.25, pp. 43-47.
- Boulaine J., 1980.** Pédologie appliquée. Masson, Paris, 220 p.

- Bouma J., Loveday J., 1988.** Characterizing soil water regims in swelling clay soils. In: Vertisols: properties, classification and management. Texas A and M University press, pp. 83-96.
- Bühmann C., Schoeman J.L., 1995.** A mineralogical characterization of Vertisols from the northern regions of the Republic of South Africa. *Geoderma*, V.66, pp. 239-257.
- Bureau des études du milieu et de l'hydraulique (BEMH), 2004.** Etude agro-pédologique de la plaine d'Henkouche (wilaya de Annaba et Skikda). Echelle 1/20 000.
- C.P.C.S., 1967.** Classification des sols. Ed. I.N.R.A, Paris, 96 p.
- Cabidoche Y.-M., Guillaume P., Hartmann C., 2000.** Déterminants biologiques du système poral de Vertisols cultivés (Petites Antilles). *Etude et gestion des sols*, V. 7, n. 4, pp. 329-352.
- Cabidoche Y.-M., Voltz M., 1995.** Non-uniform volume and water content changes in swelling clay soil: II. A field study on a Vertisol. *European Journal of Soil Science*, V. 46, pp. 345-355.
- Chao-Sheng T., Yu-Jun C., Anh-Minh T., Bin S., 2010.** Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils. *Engineering Geology*, V.114, pp. 261-266.
- Cheng Y., Pettry D.E., 1993.** Horizontal and vertical movements of two expansive soils in Mississippi. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, V. 57, pp. 1542-1547.
- Cornlis W.M., Cornly J., Medim H., 2006.** Measuring and modelling the soil shrinkage characteristics curve. *Geoderma*, V. 137, pp. 179-191.
- Coulombe Clement E., Dixon J.B., Wilding L.P., 1996.** Mineralogy and chemistry of Vertisols. In: *Vertisols and technologies for their management. Development in Soil Science 24*, Elsevier, pp. 115-188.
- Crescimanno G., Provenzano G., 1999.** Soil shrinkage characteristic curve in clay soils: Measurement and prediction. *Soil Sci. Am. J.*, V. 63, pp. 25-32.
- Dabin B., 1976.** Méthode d'extraction et de fractionnement des matières humiques du sol : Application à quelques études pédologiques et agronomiques dans les sols tropicaux. *Cah. ORSTOM Ser. Ped.*, V. XIV, n. 4, pp. 287-297.
- Daoud Y., 1993.** Contribution à l'étude des sols des plaines du Chélif. Le phénomène de salinisation, conséquences sur les propriétés physiques des sols argileux. Thèse Doc. Etat, INA, Alger, 227 p.
- Deckers J., Spaargaren O., Nachtergaele F., 2001.** Vertisols: Genesis, properties and soilscape management for sustainable development. In: *The sustainable management of Vertisols*. International water management Institute (IWMI), Thailand, CABI Publishing, pp. 3-21.
- Djebaba M., 1999.** Etude agro-pédologique de la plaine des Bordjas (wilaya de Mostaganem). A.N.R.H., échelle 1/20 000.
- Djebrani M., 1985.** Etude agro-pédologique de la région de Ben Chicao (Média) : Evaluation des propriétés physiques des sols. Thèse d'ingénieur, INA, Alger, 97 p.

- Djellal M., 1993.** Contribution à la cartographie des régions humides (bassin versant du lac Oubeira –El Kala): Essai de caractérisation biochimique et physique de deux tourbières. Thèse d'ingénieur, INA, Alger, 131 p.
- Djili K., 2000.** Contribution à la connaissance des sols du nord de l'Algérie. Création d'une banque de données informatisées et utilisation d'un système d'information géographique pour la spatialisation et la valorisation des données pédologiques. Thèse de Doct. Etat, I.N.A., Alger, 243 p.
- Dosag G.S., Acton D.F., Mermut A.R., De Jong E., 1988.** Shrink-swell potential and cracking in clay soils of Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.*, V. 68, pp. 251-260.
- Dridi B., Alkama N., Daoud Y., 2010.** Influence de la taille des agrégats sur le comportement physique et hydrique d'un Vertisol de la Mitidja (Algérie). *Sciences et Technologie C*, n. 32, pp. 31-36.
- Driese Steven G., Jacobs Joseph R., Nordt Lee C., 2003.** Comparison of modern and ancient Vertisols developed on limestone in terms of their geochemistry and parent material. *Sedimentary Geology*, V.157, pp. 49-69.
- Driese S. G., Mora C.I., Stiles C. A., 2000.** Mass balance reconstruction of a modern Vertisol: implications for interpreting the geochemistry and burial alteration of paleo-Vertisols. *Geoderma*, V. 95, pp. 179-204.
- Duchaufour P., 1970.** Précis de pédologie, 3^{ème} ed. Edition Masson, Paris, 448 p.
- Duchaufour P., 1977.** Pédogenèse et classification. Edition Masson, Paris, 477 p.
- Duchaufour P., 2001.** Introduction à la science du sol (sol, végétation, environnement). DUNOD, Paris, 331p.
- Dudal R., 1967.** Sols argileux foncés des régions tropicales et subtropicales. FAO, 176 p.
- Dudal R., Eswaran H., 1988.** Distribution, properties and classification of Vertisols. In: *Vertisols: properties, classification and management*. Texas A and M University press, pp. 1-22.
- Ecrément Y., 1971.** Etude agro-pédologique de la plaine de la Mitidja. A.N.R.H., échelle 1/50 000.
- Elias E.A., Salih A.A., Alaily F., 2001.** Cracking patterns in the Vertisols of the Sudan Gezira at the end of dry season. *International Agrophysics*, V.15, pp.151-155.
- FAO, 2006.** World Reference Base for Soil Resources: A framework for international classification, correlation and communication. Food and Agriculture organization of the nations, Rome, 128 p.
- Favre F., Boivin P., Wopereis M.C.S., 1997.** Water movement and soil swelling in a dry, cracked Vertisols. *Geoderma*, V. 78, pp. 113-123.
- Franzmeier D. P., Ross S. J., 1968.** Soil Swelling: Laboratory Measurement and Relation to Other Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal*, V. 32, pp. 573-577.
- Hajek B. F., 1979.** COLE determination by Thermomechanical Analysis. *Soil Science Society of America Journal*, V. 43, pp. 427-428.

- Hallaire V., 1988.** La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement : I. description in situ. *Agronomie*, V. 8, n. 2, pp. 139- 145.
- Hallberg George R., 1977.** The Use of **COLE** Values for Soil Engineering Evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, V. 41, pp. 775-777.
- Hamdi Aissa B., 1988.** Contribution à la cartographie des sols de la zone de Ain El-Kebira (Mascara) : Etude de la relation sol géomorphologie. Thèse d'ingénieur, INA, Alger, 106 p.
- Hammoum A., 2005.** Etude agro-pédologique de la plaine de la Mleta. Echelle 1/25 000.
- Hati K.M., Mandal K.G., Misra A.K., Ghosh P.K., Bandyopadhyay K.K., 2006.** Effect of inorganic fertilizer and farmyard manure on soil physical properties, root distribution, and water-use efficiency of soybean in Vertisols of central India. *Bioresource Technology*, V.97, pp. 2182-2188.
- Hubble G.D., 1984.** The cracking clay soil: definition, distribution, nature, genesis, and use. In: *Vertisols and technologies for their management. Development in Soil Science 24*, Elsevier, pp. 43-58.
- Hussein J., Adey M.A., 1995.** Changes of structure and tilling mellowing in a Vertisol due to wet/dry cycles in the liquid and vapour phases. *European Journal of Soil Science*, V. 46, pp. 357-368.
- Hussein J., Adey M.A., 1998.** Changes in microstructure, voids and b-fabric of surface samples of a Vertisol caused by wet/dry cycles. *Geoderma*, V.85, pp. 63-82.
- I.N.C.T., 2000.** Comgéo : Support informatique de représentation des limites géographiques de l'Algérie: «Segmentation en wilayat ou en commune» Ed. Institut National de Cartographie et Télédétection., Alger - Algérie.
- Iftene L., 1999.** Etude agro-pédologique du Sahel Algérois. A.N.R.H., échelle 1/20 000.
- ISRIC, 2002.** Procedures for soil analysis. International Soil Reference and Information Centre, Food and Agriculture Organization of United Nations, The Netherlands, 21-1p.
- Kapur S., Karaman C., Akra E., 1997.** Similarities and differences of the spheroidal microstructure in Vertisols from turkey and Israel. *Catena*, V.28, pp. 297-311.
- Karathanasis A. D., Hajek B. F., 1985.** Shrink-Swell Potential of Montmorillonitic Soils in Udic Moisture Regimes. *Soil Science Society of America Journal*, V. 49, pp. 159-166.
- Kheyar M.O., 1986.** Contribution à l'étude comparative d'un tracteur à roues et d'un tracteur à chenilles : influence sur le tassement du sol. Thèse de Magister, INA, Alger, 81p.
- Khresat A., Taimeh A.H., 1998.** Properties and characterization of Vertisols developed on limestone in a semi-arid environment. *NCE journal of Arid Environments*, V.40, pp. 235-244.
- Kishné A. Sz., Morgan C.L.S., Miller W.L., 2009.** Vertisols cracks extent associated with gilgaï and soil moisture in the Texas Gulf coast prairie. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, V. 73, pp. 1221-1230.

- Konrad J.M., Ayad R., 1997.** Desiccation of Sensitive Clay: Field Experimental Observations. *Canadian Geotechnical Journal*, n. 34, pp. 929-942.
- Kovda I.V., Wilding L.P., Drees L.R., 2003.** Micromorphology, submicroscopy and microprobe study of carbonate pedofeatures in a Vertisol gilgaï soil complex, South Russia. *Catena*, V.54, pp. 457-476.
- Kovda I., Mora C.I., Wilding L.P., 2006.** Stable isotope compositions of pedogenic carbonates and soil organic matter in a temperate climate Vertisol with gilgaï, southern Russia. *Geoderma*, V. 136, pp. 423-435.
- Kribaa M., 1983.** Contribution à la cartographie des sols de Corso et étude géomorphologique des surfaces plaines entre Zemmouri et Corso (W. d'Alger). Thèse d'ingénieur, INA, Alger, 86 p.
- Legros J.P., 1996.** Cartographies des sols. De l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Romandes, Presses Polytechniques et universitaires, 301p. (Collection Gérer l'Environnement).
- Legros J.P., Falipou P., Dunand D. F., 1992.** Vérification de la qualité de l'information dans les bases de données de sol. *Science du sol*, V. 30, n. 2, pp 117-131.
- Lezzar M.E.H., 1957.** Etude agro-pédologique de la plaine alluviale de Guelma (complément de l'étude N° EA BOS -57). A.N.R.H., échelle 1/20 000.
- Lezzar M.E.H., 1981.** Etude agro-pédologique de la région de Azzaba-Oued-El-Aneb (Fetzara). A.N.R.H., échelle 1/50 000.
- Louyot J., 2000.** Périmètre de Hamma-Bouzaiane. A.N.R.H., échelle 1/8 000.
- Mukanda N., Mapiki A., 2001.** Vertisols management in Zambia. In: The sustainable management of Vertisols. International water management Institute (IWMI), Thailand, CABI Publishing, pp. 19-138.
- Marinari S., Dell'Abate M.T., Brunetti G., Dazzi C., 2010.** Differences of stabilized organic carbon fractions and microbiological activity along Mediterranean Vertisols and Alfisols profiles. *Geoderma*, V.156, pp.379-388.
- Mathieu C., Pieltain F., 1998.** Analyse physique des sols : Méthodes choisies. Lavoisier Tec et Doc, Paris, 265p
- Mathieu C., Pieltain F., 2003.** Analyse chimique des sols : Méthodes choisies. Lavoisier Tec et Doc, Paris, 388p.
- McGarry D., 1996.** The structure and grain size distribution of Vertisols. In: Vertisols and technologies for their management. Development in Soil Science 24, Elsevier, pp. 231-256.
- Mermut A.R., Padmenabham E., Eswaran H., Dasog G.S., 1996.** Pedogenesis. In: Vertisols and technologies for their management. Development in Soil Science 24, Elsevier, pp. 43-58.
- Miller D. L., Mora C. I., Driese S.G., 2007.** Isotopic variability in large carbonate nodules in Vertisols: Implications for climate and ecosystem assessments. *Geoderma*, V.142, pp. 104-111.
- Mutin G., 1977.** La Mitidja, décolonisation et espace géographique. Ed.off. Puplic .Univ., Alger, 607p.

- Ney, 1987.** Fonctionnement hydrique de sols à argile gonflante cultivés. *Agronomie*, V. 7, n. 4, pp. 247-256.
- Nordt L. C., Wilding L. P., Lynnc W.C., Crawford C. C., 2004.** Vertisol genesis in a humid climate of the coastal plain of Texas U.S.A. *Geoderma*, V.122, pp. 83-102.
- Nowamooz H., 2007.** Retrait - Gonflement des sols argileux compacts et naturels. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de lorraine, 223 p.
- Ould Ferroukh M .E .H., 1994.** Etude du comportement physique des Vertisols de la Mitidja. Thèse de Magister, I.N.A., Alger, 127p.
- Ould Ferroukh M.E.H., 1988.** Contribution à la cartographie d'un micro bassin versant dans les Beni Slimane (région de Ain Boucif) : Etude thématique. Thèse d'ingénieur, INA, Alger, 63 p.
- Paik I.S., Lee Y.I., 1998.** Desiccation cracks in vertic palaeosols of the Cretaceous Hasandong Formation, Korea: genesis and palaeoenvironmental implications. *Sedimentary Geology*, V.119, p.p.161–179.
- Pal D.K., Balpande S.S., Srivastava P., 2001.** Polygenetic Vertisols of the Purna Valley of Central India. *Catena*, V.43, p.p.231–249.
- Pal D.K., Bhattacharyya T., Ray S.K, Chandran P., Srivastava P., Durge S.L., Bhuse S.R., 2006.** Significance of soil modifiers (Ca-zeolites and gypsum) in naturally degraded Vertisols of the Peninsular India in redefining the sodic soils. *Geoderma*, V.136, pp. 210-228.
- Pouget M., 1973.** Etude agro-pédologique de la région d'OUZERA (Média). A.N.R.H., échelle 1/50 000.
- Raissi O., 1997.** Cartographie des sols et pédogenèse de la plaine de la Mitidja (centre Algérien). Agence Nationale des ressources Hydrauliques-Soumaa, B,P.150 , Algerie, 212 p.
- Recio Espejo J.M., Olmo J.G., Carnieer M.M., Cordoba, 1988.** Closed basins and vertisol formation in the rincón lagoon (Andalusia, Spain). *Catena*, V.15, pp. 407-416.
- Reguieg-Yssaad H-A., 1984.** Contribution à la cartographie des sols de la région de Thénia et pédogénèse. Thèse d'ingénieur, INA, Alger, 88p.
- Ristori G.G., Sparvolie., Nobli M., D'Acquil.P., 1992.** Characterization of organic matter in particle- size fractions of Vertisols. *Geoderma*, V. 54, pp. 295-305.
- Romero E., Lloret A., Gens A., 1999.** Water permeability. Water retention and microstructure of unsaturated Boom clay. *Engineering Geology*, V. 54, pp. 117-127.
- Salah D., 2011.** Morphologie et propriétés des Calcisols références des hautes plaines sétifiennes. Mém. Mag. ENSA (ex INA), Alger, 81p.
- Seltzer P., 1946.** Travaux de l'institut de météorologie et de physique du globe de l'Algérie. Université d'Alger, 219 p.
- Simms P.H., Yanful E.K., 2005.** A pore-network model for hydro-mechanical coupling in compacted clayey soil. *Canadian Geotechnical Journal*, V. 42, n. 2, pp. 499-514.
- Speirs S.D., 2006.** Structural stability and form characteristics of sodic cotton growing soil. Doctoral of philosophy, Australia University Sydney New South Wales, 371p.

- Srivastava K.L., Smith G.D., Jangawad L.S., 1989.** Compaction and Shading Effects on Surface Cracking in a Vertisol. *Soil & Tillage Research*, V.13, pp.151-161.
- Srivastava P. J., Smith G.D., Jangawad L.S., 2002.** Significance of the formation of calcium carbonate minerals in the pedogenesis and management of cracking clay soils (Vertisols) of India. *Clays and clay minerals*, V. 50, n. 1, pp. 111–126.
- Tang Chao-Sheng, Cui Yu-Jun, Tang Anh-Minh, Shi Bin, 2010.** Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils. *Engineering Geology*, V. 114, pp. 261-266.
- Tarzki K., 1987.** Etude pédologique d'un bassin versant dans les Beni Slimane (région de souagui) : Evaluation de leurs aptitudes culturales. Thèse d'ingénieur, INA, Alger, 83 p.
- Thomas P.J., Baker J.C., Zelazny L.W., 2000.** An Expansive Soil Index for Predicting Shrink–Swell Potential. *Soil Science Society of America Journal*, V. 64, pp. 268-274.
- Touaf L., 2002.** Evaluation du niveau de salinité des sols du Nord de l'Algérie. Mém. Mag., INA, Alger, 71 p.
- U.S.S.L., 1954.** Diagnostic and improvement of saline and alkali soils. U.S.D.A., Hardbook, n. 60, 160 p.
- USDA, 1999.** Soil taxonomy : a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Soil staff, USDA Agric. Handbook 436 US Government Printing office, Washington, D.C-871p.
- USDA, 2010.** Keys to soil taxonomy. Soil survey staff, Natural resources conservation service, Washington, D.C., 337p.
- Voltz M., Cabidoche Y.-M., 1995.** Non-uniform volume and water content changes in swelling clay soil: I. Theoretical analysis. *European Journal of Soil Science*, V. 46, pp. 333-343.
- Wilding L.P., Tessier D., 1988.** Genesis of Vertisols: Shrink-swell phenomena. In: *Vertisols: Their Distribution, Properties, Classification and Management*. SMSS Texas A&M University, pp.55-81.
- Yerima B.P.K., Wilding L.P., Calhoun F.G., Hallmark C.T., 1987.** Volcanic Ash-influenced Vertisols and associated Mollisols of El Salvador: Physical, chemical and morphological properties. *Soil Sci. Am. J.*, V. 51, pp. 698-708.
- Yerima B.P.K., Wilding L.P., Hallmark C.T., Calhoun F.G., 1989.** Statistical Relationship among Selected properties of Northern Cameroon Vertisols and associated Alfisols. *Soil Sci. Am. J.*, V. 53, pp. 1758-1765.
- Zakharkov P., 1980.** Etude des hautes plaines constantinoises (feuille d'Ain Regada). A.N.R.H., échelle 1/100 000.
- Zemouri S., 2008.** Estimation de la rétention en eau des Vertisols de la Mitidja au moyen de fonctions de pedotransfert, Mém. Mag., ENSA (ex INA), Alger, 78 p.

Annexe

Annexe 1

Les résultats des analyses physiques

	pF 0	pF 1,9	pF 2,5	pF 3	pF 3,5	pF 4,2
P1H1	84	46	43	40	38	35
P1H2	83	43	41	38	36	32
P1H3	84	46	44	40	38	35
P1H4	101	51	48	43	42	38
P1H5	86	44	41	38	36	33
P1H6	79	42	40	35	33	29

Tableau 1. Humidité pondérale à différents potentiels de P1

Tableau 2. Humidité pondérale à différents potentiels de P2

	pF 0	pF 1,9	pF 2,5	pF 3	pF 3,5	pF 4,2
P2H1	91	50	49	45	43	40
P2H2	82	43	41	37	35	32
P2H3	81	43	40	37	36	33
P2H4	80	45	44	39	37	34
P2H5	58	30	28	26	24	21
P2H6	70	36	34	29	28	26

Tableau 3. Humidité pondérale à différents potentiels de P3

	pF 0	pF 1,9	pF 2,5	pF 3	pF 3,5	pF 4,2
P3H1	101	48	45	40	38	35
P3H2	80	42	40	35	33	30
P3H3	78	42	39	36	35	32
P3H4	75	41	36	33	31	28
P3H5	87	44	35	32	30	27
P3H6	84	44	39	34	34	30

ANNEXE 2

Résultats d'analyse physicochimique des argiles des profils étudiés

Profils	P ₁						P ₂						P ₃					
	20	40	60	80	100	120	20	40	60	80	100	120	20	40	60	80	100	120
Profondeur (cm)	20	40	60	80	100	120	20	40	60	80	100	120	20	40	60	80	100	120
Af %	24	27,5	25,50	26,5	29,5	26,5	27,5	30,5	29,5	25,5	17	27	23,5	26	21,5	23	22,5	35,5
Ag %	37,68	31,35	35,54	36,72	31,25	26,14	25,91	21,8	21,25	25,5	12,7	17,96	26,48	14,29	18,58	29,14	26,57	22,91
(Af/At) %	42,85	51,4	45,13	45,29	51,78	54,08	57,29	61,85	60,1	53	59,64	62,79	51,08	69,33	56,57	46,64	48,91	65,13
CECAf Cmol.kg ⁻¹	125,64	135,56	126,98	125,61	129,39	145,06	92,66	86,94	62,92	65,78	85,8	67,72	59,6	87,29	82,25	81,22	65,21	104,79
CECAg Cmol.kg ⁻¹	116,23	113,03	110,4	103,65	119,66	120,12	46,33	43,36	42,56	41,18	35,92	31,35	42,9	39,81	37,98	35,69	40,96	46,22
CaCO ₃ Ag %	1,17	1,74	4,54	2,01	2,74	1,37	2,69	2,69	1,16	2,48	6,60	7,92	1,58	3,06	2,96	3,69	1,69	2,8
CaCO ₃ Af %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaCO ₃ Ag %/100 g de sol	0,44	0,55	1,61	0,74	0,86	0,36	0,7	0,59	0,25	0,63	0,84	1,42	0,42	0,44	0,55	1,08	0,45	0,64
MOAf %	2,38	1,8	1,82	1,59	2,06	1,69	3,17	1,85	1,19	1,38	1,53	1,59	2,27	2,06	1,06	1,43	0,9	1,06
MOAg %	2,49	2,49	2,54	2,06	2,06	1,64	2,75	1,96	2,04	1,38	1,22	0,79	2,75	1,75	1,59	1	1,32	1,22
MOAf % /100g de sol	0,57	0,49	0,47	0,42	0,6	0,45	0,87	0,56	0,35	0,35	0,26	0,43	0,53	0,54	0,23	0,33	0,2	0,38
MOAg % /100g de sol	0,94	0,78	0,9	0,76	0,64	0,43	0,71	0,43	0,43	0,35	0,15	0,14	0,73	0,25	0,29	0,29	0,35	0,28

ANNEXE 3

Résultats du fractionnement de la matière organique des profils étudiés

Profils	P ₁						P ₂						P ₃					
	20	40	60	80	100	120	20	40	60	80	100	120	20	40	60	80	100	120
Profondeur (cm)	20	40	60	80	100	120	20	40	60	80	100	120	20	40	60	80	100	120
ML %	Trace						Trace						Trace					
AFL %	0,9	0	0,075	0	0	0,3	0,38	0,45	0,45	0,45	0,15	0,08	0,08	0,53	0,3	0,3	0,52	0,23
AFP %	0,75	0,07	0,15	0	0	0	1,35	0,75	1,2	0,45	0,8	0	1,8	1,35	0,97	0,75	0,6	1,27
AFS %	1,2	0,75	2,17	2,55	1,2	0,97	3,08	0,97	2,85	2,93	1,2	0,75	3,6	2,55	1,2	1,57	3,22	1,87
AF %	1,95	0,82	2,32	2,55	1,2	0,97	4,43	1,73	4,05	3,38	0,38	0,75	5,4	3,9	2,17	2,32	3,82	3,15
AHP %	0,45	0,45	0,52	0,3	0,37	0,3	0,45	1,05	0,9	0,68	1,95	0,98	0,15	1,37	0,3	0,45	0,37	0,22
AHS %	1,2	1,05	0,6	0,67	0,82	1,2	0,9	1,05	0,98	0,6	1,05	1,05	0,75	0,67	0,82	0,52	0,52	0,52
AH %	1,56	1,5	1,125	0,97	1,2	1,5	1,35	2,10	1,88	1,28	3,00	2,03	0,9	1,05	1,12	0,97	0,9	0,75
AFT %	2,85	0,82	2,4	2,55	1,2	1,27	4,80	2,18	4,5	3,83	0,53	0,83	5,47	4,42	2,47	2,62	4,35	3,37
Humine %	18,46	16,37	9,59	10,21	11,54	9,86	35,81	28,16	13,02	12,18	9,52	8,43	18,66	13,21	10,1	6,62	8,85	13,9
CT %	22,96	18,69	13,12	13,73	13,94	9,63	41,96	32,44	19,39	17,28	13,1	11,3	25,03	18,68	13,7	10,2	14,1	18

ML = matières légères.

AFL = acides fulviques libres.

AFP = acide fulvique pyrophosphate.

AFS = acides fulviques soude.

AHS = acides humiques soude.

AHP = acides humiques pyrophosphate.

AF = acides fulviques liés (AFS+AFP).

AFT = acide fulviques totaux (AFL+AF).

AH = acides humiques totaux (AHS+AHP).

Annexe 4

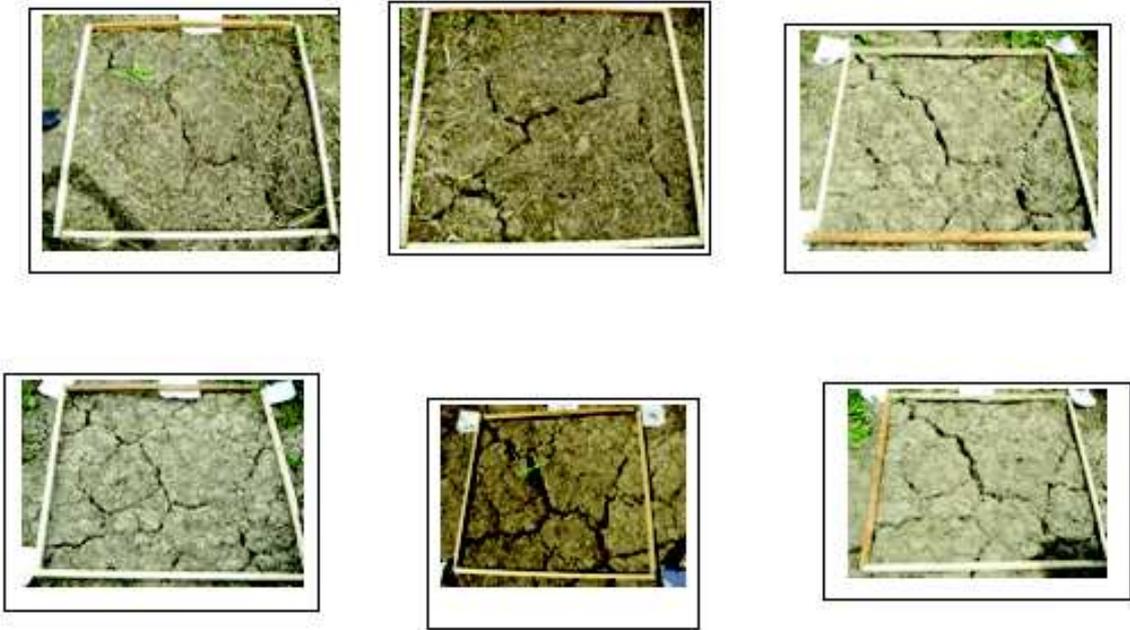


Photo 1. Suivi des fentes de retrait de S1

Annexe 4

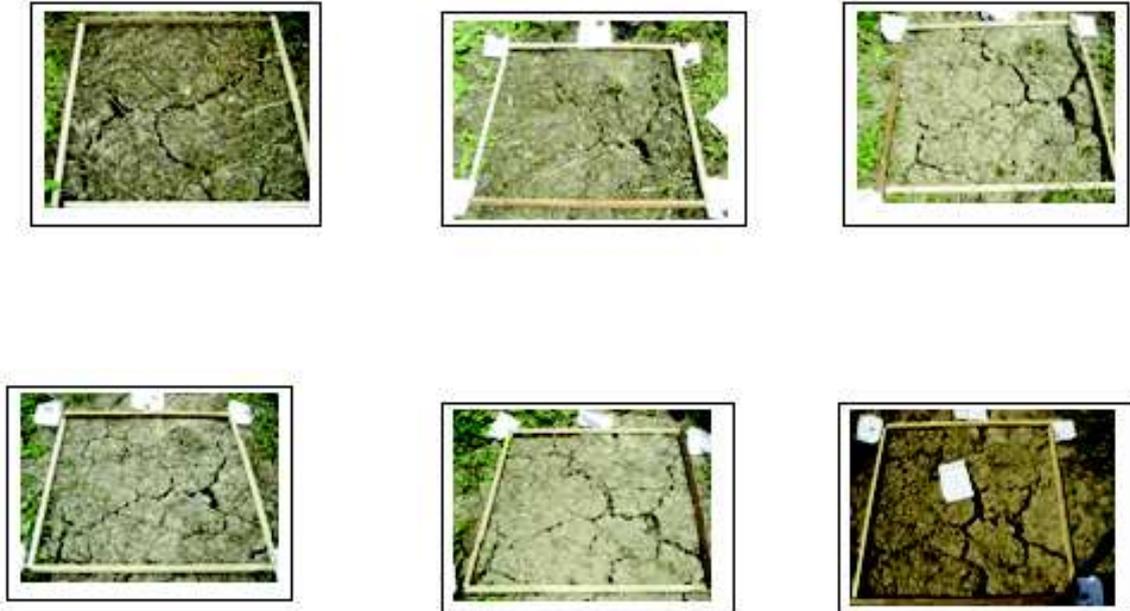


Photo 2. Suivi des fentes de retrait S2

Annexe 4

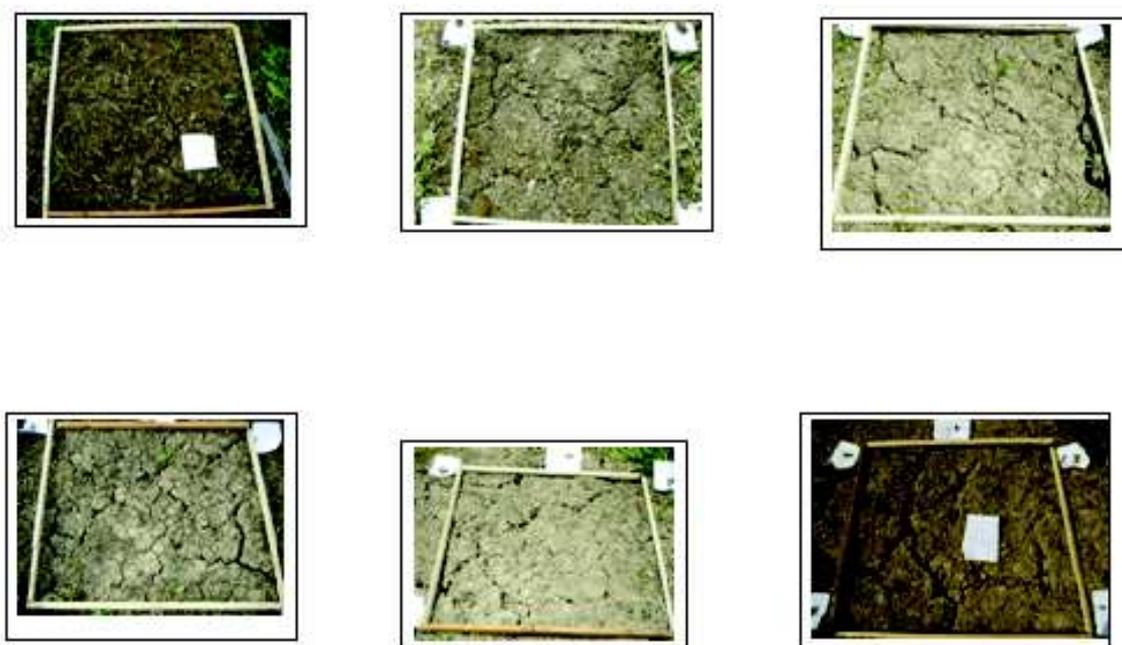


Photo 3. Suivi des fentes de retrait de S3

Annexes 5

Résultats des analyses descriptives (la base de données)

1. Les profils

	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Q 25	Q 75	Coef.Var.
A%	132	48,79	28,00	69,33	42,29	54,17	18
pH	132	7,67	7,10	8,28	7,48	7,84	3
CE	128	2,71	0,20	12,52	1,00	4,11	87
C %₀₀	127	7,42	2,70	14,00	6,14	8,57	26
CaCo3%	133	13,45	0,00	35,13	3,55	20,83	70
CEC Cmol⁺ .kg⁻¹	100	27,92	14,05	52,42	22,68	32,63	24
ESP	103	8,74	0,28	34,83	3,73	11,90	75
pF 4,2	57	18,74	12,33	29,38	15,96	20,45	20
pF 3	52	26,78	18,95	41,65	23,83	28,91	17

1. Les horizons de surface

	Valid N	Mean	Median	Minimum	Maximum	Q 25	Q 75	Coef.Var.
pH	132	7,65	7,66	6,88	8,30	7,46	7,81	4
CE	127	1,97	1,21	0,13	11,25	0,67	2,16	103
A%	133	46,98	46,00	20,00	69,00	40,00	54,00	23
C%	127	9,56	9,20	1,70	20,80	7,70	11,40	31
CaCo3%	133	12,86	16,00	0,00	37,72	2,00	20,30	75
CEC Cmol ⁺ .kg ⁻¹	103	28,05	27,00	11,00	52,05	22,78	33,00	28
ESP	103	6,59	4,35	0,21	36,84	2,90	8,33	93
pF 4,2	57	18,21	18,00	9,00	30,30	16,00	20,00	22
pF 3	52	25,98	26,00	14,00	38,10	23,59	28,75	18

1. Les horizons de subsurface

	Valid N	Mean	Median	Minimum	Maximum	Q 25	Q 75	Coef.Var.
pH	130	7,68	7,70	7,04	8,30	7,48	7,90	4
CE	127	2,30	1,30	0,20	9,25	0,74	3,05	100
A%	132	50,37	51,00	28,00	71,00	43,50	56,90	19
C%	127	7,53	7,00	3,10	18,10	6,00	8,90	29
CaCo3%	133	13,21	16,00	0,00	37,00	2,65	20,09	75
CEC Cmol ⁺ .kg ⁻¹	103	27,91	27,60	14,20	55,30	22,92	32,40	26
ESP	103	8,39	6,87	0,00	38,46	3,57	11,00	82
pF 4,2	57	19,13	18,00	9,00	31,00	16,37	20,30	22
pF 3	52	27,47	26,15	18,80	44,60	23,94	29,80	19

Annexes 5 (suite)

Résultats des analyses descriptives (la base de données)

	Valid N	Mean	Median	Minimum	Maximum	Q 25	Q 75	Coef.Var.
pH	178	7,69	7,70	7,08	8,40	7,50	7,90	4
CE	176	3,53	2,43	0,16	22,68	1,01	5,52	97
A%	184	48,29	48,00	14,00	74,00	41,00	55,00	22
C%	162	6,13	5,14	1,80	12,9	3,80	7,10	95
CaCo3%	200	13,59	15,85	0,00	53,20	1,33	22,17	84
CEC Cmol ⁺ .kg ⁻¹	120	27,66	29,00	9,45	49,91	22,70	32,00	26
ESP	120	11,20	7,88	0,22	58,33	4,63	15,26	89
pF 4,2	63	19,29	18,10	9,80	31,80	17,00	21,00	24
pF 3	64	27,22	26,17	14,80	43,60	24,00	29,55	20

Annexe 6

Les horizons de profondeur	Groupe référence	Profils	Coordonnée	
			X	Y
1	Grumic Vertisols (calcaric, humic chromic, eutric)	Mitidja 2102	470,9	358
2	Grumic Vertisols (hyposodic, eutric)	Annaba et Skikda 423	919,630	396,580
3	Mazic Vertisols (eutric)	Guelma 133	948,550	361,950
4	Mazic Vertisols (hyposodic, eutric)	Annaba et Skikda 345	917,550	408,910
		Annaba et Skikda 542	913,233	403,615
5	Grumic Gleyic Vertisols (calcaric, humic, hyposodic, eutric)	Mitidja 890	546,500	372,400
		M'leta-Tlélalt 237	184,000	241,000
6	Grumic Gleyic Vertisols (calcaric, humic, hyposalic, hyposodic, eutric)	M'leta 812	202,812	248,033
		M'leta 815	202,662	248,746
7	Grumic Gleyic Vertisols (calcaric, hyposalic, hyposodic, eutric)	M'leta-Tlélalt 12	174,000	244,000
8	Grumic Gleyic Vertisols (calcaric, hyposodic, eutric)	M'leta-Tlélalt 237	184,000	241,000
9	Grumic Gleyic Vertisols (calcaric, eutric)	Guelma 66	928,400	357,110
10	Grumic Gleyic Vertisols (humic, eutric)	Guelma 73	930,280	356,925
11	Grumic Gleyic Vertisols (hyposodic, eutric)	Guelma 98	931,010	357,475
12	Grumic Gleyic Calcic Vertisols (calcaric, humic, hyposalic, hyposodic, eutric)	Annaba et Skikda 400	918,470	398,150
13	Grumic Gleyic Calcic Vertisols (calcaric, hyposodic, eutric)	Annaba et Skikda 461	921,290	395,730
		M'leta 1476	208,970	258,090
14	Grumic Gleyic Calcic Vertisols (eutric)	Mitidja P3	547,520	374,250
15	Grumic Gleyic Calcic Vertisols (hyposodic, eutric)	M'leta-Tlélalt 55	195,000	246,000
16	Grumic Gleyic Calcic Vertisols (humic, hyposodic, eutric)	Mostaganem 2605	276,000	272,500
17	Grumic Gleyic Calcic Vertisols (calcaric, humic, hyposodic, eutric)	Mostaganem 2624	276,275	270,425
18	Grumic Gleyic Calcic Vertisols (calcaric, hyposalic, hyposodic, eutric)	Mostaganem 2629	275,650	270,325
19	Grumic Mollic Vertisols (calcaric, humic, hyposalic, hyposodic, eutric)	Batna 1103	858,980	275,930
20	Grumic Mollic Vertisols (calcaric, humic, eutric)	Batna 1210	853,120	272,840
		Batna 793	858,150	228,280
21	Grumic Mollic Vertisols (calcaric, humic, hyposodic, eutric)	Batna 1451	854,340	267,180

Les 82 groupes références des Vertisols et leurs coordonnées

Annexe 6 (suite)

Les 82 groupes références des Vertisols et leurs coordonnées

	Groupe référence	Profils		Coordonnée	
				X	Y
22	Grumic Mollic Vertisols (calcaric, hyposalic, hyposodic, eutric)	Batna	1065	860,010	277,370
			1082	861,090	276,370
			1107	859,440	274,530
			1129	860,810	272,700
			1127	861,210	272,470
			1138	860,270	272,750
			1207	852,830	273,340
			1247	856,150	273,970
			1333	856,290	268,070
			1371	860,050	267,310
			1377	858,380	267,390
			1413	855,450	266,670
			685	863,430	279,860
			749	859,980	278,730
			791	858,190	280,560
			811	857,860	278,860
967	857,340	276,980			
23	Grumic Mollic Vertisols (calcaric, hyposodic, eutric)	Batna	1061	859,390	277,370
			1126	861,090	871,810
			1219	854,730	271,140
			1298	855,300	269,710
			1379	859,170	267,560
			1382	857,650	267,600
			771	859,070	281,960
			Moyen Chélif (Ho 42)	392,042	319,025
24	Grumic Mollic Vertisols (eutric)	Mitidja P1	543,620	370,440	
25	Grumic Mollic Calcic Vertisols (calcaric, eutric)	Moyen Chélif Ho45	393,014	318,041	
26	Grumic Mollic Gypsic Calcic Vertisols (calcaric, hyposodic, eutric)	Moyen Chélif Ho170	399,980	323,880	
27	Grumic Calcic Vertisols (calcaric, humic, hyposalic, hyposodic, eutric)	Annaba 243	936,250	393,047	
		Mostaganem 3123	274,975	269,025	
28	Grumic Calcic Vertisols (hyposalic, hyposodic, eutric)	Annaba et Skikda 524	917,599	399,065	
29	Grumic Calcic Vertisols (calcaric, humic, hyposodic, eutric)	Annaba 570			
		M'leta 250	211,903	254,126	
		Mostaganem 2610	277,250	277,125	
30	Grumic Calcic Vertisols (calcaric, hyposodic, eutric)	Mostaganem 2615	271,250	276,125	
31	Grumic Vertisols (calcaric, hyposodic, eutric)	M'leta 226	207,722	252,934	
32	Grumic Vertisols (calcaric, humic, eutric)	Constantine 611	334,000	902,000	
33	Gleyic Vertisols (calcaric, hyposalic, hyposodic, eutric)	Mitidja 1991	489,200	352,200	

Annexe 6 (suite)

Les 82 groupes références des Vertisols et leurs coordonnées
an6b.gif

Annexe 6 (suite)

Les 82 groupes références des Vertisols et leurs coordonnées

	Groupe référence	Profils		Coordonnées	
				X	Y
60	Calcic Vertisols (calcaric, humic, hyposodic, eutric)	M'leta	72	211,163	255,580
			227	207,890	252,654
61	Calcic Vertisols (eutric)	Annaba 79		939,236	396,347
62	Gleyic Mollic Calcic Vertisols (calcaric, humic, eutric)	Moyan Chéliff Ho112		399,080	324,860
63	Gleyic Mollic Calcic Vertisols (calcaric, hyposodic, eutric)	Ho5		394,025	322,098
64	Gleyic Mollic Calcic Vertisols (Calcaric, humic, pellic, eutric)	Tipaza 697		496,800	382,000
65	Gleyic Mollic Calcic Vertisols (Calcaric, humic, hyposodic, eutric)	Tipaza 743		499,575	381,100
66	Cranic Gypsic Calcaric (calcaric, hyposodic, eutric)	M'leta	1587	210,971	258,341
			1573	209,394	258,330
67	Gleyic Mollic Calcic Vertisols (calcaric, humic, eutric)	Moyan Chéliff Ho112		399,080	324,860
68	Gleyic Mollic Calcic Vertisols (calcaric, hyposodic, eutric)	Moyan Chéliff Ho5		394,025	322,098
69	Gleyic Gypsic Calcic Vertisols (calcaric, hyposodic, eutric)	M'leta-Tlélalt 358		238,000	182,000
70	Gleyic Gypsic Calcic Vertisols (calcaric, humic, hyposalic, hyposodic, eutric)	M'leta-Tlélalt 437		185,000	249,000
71	Gypsic Calcic Vertisols (hyposodic, eutric)	M'leta-Tlélalt 393		185,000	249,000
72	Gleyic gypsic Calcic Vertisols (calcaric, humic, hyposodic, eutric)	M'leta-Tlélalt 446		189,000	247,000
73	Halplic Vertisols (calcaric, humic, eutric)	Annaba 711		941,767	396,909
		M'leta 492		207,589	249,864
74	Halplic Vertisols (hyposodic, eutric)	Annaba 717		941,767	396,909
		Fetzara	15	914,450	410,000
			34	916,600	396,500
		Annaba et Skikda	673	918,140	314,490
			733	924,780	394,000
75	Halplic Vertisols (eutric)	Annaba 759	715	941,257	396,282
			242	936,000	393,414
			956	945,338	396,552
			974	944,880	398,099
			937	944,237	395,841
			fetzara (34)		916,600
		Annaba et Skikda 558		913,635	401,944
76	Halplic Vertisols (calcaric, hyposalic, hyposodic, eutric)	Batna	43	806,980	281,245
			1088	860,050	275,460
77	Halplic Vertisols (calcaric, hyposodic, eutric)	Batna 803		857,640	279,570
78	Halplic Vertisols (hyposodic, chromic, eutric)	Mitidja 1952		495,000	352,400
79	Halplic Vertisols (calcaric, eutric)	Mitidja 2171		476,200	357,000
80	Halplic Vertisols (calcaric, humic, hyposodic, eutric)	Mitidja	2091	484,300	355,000
			382	534,900	374,900
		M'leta	799	201,540	248,470
81	Halplic Vertisols (eutric)	Gualma	117	939,860	397,800
			127	949,140	364,150
82	Halplic Vertisols (humic, eutric)	Gualma 143		946,020	361,300