

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE  
EL-HARRACH - ALGER  
المدرسة الوطنية العليا للفلاحة  
الحراش - الجزائر

*MEMOIRE*

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister  
en Sciences Agronomiques

Ecole doctorale : Science du sol

THEME

**ESTIMATION DE LA RETENTION EN EAU DES SOLS  
DE LA MITIDJA OUEST**

*Présenté par : OUAMER-ALI Abdelkarim*

*Devant le jury:*

<i>Président :</i>	M. DAOUD Y.	Professeur
<i>Directeur de thèse :</i>	M. DRIDI B.	Maître de conférence
<i>Examineurs :</i>	M. HAMDI AÏSSA B.	Maître de conférence
	M <sup>me</sup> KOURGLI N.	Chargée de cours

Le 14 / 12 /2010

*Année Universitaire 2009-2010*

## Remerciements

Je remercie Dieu de m'avoir donné la force et la patience pour la réalisation de ce mémoire.

Avant d'exposer ce travail, Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide la réalisation de ce mémoire et en particulier :

**M. DRIDI B.**, maître de conférence au département de science du sol à l'ENSA d'El – Harrach, à qui j'adresse mes vifs remerciements, pour avoir accepté de diriger ce mémoire, pour son aide, sa disponibilité, ses conseils très utiles, sa patience et ses directives qui m'ont permis de mener à terme ce travail.

**M. DAOUD Y.**, professeur au département de science du sol à l'ENSA d'El – Harrach, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury. Aussi, je lui suis très reconnaissant pour l'aide précieuse qu'il m'a prodiguée tout au long de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

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

Mes plus profonds remerciements vont également à :

A l'ensemble des enseignants (es) du département de science du sol, qui ont contribué à ma formation.

Sans oublier la bibliothécaire du département M<sup>elle</sup> LARBI, pour son aide et sa gentillesse et tous les techniciens du département (Amar, redouane Ahmed et Abd-elrahim) et à tous mes camarades de l'Ecole doctorale.

## *Dédicaces*

*A mes parents, à qui je dois tous*

*A mes sœurs*

*A toute ma famille.*

*A tous mes amis.*

*Je dédie ce travail*

*Abdelkarim.*

## ABREVIATIONS

**A** : Argile (%).

**CEC** : Capacité d'échange cationique (cmol(+)/kg).

**CFPT** : Classes de fonctions de pédotransfert.

**CO** : Carbone organique (%).

**Da** : Densité apparente.

**Dr** : Densité réelle.

**EMP** : Erreur moyenne de prédiction.

**ETP** : Erreur type de prédiction.

**FPT** : Fonction de pédotransfert.

**hPa** : hecto-pascal.

**Li** : Limon (%).

**Lf** : Limon fin (%).

**Lg** : Limon grossier (%).

**MO** : Matière organique (%).

**R<sup>2</sup>** : Coefficient de détermination.

**r** : Coefficient de corrélation.

**Sa** : Sable (%).

**Sf** : sable fin (%).

**Sg** : Sable grossier (%).

**W** : Teneur en eau massique (%).

**W330** : Teneur en eau massique à la capacité de rétention (%).

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Effet de la matière organique sur la rétention en eau à la capacité de rétention et au point de flétrissement (Rawls <i>et al.</i> , 2004)	8
Tableau II. Coefficients des régressions multiples et valeurs de $R^2$ correspondant à quelques FPT (Al Majou, 2008)	13
Tableau III. Fonctions de pédotransfert associées aux paramètres de la courbe de rétention en eau (Al Majou, 2008).	16
Tableau IV. Capacités en eau des sols selon les textures et la densité apparente (Jamagne <i>et al.</i> , 1977 in Bastet <i>et al.</i> , 1998)	18
Tableau V. Teneurs en eau volumiques moyennes en fonction du type d'horizon et de la texture (Bruand <i>et al.</i> , 2004).	20
Tableau VI. Teneurs en eau volumiques des horizons (A et E, B, C) en fonction de la texture et de la densité apparente (Bruand <i>et al.</i> , 2004).	21
Tableau VII. Pluviométrie et température de la station ONM de Dar El Beida (1973 - 2003).	28
Tableau VIII. Répartition des sols selon la classification CPCS (1967)	29
Tableau IX. Variabilité des caractéristiques physiques des échantillons (n = 60).	33
Tableau X. Variabilité des caractéristiques chimiques et biologique des échantillons	34
Tableau XI. Teneurs en eau pondérales aux différents potentiels	35
Tableau XII. Corrélations entre la rétention en eau et l'argile, la matière organique et la densité apparente (n = 60, $\alpha = 0,05$ )	36
Tableau XIII. Emploi comparé de la CEC comme estimateur de la rétention en eau	43
Tableau XIV. Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques (n = 22)	45
Tableau XV. Statistiques descriptives des propriétés de rétention en eau (n = 22)	46
Tableau XVI. Corrélations entre le taux d'argile et la rétention en eau (%) (n = 22, $\alpha = 0,05$ )	46
Tableau XVII. Corrélations, CEC, volume porale de l'argile et sa rétention en eau (%) (n = 22, $\alpha = 0,05$ )	48
Tableau XVIII. Régressions multiples à pF 1	53
Tableau XIX. Régressions multiples à pF 1.5	54
Tableau XX. Régressions multiples à pF 2	55
Tableau XXI. Régressions multiples à pF 2.5	55
Tableau XXII. Régressions multiples à pF 3	56
Tableau XXIII. Régressions multiples à pF 3.5	57

<b>Tableau XXIV. Régressions multiples à pF 4.2</b>	<b>57</b>
<b>Tableau XXV. Les fonctions de pédotransfert sélectionnées</b>	<b>58</b>
<b>Tableau XXVI. Les fonctions de pédotransfert après introduction de W330</b>	<b>60</b>
<b>Tableau XXVII. Les CFPT pour la classe Argileuse (30 Horizons)</b>	<b>62</b>
<b>Tableau XXVIII. Les CFPT pour la classe Argilo-limoneuse (15 Horizons)</b>	<b>62</b>
<b>Tableau XXIX. Les CFPT pour les classes Limono-argileuse fine et Limono-Argileuse (14 Horizons)</b>	<b>63</b>
<b>Tableau XXX. Les CFPT pour la classe de <math>1,3 \leq Da \leq 1,5</math> (23 Horizons)</b>	<b>64</b>
<b>Tableau XXXI. Les CFPT pour la classe de <math>Da</math> égale à 1.6 (16 Horizons)</b>	<b>64</b>
<b>Tableau XXXII. Les CFPT pour la classe de <math>1,7 \leq Da \leq 1,8</math> (20 Horizons)</b>	<b>65</b>
<b>Tableau XXXIII. Coefficients et ordonnée à l'origine pour les fonctions de pédotransfert (modèle I) de Bastet (1999)</b>	<b>66</b>
<b>Tableau XXXIV. Coefficients et ordonnée à l'origine pour les fonctions de pédotransfert (modèle I) de Rawls <i>et al.</i> (1982)</b>	<b>66</b>
<b>Tableau XXXV. Variabilité des caractéristiques physiques des échantillons de validation (n=20)</b>	<b>67</b>
<b>Tableau XXXVI. Variabilité des propriétés de rétention en eau des échantillons de validation (n=20)</b>	<b>68</b>
<b>Tableau XXXVII. Validité des FPT (modèle I et II) (<i>EMP %</i>, <i>ETP %</i>)</b>	<b>68</b>
<b>Tableau XXXVIII. Validation des CFPT texturales et structurales (<i>EM %</i>, <i>ETP %</i>)</b>	<b>70</b>
<b>Tableau XXXIX. Validité des FPT étrangères (<i>EMP %</i>, <i>ETP %</i>)</b>	<b>72</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Relation entre la morphologie des argiles, la CEC et la rétention en eau (Bruand <i>et al.</i> , 1992)	7
Figure 2. Représentation schématique des différents modèles de courbes (Bastet <i>et al.</i> , 1998)	14
Figure 3. Localisation des prélèvements (extrait de la carte pédologique de la Mitidja au 1/50 000, par Ecrement, 1971)	30
Figure 4. Textures des échantillons étudiés (USDA)	34
Figure 5. Relation entre le taux d'argile et la teneur en eau à pF 1	37
Figure 6. Relation entre le taux d'argile et la rétention en eau à pF 2,5	37
Figure 7. Relation entre le taux d'argile et la rétention en eau à pF 4,2	38
Figure 8. Relation entre $D_a$ et la rétention en eau à pF1	38
Figure 9. Relation entre $D_a$ et la rétention en eau à pF 2,5	39
Figure 10. Relation entre $D_a$ et la rétention en eau à pF 4,2	39
Figure 11. Relation entre l'argile et la CEC	41
Figure 12. Relation entre la matière organique et la CEC	42
Figure 13. Relation entre le taux d'argile et la rétention en eau des sols argileux à pF 2,5	46
Figure 14. Relation entre le taux d'argile et la rétention en eau des sols argileux à pF 4,2	47
Figure 15. Relation entre $CEC_{arg}$ et $W_{arg}$ à pF 2,5	49
Figure 16. Relation entre la $V_{arg}$ et $W_{arg}$ à pF 2,5	49
Figure 17. Relation entre la $CEC_{arg}$ et $W_{arg}$ à pF 4,2	50
Figure 18. Relation entre la $V_{arg}$ et $W_{arg}$ à pF 4,2	50
Figure 19. Relation entre $V_{arg}$ et $CEC_{arg}$	51
Figure 20. Validité des FPT (modèle I)	69
Figure 21. Validité des FPT (modèle II)	69
Figure 22. Validité des CFPT texturales	70
Figure 23. Validité des CFPT structurales	71
Figure 24. Evaluation des FPT de Bastet (1999)	72
Figure 25. Evaluation des FPT de Rawls <i>et al.</i> (1982)	73

# SOMMAIRE

## INTRODUCTION GENERALE

### CHAPITRE I : PREDICTION DES PROPRIETES DE RETENTION EN EAU.

#### SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction	3
1. Rétention de l'eau par le sol	4
1. 1. Rappels	4
1. 2. Les caractéristiques influençant la rétention en eau du sol	5
2. Estimation de la rétention en eau à l'aide des fonctions de pédotransfert	9
2. 1. Généralités et définitions	9
2. 2. Les fonctions de pédotransfert continues (FPTC)	10
2. 3. Classes de fonctions de pédotransfert (CFPT)	17
2. 4. Caractéristiques des sols étudiées pour établir les FPT	23
2. 5. Validation des fonctions de pédotransfert	24
Conclusion	27

### CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

1. Présentation de la région d'étude	28
2. Méthodologie	29

### CHAPITRE III : ETUDE DES PROPRIETES DE RETENTION EN EAU DES SOLS DE LA MITIDJA

1. Caractéristiques et propriétés de l'ensemble des sols étudiés	33
2. Paramètres influençant la rétention en eau	36
2. 1. Résultats	36
2. 2. Discussion	40
3. Rôle de la CEC dans la rétention en eau des sols	41
3. 1. Résultats	41
3. 2. Discussion	43
4. Etude de la rétention en eau des sols argileux	45
4. 1. Résultats	46
4. 2. Discussion	51
5. Synthèse des principaux Résultats	52

## **CHAPITRE IV : FONCTIONS DE PEDOTRANSFERT**

1. Fonctions de pédotransfert continues	53
1. 1. Résultats	53
1. 2. Discussion	58
2. Amélioration de la prédiction des propriétés de rétention en eau au moyen de la teneur en eau à la capacité de rétention (W330)	60
2. 1. Résultats	60
2. 2. Discussion	60
3. Apport d'une stratification des données aux CFPT	61
3. 1. Résultats	61
3. 2. Discussion	65
4. Validation des FPT et CFPT	66
4. 1. Evaluation des FPT et CFPT	68
4. 1. 1. Résultats	68
4. 1. 2. Discussion	71
4. 2. Evaluation des FPT développées à partir de bases de données étrangères	72
4. 2. 1. Résultats	72
4. 2. 2. Discussion	73
5. Synthèse des principaux résultats	74

<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>75</b>
----------------------------	-----------

### **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

### **ANNEXES**

## Résumé

Dans ce travail, nous nous proposons, sur des échantillons de sols prélevés dans la plaine de la Mitidja, de mettre en évidence les principales caractéristiques qui influent sur les propriétés de rétention en eau d'une part, et d'établir des fonctions de pédotransfert permettant de les calculer à partir d'autres caractéristiques facilement accessibles d'autre part.

Les résultats obtenus ont révélé que les propriétés de rétention en eau des sols de la Mitidja sont fortement influencées par la teneur en argile et la densité apparente. Ainsi, aux hauts potentiels, la rétention en eau est principalement due à la macroporosité résultant de la structuration du sol, celle-ci s'exprimant par la densité apparente ; par contre aux bas potentiels, l'eau est retenue principalement dans la microporosité développée par l'assemblage des particules argileuses. A cause de ses faibles taux dans ces sols, la matière organique a un effet négligeable sur la rétention en eau.

L'étude de la relation entre l'argile, la matière organique et la capacité d'échange cationique, a mis en évidence que la CEC des sols étudiés est principalement due à l'apport de la fraction argileuse. De même, les équations de régressions établies entre la CEC et la rétention en eau aux différents potentiels sont toutes significatives, de ce fait, nous confirmons que la CEC est un bon estimateur des propriétés de rétention en eau. Sur un sous ensemble d'échantillons de sols argileux, nous avons pu montrer que les propriétés de rétention en eau peuvent s'expliquer par le mode d'assemblage des particules argileuses et par les propriétés de surface des argiles.

Des fonctions de pédotransfert ont été établies par régressions multiples entre la rétention en eau à différents potentiels et les caractéristiques de constitution du sol. L'étude de validation a montré que les FPT (modèle I) sous-estiment très faiblement la teneur en eau à tous les potentiels. Les biais de prédiction sont très faibles, La précision de la prédiction est assez bonne. L'adition de la teneur en eau à la capacité de rétention (W330) améliore fortement la qualité des prédictions des FPT (modèle II), en termes de biais et de précision. L'utilisation des CFPT texturales n'améliore pas la qualité des prédictions, leur précision reste moins bonne comparée à celle des FPT (modèle I). Les CFPT structurales, améliorent légèrement la qualité des prédictions.

L'utilisation des FPT développées à partir de base de données étrangères (FPT de Rawls *et al.*, 1982 et Bastet, 1999) conduit à des biais de prédiction élevés par rapport à nos FPT et CFPT. De ce fait, nous confirmons que les FPT présentent un caractère régional et montrent leurs limites lorsqu'elles sont employées hors de leur zone d'origine.

**Mots clés :** rétention en eau, fonctions de pédotransfert, argile, matière organique, densité apparente, erreur moyenne de prédiction, écart type de prédiction.

## Abstract

The aim of this research is to bring out the relationship between the main soil characteristics that involve in the soil water retention from soil samples taking in the metidja plain and in the other hand to develop pedotransfer functions to calculate the water retention parameters from soil properties easily measurable.

The results obtained had revealed that soil water retention properties of metidja soil were mostly influenced by the clay content and bulk density. Thus, in the high potential, the water retention is primary due to the macroporosity resulting from soil structure, which is expressed by the bulk density. In the other hand, in low potential, the water is held by the microporosity created by the clay particules assembly. Due to its low rates in the soil studied, the organic matter had a negligible effect in water retention.

The study of the relationship between the clay contents, organic matter and the cation exchange capacity had highlighted that CEC is primary due to the clay fraction in the soil studied. And the regressions equations established between the CEC and water retention were all significant in all the potential. Thus the cation exchange capacity is a good estimator of water retention properties. On a subset of clay soil samples, we were able to point out that the soil water retention can be explained by the assembly mode of clay particles and their surface properties.

A pedotransfer functions were established by multiple regression between the water retention and soil characteristics in different water potential. The validation study had shown that PTF ( model I) underestimated slightly the water retention in all potential. The prediction biais were to low, The accuracy of the prediction were quite good. The incorporation of the water content at retention capacity ( W330) greatly improve the prediction quality of PTF ( model II), in term of biais and prediction. The use of textural CPTF didn't improve the prediction quality, there accuracy are less than the PTF ( model I). the structural CPTF improve slightly the quality of the prediction.

The use of PTF developed from the foreigner database (PTF of Rawls *et al.*, 1982 and Bastet., 1999) lead to a high prediction biais compared with our PTF and CPTF. thus, we confirm that PTF present a regional character and show their limits when they were employed outside the studied area.

**Key words:** water retention, pedotransfer functions, clay, organic matter, bulk density, the mean error of prediction, standard deviation of prediction.

## ملخص

في هذا العمل ، نقترح ، تسليط الضوء على الخصائص الرئيسية التي تؤثر على خصائص الاحتفاظ بالماء في أتربة سهل متيجة من جهة ، وإنشاء معادلات التحويل البيدولوجي لحساب هذه الميزات بسهولة من جهة أخرى. أظهرت النتائج أن خصائص الاحتفاظ بالماء في تربة متيجة تتأثر بشدة محتوى الطين وكثافة التربة ، في إمكانات عالية ، الاحتفاظ بالماء يرجع أساسا إلى المسامية الناتجة من بنية التربة ، وهذه الأخيرة التي تعرب عنها الكثافة الظاهرية. في قدرة منخفضة، الاحتفاظ بالماء يرجع أساسا للمسامية الناتجة عن بنية جسيمات الطين. المواد العضوية لها تأثيرا ضعيفا على الاحتفاظ بالماء.

وأظهرت دراسة للعلاقة بين الطين والمواد العضوية وقدرة تبادل الأيونات الموجبة، أن هذه الأخيرة تتعلق أساسا بمساهمة الطين. وبالمثل ، فإن معادلات الانحدار القائم بين قدرة تبادل الأيونات الموجبة و احتباس الماء في إمكانات مختلفة كلها مهمة ، ولذلك ، نؤكد أن قدرة تبادل الأيونات الموجبة هو مقدر جيدة لخصائص الاحتفاظ بالماء. على مجموعة فرعية من عينات التربة الطينية، أظهرنا أنه يمكن تفسير خصائص احتباس الماء من تجميع جزيئات الطين وخصائص سطح الطين.

أنشئت معادلات التحويل البيدولوجي عن طريق تحليل الانحدار متعددة بين احتباس الماء في إمكانات مختلفة وخصائص تكوين التربة. وأظهرت دراسة التحقق من صحة معادلات التحويل البيدولوجي (النموذج الأول) نقل من محتوى المياه جدا في جميع الامكانيات. التحيز التنبؤ منخفضة جدا، ودقة التنبؤ جيدة. إضافة محتوى الماء في القدرات الميدانية (W330) يحسن بشكل كبير نوعية التنبؤات (النموذج الثاني) ، من حيث الدقة والتحيز. استخدام معادلات التحويل البيدولوجي القوامية لا يحسن نوعية التوقعات ، معادلات التحويل البيدولوجي الهيكلي ، يحسن قليلا من نوعية التوقعات.

استخدام معادلات التحويل البيدولوجي المتقدمة من قاعدة بيانات خارجية يؤدي إلى ارتفاع التحيز . ولذلك ، فإننا نؤكد أن معادلات التحويل البيدولوجي يكون لها طابع إقليمي وتظهر حدودها عندما تستخدم خارج وطنها.

الكلمات الأساسية : الاحتفاظ بالماء؛ معادلات التحويل البيدولوجي؛ الطين؛ المواد العضوية؛ الكثافة الظاهرية؛ الخطأ المتوسط للتنبؤ؛ الانحراف المعياري للتنبؤ.

## **INTRODUCTION GENERALE**

## **Introduction générale**

Dans les régions arides et semi arides, les faibles ressources en eau constituent le premier facteur limitant des rendements. Par conséquent, les potentialités agricoles de ces régions sont limitées et ne permettent pas de faire face aux besoins alimentaires d'une population de plus en plus importante. Ainsi, en Algérie il faudrait disposer de 15 à 20 milliards de m<sup>3</sup> / an, en en allouant 70 % à l'agriculture, pour parvenir à une sécurité alimentaire satisfaisante (Halilat et Tessier, 2000). De ce fait, le recours à des méthodes permettant de mieux gérer le peu d'eau disponible est impératif notamment par la compréhension du système eau-sol-plante et la connaissance des propriétés hydriques des sols, en particulier les propriétés de rétention en eau.

Depuis les années 1970, les propriétés de rétention en eau des sols et leurs relations avec les caractéristiques édaphiques ont fait l'objet de nombreuses études, elles ont porté essentiellement sur la réserve utile des sols. Ces propriétés représentent un maillon essentiel pour la compréhension et la modélisation du comportement hydrique des sols (Bastet *et al.*, 1998 ; Bruand *et al.*, 2002, 2004).

Contrairement aux caractéristiques physiques des sols qui sont en général bien décrites lors des prospections pédologiques, les propriétés hydriques ne sont connues que pour un nombre restreint de sols, et ce en raison des exigences en termes de date de prélèvement, de conservation des échantillons et de la lourdeur des protocoles utilisés pour leur détermination. De ce fait, de nombreuses études ont très tôt eu pour objet l'établissement de relations permettant le calcul de la rétention en eau à différents potentiels à partir de caractéristiques du sol plus facilement accessibles (taux d'argile et de matière organique, densité apparente...etc.). Ces relations sont obtenues au moyen de régressions multiples appelées depuis lors « fonctions de pédotransfert » (Bouma et Van Lanen, 1987 in Bastet *et al.*, 1998).

Au départ, il s'agissait surtout d'estimer les paramètres nécessaires au calcul de la réserve utile à l'aide de simples relations statistiques (Bigorre, 2000). Ces relations se sont complexifiées au cours des années par leur forme mathématique et la nature des caractéristiques prises en compte. Puis, dans les années 80, et face au progrès de la modélisation des transferts d'eau dans le sol, les exigences ont été relevées, l'attention s'est portée alors sur l'ensemble de la courbe de rétention d'eau.

En Algérie très peu de travaux ont eu pour objet l'étude des propriétés de rétention en eau des sols et le développement de relations permettant de les prédire.

Dans ce travail, nous nous proposons, sur des échantillons de sols prélevés dans la plaine de la Mitidja, de mettre en évidence les principales caractéristiques qui influent sur les propriétés de rétention en eau d'une part, et d'établir des fonctions de pédotransfert permettant de les calculer à partir d'autres caractéristiques facilement accessibles d'autre part.

Ce mémoire est constitué de trois parties.

- la première partie est consacrée à l'analyse bibliographique dans laquelle nous présenterons les différents types de relations proposées pour prédire la quantité d'eau retenue par le sol aux différents potentiels, puis nous discuterons les travaux ayant concerné la validation de ces relations ;

- la deuxième partie porte sur le matériel et les méthodes d'études utilisées pour réaliser cette recherche, enfin,

- la troisième partie est consacrée à la présentation et à la discussion des résultats obtenus.

**PARTIE I**  
**Synthèse bibliographique**

## CHAPITRE I

### Prédiction des propriétés de rétention en eau

#### Synthèse bibliographique

##### **Introduction**

La connaissance des propriétés hydriques des sols, en particulier de leurs propriétés de rétention en eau, constitue une donnée clé pour une gestion rationnelle de l'eau, surtout en milieu semi-aride où la diminution de cette ressource constitue le premier facteur limitant des productions agricoles. Par ailleurs, les propriétés hydriques ne sont connues que pour un nombre restreint de sols, et ce en raison de la lourdeur des protocoles utilisés pour leur détermination.

De ce fait, de nombreuses études ont très tôt eu pour objet l'établissement de relations permettant de les prédire (Rawls *et al.*, 1982, 2004 ; Bruand *et al.*, 2002, 2004 ; Vereecken *et Herbst*, 2004 ; Nemes *et Rawls*, 2004 ; Lilly *et Lin*, 2004 ; Morvan *et al.*, 2004 ; Al Majou, 2008). Ces travaux avaient pour objectif l'établissement de relations permettant le calcul de la rétention en eau à différents potentiels à partir de caractéristiques du sol tel que le taux d'argile, de matière organique et la densité apparente. Ces relations sont obtenues au moyen de régressions multiples appelées depuis lors « fonctions de pédotransfert ».

Dans ce qui suit, et après avoir fait un rappel portant sur la rétention en eau et les facteurs qui l'influencent, nous présenterons les différents types de relations proposées pour prédire la quantité d'eau retenue par le sol, puis nous discuterons les travaux relatifs à la validation des fonctions de pédotransfert.

## **1. Rétention de l'eau par le sol**

### **1. 1. Rappels**

Plusieurs auteurs considèrent que l'étude et la compréhension du comportement hydrique du sol doivent passer essentiellement par la notion de structure du sol. Cette dernière, définie comme étant la manière dont sont disposées les particules du sol les unes par rapport aux autres, est à l'origine de l'espace lacunaire appelé porosité, dans lequel l'eau reçue par le sol est retenue (Musy, 1991). Ainsi, la rétention en eau peut être définie comme étant la capacité du sol à retenir l'eau à un état hydrique donné, caractérisé par une valeur donnée du potentiel matriciel de l'eau dans le sol (Bruand *et al.*, 1996).

Cette capacité de rétention en eau peut varier d'une valeur maximale (capacité maximale de rétention en eau) à une valeur minimale (point de flétrissement) correspondant un état de sécheresse plus ou moins absolue.

#### **✓ Capacité maximale de rétention en eau**

Elle correspond à la quantité d'eau maximale qu'un sol peut contenir avant le déclenchement d'un drainage en profondeur. A ce niveau, on dit que le sol est saturé en eau, ce qui signifie qu'il comporte dans sa porosité la plus grande quantité d'eau possible (Musy, 1991). Ce niveau d'humidité représente un inconvénient pour le développement des cultures, car en remplissant d'eau la porosité du sol, l'air est chassé, de ce fait le sol est transformé en milieu asphyxiant.

Dans la pratique, on cherche à déterminer la capacité au champ, elle représente la capacité de rétention mesuré au champ 2 à 3 jours après une pluie ou une irrigation dans des sols perméables, de texture et de structure uniformes. La connaissance de la capacité au champ est d'une importance primordiale du fait qu'elle constitue un paramètre important dans le calcul des réserves utiles pour les plantes et dans les projets d'irrigation.

#### **✓ Points de flétrissement**

La diminution de la teneur en eau du sol résultant de l'absorption de l'eau par les racines des plantes, par l'infiltration profonde ou par l'évaporation, entraîne une augmentation de l'énergie avec laquelle cette eau est retenue jusqu'à un seuil supérieur à la succion

maximale des plantes. A ce niveau, la plante ne peut plus absorber l'eau, c'est le point de flétrissement permanent correspondant à une pression de 1600 kPa soit pF 4,2.

Pour ne pas atteindre ce niveau fatal pour les cultures, les chercheurs ont développé la notion de point de flétrissement temporaire correspondant à un pF 3,5 (350 kPa), jusqu' à ce niveau la plante pouvait tirer de l'eau du sol (Tessier *et al.*, 1996).

## **1. 2. Les caractéristiques influençant la rétention en eau du sol**

### **1. 2. 1. La structure du sol**

La structure est une propriété fondamentale du sol car elle conditionne sa qualité physique, chimique et biologique. L'importance de la structure est liée à sa conséquence directe consistant en un ensemble d'espaces lacunaires ou porosité (Chamayou, 1989 ; Musy, 1991) ; Cette dernière est à l'origine d'une grande partie des propriétés physiques, qu'il s'agisse de l'aération, de la conductivité hydraulique ou de la rétention en eau (Tessier, 1994 ; Bruand *et al.*, 2002). Au départ, la structure a été essentiellement étudiée selon une approche descriptive, difficile à transposer en termes quantitatifs. Ainsi, pour quantifier l'effet de la structure du sol sur les propriétés de rétention en eau, plusieurs auteurs utilisent la densité apparente, du fait qu'elle renseigne sur le mode d'assemblage des constituants du sol ; l'utilisation de la densité apparente comme un estimateur de l'état structural reste relative en raison de ses variations en fonction de la classe de texture. Ainsi, pour une même densité apparente la signification en termes de structure pour un sol argileux et un sol sableux change.

Plusieurs auteurs ont montré l'existence de fortes corrélations entre la capacité de rétention en eau du sol et la densité apparente surtout au niveau des hauts potentiels (Bruand *et al.*, 1996, 2002, 2004 ; Pachepsky *et al.*, 2006), ils ont pu développer des équations qui prédisent la teneur en eau aux différents potentiels à partir de la densité apparente. Cette dernière n'est pas celle que l'on peut mesurer à l'échelle de l'horizon et qui varie en partie en fonctions des pores qui n'ont aucun rôle vis-à-vis de la rétention en eau par le sol, mais celle que l'on mesure à l'échelle de mottes prélevées dans des conditions proches de la capacité au champ.

### **1. 2. 2. La texture**

Les propriétés de rétention en eau du sol sont fortement influencées par la texture du sol ; en effet, la rétention en eau est plus élevée dans les sols de texture fine, donc contenant des taux d'argile et de constituants finement divisés plus fort que dans les sols à texture grossière. Cela est dû à la présence d'une porosité texturale responsable de la quasi-totalité de l'eau retenue dans le sol aux bas potentiels (Bigorre, 2000).

D'après Tessier (1984), l'eau extraite du sol dans le domaine énergétique utilisable par les plantes est principalement retenue entre les feuillets d'argile. Cependant, cette eau est fortement influencée par l'histoire hydrique du matériau, ce même auteur a pu montrer qu'une dessiccation provoquerait une réorganisation des feuillets d'argile. Ainsi, plus la dessiccation est poussée, moins l'échantillon reprendra l'eau, cela est dû à un rapprochement face-à-face des feuillets d'argile, les forces d'attraction sont très fortes et le phénomène peut être considéré comme irréversible.

De ce qui précède, il apparaît clairement que les propriétés de rétention en eau sont fortement influencées par le mode d'arrangement des particules argileuses, plusieurs auteurs (Tessier, 1984 ; Bruand *et al.*, 1988 ; Bigorre, 2000 ; Al Majou., 2008) ont montré que la nature minéralogique de l'argile avait une grande influence sur les propriétés de rétention en eau surtout au niveau des bas potentiels. En effet, ils ont mis en évidence l'existence d'une étroite relation entre la taille des particules élémentaires des argiles, le volume des pores créé par l'assemblage de ces particules et la capacité d'échange en cations (Figure 1), de ce fait, l'organisation des particules d'argile peut être prise en compte par la CEC du sol. Cette démarche reste valable dans les sols contenant de faibles taux de matière organique, car la contribution de la matière organique à la CEC du sol reste faible par rapport à celle de l'argile.

Ainsi, Gheyi et Halitim (1976) ; Djili et Daoud (2001), ont pu montrer que la CEC des sols du Nord d'Algérie était due principalement à la fraction argileuse du sol, l'apport de la matière étant assez faible.

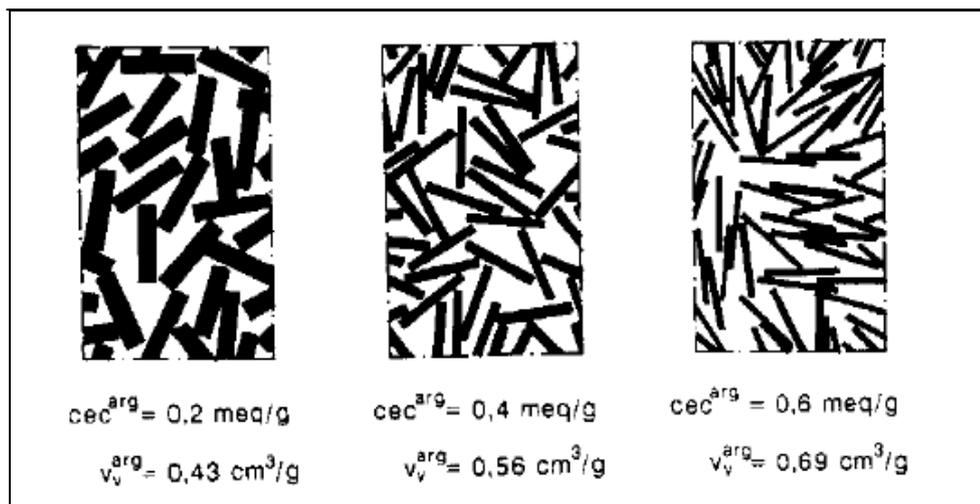


Figure 1. Relation entre la morphologie des argiles, la CEC et la rétention en eau (Bruand *et al.*, 1992).

### 1. 2. 3. La matière organique

De nombreux travaux ont montré que la matière organique tend à augmenter la rétention en eau autant à la capacité au champ qu'au point de flétrissement, si bien que l'effet sur la réserve utile peut être considéré comme négligeable (Mc Rae et Mehuys, 1985. in Bigorre, 2000).

Pour Hudson (1994), il apparaît que l'effet de la matière organique est généralement masqué dans les régressions statistiques par des variations trop importantes des autres paramètres, notamment de la composition granulométrique. Afin d'éviter ce problème, Hudson (1994) a utilisé un échantillonnage comprenant une faible variabilité de texture. Cet auteur a pu montrer que la matière organique accroît nettement la rétention en eau aux hauts potentiels et ne joue quasiment aucun rôle sur la rétention de l'eau au point de flétrissement, il a ainsi mis en évidence une augmentation de la réserve utile parallèlement à celle de la matière organique. Par ailleurs, Chenu (1993) a estimé que certaines fractions organiques comme les polysaccharides ont des propriétés d'hydratation importantes aux hauts potentiels.

Aux bas potentiels, les mécanismes de rétention de l'eau des matières organiques sont moins clairs qu'aux hauts potentiels. Comme les argiles, les matières organiques possèdent des charges de surfaces négatives compensées par des cations hydratés. Les mécanismes de rétention ne semblent pas fondamentalement différents de ceux des argiles. Par contre, les énergies de surface des matières organiques sont plus faibles de sorte que l'eau n'est pas retenue aussi fortement que sur les argiles.

Ainsi, Jouany (1991), a montré que l'adsorption de quantités très faibles de polymères synthétiques (modèles d'acides humiques) à la surface des argiles diminue de manière importante les composantes de l'énergie libre de surface du minéral.

L'analyse de la bibliographie montre que les avis concernant l'effet de la matière organique sur les propriétés de rétention d'eau restent contradictoires, le tableau 1 résume les principaux travaux sur cette question.

**Tableau I. Effet de la matière organique sur la rétention en eau à la capacité de rétention et au point de flétrissement (Rawls *et al.*, 2004)**

<b>Auteurs</b>	<b>33 kPa</b>	<b>1500 kPa</b>
Bauer and Black (1981)	Oui	Oui
Bell and van Keulen (1995)	Non	Oui
Beke and McCormick (1985)	Non	Oui
Petersen et al. (1968)	Non	Oui
Calhoun et al. (1973)	Oui	Non
Lal (1979)	Non	Non
Danalatos et al. (1994)	Non	Non
De Jong (1983)	Oui	Oui
Jamison and Kroth (1958)	Oui	Oui
Riley (1979)	Oui	Oui
McBride and MacIntosh (1984)	ND	Oui
Salter and Haworth (1961)	Non	Non

#### **1. 2. 4. Variabilité temporelle et conditions d'échantillonnage**

La courbe de rétention de l'eau des sols varie au cours de l'année, ce qui engendre des difficultés à définir un état de référence. Ainsi, dans les sols cultivés, le stade végétatif de la plante et les opérations culturales ont des effets importants sur les propriétés du sol, plus précisément sur la densité apparente.

Afin de s'affranchir de la variabilité annuelle, il est préférable d'effectuer les prélèvements à dates fixes au cours de l'année, dans des conditions où le sol se trouve à un état similaire d'une année sur l'autre. La période la plus appropriée semble être lorsque le sol est à une humidité proche de la capacité au champ.

Donc, la démarche la plus appropriée serait de prélever les échantillons dans des conditions proches de la capacité au champ, de les conserver dans des boîtes fermées hermétiquement à une température de 4 à 5°C (Kilasara et Tessier, 1991 ; Bruand *et al.*, 1996 ; Tessier *et al.*, 1996).

## **2. Estimation de la rétention en eau à l'aide des fonctions de pédotransfert**

### **2.1. Généralités et définitions**

L'estimation des propriétés hydriques des sols s'est toujours heurtée à de nombreuses difficultés liées essentiellement à des aspects méthodologiques (date de prélèvement, type d'échantillons et leur conservation) et aux coûts de leur détermination. De ce fait, plusieurs recherches visant à prédire les propriétés de rétention en eau à partir d'autres caractéristiques du sol facilement mesurables sont apparues dès les années 60 et 70. Au départ, il s'agissait surtout d'estimer les paramètres nécessaires au calcul de la réserve utile à l'aide de simples relations statistiques (Bigorre, 2000).

Ces relations qui n'étaient au départ que de simples relations statistiques entre une teneur en eau à une valeur de potentiel et une caractéristique de la composition du sol se sont complexifiées au cours des années par leur forme mathématique et la nature des caractéristiques prises en compte. Puis dans les années 80, et face au progrès de la modélisation des transferts d'eau dans les sols, l'attention s'est portée sur l'ensemble de la courbe de rétention d'eau, le terme « fonction de pédotransfert » (FPT), qui exprime le fait qu'il s'agit d'une fonction de transfert de l'information appliquée au sol, est apparu (Bouma, 1989 in Bastet *et al.*, 1998).

Les FPT ont généralement un fort caractère régional, ainsi les FPT établies avec des sols, dont le matériau parental, et la localisation géographique sont similaires, conduisaient généralement à des estimations de meilleure qualité. En revanche, elles montrent leurs limites lorsqu'elles sont employées hors de leur zone d'origine (Nemes *et Rawls*, 2004 ; Morvan *et al.*, 2004). Les FPT ont généralement la forme d'une relation mathématique entre une teneur en eau volumique ( $\theta$ ) ou une teneur en eau massique ( $W$ ) à une valeur de potentiel  $h$  donnée et des caractéristiques du sol facilement mesurables (composition granulométrique, teneur en carbone organique et densité apparente du sol).

A côté de ces relations statistiques qui sont des FPT au sens strict, d'autres types d'outils ont aussi été développés, il s'agit des classes de fonction de pédotransfert (CFPT).

Dans ce cas, des propriétés de rétention en eau sont proposées par classes, après avoir regroupé et classé les sols selon leur composition texturale (Bruand *et al.*, 2002 ; 2004).

Il existe par ailleurs des FPT basées sur l'utilisation des réseaux neuronaux plutôt que sur des équations de régression. Un réseau neuronal artificiel (ANN : *artificial neural network*) consiste en un ensemble d'éléments de calculs simples appelés noeuds ou neurones dont la structure caractérise les relations « entrées – sorties » (Pachepsky *et al.*, 2006).

Si l'on écarte les FPT de type « réseau de neurones » qui ne représentent qu'un nombre très limité d'études, les FPT peuvent être regroupées en deux grands ensembles. D'une part, celles qui permettent de prédire de façon continue en fonction de la composition du sol, la quantité d'eau retenue lorsque le potentiel de l'eau varie, il s'agit alors des FPT continues (FPTC). D'autre part, celles qui permettent de prédire par classe de composition du sol, la quantité d'eau retenue lorsque le potentiel varie, il s'agit alors des classes de FPT (CFPT) (Al Majou, 2008).

## **2. 2. Les fonctions de pédotransfert continues (FPTC)**

Dans ce premier groupe, les FPT peuvent être réparties une nouvelle fois en deux sous ensembles suivant que l'on estime la teneur en eau  $\theta$  à des valeurs particulières de potentiel, ou que l'on estime toute la courbe de rétention  $\theta(h)$ .

### **2. 2. 1. Estimation à des valeurs ponctuelles de potentiels**

Ce premier sous-ensemble concerne des FPTC établies par régression multilinéaire entre les caractéristiques du sol et des teneurs en eau à différentes valeurs de potentiel. Les premières applications agronomiques des fonctions de pédotransfert étaient basées sur la connaissance de l'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement afin d'en déduire, par différence, la réserve en eau utile du sol.

Ainsi Petersen *et al.* (1968) cités par Bastet *et al.* (1998), proposent les FPT suivantes :

$$\theta_{330} = a + (b \cdot A) + (c \cdot Li) + (d \cdot CO) + (e \cdot Da)$$

$$\theta_{15000} = a' + (b' \cdot A) + (c' \cdot Li) + (d' \cdot CO) + (e' \cdot Da)$$

Avec A, Li, CO, les taux respectifs de l'argile, des limons, du carbone organique, et Da, la densité apparente du sol. Les coefficients  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  et  $e$ , ainsi que  $a'$ ,  $b'$ ,  $c'$ ,  $d'$  et  $e'$ , sont des coefficients déterminés par régression multilinéaire (tableau 2).

D'autres relations visant à estimer la réserve utile à partir de caractéristiques de constitutions du sol ont été développées.

C'est le cas de la relation établie par Salter et Williams (1965) :

$$RU \% = 1,5 - 0,012 \cdot Sg + 0,0123 \cdot Sf + 0,302 \cdot CO$$

Avec  $Sg$ , teneur en sable grossier et  $Sf$ , teneur en sable fin,  $CO$ , taux de carbone organique.

Par la suite, de nombreux travaux ont eu pour objectif, l'accroissement du nombre de valeurs de potentiel pour lesquelles  $\theta$  pouvait être estimée.

C'est le cas des FPT établies par Gupta *et al.* (1979) et Rawls *et al.* (1982). Ainsi, ils proposent des FPT établies à la suite d'analyses par régressions multiples pour douze valeurs de potentiel variant de -40 à -15000 hPa.

Les fonctions établies par Gupta *et al.* (1979) sont de la forme :

$$q = b Sa + c Li + d A + e Mo + f Da$$

Pour les fonctions établies par Rawls *et al.* (1982), elles sont de la forme :

$$q = a + b Sa + c Li + d A + e Mo + f Da \quad (\text{modèle I})$$

A la différence des FPT développées par Gupta *et al.* (1979), celles de Rawls *et al.* (1982) présentent une ordonnée à l'origine non nulle. D'autre part, la variabilité expliquée par les FPT de Gupta *et al.* (1979) établies à partir de 43 échantillons est supérieure à 90%, par contre celles établies par Rawls *et al.* (1982) à partir de 2500 échantillons n'expliquent que 34 à 76% de variabilité.

Pour accroître la variabilité expliquée, ces derniers auteurs analysent l'amélioration obtenue en prenant en compte la teneur en eau au point de flétrissement ( $\theta_{330}$ ) (modèle II) :

$$q = a + b Sa + c Li + d A + e Mo + f Da + h (\theta_{330})$$

Puis  $\theta_{15000}$  et  $\theta_{330}$  à la fois (modèle III) :

$$q = a + b Sa + c Li + d A + e Mo + f Da + h (\theta_{330}) + g (\theta_{15000})$$

La prise en compte de ces deux teneurs en eau comme variables explicatives supplémentaires semble avoir un effet positif sur la qualité de l'estimation, en effet, la variabilité expliquée augmente.

Ces fonctions comptent parmi les FPT les plus utilisées dans la littérature scientifique (Bastet *et al.*, 1998 ; Morvan *et al.*, 2004 ; Al Majou, 2008).

### **2. 2. 2. Estimation des paramètres d'un modèle permettant de décrire la courbe $\theta[h]$**

Dans cet ensemble, les FPT permettent d'estimer les paramètres d'un modèle mathématique qui vise à décrire l'évolution de la teneur en eau ( $\theta$ ) en fonction du potentiel ( $h$ ), donc de décrire toute la courbe de rétention en eau.

Ici, les FPT ont pour rôle d'estimer les paramètres du modèle à l'aide de caractéristiques de constitution (composition granulométrique, taux de matière organique, densité apparente). Plusieurs modèles ont été développés (Figure 2), citons comme exemples ceux de Brooks et Corey (1964) ; Campbell (1974) ; Van Genuchten (1980) ; Saxton *et al.* (1986) cités par Bastet *et al.* (1998).

Dans ce qui suit, nous présentons les modèles de Campbell (1974) et de Van Genuchten (1980), ceux-ci sont les plus utilisés du fait de leur simplicité d'emploi (Bastet *et al.*, 1998 ; Bigorre, 2000 ; Al Majou, 2008).

Tableau II. Coefficients des régressions multiples et valeurs de R<sup>2</sup> correspondant à quelques FPT (Al Majou, 2008)

FPT	Horizon	Coeff	Potentiel matriciel (hPa)													
			-40	-50	-70	-100	-200	-330	-400	-600	-1000	-2000	-4000	-7000	-10000	-15000
Petersen et al. (1968)	A	b	-	-	-	-	-	0,288	-	-	-	-	-	-	-	0,296
		c	-	-	-	-	-	0,242	-	-	-	-	-	-	-	0,170
		d	-	-	-	-	-	0,206	-	-	-	-	-	-	-	0,184
		e	-	-	-	-	-	-0,432	-	-	-	-	-	-	-	-0,261
		R <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	0,34	-	-	-	-	-	-	-	0,20
	B	b	-	-	-	-	-	0,189	-	-	-	-	-	-	-	0,622
		c	-	-	-	-	-	0,213	-	-	-	-	-	-	-	-
		d	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,224
		e	-	-	-	-	-	-0,552	-	-	-	-	-	-	-	-
		f	-	-	-	-	-	-0,245	-	-	-	-	-	-	-	-
	R <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	0,48	-	-	-	-	-	-	-	0,41	
	C	b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,775
e		-	-	-	-	-	-0,89	-	-	-	-	-	-	-	-	
f		-	-	-	-	-	-0,513	-	-	-	-	-	-	-	-	
R <sup>2</sup>		-	-	-	-	-	0,83	-	-	-	-	-	-	-	0,60	
Hall et al. (1977)	A	a	-	47	-	37,47	-	-	26,66	-	-	8,7	-	-	-	2,94
		b	-	0,25	-	0,32	-	-	0,36	-	-	0,45	-	-	-	0,83
		b'	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,005
		c	-	0,10	-	0,12	-	-	0,12	-	-	0,11	-	-	-	-
		d	-	1,12	-	1,15	-	-	1	-	-	1,03	-	-	-	-
		e	-	-16,52	-	-12,5	-	-	-7,64	-	-	0,74	-	-	-	-
		R <sup>2</sup>	-	0,69	-	0,70	-	-	0,70	-	-	-	-	-	-	0,73
E, B et C	a	-	37,2	-	27,87	-	-	20,81	-	-	7,57	-	-	-	1,48	
	b	-	0,35	-	0,41	-	-	0,45	-	-	0,48	-	-	-	0,84	
	b'	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,005	
	c	-	0,12	-	0,15	-	-	0,13	-	-	0,11	-	-	-	-	
	e	-	-11,73	-	-8,32	-	-	-5,96	-	-	-	-	-	-	-	
	R <sup>2</sup>	-	0,68	-	0,74	-	-	0,77	-	-	0,79	-	-	-	0,83	
Gupta et Larson (1979)	10 <sup>3</sup> b	7,053	-	5,678	5,018	3,89	3,075	-	2,181	1,563	0,932	0,483	0,214	0,076	-0,059	
	10 <sup>3</sup> c	10,242	-	9,228	8,548	7,066	5,886	-	4,557	3,62	2,643	1,943	1,538	1,334	1,142	
	10 <sup>3</sup> d	10,07	-	9,135	8,833	8,408	8,039	-	7,557	7,154	6,636	6,128	5,908	5,802	5,766	
	10 <sup>3</sup> e	6333	-	6,103	4,966	2,817	2,208	-	2,191	2,388	2,717	2,925	2,855	2,653	2,228	
	10 <sup>3</sup> f	-321,2	-	-296,6	-242,3	-187,8	-143,4	-	-92,76	-57,59	-22,14	-2,04	15,3	21,45	26,71	
	R <sup>2</sup>	0,90	-	0,92	0,92	0,93	0,93	-	0,93	0,93	0,94	0,93	0,91	0,90	0,90	
Rawls et al. (1982) Modèle I	10 <sup>3</sup> a	789,9	-	713,5	411,8	312,1	257,6	-	206,5	34,9	28,1	23,8	21,6	20,5	26	
	10 <sup>3</sup> b	-3,7	-	-3	-3	-2,4	-2	-	-1,6	-	-	-	-	-	-	
	10 <sup>3</sup> c	-	-	-	-	-	-	-	-	1,4	1,1	0,8	0,6	0,5	-	
	10 <sup>3</sup> d	-	-	1,7	2,3	3,2	3,6	-	4	5,5	5,4	5,2	5	4,9	5	
	10 <sup>3</sup> e	10	-	-	31,17	31,4	29,9	-	27,5	25,1	20	19	16,7	15,4	15,8	
	10 <sup>3</sup> f	-131,5	-	-169,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	R <sup>2</sup>	0,34	-	0,55	0,66	0,74	0,76	-	0,76	0,76	0,65	0,70	0,65	0,65	0,64	
Modèle II	10 <sup>3</sup> a	627,5	-	482,9	410,3	300	239,1	-	181,4	141,7	98,6	0,64	42,9	30,9	-	
	10 <sup>3</sup> b	-4,1	-	-3,5	-3,1	-2,4	-1,9	-	-1,5	-1,2	0,90	-0,6	-0,4	-0,3	-	
	10 <sup>3</sup> e	23,9	-	-10,7	26	23,5	21	-	17,8	15,1	11,6	8,5	6,2	4,9	-	
	10 <sup>3</sup> h	-80	-	250	410	610	720	-	800	850	900	930	940	950	-	
	R <sup>2</sup>	0,32	-	0,55	0,65	0,79	0,85	-	0,88	0,92	0,94	0,96	0,96	0,98	-	
Modèle III	10 <sup>3</sup> a	182,9	-	888,8	61,9	31,9	-	-	13,6	-3,4	-4,3	-3,8	-2,7	-1,9	-	
	10 <sup>3</sup> b	-	-	-0,3	-0,2	-0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	10 <sup>3</sup> e	-24,6	-	-10,7	-6,7	-	-	-	-	2,2	2,6	2,6	2,4	2,2	-	
	10 <sup>3</sup> f	-37,6	-	-	-	-	-	-	-9,1	-	-	-	-	-	-	
	10 <sup>3</sup> g	1890	-	1530	1340	1010	-	-	660	520	360	240	160	110	-	
	10 <sup>3</sup> h	-1380	-	-810	-510	-60	-	-	390	540	690	790	860	890	-	
R <sup>2</sup>	0,59	-	0,82	0,90	0,98	-	-	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	-		

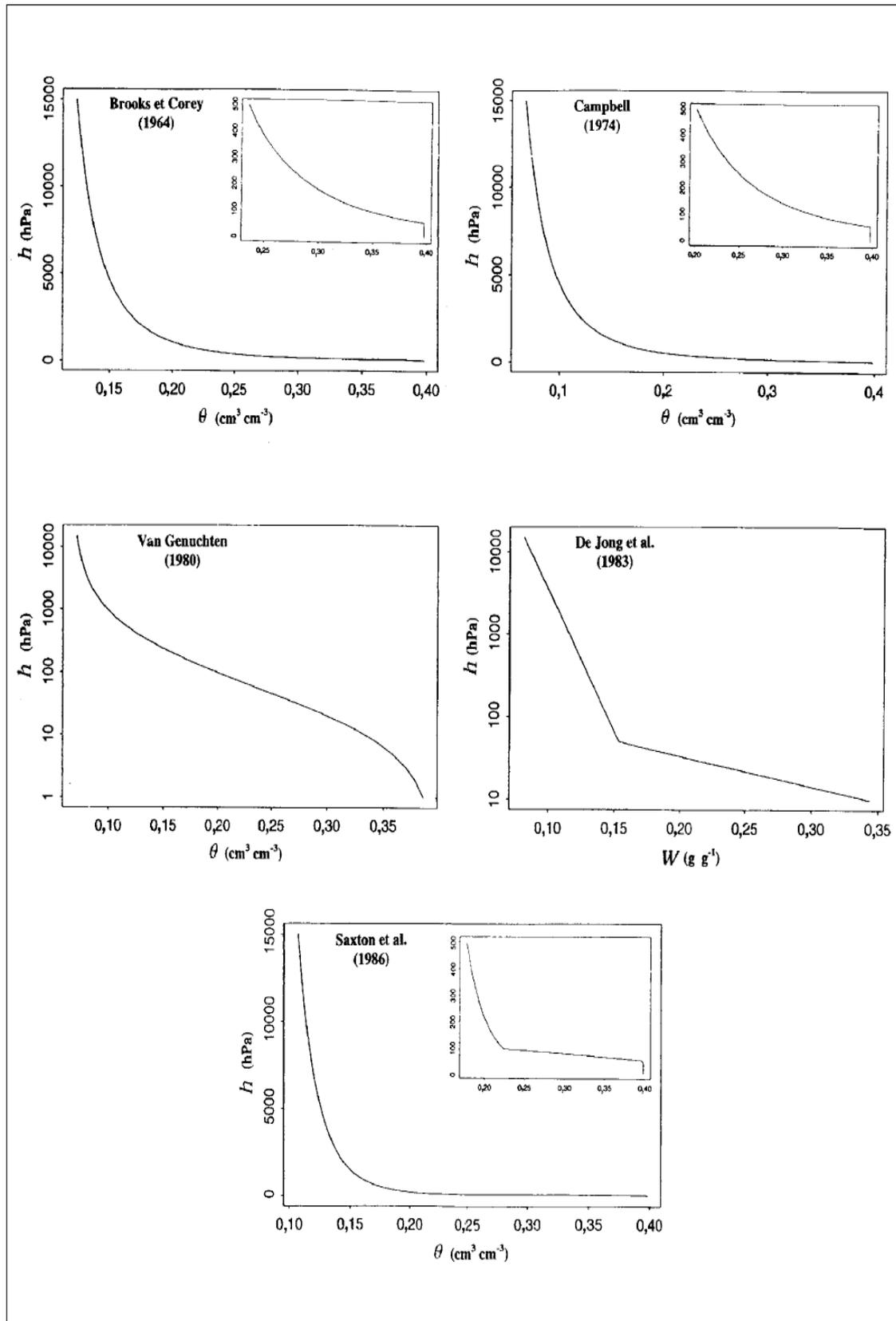


Figure 2. Représentation schématique des différents modèles de courbes (Bastet *et al.*, 1998)

✓ **Fonctions de pédotransfert continues (FPTC) établies pour le modèle de Campbell.**

Pour décrire la courbe de rétention en eau, Campbell (1974) cité par Bastet *et al.* (1998), a proposé une équation puissance du type :

$$\theta = \theta_s (h/h_a)^{-1/b}$$

Où  $h_a$  est le potentiel au point d'entrée d'air exprimé en bars,  $b$ , un paramètre empirique.

Notons que l'équation proposée par Campbell (1974) présente un inconvénient constitué par la rupture de pente lorsque  $h = h_a$  (Figure 2). Dans le même sens, des FPTC ont été établies par Cosby *et al.* (1984) à partir de mesures effectuées sur 1400 échantillons provenant des sols des Etats-Unis. Ces FPTC ont été établies pour les paramètres  $h_s$ ,  $\theta_s$  et  $b$  ;  $h_s$  étant le potentiel matriciel à saturation, il est équivalent à  $h_a$  dans le modèle de Campbell (1974).

Cosby *et al.* (1984) ont montré à cette occasion que le paramètre  $b$  était fortement corrélé à la teneur en argile ( $r^2 = 0,97$ ), tandis que les paramètres  $h_s$  et  $\theta_s$  sont corrélés de façon moins étroite à la teneur en sable grossier (respectivement  $r^2 = 0,81$  et  $0,77$ ).

✓ **Fonctions de pédotransfert continues (FPTC) établies pour le modèle de Van Genuchten.**

Le modèle de courbe proposé par Van Genuchten (1980) cité par Bastet *et al.* (1998), semble être le plus utilisé du fait de sa simplicité. Ce modèle a donné lieu à l'établissement du plus grand nombre de FPTC.

Ce modèle est de la forme suivante :

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha|h|)^n]^m$$

Où  $\theta(h)$ , teneur en eau volumique du sol au potentiel  $h$ ,  $\theta_s$ , la teneur en eau volumique du sol à saturation,  $\theta_r$ , teneur en eau volumique résiduelle. Ce sont les paramètres d'ajustement  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$  et  $n$  ( $m$  est déterminé par l'intermédiaire de  $n$  ou fixé à 1) qui ont donné lieu au développement des FPT.

Le modèle de Van Genuchten (1980) est très utilisé en raison également de la possibilité de dériver l'équation pour calculer la conductivité hydraulique.

Vereecken *et al.* (1989) puis Wösten *et al.* (1985) cité par Al Majou (2008) ont établi des relations de pédotransfert pour les paramètres de l'équation de Van Genuchten (1980) en fonction des teneurs en argile, limon, carbone organique et en fonction de la densité apparente de l'horizon à l'aide de cylindres de 100cc (tableau 3). Seules les variations de  $\theta_s$  ont pu être correctement estimées, ainsi,  $\theta_s$  est corrélé à la densité apparente du matériau et à la teneur en argile. Contrairement à  $\theta_s$ , les paramètres d'ajustement  $n$ ,  $m$  et  $\alpha$  ne semblent pas avoir de signification physique incontestable.

**Tableau III. Fonctions de pédotransfert associées aux paramètres de la courbe de rétention en eau (Al Majou, 2008).**

		$\theta = (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha h)^n]^{-1} + \theta_r$	
	Paramètres	équation régression	$R^2$
<b>Vereecken et al. (1989)</b>	$\theta_s$	$0,81 - 0,283 (Da) + 0,001(Ar)$	0,85
	$\theta_r$	$0,015 + 0,005 (Ar) + 0,014 (CO)$	0,70
	$\alpha$	$\exp[-2,486 + 0,025(Sa) - 0,351(CO) - 2,617(Da) - 0,023(Ar)]$	0,68
	$n$	$\exp[0,053 - 0,009(Sa) - 0,013(Ar) + 0,00015(Sa)^2]$	0,56
		$\theta = (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_r$	$R^2$
<b>Wösten et al. (1999)</b>	$\theta_s$	$\theta_s = 0,7919 + 0,00169*Ar - 0,29619*Da - 0,000001491*S^2 + 0,0000821*MO^2 + 0,02427*Ar^{-1} + 0,01113*Li^{-1} + 0,01472*\ln(Li) - 0,0000733*MO*Ar - 0,000619*Da*Ar - 0,001183*Da*MO - 0,0001664*topsoil*Li$	0,76
	$\alpha^* = \ln(\alpha)$	$-14,96 + 0,03135*Ar + 0,0351*Li + 0,646*MO + 15,29*Da - 0,192*topsoil - 4,671*Da^2 - 0,000781*Ar^2 - 0,00687*MO^2 + 0,0449*MO^{-1} + 0,0663*\ln(Li) + 0,1482*\ln(MO) - 0,04546*Da*Li - 0,4852*Da*MO + 0,00673*topsoil*Ar$	0,20
	$n^* = \ln(n-1)$	$-25,23 - 0,02195*Ar + 0,0074*Li - 0,1940*MO + 45,5*Da - 7,24*Da^2 + 0,0003658*Ar^2 + 0,002885*MO^2 - 12,81*D^{-1} - 0,1524*Li - 0,01958*MO^{-1} - 0,2876*\ln(Li) - 0,0709*\ln(MO) - 44,6*\ln(Da) - 0,02264*Da*Ar + 0,0896*Da*MO + 0,00718*topsoil*Ar$	0,54

Topsoil et subsoil sont des variables qualitatives ayant la valeur 1 ou 0.

### **2. 3. Classes de fonctions de pédotransfert (CFPT)**

Plusieurs auteurs ont développé d'autres méthodes pour l'établissement des FPT dans le but d'améliorer la qualité de l'estimation et de rendre ces fonctions plus simples. C'est ainsi que des classes de pédotransfert (CPT) ont été développées. Celles-ci permettent d'estimer par classe de composition (stratification en fonction de la texture, de la structure, des deux variables texture et structure, de la matière organique) les quantités d'eau retenues aux différentes valeurs de potentiel.

Comme pour les FPTC, on peut distinguer deux sous-ensembles, d'une part les CFPT donnant accès aux valeurs de  $\theta$  à des valeurs particulières de  $h$ , et d'autre part les CFPT donnant accès aux paramètres d'ajustement d'un modèle de courbe de la relation  $\theta(h)$ .

#### **2. 3. 1. Des classes de composition donnant accès à $\theta$ à des valeurs particulières de $h$**

##### **✓ CFPT prenant en compte la texture seule**

Les premières études ou applications agronomiques des classes de fonctions de pédotransfert (CFPT) étaient basées sur la texture. Ainsi, Jamagne *et al.* (1977) cités par Bastet *et al.* (1998), ont proposé des valeurs de  $\theta$  à la capacité au champ et au point de flétrissement en fonction de la texture. Seule l'appartenance à une classe de texture est nécessaire pour déduire les deux teneurs en eau, ces dernières vont par la suite servir au calcul de la RU (tableau 4).

Plus récemment, Bruand *et al.* (2002) ont développé des CFPT permettant d'estimer les teneurs en eau massique ( $W$  en g.g-1) pour 7 valeurs de potentiel en fonction de la seule appartenance des sols à des classes de texture (CFPT texturales). Des teneurs en eau volumique ( $q$ ) à -10, -33, -100, -330, -1000, -3300, -15000 hPa ont été proposées en utilisant au sein de chaque classe de texture, les teneurs en eau massiques ( $W$ ) et une valeur moyenne de densité apparente à l'échelle de l'horizon ( $Dah$ ). Dans ce cas,  $Dah$  était déduite de la densité apparente moyenne mesurée sur mottes ( $Dam$ ). Avec de telles CFPT, l'estimation de  $\theta$  nécessite uniquement le rattachement du sol à une classe de texture (tableau 5). Ces CFPT ne sont pas des fonctions de pédotransfert au sens habituel puisqu'il ne s'agit pas de relations mathématiques établies par régression, il s'agit plutôt de classes de pédotransfert texturales (Bruand *et al.*, 2002).

**Tableau IV. Capacités en eau des sols selon les textures et la densité apparente (Jamagne *et al.*, 1977 in Al Majou, 2008)**

Texture	Humidité % à la CC	Humidité % à la PF	Eau utile %	Densité apparente	RU
					mm/cm de sol
S	8	3	5	1,35	0,70
SL	12	5	7	1,40	1,00
SA	19	10	9	1,50	1,40
LLS	15	7	8	1,50	1,20
LS	19	9	10	1,45	1,55
LMS	20	9	11	1,45	1,65
LSA	22	11	11	1,50	1,65
LAS	24	12	12	1,45	1,80
LL	17	8	9	1,50	1,40
LM	23	10	13	1,35	1,80
LA	27	13	14	1,40	2,00
AS	33	22	11	1,55	1,70
A	37	25	12	1,45	1,85
AL	32	19	13	1,40	1,90
Séd.	29	18	11	1,50	1,65
ALO	38	25	13	1,30	1,70

### ✓ CFPT prenant en compte la combinaison texture et structure

Pachepsky *et al.* (2006) ont développé des fonctions de pédotransfert reliant la structure du sol aux paramètres hydrologiques du sol. Ils ont utilisé un sous ensemble de 2149 échantillons extraits de la base de données américaine contenant la teneur en eau à -330 hPa et à -15000 hPa. L'arbre de régression a été utilisé pour regrouper les sols en fonction de la teneur en eau à -330 hPa et à -15000 hPa. Cette étude avait pour objectif de mettre en évidence l'importance de la structure du sol sur les propriétés de rétention en eau.

D'autres CFPT ont été développées par Bruand *et al.* (2004) à partir de classes combinant la texture et l'état structural à l'aide de la densité apparente. Ces CFPT permettent d'estimer les teneurs en eau massique ( $W$ ) pour 7 valeurs de potentiel en fonction de l'appartenance des sols à des classes combinant texture et densité apparente à l'échelle de mottes de dimensions centimétriques (CFPT texturo-structurales).

Ces mêmes auteurs ont proposé des valeurs de teneur en eau volumique à 7 potentiels de l'eau variant de -10 hPa à -15000 hPa. Dans un premier temps, des CFPT texturales qui n'utilisent que la texture selon le triangle de texture français avaient été proposées après avoir réparti les horizons en deux ensembles, les horizons A d'une part et les horizons E, B et C d'autre part. Dans un second temps, des teneurs en eau volumiques ont été proposées en utilisant les CPT texturo-structurales qui utilisent à la fois la texture et la densité apparente de l'horizon après avoir réparti comme précédemment les horizons en deux ensembles, les horizons A d'une part et les horizons E, B et C d'autre Part (tableau 6).

Tableau V. Teneurs en eau volumiques moyennes en fonction du type d'horizon et de la texture (Bruand *et al.*, 2004).

Type d'horizons	Texture	Densité d'horizon		Teneur en eau volumique cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup>						
		moy.	S	$\theta_{1,0}$	$\theta_{1,5}$	$\theta_{2,0}$	$\theta_{2,5}$	$\theta_{3,0}$	$\theta_{3,5}$	$\theta_{4,2}$
A	ALO	1,31	0,18	0,422	0,391	0,373	0,351	0,347	0,304	0,249
	AL	1,42	0,07	0,359	0,346	0,333	0,313	0,286	0,247	0,197
	AS	1,31	-	0,445	0,385	0,385	0,334	0,286	0,224	0,212
	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	LA	1,42	0,11	0,359	0,340	0,325	0,302	0,267	0,215	0,152
	LAS	1,45	0,12	0,348	0,335	0,320	0,301	0,266	0,210	0,153
	LSA	1,55	0,13	0,312	0,304	0,283	0,267	0,245	0,201	0,140
	LM	1,40	0,09	0,350	0,337	0,322	0,283	0,209	0,143	0,109
	LMS	1,53	0,12	0,323	0,311	0,300	0,277	0,239	0,167	0,117
	LS	1,70	-	0,291	0,277	0,265	0,252	0,223	0,155	0,104
	LLS	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	LL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SA	1,66	0,05	0,287	0,278	0,259	0,233	0,197	0,164	0,131
	SL	1,61	0,11	0,277	0,259	0,216	0,173	0,143	0,118	0,084
S	1,49	0,12	0,177	0,140	0,117	0,094	0,080	0,066	0,057	
E, B, C	ALO	1,43	0,17	0,435	0,421	0,408	0,384	0,366	0,341	0,297
	AL	1,55	0,12	0,361	0,351	0,335	0,315	0,290	0,257	0,222
	AS	1,69	0,08	0,324	0,315	0,296	0,279	0,262	0,238	0,201
	A	1,67	0,08	0,338	0,332	0,315	0,290	0,282	0,253	0,221
	LA	1,53	0,05	0,344	0,331	0,312	0,280	0,238	0,196	0,163
	LAS	1,58	0,10	0,335	0,322	0,304	0,270	0,229	0,195	0,156
	LSA	1,57	0,15	0,306	0,285	0,262	0,235	0,203	0,169	0,158
	LM	1,52	0,15	0,338	0,329	0,321	0,273	0,184	0,145	0,114
	LMS	1,58	0,10	0,364	0,354	0,330	0,270	0,212	0,172	0,129
	LS	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	LLS	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	LL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SA	1,65	0,16	0,294	0,262	0,239	0,201	0,178	0,152	0,136
	SL	1,59	0,13	0,246	0,241	0,201	0,177	0,145	0,113	0,085
S	1,73	0,13	0,187	0,165	0,110	0,098	0,074	0,056	0,037	

\* densité apparente moyenne des horizons et écarts types correspondants

**Tableau VI. Teneurs en eau volumiques des horizons (A et E, B, C) en fonction de la texture et de la densité apparente (Bruand *et al.*, 2004).**

Type d'horizons	Texture	D <sub>a</sub> <sup>n</sup> horizon	Teneur en eau volumique cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup>						
			θ <sub>1,0</sub>	θ <sub>1,5</sub>	θ <sub>2,0</sub>	θ <sub>2,5</sub>	θ <sub>3,0</sub>	θ <sub>3,5</sub>	θ <sub>4,2</sub>
A	ALO	1,1	0,432	0,420	0,397	0,365	0,334	0,303	0,267
		1,3	0,429	0,414	0,389	0,356	0,325	0,294	0,258
	AL	1,3	0,353	0,349	0,336	0,308	0,274	0,237	0,195
		1,5	0,356	0,354	0,345	0,322	0,290	0,250	0,204
	AS	1,3	0,490	0,391	0,369	0,332	0,283	0,222	0,211
	A	-	-	-	-	-	-	-	-
	LA	1,3	0,331	0,328	0,310	0,289	0,247	0,198	0,146
		1,5	0,348	0,345	0,336	0,310	0,267	0,216	0,160
	LAS	1,3	0,344	0,340	0,327	0,296	0,253	0,206	0,155
		1,5	0,323	0,322	0,315	0,295	0,256	0,205	0,149
	LSA	1,5	0,291	0,288	0,281	0,258	0,222	0,179	0,133
	LM	1,3	0,342	0,341	0,330	0,271	0,185	0,127	0,104
		1,5	0,343	0,339	0,326	0,287	0,228	0,167	0,108
	LMS	1,3	0,347	0,341	0,325	0,288	0,241	0,193	0,143
		1,5	0,311	0,308	0,300	0,272	0,223	0,165	0,108
	LS	1,7	0,280	0,279	0,274	0,255	0,215	0,160	0,102
	LLS	-	-	-	-	-	-	-	-
	LL	-	-	-	-	-	-	-	-
	SA	1,7	0,293	0,285	0,267	0,235	0,202	0,169	0,134
	SL	1,5	0,285	0,269	0,241	0,203	0,170	0,141	0,113
1,7		0,294	0,270	0,230	0,181	0,143	0,111	0,081	
S	1,3	0,198	0,161	0,133	0,108	0,091	0,075	0,060	
	1,5	0,144	0,125	0,102	0,082	0,070	0,060	0,053	

Type d'horizons	Texture	D <sub>a</sub> <sup>h</sup> horizon	Teneur en eau volumique cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup>						
			θ <sub>1,0</sub>	θ <sub>1,5</sub>	θ <sub>2,0</sub>	θ <sub>2,5</sub>	θ <sub>3,0</sub>	θ <sub>3,5</sub>	θ <sub>4,2</sub>
E, B, C	ALO	1,25	0,523	0,515	0,496	0,464	0,429	0,391	0,347
		1,35	0,453	0,439	0,418	0,392	0,368	0,344	0,314
		1,45	0,414	0,409	0,398	0,376	0,350	0,321	0,286
		1,55	0,388	0,384	0,377	0,360	0,338	0,313	0,283
		1,65	0,337	0,334	0,328	0,315	0,300	0,282	0,259
	AL	1,35	0,373	0,367	0,352	0,322	0,290	0,258	0,226
		1,45	0,359	0,355	0,345	0,323	0,295	0,263	0,225
		1,55	0,363	0,355	0,339	0,313	0,287	0,260	0,228
		1,65	0,350	0,345	0,335	0,315	0,290	0,263	0,231
	AS	1,55	0,368	0,358	0,341	0,314	0,289	0,262	0,231
		1,65	0,319	0,313	0,299	0,276	0,252	0,227	0,198
		1,75	0,302	0,296	0,283	0,263	0,243	0,222	0,198
	A	1,65	0,353	0,348	0,337	0,315	0,290	0,262	0,230
		1,75	0,320	0,316	0,307	0,289	0,269	0,247	0,220
	LA	1,45	0,357	0,345	0,319	0,286	0,241	0,204	0,164
		1,55	0,355	0,346	0,325	0,287	0,249	0,210	0,168
	LAS	1,55	0,345	0,336	0,311	0,269	0,231	0,197	0,167
		1,65	0,318	0,314	0,301	0,272	0,235	0,195	0,152
	LSA	1,55	0,335	0,304	0,271	0,237	0,211	0,187	0,163
		1,65	0,283	0,275	0,251	0,208	0,172	0,146	0,128
	LM	1,55	0,351	0,350	0,344	0,297	0,201	0,135	0,108
	LMS	1,55	0,352	0,342	0,312	0,252	0,200	0,161	0,130
	LS	-	-	-	-	-	-	-	-
LLS	-	-	-	-	-	-	-	-	
LL	-	-	-	-	-	-	-	-	
SA	1,65	0,281	0,265	0,238	0,203	0,176	0,153	0,131	
SL	1,55	0,245	0,236	0,202	0,156	0,122	0,081	0,061	
S	1,65	0,203	0,170	0,129	0,093	0,069	0,052	0,038	

### ✓ CFPT prenant en compte la teneur en carbone organique ou matière organique

Rawls *et al.* (2004) ont étudié l'effet de la teneur en carbone organique sur la rétention en eau pour deux valeurs de potentiel soit -330 hPa et -15000 hPa. Pour établir les CFPT, ces auteurs ont travaillé sur un sous-ensemble d'horizons extraits de la base de données américaine (U.S National Soil Characterization Database) en utilisant les teneurs en eau retenues à -330 hPa et à -15000 hPa, la densité apparente à -330 hPa, la classe de texture (texture grossière, texture fine et texture très fine) et la teneur en carbone organique qui est considérée comme étant la variable la plus importante pour les sols de texture grossière.

A -15000 hPa, la stratification pour établir les CFPT a été faite en utilisant la composition granulométrique du sol (argile, limon et sable) et la teneur en carbone organique, celui-ci joue un rôle essentiel pour la rétention de l'eau à -15000 hPa pour les sols de faible teneur en argile (< 19 %). D'autres variables (classification des sols, densité apparente) ont aussi été prises en compte.

## **2. 4. Caractéristiques des sols étudiées pour établir les FPT**

### **2. 4. 1. Etat des échantillons utilisés pour étudier les propriétés de rétention en eau**

Les bases de données issues de travaux antérieurs aux années 80 sont essentiellement constituées de données sur des échantillons remaniés (échantillons séchés à l'air et tamisés à 2 mm). Le caractère remanié ou non remanié des échantillons utilisés pour déterminer les propriétés de rétention en eau varie suivant les études. Les premières études ont toutes porté sur des échantillons séchés à l'air et tamisés à 2 mm mais il faut aussi relever que très tôt, des travaux ont été réalisés avec des échantillons non remaniés (conservés autant que possible à la teneur en eau de leur prélèvement et sans que leur état structural soit modifié) (Bigorre, 2000 ; Bruand *et al.*, 2002 ; Morvan *et al.*, 2004 ; Al Majou, 2008).

L'étude des propriétés de rétention en eau a longtemps été effectuée à partir d'échantillons séchés à l'air et tamisés à 2 mm. Les mesures de rétention en eau sur des échantillons non remaniés conservés dans des boîtes hermétiques à la teneur en eau lors du prélèvement (proche de la capacité au champ) et à une température suffisamment basse pour

réduire considérablement l'activité biologique ont été développées il y a une vingtaine d'années seulement (Bruand *et al.*, 2002).

## **2. 5. Validation des fonctions de pédotransfert**

Malgré le nombre très élevé de FPT proposées dans la littérature scientifique, peu d'études ont eu pour objet de discuter leur validité. Celles-ci visaient beaucoup plus leur capacité à estimer avec plus ou moins de justesse les teneurs en eau mesurées pour un échantillon test d'horizons de sols. Selon Morvan *et al.* (2004) et Al Majou (2008), les études de validation ont été réalisées principalement par Williams *et al.* (1992) ; Tiejte *et al.* (1993) ; Kern (1995) ; Bastet (1999) ; Cornelis *et al.* (2001) et Wösten *et al.* (2001).

### **2. 5. 1. Critères utilisés pour comparer les FTP**

L'évaluation des FPT se fait essentiellement par une comparaison des valeurs prédites par les FPT à celles mesurées (Vereecken *et Herbst*, 2004 ; Pachepsky *et al.*, 2006). Les critères ou les grandeurs d'évaluation des FPT qui sont le plus souvent utilisées sont :

- ✓ l'erreur moyenne de prédiction (*EMP* ou *EM*)

$$EM = \frac{1}{n} \sum (\theta_p - \theta_m)$$

avec  $n$ , le nombre d'horizons,  $\theta_p$ , la teneur en eau volumique prédite par les FPT,  $\theta_m$ , la teneur en eau volumique mesurée. La prédiction est d'autant moins biaisée que *EM* est proche de zéro. Ainsi, lorsque *EM* est positif, les FPT surestiment  $\theta$ , lorsqu'il est négatif, les FPT sous-estiment  $\theta$ .

- ✓ l'erreur absolue moyenne (*EAM*)

$$EAM = \frac{1}{n} \sum | (\theta_p - \theta_m) |$$

- ✓ le coefficient de détermination ( $R^2$ )

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_p - \bar{\theta})^2}{\sum_{i=1}^n (\theta_m - \bar{\theta})^2}$$

Avec,  $\bar{\theta}$ , moyenne des teneurs en eau volumiques mesurées.

- ✓ l'écart quadratique moyen ou Root Mean Square Error ( $RMSE$ )

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{n} \sum (\theta_p - \theta_m)^2 \right\}^{1/2}$$

L'écart quadratique moyen est un estimateur de qualité de la prédiction, ainsi plus l'écart est faible, meilleur est l'estimation.

- ✓ l'écart type de prédiction

$$ETP = \left\{ \frac{1}{n} \sum [(\theta_p - \theta_m) - EMP]^2 \right\}^{1/2}$$

L'écart type de prédiction permet de discuter la précision de l'estimation, ainsi, l'estimation est d'autant plus précise qu'il est proche de zéro.

Généralement, ce sont l' $EMP$  et l' $ETP$  qui sont le plus utilisées.

## **2. 5. 2. Evaluation des FPT**

- ✓ **Validation ponctuelle de la teneur en eau**

La validité des FPTC qui permettent d'estimer la teneur en eau à des valeurs particulières de potentiels a été abordée par Williams *et al.* (1992) et Bastet (1999) cités par Al Majou (2008). Ainsi, Williams *et al.* (1992) ont utilisé dans leur étude de validation, l'erreur moyenne et l'écart type de prédiction pour évaluer les FPT, l'étude de validation a été faite sur un ensemble de 366 échantillons provenant de l'Oklahoma (Etats-Unis), ils ont pu

montrer que les FPT développées par Rawls *et al.* (1982) donnent les meilleures estimations de la rétention en eau. En effet, les *EMP* et *ETP* diminuent lorsque l'on passe du modèle I qui n'utilise pas  $\theta_{330}$  et  $\theta_{15000}$  au modèle III qui utilise  $\theta_{330}$  et  $\theta_{15000}$ .

L'étude de validation effectuée par Bastet (1999) sur des FPT faisant appel aux seules caractéristiques de constitution des sols et sur un nombre de 762 échantillons, fait ressortir que les FPT développées par Hall *et al.* (1977) donnent les meilleures estimations par rapport à celles développées par Rawls *et al.* (1982) (modèle I). En effet, les *EMP* et *ETP* diminuent lorsque l'on passe des FPT de Hall *et al.* (1977) aux FPT de Rawls *et al.* (1982) (modèle I).

L'étude de validation effectuée par Morvan *et al.* (2004) sur un nombre élevé de FPT (Hall *et al.*, 1977 ; Rawls *et al.*, 1982 ; Vereecken *et al.*, 1989 ; Bastet, 1999 modèle I ; Jamagne *et al.*, 1977 ; Bruand *et al.*, 2002 CFTP texturales et texturo-structurales), et en utilisant un ensemble de 15 échantillons fait ressortir que les classes de fonctions de pédotransfert (CFPT) développées par Bruand *et al.* (2002 ; 2004) donnent les meilleures estimations. Au sein de ces mêmes CFPT, celle développées par Bruand *et al.* (2004) qui combinent à la fois texture et densité apparente sont les plus précises.

#### ✓ Validation fonctionnelle des FPT

La validité fonctionnelle des différentes FPT a été discutée par Morvan *et al.* (2004) en calculant la réserve utile (RU) bornée par les valeurs de teneur en eau mesurées et fournies par les FPT aux potentiels matriciels de -100 hPa et -15000 hPa. Rappelons que dans cette étude, ce sont les FPTC de Hall *et al.* (1977) ; Rawls *et al.* (1982) ; Vereecken *et al.* (1989) ; Bastet (1999) ; les CFPT de Jamagne *et al.* (1977) ; Bruand *et al.* (2002), qui ont été utilisées pour prédire la teneur en eau à -100 hPa et -15000 hPa.

Les FPTC et les CFPT qui conduisent aux meilleures estimations sont celles de Bastet (1999) et les CFPT texturales et texturo-structurales de Bruand *et al.* (2002 ; 2004). Les différences de RU estimées avec celles mesurées sont de 80 et 85 mm à l'échelle du bassin versant avec les FPTC de Bastet (1999) et de respectivement 85 et 91 mm avec les CFPT texturales et texturo-structurales de Bruand *et al.* (2002 ; 2004).

## **Conclusion**

Le développement des FPT au cours de ces quarante dernières années a conduit à deux grands types d'approche ; l'une consiste à établir des FPT pour prédire des teneurs en eau à des valeurs ponctuelles de potentiels ; par contre, l'autre consiste à établir des FPT pour prédire les paramètres d'un modèle de courbe décrivant de façon continue les quantités d'eau retenues en fonction du potentiel.

Dans le premier type d'approche, les FPT développées présentent des formalismes simples et sont de ce fait les plus couramment utilisées. En revanche, dans le deuxième type d'approche, les modèles développés se heurtent à l'estimation de leurs paramètres qui manquent de sens physique, et sont de ce fait difficiles à utiliser.

Quel que soit le type d'approche ou le modèle de FPT, toutes présentent un caractère régional, rendant ainsi toute tentative de généralisation, limitée. De ce fait, il est nécessaire d'établir des FPT ou CFPT spécifiques à l'Algérie, les sols de notre pays se caractérisent par des taux de matière organique relativement bas, ils sont donc plus au moins compactés. Par ailleurs, et pour des raisons climatiques, le  $\text{CaCO}_3$  est omniprésent dans la plus grande partie des sols. Sur le plan pratique il est impossible d'effectuer des mesures sur la totalité des sols de notre pays, en raison de son étendue et de la complexité des systèmes pédologiques, par conséquent la lourdeur des moyens à mettre en œuvre pour ce type de déterminations.

**PARTIE II**  
**Matériel et méthodes**

## CHAPITRE II

### Matériel et méthodes

#### 1. Présentation de la région d'étude

##### 1. 1. Situation géographique

La Mitidja compte parmi les plus grandes plaines sublittorales de l'Algérie, s'étendant sur une longueur de 100 km et une largeur variant entre 10 et 18 km, elle occupe une superficie de 1400 km<sup>2</sup>. La plaine correspond à une vaste dépression allongée d'ouest en est, elle est répartie entre les wilayas d'Alger, Blida, Tipaza et Boumerdes.

Elle est limitée au nord par le Sahel, et monte en pente douce vers le Sud où elle est interrompue par l'atlas Blidéen. A l'est, par l'oued Boudouaou et l'oued Réghaïa, de cette limite, la plaine s'étend vers l'ouest sur une centaine de kilomètre au-delà de Hadjout. Elle est isolée de la mer par la ride du sahel qui prenant appui sur le vieux massif du Chenoua, s'estompe à l'est d'Alger et disparaît au niveau de la cluse de Réghaïa (Mutin, 1977).

##### 1. 2. Le climat

Le climat de la Mitidja est de type méditerranéen subhumide, à saisons contrastées. Le tableau 7 montre que la pluviométrie moyenne annuelle est de 645.7 mm, le mois le plus pluvieux est décembre avec 96.3 mm, tandis que le mois le plus sec est juillet avec 4.2 mm.

La température moyenne du mois le plus froid est de 10.6°C (janvier), celle du mois le plus chaud est de 25.4°C (août).

**Tableau VII. Pluviométrie et température de la station ONM de Dar El Beida (1973 - 2003).**

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
P(mm)	49,1	52,64	91,65	96,3	80,5	89,5	65	57,3	40,9	9,96	4,23	8,61	645,7
T(°C)	23,07	19,13	14,91	11,96	10,62	11,24	12,62	14,58	17,88	21,78	24,75	25,38	

### 1. 3. Les sols

La consultation de la carte des sols de la plaine de la Mitidja réalisée par Ecrement (1971) à l'échelle 1/50 000, permet de faire ressortir cinq classes de sol : les sols peu évolués, les vertisols, les sols à sesquioxyde de fer et de manganèse, les sols calcimagnésiques et les sols hydromorphes (tableau 8).

**Tableau VIII. Répartition des sols selon la classification CPCS (1967)**

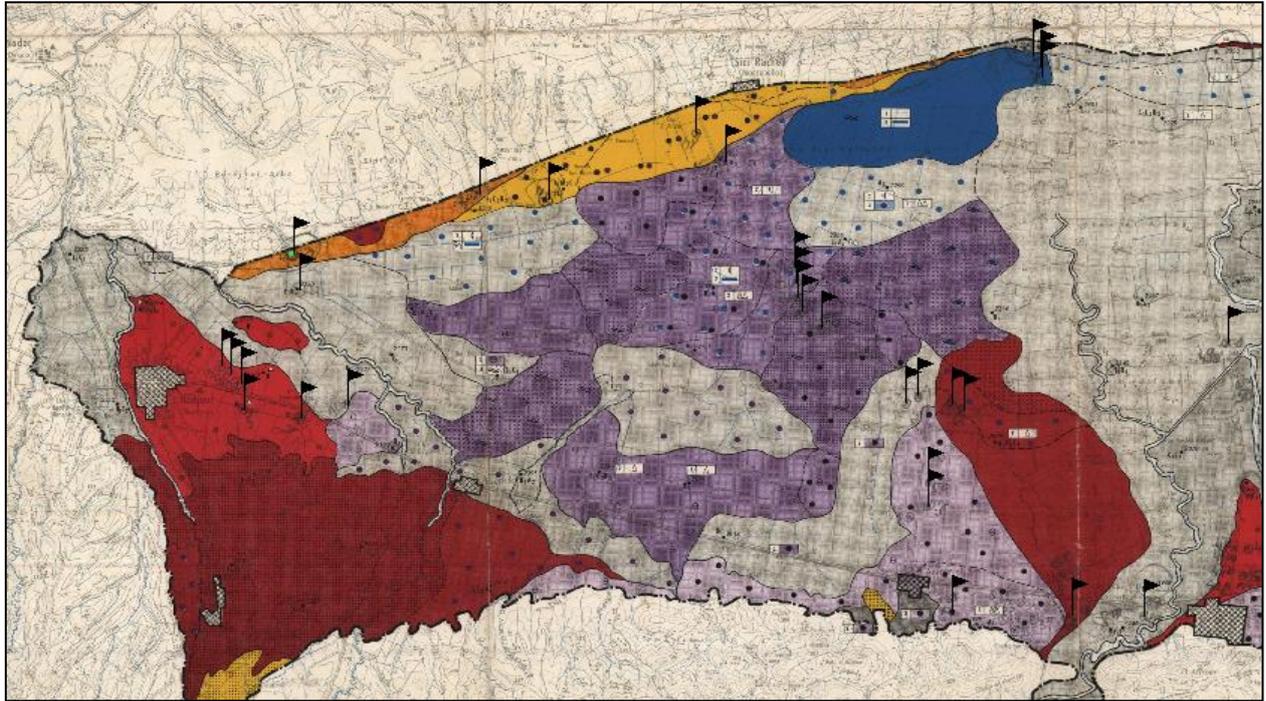
<i>Type de sols (CPCS, 1967)</i>	<i>Superficie (ha)</i>
Sols peu évolués	75 000 ha
Sols à sesquioxyde de fer et de manganèse	13 500 ha
Sols hydromorphes.	7 000 ha
Vertisols	6 000 ha
Sols calcimagnésiques	1 500 ha

## 2. Méthodologie

L'objectif de ce travail consiste à étudier les propriétés de rétention en eau des sols de la Mitidja et de développer des fonctions de pédotransfert permettant de prédire les propriétés de rétention en eau à partir des caractéristiques de constitution (composition granulométrique, taux de matière organique, densité apparente), puis valider ces fonctions de pédotransfert. Pour cela il fallait construire un ensemble de soixante d'échantillons contenant des caractéristiques de constitution assez variables, pouvant du moins représenter une large gamme des sols du Nord d'Algérie.

### 2.1. Prélèvement des échantillons

L'échantillonnage s'est déroulé au début de la période hivernale (décembre) lorsque les sols étaient en conditions hydriques proches de la capacité au champ. Trente fosses réparties sur les différentes classes de sols ont été creusées (Figure 3, annexe 1), des échantillons non perturbés de surface et de sub-surface ont été prélevés sous forme de blocs de dimensions décimétriques, ils ont été mis dans des boîtes afin de conserver leur structure et leur état d'humidité. Dans les mêmes horizons, d'autres échantillons perturbés ont été prélevés pour les analyses de caractérisation physiques, chimiques et biologiques.



**Figure 3. Localisation des prélèvements (extrait de la carte pédologique de la Mitidja Ouest au 1/50 000, par Ecrement, 1971).**

## **2. 2. Détermination de la densité apparente**

Les mesures de densité apparente à l'aide de la méthode au pétrole, ont été réalisées sur des mottes de dimensions centimétriques à une humidité proche de la capacité au champ ( $pF$  2,5).

## **2. 3. Mesure des propriétés de rétention en eau**

Les déterminations hydriques ont porté sur des mottes de dimensions centimétriques (5 à 10 cm<sup>3</sup>) obtenues par fragmentation à la main à partir d'échantillons non perturbés de dimensions décimétriques (300 à 1000 cm<sup>3</sup>). Les mesures ont par conséquent été effectuées sur des échantillons à structure interne conservée et n'ayant jamais été séchés. Sept teneurs en eau massiques ont été déterminées pour des valeurs de potentiel de -10 hPa ( $pF$ 1.0), -33 hPa ( $pF$ 1.5), -100 hPa ( $pF$ 2.0), -330 hPa ( $pF$ 2.5), -1000 hPa ( $pF$ 3.0), -3300 hPa ( $pF$ 3.5) et -15000 hPa ( $pF$ 4.2). Les principales fonctions de pédotransfert rencontrées dans la littérature scientifiques ont été développées pour ces mêmes potentiels, cette gamme de potentiels nous

permet de comparer nos résultats à ceux obtenus par d'autres auteurs (Rawls *et al.*, 1982 ; Bastet, 1999 cité par Bruand *et al.*, 2002).

Les déterminations ont été effectuées au moyen de l'appareil de Richards (1954). Les mottes ont été disposées sur une pâte de kaolinite préalablement ressuyée à -100 hPa (*pF*2.0) de façon à établir une continuité satisfaisante entre l'eau de l'échantillon et celle de la plaque poreuse du dispositif. La teneur en eau est mesurée après 72 heures de mise en équilibre puis séchage à l'étuve à 105°C pendant 24h.

#### **2. 4. Analyses physiques et chimiques**

Les analyses physiques et chimiques ont été effectuées sur des échantillons séchés à l'air ambiant et tamisés à 2mm. Il a été procédé à une analyse granulométrique selon la méthode internationale à la pipette de Robinson, après une destruction de la matière organique et une dispersion des particules élémentaires.

Concernant le pH et la conductivité électrique, ils ont été obtenus dans une suspension de terre fine dans de l'eau distillée avec respectivement un rapport de 1/2.5 et 1/5. Le taux de calcaire total a été déterminé avec le calcimètre de Bernard. Le dosage du carbone organique a été fait selon la méthode Anne.

La CEC a été mesurée selon les étapes suivantes : l'échantillon est d'abord saturé en ions sodium avec une solution de chlorure de sodium, puis on procède à une élimination de l'excès de sodium par un lavage à l'alcool éthylique, ensuite à son échange par une solution d'acétate d'ammonium. L'extraction des bases échangeables est faite sur une autre prise d'essai par une solution d'acétate d'ammonium.

#### **2. 5. Etablissement des fonctions de pédotransfert**

Les fonctions de pédotransfert ont été établies par régressions multiples entre la rétention en eau aux différents potentiels et les caractéristiques de constitution. La démarche adoptée consiste à introduire les caractéristiques des sols dans les équations de régressions, et à analyser l'amélioration obtenue sur le coefficient de détermination ( $R^2$ ) et le coefficient de corrélation ( $r$ ).

Dans une deuxième étape, les échantillons ont été regroupés selon leur texture puis en fonction de leur densité apparente. Par la suite, des fonctions de pédotransfert ont été développées pour chaque classe de texture et de densité apparente.

## 2. 6. Validation des fonctions de pédotransfert

Un autre ensemble de vingt échantillons destiné à valider les fonctions de pédotransfert a été prélevé dans la même région d'étude.

La validation se fait essentiellement par une comparaison des valeurs prédites par les fonctions de pédotransfert à celles mesurées au laboratoire, les grandeurs utilisées dans notre étude sont

- ✓ l'erreur moyenne de prédiction (*EMP* ou *EM*)

$$EM = \frac{1}{n} \sum (\theta_p - \theta_m)$$

- ✓ l'écart type de prédiction :

$$ETP = \left\{ \frac{1}{n} \sum [(\theta_p - \theta_m) - EMP]^2 \right\}^{1/2}$$

**PARTIE III**  
**Résultats et discussions**

## CHAPITRE III

### Etude des propriétés de rétention en eau des sols de la Mitidja

#### 1. Caractéristiques et propriétés de l'ensemble des sols étudiés

##### 1. 1. Description des paramètres physiques

Les résultats analytiques sont portés dans l'annexe 2. Les statistiques descriptives des données physiques présentées au tableau 9 montrent une importante variabilité de la composition granulométrique des différents échantillons. Les teneurs en argile sont assez élevées, leur moyenne est de 48,4 %, avec un minimum de 24,6 % et un maximum de 67,8 %.

**Tableau IX. Variabilité des caractéristiques physiques des échantillons (n=60).**

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart type
<b>A (%)</b>	48,4	24,6	67,8	11,5
<b>Lf (%)</b>	26,0	13,8	47,0	8,8
<b>Lg (%)</b>	15,8	1,6	27,8	5,9
<b>Sf (%)</b>	6,3	0,7	26,0	5,0
<b>Sg (%)</b>	2,5	0,3	10,2	2,4
<b>Da</b>	1,5	1,3	1,8	0,1

Concernant les teneurs en limons fins et grossiers, sables fins et grossiers, on peut dire qu'elles sont plus ou moins élevées avec des moyennes respectives de 26 %, 15,8 %, 6,3 % et 2,5. Elles varient entre des minimums respectifs de 13,8 %, 1,6 %, 0,7 % et 0,3 % et des maximums respectifs de 47 %, 27,8 %, 26 % et 10,2 %.

S'agissant des densités apparentes, celles-ci sont comprises entre un minimum de 1,3 et un maximum de 1,8.

Globalement, ces échantillons sont plutôt argileux, moyennement limoneux, et très faiblement pourvus en sables, alors que les densités s'étalent sur un large intervalle.

##### 1. 2. Textures de l'ensemble des échantillons

La représentation des résultats des compositions granulométriques sur le triangle textural de l'USDA (Figure 4) indique que les échantillons sont répartis essentiellement sur quatre classes de texture : argileuse, argilo-limoneuse, limono-argileuse fine et limono-argileuse, ces textures sont caractéristiques des sols de la Mitidja.

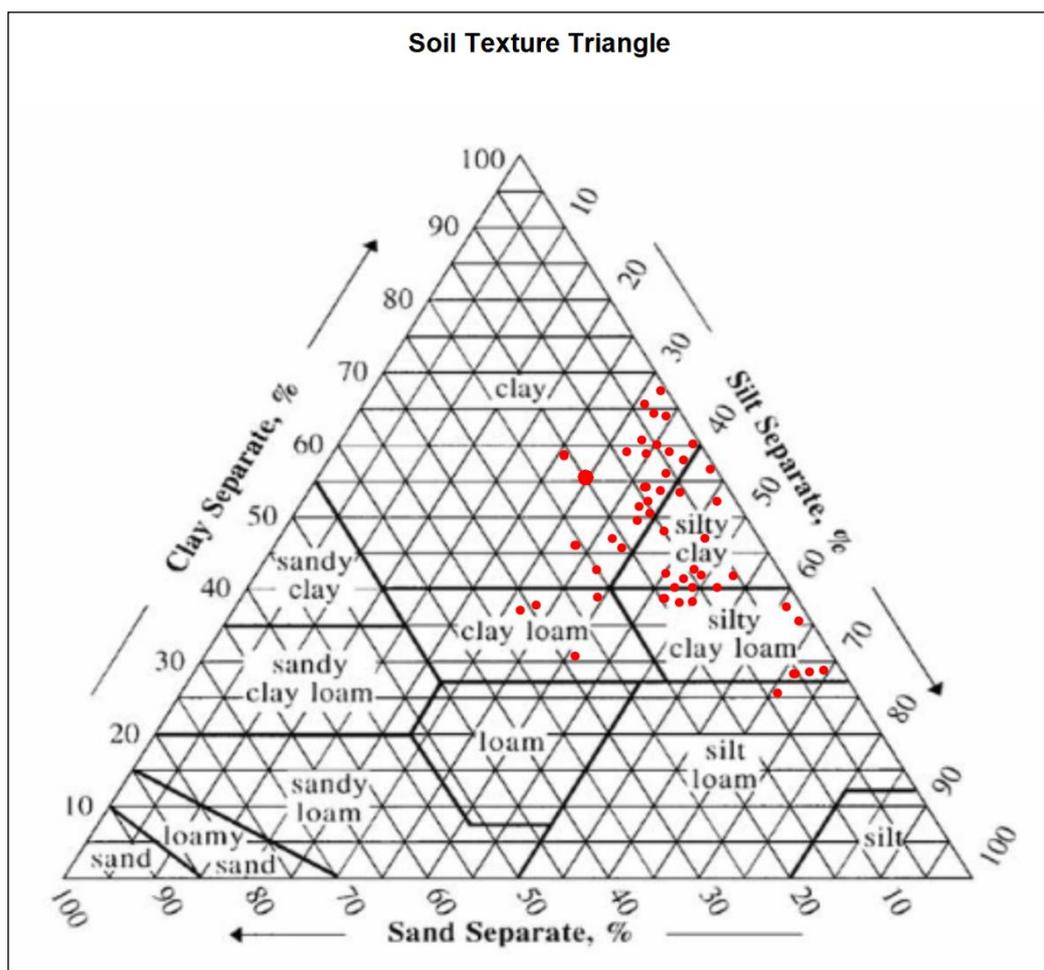


Figure 4. Textures des échantillons étudiés (USDA).

### 1. 3. Description des paramètres chimiques

Tableau X. Variabilité des caractéristiques chimiques et biologique des échantillons (n=60).

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart type
pH	8,0	7,4	8,4	0,2
CE (ds / m)	0,18	0,06	0,68	0,11
CaCO <sub>3</sub> (%)	9,5	0,0	26,1	9,0
MO (%)	2,9	1,6	4,7	0,8
CEC (Cmol / kg)	21,9	12,2	27,0	4,2

Les résultats du tableau 10 indiquent que le pH des sols étudiés varie entre 7,4 et 8,4 tandis que la CE passe de 0,06 ds/m à 0,68 ds/m. Concernant le calcaire total (CaCO<sub>3</sub> %), son taux varie entre une valeur minimale nulle à une valeur maximale de 26,1 %. Les teneurs en matière organique sont moyennes (2,9 %), elles sont comprises entre un minimum de 1,6 % et un maximum de 4,7 %. La moyenne de la CEC est de 21,9 Cmol/kg, le minimum est de

12,2 Cmol/kg alors que le maximum est de 27 Cmol/kg, ce qui est globalement en rapport avec les taux d'argile et de matière organique.

L'analyse de ces résultats indique que ces sols sont peu calcaires ; leur pH est neutre à basique ; les teneurs en matière organique sont faibles à moyennes et une CEC moyenne.

#### 1. 4. Teneurs en eau à différents potentiels sur l'ensemble des sols

Les teneurs en eau massiques aux différents potentiels sont portés dans l'annexe 3.

**Tableau XI. Teneurs en eau pondérales aux différents potentiels**

	<b>Moyenne</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>	<b>Ecart type</b>
<b>pF1</b>	29,7	22,4	41,0	4,8
<b>pF1,5</b>	28,0	21,2	38,6	4,6
<b>pF2</b>	25,9	19,7	36,4	4,4
<b>pF2,5</b>	24,1	18,2	34,6	4,1
<b>pF3</b>	21,5	15,6	31,6	3,9
<b>pF3,5</b>	19,6	13,9	26,4	3,6
<b>pF4,2</b>	16,8	11,8	22,7	3,2

Les teneurs en eau sont moyennes au niveau de tous les potentiels, cela est en relation avec les taux d'argile rencontrés dans ces sols ainsi qu'à leur texture qui est principalement fine. Le tableau 11 indique que l'humidité pondérale à la capacité de rétention (pF 2,5) de l'ensemble des sols, varie entre une valeur minimale de 18,2 % et une valeur maximale égale à 34,6 %, la moyenne étant de 24,1 %. Quant à l'humidité au point de flétrissement permanent (pF 4,2), sa moyenne est de 16,8 % et varie entre une valeur minimale de 11,8 % et une valeur maximale de 22,7 %.

## 2. Paramètres influençant la rétention en eau

Dans cette partie nous allons étudier l'effet des différents paramètres sur les propriétés de rétention en eau, il s'agit notamment de l'argile ; de la matière organique et de la densité apparente. Les coefficients de corrélation et de détermination serviront à apprécier le poids de chaque paramètre sur la rétention en eau aux différents potentiels.

### 2. 1. Résultats

Les résultats obtenus sont portés dans le tableau 12.

**Tableau XII. Corrélations entre la rétention en eau et l'argile, la matière organique et la densité apparente (n = 60,  $\alpha = 0,05$ )**

	pF1		pF1, 5		pF2		pF2, 5		pF3		pF3, 5		pF4, 2	
	R <sup>2</sup>	r												
<b>A%</b>	0,36	0,60	0,38	0,62	0,41	0,64	0,48	0,70	0,56	0,75	0,60	0,77	0,63	0,79
<b>MO%</b>	0,08	0,29	0,08	0,29	0,08	0,28	0,12	0,34	0,15	0,39	0,13	0,36	0,13	0,36
<b>Da</b>	0,59	-0,77	0,59	-0,77	0,50	-0,71	0,42	-0,65	0,34	-0,58	0,29	-0,54	0,31	-0,57

#### 2. 1. 1. Effet de la matière organique

Globalement, les coefficients de corrélation obtenus sont significatifs à 0,05 %, selon le potentiel, ils varient entre 0,29 et 0,39. Une légère augmentation est observée au fur et à mesure que le potentiel diminue. Malgré ces différences, l'effet de la matière organique sur la rétention en eau reste faible à tous les potentiels, en effet la variabilité de la rétention en eau expliquée par la matière organique est faible, elle varie de 8 % à 13 % selon le potentiel.

Cela pourrait être expliqué par les faibles taux de matière organique comparés à ceux de l'argile, son effet est statistiquement masqué par les teneurs élevées de l'argile.

#### 2. 1. 2. Effet de l'argile

Le tableau 12 et les figures 5, 6, 7, indiquent l'existence d'une forte relation statistique entre la teneur en argile et la rétention en eau, les coefficients de corrélations sont significatifs et ils ont tendances à augmenter au fur et à mesure que le potentiel diminue ; ainsi le « r » passe de 0,60 à pF 1, à 0,79 à pF 4,2.

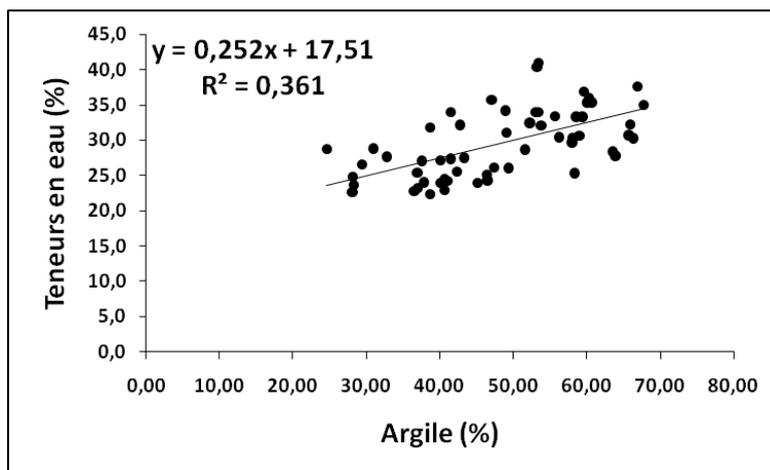


Figure 5. Relation entre le taux d'argile et la teneur en eau à pF 1

Les résultats révèlent que la rétention en eau aux bas potentiels est hautement influencée par l'argile, en effet à ce niveau de potentiel (pF 4,2), l'argile explique 63 % des variations de la rétention en eau ; alors qu'aux hauts potentiels (pF1), l'argile n'expliquerait que 36 % des variations.

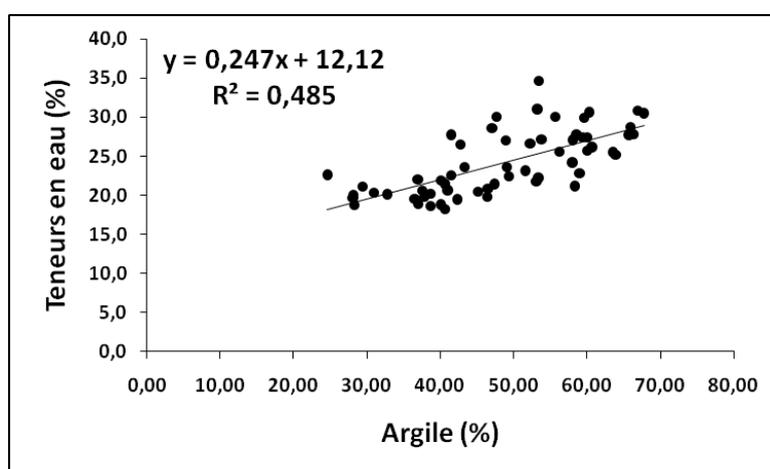


Figure 6. Relation entre le taux d'argile et la teneur en eau à pF 2,5

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 les plus fines.

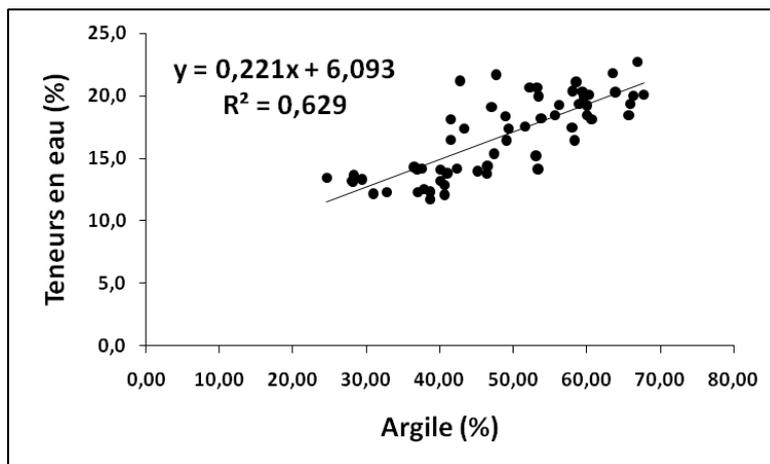


Figure 7. Relation entre le taux d'argile et la rétention en eau à pF 4,2

Globalement, il est clair que les échantillons les plus argileux sont ceux qui retiennent le plus d'eau surtout aux bas potentiels (pF 4,2) (figures 5, 6, 7). De ce fait, les variations des propriétés de rétention en eau des sols étudiés peuvent s'expliquer par les variations des taux d'argile.

### 2. 1. 3. Effet de la densité apparente

L'analyse du tableau 12 et des figures 8, 9, 10, révèle l'existence d'une forte relation statistique entre la rétention en eau et la densité apparente, les coefficients de corrélations obtenus sont significatifs et ils ont tendance à diminuer au fur et mesure que le potentiel baisse ; ainsi le « r » passe de -0,77 à pF 1 à -0,57 à pF 4,2.

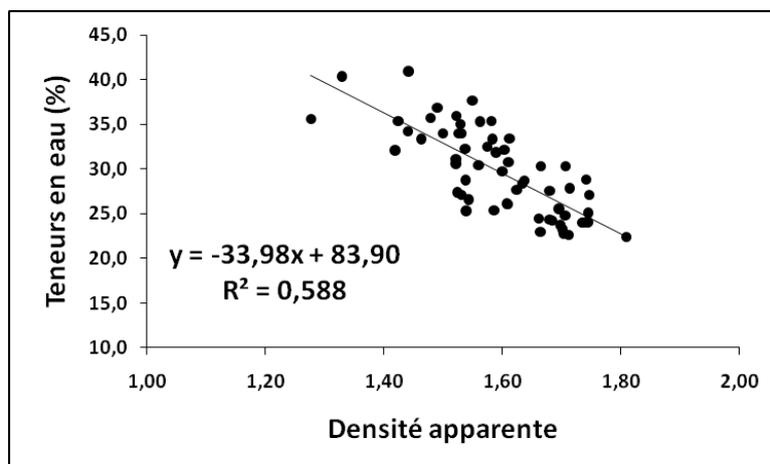


Figure 8. Relation entre Da et la rétention en eau à pF1

Les figures 8, 9, 10, révèlent l'existence d'une relation inversement proportionnelle entre la rétention en eau et la densité apparente. Il est clair que les échantillons les plus denses sont ceux qui retiennent le moins d'eau surtout dans les hauts potentiels (pF 1).

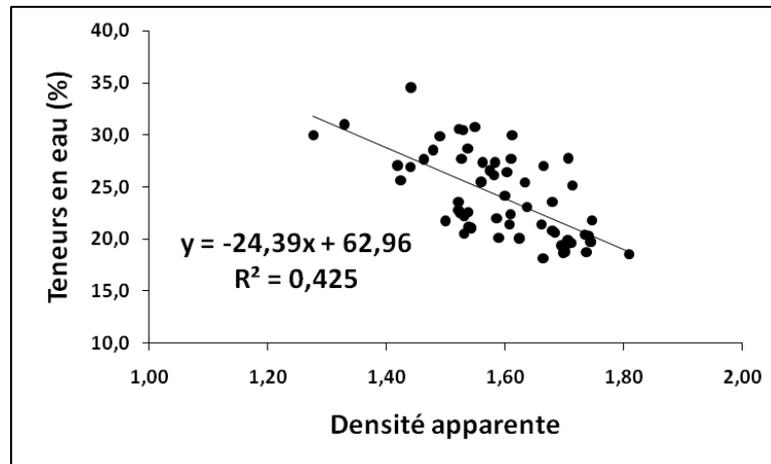


Figure 9. Relation entre Da et la rétention en eau à pF 2,5

Contrairement à l'argile, la rétention en eau aux hauts potentiels est largement influencée par la densité apparente, alors qu'aux bas potentiels son effet est moins important. Ainsi la densité apparente explique à elle seule 59 % des variations de la rétention en eau aux hauts potentiels (pF1), alors qu'au niveau des bas potentiels (pF 4,2), la densité apparente n'expliquerait que 32 %.

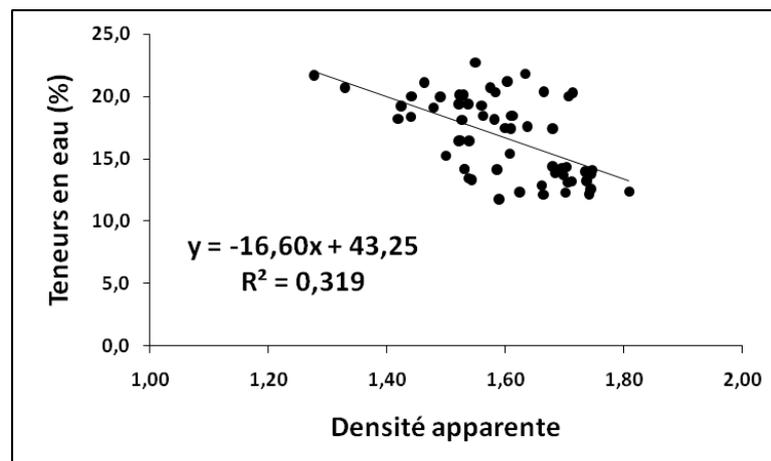


Figure 10. Relation entre Da et la rétention en eau à pF 4,2

## **2. 2. Discussion**

Il ressort des résultats obtenues que la rétention en eau des sols de la Mitidja est principalement influencée par deux paramètres à savoir, la teneur en argile et la densité apparente. Ces deux paramètres agissent différemment selon qu'on soit au niveau des hauts potentiels ou au niveau des bas potentiels.

Ainsi, aux bas potentiels, l'eau est retenue principalement à la surface des argiles et dans la microporosité développée par cette dernière ; par contre aux hauts potentiels, la rétention en eau est principalement due à la macroporosité résultant de la structuration du sol, celle-ci s'exprimant par la densité apparente.

S'agissant de la matière organique, les résultats obtenus correspondent à ceux de Lal (1994), de Danalatos *et al.* (1994) cités par Rawls *et al.* (2003), ces auteurs ont montré que l'effet de la matière organique sur la rétention en eau était faible à tous les potentiels. Dans le même sens, Hudson (1994) estime que l'effet de la matière organique est généralement masqué par des variations importantes dans la composition granulométrique.

A l'inverse, Rawls *et al.* (2003) ont indiqué que l'effet de la matière organique est important que se soit aux hauts ou aux bas potentiels.

### 3. Rôle de la CEC dans la rétention en eau des sols

#### 3. 1. Résultats

##### 3. 1. 1. Influence de l'argile et de la matière organique sur la CEC

L'objectif vise à analyser la relation qui existe entre l'argile, la matière organique d'une part et la capacité d'échange cationique des sols de la Mitidja d'autre part.

La figure 11, indique l'existence d'une forte corrélation entre la CEC du sol et le taux d'argile ( $r = 0,90$ , au seuil de 0,05 %), en effet l'argile explique 80 % des variations de la CEC du sol. L'équation de régression qui relie les deux caractéristiques est de la forme :

$$CEC = 0,33 \text{ argile} + 6,04.$$

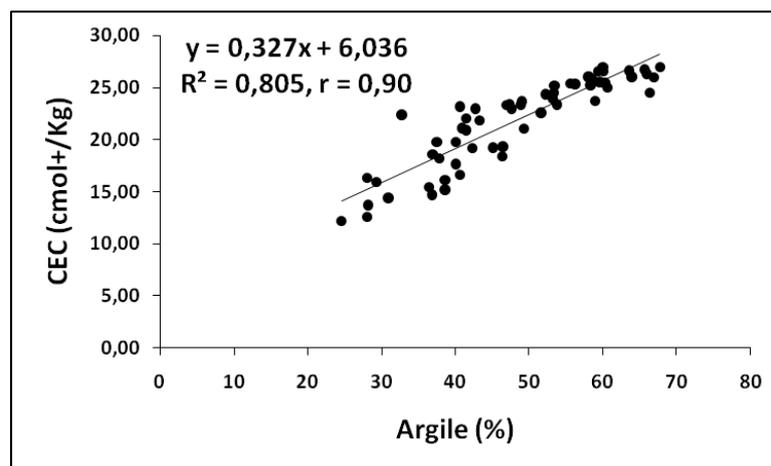
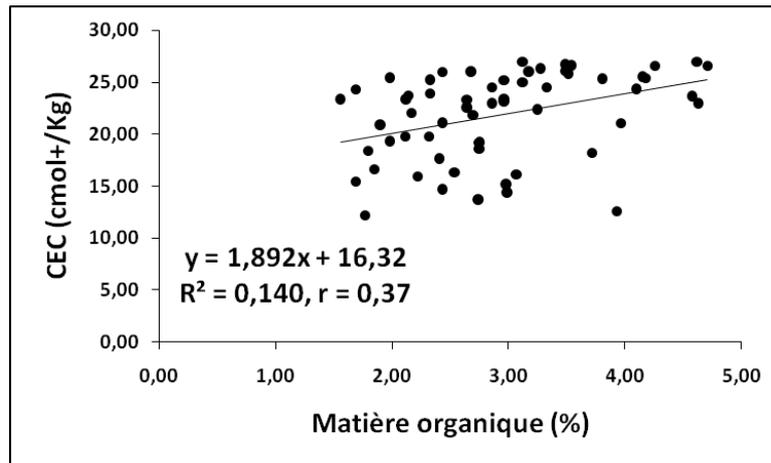


Figure 11. Relation entre l'argile et la CEC

La relation entre la matière organique et la CEC est significative au seuil de 0,05% ( $r = 0,37$ ) (Figure 12). A l'inverse de l'argile, la matière organique semble avoir un faible effet sur la CEC du sol, elle n'explique que 14 % des variations de la CEC. La relation entre ces deux caractéristiques peut s'écrire comme suite :  $CEC = 1,89 \text{ MO} + 16,32$ .



**Figure 12. Relation entre la matière organique et la CEC**

L'étude de la régression multiple entre l'argile, la matière organique et la capacité d'échange cationique, indique l'existence d'une relation significative ( $r = 0,90$  au seuil de  $0,05$ ). L'équation explique 81 % des variations dans la capacité d'échange cationique.

$$CEC = 0,32 \text{ argile} + 0,44 \text{ MO} + 5,25 \quad R^2 = 0,81, r = 0,90$$

Il ressort de cette équation que chaque Kilogramme d'argile et de matière organique contribue respectivement pour 32 cmol+ et 44 cmol+ dans la capacité d'échange cationique des sols étudiés.

### 3. 1. 2. Estimation de la rétention en eau au moyen de la CEC

De nombreux auteurs (Tessier *et al.*, 1992 ; Bruand *et al.*, 1992 ; Bigorre, 2000) ont montré le rôle important que joue la CEC dans la détermination des propriétés hydriques, selon eux, elle serait en effet un bon estimateur des propriétés de rétention en eau. Du fait que ce paramètre est souvent disponible lors de l'inventaire des sols, il serait opportun de le tester en vue de répondre à cet objectif.

D'après le tableau 13, tous les coefficients de corrélations sont significatifs, mais ils varient selon le pF. Les équations de régressions qui relient la rétention en eau à l'argile et la matière organique sont d'autant plus significatives que les potentiels sont bas. En effet, le coefficient de corrélation passe de 0.61 à 0.80, la variabilité expliquée par l'équation passe de 37 % à 64 %. Les équations de régressions qui retiennent la CEC comme variable explicative,

présentent des coefficients de corrélations comparables à ceux qui prennent en compte l'argile et la matière organique. La variabilité des propriétés de rétention en eau expliquée par la CEC varie entre 43 % et 63 %.

Le tableau 13, révèle qu'au niveau des potentiels allant de pF 1 à pF 2,5, la CEC explique la plus grande part des variations de la rétention en eau ( $0,43 \leq R^2 \leq 0,53$ ) comparée à celle de l'argile et de la matière organique ( $0,37 \leq R^2 \leq 0,50$ ). A pF 3, l'effet de la CEC est semblable à celui de l'argile et de la matière organique. Par contre aux pF 3,5 et 4,2, l'argile et la matière organique expliquent la plus grande part des variations de la rétention en eau ( $0,61 \leq R^2 \leq 0,64$ ) comparée à celle de la CEC ( $0,59 \leq R^2 \leq 0,63$ ).

**Tableau XIII. Emploi comparé de la CEC comme estimateur de la rétention en eau**

pF	FPT	R <sup>2</sup>	r
pF1	W = 16.48 + 0.24 A% + 0.58 MO%	0.37	0.61
	W = 13.12 + 0.76 CEC	0.43	0.66
pF1.5	W = 15.02 + 0.24 A% + 0.52 MO%	0.39	0.62
	W = 11.51 + 0.76 CEC	0.46	0.68
pF2	W = 13.23 + 0.24 A% + 0.39 MO%	0.42	0.65
	W = 10.44 + 0.71 CEC	0.45	0.67
pF2.5	W = 11.04 + 0.23 A% + 0.61 MO%	0.50	0.71
	W = 8.65 + 0.70 CEC	0.53	0.72
pF3	W = 8.04 + 0.23 A% + 0.73 MO%	0.58	0.76
	W = 6.14 + 0.70 CEC	0.58	0.76
pF3.5	W = 6.96 + 0.23 A% + 0.52 MO%	0.61	0.78
	W = 5.14 + 0.66 CEC	0.59	0.77
pF4.2	W = 5.32 + 0.21 A% + 0.44 MO%	0.64	0.80
	W = 3.52 + 0.61 CEC	0.63	0.79

### 3. 2. Discussion

De ces résultats, il ressort que la capacité d'échange cationique des sols étudiés est due principalement à la contribution de la fraction argileuse. Même si la matière organique contribue pour 44 cmol+ dans la CEC ce qui est légèrement supérieur à la contribution de l'argile (32 cmol+), son apport pourrait être négligé du fait que dans ces sols, les teneurs moyennes d'argile sont 15 fois supérieures à celles de la matière organique. A l'inverse de nos résultats, Bigorre *et al.* (1999), ont montré sur des échantillons provenant du territoire

Français que la contribution de la matière organique à la CEC était plus importante que celle de l'argile. En effet, chaque kilogramme d'argile et de matière organique contribue respectivement pour 37 cmol+ et 274 cmol+.

Les résultats obtenus pour nos sols concordent avec ceux de Gheyi et Halitim (1976) et Djili et Daoud (2001) pour les sols du Nord d'Algérie, la contribution de l'argile pour la CEC de ces sols est respectivement égale à 45 cmol+ et 33 cmol+ selon ces mêmes auteurs. De ces résultats, il est très probable que l'argile de ces sols a un comportement d'interstratifiés type illites-smectites.

Les résultats des corrélations entre la rétention en eau et la CEC, confirment que cette dernière peut être considérée comme un prédicteur fiable de la rétention en eau. Les effets de ce paramètre sont plus significatifs aux bas potentiels, cela est dû au fait qu'à ce niveau de potentiel, l'essentiel de l'eau est retenue par la microporosité développée par l'assemblage des particules argileuses, cette microporosité est d'autant plus élevée que la teneur en argiles est plus importantes, donc présentant une surface spécifique plus importante.

Les équations de régressions qui prennent la CEC comme variable explicative sont d'autant plus performantes que celles qui prennent en considération l'argile et la matière organique ensemble. Nos résultats concordent avec ceux obtenus par Bruand *et al.* (1992) et ceux de Bigorre (2000), ces chercheurs estiment que la CEC pourrait être considérée comme un bon estimateur des propriétés de rétention en eau.

#### 4. Etude de la rétention en eau des sols argileux

Pour mettre en évidence les effets des propriétés de surface de l'argile et du volume poral développé par l'assemblage de ses particules, un lot de 22 échantillons a été retenu (annexe 4).

Ces échantillons ont été sélectionnés du fait qu'ils appartenaient à la classe de texture argileuse (selon le triangle de texture de l'USDA). Leurs principales caractéristiques sont portées dans les tableaux 14 et 15.

**Tableau XIV. Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques (n = 22)**

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
<b>CaCO<sub>3</sub>(%)</b>	7,7	0,0	23,0	7,8
<b>MO(%)</b>	3,0	1,6	4,7	0,8
<b>CEC (cmol+/Kg)</b>	24,22	17,68	26,97	2,56
<b>Ar (%)</b>	56,7	40,1	67,8	7,8
<b>Li (%)</b>	35,4	30,9	40,3	2,6
<b>Sa (%)</b>	7,8	1,2	19,9	5,6
<b>Da</b>	1,6	1,3	1,7	0,1

L'analyse du tableau 14 indique que les échantillons étudiés ont des teneurs en calcaire qui varient de 0,0 % à 23,0 %, avec une moyenne de 7,7 %. Les taux de matière organique sont moyens à faibles, ils varient de 1,6 % à 4,7 % avec une moyenne de 3 %. La CEC de ces sols varie de 17,68 à 26,97 cmol+/Kg avec une moyenne de 24,22 cmol+/Kg, ces valeurs restent moyennes comparées aux taux élevés de l'argile, ceux-ci varient de 40,1 % à 67,8%. La fraction limoneuse est fortement présente dans ces sols, ses taux varient de 30,9 % à 40,3 % avec une moyenne de 35,4 %. A l'inverse des limons, les sables sont faiblement présents (7,8% en moyenne), leurs taux varient de 1,2 % à 19,9 %. Les valeurs de la densité apparente varient de 1,3 à 1,7 avec une moyenne de 1,6, ces valeurs renseignent sur un état structural assez variable au sein d'une même classe de texture.

Les teneurs en eau aux différents potentiels des échantillons étudiées sont moyennes, elles sont en relation avec les forts taux d'argiles rencontrés dans ces échantillons. Ces teneurs en eau sont variables au sein de la même classe de texture, ainsi la teneur en eau à pF 2,5 (capacité de rétention) varie de 18,8 % à 34,6 % avec une moyenne de 27 %, celle mesurée à pF 4,2 varie de 13,2 % à 22,7 % avec une moyenne de 18,8 %.

Tableau XV. Statistiques descriptives des propriétés de rétention en eau (n = 22)

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
pF 1	32,8	24,0	41,0	4,7
pF 1,5	30,7	21,5	38,6	4,8
pF 2	28,9	20,4	36,4	4,5
pF 2,5	27,0	18,8	34,6	3,9
pF 3	24,4	17,8	31,6	3,4
pF 3,5	22,0	16,1	26,4	2,8
pF 4,2	18,8	13,2	22,7	2,3

#### 4. 1. Résultats

##### 4. 1. 1. Relation entre l'argile et la rétention en eau

L'analyse du tableau 16 indique que la relation entre le taux d'argile et la rétention en eau est significative au niveau de tous les potentiels (r varie de 0,43 à 0,72 au seuil de 0,05 %).

Tableau XVI. Corrélations entre le taux d'argile et la rétention en eau (%) (n = 22, α = 0,05)

	pF1		pF1, 5		pF2		pF2, 5		pF3		pF3, 5		pF4, 2	
	R <sup>2</sup>	r												
A %	0,18	0,43	0,21	0,46	0,26	0,51	0,32	0,57	0,35	0,59	0,46	0,68	0,52	0,72

L'effet de l'argile est d'autant plus important que le potentiel diminue, en effet la variabilité de la rétention en eau expliquée par l'argile passe de 18 % à pF 1 à 52 % à pF 4,2.

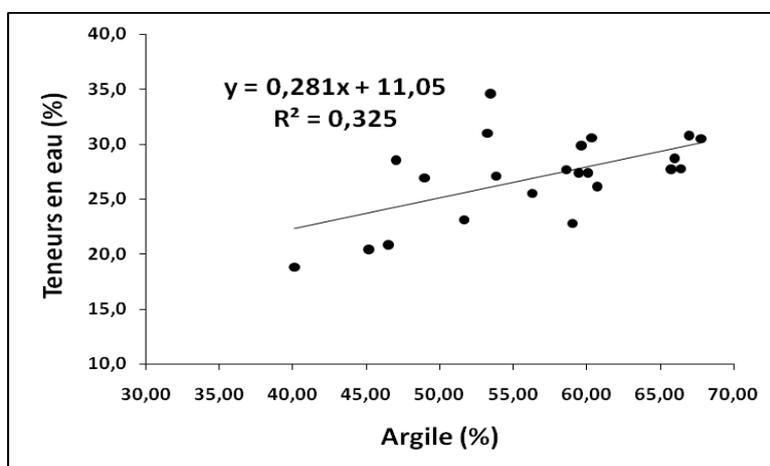


Figure 13. Relation entre le taux d'argile et la rétention en eau des sols argileux à pF 2,5

La figure 13 montre que l'argile n'explique que 32 % des variations de la teneur en eau à pF 2,5. A pF 4,2 les variations de la teneur en eau sont fortement expliquées par les taux d'argile, en effet l'argile explique 52 % des variations de la teneur en eau (figure 14).

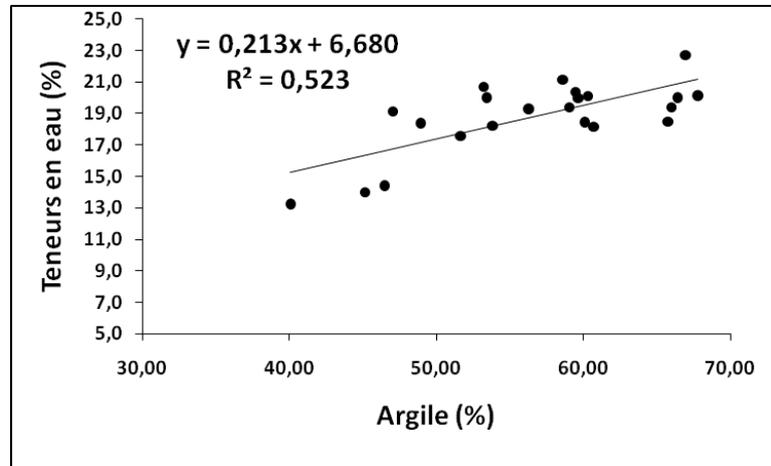


Figure 14. Relation entre le taux d'argile et la rétention en eau des sols argileux à pF 4,2

#### 4. 1. 2. Influence de la CEC et du volume poral de la phase argileuse sur la rétention en eau

Pour discuter des propriétés de rétention en eau en relation avec les propriétés de surface de l'argile et le mode d'assemblage des particules argileuses, nous avons calculé les propriétés de rétention en eau de l'argile, sa capacité d'échange cationique et le volume poral développé par l'assemblage de ses particules (Bruand et Tessier, 2000). La CEC de l'argile, est utilisée comme un estimateur des propriétés de surface de l'argile ; le volume poral est, est censé rendre compte du mode d'assemblage des particules argileuses.

Comme il a été montré précédemment, la CEC des sols étudiés est due principalement à la contribution de la phase argileuse. De ce fait, la CEC de l'argile (CECarg) peut se calculer selon

$$CEC_{arg} = CEC / A \%$$

Avec CECarg, la capacité d'échange cationique de l'argile (cmol+/Kg d'argile), la CEC du sol (cmol+/Kg de sol), A %, le taux d'argile dans le sol.

La teneur en eau de l'argile (Warg) a été calculée aux différents potentiels selon

$$W_{arg} = W / A \%$$

Avec Warg, la teneur en eau de l'argile, W, teneur en eau du sol.

Le volume poral de la phase argileuse Varg a été déterminé à partir du volume apparent calculé à pF 2,5.

$$V_t = V_v + V_s$$

$$V_{arg} = V_v / A\%$$

Avec Vt, le volume massique du sol (cm<sup>3</sup>/g de sol), Vv, le volume des vides (cm<sup>3</sup>/g de sol), Vs, le volume du solide égal à 0,377 cm<sup>3</sup>/g (Dr = 2,65), Varg, le volume poral de l'argile (cm<sup>3</sup>/g d'argile).

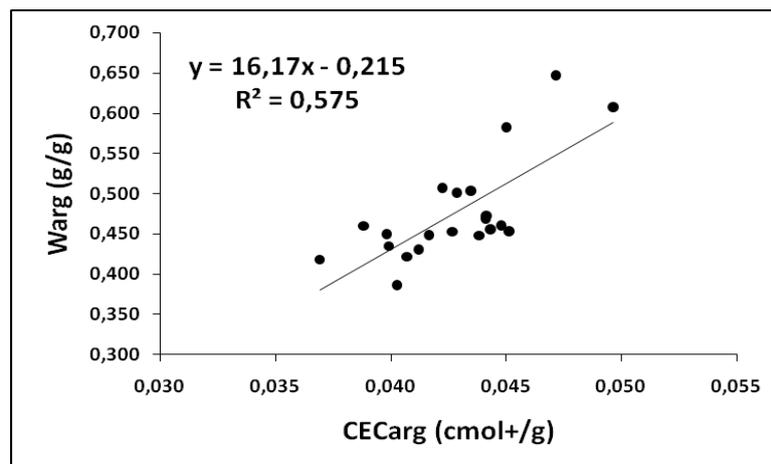
Les résultats des corrélations simples entre la CECarg, le volume poral de la phase argileuse et la rétention en eau, sont portés au tableau 17.

**Tableau XVII. Corrélations, CEC, volume poral de l'argile et sa rétention en eau (%) (n = 22, α = 0,05)**

	pF1		pF1, 5		pF2		pF2, 5		pF3		pF3, 5		pF4, 2	
	R <sup>2</sup>	r												
<b>CECarg (cmol+/Kg)</b>	0,66	0,81	0,55	0,74	0,50	0,71	0,57	0,76	0,55	0,74	0,62	0,79	0,62	0,79
<b>Varg (cm<sup>3</sup>/g)</b>	0,76	0,87	0,76	0,87	0,69	0,83	0,66	0,81	0,55	0,74	0,61	0,78	0,70	0,84

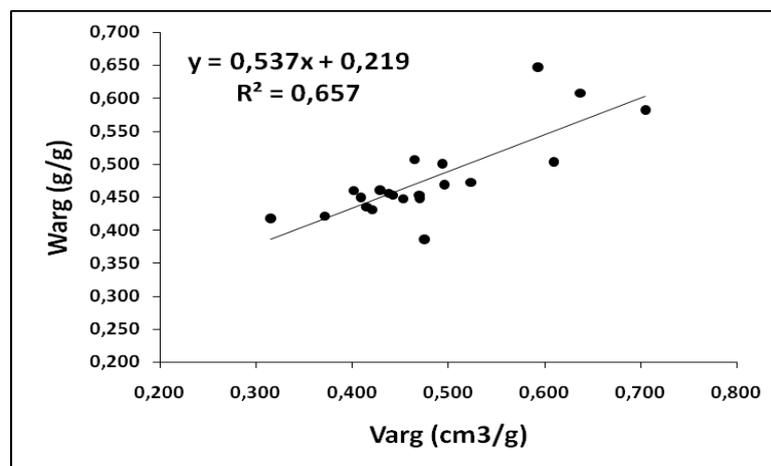
Les résultats du tableau 17 mettent en évidence l'existence d'une forte relation entre la CEC de l'argile (CECarg) et la rétention en eau (Warg). En effet, le coefficient de corrélation varie selon le potentiel de 0,74 à 0,81, sauf à pF 2 où le coefficient de corrélation est de 0,71. La relation avec le volume poral est nettement plus forte, le coefficient de corrélation varie de 0,81 à 0,87, sauf à pF 3 (r = 0,74).

Ces résultats montrent que la variation des propriétés de rétention en eau de l'argile, est fortement expliquée par sa CEC, et son volume poral.



**Figure 15. Relation entre CECarg et Warg à pH 2,5**

Ainsi à pH 2,5 la CECarg explique 57 % des variations de la teneur en eau (Warg) (figure 15). Alors que le volume poral de l'argile (Varg) explique 66 % des variations de la teneur en eau (Warg) (figure 16).



**Figure 16. Relation entre le Varg et Warg à pH 2,5**

A pH 4,2, la relation entre la rétention en eau de l'argile et sa CEC est plus forte par rapport au cas précédent (à pH 2,5). En effet, la CECarg explique 62 % des variations des propriétés de rétention en eau (figure 17).

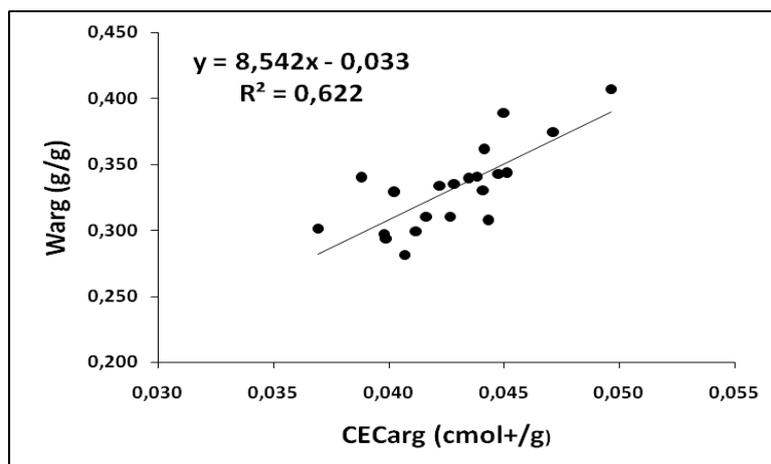


Figure 17. Relation entre la CECarg et Warg à pF 4,2

Par contre le volume poral de l'argile explique une grande part des variations de la rétention d'eau (70 %) à ce même potentiel (figure 18).

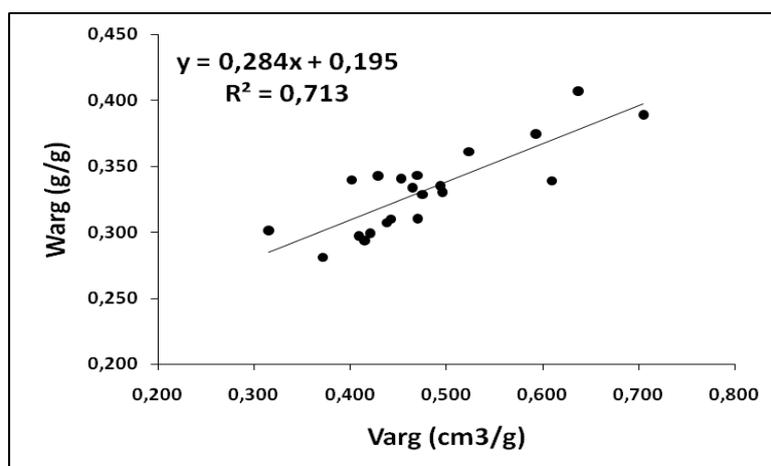


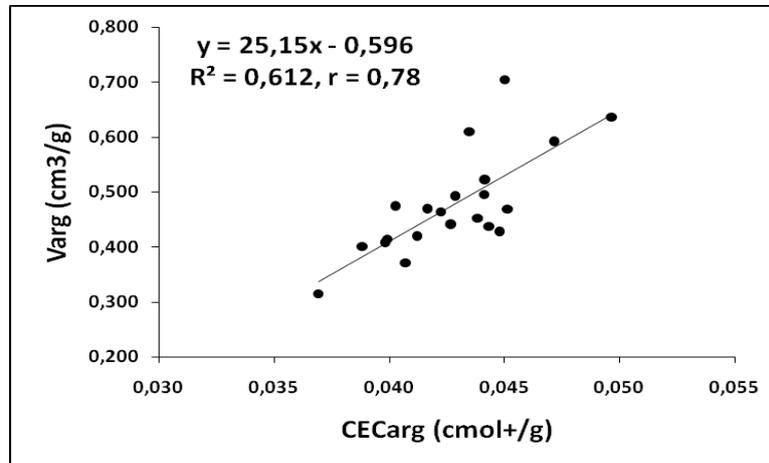
Figure 18. Relation entre le Varg et Warg à pF 4,2

D'après ces résultats, les propriétés de rétention en eau des argiles sont fortement influencées par le mode d'assemblage des particules élémentaires de l'argile (Varg), et les propriétés de surfaces des argiles (CECarg).

Ces deux propriétés, à savoir, le volume poral de l'argile et sa CEC semble être en relation étroite. La relation qui existe entre le volume poral de l'argile et sa CEC présente un coefficient de corrélation égale à 0,78 au seuil de 0,05 %.

L'équation de régression simple est de type

$$\text{Varg} = 25,15 \text{ CECarg} - 0,60$$



**Figure 19. Relation entre Varg et CECarg**

Comme le montre la figure 19, il est clair que le volume poral développé par les particules argileuses à une valeur de potentiel donnée, croit avec la capacité d'échange cationique, en raison des variations de la surface spécifique dont elle dépend.

## 4. 2. Discussion

Les propriétés de rétention en eau des sols argileux sont fortement influencées par les taux d'argile, sa capacité d'échange cationique et le mode d'assemblage des particules argileuses renseigné par le volume poral développé par l'argile. En effet, nous avons pu montrer l'existence d'une forte relation entre le Varg et Warg ( $R^2$  varie de 0,66 à 0,76).

La relation qui existe entre la CECarg et Warg ( $R^2$  varie de 0,62 à 0,76) pourrait être expliquée par l'étroite relation qui existe entre le volume poral de l'argile et sa CEC ( $R^2 = 0,61$ ), du fait que cette dernière renseigne sur les propriétés de surface de l'argile. Ainsi, les variations de la surface spécifique des particules argileuses, influencent le volume poral développé par l'assemblage de ces particules, et par conséquent la rétention en eau.

De même, les variations du volume poral liées à des variations dans le mode d'assemblage des particules argileuses, sont probablement dues à des histoires hydriques différentes, liées à des contraintes de dessiccation différentes.

## **5. Synthèse des principaux résultats**

Des résultats obtenus, il ressort que les propriétés de rétention en eau des sols de la Mitidja sont fortement influencées par la teneur en argile et la densité apparente. Ces deux paramètres agissent différemment selon le potentiel. Ainsi, aux hauts potentiels, la rétention en eau est due à la macroporosité résultant de la structuration du sol, celle-ci s'exprimant par la densité apparente. Par contre, aux bas potentiels, l'eau est retenue par la microporosité développée par l'assemblage des particules argileuses. L'effet de la matière organique sur la rétention en eau est faible à tous les potentiels, cela est dû probablement à ses faibles taux dans ces sols.

Les équations de régressions établies entre la CEC et la rétention en eau aux différents potentiels sont comparables à celles qui prennent en considération l'argile et la matière organique ensemble, de ce fait la CEC pourrait être considérée comme un bon estimateur des propriétés de rétention en eau surtout au niveau des bas potentiels.

L'étude de la relation entre l'argile, la matière organique et la capacité d'échange cationique, a montré que la CEC des sols étudiés est due principalement à l'apport de la fraction argileuse. En se basant sur ces résultats, nous avons pu calculer la capacité d'échange cationique de l'argile, ainsi que son volume poral et sa teneur en eau aux différents potentiels. Les résultats obtenus ont montré que les propriétés de rétention en eau des sols argileux sont fortement influencées par le mode d'assemblage des particules argileuses (renseigné par le volume poral développé par l'argile) et leurs propriétés de surface (estimées par la CEC).

## CHAPITRE IV

### Fonctions de pédotransfert

#### 1. Fonctions de pédotransfert continues

Les fonctions de pédotransfert ont été établies par régressions multiples entre la rétention en eau aux différents potentiels et les caractéristiques de constitution. La démarche adoptée consiste à introduire les caractéristiques du sol à l'équation de régression, et à analyser l'amélioration obtenue sur le coefficient de détermination ( $R^2$ ) et le coefficient de corrélation ( $r$ ).

##### 1. 1. Résultats

##### 1. 1. 1. Fonctions de pédotransfert à pF 1

Les régressions multiples obtenues sont toutes significatives, le coefficient de corrélations varie de 0.60 à 0.85. On observe qu'il augmente avec l'introduction successive des différents paramètres (tableau 18).

**Tableau XVIII. Régressions multiples à pF 1**

Equations de régression	$R^2$	$r$	Sgn
$y = 17.51 + 0.25 A\%$	0.36	0.60	s
$y = 16.48 + 0.24 A\% + 0.58 MO\%$	0.37	0.61	s
$y = 15.73 + 0.25 A\% + 0.53 MO\% + 0.02 Lf\%$	0.37	0.61	s
$Y = 64.63 + 0.17 A\% + 0.26 MO\% + 0.08 Lf\% - 28.83 Da$	0.73	0.85	s

Ainsi, l'équation qui relie la rétention en eau à pF1 à l'argile présente un coefficient de corrélation égal à 0.60, ce facteur explique donc à lui seul, 36 % de la variation. L'introduction de la matière organique comme variable explicative améliore quelque peu la qualité de la prédiction, le coefficient de corrélation passe de 0.60 à 0.61 alors que la variabilité expliquée par l'équation passe de 36 % à 37 %. L'introduction des limons fins à l'équation de régression semble n'avoir aucun poids sur la qualité de la prédiction. Par contre, la densité apparente améliore nettement la qualité de la prédiction, ainsi le coefficient de régression passe de 0.61 à 0.85 et la variabilité expliquée par l'équation passe de 37 % à 73

% ; soit une augmentation de 36 % apportée par l'ajout de la densité apparente. Ces résultats montrent le rôle important que joue la structure du sol dans la rétention en eau dans le domaine des hauts potentiels. Cela semble logique du fait qu'à ce niveau l'essentiel de l'eau est retenu dans la macroporosité du sol.

### 1. 1. 2. Fonctions de pédotransfert à pF1.5

Le tableau 19 indique que toutes les équations de régressions sont significatives, le coefficient de corrélation s'améliore avec l'introduction des différents paramètres.

Tableau XIX. Régressions multiples à pF 1.5

Equations de régression	R <sup>2</sup>	r	Sgn
Y= 15.94 + 0.25 A%	0.38	0.62	s
Y= 15.02 + 0.24 A% + 0.52 MO%	0.39	0.62	s
Y= 13.37 + 0.25 A% + 0.40 MO% + 0.05 Lf%	0.39	0.63	s
Y= 60.68 + 0.18 A% + 0.14 MO% + 0.10 Lf% - 27.88 Da	0.76	0.87	s

L'argile reste un bon estimateur de la rétention en eau, en effet la variabilité expliquée par l'équation est de 38 %. On remarque une légère amélioration par rapport au pF1, la variabilité expliquée passe de 36 % à 38 % et le coefficient de corrélation passe de 0.60 à 0.62. L'effet de la matière organique et des limons fins sur la rétention en eau reste faible, cela pourrait s'expliquer par les faibles teneurs en matière organique comparées à celles de l'argile ce qui rendrait son effet moins apparent. Cependant, la densité apparente constitue un facteur assez important, son introduction améliore la variabilité expliquée par l'équation de 37 % et le coefficient de corrélation de 0.24.

### 1. 1. 3. Fonctions de pédotransfert à pF 2

Toutes les équations de régressions sont significatives, le coefficient de corrélation passe de 0.64 et 0.85. La qualité de la prédiction s'améliore avec l'introduction successive des différentes variables explicatives (tableau 20).

Tableau XX. Régressions multiples à pF 2

Equations de régression	R <sup>2</sup>	r	Sgn
$y = 14.00 + 0.25 \text{ A\%}$	0.41	0.64	S
$y = 13.23 + 0.24 \text{ A\%} + 0.39 \text{ MO\%}$	0.42	0.65	S
$y = 10.33 + 0.27 \text{ A\%} + 0.18 \text{ MO\%} + 0.08 \text{ Lf\%}$	0.44	0.66	S
$y = 50.10 + 0.20 \text{ A\%} - 0.04 \text{ MO\%} + 0.13 \text{ Lf\%} - 23.44 \text{ Da}$	0.73	0.85	S

L'effet de l'argile sur la rétention en eau est plus marqué, le coefficient de corrélation s'améliore par rapport à celui obtenu à pF1 et à pF1.5. À la différence des cas précédents (pF1, pF1.5), l'effet de la matière organique et des limons fins apparaît. En effet, avec l'introduction de ces deux caractéristiques dans les équations de régressions, nous notons une augmentation respective de la variabilité expliquée de 1 % et de 2 %, et une amélioration du coefficient de corrélation de 0.01 ; cependant leur poids reste faible par rapport à celui de l'argile et de la densité apparente.

#### 1. 1. 4. Fonctions de pédotransfert à pF 2.5

Le niveau des corrélations est plus élevé en comparaison à celui déterminé aux potentiels précédents, la relation entre la rétention en eau et les différentes variables explicatives est d'autant plus forte que le nombre de variables augmente (tableau 21).

Tableau XXI. Régressions multiples à pF 2.5

Equations de régression	R <sup>2</sup>	r	Sgn
$y = 12.12 + 0.25 \text{ A\%}$	0.48	0.70	S
$y = 11.04 + 0.23 \text{ A\%} + 0.61 \text{ MO\%}$	0.50	0.71	S
$y = 7.98 + 0.26 \text{ A\%} + 0.38 \text{ MO\%} + 0.08 \text{ Lf\%}$	0.53	0.72	S
$y = 39.42 + 0.21 \text{ A\%} + 0.21 \text{ MO\%} + 0.12 \text{ Lf\%} - 18.53 \text{ Da}$	0.73	0.86	S

L'effet de l'argile sur la rétention en eau est très important, la variabilité expliquée par celle-ci est de 48 %, elle est par ailleurs plus élevée comparée à celle obtenue aux pF précédents.

Le rôle de la matière organique et des limons fins reste faible. Inversement, la densité apparente améliore nettement la qualité de la prédiction, cependant, son influence sur la rétention en eau commence à diminuer. L'augmentation de la variabilité expliquée par l'équation de régression lors de l'ajout de la densité apparente est de 20 %, alors qu'elle était de 29 % à pF2 et 37 % à pF1.5, l'évolution de ce dernier paramètre est inverse à celle de l'argile. Cela semble logique du fait que l'eau de la macroporosité est la première à être vidangée.

### 1. 1. 5. Fonctions de pédotransfert à pF 3

A ce niveau d'énergie, les relations sont encore plus serrées (tableau 22) par rapport aux pF précédents, l'addition des différentes variables explicatives améliore la qualité de la prédiction.

**Tableau XXII. Régressions multiples à pF 3**

Equations de régression	R <sup>2</sup>	r	Sgn
$y = 9.34 + 0.25 A\%$	0.56	0.75	S
$y = 8.04 + 0.23 A\% + 0.73 MO\%$	0.58	0.76	S
$y = 5.05 + 0.26 A\% + 0.51 MO\% + 0.08 Lf\%$	0.61	0.78	S
$y = 28.87 + 0.23 A\% + 0.38 MO\% + 0.11 Lf\% - 14.04 Da$	0.74	0.86	S

La rétention en eau à ce pF est fortement liée à la fraction fine du sol à savoir l'argile, en effet, cette dernière explique 56 % de la variation. L'introduction de la matière organique et des limons fins améliore la prédiction, mais leurs effets sur la rétention en eau restent faibles.

S'agissant de la densité apparente, son effet sur la rétention en eau diminue. Ainsi l'augmentation de la variabilité expliquée et du coefficient de corrélation est respectivement de 15 % et de 0.08, ce qui est faible en comparaison aux pF précédents.

Il ressort de ces résultats que les mécanismes de la rétention en eau aux hauts potentiels sont différents de ceux aux potentiels moyens, l'effet de l'argile apparaît fortement à partir des potentiels moyens à la différence de la densité apparente qui influe fortement la rétention en eau aux hauts potentiels.

### 1. 1. 6. Fonctions de pédotransfert à pF 3.5

Les équations de régressions sont également toutes significatives ; comme aux pF précédant, la prédiction s'améliore avec l'introduction des différentes variables explicatives (tableau 23).

**Tableau XXIII. Régressions multiples à pF 3.5**

Equations de régression	R <sup>2</sup>	r	Sgn
$y = 7.87 + 0.24 \text{ A\%}$	0.60	0.77	S
$y = 6.96 + 0.23 \text{ A\%} + 0.52 \text{ MO\%}$	0.61	0.78	S
$y = 4.10 + 0.26 \text{ A\%} + 0.30 \text{ MO\%} + 0.08 \text{ Lf\%}$	0.64	0.80	S
$y = 23.00 + 0.23 \text{ A\%} + 0.20 \text{ MO\%} + 0.10 \text{ Lf\%} - 11.14 \text{ Da}$	0.74	0.86	S

L'analyse de ces résultats révèle que l'argile influe fortement sur la rétention en eau dans le domaine des bas potentiels. La variable argile explique 60 % des variations de la teneur en eau, le coefficient de corrélation est de 0.77. L'effet de la matière organique et des limons fins est assez faible. On remarque aussi que l'effet de la densité apparente diminue dans le domaine des bas potentiels, l'augmentation de la variabilité expliquée et du coefficient de corrélation est respectivement de 10 % et 0.06.

### 1. 1. 7. Fonctions de pédotransfert à pF 4.2

Toutes les équations de régressions sont significatives, le coefficient de corrélation passe de 0.79 à 0.88 au fur et à mesure qu'on introduit les variables explicatives (tableau 24).

**Tableau XXIV. Régressions multiples à pF 4.2**

Equations de régressions	R <sup>2</sup>	r	Sgn
$y = 6.09 + 0.22 \text{ A\%}$	0.63	0.79	S
$y = 5.32 + 0.21 \text{ A\%} + 0.44 \text{ MO\%}$	0.64	0.80	S
$y = 2.76 + 0.24 \text{ A\%} + 0.25 \text{ MO\%} + 0.07 \text{ Lf\%}$	0.67	0.82	S
$y = 20.42 + 0.21 \text{ A\%} + 0.15 \text{ MO\%} + 0.09 \text{ Lf\%} - 10.41 \text{ Da}$	0.78	0.88	S

Les teneurs en eau à ce bas potentiel sont influencées essentiellement par la fraction fine du sol (argile), en effet cette dernière explique 63 % de la rétention en eau. Inversement, l'effet de la densité apparente est faible, l'introduction de cette dernière comme variable explicative améliore la variabilité expliquée de 11 %, ce qui est faible par rapport aux cas précédents.

## 1. 2. Discussion

Les résultats obtenus montrent qu'au fur et à mesure que les variables explicatives sont introduites dans les équations de régressions, la qualité de la prédiction - renseignée par le coefficient de régression  $r$  - de la rétention en eau aux différentes valeurs de potentiels est améliorée.

Les régressions multiples retenues sont celles qui présentent les coefficients de régressions les plus élevés (tableau 25), ce sont celles qui comportent les 4 variables explicatives.

**Tableau XXV. Les fonctions de pédotransfert sélectionnées**

pF	FPT (modèle I)	R <sup>2</sup>	r
pF 1	$W = 64.63 + 0.17 A\% + 0.26 MO\% + 0.08 Lf\% - 28.83 Da$	0.73	0.85
pF 1.5	$W = 60.68 + 0.18 A\% + 0.14 MO\% + 0.10 Lf\% - 27.88 Da$	0.76	0.87
pF 2	$W = 50.10 + 0.20 A\% - 0.04 MO\% + 0.13 Lf\% - 23.44 Da$	0.73	0.85
pF 2.5	$W = 39.42 + 0.21 A\% + 0.21 MO\% + 0.12 Lf\% - 18.53 Da$	0.73	0.86
pF 3	$W = 28.87 + 0.23 A\% + 0.38 MO\% + 0.11 Lf\% - 14.04 Da$	0.74	0.86
pF 3.5	$W = 23.00 + 0.23 A\% + 0.20 MO\% + 0.10 Lf\% - 11.14 Da$	0.74	0.86
pF 4.2	$W = 20.42 + 0.21 A\% + 0.15 MO\% + 0.09 Lf\% - 10.41 Da$	0.78	0.88

L'analyse de ces résultats montre que la rétention en eau du sol est fortement influencée par la fraction fine (l'argile) et la densité apparente. Cependant, le coefficient de corrélation de l'équation qui relie la rétention en eau et l'argile, varie selon le pF, il varie de 0.60 à 0.79. On observe que la variabilité de la rétention en eau expliquée par l'argile varie de 36 % à 63 % ; l'amélioration du coefficient de corrélation et de la variabilité expliquée due à l'introduction de la densité apparente, varie respectivement de 0.24 à 0.06 et de 37 % à 10 % (fonction du pF).

Par ailleurs, le faible poids de la matière organique dans les relations statistiques pourrait être expliqué par ses teneurs réduites dans le sol par rapport à celles de l'argile (Rawls *et al.*, 2004), de même, les fortes variations des teneurs en argile peuvent masquer l'influence de la matière organique sur les propriétés de rétention en eau. L'effet des limons fins reste à discuter du fait que certains auteurs estiment que cette fraction influence fortement la rétention en eau surtout dans le domaine des hauts potentiels et ils l'intègrent de ce fait dans les fonctions de pédotransfert (Al Majou., 2008), alors que d'autres négligent son effet (Danalatos *et al.*, 1994 in Rawls *et al.*, 2003), surtout dans le domaine des hauts potentiels.

Les équations de régressions obtenues montrent que l'argile et la densité apparente ont des effets variables sur la rétention en eau. L'effet de l'argile renseigné par le coefficient de régression et le coefficient de détermination, tend à augmenter au fur et mesure que le potentiel diminue, en effet les coefficients de corrélation et de détermination passent respectivement de 0.60 et 0.36 pour le pF 1 à 0.79 et 0.63 pour le pF 4.2. Ainsi, l'effet de l'argile sur la rétention en eau est élevé aux bas potentiels, cela semble logique du fait qu'à ce niveau l'essentiel de l'eau est retenue dans la microporosité qui résulte de l'assemblage des particules fines du sol (Tessier *et al.*, 1996).

La densité apparente joue un rôle inverse, l'augmentation des coefficients de régression et de détermination due à l'introduction de la densité apparente comme variable explicative, passent respectivement de 0.24 et 0.37 à pF 1 à 0.06 et 0.10 à pF 4.2.

Par ailleurs, le poids de la densité apparente est plus important dans le domaine des hauts potentiels, dans ce cas, l'essentiel de l'eau est retenue par la macroporosité qui résulte de l'assemblage structural. C'est pourquoi, de nombreux auteurs (Bruand *et al.*, 1996, 2002, 2004 ; Moravan *et al.*, 2004 ; Pachepsky *et al.*, 2006) considèrent que les propriétés de rétention en eau dans le domaine des hauts potentiels, peuvent être mieux estimées par la prise en compte de la densité apparente.

## 2. Amélioration de la prédiction des propriétés de rétention en eau au moyen de la teneur en eau à la capacité de rétention (W330)

Dans cette partie, nous allons analyser l'effet de l'introduction de la teneur en eau à la capacité de rétention (W330) aux équations de régressions sur la qualité des prédictions.

### 2. 1. Résultats

Les équations de régressions obtenues sont toutes significatives, la variabilité expliquée par les différentes équations varie de 84 % à 96 % ; le coefficient de corrélation oscille entre 0.92 et 0.98.

**Tableau XXVI. Les fonctions de pédotransfert après introduction de W330**

pF	FPT (modèle II)	R <sup>2</sup>	r
pF 1	$W = 34.17 + 0.004 A\% + 0.10 MO\% - 0.02 Lf\% - 14.50 Da + 0.77 W330$	0.84	0.92
pF 1.5	$W = 28.92 + 0.01 A\% - 0.03 MO\% + 0.002 Lf\% - 12.95 Da + 0.81 W330$	0.89	0.94
pF 2	$W = 9.72 - 0.01 A\% - 0.26 MO\% + 0.004 Lf\% - 4.46 Da + 1.02 W330$	0.96	0.98
pF 3	$W = -5.39 + 0.04 A\% + 0.20 MO\% + 0.005 Lf\% + 2.07 Da + 0.87 W330$	0.96	0.98
pF 3.5	$W = -2.80 + 0.09 A\% + 0.06 MO\% + 0.02 Lf\% + 0.99 Da + 0.65 W330$	0.88	0.94
pF 4.2	$W = 4.56 + 0.12 A\% + 0.07 MO\% + 0.04 Lf\% - 2.95 Da + 0.40 W330$	0.85	0.92

L'analyse du tableau 26 indique que l'influence de la variable explicative W330 diminue lorsqu'on s'éloigne du potentiel de ce point (pF 2,5). La comparaison de ces équations avec celles développées précédemment (tableau 26), montre que l'introduction de la teneur en eau à la capacité de rétention améliore fortement la qualité de la prédiction quel que soit le potentiel de l'eau.

### 2. 2. Discussion

L'analyse de ces résultats indique que l'introduction de la teneur en eau à la capacité de rétention (W330) tend à augmenter la variabilité expliquée par l'équation ainsi que le coefficient de corrélation. En effet, la variabilité expliquée et le coefficient de corrélation augmentent respectivement de 7 % à 23 % et de 0,06 à 0,13 selon le pF.

Ces résultats concordent avec ceux de Rawls *et al.* (1982), ils confirment l'amélioration de la qualité des prédictions apportée par l'introduction de W330. Leurs travaux ont également montré que les prédictions ont été améliorées encore plus lorsque W330 et W16000 sont intégrées simultanément.

Dans cette étude, nous nous sommes limités uniquement à l'addition de la teneur en eau à la capacité de rétention (W330) comme variable explicative, car la prise en compte des deux teneurs en eau peu rendre les fonctions de pédotransfert peu pertinentes. Il est important de signaler que ce type d'équations de régressions nécessite des informations qui sortent du cadre fixé par le concept des fonctions de pédotransfert, en effet, W330 et W16000 ne peuvent pas être considérés comme des caractéristiques de constitution aisément mesurables. Toutefois, ces fonctions de pédotransfert peuvent être intéressantes dans la mesure où on dispose préalablement de ces teneurs en eau.

### **3. Apport d'une stratification des données aux CFPT**

Les échantillons ont été regroupés selon leur texture en classes de texture et selon leur densité apparente en classes de densité apparente. Par la suite, des fonctions de pédotransfert ont été développées pour chaque classe de texture et de densité apparente.

#### **3. 1. Résultats**

##### **3. 1. 1. Stratification texturale**

Au cours de cette étape nous avons regroupé les horizons en fonctions de leur texture, c'est ainsi que cinq classes texturales ont été obtenues par l'emploi du diagramme textural USDA : Argileuse (30 Horizons) ; Argilo-limoneuse (15 Horizons) ; Limono-argileuse fine (10 Horizons) ; Limono-argileuse (04 Horizon) ; Limoneuse fine (01 Horizon).

La classe limoneuse fine a été éliminée du fait qu'elle ne comportait qu'un seul horizon, les classes, Limono-argileuse fine et Limono-argileuse ont été regroupées afin d'augmenter le nombre d'horizons.

Les résultats portés dans les tableaux 27, 28, 29, montrent que toutes les équations de régressions sont significatives.

Tableau XXVII. Les CFPT pour la classe Argileuse (30 Horizons)

pF	CFPT	R <sup>2</sup>	r	Sgn
pF 1	$W = 73.23 + 0.21 A\% + 0.22 MO\% + 0.13 Lf\% - 33.08 Da$	0.70	0.84	S
pF 1.5	$W = 66.18 + 0.16 A\% - 0.14 MO\% + 0.18 Lf\% - 31.33 Da$	0.72	0.85	S
pF 2	$W = 54.75 + 0.21 A\% - 0.63 MO\% + 0.22 Lf\% - 26.71 Da$	0.68	0.82	S
pF 2.5	$W = 41.44 + 0.21 A\% - 0.31 MO\% + 0.21 Lf\% - 19.89 Da$	0.63	0.80	S
pF 3	$W = 31.09 + 0.21 A\% - 0.08 MO\% + 0.18 Lf\% - 14.91 Da$	0.58	0.76	S
pF 3.5	$W = 20.33 + 0.23 A\% - 0.08 MO\% + 0.17 Lf\% - 10.00 Da$	0.63	0.79	S
pF 4.2	$W = 16.90 + 0.21 A\% - 0.24 MO\% + 0.17 Lf\% - 8.55 Da$	0.74	0.86	S

Celles développées pour la classe Argileuse (tableau 27) ont des coefficients de corrélations qui varient selon le potentiel, entre 0.76 et 0.86, la variabilité expliquée par l'équation varie de 58 % à 74 %. L'équation de régression la plus significative, est celle développée pour le pF 4,2 (r = 0,86).

Concernant les équations de régressions développées pour la classe Argilo-limoneuse, elles sont toutes significatives. En effet, le coefficient de corrélation varie entre 0.77 et 0.86, la variabilité expliquée par l'équation varie de 59 % à 74 % (tableau 28). Pour cette classe, l'équation la plus significative, est celle développée pour le pF 1,5 (r = 0,86)

Tableau XXVIII. Les CFPT pour la classe Argilo-limoneuse (15 Horizons)

pF	CFPT	R <sup>2</sup>	r	Sgn
pF 1	$W = 60.44 + 0.28 A\% - 0.84 MO\% + 0.15 Lf\% - 28.36 Da$	0.71	0.84	S
pF 1.5	$W = 53.77 + 0.24 A\% - 0.47 MO\% + 0.16 Lf\% - 25.07 Da$	0.74	0.86	S
pF 2	$W = 42.72 + 0.17 A\% + 0.19 MO\% + 0.17 Lf\% - 18.78 Da$	0.61	0.78	S
pF 2.5	$W = 37.17 + 0.11 A\% + 0.74 MO\% + 0.16 Lf\% - 15.58 Da$	0.64	0.82	S
pF 3	$W = 32.74 + 0.31 A\% + 0.79 MO\% + 0.14 Lf\% - 14.79 Da$	0.68	0.82	S
pF 3.5	$W = 27.85 + 0.12 A\% + 0.81 MO\% + 0.09 Lf\% - 11.90 Da$	0.59	0.77	S
pF 4.2	$W = 25.79 + 0.12 A\% + 0.66 MO\% + 0.11 Lf\% - 12.31 Da$	0.61	0.78	S

Les équations de régressions développées pour les classes Limono-argileuse fine et Limono-argileuse, présentent des coefficients de régressions qui varient selon le potentiel, entre 0.66 (à pF 3) et 0.83 (à pF 2) (tableau 29), de ce fait elles sont toutes significatives.

**Tableau XXIX. Les CFPT pour les classes Limono-argileuse fine et Limono-argileuse (14 Horizons)**

pF	CFPT	R <sup>2</sup>	r	Sgn
pF1	$W = 56.75 + 0.09 A\% + 2.05 MO\% + 0.02 Lf\% - 24.53 Da$	0.48	0.69	S
pF1.5	$W = 55.70 + 0.05 A\% + 1.27 MO\% + 0.02 Lf\% - 22.63 Da$	0.48	0.69	S
pF2	$W = 42.52 + 0.04 A\% + 0.55 MO\% + 0.03 Lf\% - 14.91 Da$	0.70	0.83	S
pF2.5	$W = 34.38 + 0.01 A\% + 0.28 MO\% + 0.03 Lf\% - 10.08 Da$	0.64	0.80	S
pF3	$W = 25.17 + 0.04 A\% - 0.06 MO\% + 0.05 Lf\% - 6.08 Da$	0.44	0.66	S
pF3.5	$W = 21.39 - 0.03 A\% - 1.22 MO\% + 0.03 Lf\% - 1.15 Da$	0.50	0.71	S
pF4.2	$W = 17.21 + 0.02 A\% - 0.72 MO\% + 0.03 Lf\% - 2.26 Da$	0.45	0.76	S

### 3. 1. 2. Stratification structurale

Selon leur densité apparente, les sols ont été regroupés en trois classes de structure : les horizons dont la densité apparente varie de 1,3 à 1,5 ; les horizons dont la densité apparente est égale à 1.6 et ceux dont la densité apparente varie de à 1,7 à 1,8.

Toutes les équations de régressions obtenues pour les trois classes de structures sont significatives (tableaux 30, 31, 32).

Les équations de régressions développées pour la classe des sols dont la densité apparente varie de 1,3 à 1.5 (tableau 30), présentent des coefficients de régressions qui varient entre 0.71 et 0.85, la variabilité expliquée par l'équation varie de 51 % à 73 %. L'équation de régression la plus significative, est celle développée pour le pF 4,2.

**Tableau XXX. Les CFPT pour la classe de  $1,3 \leq Da \leq 1,5$  (23 Horizons)**

pF	CFPT	R <sup>2</sup>	r	Sgn
pF 1	$W = 66.00 + 0.19 A\% - 0.82 MO\% + 0.15 Lf\% - 29.46 Da$	0.51	0.71	S
pF 1.5	$W = 60.85 + 0.19 A\% - 0.49 MO\% + 0.17 Lf\% - 28.00 Da$	0.54	0.73	S
pF 2	$W = 55.85 + 0.21 A\% - 1.15 MO\% + 0.26 Lf\% - 27.29 Da$	0.52	0.72	S
pF 2.5	$W = 48.37 + 0.19 A\% - 0.76 MO\% + 0.22 Lf\% - 23.29 Da$	0.51	0.72	S
pF 3	$W = 46.07 + 0.21 A\% - 0.42 MO\% + 0.11 Lf\% - 23.43 Da$	0.53	0.73	S
pF 3.5	$W = 33.45 + 0.18 A\% - 0.47 MO\% + 0.13 Lf\% - 15.70 Da$	0.59	0.78	S
pF 4.2	$W = 31.32 + 0.17 A\% - 0.37 MO\% + 0.12 Lf\% - 15.94 Da$	0.73	0.85	S

Celles développées pour la classe de densité apparente 1.6, présentent des coefficients de corrélation qui varient selon le potentiel, entre 0.68 et 0.89, la variabilité expliquée varie de 47 % à 80 %. Les relations les moins fortes, sont celles établies pour les pF 1 et 1,5 ( $r = 0,68$ ), alors que les relations développées pour les pF 3 et 3,5, sont les plus significatives ( $r = 0,89$ ).

**Tableau XXXI. Les CFPT pour la classe de Da égale à 1.6 (16 Horizons)**

pF	CFPT	R <sup>2</sup>	r	Sgn
pF 1	$W = 97.68 + 0.10 A\% + 1.24 MO\% + 0.01 Lf\% - 48.26 Da$	0.47	0.68	S
pF 1.5	$W = 66.70 + 0.09 A\% + 1.18 MO\% + 0.03 Lf\% - 30.04 Da$	0.47	0.68	S
pF 2	$W = 60.77 + 0.21 A\% + 0.77 MO\% + 0.12 Lf\% - 32.14 Da$	0.69	0.83	S
pF 2.5	$W = 30.42 + 0.29 A\% + 0.74 MO\% + 0.17 Lf\% - 17;26 Da$	0.80	0.89	S
pF 3	$W = 21.49 + 0.31 A\% + 0.58 MO\% + 0.15 Lf\% - 13.18 Da$	0.80	0.89	S
pF 3.5	$W = -5.95 + 0.32 A\% + 0.74 MO\% + 0.13 Lf\% + 2.35 Da$	0.69	0.83	S
pF 4.2	$W = 0.18 + 0.26 A\% + 0.37 MO\% + 0.10 Lf\% + 0.19 Da$	0.57	0.76	S

Les équations de régressions développées pour la classe des sols dont la densité apparente varie de 1,7 à 1,8, sont toutes significatives. En effet le coefficient de corrélation varie entre 0.83 et 0.98, la variabilité expliquée par l'équation varie entre 69 % et 95 %. Nous observons une nette amélioration dans les coefficients de corrélation et de détermination à partir de pF 1,5. L'équation la plus significative, est celle développée pour le pF 3 ( $r = 0,98$ ).

Tableau XXXII. Les CFPT pour la classe de  $1,7 \leq Da \leq 1,8$  (20 Horizons)

pF	CFPT	R <sup>2</sup>	r	Sgn
pF 1	$W = -3.19 + 0.18 A\% + 1.12 MO\% + 0.10 Lf\% + 8.83 Da$	0.69	0.83	S
pF 1.5	$W = 3.15 + 0.21 A\% + 0.74 MO\% + 0.12 Lf\% + 3.76 Da$	0.71	0.84	S
pF 2	$W = 10.41 + 0.21 A\% + 0.81 MO\% + 0.11 Lf\% - 1.33 Da$	0.83	0.91	S
pF 2.5	$W = 19.69 + 0.23 A\% + 1.18 MO\% + 0.11 Lf\% - 8.68 Da$	0.90	0.95	S
pF 3	$W = 11.07 + 0.25 A\% + 1.22 MO\% + 0.13 Lf\% - 5.72 Da$	0.95	0.98	S
pF 3.5	$W = 19.30 + 0.26 A\% + 0.69 MO\% + 0.13 Lf\% - 10.98 Da$	0.89	0.94	S
pF 4.2	$W = 15.82 + 0.24 A\% + 0.63 MO\% + 0.11 Lf\% - 9.66 Da$	0.91	0.95	S

### 3. 2. Discussion

Toutes les fonctions de pédotransfert développées sont significatives, l'existence d'une différence dans le nombre d'horizons utilisés ne nous permet pas de discuter l'effet d'une stratification des données sur la qualité et la précision des prédictions. De ce fait l'évaluation et la comparaison des différentes CFPT sera faite dans la partie validation.

#### 4. Validation des FPT et CFPT

Un ensemble de 20 horizons a été constitué afin de comparer la qualité des prédictions effectuées avec les FPT et les CFPT, ainsi que pour évaluer les FPT (modèle I) de Bastet (1999) cité par Bruand *et al.* (2002), et de Rawls *et al.* (1982) (modèle I). (Tableau 35 et 36)

Ces échantillons proviennent de la même région que ceux utilisés pour l'établissement des FPT et CFPT. Les caractéristiques physico-chimiques et les propriétés de rétention en eau ont aussi été déterminées selon les mêmes méthodes (annexes 5, 6).

**Tableau XXXIII. Coefficients et ordonnée à l'origine pour les fonctions de pédotransfert (modèle I) de Bastet (1999).**

Potentiels		$W = a + b (Da) + c (CO) + d (Ar) + e (Li)$				
hPa	pF	a	b	c	d	e
-33	1,5	0,4543	-0,2087	-0,0058	0,0020	0,0007
-100	2	0,2983	-0,1407	0,0076	0,0021	0,0012
-330	2,5	0,2663	-0,1489	0,0153	0,0034	0,0010
-1000	3	0,1679	-0,0960	0,0129	0,0036	0,0008
-3300	3,5	0,1519	-0,0879	0,0064	0,0036	0,0005
-15000	4,2	0,2800	-0,1418	0,0010	0,0026	-0,0001

**Tableau XXXIV. Coefficients et ordonnée à l'origine pour les fonctions de pédotransfert (modèle I) de Rawls *et al.* (1982).**

Potentiels		$q = a + b (Sa) + c (Li) + d (Ar) + e (MO) + f (Da)$				
hPa	pF	a	b	c	d	e
-100	2	0,4118	-0,003	/	0,0023	0,03117
-330	2,5	0,2576	-0,002	/	0,0036	0,0299
-1000	3	0,0349	/	0,0014	0,0055	0,0251
-15000	4,2	0,0026	/	/	0,005	0,0158

**W** : Teneur en eau massique ; **q** : teneur en eau volumique ; **Da** : densité apparente ; **CO** : teneur en carbone organique ; **MO** : teneur en matière organique ; **Ar** : pourcentage d'argile ; **Li** : pourcentage de limon ; **Sa** : pourcentage de sable.

D'après le tableau 35, la composition granulométrique des échantillons est variable. La fraction argileuse reste dominante avec une moyenne de 44,9 %, elle varie entre une valeur maximale de 61,9 % et une valeur minimale de 25,4%. Les teneurs en limons fins et grossiers sont moyennes leurs teneurs varient respectivement de 14,8 % à 35,8 % et 12,2 % à 24,5 %. La fraction sableuse est faiblement présente, ainsi les teneurs en sables fins varient entre 3,6 % et 19,5 % avec une moyenne de 8,3 %, celles des sables grossiers varient entre 0,8 % et 13,3 % avec une moyenne de 4,8 %. Les teneurs en matière organique sont en moyenne égales à 2,6 %, elles oscillent entre un minimum de 0,9 % et un maximum de 1,7 %.

**Tableau XXXV. Variabilité des caractéristiques physiques des échantillons de validation (n=20).**

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
<b>A%</b>	44,9	25,4	61,9	11,1
<b>Lf%</b>	23,9	14,8	35,8	5,4
<b>Lg%</b>	17,0	12,2	24,5	4,0
<b>Sf%</b>	8,3	3,6	19,5	3,8
<b>Sg%</b>	4,8	0,8	13,3	3,6
<b>MO%</b>	2,6	0,9	3,9	1,0
<b>Da</b>	1,6	1,5	1,7	0,1

Le tableau 36 indique que l'humidité pondérale à la capacité de rétention (pF 2,5) de l'ensemble des sols étudiés, varie entre une valeur minimale égale à 19 % et une valeur maximale égale à 27,4 %, elle est en moyenne égale à 23,1 %. Concernant l'humidité pondérale au point de flétrissement (pF 4,2), elle évolue autour d'une moyenne de 16,1 % et elle varie entre une valeur minimale de 12,2 % et une valeur maximale de 20,7 %. Nous pouvons dire que d'une manière générale les teneurs en eau massiques aux différents potentiels sont moyennes à élevées, cela semble logique puisque dans ces sols la fraction argileuse est fortement représentée.

Globalement, les caractéristiques et les propriétés de rétention en eau de ces échantillons sont comparables à celles des échantillons utilisés pour l'établissement des fonctions de pédotransfert (tableaux 9, 10 et 11).

Tableau XXXVI. Variabilité des propriétés de rétention en eau des échantillons de validation (n=20).

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
pF1	29,1	24,0	34,0	3,7
pF1.5	27,1	22,2	31,9	3,6
pF2	24,7	20,4	28,7	3,0
pF2.5	23,1	19,0	27,4	3,0
pF3	20,8	15,8	25,3	3,1
pF3.5	18,7	14,4	22,8	3,1
pF4.2	16,1	12,2	20,7	2,8

#### 4. 1. Evaluation des FPT et CFPT

##### 4. 1. 1. Résultats

##### - Validité des FPT

Tableau XXXVII. Validité des FPT (modèle I et II) (*EMP* %, *ETP* %).

Modèle I	pF1	pF1.5	pF2	pF2.5	pF3	pF3.5	pF4.2
<i>EMP</i>	-0,75	-0,75	-0,74	-0,71	-0,39	-0,37	-0,45
<i>ETP</i>	1,34	1,2	1,24	1,33	1,21	0,89	1,12
<b>Modèle II</b>							
<i>EMP</i>	-0,58	-0,15	-0,02	/	-0,09	-0,17	-0,48
<i>ETP</i>	0,84	0,9	0,45	/	0,64	0,55	0,85

L'analyse du tableau 37 et de la figure 20 montre que les FPT (modèle I) développées sous-estiment très faiblement la teneur en eau à tous les potentiels, en effet le biais de prédiction est très faible, l'*EMP* varie selon le potentiel de -0,37 % à -0,75 %. Les valeurs les plus élevées de l'*EMP* sont celles calculées pour les pF 1 ; 1,5 ; 2 ; 2,5. La précision de la prédiction est bonne, l'*ETP* varie de 0,89 % à 1,34 %, les FPT développées pour les pF 3,5 et 4,2 sont les plus précises.

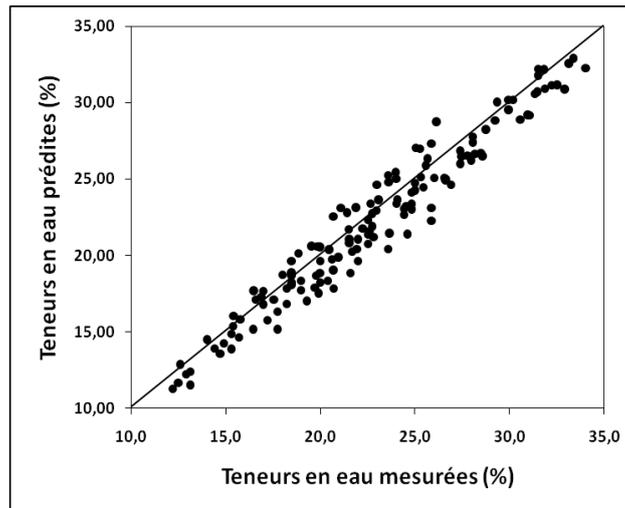


Figure 20. Validité des FPT (modèle I)

L'introduction de la teneur en eau à la capacité de rétention (W330) dans le modèle II améliore la qualité de la prédiction (figure 21), en effet le biais de prédiction est très faible, l'*EMP* varie de -0,02 % à -0,58 % selon le pF. Les valeurs les plus faibles de l'*EMP*, sont celles calculées pour le pF 2 et 3, cela est logique, du fait que se sont les deux points proches du potentiel choisi (pF 2,5).

Nous observons une forte amélioration dans la précision des FPT (modèle II), ainsi l'*ETP* varie de 0,45 % à 0,85 %.

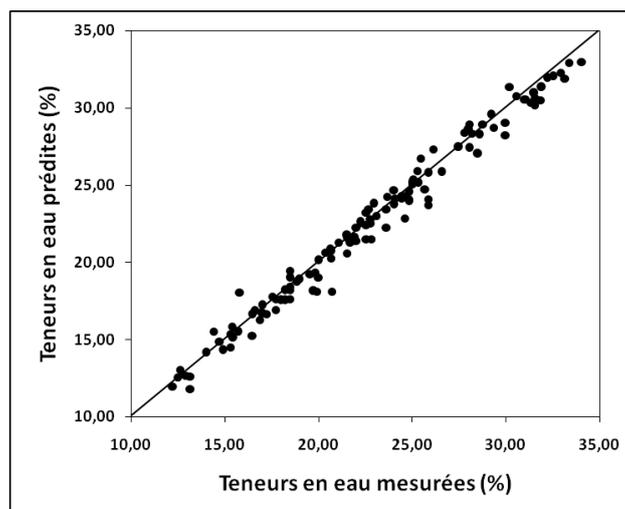


Figure 21. Validité des FPT (modèle II)

Les résultats obtenus montrent que les FPT développées conduisent à un très faible biais de prédiction, ce dernier est d'autant plus faible lorsqu'on passe du modèle I au modèle II qui prend dans sa forme la teneur en eau à la capacité de rétention (W330).

Nous estimons que la prise en compte d'un point de la courbe à savoir (W330) diminue les biais de prédiction et augmente la précision des FPT. Cette démarche a été entreprise par plusieurs auteurs (Rawls *et al.*, 1982), ils ont mis en évidence une amélioration de la prédiction des FPT suite à l'incorporation d'une teneur en eau critique.

### - Validité des CFPT

Tableau XXXVIII. Validation des CFPT texturales et structurales (*EM* %, *ETP* %).

CFPT texturale	pF1	pF1.5	pF2	pF2.5	pF3	pF3.5	pF4.2
<i>EMP</i>	1,88	-0,61	-0,40	-0,31	-0,43	-0,38	-0,50
<i>ETP</i>	2,83	1,43	1,33	1,45	1,25	1,05	1,22
<b>CFPT structurale</b>							
<i>EMP</i>	-0,49	-0,53	-0,49	-0,39	-0,48	-0,49	-0,55
<i>ETP</i>	1,37	1,15	0,95	0,79	0,87	0,79	1,11

D'après le tableau 38 et la figure 22, les CFPT texturales sous-estiment faiblement la rétention en eau, en effet, l'*EMP* varie selon le potentiel, de -0,31 % à -0,61 %, A l'exception du pF 1 où les CFPT texturales surestiment la rétention en eau avec une *EMP* de 1,88 %, et une *ETP* relativement élevée de 2,83 %.

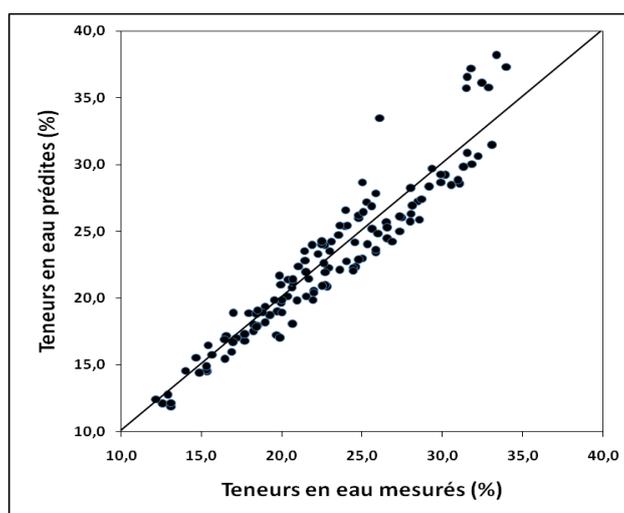
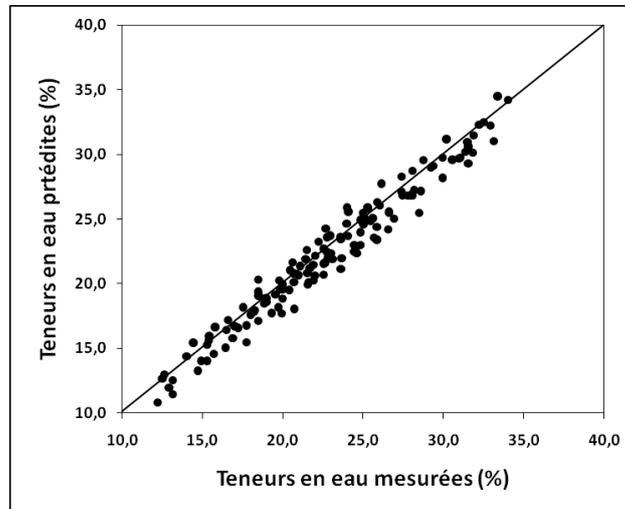


Figure 22. Validité des CFPT texturales

Aux pF 1,5, 2, 2,5, la stratification texturale a eu un effet favorable la qualité des prédictions, des *ETP* légèrement élevées.



**Figure 23. Validité des CFPT structurales**

Les CFPT structurales développées sous-estiment faiblement la rétention en eau au niveau de tous les potentiels, l'*EMP* varie de -0,39 % à -0,55 %. La précision quant à elle semble être améliorée par rapport aux CFPT texturales, l'*ETP* varie de 0,79 % à 1,37.

#### 4. 1. 2. Discussion

Les biais de prédiction obtenus avec les différentes FPT et CFPT sont dans leurs majorités faibles à très faibles, en effet l'*EMP* varie de -0,09 % à -0,75 %, sauf pour CFPT texturales développées pour le pF1, où l'*EMP* est de 1,88 %. Les FPT et CFPT sous-estiment la rétention en eau dans la majorité des potentiels. Les biais de prédiction sont nettement plus faibles lorsque l'on passe des FPT du modèle I aux FPT du modèle II, ces dernières intègrent dans leurs calculs, la teneur en eau à la capacité de rétention (W330). L'utilisation des CFPT texturales et structurales n'améliorent pas les biais de prédiction déjà faibles avec les FPT (modèle I). Concernant la précision, des différences apparaissent en fonction des FPT et CFPT développées. La précision est supérieure avec les FPT du modèle II, en effet, elles semblent être les plus précises du fait qu'on y retrouve les *ETP* les plus faibles. Les CFPT structurales améliorent légèrement la précision, l'utilisation des CFPT texturales n'a pas d'effet sur la précision, au contraire on remarque une légère augmentation de leur *ETP*.

## 4. 2. Evaluation des FPT développées à partir de bases de données étrangères

### 4. 2. 1. Résultats

#### - Validité des FPT de Rawls *et al.* (1982) (modèle I) et Bastet (1999)

Tableau XXXIX. Validité des FPT étrangères (*EMP* %, *ETP* %).

Bastet., 1999	pF1	pF 1.5	pF 2	pF 2.5	pF 3	pF 3.5	pF 4.2
<i>EMP</i>		-5,01	-1,77	1,98	1,13	1,76	0,36
<i>ETP</i>		1,38	1,25	2,25	4,92	1,74	1,75
Rawls <i>et al.</i> , 1982							
<i>EMP</i>			9,85	6,16	4,32		2,07
<i>ETP</i>			2,34	2,49	2,28		2,20

Les biais de prédiction obtenus par l'utilisation des FPT de Bastet. (1999) sont moyennement élevés et variables selon les potentiels, ainsi ces FPT sous-estiment la rétention en eau à pF 1,5 et pF 2, les *EMP* sont respectivement égales à -5,01 % et -1,77 %. Au niveau des autres potentiels, les FPT surestiment la rétention en eau, l'*EMP* varie de 1,13 % à 1,98 % ; la plus faible valeur est celle calculée pour le pF 4,2 dont l'*EMP* est de 0,36 %. S'agissant de la précision des FPT, elle est moyenne. Les FPT les moins précises sont celles qui prédisent la rétention en eau à pF 2,5 et pF 3, les valeurs de l'*ETP* sont respectivement égales à 2,25 % et 4,92 %.

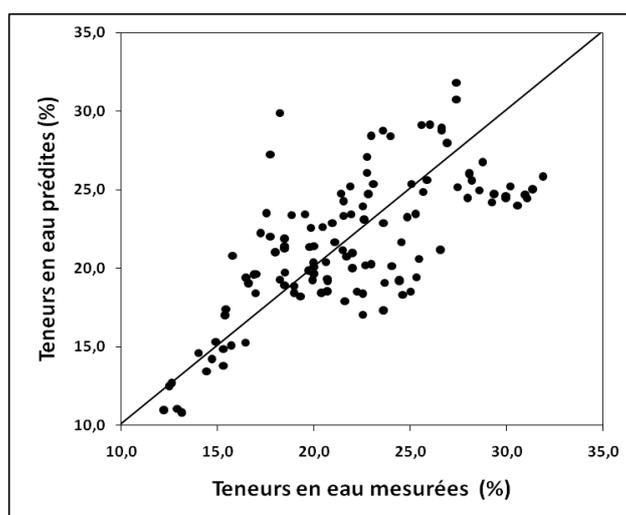


Figure 24. Evaluation des FPT de Bastet (1999)

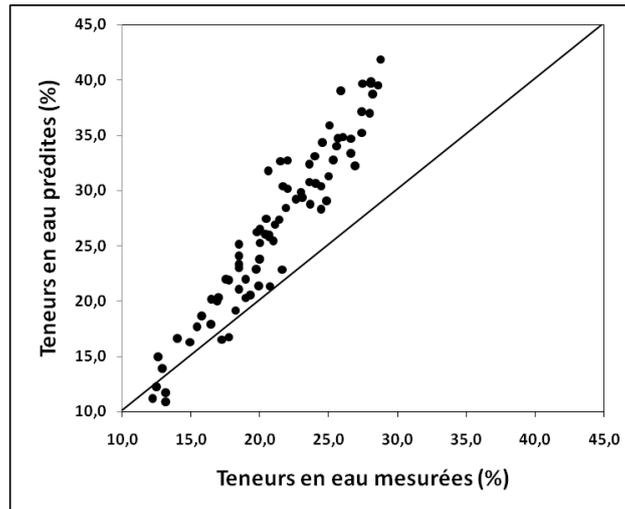


Figure 25. Evaluation des FPT de Rawls *et al.* (1982)

Les FPT de Rawls *et al.* (1982) surestiment la rétention en eau au niveau de tous les potentiels, les biais de prédiction sont plus élevés par rapport à ceux obtenus avec les FPT de Bastet., 1999, l'*EMP* varie de 2,07 % à 9,85 %. Les biais de prédiction sont plus élevés au niveau du pF2 avec une *EMP* égale à 9,85 %, et plus faible au niveau du pF 4,2 avec une *EMP* égale à 2,07 %.

Le tableau 39 montre que les valeurs les plus faibles de l'*EMP* sont celles calculées pour le pF 4,2, ceci peut s'expliquer par le fait que la rétention en eau à ce niveau de potentiels est étroitement liée à la teneur en argile ; il est donc plus facile de l'estimer correctement.

Concernant la précision, elle est moyenne, l'*ETP* varie de 2,20 % à 2,49 %, mais elle reste moins bonne que celle des FPT de Bastet (1999).

#### 4. 2. 2. Discussion

L'utilisation des FPT développées à partir de base de données étrangères (FPT de Rawls *et al.*, 1982 et de Bastet, 1999) conduisent à des biais de prédiction élevés par rapport à nos FPT et CFPT ; les FPT de Rawls *et al.* (1982) qui sont établies à partir d'un très grand nombre de sols et représentant une large gamme de variation de sols des USA sont celles qui conduisent aux estimations les plus imprécises et les plus biaisées, ces mêmes résultats ont été obtenus par Morvan *et al.* (2004), ils ont trouvé que ces FPT surestimaient fortement la rétention en eau. Les FPT de Bastet (1999) établies à partir d'un grand nombre de sols de France conduisent à des estimations plus précises et moins biaisées par rapport aux

précédentes, mais elles restent moins performantes et moins précises par rapport à celles que nous avons développées.

## 5. Synthèse des principaux résultats

Les résultats obtenus montrent qu'au fur et à mesure que les variables explicatives sont introduites dans les équations de régressions, la qualité de la prédiction - renseignée par le coefficient de régression  $r$  - de la rétention en eau aux différentes valeurs de potentiels est améliorée. L'introduction de la teneur en eau à la capacité de rétention (W330) tend à améliorer le coefficient de corrélation, selon le pF il passe de 7 % à 23 %.

La validation des FPT et CFPT a mis en évidence que les biais de prédiction obtenus avec les différentes FPT et CFPT sont dans leur majorité faibles à très faibles, l'*EMP* varie de -0,09 % à -0,75 %, sauf pour les CFPT texturales développées pour le pF1, où l'*EMP* est de 1,88 %. Les FPT et CFPT sous-estiment la rétention en eau pour l'essentiel des potentiels. Les biais de prédiction sont nettement plus faibles lorsque l'on passe des FPT du modèle I aux FPT du modèle II. L'utilisation des CFPT texturales et structurales n'améliorent pas les biais de prédiction déjà faibles avec les FPT (modèle I). Concernant la précision, des différences apparaissent en fonction des FPT et CFPT développées. La précision est supérieure avec les FPT du modèle II, en effet, elles semblent être les plus précises du fait qu'on y retrouve les *ETP* les plus faibles. Les CFPT structurales améliorent légèrement la précision, l'utilisation des CFPT texturales n'a pas d'effet sur la précision, au contraire on remarque une légère augmentation de leur *ETP*.

L'utilisation des FPT développées à partir de base de données étrangères (FPT de Rawls *et al.*, 1982 et de Bastet, 1999) conduisent à des biais de prédiction élevés par rapport à nos FPT et CFPT, Les FPT de Rawls *et al.* (1982) conduisent aux estimations les plus imprécises et les plus biaisées. Les FPT de Bastet (1999) conduisent à des estimations plus précises et moins biaisées par rapport aux précédentes, mais elles restent moins performantes et moins précises par rapport à celles que nous avons développées.

De la synthèse de ces résultats il ressort que les FPT présentent un caractère régional, elles sont d'autant plus précises quand on les utilise dans la même région où elles ont été développées en premier. De ce fait, il semble que la proximité géographique, les conditions de pédogenèse et le matériau parental sont des éléments à prendre en compte pour apprécier l'aptitude potentielle des FPT à estimer avec précision les propriétés de rétention en eau.

## **CONCLUSION GENERALE**

## **Conclusion générale**

Ce travail porte sur l'étude des propriétés de rétention en eau des sols de la Mitidja en relation avec les caractéristiques de constitution d'une part, et au développement de relations permettant d'estimer ces propriétés à partir de caractéristiques facilement accessibles d'autre part.

Les sols étudiés se caractérisent par de faibles teneurs en matière organique (2,9 % en moyenne). La capacité d'échange cationique des sols étudiés est moyenne (21,9 cmol+/Kg), elle correspond à la texture de ces sols, caractérisée par la prédominance de la fraction fine (48,4 % d'argile en moyenne).

Les propriétés de rétention en eau des sols de la Mitidja sont fortement influencées par la teneur en argile et la densité apparente. Ces deux paramètres agissent différemment selon le potentiel. En effet, la variabilité de la rétention en eau due à la densité apparente diminue au fur et à mesure que le potentiel décroît, elle passe de 0,59 à pF1 à 0,31 à pF 4,2. Par contre, celle due à l'argile, elle augmente avec la baisse du potentiel, elle passe de 0,36 à pF 1 à 0,63 à pF 4,2. Ainsi, aux hauts potentiels, la rétention en eau est principalement due à la macroporosité résultant de la structuration du sol, celle-ci s'exprimant par la densité apparente ; par contre aux bas potentiels, l'eau est retenue principalement dans la microporosité développée par l'assemblage des particules argileuses. L'effet de la matière organique sur la rétention en eau est faible à tous les potentiels ( $0,08 \leq R^2 \leq 0,13$ ), ce comportement s'explique par ses faibles taux dans ces sols.

L'étude de la relation entre l'argile, la matière organique et la capacité d'échange cationique, a montré que la CEC des sols étudiés est principalement due à l'apport de la fraction argileuse ( $R^2 = 0,80$ ), la contribution de la matière organique reste faible par rapport à celle de l'argile ( $R^2 = 0,14$ ). De même, les équations de régressions établies entre la CEC et la rétention en eau aux différents potentiels sont toutes significatives ( $0,66 \leq r \leq 0,79$ ), de ce fait la CEC reste un bon estimateur des propriétés de rétention en eau surtout au niveau des bas potentiels.

Sur un sous ensemble d'échantillons de sols argileux, nous avons pu montrer l'existence d'une forte relation entre la rétention en eau, les propriétés de surfaces des argiles (renseignées par la CEC de la fraction argileuse) et le mode d'assemblage des particules argileuses (renseigné par le volume porale développé par l'argile). En effet, au niveau des

sols argileux, les propriétés de rétention en eau peuvent s'expliquer par le mode d'assemblage des particules argileuses ( $0,61 \leq R^2 \leq 0,76$ ) et par les propriétés de surface des argiles ( $0,55 \leq R^2 \leq 0,66$ ).

Des fonctions de pédotransfert ont été établies par régressions multiples entre la rétention en eau à différents potentiels et les caractéristiques de constitution du sol, ces fonctions se présentent sous la forme suivante :

$$W = a + b A \% + c MO \% + d Lf \% + e Da \quad (\text{modèle I}).$$

Les coefficients de la régression varient selon le potentiel. L'étude de validation a montré que ces FPT (modèle I) sous-estiment très faiblement la teneur en eau à tous les potentiels. Le biais de prédiction est très faible, il varie selon le potentiel de -0,37 % à -0,75 %. La précision de la prédiction est assez bonne, l'*ETP* varie en effet de 0,89 % à 1,34 %.

Dans une deuxième étape, nous avons analysé l'effet de l'introduction de la teneur en eau à la capacité de rétention ( $W_{330}$ ) sur la qualité de la prédiction, les FPT (modèle II) développées ont la forme suivante :

$$W = a + b A \% + c MO \% + d Lf \% + e Da + f W_{330} \quad (\text{modèle II}).$$

Les résultats obtenus ont montré que l'addition de la teneur en eau à la capacité de rétention ( $W_{330}$ ) améliore fortement la qualité des prédictions. En effet, le biais de prédiction est très faible, il varie selon le potentiel de -0,02 % à -0,58 %. De même, nous observons une forte amélioration dans la précision des FPT (modèle II), ainsi l'*ETP* varie de 0,45 % à 0,85 %.

L'utilisation des CFPT texturales n'améliore pas la qualité des prédictions déjà bonne avec les FPT (modèle I). En effet, les CFPT texturales sous-estiment la rétention en eau de -0,31 % à -0,61 %, leur précision varie de 1,05 % à 1,45 % et reste moins bonne comparée à celle des FPT (modèle I). Les CFPT structurales, sous-estiment faiblement la rétention en eau aux différents potentiels (le biais de prédiction varie de -0,39 % à -0,55 %). Les résultats révèlent une légère amélioration dans les erreurs de prédictions par rapport aux FPT (modèle I), par contre la précision est assez proche (l'*ETP* varie de 0,79 % à 1,37 %).

L'utilisation des FPT développées à partir de base de données étrangères (FPT de Rawls *et al.*, 1982 et de Bastet, 1999) conduit à des biais de prédiction élevés par rapport à nos FPT et CFPT. De ce fait, nous confirmons que les FPT présentent un caractère régional et montrent leurs limites lorsqu'elles sont employées hors de leur zone d'origine.

De ce fait, la poursuite de ces travaux en Algérie est indispensable afin de mieux appréhender la vocation des sols, car les réserves en eau, constituent un facteur essentiel de fertilité des sols.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**Al Majou H., Bruand A., Nicoulaud B., Duval O., Dupont J., 2005.** Premiers Résultats de Validation des Classes de Pédotransfert établies à partir de la Base de Données SOLHYDRO 1.0 : Application à des sols de la Région Centre. *Etude et Gestion des Sols*, vol. 12, 3, pp. 221-228.

**Al Majou H., Bruand A., Duval O., Cousin I., 2007.** Variation of the water-retention properties of soils: Validity of class-pedotransfer functions. *Comptes Rendus Geosciences*, vol. 339, 9, pp. 632-639.

**Al Majou H., 2008.** Etude et prédiction des propriétés de rétention en eau des sols : prise en compte de la composition et de l'état structural du sol. Thèse de doctorat, université d'ORLÉANS, France. 254 p.

**Baker L., 2008.** Development of class pedotransfer functions of soil water retention : A refinement. *Geoderma*, vol. 144, pp. 225-230.

**Bastet G., Bruand A., Quélin P., Cousin I., 1998a.** Estimation des propriétés de rétention en eau à l'aide des fonctions de pédotransfert : une analyse bibliographique. *Etude et Gestion des sols*, vol. 5, 1, pp.7-28.

**Bigorre F., Tessier D., Pedro G., 1999.** Contribution des argiles et des matières organiques à la rétention de l'eau dans les sols : signification et rôle de la capacité d'échange en cations. *Compte rendu de l'académie des sciences, Paris, sciences de la terre et des plantes*, vol. 330, pp. 245-250.

**Bigorre F., 2000.** Influence de la pédogenèse et de l'usage des sols sur leurs propriétés physiques : mécanismes d'évolution et éléments de prévision. Thèse de doctorat, Université Nancy 1, France. 145p.

**Boizard H., Caneill J., Coquet Y., Defossez P., Manichon H., Richard G., Estrade R.J., 2004.** Morphological characterisation of soil structure in tilled fields: from a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. *Soil and tillage research*, vol. 79, 1, pp. 33-49.

**Bruand A., Tessier D., Baize D., 1988.** Contribution à l'étude des propriétés de rétention en eau des sols argileux : importance de la prise en compte de l'organisation de la phase argileuse. *C. R. Acad. Sci. Paris*. vol. 307, série II, pp. 1937-1941.

**Bruand A., Fiès J.C., 1990.** Textural porosity analysis of a silty clay soil using pore volume balance estimation, mercury porosimetry and quantified backscattered electron scanning image (BESI). *Geoderma*. vol, 47, 1/2, pp. 209-219.

**Bruand A., Prost R., Safar T., 1992.** Evolution structurale de la tranchée de drainage en sol argileux : Importance de la nature minéralogique de l'argile. *Science du sol*, vol. 30, 3, pp. 185-192.

**Bruand A., Zimmer D., 1992,** Relation entre la capacité d'échange cationique et le volume poral dans les sols argileux : incidence sur la morphologie de la phase argileuse à l'échelle des assemblages élémentaires. C.R. Acad. Sci. vol. 315, série II, pp. 223-229.

**Bruand A., Darthout R., Duval O., Gaillard H., Jamagne M., 1996.** Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols: importance de la densité apparente. Etude et Gestion des Sols, vol. 3, 1, pp. 27-40.

**Bruand A., Tessier D., 2000.** Water retention properties of the clay in soils developed on clayey sediments: Significance of parent material and soil history. European Journal of Soil Science, 51, pp. 679-688.

**Bruand A., Pérez Fernandez P., Duval O., Quélin P., Nicoullaud B., Gaillard H., Raison L., Pessaud J.F., Prud'Homme L., 2002.** Estimation des propriétés de rétention en eau des sols : Utilisation de classes de pédotransfert après stratification texturale et texturo-structurale. Etude et Gestion des Sols, 9, pp. 105-125.

**Bruand A., Duval O., Cousin I., 2004.** Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO: Une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. Etude et Gestion des Sols, 11, pp. 323-334.

**Chamayou, H., Legros, J., 1989.** Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. Ed. Techniques vivantes. Agence de coopération culturelle et technique, 593p.

**Chenu C., 1993.** Clay-or sand-polysaccharide associations as models for the interface between microorganisms and soil: water related properties and microstructure. Geoderma, vol. 56, pp. 143-156.

**Chertkov, V. Y.,( 2004)-** A physically based model for the water retention curve of clay pastes. Journal of hydrology, vol, 286, pp. 203-226.

**Cosby B. J., Hornberger G. M., Clapp R. B., Ginn T. R., 1984.** a statistical exploration of the relationships of moisture characteristics to the physical proprieties of the soil. Water Resour. Res., vol. 20, 6, pp. 682-690.

**Cousin I., 2007.** Structure et propriétés hydriques des sols: hétérogénéité spatiale et variabilité temporelle de l'horizon à la parcelle agricole. Mémoire sur travaux, INRA, France. 84p.

**Curmi P., Hallaire V., Kribaa M., Lahmar R., 2001.** Effet of various cultivation methods on tne structure and hydraulic properties of a soil in a semi-arid climate. Soil and tillage research, vol. 60, 1, pp. 43-53.

**Daoud Y., Robert M., 1992.** Influence of particle size and clay organization on hydraulic conductivity and moisture retention of clays from saline soils. Applied Clay Science, vol. 6, pp. 293-299.

**Derdour H., Angers D.A., Laverdière M.R., 1993.** Caractérisation de l'espace poral d'un sol argileux : Effets de ses constituants et du travail du sol. *Can. J. soil Sci.*, vol. 73, 3, pp. 299-307.

**Djili K., Daoud Y., 2001.** Relation entre l'argile, la matière organique et la capacité d'échange cationique des sols du Nord de l'Algérie. *Agrochimica*, vol. 45, 5-6, pp. 248-250.

**Ecrément Y., 1971.** Etude agro-pédologique de la Mitidja. DEMRH, 130p.

**Gheyi H.R., Halitim A., 1976.** Contribution de l'argile et de la matière organique dans la capacité d'échange de quelques sols du Nord d'Algérie. *An. de l'I.N.A. El Harrach*, vol. 6, 2, pp. 27-32.

**Gupta S.C., Larson W.E., 1979.** Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent and bulk density. *Water Resources Research*, vol. 15, pp. 1633-1635.

**Halilat M.T., Tessier D., 2000.** Effet de la salinité et de la sodicité sur le comportement hydrique de mélange sable-argile. *Etude et Gestion des Sols*, vol. 7, 2, pp. 155-167

**Hudson B.D., 1994.** Soil organic matter and available water capacity. *J. Soil and Water Cons.*, vol. 49, 2, pp. 189-194.

**Jouany C., 1991.** Surface free energy components of clay-synthetic humic acid complexes from contact angle measurements. *Clays & Clay Miner.*, vol. 39, 1, pp.43-49.

**Kilasara M., Tessier D., 1991.** Intérêt de mesures physiques sur échantillons non remaniés dans la caractérisation des sols ferrallitiques. Application à la couverture ferrallitique du district de Muhesa (Tanzanie). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. 26, 2, pp. 91-103.

**Lamandé M., 2003.** Effets de l'interaction des pratiques culturales et des communautés lombriciennes sur la structure du sol et son fonctionnement hydrique. Thèse de Doctorat., E. N. S. A. R, Rennes. 109p.

**Lilly A., Lin H., 2004.** Using soil morphological attributes and soil structure in pedotransfer functions. pp. 115-141. In: Y. Pachepsky, W.J. Rawls (eds) *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. Development in Soil Science.* vol. 30, Elsevier. Amsterdam.

**Minasny B., McBratney A.B., Bristow K.L., 1999.** Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*, vol. 93, pp. 225-253.

**Morvan X., Bruand A., Cousin I., Roque J., Baran N., Mouvet C., 2004.** Prédiction des propriétés de rétention en eau des sols d'un bassin versant à l'aide de fonctions de pédotransfert : influence de la densité apparente et de la teneur en éléments grossiers. *Etude et Gestion des Sols*, vol. 11, pp. 117-135.

**Musy A., Soutter M., 1991.** *Physique du sol.* Ed. Presses Polytechniques et universitaires Romandes. Lausanne, 331p.

**Mutin L., 1977.** La Mitidja Décolonisation et espace géographique. Ed ; O.P.U., Alger, 595p.

**Nemes A., Rawls W.J. 2004.** Soil texture and particle-size distribution as input to estimate soil hydraulic properties. pp. 47-70. In: Y. Pachepsky, W.J. Rawls (eds) Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. Development in Soil Science. vol. 30, Elsevier. Amsterdam.

**Nemes A., Roberts R.T., Rawls W.J., Pachepsky Y.A., Van Genuchten M.T., 2008.** Software to estimate -33 and -1500 kPa soil water retention using the non-parametric k-Nearest Neighbor technique. Environmental Modelling and Software, vol. 23, pp. 254-255.

**Pachepsky Y.A., Shaap M.G., 2004.** Data mining and exploration techniques. pp. 21-32. In: Y. Pachepsky, W.J. Rawls (eds) Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. Development in Soil Science. vol. 30, Elsevier. Amsterdam.

**Pachepsky Y.A., Rawls W.J., Lin H.S., 2006.** Hydropedology and pedotransfer functions. Geoderma, 131, pp. 308-316.

**Rawls W.J., Brakensiek D.L., Saxton K.E. 1982.** Estimation of soil water properties. Trans. ASAE, 26, 1747-1752.

**Rawls W.J., Pachepsky Y.A., Ritchie J.C., Sobecki T.M., Bloodworth H., 2003.** Effect of soil organic carbon on soil water retention. Geoderma, 116, pp. 61-76.

**Rawls W.J., Nemes A., Pachepsky Y.A., 2004.** Effect of soil organic carbon on soil hydraulic properties. pp. 95-114. In: Y. Pachepsky, W.J. Rawls (eds) Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. Development in Soil Science. vol. 30, Elsevier. Amsterdam.

**Reatto A., Bruand A., Silva E. M., Martins E. S., Brossard M., 2007.** Hydraulic properties of the diagnostic horizon of latosols of a regional toposequence across the Brazilian Central Plateau. Geoderma, vol. 139, pp. 51-59.

**Richard G., Cousin I., Sillon J.F., Bruand A., Guérif J., 2001.** Effect of compaction on the porosity of a silty soil: Consequences on unsaturated hydraulic properties. European Journal of Soil Science, 52, 49-58.

**Richard G., 2002.** Structure et fonctionnement physique des sols cultivés. Mémoire sur travaux, Université Pierre et Marie Curie (PARIS VI), France. 104p.

**Salter P.J., Williams J.B., 1965.** The influence of texture on the moisture characteristics of soils. II. Available-water capacity and moisture release characteristics. J. Soil Sci., 16, 2, pp. 310-317.

**Samuel A., 2004.** Relations entre caractéristiques des matières organiques apportées, dynamique de leur décomposition et évolution de la stabilité structurale du sol. Mémoire de doctorat, E. N. S. R., Rennes. 243p.

**Tessier D., 1984.** Comportement hydrique des matériaux argileux en relation avec leur organisation conséquences sur les propriétés macroscopiques. in compte rendue du colloque Fonctionnement hydrique et comportement des sols, Ed A. F. E. S, pp. 297-307.

**Tessier D., Bruand A., Le Bissonais Y., Dambrine E., 1996.** Qualité chimique et physique des sols : variabilité spatiale et évolution. Etude et Gestion des Sols, vol. 3, 4, pp. 229-244 (numéro spécial).

**Tessier D., 1994.** Rôle de l'eau sur les propriétés physiques des sols. Sécheresse, vol. 5, 3, pp. 143-151.

**Van Alphen B.J., Booltink H.W.G., Bouma J., 2001.** Combining pedotransfer functions with physical measurements to improve the estimation of soil hydraulic properties. Geoderma, vol. 103, pp. 133-147.

**Vereecken H., Maes J., Feyen J., Darius P., 1989.** Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. Soil Science, vol. 148, 6, pp. 389-403.

**Vereecken H., Herbst M., 2004.** Statistical regression. pp. 3-19. In: Y. Pachepsky, W.J. Rawls (eds) Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrlogy. Development in Soil Science. vol. 30, Elsevier. Amsterdam.

**Wösten J.H.M., Finke P.A., Jansen M.J.W. 1995.** Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. Geoderma, vol. 66, pp. 227-237.

**Wösten J.H.M., Lilly A., Nemes A., Le Bas C. 1999.** Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. Geoderma, vol. 90, pp. 169-185.

**Wösten J.H.M., Pachepsky Y.A., Rawls W.J. 2001.** Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. Journal of hydrology, 251, pp. 123-150.

## **ANNEXES**

## Annexe I. Localisation des profils

Profil	Classe de sols (CPCS, 1967)	Localisation	
		X	Y
1	calcimagnésique	2° 29' 34.59"	6° 32' 37.87"
2	calcimagnésique	2° 28' 45.83"	36° 32' 42.82"
3	calcimagnésique	2° 26' 32.31"	36° 32' 5.60"
4	peu évolué	2° 26' 36.85"	36° 31' 43.33"
5	sol rouge	2° 25' 55.57"	36° 30' 29.56"
6	sol rouge	2° 26' 36.24"	36° 30' 23.06"
7	sol rouge	2° 25' 52.46"	36° 30' 45.15"
8	sol rouge	2° 25' 46.49"	36° 30' 51.052"
9	sol rouge	2° 25' 40.00"	36° 30' 55.94"
10	peu évolué	2° 27' 9.29"	36° 30' 32.17"
11	peu évolué	2° 35' 45.39"	36° 33' 48.60"
12	peu évolué	2° 35' 44.05"	36° 34' 2.36"
13	peu évolué	2° 35' 21.50"	36° 34' 10.21"
14	calcimagnésique	2° 31' 24.27"	36° 33' 18.42"
15	vertisol	2° 31' 39.68"	36° 33' 2.15"
16	vertisol	2° 32' 34.32"	36° 31' 56.17"
17	vertisol	2° 32' 34.79"	36° 31' 45.69"
18	vertisol	2° 32' 35.87"	36° 31' 36.64"
19	vertisol	2° 32' 36.33"	36° 31' 26.41"
20	vertisol	2° 32' 53.09"	36° 31' 16.78"
21	peu évolué	2° 34' 2.15"	36° 30' 34.43"
22	peu évolué	2° 33' 53.51"	36° 30' 30.44"
23	sol rouge	2° 34' 24.60"	36° 30' 30.94"
24	sol rouge	2° 34' 33.13"	36° 30' 26.12"
25	vertisol	2° 34' 7.70"	36° 29' 40.61"
26	vertisol	2° 34' 6.92"	36° 29' 25.62"
27	vertisol	2° 34' 26.65"	36° 28' 29.79"
28	sol rouge	2° 35' 51.66"	36° 28' 13.97"
29	peu évolué	2° 36' 42.01"	36° 28' 17.42"
30	peu évolué	2° 37' 43.69"	36° 31' 6.17"

## Annexe II. Résultats analytiques des échantillons étudiés

Echantillons	pH	CE ds/m	CaCO3 (%)	MO (%)	CEC (cmol+/Kg)	Bases échangeables (cmol+/Kg)			Granulométrie (%)					Eg(%)
						K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>++</sup> +Ca <sup>++</sup>	A	Lf	Lg	Sf	Sg	
P1H1	7,9	0,47	16,1	4,6	23,00	0,39	0,75	21,86	47,6	34,2	13,6	5,2	0,8	5,0
P1H2	7,8	0,68	20,1	2,2	22,05	0,26	0,49	21,53	41,5	19,1	17,5	15,8	1,2	7,0
P2H1	8,1	0,14	26,1	2,2	15,97	0,90	0,75	14,32	29,4	17,0	20,7	26,0	2,5	7,5
P2H2	8,1	0,20	13,0	1,9	20,91	0,11	0,49	20,69	41,5	20,5	23,9	7,1	2,5	4,0
P3H1	7,9	0,20	5,9	2,3	19,77	0,38	0,39	19,01	37,5	14,1	16,9	21,4	7,8	8,0
P3H2	7,9	0,15	5,7	2,8	18,63	0,29	0,34	18,04	36,9	16,3	12,0	21,9	8,1	8,0
P4H1	8,2	0,14	25,4	2,1	19,77	0,14	0,52	19,48	40,1	46,0	1,6	8,7	3,4	4,0
P4H2	8,2	0,15	25,7	2,8	19,20	0,12	0,37	18,96	42,4	32,9	13,5	8,8	3,5	4,5
P5H1	8,1	0,10	0,9	3,0	23,19	0,29	0,42	22,60	40,6	24,7	21,4	7,2	1,4	4,0
P5H2	7,9	0,18	1,4	2,4	21,13	0,27	0,36	20,58	41,0	23,7	20,8	8,2	2,5	5,0
P6H1	8,0	0,08	0,0	2,1	23,38	0,20	0,36	22,99	47,4	16,3	22,3	7,9	1,9	5,0
P6H2	7,9	0,12	0,0	1,6	23,38	0,12	0,39	23,14	48,9	14,7	21,7	7,9	3,7	5,5
P7H1	7,7	0,08	0,0	2,9	24,52	0,15	0,33	24,21	53,4	21,8	19,1	5,1	2,4	4,0
P7H2	7,7	0,08	0,0	1,7	24,33	0,07	0,30	24,20	53,1	18,4	21,1	5,0	1,2	5,0
P8H1	7,7	0,12	0,0	2,3	25,28	0,12	0,34	25,04	58,4	13,8	16,0	6,7	1,9	5,5
P8H2	7,6	0,11	0,0	2,7	26,04	0,11	0,36	25,82	58,0	15,5	16,0	6,0	1,4	3,5
P9H1	7,5	0,06	0,0	3,1	16,14	0,18	0,33	15,77	38,6	23,1	22,5	8,7	2,7	4,0
P9H2	7,5	0,10	0,0	1,9	16,64	0,18	0,30	16,27	40,7	21,2	22,3	8,8	2,4	6,0
P10H1	8,0	0,15	1,4	3,0	23,38	0,35	0,54	22,68	53,8	23,8	10,5	5,4	3,5	5,0
P10H2	8,2	0,13	1,6	2,3	23,95	0,30	0,63	23,34	53,2	22,4	14,6	6,4	3,6	3,5
P11H1	8,0	0,37	23,5	3,9	12,60	0,37	0,47	11,76	28,1	38,2	23,3	5,0	0,9	3,5
P11H2	8,1	0,30	23,5	2,7	13,73	0,74	0,61	12,25	28,2	39,4	22,4	4,7	0,6	3,0
P12H1	7,7	0,47	23,8	1,8	12,21	0,38	0,31	11,45	24,6	36,1	26,2	7,8	1,2	4,0
P12H2	7,9	0,38	22,5	2,5	16,34	0,34	0,48	15,67	28,1	42,6	22,1	3,1	0,3	3,0
P13H1	8,1	0,18	20,0	2,4	14,72	0,35	0,28	14,09	36,9	47,0	13,2	1,2	0,3	3,0
P13H2	8,1	0,22	16,5	1,7	15,48	0,22	0,49	15,04	36,5	46,7	16,6	1,1	0,6	3,0
P14H1	8,2	0,17	14,2	3,5	25,85	0,60	0,81	24,65	58,6	28,2	9,0	2,9	1,0	3,5
P14H2	8,4	0,15	14,2	2,0	25,47	0,35	0,84	24,77	60,3	26,2	10,1	3,0	0,8	3,0
P15H1	8,1	0,29	13,4	3,3	26,33	0,29	0,79	25,25	66,0	25,5	7,2	1,3	1,3	3,0
P15H2	8,0	0,50	14,1	3,1	26,97	0,28	1,54	26,41	67,8	23,6	7,3	1,6	1,3	3,0
P16H1	8,2	0,18	10,6	4,2	25,43	0,28	0,76	24,87	55,7	37,3	7,2	0,8	0,7	2,0
P16H2	8,3	0,17	11,7	2,4	25,98	0,20	0,60	25,59	66,9	25,9	7,3	0,7	0,5	3,0
P17H1	8,3	0,13	11,7	4,1	24,36	0,22	0,40	23,93	52,2	19,3	27,8	1,7	0,5	2,5
P17H2	8,0	0,15	10,9	4,2	25,55	0,22	0,43	25,12	59,6	33,5	6,8	0,9	0,4	3,0
P18H1	8,2	0,17	10,5	3,5	26,13	0,26	0,81	25,61	58,1	34,3	6,8	1,6	1,1	2,5
P18H2	8,3	0,17	11,0	3,3	24,52	0,24	0,81	24,04	66,4	24,6	9,0	1,7	0,9	2,0
P19H1	8,3	0,13	10,6	4,3	26,61	0,23	0,55	26,15	59,4	26,6	9,6	2,2	1,0	2,0
P19H2	8,3	0,16	10,2	3,2	26,04	0,23	0,72	25,58	63,9	27,1	7,9	2,3	0,9	2,0
P20H1	8,2	0,16	17,2	2,7	21,86	0,22	0,45	21,42	43,3	36,1	14,4	4,5	4,1	2,0
P20H2	8,2	0,20	17,2	2,6	22,62	0,20	0,45	22,23	51,6	25,5	13,3	5,1	3,7	3,0
P21H1	8,0	0,11	0,0	3,1	25,01	0,43	0,67	24,14	60,7	20,2	13,5	4,3	1,6	3,5
P21H2	7,9	0,18	0,0	2,9	23,00	0,27	0,78	22,46	42,7	38,2	14,2	4,5	1,7	3,5
P22H1	7,5	0,06	0,0	3,8	25,38	0,33	0,67	24,73	56,3	26,4	13,2	4,4	1,8	5,0
P22H2	7,4	0,07	0,2	2,1	23,76	0,27	0,69	23,22	59,0	19,5	14,5	4,7	1,2	5,5
P23H1	8,0	0,17	0,3	2,8	19,26	0,45	0,81	18,37	45,1	21,2	14,7	11,1	5,1	6,0
P23H2	7,8	0,28	0,1	2,0	19,35	0,38	0,67	18,59	46,5	21,3	12,1	11,0	5,4	6,0
P24H1	8,2	0,12	3,1	2,4	17,68	0,35	0,51	16,99	40,1	20,6	16,8	10,7	9,2	6,0
P24H2	8,1	0,16	3,1	1,8	18,41	0,21	0,58	17,99	46,4	14,6	15,1	10,8	10,2	6,5
P25H1	7,6	0,18	0,5	4,7	26,62	0,52	0,57	25,57	60,1	18,5	13,5	3,4	2,7	4,0
P25H2	7,7	0,15	0,4	4,6	26,97	0,45	0,64	26,08	60,1	20,2	12,3	4,1	2,4	4,0
P26H1	7,9	0,09	0,3	3,5	26,75	0,38	0,61	25,99	65,7	18,3	14,9	3,0	1,0	3,5
P26H2	7,8	0,11	0,8	3,5	26,65	0,36	0,61	25,93	63,6	21,8	13,7	2,9	1,0	2,5
P27H1	8,0	0,15	23,0	2,6	23,33	0,52	0,37	22,29	47,0	24,9	13,8	5,8	7,7	5,0
P27H2	8,0	0,15	21,3	3,0	25,19	0,38	0,37	24,43	53,4	18,2	14,8	6,4	9,9	5,5
P28H1	7,9	0,13	0,6	4,6	23,69	0,34	0,37	23,01	49,1	22,1	24,9	5,3	1,1	5,0
P28H2	7,9	0,15	1,1	4,0	21,10	0,29	0,39	20,51	49,3	25,0	21,4	5,0	0,9	4,0
P29H1	8,2	0,12	11,5	3,7	18,18	0,32	0,30	17,55	37,8	25,4	24,3	9,3	2,4	4,0
P29H2	8,0	0,17	11,5	3,0	15,21	0,26	0,28	14,68	38,6	24,2	22,5	9,1	2,4	5,5
P30H1	8,1	0,17	22,7	3,0	14,42	0,24	0,33	13,94	30,9	40,0	20,8	4,6	1,0	3,0
P30H2	8,1	0,17	20,8	3,3	22,42	0,26	0,76	21,90	32,8	39,2	20,4	4,5	1,5	3,5

### Annexe III. Densité apparente et teneurs en eau (%) des échantillons étudiés

Echantillons	Da	Teneurs en eau massiques (%)						
		pF1	pF1.5	pF2	pF2.5	pF3	pF3.5	pF4.2
P1H1	1,28	35,6	34,6	32,1	30,0	27,3	23,7	21,7
P1H2	1,53	34,0	32,3	30,9	27,7	24,0	21,0	18,1
P2H1	1,54	26,6	24,6	21,9	21,1	18,6	16,9	13,3
P2H2	1,52	27,4	25,7	23,3	22,6	20,7	18,4	16,5
P3H1	1,53	27,1	26,4	23,7	20,5	18,1	16,7	14,2
P3H2	1,70	23,3	21,2	20,2	18,8	15,6	14,0	12,3
P4H1	1,75	27,2	26,4	24,3	21,8	19,0	16,1	14,1
P4H2	1,70	25,6	21,9	20,8	19,4	18,4	16,7	14,2
P5H1	1,66	24,5	23,8	22,1	21,4	18,2	15,3	12,9
P5H2	1,68	24,3	23,9	22,6	20,6	17,9	16,1	13,9
P6H1	1,61	26,1	25,3	23,6	21,4	20,0	18,0	15,4
P6H2	1,44	34,2	31,8	28,7	27,0	23,2	21,0	18,4
P7H1	1,53	34,0	32,0	25,6	22,2	19,2	16,6	14,2
P7H2	1,50	34,0	31,0	24,4	21,8	19,3	17,6	15,3
P8H1	1,54	25,3	24,4	22,6	21,2	19,9	18,5	16,5
P8H2	1,60	29,8	28,8	26,5	24,2	21,6	19,5	17,5
P9H1	1,59	31,9	29,1	24,0	20,1	17,0	13,9	11,8
P9H2	1,66	23,0	21,5	19,7	18,2	15,7	14,8	12,1
P10H1	1,42	32,1	30,8	29,3	27,1	23,0	21,0	18,2
P10H2	1,33	40,4	38,5	36,0	31,0	27,8	24,1	20,7
P11H1	1,71	24,8	22,5	21,7	20,0	18,2	15,3	13,1
P11H2	1,70	23,7	21,9	20,9	18,7	17,0	16,5	13,7
P12H1	1,54	28,8	27,4	25,7	22,6	15,8	16,4	13,5
P12H2	1,71	22,7	22,1	21,2	19,7	17,4	16,9	13,2
P13H1	1,59	25,4	24,4	23,6	22,0	19,6	16,6	14,2
P13H2	1,70	22,8	21,8	21,0	19,5	18,4	17,4	14,4
P14H1	1,46	33,4	32,6	30,0	27,7	24,3	23,4	21,1
P14H2	1,52	36,0	35,0	32,9	30,6	27,4	24,2	20,1
P15H1	1,54	32,3	31,7	30,6	28,7	24,0	21,9	19,4
P15H2	1,53	35,0	34,4	32,9	30,5	27,3	24,0	20,1
P16H1	1,61	33,5	32,2	31,5	30,0	27,0	22,8	18,5
P16H2	1,55	37,7	36,4	35,4	30,8	28,1	26,3	22,7
P17H1	1,57	32,5	31,0	28,6	26,6	24,4	23,5	20,7
P17H2	1,49	36,9	34,5	31,4	29,9	27,3	23,6	20,0
P18H1	1,66	30,4	29,7	27,3	27,1	24,9	23,0	20,4
P18H2	1,71	30,3	29,6	28,8	27,8	25,6	23,6	20,0
P19H1	1,58	33,4	29,8	28,9	27,4	25,0	24,4	20,4
P19H2	1,71	27,9	27,3	25,5	25,2	23,9	23,3	20,3
P20H1	1,68	27,6	26,6	24,5	23,6	21,0	19,2	17,4
P20H2	1,64	28,7	25,0	23,3	23,1	21,2	19,3	17,6
P21H1	1,58	35,4	28,8	27,2	26,2	23,7	21,8	18,2
P21H2	1,60	32,2	31,2	28,2	26,5	24,3	23,7	21,2
P22H1	1,56	30,5	29,4	27,5	25,5	23,3	21,0	19,3
P22H2	1,52	30,6	26,0	24,2	22,8	21,2	21,0	19,4
P23H1	1,73	24,0	22,7	21,5	20,5	18,5	16,6	14,0
P23H2	1,68	24,4	23,7	21,9	20,8	18,7	17,5	14,4
P24H1	1,74	24,0	21,5	20,4	18,8	17,8	16,1	13,2
P24H2	1,74	25,1	24,2	21,7	19,8	16,7	15,1	13,8
P25H1	1,56	35,4	30,9	28,7	27,4	25,3	22,7	18,5
P25H2	1,42	35,4	34,8	28,7	25,6	22,8	21,0	19,3
P26H1	1,61	30,8	29,8	28,3	27,7	26,5	22,1	18,5
P26H2	1,63	28,4	27,9	26,2	25,5	23,6	25,9	21,8
P27H1	1,48	35,8	33,3	31,5	28,6	25,2	22,5	19,1
P27H2	1,44	41,0	38,6	36,4	34,6	31,6	26,4	20,0
P28H1	1,52	31,1	29,3	25,1	23,6	21,1	19,5	16,5
P28H2	1,61	26,1	25,5	23,7	22,4	20,6	19,1	17,4
P29H1	1,74	24,1	22,2	20,6	19,8	17,5	15,4	12,6
P29H2	1,81	22,4	21,3	20,0	18,6	17,1	15,0	12,4
P30H1	1,74	28,9	26,6	22,4	20,3	17,7	14,7	12,2
P30H2	1,62	27,7	25,3	21,9	20,1	17,3	14,7	12,4

#### Annexes IV. Résultats analytiques des échantillons argileux

Echantillons	CEC arg (cmol+/g)	Varg(cm <sup>3</sup> /g)	Warg (g/g)						
			pF1	pF1,5	pF2	pF2,5	pF3	pF3,5	pF4,2
P6H2	0,048	0,648	0,700	0,649	0,586	0,551	0,474	0,429	0,376
P10H1	0,043	0,610	0,597	0,573	0,544	0,504	0,427	0,390	0,339
P10H2	0,045	0,705	0,759	0,723	0,676	0,583	0,522	0,452	0,389
P14H1	0,044	0,523	0,570	0,557	0,513	0,473	0,416	0,400	0,361
P14H2	0,042	0,465	0,597	0,580	0,546	0,507	0,455	0,402	0,334
P15H1	0,040	0,415	0,489	0,481	0,465	0,435	0,363	0,331	0,294
P15H2	0,040	0,409	0,517	0,508	0,486	0,450	0,403	0,354	0,297
P16H2	0,039	0,401	0,563	0,543	0,529	0,460	0,419	0,393	0,340
P17H2	0,043	0,493	0,619	0,579	0,527	0,501	0,458	0,396	0,335
P18H2	0,037	0,315	0,457	0,445	0,434	0,418	0,385	0,355	0,302
P19H1	0,045	0,429	0,562	0,502	0,487	0,461	0,420	0,410	0,343
P20H2	0,044	0,453	0,557	0,484	0,452	0,448	0,411	0,374	0,341
P21H1	0,041	0,421	0,583	0,474	0,448	0,431	0,390	0,360	0,300
P22H1	0,045	0,470	0,541	0,523	0,490	0,454	0,415	0,373	0,343
P22H2	0,040	0,475	0,519	0,440	0,410	0,387	0,359	0,356	0,329
P23H1	0,043	0,442	0,532	0,502	0,476	0,453	0,409	0,368	0,310
P23H2	0,042	0,470	0,525	0,510	0,471	0,449	0,402	0,377	0,310
P24H1	0,044	0,496	0,600	0,536	0,509	0,469	0,445	0,401	0,331
P25H1	0,044	0,438	0,589	0,514	0,479	0,456	0,421	0,379	0,307
P26H1	0,041	0,371	0,468	0,454	0,431	0,422	0,404	0,337	0,281
P27H1	0,050	0,637	0,761	0,707	0,670	0,608	0,536	0,478	0,407
P27H2	0,047	0,593	0,767	0,722	0,682	0,647	0,591	0,495	0,375

### Annexe V. localisation et résultats analytiques des échantillons tests

Echantillons	Localisation		Classe de sols (CPCS, 1967)	pH	CE (ds/m)	CaCO3(%)	MO (%)	CEC (cmol+/Kg)	Bases échangeables (cmol+/Kg)			Granulométrie (%)					Eg (%)
	X	Y							K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>++</sup> +Ca <sup>++</sup>	A	Lf	Lg	Sf	Sg	
<b>1</b>	2° 33' 54,41"	36° 29' 19,28"	vertisol	8,0	0,10	0,0	3,7	20,39	0,46	0,93	19,47	61,9	19,9	12,2	3,6	1,1	3,0
<b>2</b>	2° 34' 54,17"	36° 28' 30,56"	vertisol	8,0	0,14	5,4	3,9	26,99	0,88	0,58	25,23	56,6	23,2	12,4	5,3	3,0	4,0
<b>3</b>	2° 34' 55,26"	36° 28' 22,93"	vertisol	8,1	0,13	4,0	3,4	27,89	0,59	0,49	26,71	59,4	17,3	12,7	6,9	4,5	4,0
<b>4</b>	2° 35' 1,089"	36° 28' 15,28"	vertisol	7,9	0,13	0,5	3,8	27,59	0,77	0,46	26,05	54,9	19,2	13,6	6,4	5,0	4,0
<b>5</b>	2° 35' 10,17"	36° 28' 8,55"	vertisol	8,1	0,15	18,6	3,0	27,18	0,56	0,36	26,05	52,5	20,7	12,3	6,6	8,3	5,0
<b>6</b>	2° 35' 14,25"	36° 28' 26,61"	vertisol	8,2	0,13	0,1	3,0	22,05	0,49	0,75	21,07	52,7	23,5	18,5	4,4	0,8	4,0
<b>7</b>	2° 35' 23,28"	36° 28' 16,07"	vertisol	8,1	0,15	45,9	3,6	17,30	0,61	0,36	16,08	43,6	29,8	12,7	6,4	9,3	5,0
<b>8</b>	2° 35' 42,85"	36° 28' 42,11"	sol rouge	8,0	0,18	3,0	3,2	20,91	0,42	0,82	20,06	48,8	28,8	16,1	5,3	0,8	4,5
<b>9</b>	2° 35' 40,59"	36° 28' 50,93"	sol rouge	8,3	0,13	19,3	3,1	20,70	0,39	0,51	19,92	46,8	28,6	16,0	6,0	1,7	4,0
<b>10</b>	2° 36' 45,97"	36° 28' 26,43"	peu évolué	8,2	0,11	12,0	3,1	17,73	0,34	0,25	17,06	37,3	24,8	22,1	10,1	3,0	5,0
<b>11</b>	2° 36' 22,78"	36° 28' 18,27"	peu évolué	8,2	0,12	20,5	2,3	12,42	0,29	0,19	11,83	25,4	18,5	21,1	19,5	13,3	6,0
<b>12</b>	2° 37' 42,88"	36° 28' 34,35"	sol rouge	8,0	0,13	6,2	1,9	18,06	0,43	0,28	17,19	50,2	21,0	15,5	7,5	5,9	5,0
<b>13</b>	2° 37' 52,94"	36° 28' 34,03"	sol rouge	8,1	0,13	9,2	1,5	17,11	0,42	0,30	16,26	50,8	14,8	16,4	9,5	6,3	6,0
<b>14</b>	2° 37' 55,42"	36° 28' 42,34"	sol rouge	8,0	0,13	2,2	1,2	20,15	0,35	0,18	19,45	47,9	22,3	16,7	8,8	4,3	5,5
<b>15</b>	2° 37' 31,19"	36° 28' 45,38"	peu évolué	8,2	0,13	30,0	1,1	12,83	0,15	0,19	12,52	30,5	23,7	21,1	11,9	8,5	6,0
<b>16</b>	2° 37' 46,97"	36° 28' 52,88"	sol rouge	8,2	0,13	9,9	2,6	18,06	0,32	0,31	17,43	44,2	27,3	16,4	7,6	2,1	5,0
<b>17</b>	2° 37' 33,46"	36° 29' 0,12"	peu évolué	8,2	0,13	44,8	1,4	11,02	0,13	0,21	10,76	27,7	27,2	15,7	15,4	10,8	7,0
<b>18</b>	2° 37' 58,28"	36° 28' 57,55"	sol rouge	8,1	0,13	11,3	1,5	19,35	0,48	0,46	18,39	46,6	18,6	19,2	10,1	3,9	7,0
<b>19</b>	2° 37' 35,28"	36° 30' 56,71"	peu évolué	8,0	0,33	22,8	2,1	13,92	0,54	0,70	12,84	28,3	35,8	24,5	6,3	1,3	4,0
<b>20</b>	2° 37' 52,82"	36° 30' 39,93"	peu évolué	8,0	0,22	22,0	3,8	14,33	0,26	0,45	13,81	31,3	32,4	24,3	9,2	1,5	5,0

**Annexe VI. Densité apparente et teneurs en eau massiques des échantillons tests**

Echantillons	Teneurs en eau massiques (%)							
	Da	pF1	pF1.5	pF2	pf2.5	pF3	pF3.5	pF4.2
<b>1</b>	1,56	33,4	31,9	28,7	27,4	25,3	22,7	18,5
<b>2</b>	1,61	31,5	29,2	27,5	26,0	24,0	22,8	18,5
<b>3</b>	1,56	34,0	30,2	28,0	27,4	25,0	22,7	18,5
<b>4</b>	1,57	32,5	31,0	28,6	26,6	24,4	21,5	19,7
<b>5</b>	1,57	32,9	30,5	28,0	26,9	24,4	21,9	19,9
<b>6</b>	1,57	32,2	30,9	28,2	26,6	24,8	22,5	20,7
<b>7</b>	1,68	28,5	26,6	24,5	22,6	20,0	18,2	16,4
<b>8</b>	1,52	33,1	31,3	28,1	25,6	23,1	21,5	18,5
<b>9</b>	1,52	31,5	29,9	25,9	24,0	21,9	19,8	17,0
<b>10</b>	1,74	24,1	22,2	20,6	19,8	17,5	15,4	12,6
<b>11</b>	1,54	27,8	25,4	23,7	21,6	15,8	14,4	12,5
<b>12</b>	1,52	31,8	29,3	25,1	23,6	21,1	19,5	16,5
<b>13</b>	1,52	31,5	29,9	25,7	23,0	20,7	18,8	16,9
<b>14</b>	1,61	26,1	25,3	23,6	21,4	20,0	18,0	15,4
<b>15</b>	1,74	25,9	23,6	20,4	19,3	17,7	14,7	12,2
<b>16</b>	1,73	24,0	22,7	21,5	20,5	18,5	16,6	14,0
<b>17</b>	1,71	24,8	22,5	20,7	19,0	17,2	15,3	13,1
<b>18</b>	1,73	25,0	23,0	22,0	21,0	19,0	17,0	14,9
<b>19</b>	1,71	24,8	22,5	21,7	20,0	18,2	15,3	13,1
<b>20</b>	1,74	25,9	24,6	22,0	20,0	17,7	15,7	12,9

## Annexe VII. Validation des fonctions de pédotransfert (modèle I et II)

Echantillons	FPT (modèle I)						
	Wp - Wm pF1	Wp - Wm pF1,5	Wp - Wm pF2	Wp - Wm pF2,5	Wp - Wm pF3	Wp - Wm pF3,5	Wp - Wm pF4,2
<b>1</b>	-0,43	-0,97	-0,49	-0,54	-0,16	0,02	1,18
<b>2</b>	-0,75	-0,39	-0,97	-0,92	-0,64	-1,60	-0,24
<b>3</b>	-1,72	0,02	-0,64	-1,38	-0,72	-0,82	0,42
<b>4</b>	-1,33	-1,88	-2,06	-1,66	-1,37	-0,69	-1,81
<b>5</b>	-2,01	-1,66	-1,74	-2,29	-1,75	-1,49	-2,38
<b>6</b>	-1,05	-1,74	-1,53	-1,60	-1,79	-1,76	-2,88
<b>7</b>	-1,75	-1,49	-1,30	-0,99	-0,35	-0,37	-1,25
<b>8</b>	-0,55	-0,76	-0,29	0,32	0,57	-0,46	-0,36
<b>9</b>	0,68	0,25	1,48	1,47	1,28	0,76	0,69
<b>10</b>	-0,42	-0,45	-0,85	-1,08	-0,43	-0,01	0,28
<b>11</b>	-1,23	-0,98	-2,20	-2,76	0,05	-0,51	-0,81
<b>12</b>	0,37	0,72	1,98	1,69	2,04	1,09	1,24
<b>13</b>	0,27	-0,40	0,69	1,66	1,89	1,30	0,40
<b>14</b>	2,63	1,74	1,21	1,40	0,59	0,76	0,65
<b>15</b>	-3,56	-3,18	-2,03	-2,25	-2,54	-1,10	-0,92
<b>16</b>	1,03	0,73	0,22	-0,04	0,25	0,52	0,50
<b>17</b>	-1,47	-1,14	-1,63	-1,24	-1,43	-1,41	-1,61
<b>18</b>	-0,24	0,01	-0,91	-1,06	-0,63	-0,17	-0,66
<b>19</b>	-0,69	-0,18	-1,41	-1,10	-1,36	-0,43	-0,73
<b>20</b>	-2,74	-3,17	-2,35	-1,75	-1,41	-1,06	-0,68
<b>EMP (%)</b>	<b>-0,75</b>	<b>-0,75</b>	<b>-0,74</b>	<b>-0,71</b>	<b>-0,39</b>	<b>-0,37</b>	<b>-0,45</b>
<b>ETP (%)</b>	<b>1,34</b>	<b>1,2</b>	<b>1,24</b>	<b>1,33</b>	<b>1,21</b>	<b>0,89</b>	<b>1,12</b>
	<b>FPT (modèle II)</b>						
<b>1</b>	-0,44	-0,49	0,17		-0,12	0,06	0,99
<b>2</b>	-0,46	0,39	0,06		-0,23	-1,30	-0,25
<b>3</b>	-1,05	1,18	0,89		0,07	-0,22	0,58
<b>4</b>	-0,43	-0,50	-0,27		-0,30	0,10	-1,51
<b>5</b>	-0,64	0,23	0,67		-0,13	-0,29	-1,82
<b>6</b>	-0,22	-0,41	0,17		-0,77	-1,01	-2,60
<b>7</b>	-1,40	-0,67	-0,27		0,20	0,02	-1,17
<b>8</b>	-1,24	-0,99	-0,60		-0,05	-0,96	-0,84
<b>9</b>	-0,87	-0,91	-0,01		-0,33	-0,49	-0,23
<b>10</b>	0,07	0,43	0,26		0,25	0,47	0,45
<b>11</b>	0,64	1,29	0,59		2,28	1,11	0,09
<b>12</b>	-1,31	-0,61	0,32		0,23	-0,28	0,22
<b>13</b>	-1,35	-1,71	-0,92		0,10	-0,05	-0,60
<b>14</b>	1,17	0,63	-0,16		-0,97	-0,41	-0,25
<b>15</b>	-2,13	-1,34	0,25		-0,79	0,17	-0,24
<b>16</b>	0,68	0,78	0,30		-0,02	0,30	0,20
<b>17</b>	-0,83	-0,12	-0,41		-0,54	-0,80	-1,33
<b>18</b>	0,24	0,89	0,25		-0,03	0,28	-0,55
<b>19</b>	-0,23	0,72	-0,36		-0,61	0,07	-0,52
<b>20</b>	-1,77	-1,74	-0,60		-0,11	-0,14	-0,22
<b>EMP (%)</b>	<b>-0,58</b>	<b>-0,15</b>	<b>-0,02</b>		<b>-0,09</b>	<b>-0,17</b>	<b>-0,48</b>
<b>ETP (%)</b>	<b>0,84</b>	<b>0,9</b>	<b>0,45</b>		<b>0,64</b>	<b>0,55</b>	<b>0,85</b>

## Annexe VIII. Validation des classes de fonctions de pédotransfert texturales et structurales

Echantillons	CFPT texturales						
	Wp-Wm pF1	Wp-Wm pF1,5	Wp-Wm pF2	Wp-Wm pF2,5	Wp-Wm pF3	Wp-Wm pF3,5	Wp-Wm pF4,2
<b>1</b>	4,81	-1,82	-1,32	-1,30	-1,31	-0,79	0,32
<b>2</b>	4,25	-0,90	-1,40	-1,18	-1,25	-1,98	-0,54
<b>3</b>	3,29	-1,00	-1,73	-2,38	-2,00	-1,82	-0,65
<b>4</b>	3,58	-2,52	-2,69	-2,19	-2,15	-1,37	-2,46
<b>5</b>	2,87	-2,13	-2,27	-2,68	-2,39	-2,07	-2,91
<b>6</b>	-1,56	-2,15	-1,27	-1,36	-1,98	-1,64	-2,68
<b>7</b>	-1,23	-0,92	-0,35	-0,03	-0,10	-0,25	-1,03
<b>8</b>	-1,69	-1,54	0,16	1,26	1,17	0,38	0,64
<b>9</b>	-0,68	-0,66	1,98	2,61	2,07	1,82	1,87
<b>10</b>	1,39	1,09	0,19	-0,81	-0,46	-0,91	-0,53
<b>12</b>	5,38	0,36	1,35	1,15	1,30	0,34	0,44
<b>13</b>	4,99	-1,27	-0,50	0,56	0,70	0,12	-0,90
<b>14</b>	7,34	1,92	1,83	2,14	1,04	0,89	1,07
<b>15</b>	-2,47	-1,50	-0,25	-0,61	-0,91	0,84	0,24
<b>16</b>	1,40	1,30	1,32	0,96	0,35	0,60	0,55
<b>17</b>	1,17	1,50	0,50	0,42	-0,18	-0,67	-1,24
<b>1_</b>	3,68	-0,69	-1,42	-1,16	-0,82	-0,33	-0,54
<b>19</b>	1,39	1,70	-0,22	-0,32	-0,73	-0,43	-0,97
<b>20</b>	-2,23	-2,29	-1,56	-1,04	-0,45	0,08	-0,18
<b>EMP (%)</b>	1,88	-0,61	-0,40	-0,31	-0,43	-0,38	-0,50
<b>ETP (%)</b>	2,83	1,43	1,33	1,45	1,25	1,05	1,22
	CFPT structurales						
<b>1</b>	-2,10	-1,16	-1,25	-0,50	-1,15	-1,59	-1,34
<b>2</b>	-0,91	-0,18	0,47	0,66	-0,40	-0,28	-0,21
<b>3</b>	-0,94	-0,56	-1,68	-1,50	0,89	1,03	0,20
<b>4</b>	-1,70	-0,21	0,02	0,05	0,29	-0,34	-0,03
<b>5</b>	-2,22	-1,76	-2,08	-0,61	0,13	-0,35	-1,08
<b>6</b>	1,14	-0,39	0,82	0,89	0,49	0,86	1,84
<b>7</b>	-0,51	-0,22	-0,60	0,03	-0,34	-0,76	0,59
<b>8</b>	0,21	1,00	0,67	-0,29	-0,37	-0,28	0,92
<b>9</b>	-0,03	-1,28	-1,41	-1,14	-1,41	-0,68	-1,53
<b>10</b>	-0,65	-0,95	-1,13	-1,88	-1,93	-1,65	-2,20
<b>11</b>	0,10	-1,25	-0,94	-1,04	-1,84	-1,81	-2,66
<b>12</b>	1,61	0,63	-0,13	0,51	-0,26	-0,38	0,53
<b>13</b>	-2,97	-2,36	-1,72	-0,99	-0,44	-0,27	-1,39
<b>14</b>	-2,46	-2,43	-0,85	-1,56	-2,25	-1,43	-1,39
<b>15</b>	1,89	1,60	1,12	0,59	0,63	0,59	0,39
<b>16</b>	-0,85	-0,96	-0,53	-0,07	-0,64	-1,26	-1,67
<b>17</b>	0,47	0,78	0,18	-0,29	-0,38	-0,29	-0,87
<b>18</b>	0,11	0,18	-0,48	0,00	-0,39	-0,01	-0,60
<b>19</b>	-1,45	-2,23	-1,34	-1,13	-0,93	-1,11	-0,95
<b>20</b>	1,51	1,04	1,05	0,48	0,65	0,26	0,39
<b>EMP (%)</b>	-0,49	-0,53	-0,49	-0,39	-0,48	-0,49	-0,55
<b>ETP (%)</b>	1,37	1,15	0,95	0,79	0,87	0,79	1,11

**Annexe IX. Validation des FPT de Rawls *et al.*(1982) et de Bastet (1999)**

Echantillons	FPT de Rawls <i>et al.</i> , 1982					
	Wp - Wm pF1,5	Wp - Wm pF2	Wp - Wm pF2,5	Wp - Wm pF3	Wp - Wm pF3,5	Wp - Wm pF4,2
1	-6,02	-1,97	4,42	-5,88	4,36	3,42
2	-5,03	-2,29	3,13	-3,89	1,92	1,26
3	-4,97	-2,05	3,36	-6,49	3,34	2,79
4	-6,58	-3,62	2,17	-5,24	2,75	0,14
5	-6,54	-3,50	1,08	-5,17	1,51	-0,67
6	-6,27	-2,57	2,35	-1,58	1,43	-1,51
7	-5,39	-2,87	0,51	1,42	1,05	-1,18
8	-6,30	-1,97	3,55	2,30	1,80	0,46
9	-5,33	-0,24	4,43	3,35	2,75	1,44
10	-3,70	-0,21	1,57	5,98	1,63	0,10
11	-4,86	-4,60	-3,70	5,03	-0,97	0,02
12	-4,60	0,32	5,20	0,58	3,90	2,92
13	-5,45	-0,79	5,47	-1,35	4,55	2,73
14	-1,80	-0,72	3,35	0,12	3,04	1,97
15	-6,27	-1,95	-1,07	4,28	-0,47	-1,23
16	-2,47	-0,34	2,18	2,93	2,46	0,61
17	-5,47	-2,14	-0,52	5,02	-1,51	-2,31
18	-2,68	-1,02	1,94	-0,11	2,65	0,40
19	-4,14	-0,93	0,41	11,68	-0,44	-2,35
20	-6,29	-1,96	-0,32	9,52	-0,60	-1,85
<b>EMP (%)</b>	<b>-5,01</b>	<b>-1,77</b>	<b>1,98</b>	<b>1,13</b>	<b>1,76</b>	<b>0,36</b>
<b>ETP (%)</b>	<b>1,38</b>	<b>1,25</b>	<b>2,25</b>	<b>4,92</b>	<b>1,74</b>	<b>1,75</b>
	FPT de Bastet, 1999					
1		13,10	9,75	7,45		6,70
2		12,20	8,84	6,64		4,53
3		11,64	7,83	6,29		5,64
4		10,97	8,09	5,95		3,19
5		9,03	5,34	3,91		1,47
6		10,55	6,76	4,25		0,64
7		9,84	6,62	5,30		1,48
8		11,81	8,45	6,32		2,63
9		13,16	9,15	6,58		3,35
10		11,19	6,49	4,45		2,37
11		5,13	1,26	2,90		-0,20
12		10,84	7,20	5,85		3,71
13		9,08	6,87	5,34		3,10
14		8,80	5,99	3,87		2,29
15		5,67	1,29	-0,96		-0,98
16		11,16	6,99	4,89		2,63
17		5,11	1,32	-0,70		-2,22
18		8,17	4,52	3,02		1,38
19		8,71	3,83	0,94		-1,41
20		10,73	6,55	4,18		1,01
<b>EMP (%)</b>		<b>9,85</b>	<b>6,16</b>	<b>4,32</b>		<b>2,07</b>
<b>ETP (%)</b>		<b>2,34</b>	<b>2,49</b>	<b>2,28</b>		<b>2,20</b>