

Ecole Nationale Supérieure Agronomique
En vue de l'obtention du Diplôme de Magistère en Sciences Agronomiques
Option : Pédosphère

***Estimation de la rétention en eau des
vertisols de la Mitidja au moyen de
fonctions de pédotransfert***

Présenté par: Mme ZEMOURI Samia
M.DRIDI B. Directeur de thèse Maître de conférence
Année Universitaire 2008-2009

Devant le jury : M.DAOUD Y. Président Professeur M.DJILI K . Examinateur Professeur **M^{me}**
KOURGHLI N. Examinatrice Chargée de cours

Table des matières

Dédicace . . .	6
Remerciements . . .	7
Résumé . . .	8
Abstract . . .	9
ص خ لم . . .	10
Abréviations . . .	11
Introduction générale . . .	12
Chapitre I: Synthèse bibliographique . . .	14
1. Prévion de la rétention de l'eau . . .	14
1.1 La matière organique . . .	14
1.2 Les argiles . . .	15
1.3 La capacité d'échange cationique . . .	15
1.4 La structure . . .	16
2. Le potentiel de l'eau dans le sol . . .	16
3. Outils de prédiction des propriétés de rétention en eau des sols . . .	18
4. Les fonctions de pédotransfert (FPT) . . .	18
4.1 Importances des fonctions de pédotransfert . . .	19
4.2 Méthode d'estimation de la rétention de l'eau . . .	19
4.3 Apport d'une stratification à l'établissement de FPT . . .	24
4.4 La Validation des fonctions de pédotransfert : . . .	25
5. Présentation du milieu naturel . . .	26
5.1 Situation géographique . . .	26
5.2 Formation de La Mitidja . . .	27
5.3 Géomorphologie . . .	27
5.4 Réseau hydrographique . . .	27
5.5 Pédogenèse . . .	27
5.6 Végétation. . .	27
5.7 Climat . . .	28
5.8 Les vertisols de la Mitidja . . .	29
Chapitre II. Matériel et méthode . . .	31
1. Matériel . . .	31
1.1. Les sols étudiés pour établir les fonctions de pédotransfert . . .	31
1.2. Les sols étudiés pour tester la validité des fonctions de pédotransfert (échantillons de validation). . .	31
2. Méthode . . .	32
2.1. Méthodes de caractérisation des échantillons du sol . . .	32
2.2. Les fonctions de pédotransfert . . .	32
2.3. Analyses statistiques des données . . .	34
Chapitre III .Résultats et discussion . . .	36
1. Principales caractéristiques analytiques des sols étudiés . . .	36
2. Analyse des données et établissements des fonctions de pédotransfert . . .	40

3. Fonctions de pédotransfert après stratification texturale . .	40
3.1. Variables indépendantes: argile et limon fin . .	41
3.2. Variables indépendantes : argile et matière organique . .	42
3.3. Variables indépendantes : argile, matière organique et limon fin . .	43
3.4. Variables indépendantes : argile, matière organique, limon fin et limon grossier. . .	44
3.5. Variables indépendantes : argile, matière organique, limon fin, limon grossier, sable fin . .	45
3.6. Variables indépendante: argile, matière organique, limon fin, limon grossier, sable fin, densité apparente . .	46
4. Fonctions de pédotransfert après stratification structurale . .	47
4.1. Variables indépendante : argile et limon fin . .	47
4.2. Variables indépendante : argile et matière organique . .	48
4.3. Variables indépendante : argile, matière organique et limon fin . .	49
4.4. Variables indépendante: argile, matière organique, limon fin et limon grossier . .	50
4.5. Variables indépendante: argile, matière organique, limon fin, limon grossier, sables fins . .	51
5. Fonctions de pédotransfert après stratification texturo –structurale . .	52
5.1. Variables indépendantes: argile et limon fin . .	52
5.2. Variables indépendantes : argile et matière organique . .	53
5.3. Variables indépendantes: argile, matière organique et limon fin. . .	54
5.4. Variables indépendantes : argile, matière organique, limon fin et limon grossier . .	55
5.5. Variables indépendantes : argile, matière organique, limon fin et limon grossier, sable fin . .	56
6. Relations entre la CEC et la rétention en eau du sol . .	57
6.1. Fonctions de pédotransfert après stratification texturale . .	57
7. Relations entre les caractéristiques du sol et la réserve utile . .	61
7.1. Fonctions de pédotransfert après stratification texturale . .	61
8. Discussion . .	64
8.1. Prédiction de la rétention de l'eau . .	64
8.2. Variation de la teneur en eau résultant de la stratification texturale . .	64
8.3. Variation de la teneur en eau résultant de la stratification structurale . .	65
8.4. Effet de la CEC sur la rétention en eau . .	65
8.5. Effet de la matière organique sur la rétention en eau . .	65
8.6. Prédiction de la réserve utile du sol . .	65
9. Validations des fonctions de pédotransfert . .	66
9.1. Validation des classes de pédotransfert . .	66
9.2. Biais des prédictions . .	66
Conclusion générale . .	69
Références Bibliographiques . .	71
Annexes . .	76
Annexe I. Résultats analytiques des horizons tests. . .	76

Annexe II. Densités apparentes et réelles des horizons tests. . .	76
Annexe III. Teneurs en eau pondérales aux différents pF. . .	77
Annexe IV. Calcul de l'erreur moyenne et l'erreur type de prédiction pour les horizons de texture argilo-limoneuse après stratification texturale à pF4, 2 . .	78
Annexe V. Calcul de l'erreur moyenne et l'erreur type de prédiction pour les horizons de densité apparente 1,4 après stratification structurale à pF4, 2 . .	79
Annexe VI. Calcul de l'erreur moyenne et l'erreur type de prédiction pour les horizons de densité apparente 1,5 après stratification structurale à pF4, 2 . .	80
Annexe VII. Calcul de l'erreur moyenne et l'erreur type de prédiction pour les horizons argilo-limoneux de densité apparente 1,4 à pF4, 2 . .	81
Annexe VIII. Calcul de l'erreur moyenne et l'erreur type de prédiction pour les horizons argileux à pF4, 2 . .	82
Annexe IX. Calcul de l'erreur moyenne et l'erreur type de prédiction pour les horizons de densité apparente 1,4 à pF4, 2 . .	83
Annexe X. Calcul de l'erreur moyenne et l'erreur type de prédiction pour les horizons argileux de densité apparente 1,4 à pF4, 2 . .	84

Dédicace

Bien que ce travail soit modeste, mais c'est de bon cœur que je le dédie: A ma très chère mère pour sa tendresse, son affection, aucune dédicace ne saurait exprimer la profondeur de ma reconnaissance. A la mémoire de mon très cher père, que je n'oublierai jamais et qui aurait été comblé de bonheur, s'il était encore de ce monde. Que dieu ait son âme et l'abrite dans son immense paradis. A la mémoire de mes chers grands-parents. A mon cher époux Khaled. A mon adorable fils Housseem. A mes frères et sœurs Lachemi, Abdelwahab, Samir, Karim, Naima et Chafika. A celle qui a tant attendu ce jour, ma chère tante Farida. A mon oncle Belil et Toufik. A la famille Khenniche. A tous mes collègues et amis du B.N.E.D.E.R. et L'I.N.S.I.D. A mes collègues de promotion et tous mes amis.

Remerciements

Au terme de ce travail, et avant tout je tiens à exprimer mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à **Mr.Dridi B.**, Maître de conférence à l'E.N.S.A., qui en tant que directeur de thèse m'a encadré d'une manière exemplaire, son accueil attentif et bien veillant, son aide, sa patience et son appui et ses conseils tout au long de cette tâche ont été pour moi un encouragement permanent à terminer ce travail, qu'il soit assuré de ma reconnaissance et mon respect indéfectibles.

Je suis sensible à l'honneur que me fait **Mr. Daoud Y.**, Professeur à l'E.N.S.A., d'avoir bien voulu accepter de présider ce jury.

Il m'est très agréable d'adresser mes remerciements les plus chaleureux à **Mr. Djili K.**, Professeur à l'E.N.S.A.,d'avoir accepté d'être examinateur dans ce jury. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

J'exprime ma gratitude à **Mme Kourghli N.**, Chargée de cours à l'E.N.S.A., d'avoir accepter d'examiner ce travail.

Mes vifs remerciements s'adressent également à :

L'ensemble du personnel du département de pédologie de l'A.N.R.H.

- L'ensemble du personnel du département de pédologie de l'E.N.S.A.,

-**Mr Habila Med**, "Directeur Général de l'institut national des sols, de l'irrigation et du drainage" ainsi que Mr **Kessal A**, pour les facilités accordées.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous ceux ou celles ayant participé de près ou de loin à la réalisation du présent mémoire.

Résumé

La présente recherche a pour objectif de prédire les propriétés de rétention en eau des vertisols de la Mitidja (Meftah). Les teneurs en eau à deux potentiels ont été mises en relation avec quelques caractéristiques du sol par l'emploi des fonctions de pédotransfert. Le poids de chaque variable a été estimé vis-à-vis de sa contribution à la rétention en eau des sols. Le niveau de fiabilité des fonctions de pédotransfert établies a été mesuré au moyen d'échantillons tests.

Les principaux résultats obtenus révèlent que l'argile et les limons fins contribuent pour une grande part dans la rétention en eau des sols notamment à pF4, 2, la matière organique participe de façon modérée. Les limons grossiers et les sables fins ont un effet négligeable sur les propriétés hydriques. Enfin, la CEC apparaît comme étant un mauvais estimateur des propriétés de rétention en eau lorsque qu'elle substitue l'argile et la matière organique.

L'effet de la densité apparente sur la rétention en eau des vertisols est masqué par les teneurs élevées de l'argile dans ce type de sol.

La validation des fonctions de pédotransfert a montré que les biais de prédictions sont faibles, traduisant alors une bonne qualité d'estimation des teneurs en eau.

Mots clé : Vertisols , Mitidja, Potentiel eau , Fonctions de pédotransfert, Texture.

Abstract

this research aims to predict the properties of the soil moisture retention from vertisols taking in Mitidja (Meftah), the water contents at different potentials had been put in relation with some characteristics of soil by use of pedotransfert functions.

the weight of each variable was estimated through its contribution to soil moisture retention, the level of reliability of pedotransfert functions was measured by tests samples.

the main results obtained reveal that the clay and fine silt contribute for a large part of soil moisture retention especially in pF 4.2, and organic matter play a moderate, but coarse silt and fine sand has a negligible effect on soil moisture properties and finally, the CEC appears to be a bad estimator of the properties of soil moisture retention when it replaces the clay and organic matter.

the effect of bulk density on moisture retention of vertisols is hidden by high levels of clay in this soil type.

the validation of pedotransfert function showed that the bias of predictions were low, thus reflecting a good quality of estimation of the levels of water contents.

Keywords : Vertisols, Mitidja, water potentials, pedotransfert functions, particle size distributions

ص خ لم

بحثنا الحالي إلي التنبؤ بخواص لارتباط المائي للترب المقلوبة لمنطقة المتيجة (مفتاح).
ثم وضع علاقات بين المحتوى المائي للترب لجهود مختلفة مع عدة خواص للترب، و ذلك باستعمال وظائف التحويل البيدولوجي و تأثير كل متغير قدرت من خلال دوره في الاحتفاظ التربة بالماء، مستوى صلاحية وظائف التحويل البيدولوجي المتحصل عليها قياس باستعمال عينات اختبار.

أهم النتائج المتحصل عليها بينت أن كل من الطين، السلت الناعم تلعب دورا هاما في احتفاظ التربة للماء و خاصة عند جهد (PF 4,2) أما المادة العضوية تؤثر بصفة ضعيفة، السلت الخشن و الرمل الناعم لهما تأثير مهم بالنسبة للخواص المائية للتربة.

وأخيرا السعة التبادلية الكاتيونية (CEC) تعتبر كعامل تقدير سيء و ذلك عند استعمالها كبديل عن الطين و المادة العضوية، إن تأثير الكثافة الظاهرية علي ارتباط الماء بالنسبة للترب المقلوبة مخفي و ذلك لوجود كميات كبيرة من الطين.

مدى صلاحية وظائف التحويل البيدولوجي تبين أن ارتباط التقدير ضعيف يعبر عن نوعية جيدة لتقدير محتوى الماء في التربة.

كلمات أساسية : تربة مقلوبة، متيجة، جهد الماء، وظائف التحويل البيدولوجي،

قوام.

Abréviations

- pF: Point de flétrissement permanent.
- RU: Réserve utile du sol (mm).
- r: Coefficient de corrélation.
- R2: Coefficient de détermination.
- FPT: Fonctions de pédotransfert.
- Sgn: Signification statistique
- ddl: Degré de liberté
- A: argile. Texture argileuse.
- LF: Limon fin (%).
- LG: Limon grossier (%).
- SF: Sable fin (%).
- AL: Texture argilo-limoneuse.
- LA: Texture limono-argileuse.
- MO: Matière organique (%).
- Da: Densité apparente.
- CEC: Capacité d'échange cationique (C moles/kg de terre).
- EMP: Erreur moyenne de prédiction.
- ETP: Erreur type de prédiction

Introduction générale

La compréhension de l'alimentation en eau des plantes est étroitement liée à la connaissance des réserves hydriques. En effet, les sols cultivés peuvent réunir tous les facteurs et propriétés favorisant l'obtention des meilleurs rendements mais leurs potentialités ne s'expriment réellement qu'avec des réserves hydriques suffisantes pouvant subvenir aux besoins en eau des cultures durant la totalité de leur cycle végétatif (Ben Hassine *et al.*, 2003).

L'accroissement et la régularité de la production agricole sont liés à l'amélioration des conditions d'utilisation de l'eau du sol par les cultures. Face aux exigences climatiques des régions semi-arides où les ressources en eau sont très limitées, leur utilisation agricole suppose donc une gestion parcimonieuse.

Si les caractéristiques physiques des sols sont en général bien décrites lors des prospections pédologiques, les caractéristiques hydriques le sont rarement en raison des difficultés que soulèvent leurs études (Cornet, 1980).

Les mesures des propriétés hydriques des sols sont difficiles, longues et coûteuses, c'est pourquoi leurs relations avec les caractéristiques du sol ont fait l'objet de nombreuses études dont le but est l'établissement de relations mathématiques. Ces équations visent à relier les paramètres du sol difficilement accessibles telles que les teneurs en eau à différents potentiels aux caractéristiques plus aisément accessibles notamment, les teneurs en argile, en carbone, ou encore la densité apparente (Al Majou *et al.*, 2005) il s'agit des fonctions de pédotransfert.

Bouma et Van Lanen (1987) ont introduit pour la première fois le terme de fonction de pédotransfert (FPT), puis il se généralise suite au colloque organisé en 1989 à Riverside (Bastet *et al.*, 1998).

Ces fonctions ont été utilisées afin d'estimer certains points caractéristiques de la courbe de rétention en eau (Bruand *et al.*, 1996).

Les fonctions de pédotransfert le plus souvent employées sont établies par régressions multiples, et correspondent alors à autant de modèles empiriques décrivant de façon continue la relation pouvant exister entre les caractéristiques du sol et ses propriétés de rétention en eau (Al Majou *et al.*, 2007).

Dans le but de simplifier les fonctions de pédotransfert et accroître leur résolution, de nombreux auteurs ont procédé à un découpage préalable de leur échantillonnage, par la texture, par la profondeur ou en fonction d'autres critères pédologiques (Bigorre, 2000), il s'agit des classes de fonctions de pédotransfert qui permettent d'estimer les propriétés hydriques après avoir regroupé et classé les sols selon leur composition (Bruand *et al.*, 2003).

De l'examen de la littérature, en Algérie il n'existe pas de travaux portant sur la détermination des propriétés hydriques des sols par les fonctions de pédotransfert. Pourtant, les plus grands espaces de notre pays, consacrés généralement à la céréaliculture se situent sous climat semi-aride, sont exploités de manière empiriques, de ce fait, les cultures sont souvent exposées aux stress hydriques. Par ailleurs, lorsque la ressource en eau

est disponible, son exploitation est pratiquée de façon irrationnelle engendrant alors un gaspillage de cette denrée rare.

L'objectif principal de ce travail est d'établir des fonctions de prédiction des propriétés de rétention en eau des sols de la région de Meftah par des fonctions de pédotransfert établies à partir d'une base de données composées d'horizons issus de sols de la même région.

Le présent travail est structuré en trois chapitres, le premier chapitre présente une synthèse bibliographique relative aux propriétés de rétention en eau des sols et aux fonctions de pédotransfert ainsi que la présentation de la région d'étude.

Le deuxième chapitre porte sur le matériel et la méthodologie adoptés pour la réalisation de ce travail , enfin les résultats obtenus sont présentés et discutés dans le troisième chapitre.

Chapitre I: Synthèse bibliographique

1. Prédiction de la rétention de l'eau

La rétention de l'eau dans le sol dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels, deux sont prépondérants, la porosité et la profondeur du sol (Tessier *et al.*, 1996), un sol épais aura une rétention en eau plus grande, cette dernière croît en fonction de la profondeur. Ce paramètre est essentiel pour le calcul de la rétention en eau.

L'eau retenue est fonction de la taille des pores ainsi que de l'énergie de rétention (Duchaufour, 1995). Cette porosité se décompose en une porosité grossière ou structurale (pores > 0,2 mm), elle est d'origine fissurale, inter et intra agrégats ou d'origine biologique. Elle est occupée par de l'eau ou par de l'air. L'autre forme de porosité est dite texturale ou microporosité (ou porosité d'assemblage élémentaire), dépendante de la taille et de l'arrangement des particules entre elles. La rétention de l'eau dans le sol dépend aussi de la proportion en éléments grossiers ainsi que des cailloux non poreux qui ne retiennent pas l'eau, ce qui permet donc de déduire la réserve en eau du sol (Gras, 1994).

La quantité d'eau retenue par le sol est fortement influencée par d'autres caractéristiques telles que la matière organique et la nature des minéraux argileux, ainsi que la structure et la capacité d'échange cationique.

1.1 La matière organique

Le rôle de la matière organique dans les sols est généralement abordé suivant deux approches. La première consiste à ajouter expérimentalement de la matière organique au sol et à étudier son effet.

La seconde consiste à évaluer l'effet des matières organiques des sols sur les propriétés à partir d'échantillons de teneurs en matières organiques variables.

De nombreux travaux basés sur ce type d'approche ont montré que la matière organique tend à augmenter la rétention d'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 (Bauer et Black, 1992).

Par contre, Hudson (1994) et Emerson (1995) ont pu montrer que la matière organique accroît nettement la rétention de l'eau aux hauts potentiels et ne joue quasiment aucun rôle sur la rétention de l'eau au point de flétrissement.

Les résultats de Emerson et de Hudson ont été confirmés par Kay (1997), il a montré l'effet de la matière organique sur la porosité en fonction de la teneur en argile, en utilisant conjointement les modèles de Vereecken (1989) et de Rawls (1983). Les résultats de cette modélisation montrent une augmentation de la macroporosité définie par les pores de diamètre supérieur à 30µm, ainsi qu'une augmentation de la mésoporosité.

Les mécanismes de la rétention d'eau par les matières organiques sont généralement peu

étudiés. Il a été constaté que la matière organique a un effet sur la structure du sol de façon qu'elle peut accroître la macro et la méso porosité du sol (Anderson *et al.*, 1990). Certaines fractions organiques comme les polysaccharides ont des propriétés d'hydratation importantes aux hauts potentiels (Chenu, 1993). Pour Emerson (1995) l'augmentation de l'eau utile observée dans des sols sous prairie serait entièrement due à des gels s'apparentant aux polysaccharides.

Aux bas potentiels, les mécanismes de rétention d'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 (Bigorre, 2000).

1.2 Les argiles

Selon Hillel (1984) et Safar *et al.* (1992), le rôle des particules d'argile est déterminant dans la rétention en eau du sol. Cette rétention est liée à la teneur et à la nature de la fraction argileuse. S'il est bien structuré, un sol argileux retient beaucoup plus d'eau qu'un sol sableux en raison d'un grand nombre de micropores dans le premier.

De plus, pour une même teneur en argile, un sol à prédominance de minéraux gonflants (ex : montmorillonite) retiendra plus d'eau qu'un sol à minéraux non gonflants (kaolinite). L'arrangement des particules argileuses apparaît important dans la rétention en eau des sols plus que la présence d'eau inter feuillet. Ainsi, Bruand et Tessier (2000) et Bruand (2003) ont montré l'importance de l'organisation des particules d'argile, celle-ci peut être prise en compte par la capacité d'échange cationique.

Attou (1996) a pu mettre en évidence sur des assemblages compacts argiles-limons, la création de ponts d'argile entre les grains de limons. Ainsi, même sur des matériaux fabriqués artificiellement,

à côté de l'assemblage textural, une organisation spécifique de l'argile explique une partie de leurs propriétés physiques (Bigorre, 2000).

1.3 La capacité d'échange cationique

La CEC est utilisée comme outil de prédiction des propriétés de rétention en eau, en effet sur une collection d'échantillons de sols de France, il a pu être montré que la rétention de l'eau au point de flétrissement permanent est fortement corrélée à la valeur de CEC et ce, indépendamment de la teneur en argiles, en matières organiques ou en oxydes (Bigorre *et al.*, 1999).

Quel que soient les constituants, la relation CEC-teneur en eau démontre la prééminence des charges électriques superficielles dans la rétention de l'eau à pF 4.2, lorsque l'eau est retenue dans de très petits pores (< 0,1micron).

Il en est autrement au voisinage de la capacité au champ, car les coefficients de corrélation entre CEC et la teneur en eau sont toujours médiocres (Bigorre, 2000).

De ce fait, la rétention d'eau des sols au point de flétrissement permanent ainsi que les propriétés d'hydratation des matières organiques peuvent être prises en compte par la

CEC , il en est de même pour les argiles, c'est ainsi que la CEC du sol permet d'estimer très correctement la rétention de l'eau des lors que cette dernière est réalisée à pH 7, ce qui correspond aux conditions où les charges des constituants s'expriment pleinement, la valeur de la charge électrique de surface reste constante. Pour de nombreux chercheurs, la CEC demeure certainement l'indicateur le plus pertinent des propriétés d'hydratations des sols (Bigorre et al. ,1999).

1.4 La structure

La porosité texturale du sol peut être définie comme étant le résultat de l'assemblage des particules en fonction de leur encombrement stérique. L'importance de la porosité se situe au niveau de la rétention en eau et sa circulation à travers le sol. Ces deux propriétés sont déterminées par la dimension, la forme, la distribution et la communication des pores entre eux (Hillel, 1984). L'énergie de rétention de l'eau est d'autant plus grande que les pores sont de petite taille (Faure, 1978).

Si la texture du sol joue un rôle important dans ses propriétés, ce sont cependant les niveaux d'organisation plus macroscopiques qui déterminent le comportement des sols. La structure des

sols, c'est à dire l'arrangement des particules à différentes échelles 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 aux hauts potentiels (Al Majou *et al.* ,2005).

Il n'existe pas une mesure directe de la structure du sol ni sur son effet sur la rétention en eau des sols, mais la densité apparente est un paramètre mesurable qui reflète l'état structural du sol (Lipsius, 2002).

La densité apparente renseigne sur le mode d'organisation des constituants élémentaires. Pour une même classe granulométrique, le mode d'assemblage des constituants élémentaires varie de façon importante en fonction du matériau parental et de la pédogenèse. Lorsque les déterminations s'effectuent sur des échantillons séchés et tamisés, le mode d'assemblage serait en quelque sorte standardisé, ce qui entraîne une modification de l'organisation élémentaire et par conséquent la modification des propriétés de rétention en eau (Bruand *et al.* , 1994).

2. Le potentiel de l'eau dans le sol

Dans les sols, une même teneur en eau peut se traduire par des disponibilités différentes vis à vis de la plante selon l'énergie avec laquelle cette eau est retenue par le sol et plus précisément selon la taille des pores ou cette eau est localisée, cet état énergétique est exprimée par le potentiel de l'eau ou pF.

Le potentiel de l'eau est défini comme le travail nécessaire à transférer une unité de masse d'eau pure, de manière réversible et isotherme, d'un état standard, qui est l'eau libre sous pression atmosphérique normale, à la phase liquide au point considéré.

Il est contrôlé par différents types de potentiels sous la dépendance de la pesanteur, des sels dissous, de la porosité et de la pression de la phase gazeuse et dont la somme régit l'énergie de liaison de l'eau du sol (Bourrie et Pedro, 1979).

Le potentiel total peut s'écrire comme suit :

$$\Phi_t = \varphi_g + \varphi_m + \varphi_o + \varphi_a + \varphi_e$$

où:

Φ_t : Potentiel total.

φ_g : Potentiel gravitaire.

φ_m : Potentiel matriciel.

φ_o : Potentiel osmotique (nature et composition chimique de la solution du sol.)

φ_a : Potentiel pneumatique (relatif à la différence de pression de l'air dans le sol et la pression atmosphérique).

φ_e : Potentiel enveloppe (over-burden potential, relatif à la pression mécanique exercée par les couches supérieures du sol sur les couches inférieures).

In situ, le suivi de la rétention de l'eau peut être effectué par l'utilisation conjuguée de tensiomètres et par des mesures en continu de la teneur en eau. Quelle que soit la méthode utilisée, la courbe de teneur en eau en fonction du potentiel de l'eau résulte de l'importance respective des différentes composantes du potentiel de l'eau.

Dans les sols argileux, on ne peut pas négliger le potentiel enveloppe (φ_e), car les matériaux sont déformables. De même, quand les sols sont riches en sels ou tendent à devenir dessaturés en calcium, la composante osmotique (φ_o), en particulier les forces de dispersion entre les constituants peuvent devenir non négligeables (Tessier *et al.*, 1999).

Pour obtenir la courbe de rétention d'eau au laboratoire, l'échantillon analysé est amenée à un potentiel de l'eau fixé à l'avance et sa teneur en eau est mesurée.

Pour des potentiels de 0 à -1600 kPa, les dispositifs utilisés pour appliquer la contrainte hydrique au sol sont dérivés de la presse à membrane de Richards (1954).

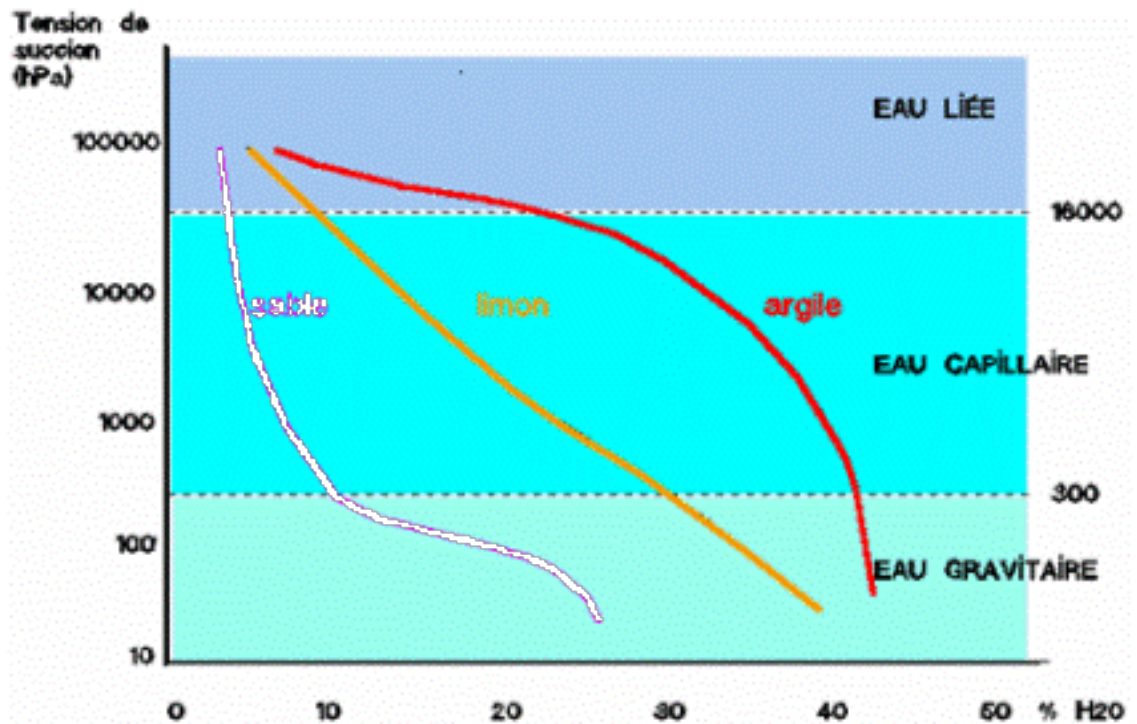


Figure 1. Tension de succion selon la texture du sol, d'après Duchaufour.

3. Outils de prédiction des propriétés de rétention en eau des sols

Les propriétés de rétention en eau des sols représentent un maillon essentiel pour la compréhension et la modélisation du comportement hydrique des sols. Par ailleurs, la lourdeur et le coût des mesures des propriétés de rétention en eau des sols ont rendu indispensable le développement d'outils d'estimation de ces propriétés.

Ces outils d'estimation doivent permettre de décrire la relation statistique qui lie des caractéristiques du sol aisément accessibles à des propriétés du sol difficilement accessibles. De tels outils d'estimation sont dénommés fonctions de pédotransfert (Bastet *et al.*, 1998).

4. Les fonctions de pédotransfert (FPT)

L'étude du fonctionnement hydrique des sols nécessite une connaissance suffisante des propriétés hydriques tel que la rétention en eau, la conductivité hydraulique, ces déterminations étant généralement difficiles, longues et coûteuses par conséquent des outils de prédiction ont été développés pour estimer de telles propriétés (Bouma et Van Lanen, 1987). Ces outils, nommés fonctions de pédotransfert, constituent un ensemble de relations statistiques qui lient des propriétés du sol difficilement mesurables à des

caractéristiques du sol aisément accessibles tel que la composition granulométrique, la densité apparente, la teneur en carbone organique (Bastet *et al.*, 1998; Wösten *et al.*, 2001; Wösten et Nemes, 2004).

Les premières applications agronomiques des fonctions de pédotransfert visaient surtout la

connaissance des humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement afin de déduire par différence, la réserve en eau utile du sol.

Depuis le début des années 90, la généralisation de l'emploi des systèmes d'information géographique (SIG) a permis d'employer des modèles complexes sur de grandes étendues géographiques (Bigorre, 2000).

4.1 Importances des fonctions de pédotransfert

Pour Bouma (1989), les fonctions de pédotransfert sont des fonctions mathématiques, qui à partir de propriétés du sol faciles d'accès (texture, densité, ...) permettent de déduire des propriétés complexes du sol (capacité de rétention). Ainsi, pour Bastet (1999), elles permettent d'estimer les propriétés de rétention en eau du sol en fonction de la texture.

En revanche, pour Gaddas (2001), elles permettent d'établir le lien entre propriétés intrinsèques du sol et les facteurs paysagiques.

Il existe deux types d'approches pour les fonctions de pédotransfert :

- l'approche empirique qui est la plus souvent utilisée, permet de corrélérer des propriétés du sol classiques avec des propriétés plus difficiles à mesurer en utilisant des méthodes numériques d'ajustement. La plus fréquente est la régression linéaire multiple (Wösten *et al.*, 1999) ou encore des réseaux de neurones artificiels, ou des modèles faisant intervenir les régressions non linéaires tels que les modèles additifs.

- l'approche mécanique a pour objectif de décrire des modèles physico-chimiques en les reliant à des données de sol classiques. Il peut s'agir, par exemple, de corrélérer la distribution de la taille des particules granulométriques à la courbe de rétention en eau à partir de l'équation de capillarité (Arya et Paris, 1981).

4.2 Méthode d'estimation de la rétention de l'eau

Afin d'aboutir aux meilleures estimations des propriétés de rétention en eau, de nombreux travaux sur les fonctions de pédotransfert ont été mis au point. Ces dernières peuvent être regroupées en deux ensembles selon que les propriétés de rétention en eau des sols sont estimées soit de manière ponctuelle ou continue (Bastet *et al.*, 1998)

4.2.1 Estimation à des valeurs ponctuelles du potentiel de l'eau

Les FPT appartenant à cet ensemble estiment la teneur en eau des sols (θ) pour des valeurs ponctuelles du potentiel (h) qui varient entre -10 hPa ($pF_{1,0}$) et -15000 hPa ($pF_{4,2}$). Le nombre de valeurs de potentiel pour lesquelles on peut calculer la teneur en eau varie selon les FPT de 2 à 12.

Les FPT peuvent avoir la forme d'une relation mathématique reliant θ à des caractéristiques comme les pourcentages d'argile, de sable et de limon, la densité

apparente et la teneur en carbone organique c'est le cas des FPT proposées par plusieurs auteurs parmi lesquels on peut citer:

Les FPT de Hall *et al.* (1977)

Hall *et al.* (1977) distinguent les horizons de surface (topsoil) et ceux de sub-surface (subsoil) en raison des différences de structures entre ces deux types d'horizons ; ils ont en conséquence développé des FPT sur ces 2 groupes d'horizons. Les teneurs en eau volumique (θ) peuvent être estimées pour 5 valeurs de potentiel (-50, -100, -400, -2000 et -15000 hPa). Les caractéristiques du sol prises en compte sont les teneurs en argile (Ar), en limon (Li), et en carbone organique (CO) ainsi que la valeur de la densité apparente de l'horizon (D_a, h).

La teneur en carbone organique n'est prise en compte que pour les horizons de surface. Les FPT ont par conséquent de la forme:

$$\theta = a (Ar) + b (Li) + c (CO) + d (D_{a,h})$$

Les valeurs des paramètres a , b, c et d varient selon le type d'horizon (horizon de surface ou de sub-surface) et le potentiel appliqué. Bien qu'ayant été établies à partir de 825 sols du

centre de la Grande Bretagne dont une proportion élevée correspond à des sols hydromorphes, ces FPT ont donné des résultats satisfaisants sur des sols du bassin Parisien non hydromorphes (Bastet, 1999).

Les FPT de Jamagne *et al.* (1977)

Jamagne *et al.* (1977) ont associé à chaque classe de texture une valeur d'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent ainsi qu'une densité apparente et une réserve utile. Les valeurs de θ proposées pour le point de flétrissement permanent et la capacité au champ des sols en fonction de leur texture constituent en fait des classes de pédotransfert, concept apparu plus tard dans la littérature. Seule l'appartenance à une classe de texture est nécessaire ; une valeur de D_a, h unique est ensuite proposée par classe de texture pour transformer les valeurs de Wen θ . Des relations de type

$$W = a * \text{Argiles} + b * \text{Limons} + c * \text{Sables} + d * \text{Corg.} + e * D_a$$

ont été utilisées.

Les FPT de Rawls *et al.* (1982)

Les caractéristiques du sol utilisées par Rawls *et al.* (1982) sont la granulométrie, la teneur en matière organique et la densité apparente. Les horizons de sol pris en compte étant issus de nombreuses études, les différentes méthodes avec lesquelles les valeurs de densité

apparente ont été mesurées ne sont pas précisées. Pour chaque valeur de potentiel matriciel étudié, Rawls *et al.* (1982) propose en fait trois modèles de FPT :

- des FPT établies par régressions multiples à partir de la composition granulométrique, la teneur en matière organique et la densité apparente (modèle I) :

$$\theta = a + b (Sa) + c (Li) + d (Ar) + e (MO) + f (Da)$$

- des FPT prenant en compte la composition granulométrique, la teneur en matière organique, Da, et θ 330 (modèle II):

$$\theta = a + b (Sa) + c (Li) + d (Ar) + e (MO) + f (Da) + g (\theta 330)$$

Enfin, des FPT prenant en compte la composition granulométrique, la teneur en matière organique, Da, et la teneur en eau à θ 330 et à θ 15000 (modèle III):

$$\theta = a + b (Sa) + c (Li) + d (Ar) + e (MO) + f (Da) + g (\theta 330) + h (\theta 15000)$$

La prise en compte de θ 330 et θ 15000 améliore la qualité des estimations (Rawls, 1982).

Les FPT de Vereecken *et al.* (1989)

Contrairement aux FPT précédentes, celles proposées par Vereecken *et al.* (1989) permettent de calculer les paramètres d'un modèle de courbe décrivant de façon continue les variations de θ en fonction du potentiel. Vereecken *et al.* (1989) ont ainsi établi des FPT pour les 4 paramètres du modèle de Van Genuchten (1980). Ces FPT ont été établies par régressions multiples avec les teneurs en argile (Ar), sable (Sa) et carbone organique (CO) ainsi qu'avec la densité apparente (Da, h).

Les FPT proposées par Hall *et al.* (1977) et Vereecken *et al.* (1989), établies avec respectivement des sols de Grande Bretagne et des sols de Belgique, donnent des estimations qui peuvent être considérées comme globalement meilleures que celles obtenues avec les FPT de Rawls *et*

al. (1982), même si l'on enregistre toujours des variations dans la qualité de l'estimation en fonction des valeurs de potentiel considérées. Avec les FPT de Jamagne *et al.* (1977), l'estimation effectuée à $-15\ 000$ hPa est la plus biaisée mais la précision est voisine de celle obtenue avec les FPT de Bruand *et al.* (2002). Enfin, c'est avec les FPT établies à partir de sol de caractéristiques proches de celles des sols du bassin versant étudié que les estimations sont les moins biaisées et les plus précises (Bastet, 1999 et Bruand *et al.*, 2002). Comme cela a été montré dans d'autres études (Bastet, 1999, Tietje et Tapkenhinrichs, 1993, Wösten *et al.*, 2001), la proximité géographique, les conditions de pédogenèse et le matériau parental sont des éléments importants à prendre en compte pour apprécier l'aptitude potentielle de fonctions de

pédotransfert à estimer les propriétés de rétention en eau des sols. Aussi, préalablement à l'établissement de fonctions de pédotransfert, une classification par texture, ou par texture et densité apparente, permet d'améliorer la qualité des estimations. C'est le cas des FPT de Bastet (1999) lorsque l'on passe du modèle I (sans classification) au modèle II (classification par

texture) et des FPT proposées par Bruand *et al.* (2002) lorsque l'on passe de celles établies par classe de texture (modèle I) à celles établies par classe combinant texture et densité apparente (modèle II).

Les FPT de Bastet (1999)

Bastet (1999) a établi des équations de régressions multiples pour 6 valeurs de potentiel : -10 , -33 , -100 , -330 , -1000 , -3300 et -15000 hPa. Il a utilisé comme caractéristiques du sol, les

teneurs en argile (Ar), limon (Li) et carbone organique (CO) ainsi que la densité apparente (Da). Suivant les échantillons, les Da ont été mesurées sur des cylindres d'environ 1000 cm³ ou sur des mottes de dimension centimétrique. Bastet (1999) a assimilé les densités apparentes mesurées sur mottes à celles de l'horizon mesurées à l'aide de cylindres.

En effet, dans son étude portant surtout sur des horizons profonds, il a trouvé que la différence entre les valeurs obtenues par les 2 approches était faible (Bruand *et al.*, 2002).

Les FPT établies permettent d'estimer la teneur en eau massique (W), elles sont de la forme :

$$W = a + b (Ar) + c (Li) + d (CO) + e (Da).$$

Bastet (1999) a établi dans un premier temps, des FPT sur l'ensemble des données dont il disposait (modèle I). Dans un second temps, il a effectué une classification des sols par classe de texture (modèle II) préalablement à l'établissement des FPT, classification qui apporte une amélioration sensible à la qualité des estimations. Le nombre d'horizons ayant servi à

l'établissement de ces FPT varie selon le potentiel matriciel : il est compris entre 394 (pF4,2) et 762 (pF2,5).

Les FPT de Bruand *et al.* (2002).

Les FPT proposées par Bruand *et al.* (2002) permettent d'estimer θ pour 7 valeurs de potentiel en fonction de la seule appartenance des sols à des classes de texture (modèle I) ou de l'appartenance des sols à des classes combinant texture et densité apparente à l'échelle de mottes de dimensions centimétriques (modèle II). En faisant apparaître 2 à 5 valeurs de densité apparente sur mottes (Da,m) pour chaque classe de texture, Bruand *et al.* (2002) généralisent la prise en compte de la composition du sol (composition granulométrique) et de sa structure (densité apparente).

Réserve en eau (mm)						
		Estimée à l'aide de FPT				
UCS	Mesurées	Hall	Rawls (Modèle I)	Bastet (Modèle I)	Bruand (Modèle I)	Vereecken
UCS1	143	167	307	138	154	199
UCS2	121	145	263	111	123	173
UCS3	169	155	276	125	161	211
UCS4	155	139	227	91	158	219
UCS5	72	77	106	42	58	102
UCS6	40	70	99	36	29	80
UCS7	57	64	82	36	28	61
UCS8	35	44	54	23	18	39
UCS9	105	145	218	85	83	175
UCS10	184	162	291	136	161	198
UCS11	151	183	333	142	161	218

Tableau I. Exemples des valeurs mesurées et estimées par quelques FPT (Bruand et al., 2002).

UCS: unités cartographiques de sols

4.2.2 Estimation de l'ensemble de la courbe de rétention.

Le calcul de la conductivité hydraulique en milieu insaturé nécessite l'étude de la courbe de rétention d'eau dans son intégralité (Bigorre, 2000). En conséquence deux sous-ensembles peuvent exister dans ce groupe de FPT.

4.2.2.1 Modèles mathématiques de représentation de la courbe de rétention d'eau

Plusieurs modèles existent et associent la courbe de rétention en eau à une courbe mathématique par ajustement de 3 ou 4 paramètres, la courbe de rétention prend généralement la forme d'une sigmoïde, dont les paramètres de forme évoluent en fonction de la texture et de la structure (De Jong (1983), Brooks et Corey (1964), Saxton *et al.* (1986), Campbell (1974), Sala et Tessier

1994). Cependant, le modèle de Van Genuchten (1980) reste le plus utilisé en raison de la simplicité de son expression analytique et sa capacité à donner les expressions analytiques dérivées utilisées dans le cas de l'estimation de la conductivité hydraulique.

Brooks et Corey (1964) ont proposé de scinder la courbe en deux parties. De la saturation jusqu'au point d'entrée d'air, la teneur en eau est supposée constante. Au-delà du point d'entrée d'air, la teneur en eau est donnée par une fonction puissance (Bigorre, 2000).

Campbell (1974) a proposé une équation du même type à partir de fonctions de pédotransfert établies sur 1400 échantillons provenant des Etats-Unis.

4.2.2.2 Modèles mathématiques conceptuels

Dans ce type de modèle, les paramètres de calage sont directement issus des propriétés du sol. La courbe de rétention d'eau représente en fait la courbe cumulée de la porosité (quand on la lit de droite à gauche en partant des petits pores vers les grands pores).

Les modèles physiques cherchent à simuler la distribution des pores dans le sol. Une première façon de procéder consiste à assimiler la distribution des particules comme le corollaire à la distribution des pores (Arya et Paris, 1981 ; Haverkamp et Parlange, 1986). Nimmo (1997) ajoute au modèle d'Arya et Paris (1981), une composante intéressante représentant l'assemblage structural qui est obtenu à partir de la distribution des agrégats du sol (Bigorre, 2000).

4.3 Apport d'une stratification à l'établissement de FPT

Préalablement à l'établissement de FPT, de nombreux auteurs ont constitué des sous-ensembles d'horizons et procédé de la sorte à une stratification au sens statistique du terme.

4.3.1 Stratification en fonction de la texture.

Dès les premières études, des auteurs procèdent à une stratification par texture. Ainsi, Petersen *et al.* (1968) établissent des FPT pour chaque classe de texture du triangle utilisé par l'USDA aux Etats-Unis. Ils montrent par ailleurs que la densité apparente explique la plus grande part de variabilité pour θ_{330} à l'exception de la classe sablo-limoneuse pour laquelle c'est le sable qui est en cause. Cependant pour θ_{15000} , c'est l'argile qui explique le maximum de variabilité, excepté pour la classe limono-argileuse pour laquelle c'est la densité apparente. Le sable et le limon ont davantage de poids dans l'estimation de la réserve utile pour les sols de texture grossière (sablo-limoneuse, limono-sableuse et limoneux) que pour ceux de texture plus fine (limono-argileuse,

argilo-limoneuse) dans lesquels la densité apparente est la variable explicative qui domine (Bastet *et al.* ,1998) .

4.3.2 Stratification en fonction de la compacité

Renger (1971) établit des FPT après stratification en fonction de la compacité calculée à partir de la densité apparente à l'aide de la relation:

$$\text{Compacité} = D_a + 0,009 A_r$$

Les FPT obtenues n'utilisent que les seules caractéristiques argile et limon et permettent d'estimer θ pour $h = 0, -65, -300$ et 15000 hPa. En stratifiant en fonction de la compacité, Renger (1971) tient en fait compte de la nature des particules élémentaires (composition granulométrique) et de leur mode d'assemblage (structure).

4.3.3 Stratification en fonction de la profondeur

Après avoir établi des FPT pour chaque classe de texture, Petersen *et al.* (1968) analysent les propriétés de rétention en eau des horizons limoneux à limono-argileux. Ils subdivisent cet ensemble d'horizons en distinguant les horizons A, B et C. Puis au sein des horizons A, ils distinguent ceux qui sont cultivés de ceux qui ne le sont pas et au sein des horizons B, ils distinguent différents horizons selon le degré de développement de la structure (Bastet *et al.*, 1998). Petersen *et al.*, (1968) montrent que l'étroitesse des relations établissant θ_{330} ou θ_{15000} est d'autant plus grande que l'horizon est profond. De Jong *et al.* (1983), ont proposé un modèle composé de deux segments de droite pour représenter des horizons dont les paramètres ont donné lieu à l'établissement de FPT, ont aussi classé leurs échantillons suivant des critères de profondeur (horizons de surface et de sub-surface) et de mode d'occupation (sols cultivés ou pas). Bien que ces auteurs calculent les paramètres d'ajustement de leur modèle pour chacun de ces cas, ils n'en tiennent plus compte lors de l'établissement des FPT (Bastet *et al.*, 1998).

4.3.4 Stratification en fonction de critères pédologiques

Sur la base de la distinction introduite par Jamagne *et al.* (1977) en fonction de l'origine de l'argile (héritage de la roche mère ou illuviation), Bruand (1990) compare les résultats obtenus avec ou sans stratification pour des horizons B argileux, le critère de stratification repose alors

sur l'origine pédologique (matériau parental et pédogenèse) des horizons étudiés. Les résultats

obtenus montrent très clairement que non seulement une telle stratification accroît l'étroitesse des relations établies pour W_{330} (r^2 , lorsque argile est utilisé comme variable explicative, passe

de 0,57 sans tenir compte d'une stratification à 0,79 en moyenne avec stratification) et W_{15000} (r^2 , lorsque argile est utilisé comme variable explicative, passe de 0,82 sans tenir compte d'une stratification à 0,86 en moyenne avec stratification) mais aussi que des FPT peuvent être établies avec des caractéristiques plus faciles d'accès après stratification pédologique (Bastet *et al.*, 1998)

4.4 La Validation des fonctions de pédotransfert :

Plusieurs auteurs (Williams *et al.*, 1992 ; Tietje et Tapkenhinrichs, 1993 ; Kem, 1995) ont cherché récemment à évaluer l'efficacité d'un certain nombre de FPT. Cette évaluation des FPT a essentiellement porté sur leur capacité à estimer avec plus moins de justesse les teneurs en eau mesurées pour un échantillon d'horizons de sols (Bastet *et al.*, 1998).

4.4.1 Validation effectuée par Williams

Selon Bastet *et al.* (1998), Williams *et al.* (1992) ont d'abord comparé l'efficacité de FPT faisant appel aux seules caractéristiques de constitution des sols (Gupta et Larson, 1979 ; Rawls *et al.*, 1982 et Rawls, 1983) à d'autres qui tiennent compte de valeurs de teneur en eau à des valeurs de potentiels matriciels particulières (Rawls *et al.*, 1982 ; Ahuja *et al.*, 1985 ; Gregson *et al.*, 1987). L'étude a porté sur les teneurs en eau des sols pour $h = -100, -330, -600, -1000$ et -15000 hPa, le critère utilisé pour comparer les FPT étant l'erreur moyenne de prédiction (EMP) et l'écart-type (ETP) associé à EMP.

A partir d'un échantillon composé de 366 horizons de sols provenant de l'Oklahoma (Etat Unis), Williams *et al.* (1992) montrent que les méthodes d'estimation rendent mieux compte des valeurs mesurées lorsqu'elles utilisent une ou deux valeurs connues de teneur en eau.

En effet, les valeurs de EMP associées aux trois niveaux de régression (modèles I, II et III) proposés par Rawls *et al.* (1982) diminuent lorsque l'on passe du modèle I qui n'utilise pas θ_{330} et θ_{15000} au modèle III qui utilise θ_{330} et θ_{15000} . Ainsi pour θ_{100} , EMP varie de $-0,029 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ avec le modèle I à $-0,013 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ avec le modèle III.

De même, pour la dispersion des points : l'écart-type (ETP) associé à EMP varie pour θ_{100} de $0,058 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ avec le modèle I à $0,028 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ avec le modèle III.

4.4.2 Validation effectuée par Tietje et Tapkenhinrichs

Bastet *et al.* (1998) montrent que Tietje et Tapkenhinrichs (1993) comparent un nombre élevé de FPT. L'étude porte sur les FPT permettant d'estimer ponctuellement θ à différentes valeurs de h (Husz, 1967 ; Gupta et Larson, 1979 ; Rawls *et al.*, 1982 ; Puckett *et al.*, 1985) et sur les FPT correspondant aux paramètres de fonctions mathématiques (Pachepsky *et al.*, 1982 ; De Jong *et al.*, 1983 ; Cosby *et al.*, 1984 ; Rawls et Brakensiek, 1985 ; Nicolaeva *et al.*, 1986 ; Saxton *et al.*, 1986 ; Vereecken *et al.*, 1989).

Tietje et Tapkenhinrichs (1993) intègrent aussi à leur évaluation, les FPT, des méthodes d'estimation de rétention en eau des sols basées sur la distribution de taille de particules et de porosités (Arya et Paris, 1981 ; Tyler et Wheatcraft, 1989).

L'échantillon test de validation provient de sols d'Allemagne (Basse – Saxe). Il comporte d'une part, 1079 horizons de sols renseignés pour quatre valeurs de potentiel matriciel (-10, -60, -300 et -15000 hPa) d'autre part, 37 horizons de sols renseignés pour neuf valeurs de potentiel matriciel (-2, -10, -20, -50, -100, -330, -1000, -3000, -15000 hPa). Dans un premier temps, Tietje et Tapkenhinrichs (1993) testent l'applicabilité des FPT vis-à-vis de l'échantillon test, sans que soit explicité de critère d'évaluation.

5. Présentation du milieu naturel

La Mitidja est une vaste plaine d'environ 130.000ha Elle correspond à une dépression allongée d'ouest en est. Elle est Limitée à l'ouest par l'oued Nador, et à l'est par l'oued Boudouaou, par ailleurs, elle est bordée par deux zones élevées, le Sahel au nord et l'Atlas au sud.

5.1 Situation géographique

La plaine de la Mitidja est bordée par l'Atlas Blideen, formé d'une série de massifs, Djebel Laghouat, Mouzaia , Djamaa-Draa , Guerroumene et Ferroukha dont le point le plus culminant est le pic de Mouzaia (1600m) situé à 10 km au sud de Mouzaia ville.

L'altitude de la plaine se situe en moyenne autour de 50 m.

5.2 Formation de La Mitidja

A la fin du pliocène, la Mitidja était une plaine alluviale qui s'étendait du pied de l'Atlas jusqu'au delà de la côte actuelle ; pendant le quaternaire, les cours d'eau qui parcouraient la plaine alluviale l'ont déblayé par l'abaissement du niveau de la mer de plus de 100 m au dessous du niveau actuel.

Les apports venant de l'Atlas par les torrents et les cours d'eau remplissent de cailloutis le synclinal Mitidjien. La vitesse de l'alluvionnement étant sensiblement plus élevée que la vitesse de descente de fond. Les produits détritiques pouvant en certain points, recouvrir le sahel, ainsi se sont formés dans le sahel des méplats couverts d'alluvions (Raissi, 1988).

5.3 Géomorphologie

La plaine de la Mitidja offre sur le plan géomorphologique une assez grande homogénéité. Ce phénomène est lié à la nature subsidente de cette unité. Le paysage apparaît ainsi sous différents aspects.

Nous distinguons successivement les cônes de déjection, les glacis d'accumulation, les zones d'épandage, les étendues marécageuses et hydromorphes de la basse plaine et la région côtière à l'est d'Alger.

5.4 Réseau hydrographique

Les nappes artésiennes de la Mitidja se constituent au pied de l'Atlas et sont alimentées par les eaux, celles collectées par l'impluvium qui constitue la plaine et le tribut souterrain des nappes artésienne.

Tous les oueds qui traversent la plaine de la Mitidja sont caractérisés par un écoulement temporaire. Leur régime d'écoulement présente des analogies avec celui des précipitations. Le maximum d'écoulement est observé en hiver et en début du printemps et le minimum en été.

5.5 Pédogenèse

La cartographie des sols de la Mitidja a permis de recenser cinq types de sols (Ecrément, 1971):

Sols minéraux bruts, sols peu évolués, sols à sesquioxydes de fer, sols calcimagnésiques et sols hydromorphes.

Parmi les processus pédogénétiques les plus importants sont, la rubéfaction, la brunification, le lessivage et l'hydromorphie, cette dernière est très marquée dans la plaine de la Mitidja. Elle a affecté la majorité des sols de la plaine reposant sur différents types de matériau marqué par des processus d'oxydo- réduction qui apparaissent à différents niveaux du sol.

5.6 Végétation.

La région de la Mitidja est à vocation agricole, à coté des agrumes, on trouve les cultures annuelles (céréales), les cultures saisonnières (maraîchages), la vigne, les plantes à parfum

et les bois, toute cette agriculture est répartie sur l'ensemble de la plaine, excepté le long des cours d'eau où les rives sont jalonnées par les buissons et certaines plantes sauvages.

5.7 Climat

Pour caractériser le climat de la plaine de la Mitidja, nous avons rassemblé les données climatologiques de la station la plus proche (Dar El Beida).

5.7.1 Les vents

Ils sont d'habitude faibles à modérés, la direction prédominante est de nord-ouest, le sirocco souffle en moyenne 5 jours par an. Les orages sont fréquents, surtout en hiver et en automne avec en moyenne 23,3 jours/an.

5.7.2 L'humidité relative

L'humidité relative ou état hygrométrique exprimé en % est le rapport de la tension de la vapeur à la tension maximale correspondant à la température.

Du fait de la proximité de la mer, le taux d'hygrométrie annuel moyennement est élevé.

Cependant, une variation journalière est marquée, la plus forte est relevée à 7 heures, la plus faible à 13 heures.

5.7.3 La pluviométrie

La Mitidja présente deux saisons contrastées, l'une pluvieuse en hiver, l'autre sèche en été, caractéristique du climat méditerranéen. Cependant, les données climatiques de ces dernières années indiquent une aridification du milieu.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	O	Total annuel
P (mm)	88.4	67.7	49.9	57.1	40.7	6.3	3.1	10.7	24.3	51.3	94.1	85.8	579.4

Tableau II. Précipitations moyennes mensuelles enregistrées par la station de Dar- -El- Beida (1990 – 2007).

Les données climatiques de la période comprise entre 1990 et 2007 indiquent que la moyenne pluviométrique annuelle est de 578.4 mm à la station de Dar- El -Beida.

5.7.4 Les températures

La plaine de la Mitidja est une région à hiver doux et à été chaud durant la saison estivale (juin - septembre); en revanche l'hiver compte des moyennes voisines de 12 C°. La période de

décembre à mars constitue les mois les plus froids de l'année, contrairement à la période de juin à septembre qui constitue les mois les plus chauds La proximité de la mer adoucit les amplitudes thermiques.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T° moyen ne (C°)	10.6	10.9	13.4	14.9	18.7	22.6	25.3	26.3	23.6	20	15	11.9

Tableau III . Températures moyennes mensuelles enregistrées par la station Dar el Beida (1990– 2007)

Synthèse climatique : Le climat de la Mitidja est de type méditerranéen. Selon le climagramme d’Emberger, la plaine de la Mitidja est située dans l’étage bioclimatique sub-humide (entre septembre et mars), caractérisé par des étés secs et chauds (de mai à août) et par des hivers doux et humides.

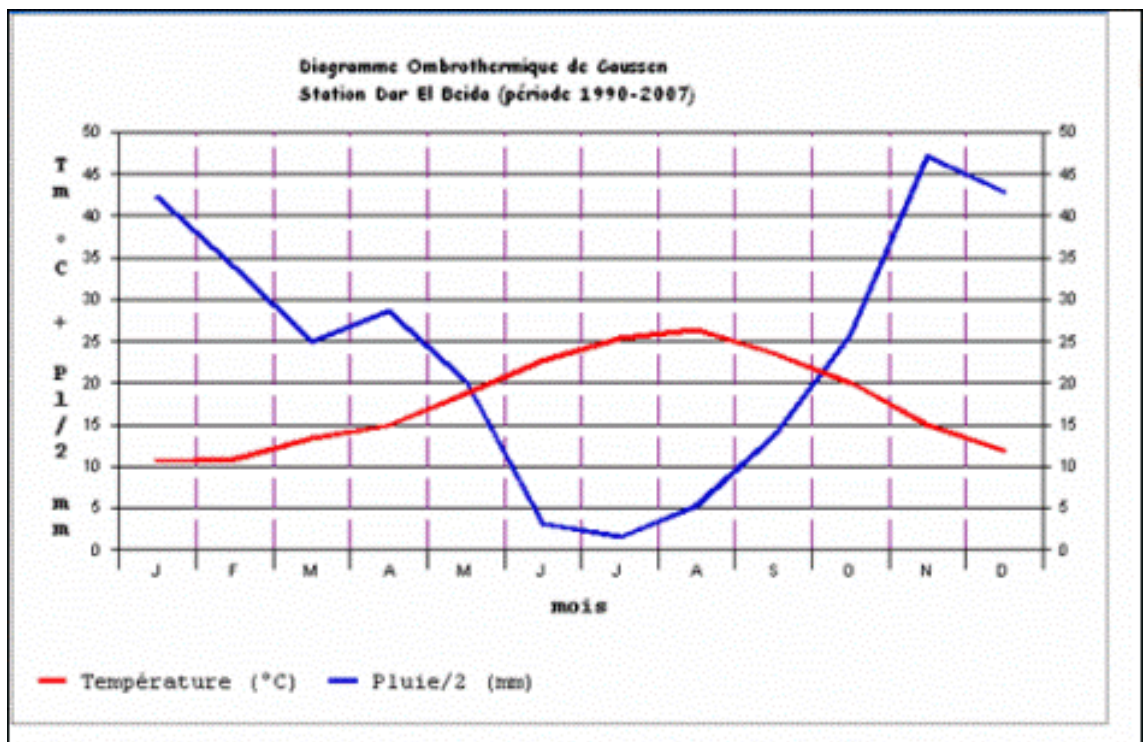


Figure 2. Diagramme Ombrothermique de Gaussen (station de Dar-El –Beida)

5.8 Les vertisols de la Mitidja

Les vertisols de la Mitidja couvrent une superficie totale d'environ 6300 hectares, soit environ 6% de la superficie totale de cette plaine. Ils sont répartis globalement dans ses parties est et ouest (Ecrément, 1971). Ces sols à profils plus au moins homogènes, présentent de larges fentes de retrait en conditions sèches, les horizons ne se différencient que par leur structure qui est polyédrique à prismatique grossière.

5.8.1 Profil caractéristique de la Mitidja Est (Iftene, 1988).

Profil 1

Localisation : sud -est de la ferme Ben Hassen (route de Meftah)

Coordonnées:

Estimation de la rétention en eau des vertisols de la Mitidja au moyen de fonctions de pédotransfert

X= 516Km

Y= 362.2Km

Z= 57 m

Topographie : plane

Géomorphologie: terrasse alluviale

Occupation du sol : en jachère

Roche mère : alluvions des basses terrasses

Profondeur (cm)	Granulométrie %					MO%	Calcaire total (%)	pH	CE ds/m	Base échangeable C moles/Kg de terre				CEC moles/Kg de terre
	A	LF	LG	SF	SG					Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	
	0-26	51	21	6	16					6	1.30	0.41	7.20	
26-56	56	17	11	10	6	0.94	0.82	7.10	0.5	27	5	0.32	0.58	33
56-85	56	17	10	10	3	0.51	0.41	7.08	1.59	28	6	0.28	0.44	35.1

Tableau IV . Résultats analytiques du profil 1

L'exemple ci-dessus est celui de la région est de la Mitidja, sa texture est argileuse, le drainage modéré, c'est une plaine alluviale à pente presque nulle.

Les résultats du tableau IV montrent la prédominance des argiles dans les horizons profonds, les taux dépassent 55%, des teneurs non négligeables en limons alors que celles des sables sont en moyenne de 15 %.

La CEC est élevée, ses valeurs confirment la richesse importante des sols en particules fines.

Le profil est décarbonaté et non salé dans la totalité des horizons

Profondeur (cm)	Da	Humidité en %			RU (mm)
		pF 4,2	pF3	pF2, 5	
0-26	1.4	17.6	21.3	26.8	13.46
26-56	1.4	17.7	21.8	27.1	17.22
56-85	1.5	22.3	26.5	31.5	18.27

Tableau V . Résultats relatifs à la réserve utile du profil 1

Les teneurs en eau au point de flétrissement permanent (pF4, 2) sont comprises entre 17.6 et 22.3 % pour trois horizons, celles de la capacité au champ sont proches de 25 %, ces dernières semblent être sous estimées, ce qui explique la faible réserve utile.

Chapitre II. Matériel et méthode

1. Matériel

1.1. Les sols étudiés pour établir les fonctions de pédotransfert

Les déterminations ont porté sur 154 horizons issus de 50 profils provenant de l'étude agro-pédologique de la Mitidja est Larbaa-Meftah (Raissi, 1988) réalisée par le département de pédologie de l'Agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH). Les sols retenus sont échantillonnés dans la région de Meftah, ils peuvent être considérés comme représentatifs des vertisols de la région.

Les horizons étudiés sont de texture fine, elle est argileuse à argilo-limoneuse.

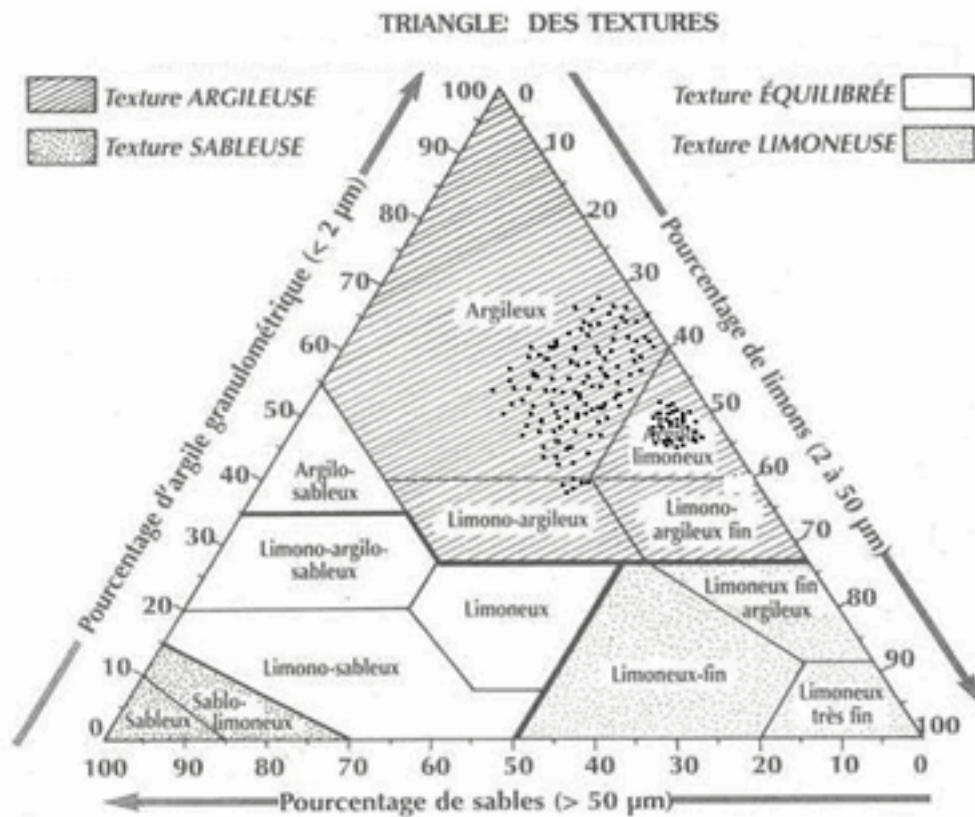


Figure 3. Principaux types de texture des horizons.

1.2. Les sols étudiés pour tester la validité des fonctions de pédotransfert (échantillons de validation).

Pour tester le niveau de fiabilité des fonctions de pédotransfert de prédiction de la teneur en eau à pF3 et pF4, 2, nous avons utilisé un ensemble de 20 horizons issus de 5 profils appartenant à la

même région.

L'étude de la rétention en eau dans les sols a été effectuée à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent à l'aide de la presse à membrane et les mesures ont été effectuées sur la

terre fine humectées préalablement et soumises à un cycle de dessiccation jusqu'au équilibre avec le potentiel recherché.

2. Méthode

2.1. Méthodes de caractérisation des échantillons du sol

Pour la caractérisation physique et chimique des échantillons, les méthodes conventionnelles mentionnées au tableau VI ont été employées

Paramètres	Méthodes
Analyse granulométrique	Méthode internationale à la pipette de Robinson.
Calcaire total.	Méthode volumétrique au Calcimètre de Bernard.
pH eau	Méthode électrométrique au pH -mètre sur une suspension sol/eau (rapport 2/5).
Conductivité électrique (CE)	Au conductimètre sur une suspension terre / liquide de 1/5
Carbone organique	Méthode de Walkley et Black.
Azote total	Méthode de Kjeldhal
Bases échangeables	Percolation à l'acétate d'ammonium(1N) à pH7
Capacité d'échange cationique	Méthode Métson
Capacités de rétention en eau	Presse à membrane.
Densité apparente	Méthode à la paraffine
Densité réelle	Méthode de pycnomètre .

Tableau VI . Méthodes de caractérisation des échantillons des sols

2.2. Les fonctions de pédotransfert

Les fonctions de pédotransfert ont la forme d'une relation mathématique entre d'une part, la teneur en eau à deux valeurs de potentiel soit à la capacité au champ (pF3) et au point

de flétrissement permanent (pF4, 2) et d'autre part, les caractéristiques du sol (composition granulométrique, teneur en matière organique, densité apparente, capacité d'échange cationique). Ces fonctions sont établies

par des régressions multiples qui permettent d'avoir les meilleures relations existant entre les caractéristiques du sol et ses propriétés de rétention en eau.

La bibliographie présente plusieurs fonctions de pédotransfert élaborées pour prédire les propriétés hydriques des sols à partir de leurs caractéristiques. Nous avons retenu le modèle de Bastet *et al.*

(1998), cette fonction présente l'avantage de la simplicité d'emploi et de la disponibilité des caractéristiques utilisées comme variable explicative, le modèle est de type:

$$W = a_1 C_1 + a_2 C_2 + a_3 C_3 + a_i C_i + b$$

Dans laquelle C_i est une caractéristique pédologique, a_i le coefficient correspondant, b l'ordonnée à l'origine et W la teneur en eau.

Différents auteurs ont mis en évidence que les prédictions étaient plus précises lorsque la structure du sol (volume et distribution des vides) est prise en considération dans les calculs.

Afin d'aboutir à des valeurs de teneur en eau à deux potentiels tout en tenant compte des classes de texture et de structure nous avons procédé à :

-La répartition des horizons dans différentes classes de texture en fonction de leur composition granulométrique (stratification texturale);

-La répartition des horizons dans différentes classes de structure en fonction de leur densité apparente (stratification structurale).

-La répartition des horizons appartenant à chaque classe de texture dans des sous – classes en fonction de la densité apparente (stratification texturo-structurale).

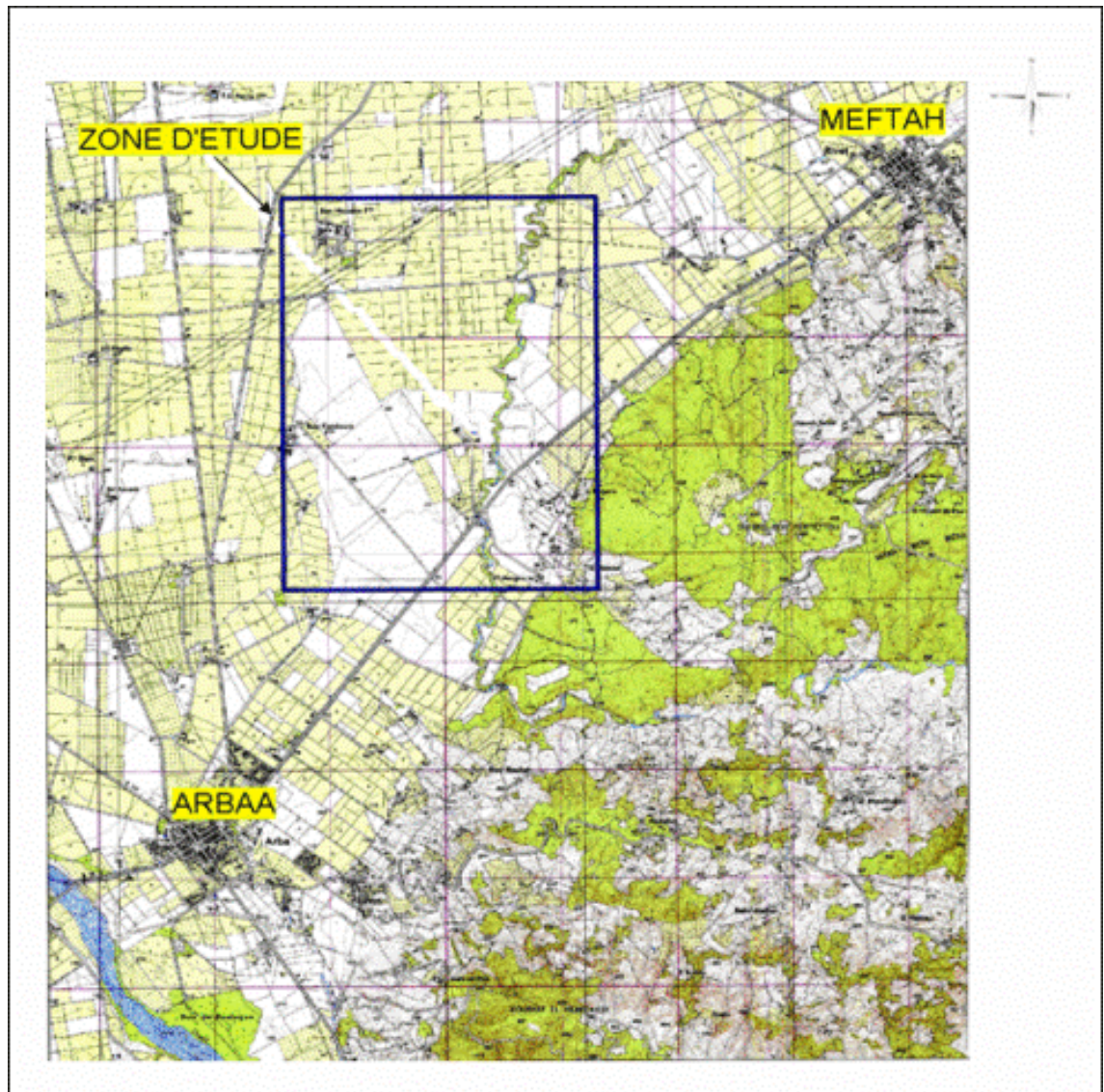


Figure 4. Carte de situation de la zone d'étude (extrait de la carte topographique de l' ARBAA 1/50000).

2.3. Analyses statistiques des données

Les données sont soumises à deux phases de traitements statistiques au moyen du logiciel STATISTICA version 6.1. La première phase consiste à établir un des statistiques descriptives, dans la deuxième, nous recherchons par des régressions multiples, les corrélations les plus fortes existant entre les variables indépendantes, caractéristiques du sol et la variable dépendante représentant la teneur en eau à un potentiel donné.

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

D'après Dagnelie et Palm (1995), Rouanet *et al.*, (2002) et Borcard (2007), l'objectif de la régression multiple est de:

-Décrire les relations entre une variable privilégiée appelée variable dépendante (expliquée), et plusieurs variables, appelées variables indépendantes (explicatives).

-Estimer et prédire la variable dépendante en fonction des variables indépendantes et évaluer la précision et la signification.

Les données pédologiques qui seront mobilisées dans cette étude sont : le taux d'argile, de limon fin et limon grossier ainsi que le sable fin, le taux de matière organique, la capacité d'échange cationique, et la densité apparente (Bastet *et al.*, 1998).

Les résultats des régressions obtenus mettent en évidence l'évolution continue des coefficients r et R^2 affectés par la variation de la teneur en eau lorsque les variables explicatives changent.

Le r renseigne sur le degré de liaison entre la variable dépendante (teneur en eau) et les variables indépendantes (caractéristiques du sol), et le R^2 mesure le pouvoir explicatif du modèle.

Pour tester le degré de signification des équations de régressions nous comparons le r calculé avec le r critique déterminé à partir de la table des valeurs du r de Bravais - Pearson .

Lorsque r est supérieur à un seuil critique déterminé à partir de la table des valeurs ajustées, on admet qu'il y a un effet significatif des variables indépendantes sur la variable dépendante. Plus r est élevé par rapport au seuil critique, plus la qualité de la corrélation est meilleure.

Pour sélectionner les équations de régressions les plus importantes, on se réfère au r le plus élevé.

Chapitre III .Résultats et discussion

1. Principales caractéristiques analytiques des sols étudiés

Les caractéristiques analytiques moyennes des sols (horizons) issus de la base de données de l'ANRH sont portées sur les tableaux VII et VIII.

Paramètres		n horizons	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart -type
Granulométrie	A%	154	49.28	24	64	6.54
	LF%	154	29.36	17	47	6.90
	LG%	154	6.51	3	14	2.86
	SF%	154	9.85	1	24	5.21
	SG%	154	3.45	0	17	3.01
Dr		154	2.53	2.30	2.80	0.047
Da		154	1.42	1.40	1.50	0.045

Tableau VII. Statistiques descriptives des horizons étudiés

La texture de l'ensemble des horizons est généralement marquée par une nette prédominance des fractions d'argiles et limons fins, elle est donc argileuse à argilo – limoneuse, avec un taux d'argile moyen de 49.30 %, et un maximum de 64 %. Cependant, le taux des limons fins est compris entre 17 % et 47 % , alors que les teneurs en limons grossiers oscillent autour de 6.5 %, tandis que le taux des sables fins ne dépasse pas 9.85 % , enfin les sables grossiers ne présentent que 3.45 % en moyenne .

Quant à la moyenne de la densité apparente des horizons, elle est de 1.42, alors que celle de la densité réelle est de 2.53, avec de faibles variations et un écart-type très bas.

Paramètres	n horizons	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart -type	
Ca CO ₃ total%	154	2.69	0.10	18.27	2.94	
pH	154	7.03	5.82	9.30	0.85	
CE (ds/m)	154	0.94	0.11	2.5	0.045	
C‰	154	6.72	0.23	15.9	3.59	
N‰	154	0.87	0.035	2.90	0.42	
MO %	154	1.30	0.020	3.67	0.62	
C/N	154	7.87	1	11	2.16	
Bases échangeables C moles/kg de terre	Ca ⁺⁺	154	35.39	7.30	19	2.71
	Mg ⁺⁺	154	4.55	0.30	2.45	0.42
	Na ⁺	154	0.70	0.14	2.45	0.32
	K ⁺	154	0.57	0.17	11	2.16
CEC Cmoles/kg de terre	154	41.22	13.02	41.63	7.80	

Tableau VIII . Statistiques descriptives des paramètres chimiques et biologiques des horizons étudiés

Comme la montre le tableau VIII , le calcaire total est en faibles teneurs, les horizons sont neutres à alcalin avec un pH compris entre 5.82 et 9.30, alors que la conductivité électrique est très faible.

La teneur moyenne en matière organique est de 1.30 % avec un maximum de 3.67 %, ce qui montre la pauvreté de certains horizons en matière organique.

Concernant la capacité d'échange cationique, elle est assez élevée, elle varie dans un intervalle de 13.02 et 41.63 C moles / kg de terre, ce qui confirme sa relation étroite avec les teneurs en argiles des horizons.

Le complexe adsorbant est saturé avec prédominance du calcium dont la valeur moyenne est de 35.39 C moles / kg, cependant la valeur moyenne du magnésium échangeable est de 4.55 Cmoles/kg de terre. Le sodium et le potassium échangeable montrent des teneurs très faibles.

Classe de texture	n		p F 3 H p (%)	p F 4,2 H p (%)	RU (mm)
A	111	-Moyenne	23.13	17.11	29.98
		-Ecart type	2.68	2.21	14.96
		-Minimum	12.30	8.90	8.40
		-Maximum	29.60	22.60	74.25
A	37	-Moyenne	22.47	15.92	32.05
		-Ecart type	2.83	1.9	13.92
		-Minimum	13.10	9.7	9.10
		-Maximum	27.30	19.90	62.01
LA	06	-Moyenne	22.08	15.04	37.65
		-Ecart type	1.02	1.21	17.49
		-Minimum	20.60	13.2	12.32
		-Maximum	22.90	16.20	55.35

Tableau IX . Capacités de rétention en eau des horizons

Les résultats illustrés par le tableau IX font apparaître que la teneur en eau à la capacité au champ la plus élevée est enregistrée dans les horizons de texture argileuse avec une valeur maximum de 29.60 %, en second position, on trouve les horizons de texture argilo-limoneuse dont la teneur moyenne est de 22.47 %. Par ailleurs la teneur moyenne en eau des horizons de texture limono -argileuse avoisine 22.08 %.

L'humidité pondérale au point de flétrissement permanent montre que les horizons ayant la teneur en eau la plus élevée sont de texture argileuse avec une moyenne de 17.11 %, alors que les teneurs moyennes des horizons de texture argilo- limoneuse et limono – argileuse sont relativement proches, et sont respectivement de 15.92 % et 15.04 %. Au regard des données bibliographiques, ces valeurs sont relativement faibles.

En ce qui concerne la réserve utile, on constate que la valeur moyenne la plus élevée est celle des textures limono- argileuse, elle est de l'ordre de 37.65mm, cependant celle des horizons de texture argileuse, elle est de 29.98 mm, alors que les horizons de texture argilo- limoneuse ont une réserve utile moyenne de 32.05mm.

Afin de discuter les niveaux de la teneur en eau et de la RU des différents horizons, les résultats sont représentés graphiquement (figures. 5, 6,7).

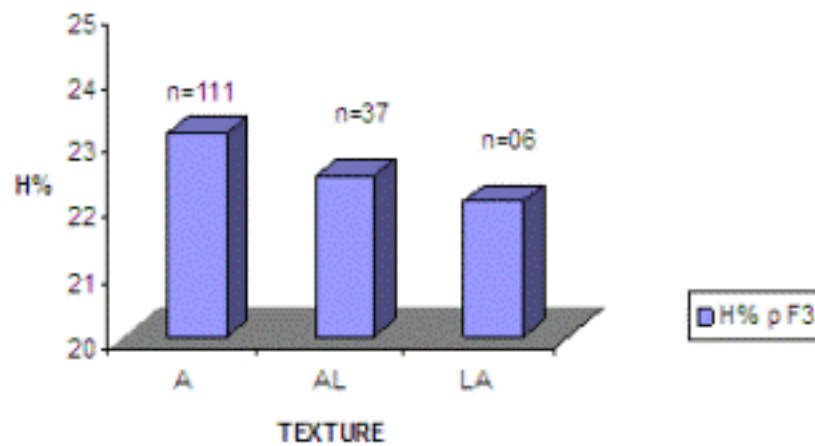


Figure 5. Teneurs en eau pondérales à p F 3 en fonction de la texture

Les teneurs en eau au potentiel correspondant à la capacité au champ (figure 5) diminuent d'une façon progressive avec le type de texture des différents horizons, on constate que les horizons de texture argileuse présentent la valeur la plus élevée de l'humidité pondérale (23.13%), elle diminue pour les horizons de texture argilo -limoneuse pour atteindre la valeur de 22.47%, alors que la plus faible teneur est enregistrée pour les horizons de texture limono- argileuse (22.08%).

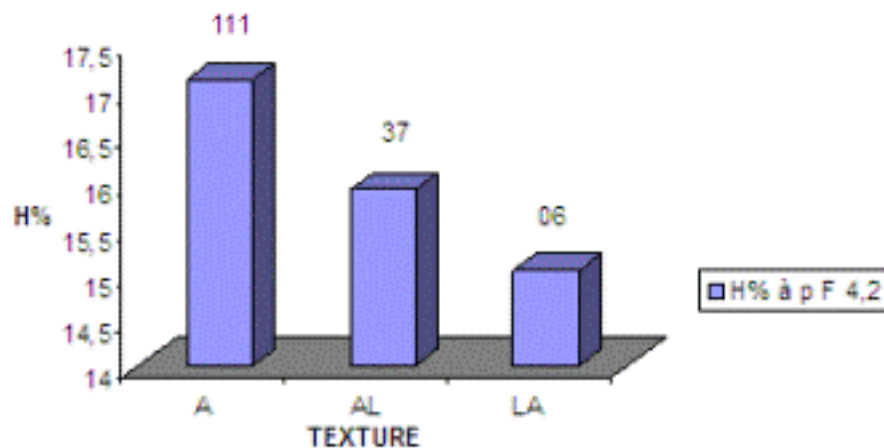


Figure 6. Teneurs en eau pondérales à pF 4,2

Le même raisonnement relatif aux teneurs en eau, montre que l'humidité pondérale à pF 4,2 reste toujours liée à la composition granulométrique des horizons, et en particulier à la fraction fine, de ce fait les plus hautes teneurs en eau sont enregistrées dans les horizons de texture argileuse avec une valeur de 17.11 %, cependant les horizons de texture argilo-limoneuse et limono-argileuse présentent des teneurs plus faibles que celles enregistrés dans la cas des horizons de texture argileuse, ils sont respectivement de l'ordre de 15.92 % et 15.04 %.

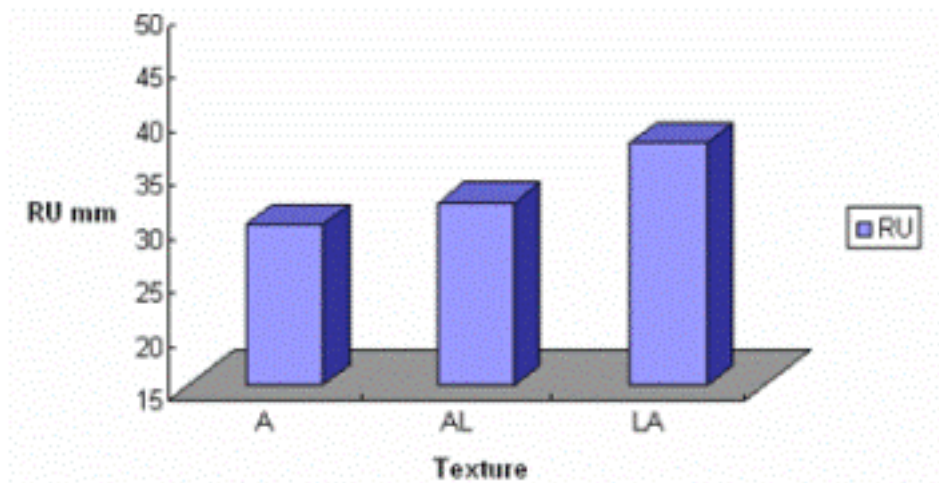


Figure 7. La réserve utile

La réserve utile est variable en fonction de la texture des sols, dans les sols argileux ce paramètre est plus faible car parallèlement à l'augmentation de l'humidité à la capacité de rétention, il y a élévation de la teneur en eau à pF 4,2.

2. Analyse des données et établissements des fonctions de pédotransfert

Afin de montrer la part qui revient à chaque paramètre ou bien variable dans la rétention en eau du sol, déjà cités dans le chapitre matériels et méthodes, nous avons effectué une analyse statistique (régression multiple) afin d'établir une série d'équations à partir du modèle de Bastet *et al.* (1998).

Nous avons regroupé (stratification) les horizons selon les classes de textures (argileuse, argilo- limoneuse) et selon les classes de densité apparente 1,4 et 1,5 (classes structurales).

Les paramètres pédologiques employés comme variables indépendantes sont le taux d'argile, le taux de la matière organique, le taux des limons fins et limons grossiers, le taux des sables fins, ainsi que la capacité d'échange cationique et la densité apparente. La rétention en eau est mesurée à pF 3 et pF 4,2, considérée comme variables dépendantes.

Les équations de régressions et les variations des coefficients de corrélation r en fonction des paramètres testés sont représentées dans les différents tableaux.

3. Fonctions de pédotransfert après stratification texturale

La répartition de l'ensemble des horizons en fonction des textures dominantes fait ressortir deux classes de textures, horizons de textures argileuses ($n=111$) et horizons de textures

argilo- limoneuse (n=37). Les sols de texture limono -argileuse, dont l'effectif est très faible (n=06) ont donné des résultats non significatifs.

Afin de mettre en évidence l'impact de la stratification, nous avons comparé les résultats de l'ensemble des horizons (n=154) à ceux obtenus après stratification texturale.

3.1. Variables indépendantes: argile et limon fin

3.1.1. Équations de régression à pF 3

La corrélation de l'argile et du limon fin à la teneur en eau est significative au seuil $\alpha=0,05$.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	A, LF	$Y_1 = 0,16 A + 0,07 LF + 12,40$	151	0,38	0,14	*
Texture argileuse (A)	A, LF	$Y_2 = 0,18 A + 0,01 LF + 13,07$	105	0,37	0,13	*
Textures argilo-limoneuse (AL)	A, LF	$Y_3 = 0,18 A + 0,22 LF + 5,77$	35	0,43	0,18	*

*: significative

ns: non significative

Tableau X . Relations entre les variables A, LF et la rétention en eau à pF 3

A partir des résultats du tableau X, il apparaît que les différentes équations de régressions définissent des corrélations significatives pour les trois types d'horizons, la valeur du r la plus élevée est celle des horizons de texture argilo –limoneuse ($r=0,43$). En effet, l'argile et les limons fins expliquent 18 % de la variance de rétention en eau pour le même type d'horizons, ceci est déjà confirmé par les travaux de Duchaufour (1995) qui explique que la texture conditionne l'énergie de la rétention, et cette énergie est d'autant plus grande que les pores sont de petite taille.

La comparaison de coefficient de corrélation des équations Y_1 et Y_2 montre que les écarts sont très faibles, la stratification texturale n'a pas eu d'effet sur les sols argileux , encore faut -il que le nombre d'échantillons soit équivalent.

3.1.2. Équations de régression à pF 4,2

A pF 4,2, les équations de régressions présentent des coefficients de corrélation élevés ce qui reflète des corrélations significatives à ce niveau.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	A, LF	$Y_1 = 0,16A - 0,02 LF + 9,32$	151	0,52	0,27	*
Texture argileuse (A)	A, LF	$Y_2 = 0,18 A - 0,008 LF + 9,82$	108	0,52	0,27	*
Textures argilo-limoneuse (AL)	A, LF	$Y_3 = 0,20 A + 0,07 LF + 3,96$	34	0,60	0,36	*

Tableau XI. Relations entre les variables A, LF et la rétention en eau à pF 4,2

Globalement, le coefficient de corrélation s'améliore pour les trois type d'horizons, la valeur du r la plus forte est enregistrée dans le cas des horizons de texture argilo-limoneuse (r=0,60).

Si nous comparons les coefficients de corrélation obtenus à pF 3 et à pF 4,2, nous remarquons que le r est d'autant plus important que le potentiel diminue, ce qui confirme le rôle important de la fraction fine du sol (argile et limon fin) dans la rétention de l'eau aux bas potentiels. Ce comportement s'explique par l'eau retenue par les pores des particules fines lorsque la pression devient plus forte. De plus, les charges développées à la surface des argiles favorisent l'adhésion des molécules d'eau, ces résultats corroborent les travaux de Bruand *et al.* (2002). d'après ces auteurs, la teneur en eau aux bas potentiels est liée à la composition granulométrique et particulièrement à la teneur en argile.

3.2. Variables indépendantes : argile et matière organique

3.2.1. Équations de régression à pF 3

Les équations de régressions montrent des coefficients de corrélation de la teneur en eau à l'argile et la matière organique légèrement plus élevés que ceux de l'argile et les limons fins.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	A, MO	$Y_1 = 0,14A + 0,78MO + 14,68$	151	0,40	0,16	*
Texture argileuse (A)	A, MO	$Y_2 = 20,19A + 0,98MO + 11,52$	108	0,43	0,19	*
Textures argilo-limoneuse (AL)	A, MO	$Y_3 = 20,17A + 0,73MO + 13,57$	34	0,44	0,19	*

Tableau XII. Relations entre les variables A, MO et la rétention en eau à pF 3

L'analyse des tableaux X et XII montre que l'effet de la matière organique sur la rétention en eau est plus élevé que celui des limons fins aux bas potentiels. Cet effet reste cependant limité sur l'ensemble des horizons et les horizons de texture argilo-limoneuse.

A pF 3, malgré une légère hausse du coefficient de corrélation, l'argile et la matière organique n'expliquent que 19% de la variance pour les horizons de texture argileuse et argilo-limoneuse et seulement 16% pour l'ensemble des horizons.

3.2.2. Équations de régression à pF 4,2

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	A, MO	$Y_1 = 0,17A - 0,04MO + 0,27$	151	0,52	0,27	*
de Texture argileuse (A)	A, MO	$Y_2 = 0,20A - 0,18MO + 6,94$	108	0,49	0,24	*
Texture argilo-limoneuse (AL)	A, MO	$Y_3 = 0,20A + 0,22MO + 6,41$	34	0,55	0,31	*

Tableau XIII . Relations entre les variables A, MO et la rétention en eau à pF 4,2

A la lecture des résultats du tableau XIII , il ressort que l'addition de la matière organique entraîne la baisse de r, il est respectivement de 0,49 et 0,55 pour les horizons de texture argileuse et argilo-limoneuse.

Ces résultats permettent de mettre en évidence la faible contribution de la matière organique à la rétention en eau à ce niveau de potentiel, ce qui confirme les résultats de Hudson (1994) et Emerson (1995), ces chercheurs ont montré que la matière organique tend à accroître la rétention de l'eau aux hauts potentiels et joue rôle négligeable au point de flétrissement permanent.

3.3. Variables indépendantes : argile, matière organique et limon fin

3.3.1. Équations de régression à pF 3

A pF 3 la corrélation est significative, le coefficient de corrélation tend à augmenter progressivement.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	A, MO, LF	$Y_1 = 0,16A + 0,67MO + 0,051LF + 12,03$	150	0,42	0,18	*
Texture argileuse (A)	A, MO, LF	$Y_2 = 0,19A + 1,02MO - 0,01LF + 12,24$	107	0,44	0,19	*
Texture argilo-limoneuse (AL)	A, MO, LF	$Y_3 = 0,18A + 0,23MO + 0,21LF + 6,20$	33	0,60	0,36	*

Tableau XIV . Relations entre les variables A, MO, LF et la rétention en eau à pF 3

L'effet de l'addition de la valeur des limons fins se manifeste par l'augmentation du coefficient de corrélation pour les trois types d'horizons, le poids de cette caractéristique est plus important dans les horizons de texture argilo-limoneuse ($r = 0,60$). La comparaison de ces résultats avec ceux du tableau XI montre que le poids de la matière organique est de 0,08 pour l'ensemble des horizons, et 0,17 pour les textures argilo-limoneuse, donc l'efficacité de ce constituant à pF 3 est plus élevée pour ces horizons.

3.3.2. Équations de régression à pF 4,2

Les équations de régressions présentent un résultat significatif pour les trois types d'horizons

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	A, MO, LF	$Y=0,16A+0,09MO-0,027LF+9,27$	150	0,52	0,28	*
Texture argileuse (A)	A, MO, LF	$Y=0,18A+0,03MO-0,07LF+9,85$	107	0,62	0,38	*
Texture argilo-limoneuse (AL)	A, MO, LF	$Y=0,20A+0,06MO-0,06LF+4,07$	33	0,68	0,46	*

Tableau XV . Relations entre les variables A, MO, LF et la rétention en eau à pF 4,2

La valeur des limons fins intégrés à la relation statistique améliore la prédiction pour les horizons de texture argileuse ainsi que pour les horizons de texture argilo-limoneuse avec R² de respectivement de 0,38 et 0,46, alors que la prédiction est améliorée de 1% pour l'ensemble des horizons (R²=0,28). Ces différences sont relativement faibles.

Les résultats des tableaux XIII et XV révèlent de nouveau le rôle important de la fraction fine du sol sur la rétention en eau, ces résultats sont confirmés par les travaux de Faure (1978) et Attou (1996), ils ont montré sur des assemblages compacts argiles-limons, la création de ponts d'argile entre les grains de limons, ce qui peut expliquer la formation d'une fine porosité.

En comparaison au potentiel précédant, les corrélations se sont améliorées, traduisant une plus forte relation entre les caractéristiques du sol aux bas potentiels

3.4. Variables indépendantes : argile, matière organique, limon fin et limon grossier.

3.4.1. Équations de régression à pF 3

L'ensemble des équations de régressions est significatif au seuil de 5%.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	A, MO, LF, LG	$Y_1=0,13A+0,52MO-0,21LG+0,038LF+16,02$	149	0,47	0,22	*
Texture argileuse (A)	A, MO, LF, LG	$Y_2=0,15A+0,95MO-0,10LG-0,03LF+14,04$	106	0,45	0,20	*
Texture argilo-limoneuse (AL)	A, MO, LF, LG	$Y_3=0,11A+0,16MO-0,29LG+0,13LF+14,80$	32	0,68	0,47	*

Tableau XVI . Relations entre les variables A, MO, LF, LG et la rétention en eau à pF 3

A pF 3 le coefficient de corrélation augmente légèrement dans les équations Y₁ et Y₂ lors de l'ajout de la valeur des limons grossiers, cependant le r le plus important est enregistré dans le cas des horizons de texture argilo-limoneuse.

Ces résultats suggèrent une faible contribution des limons grossiers à la rétention en eau à pF 3.

3.4.2. Équations de régression à pF 4,2

L'introduction de la valeur des limons grossiers à l'équation de prédiction n'a pas apporté une amélioration remarquable.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	A, MO, LF, LG	$Y_1 = 0,15A + 0,045MO - 0,06LG - 0,03LF + 10,42$	149	0,52	0,27	*
texture argileuse (A)	A, MO, LF, LG	$Y_2 = 0,18A - 0,007MO + 0,03LG - 0,07LF + 9,20$	106	0,62	0,38	*
texture argilo-limoneuse (AL)	A, MO, LF, LG	$Y_2 = 0,17A + 0,03MO - 0,14LG + 0,027LF + 8,17$	32	0,68	0,47	*

Tableau XVII . Relations entre les variables A, MO, LF, LG et la rétention en eau à pF 4,2

L'addition de la valeur des limons grossiers n'affecte pas la qualité des prédictions, ce qui signifie que le poids des limons grossiers est nul malgré la stratification texturale.

Hénin (1977), a montré que la teneur en eau aux bas potentiels est étroitement liée à la composition granulométrique notamment à la fraction la plus fine.

3.5. Variables indépendantes : argile, matière organique, limon fin, limon grossier, sable fin

3.5.1. Équations de régression à pF 3

S'agissant des sables fins, leurs poids est nul dans la rétention en eau à ce potentiel, leur introduction à la relation statistique n'améliore pas la qualité de la prédiction.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	A, MO, LF, LG, SF	$Y_1 = 0,12A + 0,52MO + 0,02LF - 0,021LG - 0,01SF + 16,90$	148	0,47	0,22	*
Texture argileuse (A)	A, MO, LF, LG, SF	$Y_2 = 0,15A + 0,98MO - 0,05LF - 0,11LG - 0,03SF + 16,40$	105	0,45	0,20	*
Textures argilo-limoneuse (AL)	A, MO, LF, LG, SF	$Y_3 = 0,19A + 0,22MO + 0,24LF - 0,21LG + 0,23SF + 4,17$	31	0,68	0,46	*

Tableau XVIII . Relations entre les variables A, MO, LF, LG, SF et la rétention en eau pF 3

A pF 3, les coefficients de corrélation ne changent pas de valeur lors de l'introduction des sables fins, cette faible affinité vis-à-vis de l'eau peut s'expliquer par la formation de macropores en présence de cette fraction.

3.5.2. Équations de régression à pF 4,2

De même, à pF 4,2, la contribution des sables fins à la rétention en eau est négative.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	A, MO, LF, LG, SF	$Y_1=0,15A+0,05MO-0,03LF-0,06LG-0,0027SF+10,59$	148	0,52	0,28	*
Texture argileuse (A)	A, MO, LF, LG, SF	$Y_2=0,18A-0,008MO-0,076LF+0,03LG+0,003SF+9,17$	105	0,52	0,27	*
Textures argilo-limoneuse (AL)	A, MO, LF, LG, SF	$Y_3=0,24A+0,08MO+0,12LF-0,07LG+0,19SF+1,70$	31	0,66	0,44	*

Tableau XIX . Relations entre les variables A, MO, LF, LG, SF et la rétention en eau à pF 4,2

A 16000 hPa, l'effet défavorable des sables fins est évident, l'introduction de cette fraction granulométrique à la relation statistique a engendré une réduction des coefficients de corrélation pour les horizons de texture argileuse et argilo-limoneuse, le r est passé respectivement de 0,62 à 0,52 et de 0,68 à 0,66. Pour l'ensemble des horizons, les sables fins n'ont apporté aucune modification.

3.6. Variables indépendante: argile, matière organique, limon fin, limon grossier, sable fin, densité apparente

3.6.1. Équations de régression à pF 3

L'introduction de la densité apparente dans l'équation de prédiction semble être sans effet sur la relation.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	A, MO, LF, LG, SF, Da	$Y_1=0,12A+0,52MO+0,03LF-0,22LG-0,01SF+1,66Da+14,54$	147	0,47	0,22	*
texture argileuse (A)	A, MO, LF, LG, SF, Da	$Y_2=0,15A+0,98MO-0,05LF-0,12LG-0,03SF-0,84Da+17,74$	104	0,45	0,20	*
textures argilo-limoneuse (AL)	A, MO, LF, LG, SF, Da	$Y_3=0,19A+0,23MO+0,24LF-0,21LG+0,23SF+1,02Da+2,88$	30	0,68	0,46	*

Tableau XX . Relations entre les variables A, MO, LF, LG, SF, Da et la rétention en eau à pF3

L'addition de la valeur de la densité apparente à la relation statistique n'a pas apporté un changement aux coefficients de corrélation pour les trois types d'horizons, ce qui explique le poids nul de la densité apparente dans la rétention en eau. Ces résultats remettent en question le rôle de la structure du sol sur la rétention en eau, ce qui est en contradiction avec les travaux de Bruand *et al.* (2002). Cependant, il semblerait que les mesures des propriétés hydriques aient été réalisées sur des échantillons de sols reconstitués, de ce fait, ce remaniement a modifié le volume et la géométrie de l'espace poral.

3.6.2. Équations de régression à pF 4,2

La densité apparente reste toujours sans effet, sa contribution à la rétention en est nulle.

Horizons	Variabes indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	A, MO, LF, LG, SF, Da	$Y_1=0,15A+0,04MO-0,03LF-0,06LG+0,78Da+9,48$	147	0,52	0,28	*
Texture argileuse (A)	A, MO, LF, LG, SF, Da	$Y_2=0,19 A-0,01 MO-0,07 LF+0,037 LG+0,0009SF+0,85 Da+7,82$	104	0,52	0,27	*
Textures argilo-limoneuse (AL)	A, MO, LF, LG, SF, Da	$Y_3=0,24 A+0,07 MO+0,12 LF-0,06 LG+0,19 SF-0,80 Da+0,36$	30	0,66	0,44	*

Tableau **XXI** . Relations entre les variables A, MO, LF, LG, SF, Da et la rétention en eau à pF 4,2

De même à pF 4,2, les résultats des corrélations ne montrent pas de modifications aux relations, ce qui confirme les résultats de nombreux travaux selon lesquels la structure du sol exprimée par la densité apparente a un effet sur la rétention en eau uniquement aux hauts potentiels.

A la lecture des résultats obtenus à cette phase d'étude (stratification texturale), il ressort que les meilleures corrélations (coefficients de corrélations les plus élevés) sont obtenues dans le cas des horizons de texture argileuse, et horizons de texture argilo-limoneuse, ce qui nous amène à déduire que la stratification texturale améliore quelques peu les prédictions.

En résumé, sur les six paramètres introduits dans les équations de prédictions, trois paramètres, semble avoir plus de poids, et donc être de meilleurs prédicateurs de la rétention en eau, de ce fait il s'agit du modèle incluant l'argile, la matière organique et les limons fins, ce modèle permet d'expliquer respectivement 28 %, 38 % et 36 % de la variance de la rétention en eau à pF 4,2.

$Y=0,16A+0,09MO-0,027LF+9,27$ (1). Pour l'ensemble des horizons.

Avec $r=0,52$ pour un ddl de 150

$Y=0,18A+0,03MO-0,07LF+9,85$ (2). Pour les horizons de texture argileuse.

Avec $r=0,62$ pour un ddl de 104

$Y=0,20A+0,06MO-0,06LF+4,07$ (3). Pour les horizons de texture argilo - limoneuse.

Avec $r=0,68$ pour un ddl de 34

4. Fonctions de pédotransfert après stratification structurale

Au cours de cette phase, les horizons sont répartis en classes de densités apparentes, c'est une stratification structurale qui fait ressortir deux types d'horizons. 101 individus ont une densité apparente de 1,4, et 45 autres ont une densité apparente de 1,5.

4.1. Variables indépendante : argile et limon fin

4.1.1 .Équations de régression à pF 3

Après la stratification par classe de structure, les équations de régressions ont donné des relations significatives au seuil de 5%.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Horizons de Da 1,4	A, LF	$Y_1=0,17A+0,10 LF+11,10$			0,15	*
Horizons de Da 1,5	A, LF	$Y_2=0,14 A+0,003 LF+15,89$	42	0,37	0,14	*

Tableau **XXII** . Relations entre les variables A, LF et la rétention en eau à pF 3

A pF 3, l'argile et les limons fins expliquent 15 % de la variance de rétention en eau pour les horizons de densité apparente 1,4, et 14 % pour les horizons de densité apparente 1,5. Cependant les différences entre les deux horizons sont pratiquement insignifiantes, ce résultat montre le peu d'effet de la densité apparente sur le degré de liaison. Il faut souligner par ailleurs que les deux niveaux de densités apparentes sont très proches, les autres paramètres masquent les faibles écarts. Ces résultats ne sont pas conformes à ceux de Bigorre (2000), cet auteur estime que la densité apparente est très fortement corrélée avec l'humidité à la capacité au champ.

4.1.2.Équations de régression à pF 4,2

À pF 4,2, les paramètres testés apparaissent bien corrélés, le r s'améliore pour les deux horizons mais particulièrement plus élevé pour les horizons les plus denses.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Horizons de Da 1,4	A, LF	$Y_1=0,15 A-0,004 LF+8,97$			0,22	*
Horizons de Da 1,5	A, LF	$Y_2=0,18 A-0,07 LF+10,08$	42	0,69	0,48	*

Tableau **XXIII** . Relations entre les variables A, LF et la rétention en eau à pF 4, 2

En effet, les sols dont la densité la plus élevée présentent en générale une porosité totale plus faible mais constituée essentiellement de micropores qui fixent l'eau avec plus d'énergie.

4.2. Variables indépendante : argile et matière organique

4.2.1. Équations de régression à pF 3

A pF 3 l'argile et la matière organique expliquent respectivement 15% et 19 % de la variance de la rétention en eau pour les horizons de densité apparente 1,4 et 1,5, ce qui traduit des prédictions significatives.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddi	r	R ²	Sgn
Horizons de Da 1,4	A, MO	$Y_1=0,14A+0,78MO+14,88$		0,38	0,15	*
Horizons de Da 1,5	A, MO	$Y_2=0,14A+0,74MO+14,80$	42	0,44	0,19	*

Tableau **XXIV** . Relations entre les variables A, MO et la rétention en eau à pF 3

L'addition de la valeur de la matière organique à la relation statistique entraîne une augmentation du coefficient de corrélation seulement pour les horizons de densité apparente 1, 5 par rapport à celui obtenu dans le cas de l'argile et les limons fins, une telle contribution peut être expliquée par l'effet

favorable qu'exerce la matière organique sur la structure, ceci a été expliqué par les travaux de Anderson *et al.* (1990) ainsi que Anderson *et al.* (1994), il semble que la matière organique a un effet sur la structure de façon à accroître la macro et la méso porosité du sol.

La substitution des limons fins par la matière organique n'a pas modifié le degré de liaison, donc le poids des premiers dans la contribution à la rétention en eau est égal à celui de la matière organique.

La connaissance de la nature de la matière organique et son rôle de ciment reste à déterminer par des analyses spécifiques.

4.2.2. Équations de régression à pF 4,2

Les équations de régressions présentent un résultat significatif au seuil de 0,05, les coefficients de corrélation s'améliorent par rapport à ceux obtenus à pF 3.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddi	r	R ²	Sgn
Horizons de Da 1,4	A, MO	$Y_1=0,16A+0,12MO+8,53$	98	0,48	0,23	*
Horizons de Da 1,5	A, MO	$Y_2=0,20A+0,25MO+6,8$	42	0,65	0,42	*

Tableau **XXV** . Relations entre les variables A, MO et la rétention en eau à pF 4,2

A pF 4,2, l'effet de la matière organique reste limité, il n'a aucun effet sur la relation Y_1 et fait baisser légèrement la corrélation pour la densité 1,5.

La comparaison des mêmes variables mais à des niveaux d'énergies différents indique que la corrélation est nettement plus élevée aux bas potentiels.

4.3. Variables indépendante : argile, matière organique et limon fin

4.3.1. Équations de régression à pF 3

Les limons fins améliorent sensiblement la qualité de la prédiction, les équations de régressions définissent des résultats significatifs.

Estimation de la rétention en eau des vertisols de la Mitidja au moyen de fonctions de pédotransfert

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Horizons de Da 1,4	A, MO, LF	$Y_1=0,17A+0,58MO+0,08LF+11,11$	97	0,42	0,18	*
Horizons de Da 1,5	A, MO, LF	$Y_2=0,14A+0,74MO+0,005LF+14,56$	41	0,44	0,19	*

Tableau **XXVI** . Relations entre les variables A, MO, LF et la rétention en eau à pF 3

A pF 3 l'addition des limons fins améliore seulement la prédiction de 3% ($R^2=0,18$) pour les horizons de densité apparente 1,4, ce qui indique une 'augmentation de la rétention en eau, celle-ci est en relation avec l'accroissement de la porosité fine.

4.3.2. Équations de régression à pF 4,2

Les résultats de prédiction à pF 4,2 traduisent des corrélations significatives au seuil de 0,05

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Horizons de Da 1,4	A, MO, LF	$Y_1=0,15A+0,14MO-0,009LF+8,98$	97	0,48	0,23	*
Horizons de Da 1,5	A, MO, LF	$Y_2=0,17A-0,26MO-0,07LF+10,55$	41	0,70	0,49	*

Tableau **XXVII** . Relations entre les variables A, MO, LF et la rétention en eau à pF 4,2

A la lecture des résultats du tableau XXVII , il ressort que les limons fins à pF 4,2 améliorent les coefficients de corrélation seulement pour les horizons de densité apparente 1,5. Ces résultats montrent l'effet des limons fins sur la formation de la microporosité des sols.

4.4. Variables indépendante: argile, matière organique, limon fin et limon grossier

4.4.1. Équations de régression à pF 3

Les quatre variables testés ensemble indiquent des relations significatives au seuil de 5 %.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Horizons de Da 1,4	A, MO, LF, LG	$Y_1= 0,12A+0,39MO-0,25LG+0,05LF+16,41$	96	0,43	0,19	*
Horizons de Da 1,5	A, MO, LF, LG	$Y_2= 0,13A+0,68MO-0,09LG+0,002LF+15,99$	40	0,45	0,20	*

Tableau **XXVIII** . Relations entre les variables A, MO, LF, LG et la rétention en eau à pF 3

Le poids des limons grossiers est négligeable à ce potentiel, alors qu'on principe cette fraction favorise la formation de méso et macropores favorable à la rétention aux potentiels

moyens. Par ailleurs, du fait des faibles teneurs des limons grossiers leur effet est masqué par les taux élevés des argiles.

4.4.2. Équations de régression à pF 4,2

À pF 4,2, les équations de régressions présentent des coefficients de corrélation élevés, qui présentent un résultat significatif.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Horizons de Da 1,4	A, MO, LF, LG	$Y_1 = 0,14A + 0,08MO - 0,08LG - 0,02LF + 10,81$	96	0,48	0,24	*
Horizons de Da 1,5	A, MO, LF, LG	$Y_2 = 0,18A - 0,24MO + 0,22LG - 0,07LF + 10,22$	40	0,70	0,49	*

Tableau **XXIX** . Relations entre les variables A, MO, LF, LG et la rétention en eau à pF 4,2

Même si les équations de régressions se caractérisent par des coefficients de corrélation significatifs, l'addition de la valeur des limons grossiers n'apporte aucune amélioration à la qualité de la prédiction, les coefficients de corrélation restent les mêmes pour les deux types d'horizons, ce résultat confirme a nouveau la faible part des limons grossiers dans la rétention en eau.

4.5. Variables indépendante: argile, matière organique, limon fin, limon grossier, sables fins

4.5.1. Équations de régression à pF 3

Les sables fins introduits dans l'équation n'ont pas un effet sur la rétention en eau quelque soit la densité apparente.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Horizons de Da 1,4	A, MO, LF, LG, SF	$Y_1 = 0,11A + 0,39MO + 0,04LF - 0,26LG - 0,01SF + 17,25$	95	0,43	0,19	*
Horizons de Da 1,5	A, MO, LF, LG, SF	$Y_2 = 0,01A + 0,83MO - 0,10LF - 0,18LG - 0,16SF + 27,03$	39	0,45	0,20	*

Tableau **XXX** . Relations entre les variables A, MO, LF, LG, SF et la rétention en eau à pF 3

Les équations de régressions indiquent que les sables fins ne présentent aucun intérêt dans l'estimation de la rétention en eau. Il semblerait que ces résultats soient spécifiques aux sols argileux, notamment les vertisols dont les taux de cette fraction sont souvent bas.

4.5.2. Équations de régression à pF 4,2

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Horizons à Da 1,4	A, MO, LF, LG, SF	$Y_1 = 0,12A + 0,09MO - 0,03LF - 0,09LG - 0,01SF + 11,99$	95	0,48	0,24	*
Horizons à Da 1,5	A, MO, LF, LG, SF	$Y_2 = 0,19A - 0,26MO - 0,06LF + 0,03LG + 0,025SF + 8,82$	39	0,70	0,49	*

Tableau **XXXI** . Relations entre les variables A, MO, LF, LG, SF et la rétention en eau à pF 4,2

De même à pF 4,2, les équations de régressions semblent confirmer, les résultats obtenus avec la stratification texturale, ils montrent l'effet négligeable des sables fins sur la rétention en eau.

D'après les résultats des corrélations obtenues, il en ressort qu'à pF 3 la stratification structurale n'explique pas une grande variation de la teneur en eau. Cependant, les horizons à densité apparente 1,5 à pF 4,2 montrent les meilleures corrélations ($r=0,70$), cela peut être attribué à la microporosité, cette dernière est en relation étroite avec la rétention en eau à pF 4,2.

En se référant aux valeurs du coefficient de corrélation les plus élevés, il est évident que les équations de régression les plus représentatives dans le cas de la stratification structurale sont celles incluant seulement l'argile, la matière organique et les limons fins à pF 4,2 particulièrement pour les horizons de densité apparente 1,5. Les limons grossiers les sables fins ne contribuent pas à la rétention en eau des sols.

$Y = 0,15A + 0,14MO - 0,009LF + 8,98$ (1) pour les horizons de densité apparente 1,4.

$r = 0,48$ pour un ddl de 97

$Y = 0,17A - 0,26MO - 0,07LF + 10,55$ (2) pour les horizons de densité apparente 1,5

$r = 0,70$ pour un ddl de 41

5. Fonctions de pédotransfert après stratification texturo –structurale

La stratification texturo-structurale consiste à répartir l'ensemble des horizons dans des sous -classes en tenant compte à la fois de la texture et de la densité apparente des horizons, ce qui a permis de d'obtenir les trois sous –classes suivantes :

- -Horizons de texture argileuse et de densité apparente 1,4 (n=71).
- - Horizons de texture argileuse et de densité apparente 1,5 (n=36).
- - Horizons de texture argilo-limoneuse et de densité apparente 1,4 (n=32).

Les horizons de texture argilo-limoneuse de densité apparente 1,5 dont le nombre d'individus est très faible (n=07), ne peuvent de ce fait faire l'objet de calculs de prédiction.

5.1. Variables indépendantes: argile et limon fin

5.1.1. Équations de régression à pF 3

Après stratification texturo-structurale l'addition de la valeur des limons fins explique des corrélations significatives au seuil de 5 %.

Classe de texture	Valeur de Da	Variabes indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Argileuse	1,4	A, LF	$Y_1=0,21A+0,07LF+9,98$			0,14	*
	1,5	A, LF	$Y_2=-0,19A-0,09LF+28,87$	33	0,36	0,13	*
Argilo-limoneuse	1,4	A, LF	$Y_3=0,16A+0,20LF+7,69$	29	0,60	0,36	*

Tableau XXXII. Relations entre les variables A, LF, et la rétention en eau à pF 3

A pF3, les équations de régressions permettent d'observer l'effet remarquable des argiles associés aux limons fins sur les horizons de texture argilo- limoneuse de densité apparente 1,4, ils présentent le coefficient de corrélation le plus élevé (r=0,60).

En effet, les limons fins agissent favorablement sur la rétention en eau par l'augmentation de la microporosité et la méso porosité et dans le cas des horizons de texture argilo- limoneuse il s'agit de la microporosité résultant de l'organisation des particules argileuses et limoneuses.

5.1.2. Équations de régression à pF 4,2

Classe de texture	Valeur de Da	Variabes indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Argileuse	1,4	A, LF	$Y_1=0,18A-0,03LF+8,64$			0,21	*
	1,5	A, LF	$Y_2=-0,23A+0,07LF+22,84$	33	0,53	0,29	*
Argilo-limoneuse	1,4	A, LF	$Y_3=0,21A+0,05LF+4,14$	29	0,59	0,35	*

Tableau XXXIII . Relations entre les variables A, LF, et la rétention en eau à 4,2

L'augmentation de la contrainte a amélioré les corrélations des horizons argileux pour les deux densités apparentes. Ces sols constitués essentiellement de micropores, ce qui explique qu'aux bas potentiels la rétention en eau y est plus élevée.

5.2. Variables indépendantes : argile et matière organique

5.2.1. Équations de régression à pF 3

Classe de texture	Valeur de Da	Variabes indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Argileuse	1,4	A, MO	$Y_1=0,20A+1,14MO+11,06$	68	0,42	0,18	*
	1,5	A, MO	$Y_2=0,17A+0,76MO+13,33$	33	0,45	0,20	*
Argilo-limoneuse	1,4	A, MO	$Y_3=0,15A+0,63MO+14,42$	29	0,40	0,16	*

Tableau XXXIV . Relations entre les variables A, MO, et la rétention en eau à pF 3

Toutes les équations sont significatives au seuil de 5%. La prise en compte de la matière organique en remplacement des limons fins a eu des effets différents selon la texture et la structure des sols. Un effet négatif sur les horizons argilo-limoneux, le coefficient de corrélation a été réduit de 0,20 alors que celui des sols argileux s'est amélioré mais de manière différente, il est plus élevé dans les horizons de densité 1,5.

D'une part, L'examen des équations régression, montre que l'effet de la matière organique est plus élevé pour les horizons de texture argileuse que les horizons de texture argilo- limoneuse à pF1,5

D'autre part l'effet de la matière organique est plus important que celui des limons fins.

5.2.2. Équations de régression à pF 4,2

Classe de texture	Valeur de Da	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Argileuse	1,4	A, MO	$Y_1=0,19A-0,09MO+7,1$	68	0,45	0,20	*
	1,5	A, MO	$Y_2=0,20A-0,34MO+7,03$	33	0,52	0,27	*
Argilo-limoneuse	1,4	A, MO	$Y_3=0,21A+0,23MO+6,02$	29	0,57	0,32	*

Tableau XXXV . Relations entre les variables A, MO, et la rétention en eau à pF 4,2

Lorsque les sols sont soumis à 16000 hPa les limons et la matière organique ont des effets sensiblement équivalent. L'effet de la matière organique, malgré son caractère hydrophile est contrarié par les teneurs élevées des limons fins.

5.3. Variables indépendantes: argile, matière organique et limon fin.

5.3.1. Équations de régression à pF 3

Les équations de régressions présentent un résultat significatif au seuil de 0,05.

Classe de texture	Valeur de Da	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Argileuse	1,4	A, MO, LF	$Y_1=0,21A+0,62MO+0,06LF+9,76$	67	0,46	0,21	*
	1,5	A, MO, LF	$Y_2=0,18A+0,56MO-0,06LF+11,13$	32	0,48	0,23	*
Argilo-limoneuse	1,4	A, MO, LF	$Y_3=0,15A+0,37MO+0,19LF+8,28$	28	0,62	0,38	*

Tableau XXXVI . Relations entre les variables A, MO, LF et la rétention en eau à pF 3

A pF 3, les limons fins expliquent une variation de coefficient de corrélation, particulièrement pour les horizons de texture argilo- limoneuse (r=0,62), ce qui peut être expliqué par une amélioration de la teneur en eau due certainement à l'augmentation de la porosité fine.

5.3.2. Équations de régression à pF 4,2

Classe de texture	Valeur de Da	Variabes indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Argileuse	1,4	A, MO, LF	$Y_1=0,18A+0,01MO-0,03LF+8,36$	67	0,46	0,21	*
	1,5	A, MO, LF	$Y_2=0,19A+0,15MO-0,22LF+12,92$	32	0,76	0,58	*
Argilo-limoneuse	1,4	A, MO, LF	$Y_3=0,021A+0,16MO+0,05LF+4,40$	28	0,59	0,35	*

Tableau **XXXVII** . Relations entre les variables A, MO, LF et la rétention en eau à pF 4,2

À pF 4,2, l'intégration de la valeur des limons fins à la relation statistique améliore la qualité de prédiction notamment pour les horizons de texture argileuse et de densité apparente 1,5 (r=0,76), cependant ces résultats de corrélations sont plus intéressants que ceux obtenus à pF 3, ce qui reflète la part des limons fins dans la rétention en eau lorsque la pression augmente.

5.4. Variables indépendantes : argile, matière organique, limon fin et limon grossier

5.4.1. Équations de régression à pF 3

A pF 3 limons grossiers n'expliquent pas une grande variation de la teneur en eau, cependant les équations de régression définissent un résultats significatif.

Classe de texture	Valeur de Da	Variabes indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Argileuse	1,4	A, MO, LF, LG	$Y_1= 0,19A+0,92MO-0,12LG+0,022LF+12,23$	66	0,44	0,19	*
	1,5	A, MO, LF, LG	$Y_2= 0,15A+0,40MO-0,23LG+0,37LF+15,46$	31	0,47	0,21	*
Argilo-limoneuse	1,4	A, MO, LF, LG	$Y_3= 0,11A+0,16MO-0,28LG+0,13LF+12,23$	27	0,66	0,44	*

Tableau **XXXVIII** . Relations entre les variables A, MO, LF, LG et la rétention en eau à pF 3

La contribution des limons grossiers à la rétention en eau est très faible, le coefficient de corrélation ne s'améliore que pour les horizons de texture argilo-limoneuse, le faible apport peut être expliqué par la présence d'une gamme de pores (mésopores et macropores) qui ne retiennent pas l'eau à des succions élevées.

5.4.2. Équations de régression à pF 4,2

Tableau **XXXIX**. Relations entre les variables A, MO, LF, LG et la rétention en eau à pF 4,2

Classe de texture	Valeur de Da	Variabes indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Argileuse	1,4	A, MO, LF, LG	$Y_1= 0,18A+0,02MO+0,017LG-0,03LF+8,22$	66	0,46	0,21	*
	1,5	A, MO, LF, LG	$Y_2= 0,20A-0,11MO+0,07LG-0,21LF+12,19$	31	0,74	0,59	*
Argilo-limoneuse	1,4	A, MO, LF, LG	$Y_3= 0,19A+0,07MO-0,11LG+0,026LF+6,85$	27	0,61	0,37	*

Si on compare les tableaux XXXVIII et XXXIX, nous remarquons que les effets des limons

grossiers peuvent être parfois positifs et parfois négatifs selon la texture et la densité apparente. Cependant les différences sont négligeables. Les analyses granulométriques montre que les teneurs de cette fraction sont très faibles.

la pression augmente, la teneur en eau diminue, seule l'eau localisée dans les pores les plus fins qui persiste, c'est pour cette raison que le coefficient de corrélation augmente légèrement pour les horizons de texture argilo-limoneuse de densité apparente 1,4 ($r=0,61$).

5.5. Variables indépendantes : argile, matière organique, limon fin et limon grossier, sable fin

5.5.1. Équations de régression à pF 3

Classe de texture	Valeur de Da	Variabiles indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Argileuse	1,4	A, MO, LF, LG, SF	$Y_1 = 0,17A + 0,93MO + 0,01LF - 0,12LG - 0,01SF + 13,29$	65	0,44	0,19	*
	1,5	A, MO, LF, LG, SF	$Y_2 = 0,01A + 1,05MO - 0,34LF - 0,14LG - 0,20SF + 32,98$	30	0,62	0,38	*
Argilo-limoneuse	1,4	A, MO, LF, LG, SF	$Y_3 = 0,14A + 0,17MO + 0,17LF - 0,23LG + 0,06SF + 10,42$	26	0,61	0,37	*

Tableau XL. Relations entre les variables A, MO, LF, LG, SF et la rétention en eau à pF 3

En ce qui concerne les sables fins, leur poids est très faible dans la rétention en eau, leur introduction à la relation statistique apporte une légère aux horizons de texture argileuse de densité apparente 1,5.

Elle est faible pour l'horizon argilo-limoneux.

5.5.2. Équations de régression à pF 4,2

Classe de texture	Valeur de Da	Variabiles indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Argileuse	1,4	A, MO, LF, LG, SF	$Y_1 = 0,16A + 0,05MO - 0,05LF + 0,002LG - 0,02SF + 10,18$	65	0,46	0,21	*
	1,5	A, MO, LF, LG, SF	$Y_2 = 0,19A - 0,11MO - 0,22LF + 0,07LG - 0,009SF + 12,83$	30	0,48	0,24	*
Argilo-limoneuse	1,4	A, MO, LF, LG, SF	$Y_3 = 0,22A + 0,08MO + 0,07LF - 0,06LG + 0,06SF + 2,99$	26	0,62	0,38	*

Tableau XLI. Relations entre les variables A, MO, LF, LG, SF et la rétention en eau à pF 4,2

L'influence des contraintes a engendré une réduction du coefficient de corrélation des sols argileux de densité apparente 1,5. Les sables fins étant responsables de la macroporosité, ils réduisent de ce fait la rétention en eau aux bas potentiels.

L'analyse des valeurs des coefficients de corrélation indique que l'équation la plus représentative à ce niveau de stratification est celle des horizons de texture argilo-limoneuse de densité apparente 1,5 obtenue à pF 4,2 avec les combinaisons de l'argile , la matière organique les limons fins .

$$Y=0,19A+0,15MO-0,22LF+12,92..... (1) \quad r=0,76 \text{ pour un ddl de } 32$$

6. Relations entre la CEC et la rétention en eau du sol

De nombreux auteurs (Tessier *et al.* , 1999) ont montré que la CEC pouvait constituer un paramètre judicieux et donc un bon estimateur des propriétés de rétention en eau. C'est ainsi que la CEC a été mise en relation avec la rétention en eau en remplacement de l'argile et la matière organique, ces deux facteurs étant à l'origine de l'essentiel de la CEC (Tessier *et al.* , 1999).

6.1. Fonctions de pédotransfert après stratification texturale

6.1.1. Variables indépendantes : CEC et limon fin

6.1.1.1. Équations de régression à pF 3

À pF 3 les équations de régressions expriment des corrélations non significatives au seuil de 5% pour l'ensemble des horizons et les horizons de texture argileuse.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	CEC, LF	$Y_1=0,04 \text{ CEC}-0,015 \text{ LF}+20,70$	151	0,12	0,01	ns
Texture argileuse (A)	CEC, LF	$Y_2=0,02 \text{ CEC}-0,03 \text{ LF}+23,20$	108	0,10	0,01	ns
Textures argilo-limoneuse (AL)	CEC, LF	$Y_3=0,04 \text{ CEC}-0,21 \text{ LF}+12,88$	34	0,57	0,33	*

Tableau **XLII**. Relations entre les variables CEC, LF et la rétention en eau à pF 3

Malgré la présence des limons, la CEC s'avère être un mauvais estimateur de la rétention en eau aux hauts et moyen potentiels, car à ce niveau d'énergie, la structure des sols est mieux reliée à la rétention en eau.

La comparaison des tableaux XIV et XLII, montre que lorsque la CEC remplace l'argile et la matière organique, les équations de régressions deviennent non significatives pour l'ensemble des horizons et les horizons argileux. Dans la littérature scientifique, Tessier *et al.* (1999) estiment que la corrélation est forte entre la CEC à pH 7 et la teneur en eau à pF 4,2. Par ailleurs, nous n'avons pas d'informations sur le pH et la CEC de la base de données que nous avons utilisé.

6.1.1.2. Équations de régression à pF 4,2

Lorsque la contrainte est égale à pF 4,2, les corrélations deviennent significatives au seuil de 5 %, la CEC devient un facteur prédictif car à ce niveau elle se substitue à l'argile.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	CEC, LF	$Y_1=0,03 \text{ CEC}-0,08\text{LF}+17,80$	151	0,29	0,087	*
Texture argileuse (A)	CEC, LF	$Y_2=0,01 \text{ CEC}-0,12\text{LF}+19,75$	108	0,31	0,09	*
Textures argilo-limoneuse (AL)	CEC, LF	$Y_3=0,02\text{CEC}+0,10\text{LF}+17,68$	34	0,30	0,09	*

Tableau XLIII. Relations entre les variables CEC, LF et la rétention en eau à pF 4,2

A pF 4,2 la qualité de prédiction s'améliore notablement pour l'ensemble des horizons et les horizons de texture argileuse, les coefficients de corrélation sont respectivement de 0,29 et 0,31, cependant une diminution du r est enregistrée pour les horizons de texture argilo-limoneuse.

En se référant aux corrélations obtenues avec l'argile et la matière organique, la CEC reste moins bien corrélée à la teneur en eau aux deux potentiels.

En se référant au tableau XV, nous remarquons que la CEC engendre une liaison nettement plus faible lorsque elle remplace l'argile et la matière organique. De ce fait, ce paramètre ne peut constituer un bon estimateur de la rétention en eau aussi bien aux bas qu'aux hauts potentiels.

6.1.2. Variables indépendantes : CEC, limon fin, limon grossier

6.1.2.1. Équations de régression à pF 3

.La CEC, les limons fins et limons grossiers déterminent des corrélations significatives au seuil

$\alpha= 0,05$.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	CEC, LF, LG	$Y_1=0,017\text{CEC}-0,33\text{LG}-0,0008\text{LF}+24,41$	150	0,36	0,13	*
texture argileuse (A)	CEC, LF, LG	$Y_2=0,01\text{CEC}-0,23\text{LG}-0,06\text{LF}+25,61$	107	0,24	0,060	*
textures argilo-limoneuse (AL)	CEC, LF, LG	$Y_3=-0,01\text{CEC}-0,4\text{LG}+0,10\text{LF}+25,50$	33	0,67	0,45	*

Tableau XLIV. Relations entre les variables CEC, LF, LG et la rétention en eau à pF 3

L'addition de la valeur des limons grossier à la relation statistique améliore la qualité de prédiction, cette amélioration est plus importante dans le cas des horizons de texture argilo-limoneuse ($r=0,67$).

Le r des horizons de texture argilo-limoneuse est proche de celui obtenu avec l'argile et la matière organique ($r=0,70$), dans ce cas ces résultats confirment les travaux de Bigorre *et al.* (1999) qui indiquent que les argiles et la matière organique possèdent aux bas potentiels des propriétés d'hydratation propres et additives.

6.1.2.2. Équations de régression à pF 4,2

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	CEC, LF, LG	$Y_1=0,02CEC-0,17LG-0,009LF+19,73$	150	0,36	0,13	*
Texture argileuse (A)	CEC, LF, LG	$Y_2=0,017CEC-0,13LG-0,06LF+20,44$	107	0,32	0,10	*
Textures argilo-limoneuse (AL)	CEC, LF, LG	$Y_3=-0,004CEC-0,30LG-0,01LF+18,99$	33	0,48	0,23	*

Tableau XLV. Relations entre les variables CEC, LF, LG et la rétention en eau à pF 4,2

Les limons grossiers entraînent de légères augmentations des coefficients de corrélation, particulièrement pour les horizons argilo-limoneux. En général, les limons grossiers contribuent peu à la rétention en eau, ceci est d'autant plus vrai dans les vertisols où leurs taux sont très bas.

6.1.3. Variables indépendantes : CEC, limon fin, limon grossier, sable fin

6.1.3.1. Équations de régression à pF 3

Les équations de régressions à pF 3 présentent un résultat significatif au seuil de 5 %.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	CEC, LF, LG, SF	$Y_1=0,02CEC-0,04LF-0,33LG-0,12SF+26,88$	149	0,42	0,17	*
Texture argileuse (A)	CEC, LF, LG, SF	$Y_2=0,02CEC-0,12LF-0,25LG-0,15SF+28,83$	106	0,35	0,12	*
Textures argilo-limoneuse (AL)	CEC, LF, LG, SF	$Y_3=-0,01CEC+0,12LF-0,42LG+0,03SF+21,68$	32	0,67	0,45	*

Tableau XLVI. Relations entre les variables CEC, LF, LG, SF et la rétention en eau à pF 3

A l'exception des horizons de texture argilo-limoneuse, l'adjonction des sables fins a engendré une légère amélioration de la corrélation, en effet les sables fins comme les limons grossiers participent faiblement à la réserve en eau des sols.

6.1.3.2. Équations de régression à pF 4,2

Malgré l'introduction des sables fins, toutes les équations sont significatives au seuil de 5 %.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	CEC, LF, LG, SF	$Y_1=0,02CEC-0,15LF-0,17LG-0,15SF+12,82$	149	0,48	0,23	*
Texture argileuse (A)	CEC, LF, LG, SF	$Y_2=0,025CEC-0,12LF-0,09LG-0,17SF+24,14$	106	0,47	0,22	*
Textures argilo-limoneuse (AL)	CEC, LF, LG, SF	$Y_3=-0,006CEC-0,03LF-0,3LG-0,04SF+19,98$	32	0,48	0,23	*

Tableau XLVII. Relations entre les variables CEC, LF, LG, SF et la rétention en eau à pF 4,2

Les sables ont eu un effet sur la rétention en eau pour l'ensemble des sols et pour la texture argileuse à pF 4,2, cependant leur contribution reste limitée en raison de la faible amélioration de la corrélation. La comparaison des résultats avec les mêmes variables mais à des contraintes différentes indique que la contrainte la plus élevée améliore la relation pour l'ensemble des horizons et pour les horizons argileux. Le rôle de cette fraction améliore parfois le volume total des vides, c'est une pratique utilisée sur des surfaces restreintes.

6.1.4. Variables indépendantes : CEC, limon fin, limon grossier, sable fin, densité apparente

6.1.4.1. Équations de régression à pF 3

La densité apparente n'apporte aucune amélioration à la qualité de la prédiction, toutefois les équations sont significatives.

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	CEC, LF, LG, SF, Da	$Y_1=0,02CEC-0,04LF-0,33LG-0,12SF+2,13Da+30,22$	148	0,42	0,17	*
Texture argileuse (A)	CEC, LF, LG, SF, Da	$Y_2=0,02CEC-0,12LF-0,25LG-0,15SF-0,09Da+28,97$	105	0,35	0,12	*
Textures argilo-limoneuse (AL)	CEC, LF, LG, SF, Da	$Y_3=-0,01CEC+0,12LF-0,43LG+0,03SF+3,5Da+16,83$	31	0,67	0,44	*

Tableau XLVIII. Relations entre les variables CEC, LF, LG, SF, Da et la rétention en eau à pF 3

Contrairement à la bibliographie qui indique l'importance de la structure du sol à travers la densité apparente (Bruand *et al.*, 2002), les résultats obtenus montrent que ce paramètre n'a aucun effet sur l'ensemble des sols et sur les horizons argileux. Ce comportement est probablement lié au type de sol, lequel est caractérisé par excès d'argile peu sensible aux faibles différences de densité apparente mesurée.

6.1.4.2. Équations de régression à pF 4,2

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	CEC, LF, LG, SF, Da	$Y_1=0,02CEC-0,15LF-0,17LG-0,15SF+1,23Da+21,00$	148	0,48	0,23	*
Texture argileuse (A)	CEC, LF, LG, SF, Da	$Y_2=0,02CEC-0,12LF-0,09LG-0,17SF+0,31Da+23,67$	107	0,47	0,22	*
Textures argilo-limoneuse (AL)	CEC, LF, LG, SF, Da	$Y_3=0,007CEC-0,03LF-0,31LG-0,03SF+2,6Da+16,34$	31	0,48	0,24	*

Tableau **XLIX**. Relations entre les variables CEC, LF, LG, SF, Da et la rétention en eau à pF 4,2

Avec les mêmes variables explicatives et des contraintes différentes, la densité apparente apporte une faible contribution à l'ensemble des horizons et aux horizons argileux mais un effet inverse sur les horizons argilo- limoneux.

Pour déterminer les corrélations les plus fortes qui traduisent les meilleures relations entre les variables explicatives et la rétention en eau, trois équations incluant la CEC, les limons fins, les limons grossiers ainsi que les sables fins ont été sélectionnées.

$Y=0,02CEC-0,15LF-0,17LG-0,15SF+12,82.....$ (1). Pour l'ensemble des horizons à pF 4,2

$r=0,48$ avec un ddl de 149

$Y=0,025CEC-0,12LF-0,09LG-0,17SF+24,14....$ (.2). Pour les horizons de texture argileuse à pF 4,2

$r=0,47$ avec un ddl de 103

$Y=-0,01CEC+0,12LF-0,42LG+0,03SF+21,68.....$ (3). Pour les horizons de texture argilo- limoneuse à pF 3

$r=0,67$ avec un ddl de 33

7. Relations entre les caractéristiques du sol et la réserve utile

La réserve utile du sol résulte de la différence entre la capacité de rétention et l'humidité au point de flétrissement permanent, ces deux points dépendent des caractéristiques des sols. Dans le but d'étudier la relation entre ce paramètre et les constituants du sol, nous avons établi les régressions correspondant aux différentes variables.

7.1. Fonctions de pédotransfert après stratification texturale

7.1.1. Variables indépendantes: argile et matière organique

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	A, MO	$Y_1 = -0,03A + 0,74MO + 6,68$	151	0,34	0,12	*
Texture argileuse (A)	A, MO	$Y_2 = -0,002A + 1,16MO + 4,58$	108	0,40	0,16	*
Textures argilo-limoneuse (AL)	A, MO	$Y_3 = -0,03A + 0,51MO + 7,15$	34	0,32	0,10	*

Tableau L. Relations entre les variables A, MO et la réserve utile du sol

A la lecture des résultats du tableau L, il ressort que l'argile et la matière organique définissent des relations significatives, cependant la valeur la plus élevée du coefficient de corrélation est enregistrée pour les horizons de texture argileuse, ce qui nous amène à déduire que la grande part dans la relation revient à l'argile qui contribue à la rétention en eau par sa porosité fine ainsi que par les charges de surfaces.

D'après de nombreux travaux portant sur ce sujet (Mc Rae et Mehuys, 1985 ; Bauer et Black, 1992), l'effet de la matière organique sur la réserve utile reste faible, car elle tend à augmenter la rétention en eau autant à la capacité au champ qu'au point de flétrissement, si bien que l'effet sur le stock d'eau peut être considéré comme négligeable.

7.1.2. Variables indépendantes: argile, matière organique et limon fin

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	A, MO, LF	$Y_1 = 0,002A + 0,58MO + 0,081LF + 2,75$	150	0,45	0,21	*
Texture argileuse (A)	A, MO, LF	$Y_2 = 0,01A + 1,05MO - 0,06LF + 2,38$	107	0,43	0,19	*
Textures argilo-limoneuse (AL)	A, MO, LF	$Y_3 = -0,02A + 0,17MO + 0,14LF + 2,13$	33	0,66	0,44	*

Tableau LI. Relations entre les variables A, MO, LF et la réserve utile du sol

Les coefficients de corrélation s'améliorent pour les trois types d'horizons, notamment pour les horizons argilo-limoneux, le r a doublé. En effet, de nombreux travaux ont montré que les limons fins contribuent à la réserve en eau du sol, c'est ainsi d'ailleurs que les sols limoneux disposent d'un stock d'eau plus important.

7.1.3. Variables: indépendantes argile, matière organique, limon fin et limon grossier

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	A, MO, LF, LG	$Y_1 = -0,02A + 0,47MO + 0,07LF - 0,15LG + 5,59$	149	0,50	0,25	*
Horizons de texture argileuse (A)	A, MO, LF, LG	$Y_2 = -0,008A + 0,96MO + 0,04LF - 0,13LG + 4,84$	106	0,47	0,22	*
Horizons de textures argilo-limoneuse (AL)	A, MO, LF, LG	$Y_3 = -0,06A + 0,13MO + 0,10LF - 0,15LG + 6,63$	32	0,70	0,49	*

Tableau LII. Relations entre les variables A, MO, LF, LG et la réserve utile du sol

Le poids des limons grossiers est relativement faible car sa contribution à la rétention en eau est limitée en raison de sa dimension qui favorise plutôt la formation des méso et macropores.

7.1.4. Variables indépendantes : argile, matière organique, limon fin, limon grossier, sable fin

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	A, MO, LF, LG, SF	$Y_1 = -0,03A + 0,48MO + 0,06LF - 0,15LG - 0,01SF + 6,31$	148	0,50	0,25	*
Texture argileuse (A)	A, MO, LF, LG, SF	$Y_2 = -0,03A + 0,99MO + 0,02LF - 0,15LG - 0,03SF + 7,22$	105	0,47	0,22	*
Textures argilo-limoneuse (AL)	A, MO, LF, LG, SF	$Y_3 = -0,05A + 0,15MO + 0,12LF - 0,14LG - 0,04SF + 4,81$	31	0,70	0,49	*

Tableau LIII. Relations entre les variables A, MO, LF, LG, SF et la réserve utile du sol

Les résultats du tableau LIII, confirment la littérature selon laquelle les sables fins n'ont pas d'effet sur la rétention en eau.

7.1.5. Variables indépendante: argile, matière organique, limon fin, limon grossier, sable fin, densité apparente

Horizons	Variables indépendantes	Equations de régressions	ddl	r	R ²	Sgn
Ensemble des horizons	A, MO, LF, LG, SF, Da	$Y_1 = -0,03A + 0,48MO + 0,06LF - 0,15LG - 0,01SF + 0,88Da + 5,05$	147	0,50	0,25	*
Texture argileuse (A)	A, MO, LF, LG, SF, Da	$Y_2 = -0,03A + 1MO + 0,01LF - 0,15LG - 0,03SF + 1,69Da + 9,92$	104	0,47	0,22	*
Textures argilo-limoneuse (AL)	A, MO, LF, LG, SF, Da	$Y_3 = 0,05A + 0,15MO + 0,12MO + 0,01LF - 0,15LG + 0,03SF + 1,83Da + 2,51$	30	0,70	0,49	*

Tableau LIV. Relations entre les variables A, MO, LF, LG, SF, Da et la réserve utile du sol

Les coefficients de corrélation restent stables dans le cas de l'introduction de la valeur de la densité apparente, ce qui explique l'effet nul de cette propriété sur la réserve utile du sol, celle-ci est dépendante de la texture des sols lorsqu'ils sont argileux.

L'exploitation des résultats relatifs aux équations de régressions obtenues pour prédire la réserve utile du sol, nous permet de sélectionner les équations les plus représentatives, celles qui incluent l'argile, la matière organique, les limons fins et les limons grossiers.

8. Discussion

8.1. Prédiction de la rétention de l'eau

La rétention en eau est liée aux principales caractéristiques des sols, celles-ci sont différentes selon leur nature (taille et minéralogie des constituants, proportion et nature des constituants organiques) et leur mode d'assemblage (structure).

Les principales caractéristiques du sol utilisées pour estimer les teneurs en eau sont la composition granulométrique, la teneur en matière organique et la capacité d'échange cationique.

Les résultats obtenus montrent que l'argile et la matière organique notamment à pF 4,2 expliquent une grande part de la rétention en eau. Par contre, la CEC apparaît moins performante, de ce fait les corrélations qui lui sont associées sont beaucoup plus faibles que celles de la somme de l'argile et de la matière organique

En fonction du potentiel hydrique, les différentes caractéristiques n'ont pas la même contribution vis-à-vis la rétention en eau. En général, aux hauts potentiels, le mode d'assemblage (structure) améliore la rétention en eau, tandis qu'aux bas potentiels, l'argile et la matière organique s'avèrent être les meilleurs estimateurs.

8.2. Variation de la teneur en eau résultant de la stratification texturale

Les résultats montrent que la rétention en eau est bien corrélée aux différentes fractions minérales du sol, de ce fait, aux faibles potentiels, la teneur en eau est étroitement liée à l'argile, à ce niveau d'énergie seuls les pores de diamètre équivalent $<10\mu\text{m}$ sont occupés par l'eau. Ces pores résultent de l'assemblage des particules d'argile (Bruand *et al.*, 2002). En effet, la texture conditionne largement l'énergie de rétention en eau, cette énergie est d'autant plus grande que les pores sont de petite taille (Faure, 1978).

Lorsque la contrainte est égale à pF 3, la corrélation traduisant les effets des limons fins indique une amélioration des relations, particulièrement pour les horizons argilo-limoneux. Aux bas potentiels la contribution des limons fins est observée uniquement après stratification texturale. Cependant l'effet

des limons grossiers et sables fins est négligeable. Ce constat est contraire à certains résultats bibliographiques dont les bases de données portent sur les sols de constituants hétérogènes.

8.3 .Variation de la teneur en eau résultant de la stratification structurale

Les résultats montrent qu'aux potentiels moyens (pF 3), la densité apparente affecte faiblement la prédiction, le r passe de 0,47 pour l'ensemble des sols sans stratification structurale à 0,43 et 0,45 pour respectivement les densités apparentes 1,4 et 1,5. Lorsqu'on augmente la pression à 16000 hPa, nous constatons une amélioration de la corrélation, elle passe de 0,52 sans stratification structurale à 0,70 pour la densité apparente 1,5. Une compaction modérée des sols réduit légèrement le volume des vides mais modifie fortement la configuration de la porosité en augmentant les micropores.

Dans notre travail nous n'avons pas testé l'influence de la structure du sol aux hauts potentiels, car ces données ne sont pas disponibles dans la base de données.

8.4. Effet de la CEC sur la rétention en eau

Si on admet que la teneur en eau aux bas potentiels est étroitement liée à la composition granulométrique de l'échantillon (Hénin, 1977), Tessier *et al.* (1999), précisent que seules les fractions fines affectent les propriétés hydriques aux bas potentiels, de ce fait, la CEC mesurée à pH7 peut se substituer à l'argile. Le tableau XLII montre des corrélations non significatives à pF 3 lorsque la CEC est testée comme prédicateur de la rétention en eau. Lorsque la contrainte est plus élevée, les corrélations sont significatives, la CEC apparaît comme étant prédicateur de qualité moyenne. En effet, les résultats des tableaux n° XVI et XVII comparés aux n° XLVI et XLVII montrent des corrélations significatives mais de moindre qualité lorsque la CEC remplace l'argile et la matière organique et ce quelque soit le potentiel appliqué.

8.5. Effet de la matière organique sur la rétention en eau

L'analyse des résultats des différents tableaux met en évidence un effet moyen de la matière organique à pF 3 tandis qu'à pF 4,2, son influence sur la rétention en eau est faible, parfois nulle notamment si on considère l'ensemble des sols, ce qui peut être expliqué par le fait que l'effet de la matière organique est masqué dans la régression statistique par les teneurs élevées d'argile ainsi que les faibles énergies de surfaces incapable de retenir l'eau fortement lorsque la contrainte augmente (Bigorre,2000).

8.6. Prédiction de la réserve utile du sol

Les résultats montrent que l'argile et les limons fins contribuent à l'augmentation de la réserve utile des sols, en effet, avec leur porosité très fine ils confèrent aux sols un pouvoir de rétention très important.

Par contre, la matière organique a un effet très faible sur la réserve utile, ce qui confirme les avis des auteurs qui ont travaillé sur cet aspect et qui expliquent que l'influence de la matière organique sur la réserve utile reste faible, car elle tend à augmenter la rétention en eau autant à la capacité au champ qu'au point de flétrissement permanent, si bien que l'effet sur le stock d'eau peut être considéré comme négligeable (Bauer et Black ,1992).

Les limons grossiers et sables fins n'affectent pas la qualité de la prédiction, leur participation à la rétention en eau est limitée, ceci s'explique par la présence d'une méso et macroporosité importante défavorables à la rétention en eau des sols.

9. Validations des fonctions de pédotransfert

9.1. Validation des classes de pédotransfert

Les fonctions de pédotransfert permettent de prédire les teneurs en eau aux mêmes valeurs de potentiels auxquelles elles ont été établies.

Nous avons comparé les teneurs en eau prédites à l'aide des fonctions de pédotransfert établies à celles mesurées à partir des 20 échantillons utilisés pour tester les fonctions de pédotransfert (échantillons de validations).

Pour discuter de la qualité de la prédiction obtenue avec de telles fonctions, nous avons calculé pour l'ensemble des horizons l'erreur moyenne de prédiction (EMP_{moy}) définie par :

$$EMP = 1/n \sum (W_{Pré} - W_{Mes})$$

Avec n , le nombre d'horizons considérés, $W_{Pré}$ la teneur en eau prédite par les fonctions de pédotransfert et W_{Mes} la teneur en eau mesurée.

La prédiction est d'autant moins biaisée que EMP_{moy} est proche de 0. Par ailleurs, les fonctions surestiment la teneur en eau lorsque EMP_{moy} est positive et la sous-estiment lorsque EMP_{moy} est négative (Bruant *et al.*, 2002).

Pour évaluer la précision des différentes fonctions de pédotransfert sélectionnées, nous avons utilisé un autre critère d'erreur, c'est l'écart type de prédiction (ETP):

$$ETP = \left\{ 1/n \sum [(W_{Pré} - W_{Mes}) - EMP]^2 \right\}^{1/2}$$

L'écart type de précision renseigne sur la précision de l'estimation, celle-ci est d'autant plus élevée que ETP est faible (Bruant *et al.*, 2002).

9.2. Biais des prédictions

Si on compare les teneurs en eau déterminées pour les horizons constituant les échantillons de validation et celles des horizons ayant servi à l'établissement des fonctions de pédotransfert, on constate une sous-estimation globale de la teneur en eau pour la plupart des horizons.

Horizons	n	EMP %	ETP %
Stratification texturale			
Ensemble des horizons	154	-0,027	3,30
Texture argileuse	108	0,17	1,85
Texture argilo-limoneuse	38	-2,86	1,73
Stratification structurale			
Da 1,4	101	-0,37	1,97
Da 1,5	45	-0,23	1,38
Stratification texturo-structurale			
Texture Argileuse Da 1,4	71	-0,21	1,19
Texture argilo-limoneuse Da 1,4	32	-1,54	2,48

Tableau LV. Validation des fonctions de pédotransfert

Les FPT sous- estiment très faiblement la teneur en eau après la stratification texturale, excepté pour les horizons de texture argileuse dont le biais est positif (0,17 %).

Après stratification structurale, le biais de l'estimation reste faible particulièrement avec la densité 1,5, l'ETP reste limité. La stratification texturo-structurale donne de meilleures prédictions pour les horizons de texture argileuse et de densité apparente 1,4.

Classes de pédotransfert	EMP (%)	ETP (%)
A	-1,28	1,03
Da 1,4	-1,12	2,36
A/Da 1,4	-1,32	1,38

Tableau LVI. Validation des fonctions de pédotransfert

Les résultats de validation par un second ensemble d'horizons issus de la même aire géographique ont donné des biais moins intéressants. Le faible nombre d'échantillons tests et l'absence d'une diversité texturale et structurale lors des prélèvements expliquent la qualité moyenne des estimations.

Au terme de ces résultats, il apparaît que lorsqu'on teste les fonctions de pédo-transfert sur l'ensemble des échantillons correspondant à ceux à partir desquels elles ont été établies, les résultats sont plus satisfaisants.

Conclusion générale

Ce travail a pour objectif l'établissement de fonctions de pédotransfert de prédiction des propriétés de rétention en eau des vertisols de la région de Meftah dans la Mitidja. La démarche a consisté à mettre en relation sous forme mathématique, les caractéristiques du sol et les teneurs en eau à deux potentiels.

Des traitements statistiques sont réalisés sur des données réparties par classes de textures et classes de structure ainsi qu'une classe intégrant la texture et l'état structural des différents horizons à étudier (classe texturo-structurale).

Les résultats obtenus ont montré que :

Les fractions fines expliquent la plus grande proportion de l'eau fixée par le sol, de ce fait l'argile et les limons fins sont d'un poids élevé dans la rétention en eau, en effet, leur texture fine ainsi que la microporosité qui en découle, conditionnent l'énergie de rétention en eau, cette énergie est d'autant plus grande que les pores sont de petite taille, ces résultats sont en accord avec ceux cités dans plusieurs travaux (Bruand *et al.*, 2002; Faure, 1978).

La relation entre la matière organique et les teneurs en eau est très faible, particulièrement à pF 4,2. Les grandes variations de la teneur en argile dans les vertisols, ainsi que les faibles énergies de surfaces des matières organiques, incapables de retenir l'eau aux fortes pressions, expliquent leur faible contribution.

L'influence des limons grossiers et des sables fins vis-à-vis de la rétention en eau est négligeable aux deux pF étudiés, en effet, la macroporosité engendrée par leur présence est défavorable à la rétention en eau.

Par ailleurs, la structure du sol exprimée par la densité apparente est d'un poids nul dans la rétention en eau notamment à pF 4,2, ces résultats sont en accord avec les travaux réalisés dans ce domaine (Bruand *et al.*, 2002). Ces auteurs expliquent que la densité apparente a un effet sur la rétention en eau uniquement aux hauts potentiels. Dans notre travail, les teneurs élevées de l'argile dans les vertisols masquent l'effet de la densité apparente dont les variations sont très limitées.

Les résultats relatifs à la relation entre la CEC et la teneur en eau, indiquent que ce paramètre physico-chimique peut être considéré comme un prédicteur de moyenne à faible qualité aux bas potentiels lorsque qu'il se substitue à l'argile et la matière organique.

Les différents résultats montrent que la stratification texturale n'a eu d'effet que sur les horizons de texture argilo-limoneuse.

La stratification structurale a eu un effet limité sur la qualité des prédictions à pF 3, ainsi qu'à pF 4,2 pour la densité apparente 1,5 tandis qu'à ce même potentiel, elle a baissé lorsque d.a est de 1,4.

La stratification texturo-structurale à pF 3, améliore la rétention en eau uniquement pour les horizons argileux de densité apparente 1,5, cependant à pF 4,2 elle n'a aucun effet sur la qualité des prédictions.

Les validations effectuées sur les équations obtenues pour l'ensemble des horizons étudiés ainsi que les horizons tests montrent une sous-estimation globale de la teneur

en eau par les fonctions de pédotransfert, la stratification texturo-structurale donne de meilleures prédictions pour les horizons de texture argileuse de densité apparente 1,4.

Les validations montrent que lorsqu' on teste les fonctions de pédotransfert sur l'ensemble des sols correspondant à ceux à partir desquels elles ont été établies, les résultats sont plus satisfaisants.

L'importance et la précision des résultats dépendent de la qualité des analyses physiques et chimiques de la base de données.

Cette étude a permis une estimation satisfaisante des propriétés de rétention en eau des vertisols à deux valeurs de potentiels. Aussi, pour mettre en évidence le maximum de relations fiables pouvant exister entre l'eau et le sol, des études plus détaillées à plusieurs points de potentiels avec une large gamme de densité apparente ainsi qu'avec un nombre d'horizons plus élevé seraient d'un apport certain .

Références 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 SOLYDRO 1.0 : Application à des sols de la région centre. Mémoire de D.E.A. National de Science du Sol, 35 p.
- Al Majou H., Bruand A., Duval O., (2005)** - Contribution des argiles à la rétention de l'eau dans les sols . Institut des sciences de la terre, Géosciences, Université d'Orléans , 2 p.
- Al Majou H., Bruand A., Duval O., Cousin I., (2007)** - Performance de fonction de pédotransfert nationales et européennes pour prédire les propriétés de rétention en eau des sols. Journées Nationales de l'Etude des Sols, avril 2007, Angers
- Anderson S H., Gantzer C J et Brown J R., (1990)** - Soil physical properties after 100 years of continuous cultivation. J. Soil Water Cons. 45, 117-121.
- Arya L M., Paris J F., (1981)** - A physico empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. Soil Sci. Soc. Am. J. 45, 1023-1030.
- Attou F., (1996)** - Etude expérimentale d'assemblages squelette-argile. Apport à la compréhension du comportement physique des sols. Thèse de Doctorat de l'université d'Orléans. 230 p.
- Bastet G., Bruand A., Quélin P. et Cousin I., (1998)** - Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT): Une analyse bibliographique. Etude et Gestion des Sols.5 (1), 7-30.
- Bastet. , (1999)** - Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de fonction de pédotransfert : développement de nouvelles approches. Thèse de l'Université d'Orléans, 214 p.
- Bauer A., Black A., (1992)** - Organic carbon effects on available water capacity of three textural groups. Soil Sci. Am. J. 56, 248-254.
- Ben Hassine H., Ben salem M., Bonin G., Braudeau E. et Zidi C., (2003)** - Réserve utile des sols du Nord-Ouest Tunisien : Evolution sous culture. Etude et gestion des sols, Vol.10, 1, 2003, pp.19-33.
- Bigorre F., Tessier D., et Pedro G., (1999)** - Contribution des argiles et des matières organiques à la rétention de l'eau dans les sols: Signification et rôle fondamentale de la capacité d'échange en cations. Compte rendu de l'académie des sciences, Paris, sciences de la terre et des plantes, n.330 (2000), pp.245-250.
- Bigorre F., (2000)** - Influence de la pédogenèse et de l'usage des sols sur leurs propriétés physique : mécanisme d'évolution et éléments de prévision. Thèse de doctorat, G.F.D. Sciences de la terre , spécialité Science du sol , Université Henri Poincaré , Nancy I , France 145 p.

- Borcard D., (2007)** -Régression multiples: Corrélation multiple et partielle. Ed. Univ. Montréal, Départ. Sci. Bio-2042, 17p.
- Bouma J., Van Lanen H.A.J. , (1987)** -Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities. p 106-111. In : Beek K.J., P.A. Burrough and D.E. McCormack (eds.), Proc. ISSS/SSSA Workshop on Quantified Land Evaluation Procedures. Int. Inst. for Aerospace Surv. and Earth Sci., Publ. No 6, Enschede, The Netherlands.
- Bouma J., (1989)** - Land qualities in space and time. Pp 3-13. In J. Bouma and A.K. Bregt (Ed.) Proc. ISSS symp. On land qualities in space and time, Wageningen, the Netherlands. 22-26 Aug. 1988. Pudoc. Wageningen.
- Bourrie G., Pedro G., (1979)** - La notion de pF, sa signification physicochimique et ses implications pédogénétiques. I-Signification physicochimique. Relations entre le pF et l'activité de l'eau. Science du Sol 4, 313-322.
- Brooks R H., Corey C T.,(1964)** - Hydraulic properties of porous media. Hydrol. Pap. 3, 27 pp. Colo. State Univ. Fort Collins, 1964.
- Bruand A., (1990)** -Improved prediction of water retention properties of clayey soils by pedological stratification. J. Soil Sci. 41, 491-497.
- Bruand A., Baize D; Hardy M., (1994)** -Prediction of water retention properties of clayey soils: validity of relationships using a single soil characteristic. Soil Use and Management, 10, 3, 99-103
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R et Jamagne M., (1996)** - Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. Etude et Gestion des Sols. 3 (1), 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 ,vol .51, pp.679-688.
- Bruand A., Pérez Fernandez P., Duval O., Quélin P., Nicoulaud B., Gaillard H., Raison I., Pessaud J-F., et Prud'homme I. (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., (2003)** -Chapitre 9. Utilizing mineralogical and chemical information in PTFs. en .Scientific ,9p.
- Campbell G S., (1974)** - A simple method for determining unsaturated conductivity moisture retention data. Soil Sci. 117 (6), 311-314.
- Carte topographique de l' ARBAA (1/50000).
- Chenu C., (1993)** -Clay -or -sand -polysaccharides associations as models for the interface between micro-organism sand : water related properties microstructure. Geoderma ,56, pp.143-156.
- Cihacek L J., and Bremner J M.,(1979)** -A simplified Ethylene Glycol Monoethyl ether for determining surface area. Soil Sci. Soc. Am. J. 43, 821-822.
- Cornet A., (1980)** - Observations sur la capacité de rétention, ses relations avec les valeurs de potentiel et la texture des sols sableux du Nord Sénégal. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Biol. n°42, 1980:53-59

- 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 properties of the soils. *Water Resour. Res.*20 (6), 682-690.
- Dagnelie P.; Palm P., (1995)** -Régression multiple et prévision de rendement agricoles de données météorologiques *Notes Stat.Inform.*, Faculté des sciences agronomiques, Gembloux,pp:1-6.Les presses agronomiquesde Gembloux,463p.
- De Jong R. (1983).**Soil water desorption curves estimated from limited data. *Can. J. Soil Sci.*, 63, 697-703.
- Duchaufour P., (1991)** - Pédologie. Sol, végétation, environnement. Masson, Paris,300 p.
- Duchaufour P., (1995.)** - Pédologie : sol, végétation, environnement, ed Masson, 4ème édition, 324p
- Ecrément Y., (1971)** - Etude agro-pédologique de la Mitidja .DEMHR, 130 p
- Emerson W W., (1995)** - Water retention, Organic C and Soil texture. *Aust. J. Soil Res.* 33, 241-251.
- Faure A., (1978)-** Comportement des sols au compactage. Rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains. Thèse de Doctorat de l'université scientifique et médicale de Grenoble.179 p.
- Gaddas F., (2001)** -Proposition d'une méthode de cartographie des pédopaysages Applicatin à la moyenne vallée du Rhône.Thèse de Doctorat de L'I.N.A.P.G., Département Agronomie -Environnement , 212 p.
- Gras R., (1994)** -Sols caillouteux et production végétale, INRA édition,175 p.
- Gregson K D.;Hector J.;Macgowan M.(1987).**A one parameter model for the soil water characteristics.*J.Soil sci* .38,483-486.
- Gupta S C., Larson W E. (1979)** -Estimating soil water retention characteristics from particule size distribution, organic matter percent, and bulk density.*Water resources research.* 15, 1633-1635.
- Hall D G., Reeve M J., Thomasson A J., Wright V F., (1977)** -Water retention, porosity and density of field soils.*Technical Monograph No.9.Soil survey of England & Wales,* Harpenden.
- Haverkamp R., Parlange JY.,(1986)** - Predicting the water retention curve from particle-size distribution: 1. Sandy soils whithout organic matter.*Soil Science.* 142(6), 325-338.
- Hénin S., (1977)** - Cours de physique du sol, volume 2. Initiations – Documentations techniques, n° 29, ORSTOM, Paris, 222 pages.
- Hillel D., (1984)** - L'eau et le sol, principes et processus physique.CABAY, libraire-éditeur , Louvain-La-Neuve 288p.
- Hudson B D., (1994)** -Soil organic matter and available water capacity. *J. Soil and Water Cons.* 49(2), 189-194.
- Husz G.(1967).**The determination of pF-cuves from texture using multiple regression (In german) *Z.Planzender dung.Bodenk.*116(2).23-29.

- Iftene L ., (1989)** -Etude agro-pédologique de la Mitidja –Est : échelle .1/25000 é 2^{eme} partie.
- Jamagne M., Betremieux R., Begon J C., Mori A., (1977)** -Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. Bulletin technique d'information, 324-325, 627-641.
- KEM J.S.,(1995)**- Evaluation of soil water retention models basrd on basic soil physical properties .Soil Sci .An.J.,59,1134-1141.
- Lipsius K., (2002)** -Estimating avaiblewater capacity from basic soil physical proprieties: A comparison of common pedotransfer functions.Département of Geocology , Braunschweig Technical U niversity,133p..
- Nimmo J R. ;(1997).** Modeling structural influences on soil water retention. Soil sci. Soc. Am. J. 61, 712-719.
- Ould Ferroukh M.E.H., (1994)** -Etude du comportement physique des vertisols de la Mitidja. Mémoire de Magister. I.N.A. 127p.
- Pachepsky Y.; Shcherbakov RA.; Varallyay G.; Rajk ai K.(1982).**Statistical analysis of water retention relations with other physical properties of soils.Pochvovedenie 2-42-52.
- Petersen GW.,Cunningham RL.,RP.,(1968)**-Moisturecharacteristics of pennylvania Soil :I.Moisture retentions related to texture Soil Sci .A.m.P.roc.,32,27,271-275.
- Puckett W E.;Dane JH.; Hajek BF. (1985).** Physical and mineralogical data to determinate soil hydraulic properties .Soil Sci .Soc.Am.J.49, 831-836.
- Raissi O., (1988)** -Etude agro-pédologique de la Mitidja –Est. Echelle: 1/25000é 1^{eme} partie.
- 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.
- Rawls W J., Brakensiek DL. , Saxton KE., (1982)** - Estimating soil water retention from soil properties. J. Irrig. And Drain. Div., ASCE. 108 (IR2), 166-171.
- Rawls W J., (1983)** - Estimating soil bulk density from particule sise analysis and organic matter content. Soil science, 135, 123-125.
- Rawls .WJ., Brakensiek DL., (1985)** - Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. Watershed Management in the Eighties. Proc. Irrig. and Drain. Div., ASCE, Denver, Colorado. In : E. Jones and T.J Ward (ed.) Watershed Manage. Eighties. Proc. Symp. ASCE, Denver, CO. 30 Apr. - 2 May 1985. ASCE, New York. 293-299.
- Richards LA., (1954)** -Parous plate apparatus for measuring moisture and transmission by soil.Soil Sci.66,105-110.
- Rouanet H., Lebanron F., Le Hay V.,Ackermann W., Le Roux B.(2002)** -Régression et analyse géométrique des données réflexions et suggestions. Math. & Sci.hum., Mathathetics and social sciences, 40^e année, n°160,2002, pp:13-45.
- Safar T.,Bruand A.,Prost R., (1992)**-Evolution structurale de la tranchée de drainage en sol argileux : importance de la nature minéralogique de l'argile.Science du sol, Vol.30 ,n°3,pp:185-192.

- Saxton K E.; Rawls W J.; Romberger J S.; Papendick R I.;**(1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 1031-1036.
- Sala G H., Tessier D., (1994)** -Rétention de l'eau par les matériaux argileux: signification and prévision. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 318 série II, 381-388.
- Tyler S W.,Wheatcraft S W., (1989)** - Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 4, 987-996.
- Tessier D., (1984)** -Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de réhumectation. Thèse de doctorat d'état , Univ. Paris VII, 361 p.
- Tessier D., Bruand A., LE Bissonnais Y., Dambrine E., (1996)**- Qualité chimique et physique des sols : variabilité spatiale et évolution, *Étude et gestion des sols*, 3, 4, p229-244.
- Tessier D ., Bigorre F .; Bruand A .,(1999)** -La capacité d'échange : outil de prévision de propriétés physiques des sols. The exchange capacity : Tool for predicting soil physical properties. *Compte rendu à l'Académie d'agriculture Française.* 85, 2, 37-46.
- Tietje.,Tapkenhinrichs.,(1993)**-Evaluation of pedo –transfer .*Soil Sci.Soc..Am j.,57,1088-1095*
- Tessier D., Bigorre F ., Bruand A ., (1999)** - La capacité d'échange : outil de prévision de propriétés physiques des sols. The exchange capacity : Tool for predicting soil physical properties. *Compte rendu à l'Académie d'agriculture Française.* 85, 2, 37-46.
- Tiller KG. , Smith LH., (1990)** -Limitations of EGME retention to estimate the surface area of soils. *Aust. J. Soil Res.* 28 ,1-26.
- Van Genuchten M T., (1980)** - A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898
- Vereecken H.;Maes J., Feyen J., and Darius P., (1989)**-Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. *Soil Science*, 148,6, 389-403.
- Williams R.D.,Ahuja .L.R.,Naney J.W.,(1992)**-Comparaison of methods to estimate soil water characteristics from soil texture , bulk density and limited data .*Soil Science* , 153(3) , 172-184.
- Wösten, JHM., Lilly A., Nemes A., Le Bas.,C. ,(1999)** - Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90, 169–185.
- Wösten JHM. , Pachepsky YA., Rawls WJ. , (2001)** - Pedotransfer functions : bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251, pp. 123–150.
- Wösten J.H.M., Nemes A., 2004** - Pedotransfer functions for Europe. In: *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology*, Y. Pachepsky and W.J. Rawls (eds.), *Developments in Soil Science*, volume 30, Elsevier, pp. 431-435.

Annexes

Annexe I. Résultats analytiques des horizons tests.

Profils	Profondeur (cm)	Granulométrie %					MO%	Calcaire total (%)	pH	CE ds/m	Base échangeable C moles/Kg de terre				CEC moles/Kg de terre
		A	LF	LG	SF	SG					Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	
P1	0-20	47.2	35.1	5.1	8.2	4.4	1.75	2.6	8.48	0.17	25.97	6.25	0.89	0.75	35.3
	20-40	45.3	30.9	6.4	9.1	8.2	1.03	3.0	8.51	0.14	20.45	7.1	0.54	0.45	30.47
	40-50	45.9	35.1	4.2	8.7	6.1	0.27	3.3	8.55	0.15	15.89	6.03	0.78	0.31	25.23
	70-140	46.1	33.7	6.2	7.1	6.9	0.12	3.0	8.62	0.10	17.02	5.45	0.63	0.25	24.17
P2	0-20	44.7	32.1	8.4	6.5	8.3	1.87	3.7	8.33	0.21	26.91	6.95	0.47	0.69	37.98
	20-60	50.3	30.7	5.1	9.3	4.6	0.75	1.5	8.61	0.13	14.12	5.56	1.02	0.32	23.56
	60-70	46.1	33.6	6.2	9.1	5.0	0.44	3.7	8.33	0.15	21.04	7.09	0.56	0.15	30.14
	>90	48.6	31.3	5.1	10.7	4.3	0.22	2.2	8.27	0.14	24.56	6.14	0.25	0.24	33.25
P3	0-20	45.9	31.0	6.2	9.0	7.9	1.02	1.5	8.20	0.15	30.47	7.56	0.87	0.75	41.78
	20-40	52.8	24.1	8.2	6.5	8.4	0.82	1.5	8.27	0.15	22.78	5.45	0.96	0.41	31.25
	50-80	47.5	32.0	6.0	9.1	5.4	0.53	1.9	8.35	0.22	25.45	6.12	1.22	0.20	34.87
	>80	49.2	26.9	10.1	5.2	8.6	0.15	2.6	8.71	0.17	19.56	6.05	0.47	0.18	28.32
P4	0-20	45.3	33.7	5.8	10.5	4.7	1.47	2.6	8.10	0.14	27.55	7.12	1.07	0.68	38.12
	20-40	47.8	28.0	11.1	7.5	5.6	1.03	2.6	8.14	0.14	24.12	5.25	0.54	0.39	33.10
	50-80	52.3	26.7	5.5	8.7	6.8	0.35	1.5	8.36	0.12	15.26	6.74	0.68	0.21	24.50
	>80	44.9	33.8	6.2	8.1	7.0	0.15	2.2	8.71	0.17	20.14	6.86	0.13	0.30	29.24
P5	0-20	47.0	31.7	5.9	10.3	5.1	1.60	1.5	8.32	0.18	23.56	5.15	0.45	0.63	31.02
	20-40	50.6	28.4	5.3	8.7	7.0	0.75	2.6	8.37	0.20	20.79	5.05	0.95	0.33	28.40
	50-80	48.3	31.7	6.9	11.0	2.1	0.42	2.6	8.59	0.20	24.32	7.80	0.47	0.28	34.26
	>80	45.2	33.0	5.8	9.3	6.6	0.25	3.0	8.62	0.18	21.56	6.05	0.63	0.20	30.78

Annexe II. Densités apparentes et réelles des horizons tests.

Profils	Profondeur (cm)	Da	Dr
P1	0-20	1.42	2.55
	20-40	1.44	2.54
	40-50	1.40	2.55
	70-140	1.46	2.54
P2	0-20	1.42	2.55
	20-60	1.42	2.54
	60-70	1.45	2.55
	>90	1.42	2.54
P3	0-20	1.45	2.56
	20-40	1.43	2.55
	50-80	1.40	2.55
	>80	1.40	2.54
P4	0-20	1.43	2.55
	20-40	1.45	2.54
	50-80	1.45	2.54
	>80	1.41	2.53
P5	0-20	1.44	2.56
	20-40	1.40	2.53
	50-80	1.43	2.55
	>80	1.40	2.54

Annexelll. Teneurs en eau pondérales aux différents pF.

Profils	Profondeur (cm)	pF 3,0	pF 4,2
P1	0-20	24.6	17.5
	20-40	26.9	14.1
	40-50	21.9	21.3
	70-140	23.5	13.6
P2	0-20	19.7	15.5
	20-60	24.7	12.9
	60-70	26.3	20.1
	>90	21.5	18.1
P3	0-20	25.8	15.4
	20-40	23.1	19.6
	50-80	25.6	13.2
	>80	22.3	15.1
P4	0-20	18.9	19.2
	20-40	21.2	17.5
	50-80	23.6	14.4
	>80	25.4	21.5
P5	0-20	26.3	16.8
	20-40	18.5	13.4
	50-80	22.5	17.9
	>80	24.9	14.6

Annexe IV. Calcul de l'erreur moyenne et l'erreur type de prédiction pour les horizons de texture argilo-limoneuse après stratification texturale à pF4, 2

W Estimée	W Mesurée	La différence		
11,5234	15,4	-3,8766		
9,7984	15,3	-5,5016		
11,6534	15,1	-3,4466		
12,9478	16,4	-3,4522		
11,606	15,7	-4,094		
12,1712	16,8	-4,6288		
11,4878	15,2	-3,7122		
10,5418	13,9	-3,3582		
10,3814	14,9	-4,5186		
11,5554	16,3	-4,7446		
11,255	15	-3,745		
13,7188	19,9	-6,1812		
10,6034	17,1	-6,4966		
10,3452	16,9	-6,5548		
11,303	17,2	-5,897		
12,5014	16,3	-3,7986		
9,5478	18,1	-8,5522		
11,1584	17,6	-6,4416		
8,8022	13,7	-4,8978		
11,7668	18,4	-6,6332		
9,3322	13,2	-3,8678		
10,5418	13,9	-3,3582		
10,3814	14,9	-4,5186		
11,5554	16,3	-4,7446		
11,366	16,6	-5,234		
10,0404	15,2	-5,1596		
8,5468	12,9	-4,3532		
11,5178	16,7	-5,1822		
11,6614	18	-6,3386		
11,5834	16,7	-5,1166		
10,3534	15,6	-5,2466		
11,4878	15,2	-3,7122		
9,821	17,9	-8,079		
10,3872	17,7	-7,3128		
11,5134	19,5	-7,9866		
10,356	15,3	-4,944		
11,7228	14,6	-2,8772		
11,0602	9,7	1,3602	EMP	ETP
	La somme	-187,203	-2,8658	1,73804442

Annexe V. Calcul de l'erreur moyenne et l'erreur type de prédiction pour les horizons de densité apparente 1,4 après stratification structurale à pF4, 2

Estimation de la rétention en eau des vertisols de la Mitidja au moyen de fonctions de pédotransfert

W Estimée	W Mesurée	La différence		
16,7856	15,5	1,2856		
15,8656	15,4	0,4656		
15,8954	19,6	-3,7046		
16,4654	17,5	-1,0346		
17,6644	17,8	-0,1356		
16,97	15,1	1,87		
15,72	15,7	0,02		
16,0888	16,8	-0,7112		
15,5752	15,2	0,3752		
15,3112	13,9	1,4112		
15,1226	14,9	0,2226		
15,687	15	0,687		
15,616	14,5	1,116		
17,0952	18,9	-1,8048		
17,209	14,2	3,009		
17,101	17,8	-0,699		
17,2212	19,9	-2,6788		
15,6076	17,1	-1,4924		
15,4528	16,9	-1,4472		
16,028	17,2	-1,172		
15,3052	18,6	-3,2948		
18,1264	21,1	-2,9736		
16,2806	16,3	-0,0194		
16,638	18,4	-1,762		
17,4466	19,7	-2,2534		
16,5496	16,8	-0,2504		
15,7446	15,9	-0,1554		
17,768	19,9	-2,132		
18,0758	21,3	-3,2242		
13,8978	13,2	0,6978		
15,1226	14,9	0,2226		
16,044	16,6	-0,556		
14,9952	14,1	0,8952		
15,0366	15,2	-0,1634		
17,758	18,6	-0,842		
15,2814	18,3	-3,0186		
13,5392	12,9	0,6392		
16,7912	16,7	0,0912		
16,2856	18	-1,7144		
16,833	9,2	7,633		
15,2762	8,9	6,3762		
17,31	17,2	0,11		
17,81	18,2	-0,39	EMP	ETP
	La somme	-40,8456	-0,3757795	1,9703877

Annexe VI. Calcul de l'erreur moyenne et l'erreur type de prédiction pour les horizons de densité apparente 1,5 après stratification structurale à pF4, 2

W Estimée	W Mesurée	La différence		
17,3786	16,2	1,1786		
19,2162	19,7	-0,4838		
14,3236	15,3	-0,9764		
16,8396	16,8	0,0396		
15,8466	15,9	-0,0534		
15,8986	15,1	0,7986		
17,4062	16,4	1,0062		
15,7566	16,3	-0,5434		
18,5394	20,6	-2,0606		
18,658	18,9	-0,242		
16,7622	20,2	-3,4378		
17,3786	16,2	1,1786		
16,9666	15,5	1,4666		
19,2162	19,1	0,1162		
17,1844	17,5	-0,3156		
18,8064	17,8	1,0064		
18,408	18,9	-0,492		
14,8722	13,9	0,9722		
15,7566	16,3	-0,5434		
12,3918	13,2	-0,8082		
16,473	13,8	2,673		
16,6274	16,2	0,4274		
15,6666	14,4	1,2666		
15,4846	16,1	-0,6154		
16,9544	16,9	0,0544		
16,3044	18	-1,6956		
17,8642	19,7	-1,8358		
17,3912	17,6	-0,2088		
18,7474	22,3	-3,5526		
17,3814	17,9	-0,5186		
17,496	19,2	-1,704		
17,9614	18,5	-0,5386		
15,7978	14,6	1,1978		
16,6248	16,8	-0,1752		
15,6086	19,5	-3,8914		
16,6146	17,9	-1,2854		
16,6442	16,7	-0,0558		
16,6196	17,5	-0,8804		
16,9544	16,9	0,0544		
15,2658	16,2	-0,9342		
16,8954	17,9	-1,0046		
16,6648	16,8	-0,1352		
16,142	15,1	1,042		
16,6478	15,9	0,7478		
16,7226	13,8	2,9226	EMP	ETP
	La somme	-10,8392	-0,238462	1,3886747

Annexe VII. Calcul de l'erreur moyenne et l'erreur type de prédiction pour les horizons argilo-limoneux de densité apparente 1,4 à pF4, 2

Estimation de la rétention en eau des vertisols de la Mitidja au moyen de fonctions de pédotransfert

W Estimée	W Mesurée	La différence		
15,6905	15,4	0,2905		
16,47	15,7	0,77		
16,779	16,8	-0,021		
15,8135	15,2	0,6135		
13,6385	13,9	-0,2615		
13,5155	14,9	-1,3845		
15,2175	15	0,2175		
18,756	19,9	-1,144		
12,8605	17,1	-4,2395		
12,464	16,9	-4,436		
13,7175	17,2	-3,4825		
17,4855	16,3	1,1855		
11,1035	18,1	-6,9965		
13,093	17,6	-4,507		
12,5415	13,7	-1,1585		
15,356	18,4	-3,044		
13,8265	13,2	0,6265		
13,5155	14,9	-1,3845		
13,96	16,6	-2,64		
12,958	15,2	-2,242		
12,786	12,9	-0,114		
15,7885	16,7	-0,9115		
14,6355	18	-3,3645		
14,2805	16,7	-2,4195		
12,6855	15,6	-2,9145		
14,498	14,8	-0,302		
14,7295	14,9	-0,1705		
13,515	14,8	-1,285		
17,9315	16,2	1,7315		
14,282	14,1	0,182		
15,8135	15,2	0,6135		
11,6125	17,9	-6,2875		
12,549	17,7	-5,151		
13,945	15,3	-1,355		
15,646	14,6	1,046		
13,8265	9,7	4,1265	EMP	ETP
	La somme	-49,8135	-1,544218	2,48667827

Annexe VIII. Calcul de l'erreur moyenne et l'erreur type de prédiction pour les horizons argileux à pF4, 2

W Estimée	W Mesurée	La différence		
17.5	15.95585	-1.54415		
14.1	15.62737	1.52737		
21.3	15.78893	-5.51107		
13.6	15.73308	2.13308		
16.5	15.41053	-1.08947		
12.9	16.45285	3.55285		
20.1	15.73276	-4.36724		
18.1	16.18138	-1.91862		
15.4	15.70018	0.30018		
19.6	16.71638	-2.88362		
13.2	15.96547	2.76547		
15.1	16.05745	0.95745		
19.2	15.62133	-3.57867		
17.5	15.78857	-1.71143		
14.4	16.75565	2.35565		
21.5	15.54105	-5.95895		
16.8	15.8888	-0.9112		
13.4	16.49205	3.09205		
17.9	16.05398	-1.84602		
14.6	15.60657	1.00657	EMP	ETP
	La somme	-13.62977	-1.281488	1.035456

Annexe IX. Calcul de l'erreur moyenne et l'erreur type de prédiction pour les horizons de densité apparente 1,4 à pF4, 2

W Estimée	W Mesurée	La différence		
17.5	16.0318	-1.4682		
14.1	15.8084	1.7084		
21.3	15.6906	-5.6094		
13.6	15.7469	2.1469		
16.5	15.7236	-0.7764		
12.9	16.5566	3.6566		
20.1	15.7784	-4.3216		
18.1	16.2207	-1.8793		
15.4	15.8688	0.4688		
19.6	17.1411	-2.4589		
13.2	16.0537	2.8537		
15.1	16.4292	1.3292		
19.2	15.7404	-3.4596		
17.5	16.2547	-1.2453		
14.4	16.9486	2.5486		
21.5	15.5549	-5.9451		
16.8	16.0781	-0.7219		
13.4	16.6667	3.2667		
17.9	16.1799	-1.7201		
14.6	15.629	1.029	EMP	ETP
	La somme	-10.5979	-1.12989	2.36587

Annexe X. Calcul de l'erreur moyenne et l'erreur type de prédiction pour les horizons argileux de densité apparente 1,4 à pF4,2

W Estimée	W Mesurée	La différence		
17.5	16.0932	-1.4068		
14.1	15.8006	1.7006		
21.3	15.7878	-5.5122		
13.6	15.8914	2.2914		
16.5	15.673	-0.827		
12.9	16.5802	3.6802		
20.1	15.8916	-4.2084		
18.1	16.27	-1.83		
15.4	15.8808	0.4808		
19.6	17.0206	-2.5794		
13.2	16.0702	2.8702		
15.1	16.344	1.244		
19.2	15.7716	-3.4284		
17.5	16.2042	-1.2958		
14.4	16.942	2.542		
21.5	15.6256	-5.8744		
16.8	16.0784	-0.7216		
13.4	16.606	3.206		
17.9	16.2396	-1.6604		
14.6	15.6672	1.0672	EMP	ETP
	La somme	-10,262	-1.3213	1.38965