

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE
EL HARRACH-ALGER



Thèse en Co-tutelle entre l'ENSA-Alger et l'Université de Liège

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques

THEME

**Rétention en eau des sols en Algérie,
approche pour leur caractérisation et modélisation à l'aide
des fonctions de pédotransfert**

Présentée par : M. Sami TOUIL

Soutenue publiquement le :10 septembre 2018

Devant le jury composé de

Président

BROSTAUX Yves	Université de Liège	Professeur
---------------	---------------------	------------

Directeurs de thèse

CHABACA Mohamed Nacer	ENSA-Alger	Professeur
-----------------------	------------	------------

DEGRÉ Aurore	Université de Liège	Professeur
--------------	---------------------	------------

Examineurs

GARRÉ Sarah	Université de Liège	Professeur
-------------	---------------------	------------

BOUREGHDA Nadia	ENSA-Alger	MCA
-----------------	------------	-----

Résumé

L'objectif de cette thèse est de contribuer à l'étude des propriétés de la rétention en eau des sols en Algérie. La détermination de ces propriétés est généralement connue par la lourdeur des protocoles utilisés en matière de temps et de coût. C'est pour cette raison que des outils nommés « fonctions de pédotransfert » (FPTs), ont été développés pour prédire les rétentions en eau. L'élaboration de ces modèles (FPTs) nécessite un ensemble suffisant de données sur les propriétés basiques du sol.

Dans un premier temps, nous avons utilisé huit FPTs pour prédire la rétention en eau des sols. L'efficacité des FPTs, quand elles sont utilisées en dehors de leurs contextes, est mise en question. Les FPTs de Rawls et Ghorbani et de Dashtaki et Homae Type-1 (2004) ont donné les meilleures estimations de la rétention en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement. La performance de la FPT de GH-1 (2004) que nous avons appliqué dans notre contexte s'explique par le fait qu'elle a été développée à partir d'un ensemble de données recueillies dans un contexte pédoclimatique similaire à celui de nos sols.

Ceci nous a motivé à développer des FPTs locales en utilisant une base de données composée de quelques sols algériens. Deux types de FPTs, à savoir FPT point et FPT paramétrique, ont été développés en utilisant des techniques de régression. Les FPTs point produisent des estimations plus précises que les FPTs paramétriques. Cependant, les FPTs paramétriques dérivées pour estimer les paramètres de la courbe de rétention de Van Genuchten ont fourni de meilleures estimations que les FPTs de Rosetta.

Les résultats de l'analyse de sensibilité globale montrent que la formulation mathématique des modèles et leurs variables d'entrée réagissent différemment en fonction du point de pression et de la classe texturale. La rétention en eau est toujours sensible, principalement à la fraction de sable dans les classes de textures fines et moyennes pour un potentiel de -33 kPa. D'autre part, la qualité des estimations des FPTs diminue lorsqu'elles sont appliquées sur des échantillons de sols dont la teneur en argile est supérieure à 60 %.

Nos résultats montrent également que les irrigations menées avec des eaux usées épurées (EUE) affectent la capacité du sol à retenir l'eau. A court et à long terme, un impact négatif des EUE sur les rétentions en eau des sols est enregistré dans la couche de surface (0 à 10 cm de profondeur). Ce dernier devient plus important aux très hautes pressions de succion (VHB : > 100 kPa) et hautes pressions de succion (HP : 1-100 kPa).

Mots-clés : rétention en eau des sols, fonctions de pédotransfert, modélisation hydro-pédologique, eaux usées épurées.

Abstract

The aim of this thesis is to contribute to the study of soil water retention properties in Algeria. These properties are generally known for a limited number of soils due to the laborious experimental protocols used for their determination (expensive and time consuming). Therefore, prediction tools have been developed, called “pedotransfer functions” (PTFs) which relate soil water retention properties with soil properties easily obtained such as the sand, silt, and clay content, the organic carbon content or bulk density.

First, we used eight PTFs to predict soil water retention. The accuracy of pedotransfer function (PTF) when used outside of their development data sets is in question. The Rawls PTF, Ghorbani Dashtaki and Homaei Type-1 (2004) were the best in estimation of soil water retention at Field capacity and Wilting point. The performance of GH-1 (2004) PTF is due to the fact that has been developed from data-set collected in similar pedoclimatic context then our soils.

These results have motivated to establish the local PTF using a database collected only from algerian soils. Two types of FPTs, namely FPT point and parametric FPT, were developed using regression techniques. The point PTFs produce more accurate estimations than parametric PTFs. However, the derived parametric PTFs provided better estimations than the Rosetta models originally developed from a large intercontinental database. The result of the global sensitivity analysis (GSA) showed that the mathematical formalism of the PTF models and their input variables reacted differently depending on pressure points and textural class. The soil water retention is always sensitive, primarily to the sand fraction in the fine and medium texture classes at -33 kPa. On the other hand, the accuracy of PTFs decreased when they were applied to soil samples with a clay content upper than 60 %.

In the end, we have shown that the irrigation with purified wastewater (PWW) affects the soil's ability to retain water. In the short and long term, irrigation with PWW has an important impact on water retention curves at 0-10 cm depth. The impact of PWW is important in high suction pressures (HP: 1-100 kPa) and very high (HBV :> 100 kPa) suction pressure.

Keywords: Soil water retention; Pedotransfer function ; Hydropedology modelling ; Purified wastewater

الملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو المساهمة في دراسة خصائص احتفاظ الماء في التربة في الجزائر. يعرف تحديد هذه الخصائص عمومًا بثقل البروتوكولات المستخدمة في المختبر من حيث الوقت والتكلفة. لهذا السبب ، تم تطوير أدوات تسمى « دوال الانتقال في التربة (Pedotransfer functions PTFs) » للتنبؤ بخواص التربة بالاحتفاظ بالمياه. يتطلب تطوير هذه النماذج (PTFs) مجموعة كافية من البيانات حول الخصائص الأساسية للتربة.

كخطوة أولى ، استخدمنا ثمانية وظائف PTFs للتنبؤ باحتفاظ الماء في التربة. بعد دراسة حول مدفعاليته عند استخدامها خارج السياق الذي تم فيه تطويرها ، تبين ان كل من وظيفتي Rawls and Ghorbani و Dashtaki-Homaei (2004) GH-1 اعطيا أفضل التقديرات للمحتوى الرطوبي عند نقطتي السعة الحقلية ونقطة الذبول الدائم. تم شرح كفاءة نموذج GH-1 (2004) الذي قمنا بتطبيقه في سياقنا من خلال حقيقة أنه تم تطويره باستخدام مجموعة من البيانات التي تم جمعها في ظروف التربة و المناخ مشابهة للظروف المحلية في مجال الدراسة.

حفزنا ذلك على تطوير PTFs محلية باستخدام قاعدة بيانات مكونة من بعض أنواع التربة في الجزائر. تم تطوير نوعين من FPTs ، وهما PTFs point و PTFs parametric. تعطي PTFs point تقديرات أكثر دقة من parametric PTFs ومع ذلك ، فإن هته الاخيرة التي تم استعمالها لتقدير معايير منحني Van Genuchten للمحتوى الرطوبي في التربة قدمت تقديرات أفضل من نموذج Rosetta.

تظهر نتائج تحليل الحساسية العام أن الصيغة الرياضية للنماذج ومتغيرات مدخلاتها تتفاعل بشكل مختلف اعتمادًا على نقطة الضغط والطريقة الرياضية التي يتم تطبيقها في تطويرها. الاحتفاظ الماء يتأثر بشكل أساسي من الرمل في فنتي التربة الناعمة والمتوسطة عند نقطة الضغط 33kPa. و من ناحية أخرى ، تنخفض جودة تقديرات PTFs عند تطبيقها على عينات من التربة ذات المحتوى الطيني أكبر من 60٪.

كما تظهر نتائجنا أن الري بمياه الصرف المعالجة يؤثر على قدرة التربة على الاحتفاظ بالمياه. على المدى القصير والطويل ، يتم تسجيل التأثير السلبي لهته المياه في الطبقة السطحية للتربة (من 0 إلى 10 سم). هذا الأخير يصبح أكثر تأثيرا عند نقاط الضغط العالي جدا ($VHB > 100 \text{ kPa}$) و نقاط الضغط العالي (HP: 1-100 kPa).

الكلمات المفتاحية : خصائص احتفاظ الماء في التربة، دوال الانتقال في التربة، تصميم هيدرولوجي، مياه الصرف المعالجة

Dédicaces

A mes chers parents

C'est à vous que je dois cette partie de ma vie

Mon père, dans tes sacrifices, ta force et ton honnêteté,

Maman, dans ta bonté et ton dévouement pour nous

A ma femme Nassima, pour la patience et le soutien quotidien indéfectible dont elle a fait preuve pendant toute la durée de cette thèse. "Parfois notre lumière s'éteint, puis elle est rallumée par un autre être humain" Albert Schweitzer.

A ma fille Layane, mon petit cœur qui bat 😊

A mes frères Sofiane, Rydha, Imed, Nadir et à ma sœur bien aimée Amel

Que Dieu vous protège et vous garde pour moi

Remerciements

Il est difficile de remercier toutes les personnes qui ont participé d'une quelconque manière à l'aboutissement de ce travail.

En premier lieu, j'aimerais remercier la Professeure Aurore DEGRÉ. Une directrice de thèse exceptionnelle qui, bien avant l'aventure qu'a été cette thèse de doctorat, a toujours répondu présente avec son expertise, ses conseils avisés, sa disponibilité, sa générosité, sa bienveillance et son soutien sans faille. Aurore, tous les mercis de la Terre ne sauraient être à la hauteur de tes (bien grandes !) qualités professionnelles et humaines.

Au Professeur CHABACA Mohamed Nacer, qu'il trouve ici l'expression de toute ma gratitude et ma reconnaissance pour avoir dirigé cette thèse. Tout au long de ce travail, il a été un soutien, une aide et une confiance infaillibles. Ses critiques et ses conseils ont été un véritable moteur pour aller au terme de cette thèse. Merci Professeur.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble des membres du jury de ma thèse. Au Professeur Yves BROSTAU, pour avoir accepté de présider ce jury, au Professeur Sarah GARRÉ, pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail et y apporter ses précieux conseils et critiques afin de l'améliorer, et au Docteur BOUREGHDA Nadia, Maître de conférences à l'ENSA pour avoir accepté de siéger à ce jury, malgré ses contraintes professionnelles.

J'exprime également ma gratitude et ma sympathie à mes amis chercheurs et doctorants de l'axe Échanges eau-sol-plante de l'Agro-Bio Tech de Gembloux, particulièrement Éléonore BECKERS et Boubacar BilloBAH pour leur soutien et leur aide.

A Katia BERGHMANS qui, en plus d'avoir brillamment géré l'aspect administratif de ma formation, a accepté de sacrifier une partie de son temps pour la relecture attentive de cette thèse. Merci de tout cœur !

Un grand merci à l'équipe technique, particulièrement Stéphane BECQUEVORT et Daniel BAES pour leur disponibilité et leur aide au cours de mes expérimentations au laboratoire.

A mes amis et collègues, enseignants-chercheurs de la faculté des sciences de la nature et de la vie et sciences de la terre à l'université de Khemis Miliana, en particulier le Professeur DOUAOUI Abdelkader et le Professeur BRADA Moussa, merci pour vos multiples marques d'encouragement et pour votre aide.

Pour le réconfort moral pendant les périodes difficiles, Merci Bouba, Merci d'être là.

A tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail, je vous remercie tous sans exception.

Table des matières

Résumé	i
Abstract.....	ii
Dédicaces.....	iv
Remerciements	v
Table des matières	vi
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux	x
Liste des abréviations	xi
Liste des symboles et variables	xii
1. Introduction générale.....	1
Introduction	1
Problématique et hypothèses de travail	2
<i>Références</i>	5
2. Propriétés de rétention en eau des sols, synthèse bibliographique	7
2.1. Propriétés de rétention en eau des sols	8
2.1.1. Teneur en eau du sol.....	8
2.1.2. Capacité au champ et point de flétrissement	8
2.1.3. Rétention en eau du sol.....	9
2.1.4. Courbe de rétention en eau	10
2.2. Facteurs influençant la rétention de l'eau.....	11
2.2.1. Texture du sol et porosité	11
2.2.2. Influence de la distribution de la taille des pores sur la rétention en eau	12
2.2.3. Matière organique.....	12
2.2.4. Les argiles et leur minéralisation.....	12
2.2.5. Structure du sol.....	13
2.2.6. Contexte agro-pédo-climatique	14
2.2.6.1. Aspects climatiques	14
2.2.6.2. Couverture de la surface du sol	14
2.3. Les fonctions de pédotransfert.....	14
2.3.1. Histoire des fonctions de pédotransfert	14
2.3.2. Types de fonctions de pédotransfert	15
2.3.2.1. Fonctions de pédotransfert de points (ponctuelles)	15
2.3.2.2. Fonctions de pédotransfert paramétriques	16
2.3.3. Formalismes mathématiques utilisés dans le développement des fonctions de pédotransfert.....	19
2.3.3.1. Analyse de régression.....	19
2.3.3.2. Analyse des réseaux neuronaux artificiels.....	22
2.3.3.3. Quelques méthodes récentes utilisées dans le développement des FPTs	22
2.3.4. Évaluation de l'incertitude des fonctions de pédotransfert.....	23
<i>Références</i>	24
3. Sites expérimentaux, mesures et caractérisation.....	29

3.1.	Contexte.....	30
3.1.1.	Présentation des bases de données utilisées dans l'évaluation, l'élaboration et la validation des FPTs	30
3.1.2.	Caractéristiques pédoclimatiques des zones d'échantillonnage	30
3.1.2.1.	Plaine de Beni Slimane.....	30
3.1.2.2.	Plaine du Bas Cheliff.....	32
3.1.2.3.	Plaine de Kherba - El Abadia	32
3.1.2.4.	Plaine côtière de Annaba	32
3.1.3.	Site expérimental sélectionné pour l'étude de l'impact des eaux usées épurées (EUE) sur la courbe de rétention en eau du sol.....	33
3.1.3.1.	Historique de l'exploitation des parcelles étudiées	33
3.1.3.2.	Caractéristiques de la zone d'étude	33
3.1.3.3.	Evaluation de la qualité des eaux usées épurées de la station de Boumerdes	36
3.2.	Méthodes de mesure utilisées.....	38
3.2.1.	Analyses physiques du sol.....	38
3.2.1.1.	Rétention en eau des sols.....	38
3.2.1.2.	Densité apparente	38
3.2.1.3.	Analyse granulométrique.....	38
3.2.1.4.	Stratification texturale	39
3.2.2.	Analyses chimiques du sol	39
3.3.	Critères de validation.....	40
3.3.1.	Erreur moyenne (EM).....	40
3.3.2.	Coefficient de détermination (R^2).....	41
3.3.3.	Erreur moyenne quadratique (EMQ).....	41
3.3.4.	Degré d'accord (d).....	41
3.3.5.	Critère d'information d'Akaike (AIC).....	41
3.3.6.	Erreur moyenne géométrique (EMG).....	41
3.4.	Estimation des paramètres de Van Genuchten	42
	<i>Références</i>	43
4.	Résultats et interprétations	44
4.1.	Evaluation des fonctions de pédotransfert pour estimer la rétention d'eau des sols algériens.....	46
	Introduction	46
4.1.1.	Base de données d'évaluation	46
4.1.2.	Description des FPTs sélectionnées	47
4.1.3.	Origine des sols utilisés pour établir les FPTs sélectionnées	48
4.1.4.	Résultats	49
4.1.4.1.	Estimation de la teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement.....	49
4.1.5.	Discussion	51
4.1.5.1.	Données d'application	51
4.1.5.2.	Matière organique.....	52
4.1.5.3.	Modèles mathématiques utilisés.....	52
	<i>Références</i>	54

4.2. Analyse de sensibilité des fonctions de pédotransfert points et paramétriques pour estimer la rétention d'eau des sols en Algérie.....	57
Introduction	57
4.2.1. Caractérisation des sols utilisés	58
4.2.2. Méthodologie.....	60
4.2.2.1. Développement des FPTs	60
4.2.2.2. Analyse de la sensibilité globale (ASG).....	61
4.2.3. Discussion des résultats	62
4.2.3.1. FPTs dérivées	62
4.2.3.2. Indice de sensibilité (Si) avant la stratification texturale.....	64
4.2.3.3. Analyse de sensibilité et incertitude des FPTs après la stratification texturale	65
<i>Références</i>	69
4.3. Impact de l'irrigation par les eaux usées épurées sur la courbe de rétention en eau	73
Introduction	73
4.3.1. Caractérisation physicochimique des sols irrigués par les EUE.....	74
4.3.2. Analyse statistique des données.....	74
4.3.3. Résultats et discussions	75
4.3.3.1. Caractérisation physicochimique des sols	75
4.3.3.2. Calcaire total et pH du sol	75
4.3.3.3. Effet de l'irrigation par les EUE sur la salinité du sol	75
4.3.3.4. Matière organique.....	76
4.3.3.5. Impact de l'irrigation par les EUE sur la courbe de rétention en eau du sol (CRES).....	76
4.3.4. Conclusion.....	80
<i>Références</i>	81
5. Discussion générale, conclusion et perspectives	84

Liste des figures

Figure 1. Courbe de rétention en eau d'un sol de texture sableuse et argileuse (Selon Musy et Soutter, 1991)	10
Figure 2. Relation entre la CEC et la morphologie des argiles, d'après Bruand et Zimmer (1992).....	13
Figure 3. Concept général du développement des FPTs (Van Looy et al., 2017).	15
Figure 4. Représentation schématisée des différents modèles de courbes utilisés (d'après Bastet et al. 1999).16	
Figure 5. Situation des zones d'échantillonnage	31
Figure 6. Situation des parcelles d'étude (Source : Google Maps, 2018)	34
Figure 7. Variante texturale utilisée dans la stratification.	39
Figure 8. Prédiction des rétentions en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement par les FPT sélectionnées dans cette étude	50
Figure 9. Prédiction des rétentions en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement par les FPT sélectionnées dans cette étude (<i>Suite</i>).....	51
Figure 10. Représentation fréquentielle de la matière organique des échantillons utilisés	52
Figure 11. Représentation graphique des critères d'évaluation.....	53
Figure 12. Caractéristiques texturales des échantillons étudiés.....	59
Figure 13. Rétention d'eau du sol mesurée par rapport à la rétention d'eau du sol prédite.....	62
Figure 14. Rétention d'eau du sol mesurée versus prédite par Rosetta H2.....	63
Figure 15. Indice de la sensibilité du premier ordre.	64
Figure 16. Valeurs d'erreur carrée moyenne (EMQ) calculées pour les différentes classes de textures	65
Figure 17. Variation de l'indice de première sensibilité avec EMQ après le groupement de textures	66
Figure 18. Variation de la conductivité électrique dans les parcelles étudiées	76
Figure 19. Courbes de rétention mesurées par la méthode de Richards (1948) pour les parcelles d'étude d'impact des EUE (P1, P2) et la parcelle témoin.	77
Figure 20. Variation de la réserve utile des parcelles étudiées.....	79
Figure 21. Variation de la rétention en eau dans les parcelles étudiées	79

Liste des tableaux

Tableau 1. Réserve en eau utile (RU) et densité apparente selon les textures (Jamagne et al. 1977).	9
Tableau 2. Modèles de courbes de rétention en eau des sols.....	17
Tableau 3. Fonctions de pédotransfert associées aux paramètres de la courbe de rétention en eau de Van Genuchten (1980) et Brooks Corey (1964)	19
Tableau 4. Coefficients de régressions multiples et valeurs de R^2 correspondant aux FPTs développées par Rawl et al. (1982) ; Ghorbani et al Type 1 (2004).....	21
Tableau 5. Durées d'irrigation par les EUE.....	33
Tableau 6. Localisation des sites d'échantillonnage pour l'étude de la courbe de rétention en eau des sols.....	34
Tableau 7. Itinéraire technique de la production de la vigne (variété Red-Glob) appliqué dans les parcelles d'étude	34
Tableau 8. Qualité des eaux usées issues de la STEP de Boumerdes pour l'année 2013 (Source : STEP de Boumerdes 2013).....	37
Tableau 9. Qualité des eaux usées issues de la STEP de Boumerdes pour l'année 2011 (Source : STEP de Boumerdes 2013).....	37
Tableau 10. Paramètres chimiques, méthodes et normes employés	40
Tableau 11. Caractéristiques des sols sélectionnés.....	47
Tableau 12. Paramètres du modèle Van Genuchten des sols sélectionnés.	47
Tableau 13. Paramètres d'entrée nécessaires pour le développement des FPTs évaluées.....	48
Tableau 14. Critères statistiques calculés pour évaluer l'estimation de la rétention en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement par les FPTs sélectionnées dans cette étude.....	49
Tableau 15. Coefficients de détermination (R^2) des sols étudiés.....	53
Tableau 16. Caractéristiques du sol des ensembles de données développées et validées.....	59
Tableau 17. Fonctions de pédotransfert développées	61
Tableau 18. Critères d'évaluation d'estimation de la rétention en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement par les FPTs.....	63
Tableau 19. Variation du premier indice de sensibilité dans les différentes classes de texture du sol.....	65
Tableau 20. Matrice de corrélation de Pearson entre les caractéristiques basiques du sol.....	66
Tableau 21. Propriétés physiques des sols des trois parcelles étudiées	74
Tableau 22. Caractérisation physico-chimique des sols irrigués et témoin	75
Tableau 23. Résultats de l'analyse de la variance Type I (Sum of Squares).....	77
Tableau 24. Analyse du test du Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95 %.....	78

Liste des abréviations

A%	Pourcentage d'argile
AFNOR	Association Française de Normalisation
AIC	Critère d'information d'Akaike
ANOVA	Analyse de la variance
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
ASG	Analyse de la sensibilité globale
C	Teneur en carbone organique [‰]
CC	Capacité au champ
CEC	Capacité d'échange cationique
CEC	Conductivité électrique
CRES	Courbe de rétention en eau des sols
CV	Coefficient de variation
d	Degré d'accord
Da	Densité apparente [g.cm^{-3}]
DBO5	Demande biochimique en oxygène à 5 jours
DCO	Demande chimique en oxygène
EM	Erreur moyenne
EMG	Erreur moyenne géométrique
EMQ	Erreur moyenne quadratique
ETM	Éléments trace métalliques
EUE	Eaux usées épurées
FAO	Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations-Unies pour l'alimentation et l'agriculture)
FPT	Fonction de pédotransfert
FPTC	Fonction de pédotransfert continues
GMDH	Méthode de traitement des données
ISO	Organisation Internationale de Normalisation
L%	Pourcentage de limon
MES	Matières en suspension
MO	Matière organique
PF	Point de flétrissement permanent
pF	Transformation logarithmique en base 10 de la succion [cm]
PF	Parcelle
pH	Potentiel hydrogène
Prof	Profondeur (cm ou m)
PT	Parcelletémoin
REUE	Réutilisation des eaux usées épurées
RML	Régression linéaire multiple
RMNL	Régression multiple non linéaire
RNA	Réseaux neuronaux artificiels
RU	Reserve utile
S%	Pourcentage de sable
STEP	Station d'épuration
USDA	United State Department of Agriculture (Département de l'agriculture des Etats-Unis)
W	Teneur en eau du sol

Liste des symboles et variables

dS	Déci Siemens
h	Potentiel matriciel [L].
ha	Hectare
K (h)	Conductivité hydraulique non saturée [$L.T^{-1}$]
Kg	Kilogramme
m	Paramètre dans la courbe de rétention ($=1-1/n$, $n > 1$) [-]
mg	Milligramme
Ms	Masse de sol séché à 105°C contenu dans le cylindre
n	Index de la distribution de la porosité dans la courbe de rétention [-]
n	Nombre de mesures pour le calcul du REMQ
n	Nombre de mesures pour le calcul du EMQ
Pa	Pascal
Se	Taux de saturation effectif [L^3L^{-3}]
Vc	Volume du cylindre.
VSi	Variation de l'indice de sensibilité
Vv	Volume des vides [cm^3]
α	Paramètre relatif à la pression d'entrée d'air dans la courbe de rétention [L^{-1}]
θ_{volu}	Teneur en eau volumétrique [$cm^3.cm^{-3}$]
θ_r	Teneur en eau résiduelle [$cm^3.cm^{-3}$]
θ_s	Teneur en eau à saturation [$cm^3.cm^{-3}$]
$\theta(h)$	Rétention en eau
Φ	Porosité
R²	Coefficient de détermination

Introduction générale

Introduction

L'insuffisance et l'irrégularité dans la distribution des eaux de surface et/ou souterraines, dues aux changements climatiques, sont parmi les problèmes majeurs que rencontre le monde agricole, notamment durant les deux dernières décennies, dans les contextes agropédoclimatiques arides et semi-arides, dont l'Algérie fait partie.

Sur l'ensemble du pays, l'amélioration de la gestion de l'eau en agriculture irriguée est devenue une préoccupation primordiale. Le recours à l'irrigation est obligatoire car les besoins en eau de la plupart des cultures ne peuvent être couverts par les précipitations. Celle-ci s'avère nécessaire pour garantir une production suffisante et rentabiliser les investissements consentis afin de se prémunir contre les aléas climatiques et sécuriser la production (Douh & Boujelben, 2010). D'autre part, à l'image de nombreuses régions arides et semi-arides, l'Algérie fait face depuis plusieurs décennies aux effets conjugués d'une demande en eau de plus en plus importante et d'un changement climatique dont les impacts commencent à être ressentis. Ces facteurs ont contribué à un amenuisement des ressources en eau conventionnelle et l'humidité nécessaire à la croissance des cultures s'appuie désormais en grande partie sur l'irrigation.

Cette conjoncture, peu favorable au développement agricole, a incité le pays à opter pour une politique orientée vers le concept d'économie en eau. L'effort se focalise sur le changement dans les habitudes des pratiques de l'irrigation par les agriculteurs (irrigation gravitaire traditionnelle). Les superficies équipées pour l'irrigation en maîtrise totale ont été estimées à 1 229 907 ha en 2012 dont 58 % irrigués par irrigation de surface, 23 % par aspersion et 19 % par irrigation localisée (FAO, 2012). L'irrigation de surface fait progressivement place à l'irrigation par systèmes sous pression (aspersion et localisée) qui a, en effet, progressé de 21 % en 2000 à 42 % en 2012 et 49 % en 2014 (FAO, 2015). L'irrigation localisée est considérée comme le moyen le plus économe et efficace pour fournir juste ce qu'il faut, c'est-à-dire une quantité d'eau calculée de façon à satisfaire les besoins des cultures et prévenir l'accumulation des sels dans le sol tout en minimisant les pertes par percolation et par ruissellement (FAO, 1997). Cependant, cette conception nécessite une bonne connaissance des propriétés hydrodynamiques des sols. En Algérie, les enjeux du climat et des ressources en eau et en sols requièrent des recherches locales pour adapter les systèmes de production agricole.

Le sol, dans sa partie non saturée, apparaît comme un complexe dynamique à trois phases : liquide, solide et gazeuse. Ce dernier est représenté comme une matrice composée d'un ensemble de pores, connectés entre eux et dans lesquels l'eau est retenue ou non en fonction de son potentiel matriciel (h). L'évolution de la quantité de l'eau (volume) et de sa qualité (composition) découle d'une dynamique de transferts liée aux propriétés même de l'eau et aux caractéristiques du sol (Musy, 2005). L'information prédictive sur la distribution spatiale de l'eau du sol et sur sa disponibilité pour les plantes permettra aux producteurs de prendre des décisions efficaces afin de maximiser leur rentabilité (Khodaverdilloo et al., 2011 ; Touil, 2012).

Il est possible de simuler des transferts d'eau qui s'exercent sous l'effet de gradients de pression. Les propriétés hydrauliques du sol sont les principales données d'entrée pour décrire et simuler le transport de l'eau et des solutés dans le profil du sol. On suppose que le comportement hydrodynamique dans un sol est caractérisé par deux fonctions : la conductivité hydraulique $K(h)$ et la rétention en eau des sols $\theta(h)$. La rétention en eau du sol est une propriété hydrodynamique clé qui régit le fonctionnement et la gestion du sol. L'équation aux dérivées partielles (équation de Richards, 1931), qui permet de décrire le transport de l'eau dans le sol, repose sur la formulation de ces deux fonctions.

A partir de cette description conceptuelle du sol, de nombreux auteurs ont proposé des relations mathématiques permettant de décrire la fonction $\theta(h)$. Parmi les plus utilisées, on peut citer les modèles de Brooks et Corey (1964), Campbell (1974), De Jong (1983), Saxton et al. (1986) et Van Genuchten (1980). Le dernier modèle est le plus couramment utilisé, et c'est celui que nous avons choisi dans le cadre de ce travail. L'estimation des paramètres qui interviennent dans l'expression de Van Genuchten revêt donc une importance majeure. Il s'agit d'une étape très délicate dans l'utilisation des modèles et en conditionne fortement les résultats (Schneider, 2008).

La rétention en eau n'est généralement connue que pour un nombre restreint de sols en raison de la lourdeur des protocoles utilisés pour sa détermination¹. Raison pour laquelle des outils de prédiction ont été développés pour résoudre ce problème. Ces outils, dénommés « fonctions de pédotransfert » (FPT), relient les propriétés hydriques à des propriétés du sol beaucoup plus aisément accessibles comme les fractions texturales, la teneur en carbone organique ou encore la densité apparente (Bouma, 1989 ; Van Genuchten et Leij, 1992).

Deux grands types de fonction de pédotransfert (FPT) ont été développés : l'un consiste à établir des FPT pour prédire des teneurs en eau à des valeurs ponctuelles de potentiel (FPT point ou ponctuelle) alors que l'autre consiste à établir des FPT pour prédire les paramètres de calage d'un modèle de courbe (FPT paramétrique) décrivant de façon continue les quantités d'eau retenues en fonction du potentiel (Bastet et al., 1998 ; Ary Bruand et al., 2002).

Ce développement s'est poursuivi en parallèle avec les discussions sur la capacité des FPT à estimer, avec plus ou moins de justesse, les teneurs en eau mesurées pour des échantillons qui ont relativement la même nature de constituants du sol (Williams et al., 1992 ; Tietje et Tapkenhinrichs, 1993 ; Kern, 1995 ; Pachepsky et al., 1998 ; Bastet et al., 1998 et 1999 ; Schaap et al., 2001 ; Cornelis et al., 2001 et 2005 ; Wösten et al., 2001 ; Donatelli et al., 2004). C'est en effet avec les FPT établies à partir de sols de caractéristiques proches de celles des sols étudiés que les estimations sont le moins biaisées et les plus précises (Morvan et al., 2003). Les FPTs ont généralement un fort caractère régional et montrent leurs limites lorsqu'elles sont employées hors de leur zone d'origine (Nasri, 2014). Un effort de réflexion sur l'utilisation des FPTs hors de leurs contextes agropédoclimatiques d'origine est nécessaire.

Le fonctionnement des modèles de rétention en eau dans le sol exige un nombre important de données relatives aux paramètres hydrodynamiques. En Algérie, il n'y a, jusqu'à présent, pas eu d'études réalisées à l'échelle des sols du territoire national ou régional dans ce domaine en raison de l'absence d'un jeu de données que l'on pourrait considérer comme représentatif. Il y a eu en revanche quelques travaux portant sur les propriétés hydrodynamiques des sols, réalisés dans le cadre d'études de périmètres irrigués d'intensification agricole et situés dans différentes plaines du pays (*e.g.* Études de l'avant-projet détaillé des extensions de Guerouaou et de Sebkhath Benziane et du réaménagement du Bas Chélif. BNEDER, 1990).

Le présent travail s'inscrit dans un contexte global sur l'étude des sols algériens et de leurs propriétés hydrauliques, notamment la rétention en eau. Il vise à mettre en évidence des modèles simples à appliquer, vérifiables et adaptés au contexte agropédoclimatique algérien. Notre approche consiste à appliquer une méthodologie simple pour modéliser et caractériser les transferts d'eau dans le contexte des pratiques agricoles, notamment en termes d'irrigation.

Problématique et hypothèses de travail

Généralement, l'établissement de FPTs exige la connaissance des propriétés de rétention en eau et des caractéristiques basiques du sol (texture, teneur en matière organique, densité apparente, etc.) et d'une base de données représentative et suffisante d'échantillons (sol) pour développer des relations statistiquement robustes.

L'insuffisance de données, voire leur absence, sur les propriétés hydrauliques des sols ne permet pas de pouvoir dériver des FPTs locales. Les hydrologues sont souvent confrontés à des situations où un ou plusieurs paramètres d'entrée de la FPT ne sont pas disponibles. Un certain nombre de bases de données de sols, ou parfois plus modestement un ensemble de sols limités à plusieurs horizons, ont été utilisés pour établir des FPTs dans cette étude.

Dans un premier temps, nous ferons quelques rappels concernant l'expression de la teneur en eau en relation avec le potentiel de l'eau qui lui convient, puis nous établirons un état de l'art des propriétés de la rétention en eau du sol et ses facteurs influençant, afin de présenter d'une manière plus détaillée les approches prédictives

¹ La technique des presses de Richards permet d'obtenir au laboratoire une courbe de rétention en eau $\theta(h)$ définie au Chapitre 3.

utilisées dans ce contexte. Enfin, nous discuterons quelques travaux relatifs à l'évaluation des fonctions de pédotransfert.

Objectif 1 : Evaluation de la performance des fonctions de pédotransfert existantes pour prédire la rétention en eau de quelques sols algériens

Dans cette partie, nous discutons la robustesse et l'efficacité d'une FPT en dehors de son ensemble de données de développement. En outre, une question importante subsiste quant à la transposabilité de la FPT sur d'autres contextes agropédoclimatiques. Les modèles développés et validés dans un contexte particulier ont été relativement peu testés dans d'autres contextes. Dans cette étape de la thèse, nous analysons l'intérêt de transposer, sur quelques sols algériens, des modèles internationaux issus de la littérature pour estimer les rétentions en eau à la capacité au champ $\theta_{2.5}$ (à -330 hPa) et au point de flétrissement $\theta_{4.2}$ (à -15000 hPa). Les FPTs considérées sont celles de : Saxton et al. (1986), Rawls et al. (1982), Rosetta (Schaap et al. 2001), Ghorbani Dashtak Homae-type1 (2004), Ghorbani Dashtak Homae-type3 (2004), Vereecken et al. (1989), Rawls et Brakensiek (1989) et Campbell (1974). Nous les utilisons pour évaluer la rétention en eau du sol à la capacité au champ (CC) et au point de flétrissement (PF) sur un ensemble de 134 échantillons prélevés dans le Bas Cheliff (Algérie). Des critères d'évaluation tels que l'information Akaike (AIC) et l'erreur moyenne quadratique (EMQ) sont utilisés pour vérifier la performance de ces modèles quand ils sont appliqués à quelques sols algériens.

Ce travail a abouti à la publication suivante dans la revue *Desalination and Water Treatment* :

Touil S., Degré A., Chabaca M.N., 2016. Transposability of pedotransfer functions for estimating water retention of Algerian soils. *Desalination and Water Treatment*, 57(12), 5232-5240.

Objectif 2 : Etude de la sensibilité des fonctions de pédotransfert pour prédire la rétention en eau des sols algériens

Cette étape est motivée par la nécessité de penser à une alternative aux fonctions de pédotransfert établies dans différents contextes agropédoclimatiques de par le monde et d'envisager la possibilité de développer des FPT spécifiques. Dériver des FPT basées sur des sols algériens pour permettre de prédire des paramètres de calibrage du modèle de courbe de rétention en eau (*e.g* de Van Genuchten, 1980) est une perspective majeure dans ce travail.

Dans cette même optique, nous avons entamé une analyse de la sensibilité globale des FPTs spécifiques en fonction de leurs formalisations mathématiques, différentes les unes des autres en matière de variables d'entrée (fractions granulométriques, densité apparente, matière organique).

Activité 1 : Elaboration des FPTs algériennes pour prédire les propriétés de la rétention en eau

Dans un premier essai, nous avons élaboré des FPTs point et paramétriques spécifiques aux sols algériens et les avons comparées aux applications de l'un des modèles les plus répandus dans les études des FPTs, à savoir la courbe de rétention en eau de Van Genuchten (1980) qui permet une meilleure description de l'évolution conjointe de la teneur en eau volumique et de h (potentiel de pression) à proximité de la saturation. Ce modèle favorise une simplicité de l'expression analytique ainsi que la capacité à donner des expressions dérivées (*ex* : estimation de la conductivité hydraulique). Vereecken et al. (1989) puis Wösten et al. (1985, 1995) ont établi des fonctions de pédotransfert sur les paramètres de l'équation de Van Genuchten (1980). Schaap et al. (2001) ont élaboré le paquet de Rosetta basé sur la méthode du réseau de neurones artificiels, qui met en œuvre 5 FPT hiérarchiques pour prédire ces paramètres à l'aide de limites bien déterminées (les classes de texture du sol seulement) et des données d'entrée les plus répandues (la texture, la densité, et un ou deux points de la rétention en eau). Cela a rendu le modèle Rosetta très utile pour les pays ayant peu de données.

Trois méthodes de modélisation sont adoptées pour générer les fonctions de pédotransfert spécifiques pour la prédiction de la rétention en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement de 53 échantillons de sol recueillis dans le Bas Cheliff : la régression linéaire multiple (RML), la régression multiple non linéaire (RMNL) et le réseau de neurones artificiels (RNA) de Rosetta (RNA; Schaap et al., 2001) sont utilisés pour prédire les paramètres de la courbe de Van Genuchten (Van Genuchten, 1980).

Activité 2 : Etude de la sensibilité des FPT point et paramétriques pour prédire les propriétés de la rétention en eau des sols algériens

L'amélioration de la précision des fonctions de pédotransfert (FPTs) nécessite l'étude de l'incertitude dans la prédiction qui peut être répartie entre les différentes entrées du modèle. Le but était de classer les variables entrées des FPTs par ordre d'importance en fonction du potentiel de l'eau et de la classification texturale. Les discussions se focalisent sur la performance des modèles développés, avec une analyse de la sensibilité globale (Sobol, 1990) des FPTs.

Cet objectif a conduit à la publication suivante dans la revue SOIL :

Touil, S., Degré, A., and Chabaca, M. N., 2016. Sensitivity analysis of point and parametric pedotransfer functions for estimating water retention of soils in Algeria, SOIL, 2, 647-657, <https://doi.org/10.5194/soil-2-647>.

Objectif 3 : Impact de l'irrigation par les eaux usées épurées (EUE) sur la courbe de rétention en eau de quelques sols algériens

Alors que les objectifs 1 et 2 se sont focalisés sur l'applicabilité et le développement de FPTs sur quelques sols algériens irrigués par des ressources en eau conventionnelles, le 3ème objectif de cette thèse propose d'étudier la rétention en eau des sols à travers le suivi de l'évolution des flux d'eau dans un contexte d'irrigation par les eaux non conventionnelles (eaux usées épurées (EUE)).

La réutilisation des EUE est une pratique très répandue dans les régions du monde affectées par des pénuries de ressources en eau. Certains pays et Etats (Australie, Californie, Floride, Israël, Jordanie, etc.) ont comme objectif de satisfaire 10 à 30 % de leur demande en eau par cette ressource alternative dans les 5 à 10 prochaines années (Lazarova et al., 2013). Dans les zones arides et semi-arides, la gestion durable des ressources en eau et des ressources en sol est un challenge permanent. Etudier les effets de la qualité de l'eau sur la rétention est important pour le développement de pratiques efficaces de conservation et de gestion des sols et de l'eau. Dans les régions arides, le climat rend l'irrigation nécessaire à toute mise en culture, ce qui exige une maîtrise des ressources en eaux et en sols. Suivant les cas, et en fonction des conditions environnementales, les sols contiennent des sels en quantité plus ou moins importante. En Algérie, plus de 20 % des sols irrigués sont concernés par le problème de la salinité (Douaoui et al., 2007). La salinité des sols évolue progressivement d'un sol sableux à un sol argileux, cela a un impact direct sur les plantes. Cette évolution peut s'accélérer lors de l'utilisation d'une eau non conventionnelle (eau usée épurée) et avoir un effet sur la courbe de rétention en eau du sol. Le bassin méditerranéen est l'une des régions du monde où la réutilisation agricole des eaux usées épurées est la plus pratiquée. Le déficit chronique en eau et son aggravation due au réchauffement climatique, dans cette région conduit progressivement à une utilisation accrue des eaux usées épurées en agriculture pour l'irrigation.

En Algérie, l'agriculture est le premier consommateur d'eau. En 2012, sur 69 % de la superficie équipée pour l'irrigation, la principale ressource en eau était l'eau souterraine provenant des forages (41 %), des puits (26 %) et des sources (2 %) (FAO, 2012).

L'Algérie compte actuellement 171 stations d'épuration (MRE, 2018) dont 17 sont concernées par la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture. En 2016, l'office national de l'assainissement (ONA) estimait le volume réutilisé à 14.6 Millions de m³ destiné à irriguer 11 076ha de superficies agricoles.

Cependant, en raison de l'origine et de la composition de ces eaux, leur réutilisation doit être gérée d'une manière rationnelle et contrôlée afin de maîtriser et de minimiser les risques sanitaires et environnementaux liés à cette pratique.

Reste à connaître le devenir de ces eaux distribuées dans le sol et l'impact de leur qualité sur les propriétés de la rétention en eau des sols. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étape du travail pour étudier l'impact de

l'irrigation par les EUE sur la courbe de rétention en eau du sol dans des parcelles ayant été soumises à ce type d'irrigation sur des périodes de 8 et 13 ans, situées dans la wilaya de Boumerdes.

Références

- Al Majou H., 2008. Etude et prédiction des propriétés de rétention en eau des sols : Prise en compte de la composition et de l'état structural du sol. Thèse de doctorat. Département Sciences de la Terre. Université d'Orléans.
- Bastet G., Bruand A., Voltz M., Bornand M., Quéting P., 1999. Performance of available pedotransfer functions for predicting the water retention properties of french soils, In: Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Media, Riverside, California, October 22-24, 1997, ed. M.Th. Van Genuchten, F.J. Leij and L. Wu, 981-991.
- Bastet, G., Bruand, Quéting A. 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), 7-28.
- Behzad Nasri, 2013. Evaluation des fonctions de pédotransfert d'un sol hétérogène, milieu récepteur d'eau usée traitée, sur un site pilote dédié. Sciences de la Terre. Université Paris-Est, France.
- Bouma J., 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation, *Adv. Soil Sci.* 9, 177– 213.
- Brooks R.H., Corey C.T., 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper 3, Colorado State Univ., Fort Collins, CO.
- Bruand A., Pérez Fernández P., Odile Duval, Quéting P., Bernard Nicoullaud., et al., 2002. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols : Utilisation de classes de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale. *Etude et Gestion des Sols*, Association française pour l'étude des sols, 9, pp.2, 105-126.
- Campbell G.S., 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data, *Soil Sci.* (117) 311–314.
- Campbell G.S., 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity moisture retention data. *Soil Science*, 117(6), 311-314.
- Cornelis W.M., Ronsyn J., Van Meirvenne M., Hartmann R., 2001. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 638–648.
- De Jong R., Campbell C.A., Nicholaichuk W., 1983. Water retention equations and their relationship to soil organic matter and particle size distribution for disturbed samples. *Can. J. Soil Sci.*, 63, 291-302.
- Douh, B., Boujelben A., 2010. Effet Du Système D'irrigation Localise Au Goutte A Goutte Souterrain Sur Une Culture D'aubergine. Actes des 17ème Journées Scientifiques sur les Résultats de la Recherche Agricoles. Nabeul-Tunisie 16 et 17 Décembre.
- FAO. 2012. Site web AQUASTAT. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Site consulté le [05/01/2018].
- FAO. 2015. Indicateurs sensibles au genre pour l'agriculture et l'eau en Algérie. Rapport interne. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO., 1997. La petite irrigation dans les zones arides : principes et options. (Fr) / Hillel, D. / FAO, Rome (Italy). Div. de la Mise en Valeur des Terres et des Eaux. Rome (Italy). 69 p. Collection FAO: Développement (FAO). no. 2. / P56. Job no: W3094. ISBN 92-5-203896-5.
- Ghorbani Dashtaki Sh., Homae M., 2004. Using geometric mean particle diameter to derive point and continuous pedotransfer functions, In Whrle, N. and Scheurer, M. (eds.) EuroSoil. September 4–12. 2004. Freiburg. Germany. 10 (30) 1–10.
- Kern J. S., 1995. Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 1134-1141.
- Khodaverdiloo, Habib & Homae, Mehdi & Van Genuchten, Martinus & Ghorbani Dashtaki, Shoja. (2011). Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*. 399. 93-99. 10.1016/j.jhydrol.2010.12.040.
- Lazarova, V., Brissaud, F., 2013. Intérêt, bénéfices et contraintes de la réutilisation des eaux usées en France. *L'eau, l'industrie, les nuisances*. Juin 2013, 299.
- M. Donatelli, Wösten J.H.M., Belocchi G., Acutis M., Nemes A., Fila G., 2004. Methods to evaluate pedotransfer functions, Elsevier B.V. 30, 357–411.

- Mc Donald : Étude de l'avant-projet détaillé des extensions de Guerouaou et de Sebkhath Benziane et du réaménagement du Bas Chélif. BNEDER (Bureau National d'Étude pour le Développement Rural), 1990.
- Morvan X., Bruand A., Cousin I., Roque J., Baran N., Mouvet C. [2003]. Prédiction des propriétés de rétention en eau des sols d'un bassin versant à l'aide de fonctions de pédotransfert : influence de la densité apparente et de la teneur en éléments grossiers. In *Etude et Gestion des Sols*, 11 (2) : 117-135.
- MRE (ministère des ressources en eau), 2014. 850 millions de m³ pour l'irrigation dès la fin 2015. [éd.] Liberté. 22 Mai 2014, 6619, p. 9.
- Musy, A., & Laglaine, V., 2005. Hydrologie générale. *Cours en ligne*.
- Pachepsky, Ya., Rawls, W.J., Gimenez, D., Watt, J.P.C., 1998. Use of soil penetration resistance and group method data handling to improve soil water retention estimates, *Soil Tillage Res.* 49, 117–126.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L., 1982. Estimating soil water retention from soil properties, *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 108, 166–171.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L., 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties, H.J. Morelseytoux (ed), *Unsaturated flow in hydrologic modeling - theory and practice*, Dordrecht. Kluwer Academic, 275-300.
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1, 318–333.
- Saxton K.E., Rawls W.J., Roemberger J.C., Papendick R.I., 1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 1031–1036.
- 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.
- Schaap M.G., Leij F.J., and Van Genuchten M. Th., 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions, *Journal of Hydrology*. 251, 163-176.
- Schaap M.G., Leij F.J., and Van Genuchten M. Th., 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions, *Journal of Hydrology*. 251, 163-176..
- Schneider S., 2008. Estimation des paramètres hydrodynamiques des sols à partir d'une modélisation inverse de données d'infiltration et de résistivité électrique. Thèse de doctorat. Planète et Univers [physics]. Université Paris Sud - Paris XI.
- Sobol, I.M., 1990. Sensitivity analysis for non-linear mathematical models, *Mathematical Modelling and Computational Experiment 1* (1993) 407–414; Translated from Russian: I.M. Sobol', Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models, *Matematicheskoe Modelirovanie 2*, 112–118.
- Tietje, O., Tapkenhinrichs, M., 1993. Evaluation of pedotransfer functions, *Soil Science Society of America Journal*. 57, 1088–1095.
- Touil S., 2012. Elaboration et utilisation de fonctions de pédotransfert pour la prédiction des propriétés de la rétention en eau des sols du bas Cheliff. Algérie. Mémoire de Magister : Université de Hassiba Ben Bouali, Chlef, Algérie. 116 P.
- Van Genuchten M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892–898.
- Van Genuchten M.Th., Leij F.J., 1992. On estimating the hydraulic properties of unsaturated soils, *Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*, Riverside. CA.CA. 11–13. University of California, 1–14.
- Vereecken V H., Maes J., Feyen J., Darius P., 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content, *Soil Sci.* 148, 389–403.
- Williams, J., Ross, P.J., Bristow, K.L., 1992. Prediction of the Campbell water retention function from texture, structure and organic matter. In: *Proceedings of an International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*, eds MTh Van Genuchten FJ Leij & LJ Lund, University of California, Riverside, CA, USA. pp. 427-441.
- Wösten J.H.M., Pachepsky Y.A., and Rawls W.J., 2001. Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics, *J. Hydrol.* 251, 123–150.
- Wösten, J.H.M., Finke, P.A., Jansen, M.J.W., 1995. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. *Geoderma*, 66, 227–237.
- Wosten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A., Le Bas, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90, 169–185.

Propriétés de rétention en eau des sols
Synthèse bibliographique

Dans cette partie, nous nous focaliserons sur la prédiction des propriétés de rétention en eau. Ainsi, après avoir fait quelques rappels concernant l'expression de la teneur en eau et de l'état de l'eau dans les sols, nous présenterons les différents facteurs explicatifs de la rétention d'eau qui seront étudiés en relation avec le contexte agropédologique et l'usage du sol.

Nous présenterons également les différents types de relations qui ont été proposés dans la littérature pour prédire la quantité d'eau retenue par le sol à une valeur de potentiel hydrique en fonction des caractéristiques du sol. Ceci nous permettra d'introduire la notion de fonction de pédotransfert.

2.1. Propriétés de rétention en eau des sols

2.1.1. Teneur en eau du sol

La teneur en eau du sol est la quantité d'eau contenue dans un volume donné de sol à tout moment exprimée sur une base gravimétrique ou volumétrique. La teneur en eau gravimétrique (θ_g) est la masse d'eau par masse du sol sec. Elle est mesurée en pesant un échantillon du sol humide (M_w), en séchant l'échantillon pour enlever l'eau, puis pesant le sol séché (M_s) :

$$\theta_g = \frac{M_w}{M_s} \quad (2-1)$$

La teneur en eau volumétrique (θ_v) est le volume d'eau liquide (V_w) par le volume du sol (V_s). Le volume est le rapport de la masse à la densité (ρ) qui donne :

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_s} \quad (2-2)$$

Avec la structure, la texture, la teneur en matière organique et la couverture pédologique, elle est l'un des paramètres clé de la rétention en eau des sols. La teneur en eau du sol est, à la fois, une conséquence et un paramètre d'influence de la capacité de rétention en eau. Elle dépend fortement des conditions climatiques et des conditions édaphiques.

La teneur en eau du sol peut également avoir une incidence indirecte sur la rétention en eau par son rôle dans les processus chimiques et biologiques, en particulier sur la biodiversité des sols et sa contribution à la régulation des processus d'évapotranspiration. L'eau du sol peut être gérée activement, soit directement par l'approvisionnement en eau, soit par l'irrigation ou l'évacuation d'eau par drainage, soit indirectement par la gestion des sols, à savoir les pratiques et la couverture terrestre qui influencent les processus naturels d'infiltration d'eau de pluie, d'évapotranspiration et de percolation.

2.1.2. Capacité au champ et point de flétrissement

La capacité au champ (CC) est le terme utilisé pour décrire la quantité maximale d'eau qu'un sol, initialement saturé, conservera après que l'eau gravitaire se soit évacuée. Elle varie de 1/10 bar (10 kPa) pour les sols texturés grossiers à 1/3 bar (33 kPa) pour les sols à texture fine (Tableau 1).

Le point de flétrissement permanent (PF) est la teneur en eau du sol au niveau ou en dessous de laquelle les plantes flétrissent et tous les processus de croissance cessent. On suppose qu'il correspond à 15 bars de la tension ou la succion de l'eau du sol.

Tableau 1. Réserve en eau utile (RU) et densité apparente selon les textures (Jamagne et al. 1977).

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

S: sable; SL: sable limoneux; SA : sable argileux ;LLS :limon léger sableux ;LS :limon sableux ;LMS :limon moyen sableux ;LSA :limon sablo-argileux ;LAS : limon argilo-sableux ;LL :limon léger ;LM :limon moyen ;LA :limon argileux ;AS :argile sableuse ;A :argile ;AL :argile limoneuse ;A Séd. : argile sédimentaire ; ALO : argile lourde

2.1.3. Rétention en eau du sol

Le sol est composé de minéraux, de matières organiques, d'eau et d'air. La composition et la proportion de ces composants influencent fortement les propriétés physiques du sol, y compris sa texture, sa structure et sa porosité qui est la fraction de l'espace des pores dans un sol. À leur tour, ces propriétés influent sur le mouvement de l'air et de l'eau dans le sol, aidant ainsi le sol à mieux fonctionner pour favoriser la croissance des plantes.

Lorsque l'eau est appliquée à la surface du sol, que ce soit par précipitation ou par irrigation, elle s'écoule naturellement par gravité, à condition que l'infiltration ne soit pas entravée par des barrières physiques ou que la surface du sol ne reçoive pas plus d'eau que l'infiltration dans un certain laps de temps. Dans ces conditions, l'eau est retenue en différentes quantités à différents potentiels de succion en fonction de plusieurs facteurs. En d'autres termes, 1 m² de sol peut retenir de moins d'un litre à plus de 100 litres d'eau par heure, jusqu'à sa saturation. Généralement, la rétention en eau est élevée au début d'un événement pluviométrique, puis le taux d'infiltration diminue progressivement à mesure que la teneur en eau du sol augmente. L'eau remplit progressivement tous les pores, fissures et fractures du sol, jusqu'à ce qu'il atteigne sa « teneur maximale en eau ».

2.1.4. Courbe de rétention en eau

La courbe de rétention d'eau du sol (CRES) est la relation entre la teneur en eau (W ou θ) et le potentiel de l'eau du sol, le plus souvent exprimé en unité de pression (Pascal) ou en hauteur de colonne d'eau (cm).

Le potentiel de l'eau dans les sols est contrôlé par différents types de forces dont la somme régit l'énergie de liaison de l'eau du sol (Buckingham, 1907; Schofield, 1935; Bourrié et Pédro, 1979). Le potentiel total peut s'écrire comme suit:

$$\Phi_t = \phi_g + \phi_m + \phi_o + \phi_a + \phi_e \quad (2-3)$$

Avec 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).

La courbe est caractéristique pour différents types de sols (différentes textures, structures, etc.). Elle décrit la capacité d'un sol à retenir de l'eau de façon qu'à chaque valeur de potentiel correspond une teneur en eau. Pour obtenir la courbe de rétention d'eau au laboratoire, l'échantillon analysé est amené à un potentiel de l'eau fixé à l'avance (0 à -1500 kPa) et sa teneur en eau est mesurée (Richards, 1948).

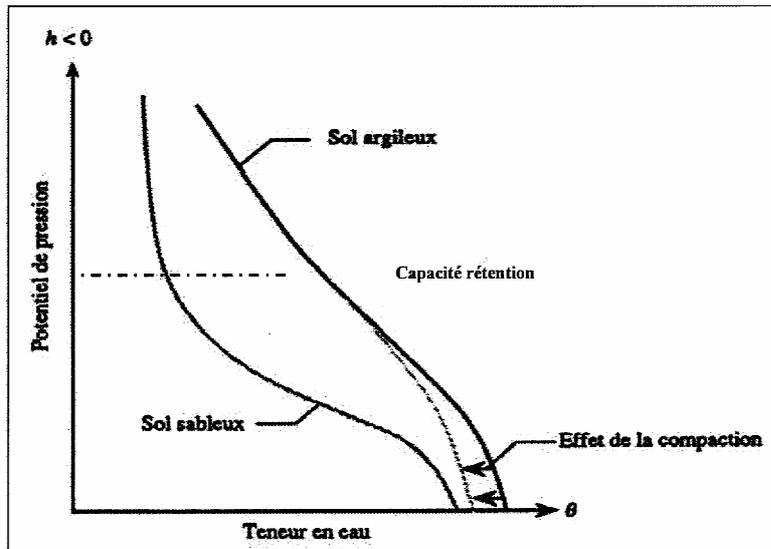


Figure 1. Courbe de rétention en eau d'un sol de texture sableuse et argileuse (Selon Musy et Soutter, 1991)

La courbe de rétention en eau des sols varie au cours de l'année et la difficulté consiste à définir un état de référence. Ces variations sont essentiellement dues à des phénomènes d'hystérésis dépendant de l'état hydrique du sol et du retrait structural de ses constituants (Figure 1). Il apparaît que les conditions expérimentales de la mesure de la courbe de rétention d'eau au laboratoire peuvent différer fortement des conditions réelles du terrain et modifier le résultat de façon importante. En effet, il est préférable d'effectuer les mesures à date fixe durant l'année, dans des conditions où le sol se trouve à un état similaire d'une année à une autre. Une méthodologie adaptée, basée sur l'étude d'échantillons non remaniés et prélevés à une humidité proche de la capacité au champ (après la période hivernale), permet de limiter au maximum tout biais expérimental. En effet, le labour est suffisamment ancien pour que les sols aient retrouvé un état de référence comparable pour lequel l'effet des opérations de travail du sol et les conséquences du passage d'engins soient minimisés.

2.2. Facteurs influençant la rétention de l'eau

La dynamique de l'eau dans le sol est influencée par de nombreux facteurs qui varient selon le profil du sol, l'utilisation des terres et temporellement en fonction du climat (Swarowsky et al., 2011). Ces facteurs sont liés au sol et au contexte agropédoclimatique. La littérature scientifique montre que la capacité intrinsèque du sol à retenir l'eau peut généralement être décrite par des paramètres spécifiques du sol (comme la texture du sol, la structure du sol et la teneur en matière organique du sol (MO), la couverture du sol et la teneur initiale en eau).

Ensemble, ces paramètres déterminent la capacité du sol à saisir, à retenir et à libérer de l'eau, soit directement, soit par des interactions les unes avec les autres. Par exemple, la structure du sol a une influence directe sur la rétention en eau du sol en permettant des flux préférentiels. La biodiversité du sol joue un rôle clé sur la capacité d'un sol à retenir de l'eau par son influence sur la structure du sol.

2.2.1. Texture du sol et porosité

La texture du sol a un effet profond sur la rétention d'eau, elle est considérée comme la plus importante propriété physique des sols. Le terme « texture » est utilisé pour exprimer le pourcentage des trois constituants solides du sol, à savoir le sable, le limon et l'argile. Ces particules se distinguent principalement par leur taille et constituent la fraction minérale. Des particules au-dessus de 2 mm de diamètre ne sont pas considérées comme des textures, même si, dans certains cas, elles peuvent affecter la rétention d'eau et d'autres propriétés. La pertinence de la quantité des différentes particules dans un sol définit sa texture, s'il s'agit d'une texture argileuse, limoneuse, sableuse ou de certaines autres catégories de textures.

La porosité ϕ est le rapport du volume des vides (V_v) au volume total du sol qui peut être calculé à partir de la densité relative du sol. La densité relative est un terme indiquant le rapport entre la masse volumique d'un échantillon du sol et celle de l'eau.

Contrairement à la texture, la porosité et la structure ne sont pas constantes et peuvent être modifiées par la gestion de l'eau et les procédés chimiques. La culture à long terme tend à réduire la porosité totale en raison d'une diminution de la matière organique. La croûte de surface et le compactage diminuent la porosité et inhibent l'entrée d'eau dans le sol et, éventuellement, l'augmentation de la surface écoulee et érodée. Les sols calcaires et salés peuvent également altérer la porosité et la structure. En général, l'augmentation des niveaux de matière organique, la réduction de l'ampleur de la perturbation du sol et la minimisation du compactage et de l'érosion augmenteront la porosité du sol et amélioreront sa structure.

La géométrie des espaces poreux entre les particules du sol et la nature de la surface détermine la rétention en eau du sol. Cette dernière permet au sol de retenir les précipitations ou l'eau d'irrigation dans la zone racinaire sous la forme d'un réservoir d'eau à utiliser par les plantes au cours de la croissance. La quantité d'eau retenue dépend de la distribution de la porosité, des pores et de la pression capillaire de l'eau dans le sol. Cette relation entre la quantité d'eau retenue par le sol (l'eau du sol contenue exprimée en poids ou en volume) et la force par laquelle elle est retenue (pression capillaire ou succion ou tension appelée potentiel matriciel / tension exprimée en barres ou kPa/MPa) est représentée par une courbe communément appelée « courbe de rétention en eau » ou simplement « courbe pF ».

Deux parties de cette courbe présentent un intérêt particulier pour les agriculteurs et les ingénieurs d'irrigation : la capacité au champ et le point de flétrissement permanent. Elles représentent la limite supérieure et inférieure de la disponibilité de l'eau pour les plantes.

2.2.2. Influence de la distribution de la taille des pores sur la rétention en eau

Les sols agricoles devraient pouvoir conserver l'eau pendant de longues périodes entre deux évènements d'apport d'eau (irrigation ou pluies), ce qui nécessite la présence de pores plus petits. Les sols avec une prédominance de petits pores (méso et micropores) tels que les sols à texture fine, présentent généralement une grande capacité de rétention d'eau à travers des potentiels matriciels gradués (0 à 1500 kPa) qui maintiennent l'eau dans le sol contre la force de gravité. Les sols avec une prédominance de micropores risquent d'avoir un mauvais drainage, ce qui induit facilement la saturation en eau. Cela résulte d'une mauvaise aération du sol (Patriquin, 2003) qui limite son potentiel agricole et aboutit souvent à une faible capacité d'infiltration, ce qui le rend sujet au ruissellement (Nedkov et Burkhard, 2012).

2.2.3. Matière organique

La matière organique (MO) joue un rôle clé et direct sur la rétention en eau. Elle contribue indirectement à favoriser l'infiltration et la circulation de l'eau dans le sol en augmentant la capacité d'échange des cations du sol et en stabilisant les agrégats. L'augmentation des teneurs en matières organiques des sols a été corrélée positivement avec une amélioration de la capacité à stocker l'eau, en particulier l'eau disponible, indépendamment de la texture du sol (Ohu et al., 1987 ; Hudson, 1994 ; Wall et al., 2003; Saxton et Rawls, 2006; Singer et al., 2006; Margulies, 2012).

Le rôle conjugué de la texture du sol et des matières organiques est très important dans la rétention de l'eau. Il faut néanmoins considérer que l'effet texture et l'effet matière organique sont variables d'un sol à l'autre, mais aussi d'un potentiel de l'eau à l'autre. On considère de manière générale que pour chaque augmentation de 1 % de la matière organique, l'eau disponible augmente de plus de 1,5 à 2 %, ces augmentations étant plus remarquables dans les sols limoneux (par exemple jusqu'à 4 %) (Hudson, 1994). En effet, il est bien connu 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 (Lal et al., 1994 ; Schjonning et al., 1994).

Cependant, 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. Pour ces auteurs la réserve utile est augmentée parallèlement à la teneur en matière organique.

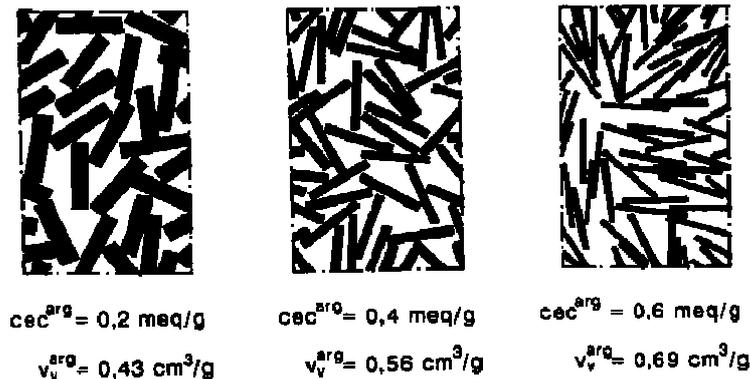
2.2.4. Les argiles et leur minéralisation

Plusieurs auteurs ont montré qu'il existait une relation étroite entre les propriétés de rétention en eau et les argiles (Hillel et al., 1984, Safar et al., 1992, Tessier, 1984 ; Bruand et Zimmer., 1992, Almadjou, 2008, Dridi et al., 2012). Les propriétés de rétention en eau peuvent s'expliquer par les différences de teneur en argile ainsi que de mode d'assemblage des particules composant la phase argileuse et à la nature de cette dernière. 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) (Zemouri, 2009). Les résultats de travaux de Dridi et al. (2012) sur quelques sols argileux de la plaine de la Mitidja en Algérie révèlent que la teneur en argile, en matière organique et en limons fins (2 à 20 μm) sont les facteurs qui contribuent le plus à la rétention en eau des sols, y compris aux bas potentiels (-1600 kPa). Ainsi, Bruand et Tessier (2000) , Bruand (2003) et Almadjou (2008) ont montré l'importance de l'organisation des particules d'argile, celle-ci peut être prise en compte par la capacité d'échange cationique.

Les argiles, et les autres constituants finement divisés des sols, développent une surface spécifique très grande et interagissent très fortement avec l'eau. L'expression macroscopique est généralement un gonflement-retrait. Ce mécanisme a longtemps été explicité par les seules variations de distance entre les feuillets des argiles (Méring, 1949 ; Norrish, 1954 ; Ayhuore et Quirk, 1959). Depuis les travaux de Tessier (1984), on sait que l'eau extraite du sol dans le domaine énergétique utilisable par les plantes est principalement retenue entre les tactoïdes ou quasi-cristaux formés par l'assemblage des particules unitaires de phyllites.

L'étude expérimentale de certains modèles des matériaux d'argile a permis de bien comprendre les mécanismes liés à la charge de feuillet, à la nature de la compensation et à la concentration de la solution sur la rétention d'eau. Cependant, dans les sols, les comportements dépendent aussi de l'« histoire hydrique » du matériau. Croney et Coleman (1954) ont montré que la dessiccation provoque une réorganisation analogue à une sur-consolidation. Ainsi, plus la dessiccation est importante, moins l'échantillon reprend d'eau lors de la réhumectation. Tessier (1984) a montré que ce phénomène est dû à un rapprochement face-à-face des feuillets argileux. Les forces d'interaction entre deux feuillets ainsi accolés sont importantes et le phénomène peut être considéré comme largement irréversible en conditions naturelles.

L'arrangement des particules argileuses est primordial dans la rétention en eau des sols plus que la présence d'eau inter-feuillets. Bruand et al. (1988) et Bruand et Zimmer (1992) ont montré que



l'organisation des particules d'argile peut être prise en compte par la capacité d'échange en cations (Figure 2).

Figure 2. Relation entre la CEC et la morphologie des argiles, d'après Bruand et Zimmer (1992).

2.2.5. Structure du sol

La structure du sol reflète la façon dont les particules de sol solides sont agrégées et arrangées ensemble, ce qui se traduit par un agencement de macrospores et de fissures. Il n'y a pas de structure de sol "idéale" associée à la rétention en eau. Chaque structure présente des caractéristiques différentes en termes de porosité globale, de perméabilité, de stabilité structurale et de résistance du sol en cas de perturbations mécaniques. La structure du sol est particulièrement déterminante pour la capacité des sols à retenir l'eau dans des conditions proches de la saturation. Plus l'eau est présente dans le sol, plus sa répartition dans le profil du sol est conditionnée par la texture du sol et la présence de matière organique (Malaya et Sreedeeep, 2012).

La dégradation de la structure du sol s'accompagne généralement d'une réduction de la rétention en eau. Le compactage, en particulier, est une menace majeure car il augmente la densité apparente du sol et diminue sa porosité, ce qui oblige à réduire la taille des pores dans le sol. Même un faible niveau de compactage peut affecter de manière significative la façon dont l'air et l'eau se déplacent dans le sol, générant un écoulement

avec une diminution de la conductivité hydraulique dans le sol (Richard et al., 2001 ; Mueller et Thompson, 2009).

2.2.6. Contexte agro-pédo-climatique

2.2.6.1. Aspects climatiques

Les précipitations, les températures et les vents sont relativement inhérents à la zone géographique. Au-delà de la capacité des sols à retenir, stocker et libérer de l'eau, les paramètres climatiques (précipitations, températures et vents) influent sur la teneur en eau des sols, dans des proportions variables, sur la recharge des eaux souterraines grâce à leur influence sur l'approvisionnement en eau et l'évapotranspiration. Lorsqu'il n'y a aucun apport d'eau dans le sol, l'eau du sol est progressivement retirée dans l'atmosphère par évapotranspiration jusqu'à atteindre le point de flétrissement. Dans les terres arides, plus de la moitié des précipitations est renvoyée à l'atmosphère par évaporation directement de la surface du sol, l'évapotranspiration y est également élevée pour l'agriculture irriguée. Les zones humides enregistrent aussi des pertes par évaporation importantes durant les périodes estivales.

La température influe directement sur la rétention en eau par la régulation des processus d'évapotranspiration et donc de la libération de l'eau du sol dans l'atmosphère. Une augmentation de la température augmente l'évapotranspiration, entraînant ainsi une diminution de la teneur en eau du sol. L'évapotranspiration peut alors dépasser l'approvisionnement en eau par les précipitations ou l'irrigation, engendrant un stress hydrique pour les plantes et le manque de recharge des eaux souterraines.

Au-delà de son pouvoir érosif, susceptible d'avoir une incidence sur la rétention en eau par les pertes de sol, la vitesse du vent influence également les processus d'évapotranspiration (Liu M. et al., 2012; Liu X. et Zhang, 2012) et modifie donc le bilan hydrique.

2.2.6.2. Couverture de la surface du sol

Les changements dans l'utilisation des terres entraînent des variations importantes des propriétés physico-chimiques de la surface du sol ainsi que des changements dans la demande d'évapotranspiration, en particulier dans la couverture des surfaces entre les sols à couverture végétale, les sols à prédominance abiotique et les sols nus. Lorsque l'on compare les sols forestiers aux sols cultivés, la première différence réside dans leurs propriétés chimiques. En effet, la pratique du chaulage des sols cultivés conduit généralement à la saturation du complexe d'échange par le calcium. D'autre part, il est bien connu que les sols cultivés se différencient par une chute de leur teneur en carbone dans les horizons de surface (Balesdent, 1998; Badeau et al. 1999).

En plus de l'impact direct de la couverture du sol sur la rétention en eau, les changements dans l'utilisation des terres influencent fortement, à l'échelle locale, la structure du sol et la teneur en carbone organique du sol, qui sont des paramètres clés des processus de rétention en eau.

2.3. Les fonctions de pédotransfert

2.3.1. Histoire des fonctions de pédotransfert

Le terme « fonction de pédotransfert » a été introduit par Bouma en 1989, pour traduire des fonctions prédictives de certaines propriétés du sol à partir d'autres propriétés plus disponibles et facilement mesurables, telles que la morphologie du terrain, la texture du sol, la structure et le contenu en carbone organique (figure 3). Les temps et les coûts d'acquisition de ces propriétés étant importants, des fonctions établies à partir de données des sols se sont généralisées. Les fonctions de pédotransfert utilisent diverses techniques d'analyse de régression et d'exploration de données pour construire des modèles qui lient les caractéristiques basiques du sol avec des propriétés plus laborieuses et plus coûteuses à mesurer.

Bien qu'elles ne soient officiellement reconnues et nommées qu'en 1989, les premières applications agronomiques des fonctions de pédotransfert étaient basées sur la connaissance de l'humidité à la capacité au

champ et au point de flétrissement afin de déduire, par différence, la réserve en eau utile du sol. Depuis les années 60 et 70, les propriétés de rétention en eau et leur relation avec les caractéristiques du sol ont fait l'objet de nombreuses études. Au début, il s'agissait d'estimer les paramètres de calcul de la réserve utile (*e.g.* Salter et Williams (1965) ; Petersen et al., (1968, a et b) ; Reeve et al., (1973) ; Hall et al., (1977); Jamagne et al., (1977)).

Dans les années 80, face au progrès de la modélisation des flux d'eau dans le sol, les besoins ont été plus exigeants et l'attention s'est portée sur l'ensemble de la courbe de rétention d'eau et de la conductivité hydraulique. Clapp et Hornberger (1978) ont dérivé des valeurs moyennes pour les paramètres d'une courbe de rétention d'eau fonctionnelle, de la sorptivité et de la conductivité hydraulique saturée pour différentes classes de texture. Bloemen (1977) a dérivé des équations empiriques reliant les paramètres du modèle hydraulique Brooks et Corey à la distribution granulométrique. Lamp et Kneib (1981) ont introduit le terme de « pédo-fonction », tandis que Bouma et Van Lanen (1987) utilisaient le terme de « fonction de transfert ». Pour éviter toute confusion avec le terme fonction de transfert utilisé dans la physique des sols et dans de nombreuses autres disciplines, Bouma (1989) les nommera « fonctions de pédotransfert (FPTs) ».

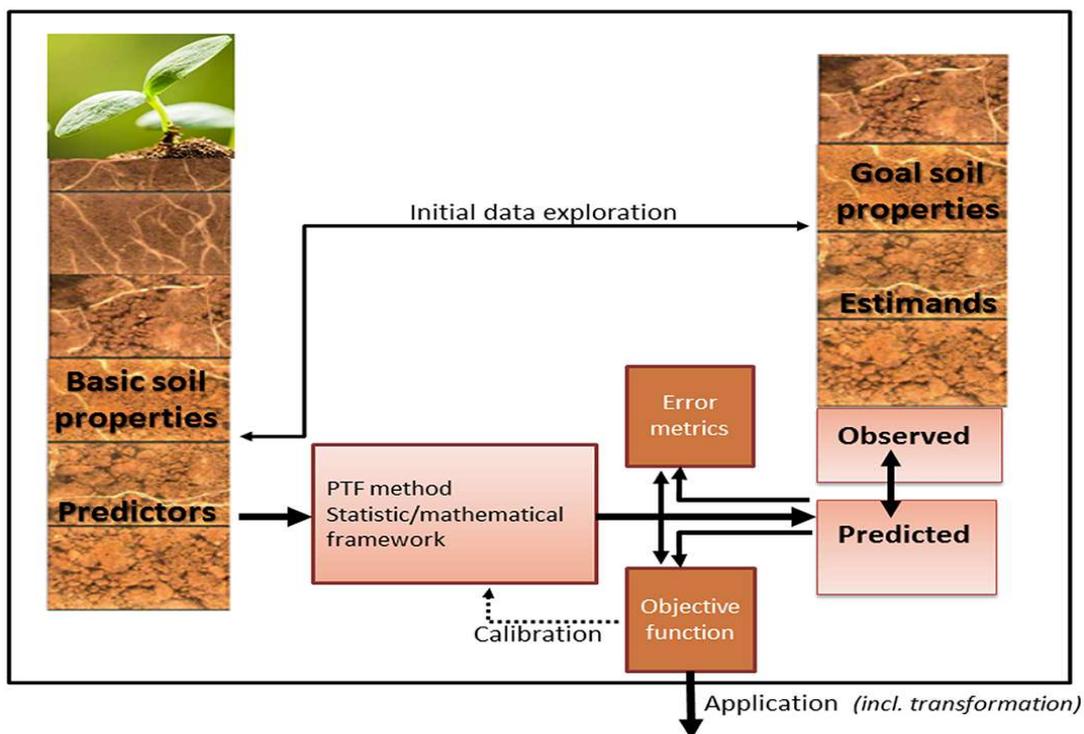


Figure 3. Concept général du développement des FPTs (Van Looy et al., 2017).

2.3.2. Types de fonctions de pédotransfert

2.3.2.1. Fonctions de pédotransfert de points (ponctuelles)

Ces FPTs sont des fonctions empiriques qui prédisent la teneur en eau du sol à un potentiel prédéfini (Gupta et Larson, 1979 ; Rawls et al., 1982). Le plus souvent estimé, (θ) est de -10, -33 kPa correspondant à la capacité au champ et à -1500 kPa correspondant au point de flétrissement permanent qui sont nécessaires pour déterminer la teneur en eau disponible dans le sol.

Les FPTs de points peuvent prendre la forme de l'équation (1) pour prédire la courbe des caractéristiques de l'eau du sol. La valeur de la teneur en eau du sol (θ), à un certain potentiel matriciel (h), dépend de la valeur des paramètres de régression (a , b , c , d et e), qui a des valeurs différentes à une tête de potentiel prédéfinie :

$$W = a*(A\%) + b*(L\%) + c*(S\%) + d*(MO\%) + e*Da \quad (2-4)$$

Avec : A% : Pourcentage d'argile
 L% : Pourcentage de limon
 S% : Pourcentage de sable
 MO% : Pourcentage de matière organique
 Da : Densité apparente

Plusieurs auteurs ont cherché à associer à chaque classe de texture une valeur d'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement, ainsi qu'une densité apparente et une réserve utile (Jamagne et al., 1977) ; Petersen et al. (1968a, b) ; Manrique et al., 1991). Afin d'améliorer la qualité de prédiction, ils ont dû établir la stratification préalable de leur échantillonnage en fonction du type d'horizon, de la texture de l'horizon (Petersen et al., 1968a, b) ou encore du type de sol (Manrique et al., 1991). Afin de caractériser la courbe de rétention de l'eau, Gupta et Larson, (1979), Batjes et al. (1996), et Bruand et al. (1996) ont cherché à mesurer la rétention en eau à plusieurs points de potentiel matriciel, respectivement à douze (12), dix (10) et huit (8) points de potentiel.

2.3.2.2. Fonctions de pédotransfert paramétriques

a) Modèles de la courbe de rétention en eau des sols

Les différents modèles de la courbe de rétention en eau des sols utilisés sont : Brooks et Corey (1964), Campbell (1974), De Jong (1983), Saxton et al. (1986), Van Genuchten (1980). Chaque courbe de rétention d'eau est ajustée par 3 ou 4 paramètres (Tableau 2). La courbe de rétention d'eau prend généralement la forme d'une sigmoïde dont les paramètres de forme évoluent en fonction de la texture et de la structure du sol (Figure 4).

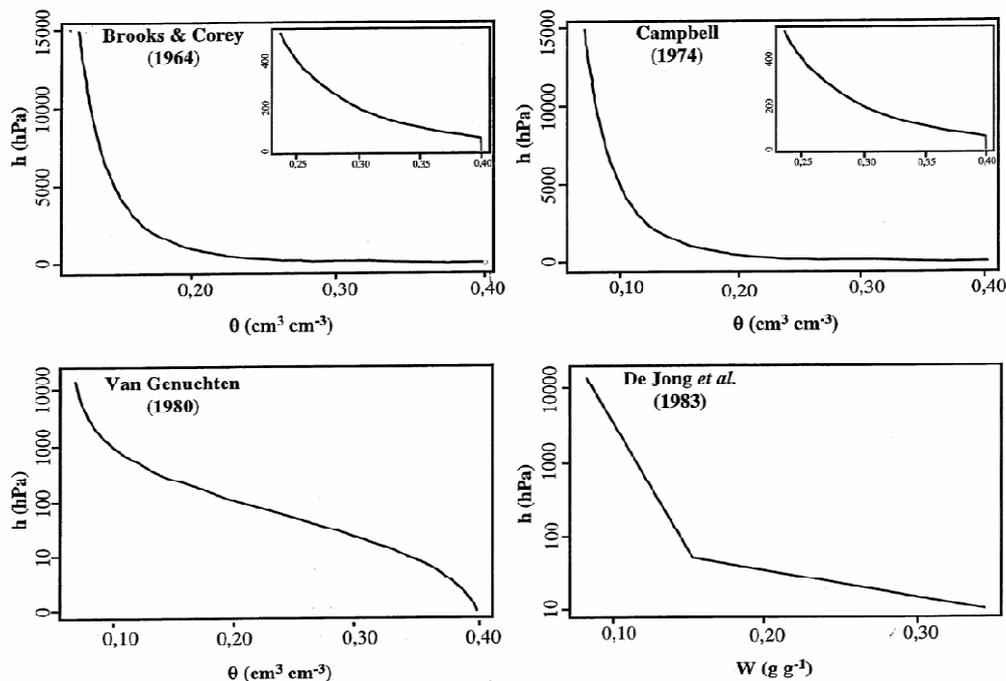


Figure 4. Représentation schématique des différents modèles de courbes utilisés (d'après Bastet et al. 1999).

Tableau 2. Modèles de courbes de rétention en eau des sols

Auteurs	Equations	Paramètres
Brookset Corey (1964)	$\theta(h) = \theta_s$; $h_a/h < 1$ $(\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) = (h_a/h)^\lambda = S_e$; $h_a/h \geq 1$	θ_s : teneur en eau volumique du sol à saturation ; θ_r : teneur en eau volumique résiduelle ; h_a = potentiel au point d'entrée d'air ; S_e = taux de saturation effectif. Le caractère λ varie selon la texture et permet de rendre compte de la distribution de la taille des pores.
Campbell (1974)	$\theta(h) = \theta_s (h/h_a)^{-1/b}$	h_a : potentiel au point d'entrée d'air ; b : paramètre empirique.
Saxton et al. (1986)	$\theta(h) = \theta_s$; $h_a/h < 1$ $\theta = [(100-h)(\theta_s - \theta_{100})] + \theta_{100}$; $h_a \geq h \geq 0,00hPa$ $\theta = (h/A)^{1/B}$; $-100hPa \geq h \geq 15.10^3 hPa$	
De Jong (1983)	$\theta(h) = a + b_1 [\log(h) - t]$; $h_a/h < 1$ $\theta(h) = a + b_2 [\log(h) - t]$; $h_a \geq h \geq 100hPa$ $\theta(h) = a + b_2 [\log(h) - t]$; $h_a \geq h \geq 100hPa$	$t = -1.12 + 0.029 Ar$ b_1 : dépend du taux d'argile ; b_2 : dépend des limons, des argiles et du taux de matières organiques ; a : dépend de la teneur en argile et en matières organiques.
Van Genuchten (1980)	$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha h)^n]^m$	θ_s , la teneur en eau volumique du sol à saturation ; θ_r : teneur en eau volumique résiduelle ; n : paramètre de forme avec $m = 1 - 1/n$.

b) Fonctions de pédotransfert paramétriques associées aux paramètres de la courbe de rétention

Les FPTs paramétriques (ou continues pour certains auteurs) sont basées sur l'hypothèse que la relation entre les données disponibles sur le sol et les propriétés de la rétention en eau du sol nécessitent d'être décrites de manière adéquate par un modèle de la courbe de rétention qui est une équation fermée avec un certain nombre de paramètres. Les FPTs paramétriques ont gagné une popularité considérable avec leur avantage de prédire ces paramètres des modèles de la courbe de rétention en eau des sols (e.g Rawls et Brakensiek, 1985; Wosten and Van Genuchten, 1988; Vereecken et al., 1989; Scheinost et al., 1997; Minasny et al., 1999; Schaap et Leij, 1998, et Minasny et McBratney, 2002).

En se basant sur la bibliographie d'Al Majou et al. (2008), nous allons présenter dans ce qui suit les différentes FPTs paramétriques qui prédisent les paramètres des modèles de Campbell (1974) et de Van Genuchten (1980).

Fonctions de pédotransfert paramétriques établies pour le modèle de Campbell

Concernant la relation proposée par Campbell (1974), des FPTC ont été établies par Cosby et al. (1984) à partir de mesures effectuées sur 1400 échantillons provenant des sols des États-Unis. Ces FPTC ont été établies pour les paramètres h_s , θ_{setb} , h_s étant le potentiel matriciel à saturation et équivalent à h_a dans le modèle de Campbell (1974). Cosby et al. (1984) ont montré à cette occasion que le paramètre b était fortement corrélé à la teneur en argile ($r^2 = 0,97$), tandis que les paramètres h_s et θ_s sont corrélés de façon moins étroite à la teneur en sable grossier (S_a , $r^2 = 0,81$ et $0,77$ respectivement).

Fonctions de pédotransfert paramétriques établies pour le modèle de Van Genuchten

Le modèle de courbe proposé par Van Genuchten (1980) est sans aucun doute celui qui a donné lieu à l'établissement du plus grand nombre de FPTC.

Vereecken et al. (1989) ont établi des FPTC par régressions multiples pour les paramètres de l'équation de Van Genuchten (1980) en fonction des teneurs en argile, limon et carbone organique ainsi qu'en fonction de la densité apparente (Tableau 3).

Wösten et al. (1999) ont établi d'autres FPTC pour le modèle de Van Genuchten (1980) à partir de la base de données Européenne HYPRES (HYdraulic PROPERTIES of European Soils) qui regroupe des données pédologiques et hydrauliques de sols appartenant à 12 pays européens.

Fonctions de pédotransfert paramétriques à concepts physiques

Dans ces FPTs, les paramètres des modèles de courbe de rétention sont directement estimés à partir des propriétés du sol tel que la porosité. 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).

Ces modèles physiques établis cherchent à simuler la distribution des particules, la distribution des pores et l'assemblage structural qui est obtenu à partir de la distribution des agrégats du sol (Arya et Paris, 1981 ; Haverkamp et Parlange, 1986 ; Nimmo, 1997 ; Assouline et al. 1998). A cela peut être ajoutée une approche par calcul de la dimension fractale de la porosité (Tyler et Wheatcraft, 1989). Assouline et al. (1998) ont pris en compte le réarrangement des particules et les changements consécutifs aux retraits/gonflements du sol au cours de la dessiccation/réhumectation.

Tableau 3. Fonctions de pédotransfert associées aux paramètres de la courbe de rétention en eau de Van Genuchten (1980) et Brooks Corey (1964)

<i>Van Genuchten (1980) : $\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) / [1 + (ah)^n] - 1 + \theta_r$</i>		
	<i>Paramètres</i>	<i>Équation de régression</i>
Vereecken etal.(1989)	θ_s	$0,81 - 0,283 * (Da) + 0,001 * (Ar)$
	θ_r	$0,015 + 0,005 * (Ar) + 0,014 * (CO)$
	α	$\text{Exp} [-2,486 + 0,025 * (Sa) - 0,351 * (CO) - 2,617 * (Da) - 0,023 * (Ar)]$
	n	$\text{Exp}[0,053 - 0,009(Sa) - 0,013(Ar) + 0,00015(Sa)^2]$
Ghorbani et al. Type 3 (2004)	θ_s	$933 - 0,000707 * (Sa) - 0,311 * (Da)$
	θ_r	$0,0192 + 0,00375 * (Ar)$
	α	$531 - 4,67 * (Sa) + 550 * (Da)$
	n	$1,668 - 0,00522 * (Sa)$
<i>Brooks Corey (1964) : $\theta(h) = \theta + \theta_s - \theta_r / (h_a/h)^{\lambda}$</i>		
	<i>Paramètre</i>	<i>Équation de régression</i>
Rawls et Brakensiek (1989)	Φ	$0,93 * (1 - ((Da) / 2,65))$
	h_b	$\text{Exp} [5,34 + (0,185 * (Ar)) - (2,48 * \mathbb{Q}) - (0,002 * (Ar)^2) - (0,044 * (Sa) * \mathbb{Q}) - (0,617 * (Ar) * \mathbb{Q}) + (0,001 * (Sa)^2 * \mathbb{Q}^2) - (0,009 * (Ar)^2 * \mathbb{Q}^2) - (0,00001 * (Sa)^2 * (Ar)) + (0,009 * (Ar)^2 * \mathbb{Q}) - (0,0007 * (Sa)^2 * \mathbb{Q}) + (0,000005 * (Ar)^2 * (Sa)) + (0,5 * \mathbb{Q}^2 * (Ar)]$
	λ	$\text{Exp} [-0,784 + (0,018 * (Sa)) - (1,062 * \mathbb{Q}) - (0,00005 * (Sa)^2) - 0,003 * (Ar)^2 + (1,111 * \mathbb{Q}^2) - (0,031 * (Sa) * \mathbb{Q}) + (0,0003 * (Sa)^2 * \mathbb{Q}^2) - (0,006 * (Ar)^2 * \mathbb{Q}^2) - (0,000002 * (Sa)^2 * (Ar)) + (0,008 * (Ar)^2 * \mathbb{Q}) - (0,007 * \mathbb{Q}^2 * (Ar))]$
	θ_r	$-0,018 + (0,0009 * (Sa)) + (0,005 * (Ar)) + (0,029 * \mathbb{Q}) - (0,0002 * (Ar)^2) - (0,001 * (Sa) * \mathbb{Q}) - ((0,0002 * (Ar)^2 * \mathbb{Q}^2) + (0,0003 * (Ar)^2 * \mathbb{Q}) - 0,002 * \mathbb{Q}^2 * (Ar))$

θ_s : teneur en eau volumique du sol à saturation ; θ_r : teneur en eau volumique résiduelle ; Da : densité apparente ; Ar : argile ; Sa : sable ; CO : carbone organique

2.3.3. Formalismes mathématiques utilisés dans le développement des fonctions de pédotransfert

2.3.3.1. Analyse de régression

L'analyse de régression est une technique utilisée dans le développement de la fonction de pédotransfert. C'est une technique utilisée pour la modélisation et l'analyse de données numériques constituées de valeurs d'une variable dépendante (la réponse) et d'une ou plusieurs variables indépendantes (variables explicatives). La variable dépendante dans l'équation de régression est modélisée en fonction des variables indépendantes,

des paramètres de régression ("constantes") et un terme d'erreur. Le terme d'erreur représente une variation inexpliquée dans la variable dépendante. Le plus souvent, le meilleur ajustement est évalué en utilisant la méthode des moindres carrés, mais d'autres critères peuvent également être utilisés.

L'analyse de régression est divisée en deux approches : une régression multiple linéaire et une régression multiple non linéaire étendue (Minasny et al., 1999). La méthode la plus communément employée dans l'estimation des FPTs de points consiste à utiliser de multiples régressions linéaires. La régression multiple non linéaire est souvent utilisée dans les FPTs paramétriques. Les paramètres des modèles hydrauliques sont estimés en ajustant, avec une régression non linéaire, les propriétés basiques du sol et les paramètres du modèle de la courbe de rétention. L'avantage de l'analyse de régression est qu'elle est facile à réaliser et à utiliser, alors que l'inconvénient réside dans le fait que les équations de régression (linéaire, logarithmique ou exponentielle par exemple) et les prédicteurs doivent être déterminés a priori et que les relations entre les propriétés du sol et les prédicteurs peuvent être différentes dans différentes parties de la base de données (Van Looy et al., 2017).

À titre d'exemple, pour les FPTs développées à l'aide de la technique de régression multiple, Rawls et al (1982) et Ghorbani et al (2004) ont développé des FPTs de points (équation 1) pour prédire la teneur en eau du sol en des potentiels matriciels. (Tableau 4).

Tableau 4. Coefficients des régressions multiples et valeurs de R^2 correspondant aux FPTs développés par Rawls et al. (1982) ; Ghorbani et al Type 1 (2004).

FPT	Variable d'entrée	Coef	Potentiel matriciel (hPa)											
			-100	-200	-330	-600	-1000	-2000	-3000	-4000	-5000	-7000	-10000	-15000
Rawls et al. (1982) Modèle 1	Intercept	10^3 a	411,8	312,1	257,6	206,5	34,9	28,1	-	23,8	-	21,6	20,5	26
	Sable (%)	10^3 b	-3	-2,4	-2	-1,6	-	-	-	-	-	-	-	-
	Limon (%)	10^3 c	-	-	-	-	1,4	1,1	-	0,8	-	0,6	0,5	-
	Argile (%)	10^3 d	2,3	3,2	3,6	4	5,5	5,4	-	5,2	-	5	4,9	5
	Matière Organique MO (%)	10^3 e	31,17	31,4	29,9	27,5	25,1	20	-	19	-	16,7	15,4	15,8
	Densité apparente Da (g.cm ⁻³)	10^3 f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		R^2		0,66	0,74	0,76	0,76	0,76	0,65	-	0,70		0,65	0,65
Ghorbani et al. Type 1 (2004)	Intercept	10^{-2} a	35.9	-	15.6	-	11.35	-	11.9	-	9.291	-	-	6.627
	Sable (%)	10^{-2} b	0.423	-	0.323	-	0.287	-	0.219	-	-	-	-	-
	Limon (%)	10^{-2} c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Argile (%)	10^{-2} d	-	-	-	-	-	-	-	-	0.343	-	-	0.315
	Matière Organique MO (%)	10^{-2} e	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Densité apparente Da (g.cm ⁻³)	10^{-2} f	12,2	-	16.9	-	15.09	-	8.39	-	-	-	-	-
	Argile (%) / Limon (%)	10^{-2} g	-	-	-	-	-	-	4.25	-	-	-	-	-
	R^2		0,81	-	0,66	-	0,69	--	0,76	-	0,66	-	-	0,76

2.3.3.2. Analyse des réseaux neuronaux artificiels

Une approche récente pour le développement des FPTs consiste à utiliser des réseaux neuronaux artificiels (RNA). Le modèle mathématique d'un RNA se compose d'un ensemble de fonctions simples reliées par des poids. Le réseau se compose d'un ensemble d'unités d'entrée, d'un ensemble d'unités de sortie et d'un ensemble d'unités cachées qui relient les entrées aux sorties. Les unités cachées extraient des informations utiles des unités d'entrées et les utilisent pour prédire les unités de sorties. Chaque unité possédant éventuellement une petite quantité de mémoire locale (Minasny et al., 1999).

Pachepsky et al. (1996) ont utilisé des RNA pour estimer la teneur en eau de (8) huit potentiels hydrauliques pour estimer les paramètres de Van Genuchten (1980) à partir de données granulométriques et de densité apparente pour 230 échantillons de sol. Schaap et al. (1998) ont estimé les paramètres de Van Genuchten pour 1209 échantillons de sol des États-Unis à l'aide de RNA. L'un des avantages des réseaux de neurones par rapport aux FPTs de régression traditionnelle est qu'ils n'exigent pas de modèle de régression a priori (Schaap et Leij, 1998). Le RNA se comportait mieux que la méthode de régression dans les FPTs de points dans certaines études, mais pour les FPTs paramétriques, la performance des deux approches était comparable (Pachepsky et al., 1996).

2.3.3.3. Quelques méthodes récentes utilisées dans le développement des FPTs

a) *Machines à vecteurs de support (SVM)*

Les machines à vecteurs de support (en anglais *Support Vector Machines (SVM)*) sont un autre outil d'exploration de données récemment utilisé pour construire des FPTs (Skalová et al., 2011, Haghverdi et al., 2014, Nguyen et al., 2015, et Khlosi et al., 2016). Ce sont un ensemble de méthodes d'apprentissage statistique non paramétrique supervisés (Van Looy et al., 2017). L'avantage des SVM est l'élimination du problème minimum local et la résolution des problèmes de discrimination et de régression. Le minimum trouvé dans l'espace des paramètres est toujours le global (Cristianini et Shawe-Taylor, 2000). Contrairement aux réseaux de neurones artificiels (RNA), les SVM sélectionnent automatiquement la taille de leur modèle car elles sont basées sur le principe de l'optimisation des risques structurels qui empêche le surmenage (Vapnik, 1995).

À l'instar des RNA, les SVM ont été développées à l'origine pour résoudre des problèmes de classification (Boser et al., 1992; Cortes et Vapnik, 1995), et modifiée plus tard pour rapprocher les relations entre les variables dans les bases de données (Vapnik, 1995).

Lamorski et al. (2008) ont développé des FPTs dans les sols polonais en utilisant des SVM et des ANNs. Leurs résultats montrent que les SVM ont donné des meilleures précisions, voire égales par rapport aux ANNs. Twarakavi et al. (2009) ont obtenu des résultats similaires lorsqu'ils ont développé des FPTs basées sur des SVM en utilisant la base de données de Rosetta (Schaap et al., 2001).

b) *Méthode des k plus proches voisins*

La méthode des k plus proches voisins (en anglais *k-nearest neighbor*) est une méthode d'apprentissage supervisé, abrégée k-NN ou KNN. Une approche alternative aux méthodes couramment utilisées de dérivation de FPTs (telles que les méthodes de régression ou les réseaux de neurones artificiels) est d'utiliser des techniques non-paramétriques, telles que les k-plus proche voisin (k-NN), introduits dans ce contexte par Nemes et al. (2006a). Les techniques non paramétriques utilisent la reconnaissance de formes et la similitude des données au lieu de s'adapter à la donnée par équations.

La technique k-NN appartient aux algorithmes "apprentissage paresseux". Elle localise et récupère la plupart des objets similaires (les plus proches voisins) dans l'ensemble de données de référence à un objet cible. Le développement de l'ensemble de données (de référence) est conservé tel quel jusqu'à réalisation des calculs. Cela signifie que de nouvelles données peuvent être simplement ajoutées aux données stockées (Miháliková et al., 2014).

Nemes, Rawls et Pachepsky (2006) ont trouvé que la méthode KNN a une performance presque identique à celle des RNA. Nemes, Rawls, Pachepsky et Van Genuchten (2006) ont analysé la sensibilité de la variante KNN à différentes données et algorithmes. Parmi les applications les plus récentes de la méthode KNN, nous pouvons citer Ghehi et al. (2012), Botula et al. (2013), et Nguyen et al. (2015).

2.3.4.Évaluation de l'incertitude des fonctions de pédotransfert

Avec le développement des bases de données, plusieurs études ont testé les différentes FPT existantes dans la littérature. Un facteur important qui doit être pris en considération est l'incertitude dans les prédictions. L'incertitude dans les fonctions de pédotransfert peut résulter d'un biais dans le modèle, de l'incertitude dans les paramètres et des erreurs dans les mesures des variables d'entrée (Minasny et Mcbratney, 2002). Cependant, il apparaît que les fonctions sont d'autant plus performantes quand elles sont appliquées dans leurs aires géographiques d'origine (Minasny et Mcbratney, 2002 ; Schaap et Leij, 1998). Ce constat nous amène à nous interroger sur les conditions d'échantillonnage, la nature et la pertinence des mesures effectuées. Une analyse de l'incertitude est nécessaire pour évaluer la fiabilité des prédictions. Vereecken et al. (1992) ont évalués l'erreur dans les estimations des fonctions de pédotransfert et son effet sur la sortie d'un modèle du mouvement sol-eau.

Rubio et al. (2008) ont évalués l'utilisation des FPTs intégrées dans le modèle Rosetta qui prédisaient les paramètres de la courbe de rétention d'eau du sol par rapport aux autres fonctions de pédotransfert élaborées à partir des méthodes de régression. En outre, ils ont évalué l'incertitude de chaque méthode en termes d'erreur moyenne (ME) et de l'erreur carrée moyenne (EMQ) des prédictions. Les résultats indiquent que l'efficacité des méthodes est similaire à celles obtenues par les autres méthodes de régression, quand elles sont appliquées sur des sols homogènes.

Références

- Al Majou, H., 2008. Etude et prédiction des propriétés de rétention en eau des sols : Prise en compte de la composition et de l'état structural du sol. Thèse de doctorat. Département Sciences de la Terre, Université d'Orléans (France).
- Arya L.M., Paris J.F., 1981. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 1023-1030.
- Assouline S., Tessier D., Bruand A., 1998. A conceptual model of the soil water retention curve. *Water Resour. Res.*, 34(2), 223-231.
- Ayhuore, L. A. G. and Quirk, J. P., 1959. Swelling of clay-water systems: *Nature*, v. 183, pp. 1752-1753.
- Badeau V., Dambrine E., Walter Ch., 1999. Propriétés des sols forestiers français : résultats du premier inventaire systématique. *Étude et Gestion des Sols*, 6, pp. 165-180.
- Balesdent, J., Wagner, G.H., Mariotti, A., 1988. Soil organic matter turnover in long-term field experiments as revealed by carbon-13 natural abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 118±124.
- Bastet G., Bruand A., Voltz M., Bornand M., Quélin P., 1999. Performance of available pedotransfer functions for predicting the water retention properties of French soils. In: M. Th. Van Genuchten, F.J. Leij, L. Wu (eds), *Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*, Riverside, California, October 22-24, 981-992.
- Batjes N.H., 1996, Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules. *Geoderma*. 71, 31-52.
- Bloemen, G.W., 1977. Calcul de la conductivité capillaire et de l'ascension capillaire à partir de la distribution granulométrique. I. Valeurs réelles et théoriques de l'exposant dans une formule de Brooks et Corey pour le calcul des conductivités hydrauliques. ICW Wageningen Notano. 952. II. Évaluation des valeurs de l'exposant dans une formule de Brooks et Corey pour le calcul de la conductivité hydraulique à partir de la distribution granulométrique. ICW Wageningen notano. 962. III. Pression d'entrée d'air et conductivité saturée calculée à partir de la distribution granulométrique et de la taille médiane des grains. ICW Wageningen notano. 990. IV. Hausse capillaire des types de sol et des profils de sol. ICW Wageningen notano. 1013
- Boser, B.E., Guyon, I., & Vapnik, V.N. (1992). A training algorithm for optimal margin classifiers. In *Proceedings of the Fifth Annual Workshop of Computational Learning Theory*, 5, 144-152. Pittsburgh, ACM.
- Bouma J., 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science* 9: 177-213.
- Bouma J., Van Lanen H.A.J., 1987. Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities. In: *Quantified land evaluation procedures*, Proc. international workshop on quantified land evaluation procedures, 27 April - 2 May 1986. Washington, DC.
- Bourrie, G., Pedro, G., 1979. La notion de pF, sa signification physicochimique et ses implications pédogénétiques. I : Signification physicochimique - Relation entre le pF et l'activité de l'eau. *Bull. Assoc. Fr. Etude Sol*, 4, 313-322.
- Brooks R.H., Corey C.T., 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper* 3, Colorado State Univ., Fort Collins, CO.
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R., Jamagne M., 1996. Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : Importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, 3, 27-40.
- Bruand A., Tessier D., Baize D., 1988. Contribution à l'étude des propriétés de rétention en eau des sols argileux : importance de la prise en compte de l'organisation de la phase argileuse. *C.R. Académie des Sciences, Paris*, t. 307, Série II, 1937-1941.
- Bruand A., Zimmer D., 1992. Relation entre la capacité d'échange cationique et le volume poral dans les sols argileux : incidence sur la morphologie de la phase argileuse à l'échelle des assemblages élémentaires. *C.R. Acad. Sci.* 315, série II, 223-229.
- Bruand A., Tessier D., 2000, Water retention properties of the clay in soils developed on clayey sediments: Significance of parent material and soil history. *European Journal of Soil Science*, 51, 679- 688.
- Bruand A., Pérez Fernandez P., Duval O., 2003, Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. *Soil Use and Management*, 19, 232-242.
- Buckingham, E., 1907. Studies on the movement of soil moisture. *Bull. No. 38*. Bureau of Soils, USDA, Washington, DC.
- Campbell G.S., 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity moisture retention data. *Soil Science*, 117(6), 311-314.

- Clapp, R. B., and Hornberger, G. M., 1978. "Empirical Equations for Some Soil Hydraulic Properties," *Water Resources Research*, 14: 601- 604.
- Cortes, Corinna & Vapnik, V.N. (1995). Support Vector Networks. *Machine Learning*. 20. 273-297. 10.1023/A:1022627411411.
- Cosby B.J., Hornberger G.M., Clapp R.B., Ginn T.R., 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils, *Water Resour. Res.* 20, 682–690.
- Cristianini, N. and Shawe-Taylor, J. (2000) *An Introduction to Support Vector Machines*. Cambridge University Press, Cambridge, 204 p.
- Croney, D. and Coleman, J. D., 1954. Soil structure in relation to soil suction (pF). *Journal of Soil Science*, 5: 75–84. doi:10.1111/j.1365-2389.1954.tb 02177.x.
- De Jong R., Campbell C.A., Nicholaichuk W., 1983. Water retention equations and their relationship to soil organic matter and particle size distribution for disturbed samples. *Can. J. Soil Sci.*, 63, 291-302.
- Dridi B., Zemmouri S., 2012. Fonctions de pédotransfert pour les vertisols de la plaine de la Mitidja (Algérie) : recherche de paramètres les plus pertinents pour la rétention en eau, *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2012 16(2), 193-201.
- Emerson, W., 1995. Water-retention, organic-C and soil texture. *Soil Res.* 33:241-251. doi:10.1071/SR9950241.
- Ghorbani Dashtaki, Sh., Homae, M., 2004. Using geometric mean particle diameter to derive point and continuous pedotransfer functions, in: N. Whrle, M. Scheurer (Eds.), *EuroSoil*, September 4–12, 2004, Freiburg, Germany, 10, (30), 1–10.
- Gupta S.C., Larson W.E., 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent and bulk density. *Water Resources Research*, 15, 1633–1635.
- Haghverdi, A., Öztürk, H. S., & Cornelis, W. M. (2014). Revisiting the pseudo continuous pedotransfer function concept: Impact of data quality and data mining method. *Geoderma*, 226, 31–38.
- Hall D.G., Reeve M.J., Thomasson A.J., Wright V.F., 1977. Water retention, porosity and density of field soils. *Technical Monograph. n°9. Soil Survey of England & Wales, Harpenden*.
- Haverkamp R., Parlange J.Y., 1986. Predicting the water-retention curve from particle-size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. *Soil Science*, 142(6), 325-338.
- Hillel, D., & De Backer, L. W. (1988). *L'eau et le sol : principes et processus physiques*. Academia. 288p.
- Hudson, B., 1994. Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(2):189-194.
- Hudson, B., 1994. Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(2), 189-194.
- Jamagne M., Bétrémieux R., Bégon J.C., Mori A., 1977. Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bull. Tech. Inf.* 324-325, 627-641.
- Khlosi, M., Alhamdoosh, M., Douaik, A., Gabriels, D., & Cornelis, W. M. (2016). Enhanced pedotransfer functions with support vector machines to predict water retention of calcareous soil. *European Journal of Soil Science*, 67(3), 276–284. <https://doi.org/10.1111/ejss.12345>.
- Lal, R., Mahboubi, A.A., and Fausey, N.R., 1994. Long-term tillage and rotation effects on properties of a central Ohio soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:517-522.
- Lamorski, K., Pachepsky, Y., Sławiński, C., & Walczak, R. T. (2008). Using support vector machines to develop pedotransfer functions for water retention of soils in Poland. *Soil Science Society of America Journal*, 72(5), 1243–1247. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0280N>.
- Lamp J., Kneib W., 1981. Zur quantitativen Erfassung und Bewertung von Pedofunktionen. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 32: 695-711
- Liu M., Bardossy A., Li J., Jiang Y., 2012. Physically-based modeling of topographic effects on spatial evapotranspiration and soil moisture patterns through radiation and wind. *Hydrology and Earth System Sciences*, European Geosciences Union, 16:357-373.
- Liu X., Zhang D., 2012. Trend analysis of reference evapotranspiration in Northwest China: the roles of changing wind speed and surface air temperature. *Hydrological Processes*.
- Malaya C. and Sreedeeep S., 2012. Critical Review on the Parameters Influencing Soil-Water Characteristic Curve. *J. Irrig. Drain Eng.*, 138:55-62.
- Manrique L.A., Jones C.A., 1991. Bulk density of soil in relation to soil physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 476-481.
- Margulies, J., 2012. No-Till Agriculture in the USA, in *Organic Fertilisation, Soil Quality and Human Health*, *Sustainable Agriculture Reviews*, 9: 11-30.

- Mering J., 1949. L'interférence des rayons X dans les systèmes à stratification désordonnée. *Acta Cryst.* 2, 371-377.
- Miháliková, Markéta & Matula, Svat & Dolezal, Frantisek. (2014). Application of k-Nearest Code for the Improvement of Class Pedotransfer Functions and Countrywide Field Capacity and Wilting Point Maps. *Soil and Water Research*. 10.17221/44/2013-SWR.
- Minasny B., McBratney A.B., Bristow K.L., 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*, 93, 225–253.
- Minasny, B., and Mcbratney, A., 2002. The Neuro-m Method for Fitting Neural Network Parametric Pedotransfer Functions. Published in *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66. 352-361. 10.2136/sssaj2002.0352.
- Mueller G. D. & Thompson A. M., 2009. The ability of urban residential lawns to disconnect impervious area from municipal sewer systems1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 45(5): 1116-1126.
- Musy A., Soutter M., 1991. *Physique du sol*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 335 p, Lausanne, Suisse
- Nedkov, S., Burkhard, B., 2012. Flood regulating ecosystem services—Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators*, 21: 67-79.
- Nemes, A., Rawls, W. J., & Pachepsky, Y. A. (2006). Use of the nonparametric nearest neighbor approach to estimate soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 327–336. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0128>
- Nemes, A., Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A., & Van Genuchten, M. T. (2006). Sensitivity analysis of the nonparametric nearest neighbor technique to estimate soil water retention. *Vadose Zone Journal*, 5(4), 1222–1235. <https://doi.org/10.2136/vzj2006.0017>
- Nemes A., Rawls W.J., Pachepsky Y.A. 2006a: Use of a nonparametric nearest-neighbour technique to estimate soil water retention. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 327–336.
- Nguyen, P. M., De Pue, J., Van Le, K., & Cornelis, W. 2015. Impact of regression methods on improved effects of soil structure on soil water retention estimates. *Journal of Hydrology*, 525, 598–606. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.014>.
- Nimmo J.R., 1997, Modeling structure influence on soil water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 712-719.
- Norrish K., 1954. swelling of montmorillonite. *Discuss. Faraday soc* 18:120-134 *Discuss. Faraday Soc.*, 1954,18, 120-134 DOI: 10.1039/DF9541800120.
- Ohu, J., Raghavan, G., Prasher, S., Mehuys, G., 1987. Prediction of water retention characteristics from soil compaction data and organic matter content. *Journal of Agricultural Engineering Research*, September 1987, 38(1), 27-35.
- Pachepsky Y.A, Timlin D., Várallyay G., 1996. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 727-773.
- Patriquin, D., 2003. Water, soil and organic matter: a complex relationship. *Eco-farm and Garden Summer*.
- Petersen G.W., Cunningham R.L., Matelski R.P., 1968a. Moisture characteristics of Pennsylvania soils: I. Moisture retention as related to texture. *Soil Sci. Am. Proc.*, 32, 271-275.
- Petersen G.W., Cunningham R.L., Matelski R.P., 1968b, Moisture characteristics of Pennsylvania soils: II. Soil factors affecting moisture retention within textural class-Silt Loam. *Soil Sci. Am. Proc.*, 32, 866-870.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modelling. In E. Jones and T.J. Ward (ed.) *Watershed manage. Eighties. Proc. Symp. ASCE*, Denver, CO. 30 Apr-2May 1985. ASCE, New York. 293-299.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties, in: H.J. Morelseytoux (Ed.), *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling— Theory and Practice*, Kluwer Academic, Dordrecht, pp. 275–300.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Saxton, K.E., 1982. Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE*, 26, 1747–1752.
- Reeve M.J., Smith P.D., Thomasson A.J., 1973. The effect of density on water retention properties of field soils. *J. Soils Sci.*, 24, 354-367.
- Rezaei R., Arshad, Sayyad, Gh., Mosaddeghi, M., and Gharabaghi, B., 2013. “Predicting Saturated Hydraulic Conductivity by Artificial Intelligence and Regression Models,” *ISRN Soil Science*, vol. 2013, Article ID 308159, 8 p.[doi:10.1155/2013/308159](https://doi.org/10.1155/2013/308159)
- Richard G., Cousin I., Sillon J.F., Bruand, A. and Guerif J., 2001. Effect of compaction on soil porosity: Consequences on hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52:49-58.

- Richards, L.A., 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soils. *Soil Sci.*, 66, 105–110.
- Rubio C.M., 2008. Applicability of Site-Specific Pedotransfer Functions and Rosetta Model for the Estimation of Dynamic Soil Hydraulic Properties under Different Vegetation Covers. *J Soils Sediments* 8 (2) 137–145
- 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.
- Salter P.J., Williams J.B., 1965. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. II. Available-water capacity and moisture release characteristics. *J. Soil Sci.*, 16(2), 310-317.
- 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.
- Saxton, K. E. and Rawls, W. J., 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions, *Soil Science Society of America Journal.*, Vol. 70.
- Schaap M.G., Leij F.J., 1998. Database related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Sci.* 163, 765-779.
- Schaap M.G., Leij F.J., Van Genuchten M.T., 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 847-855.
- Schaap, M. G., & Leij, F. J., 1998. Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Science*, 163(10), 765-779.
- Schaap M.G., Leij F.J., and Van Genuchten M. Th., 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions, *Journal of Hydrology*. 251, 163-176.
- Scheinost A.C., Sinowski W., Auerswald K., 1997. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma* 78, 129-143.
- Schjonning, P., B.T. Christensen and B. Carstensen. 1994. Physical and chemical properties of a sandy loam receiving animal manure, mineral fertilizer or no fertilizer for 90 years. *Europ. J. Soil Sci.* 45: 257-268. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1994.tb00508.x>.
- Schofield, M., 1935. Two great organic chemists. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 54: 1053–1054. doi:10.1002/jctb.5000544902.
- Singer, J. W., Malone, R. W., Tomer, M. D, Meade, T. G, Welch, J., 2006. Compost effect on water retention and native plant establishment on a construction embankment, *Journal of Soil and Water Conservation*, 61(5), 268-273.
- Skalová, J., Čistý, M., & Bezák, J., 2011. Comparison of three regression models for determining water retention curves. *Journal of Hydrological Hydromechanics*, 59(4), 275–284.
- Swarowsky, A, Dahlgren, R.A., Tate, K.W., Hopmans J.W. and O'Geen, A.T., 2011. Catchment-scale soil water dynamics in a Mediterranean-type oak woodland. *Vadose Zone Journal*, 10: 800-815.
- Tessier D., 1984. Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse d'état, Univ. Paris VII, 361 p.
- Twarakavi, N. K. C., Šimůnek, J., & Schaap, M. G., 2009. Development of pedotransfer functions for estimation of soil hydraulic parameters using support vector machines. *Soil Science Society of America Journal*, 73(5), 1443–1452. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0021>.
- Tyler S.W., Wheatcraft S.W., 1989. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 362-369.
- Van Genuchten M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892–898.
- Van Looy, K., Bouma, J., Herbst, M., Koestel, J., Minasny, B., Mishra, U., Montzka, C., Nemes, A., Pachepsky, Y. A., Padarian, J., Schaap, M. G., Tóth, B., Verhoef, A., Vanderborght, J., van der Ploeg, M. J., Weihermüller, L., Zacharias, S., Zhang, Y., and Vereecken, H.: Pedotransfer Functions in Earth System Science: Challenges and Perspectives, *Rev. Geophys.*, 55, 1199– 1256, <https://doi.org/10.1002/2017rg000581>, 2017.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., Darius, P., 1989. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Science* 148, 389– 403.
- Vereecken, H., Diels, J., Van Orshoven, J., Feyen, J., and Bouma J., 1992. Functional evaluation of pedotransfer functions for the estimation of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1371–1379. doi:10.2136/sssaj1992.03615995005600050007x.
- Wall, A. and Heiskanen, J., 2003. Water-retention characteristics and related physical properties of soil on afforested agricultural land in Finland, *Forest Ecology and Management*, 186: 21–32.

- Wösten, J.H.M. and. Van Genuchten, M. Th., 1988. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*52: 1762 – 1770.
- Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A., Le Bas, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90, 169–185.
- Zemmouri S., 2009. Estimation de la rétention en eau des vertisols de la Mitidja au moyen de fonctions de pédotransfert. Mémoire de magister. ENSA -Alger (Algérie). 85p.

Sites expérimentaux, mesures et caractérisation

3.1. Contexte

Ce travail vise à étudier et prédire la rétention en eau des sols en Algérie. Dans cette partie, nous présenterons les bases de données utilisées, les sites expérimentaux et les méthodes appliquées pour mesurer les propriétés physico-chimiques des sols.

3.1.1. Présentation des bases de données utilisées dans l'évaluation, l'élaboration et la validation des FPTs

Le jeu d'échantillons utilisé a été constitué en plusieurs étapes, en fonction du déroulement du travail et de l'objectif souhaité.

Suivant l'objectif recherché dans le troisième chapitre, il s'agit d'évaluer les fonctions de pédotransfert internationales et de tester leur efficacité en les appliquant dans le contexte de quelques sols algériens. En effet, un ensemble de 134 échantillons ont été prélevés aléatoirement dans le Bas Cheliff. Ils sont issus, pour la plupart, de l'est de la Merdja de Sidi Abed, de la plaine de Boukadir (entre les périmètres du Bas et du Moyen Cheliff), de l'extension de Guerouaou (au nord de l'Oued Cheliff), et de la portion nord-ouest de la plaine et du plateau de Benziane au sud-ouest du périmètre du Bas Cheliff (Figure 5).

Dans le quatrième chapitre, les FPTs spécifiques aux sols algériens seront développées. Pour cela, un ensemble a été constitué de 189 échantillons pris aléatoirement dans quelques régions du nord de l'Algérie (54 échantillons prélevés dans la plaine de Kherba-El Abadia à Ain Defla, 13 échantillons dans la plaine côtière de Annaba, 42 échantillons dans la plaine de Beni Slimane à Médéa et 80 échantillons dans le Bas Cheliff). Pour vérifier et valider les FPTs établies dans le contexte de cette étude, un sous-ensemble de 53 échantillons a été prélevé aléatoirement dans le plateau de Benziane dans la plaine du sud-ouest du Bas Cheliff.

Les propriétés de la rétention en eau des échantillons utilisés pour le développement et pour la validation ont été déterminées à -330 hPa et -15000 hPa en utilisant les mêmes méthodes expérimentales développées dans ce qui suit.

3.1.2. Caractéristiques pédoclimatiques des zones d'échantillonnage

3.1.2.1. Plaine de Beni Slimane

Cette région est caractérisée par un climat de type méditerranéen avec une température moyenne annuelle de 15.6°C et une pluviométrie de 526mm par an.

L'humidité relative dans la région varie de 73% au mois d'octobre à 81 % en avril. Durant la période estivale, entre 65% en mai et 48% en septembre. Les mois les plus secs sont juillet et août avec respectivement 48% et 49% d'humidité relative.

Les vents à la station de Beni Slimane ont une direction dominante ouest. Durant les mois de juillet, août et septembre, les vents ont une direction nord-ouest.

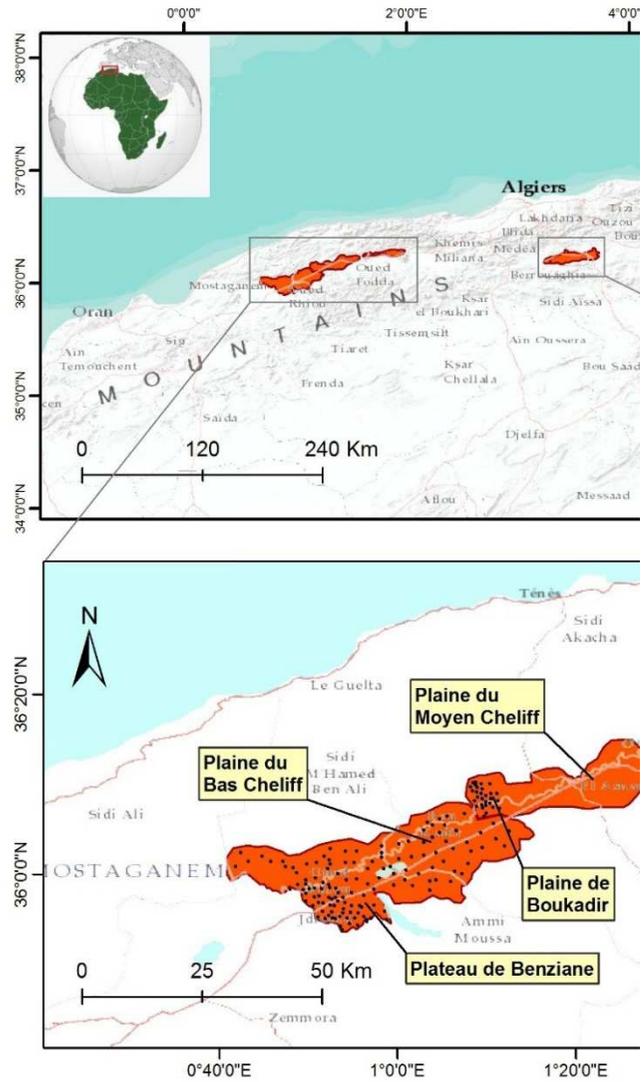


Figure 5. Situation des zones d'échantillonnage

Au cours de la prospection pédologique nous avons rencontré cinq (05) classes de sols : les sols minéraux bruts, les sols peu évolués, les sols calcimagnésiques, les sols à sesquioxydes de fer et manganèse et les sols hydromorphes. D'une façon générale, ces sols se caractérisent par une très grande hétérogénéité en relation avec un même substrat géologique.

3.1.2.2. Plaine du Bas Cheliff

Le Bas Cheliff est caractérisé par un climat semi-aride avec des températures élevées en été et basses en hiver. Sur l'année, la température moyenne est de 18.3 °C. A n'importe quelle période de l'année, les précipitations sont faibles. La longue période de sécheresse (7 mois et précipitations annuelles moyennes inférieures à 250 mm) indique que la zone est située dans un climat de transition semi-aride à aride (Yahiaoui et Douaoui, 2014).

Selon les travaux de Douaoui et al (2005), les sols des bordures des plaines sont formés par des associations plus ou moins érodées, qui peuvent évoluer sur du calcaire dur ou tendre, des grès ou des marnes. Lorsque la roche n'affleure pas à la surface, ce sont des sols généralement calcimagnésiques, le plus souvent rendziniformes avec parfois la présence d'une croûte calcaire. Les sols de la plaine proprement dite comportent cinq classes : les sols salés, les sols hydromorphes, les vertisols, les sols peu évolués alluviaux et colluviaux et les sols calcimagnésiques.

Les sols du Bas-Chéliff sont souvent argileux et salés. Ils sont, soit occupés par l'agriculture, soit par la végétation halophyte. Sous irrigation, on y trouve surtout l'olivier et les cultures maraîchères. Les céréales se font le plus souvent en sec. Le Bas-Chéliff comporte plusieurs périmètres irrigués, dont les plus importants sont ceux de Rhiou, Ouarizane, Djédouia, Hmadna, et de Guerouaou.

3.1.2.3. Plaine de Kherba - El Abadia

Quant à la plaine de Kherba d'El Abadia, le climat y est de type méditerranéen avec une température moyenne de 18.2 °C. Chaque année, on enregistre en moyenne 478 mm de pluie. Les fortes précipitations concernent les saisons automnale et hivernale où le mois de décembre est le plus pluvieux, alors qu'elles sont réduites durant les saisons de développement végétale, à savoir le printemps et l'été.

L'humidité relative augmente pendant la nuit et compense ainsi la perte d'eau qui se produit en journée. Cette humidité est enregistrée de décembre à mai et diminue progressivement jusqu'à atteindre 57.6 % (ANRH, 1987/2013). Le vent est caractérisé par une direction dominante nord-ouest et une vitesse moyenne estimée à 1.79 m/s (ANRH, 1987/2013).

La plaine de Kherba-El Abadia est formée d'alluvions du Quaternaire provenant de l'Oued Chéliff et de l'Oued Sidi Makhoulouf, dont les méandres ont formé une dépression avec les alluvions récentes constituées par des dépôts limoneux, conglomérats et sables argileux s'étendant sur toute la plaine du Cheliff.

3.1.2.4. Plaine côtière de Annaba

La plaine de Annaba est soumise à un climat méditerranéen avec 18.4 °C de température en moyenne sur toute l'année et 712 mm de pluie en moyenne par an. Il est caractérisé par deux saisons distinctes ;une saison humide et une saison sèche. La saison humide s'étale de septembre à mai où le mois le plus pluvieux est celui de décembre avec 122,61 mm. Le minimum des températures moyennes est enregistré au mois de janvier avec 6,9 °C. La saison sèche est chaude, les températures atteignent un maximum de 31,4°C au mois d'août, qui reste le mois le plus chaud de l'année.

Les vents soufflent fréquemment dans des directions instables et à différentes intensités en fonction des saisons. A la station des Salines, les vents dominants ont une direction NW-SE et la vitesse moyenne annuelle est de 3,75 m/s (station des Salines (1984- 2007) ; Ali Tartar, 2010).

L'humidité est supérieure à 75 % et ce, du mois de novembre au mois de juin. Le maximum est enregistré durant la saison hivernale avec 78 % alors que le minimum est observé en été avec 68 % (station des Salines (1974 – 2007); Ali Tartar, 2010).

La région de Annaba est caractérisée par la présence de différents types de sols: les sols podzoliques insaturés qui ont une vocation forestière (*Quercus suber*), les sols dunaires qui se trouvent en bordure du littoral, les sols alluviaux qui sont les sols riches des plaines et les sols solonetz, solonchets qui sont des sols très humides, bourbeux (marécages) et de mauvaise qualité.

3.1.3. Site expérimental sélectionné pour l'étude de l'impact des eaux usées épurées (EUE) sur la courbe de rétention en eau du sol

3.1.3.1. Historique de l'exploitation des parcelles étudiées

Le site qui fera l'objet de cette étude comporte trois parcelles agricoles situées au nord-est de la station d'épuration des eaux usées (STEP) de la ville de Boumerdes. La zone étudiée fait partie du bassin hydrographique Côtier-Algérois (02A) qui est subdivisé en 09 sous-bassins et s'étend sur une superficie de 4585 Km² couvrant, en totalité ou en partie, les wilayas d'Alger, Blida, Boumerdes, Tipaza, Médéa et Ain Defla.

Les parcelles sont équipées par un système d'adduction par refoulement. La première campagne d'irrigation par les EUE a démarré en 2003 (Tableau 5). Les principales cultures depuis le démarrage sont la vigne (raisins de table, variété Red-Glob, Dabouqui), les agrumes et les cultures fourragères.

Tableau 5. Durées d'irrigation par les EUE

Parcelle	Culture	Durées et historique d'irrigation par les EUE
P1	Vigne	Parcelle irriguée par les EUE pendant 8 ans (depuis 2008)
P2	Vigne	Parcelle irriguée par les EUE pendant 13 ans (depuis 2003)
PT	Vigne	Parcelle Témoin irriguée par des eaux conventionnelles (eau de forage)

3.1.3.2. Caractéristiques de la zone d'étude

La zone d'étude est située sur le littoral Est Algérois, au nord de la localité de Corso- Boumerdes (figure 6). Le climat est méditerranéen subhumide à hiver doux et pluvieux et à été chaud et humide. La saison sèche dure 4 à 5 mois et coïncide avec les journées longues et chaudes. Plus de 50 % des précipitations annuelles tombent en un temps relativement court, juste après la période sèche. Les risques d'érosion des sols sont alors élevés.

L'esquisse pédologique de la région a confirmé l'existence d'une seule classe de sols, à savoir la classe des sols peu évolués non climatiques d'apport alluvial, avec deux sous-groupes modaux et sur encroûtement :

- Le sol est peu évolué d'apport alluvial ;
- Morphologie : plaine labourée à faible pente.
- Occupation du sol : vignoble irrigué.

La parcelle étudiée appartient à l'exploitant Ben Rahmoun et se trouve à une altitude de 26 m par rapport au niveau de la mer. La culture installée est la vigne, et le mode d'irrigation est le goutte à goutte. Les sites d'échantillonnage ont été sélectionnés sur la base d'une enquête effectuée auprès des exploitants portant spécifiquement sur la durée et l'historique d'irrigation par des EUE (Tableau 6). Les mesures des propriétés physico-chimiques présentées dans cette partie du travail ont été réalisées par Hasbaia (2014).

Tableau 6. Localisation des sites d'échantillonnage pour l'étude de la courbe de rétention en eau des sols

N° Sondage	Distance par rapport au goutteur (cm)	Profondeur (cm)	Durée et historique d'irrigation par des EUE
Sondage N° 1	30	10	P1 : Parcelle irriguée par les EUE 8 ans (depuis 2008)
Sondage N° 2	30	10	P2 : Parcelle irriguée par les EUE 13 ans (depuis 2003)
Sondage N° 3	30	20	
Sondage N° 3	30	10	PT : Parcelle Témoin irriguée par des eaux conventionnelles (eau de forage)

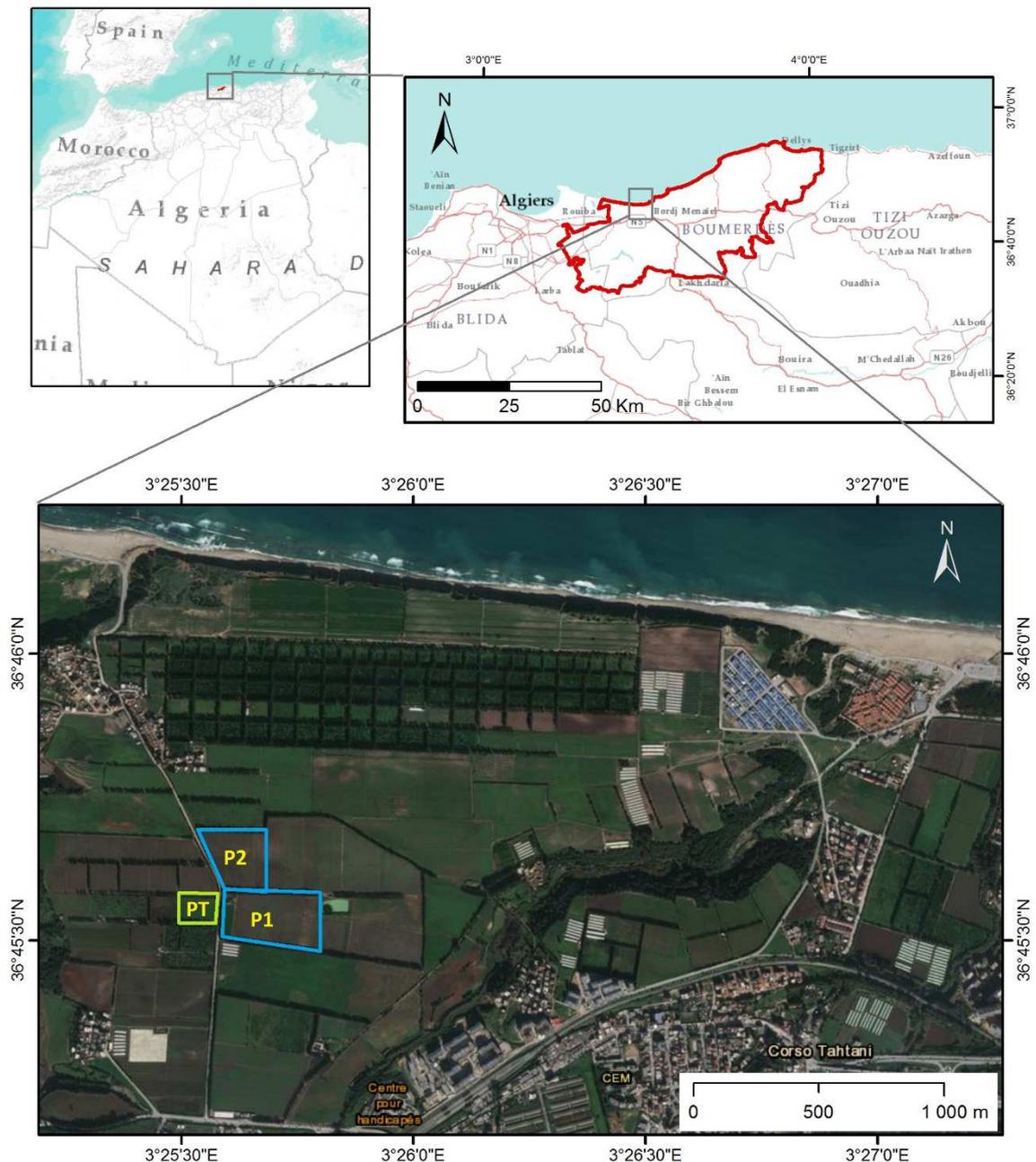


Tableau 7. Itinéraire technique de la production de la vigne (variété Red-Glob) appliqué dans les parcelles d'étude

Date	Opération	Descriptif
11/2015	Labour	Effectué durant le mois de novembre, juste après la fin de la récolte. 1 passage. (30-40 cm), charrue vigneronne (interligne).
	Amendement	L'engrais utilisé est le 0.20.25 dosé à 6 qx/ha. La période d'épandage se situe fin novembre.
	Déchaussage	Cette opération s'exécute vers la fin novembre. C'est une opération qui consiste à enlever la terre qui dépasse le point de greffage, elle est effectuée mécaniquement et manuellement.
12/2015	Taille	Débute vers la fin décembre/début janvier.
01/2016	Ramassage du bois de la taille	Cette tâche est réalisée en même temps que la taille, elle consiste à enlever du terrain du vignoble les déchets et les débris résultant de la taille.
01/2016	Entretien du palissage	a) Placement, fixation et vérification des piquets et attache de fil de fer. Durant la même période les ouvriers ôtent les branches cassées. b) Attache des plants aux piquets.
	Attachage des sarments	On attache les sarments ou palissage.
	Repassage	Opération qui consiste à éliminer les racines issues du greffon et les rejets du porte greffe.
	Echantillonnage	
02/2016	Traitement d'hiver	Les viticulteurs utilisent l'huile jaune ou l'huile blanche à raison de 5L/ha ; la période est début février, avant le débourrement des œufs des différents insectes.
02/2016	Désherbage	Il est réalisé durant le mois de février. Le désherbage chimique est le mode le plus répandu. Généralement, le Glyphosate est utilisé à raison de 4-5 l/ha (pulvérisateur à dos si le traitement est manuel) pour les plants dépassant 4 ans minimum.
03/2016	Palissage	Vérification de l'alignement du palissage et attachage par le fil synthétique des ramifications des ceps au palissage.
04/2016	Labour de rechaussage	1 passage. (30-40 cm), charrue vigneronne (interligne).
15 au 30/04/2016	Rechaussage	C'est une opération qui consiste à rebuter le plant pour éviter le cas d'enselement estivale du tronc. Par plusieurs disques (Cover crop).
30/04/2016 15/05/2016	Epannage d'engrais	Après le labour et à la fin du mois d'avril jusqu'à mi-mai, les viticulteurs procèdent à l'épandage d'engrais en utilisant le 15.15.15, la quantité utilisée varie entre 3 à 4 quintaux par hectare.
05/2016	Traitement phytosanitaire	Durant le mois de mai, un traitement phytosanitaire s'avère nécessaire, les viticulteurs utilisent le produit cuprique et les sulfates de cuivre, (les sulfates est le traitement préféré, vu son efficacité). La fréquence de traitement peut aller jusqu'à 6-8 fois, en alternance avec des produits systémiques (Mildiou et oïdium).
	Ebourgeonnage	La fin du mois de mai connaît l'opération de l'ébourgeonnage en éliminant les bourgeons basiliaires après que l'opération de fécondation soit terminée.
05/2016	Entretien du Palissage	Cette opération revient à chaque saison, avant la récolte, vers la fin mai/début juin.
06/2016	Rechaussage	Parfois, les viticulteurs sont en retard et le rechaussage peut aller jusqu'à la période fin mai/début juin.

3.1.3.3. Evaluation de la qualité des eaux usées épurées de la station de Boumerdes

Lors de l'autosurveillance effectuée au niveau de la STEP de Boumerdes, des paramètres importants pour la réutilisation des EUE sont contrôlés chaque mois. Ces paramètres sont: MES, DBO₅, DCO, NH₄-N, NTK, N-NO₂, NO₃-N, P (total), pH, température, conductivité électrique CE (tableaux 8 et 9).

Les résultats collectés pour l'année 2013 ainsi que durant la période d'utilisation des EUE par les exploitants, qui s'étend du mois de juin au mois de novembre pour l'année 2013, sont présentés dans le tableau 8. Les données relatives à la conductivité électrique de l'année 2011. Pour l'année 2013, ces données n'ont pu être obtenues.

Les résultats de la qualité des EUE de la STEP pour l'année 2011, montrent qu'ils sont conformes à la réglementation algérienne (normes de réutilisation en irrigation: Arrêté interministériel du 8 safar 1433 correspondant au 2 janvier 2012 fixant les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation). Notamment la salinité dont la moyenne est de 1254,95 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ en 2011 est inférieure à la limite de la norme qui est de 3000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Les valeurs obtenues des différents paramètres analysés indiquent que le rendement d'élimination des MES, DBO₅ et DCO est plus élevé, ce qui reflète l'efficacité du traitement opéré sur ces paramètres dans cette station.

Le pH moyen de l'eau épurée à la sortie est de 7,24 pour l'année 2013 et 7,35 pour l'année 2011. Ces valeurs semblent satisfaire les exigences recommandées pour les EUE destinées à la réutilisation agricole (Tableau 8).

Tableau 8. Qualité des eaux usées issues de la STEP de Boumerdes pour l'année 2013 (Source : STEP de Boumerdes 2013)

STEP	Eaux épurées											Rendements Epuratoires		
Boumerdès														
Jan–Nov. 2013	MES (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	DCO (mg/l)	N- NH ₄ (mg/l)	NTK (mg/l)	N- NO ₂ (mg/l)	N- NO ₃ (mg/l)	Pt (mg/l)	pH	T (°C)	CE μS/cm	MES %	DBO ₅ %	DCO %
Moyenne	10,64	5,99	37,98	0,51	1,97	0,07	9,09	1,86	7,24	19,93	-	93,80	95,66	88,83
Max	14,55	9,33	56,2	1,71	3,6	0,19	16	3,88	7,31	24,7	-	95	98	93
Min	7,35	2,25	17,75	0,05	0,56	0,02	3,94	1,08	7,15	13,55	-	92,6	93,31	84,66
Limite	30	30	90	-	-	-	30	-	6.5 ≤ pH ≤ 8.5	-	3000 μS/cm	-	-	-

Tableau 9. Qualité des eaux usées issues de la STEP de Boumerdes pour l'année 2011 (Source : STEP de Boumerdes 2013)

STEP	Eaux épurées											Rendements Epuratoires		
Boumerdès														
Jan. – Déc. 2011	MES (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	DCO (mg/l)	N- NH ₄ (mg/l)	NTK (mg/l)	N- NO ₂ (mg/l)	N- NO ₃ (mg/l)	Pt (mg/l)	pH	T (°C)	CE μS/cm	MES %	DBO ₅ %	DCO %
Moyenne	13,58	10,69	29,70	9,58	-	0,42	2,60	2,60	7,35	20,37	1254,95	93,68	94,44	91,33
Max	17,60	24,50	53,95	33,50	-	4,20	6,40	6,14	7,46	26,32	1384,50	95,27	97,92	97,48
Min	10,23	3,00	12,25	0,99	-	0,02	0,68	1,00	7,24	14,73	1029,64	91,85	92,17	76,06
Limite	30	30	90	-	-	-	30	-	6.5 ≤ pH ≤ 8.5	-	3000 μS/cm	-	-	-

3.2. Méthodes de mesure utilisées

3.2.1. Analyses physiques du sol

3.2.1.1. Rétention en eau des sols

Les déterminations ont porté sur des mottes de dimensions le plus souvent centimétriques (5 à 20 cm³), prélevées sur des échantillons non perturbés. L'échantillonnage est déroulé en période hivernale lorsque les sols étaient en conditions hydriques proches de la capacité au champ, c'est-à-dire la plupart du temps environ 48 heures après une période pluvieuse. Les échantillons ont été prélevés sous forme de volumes non perturbés (blocs ou mottes) de dimensions décimétriques. Ils ont été conservés au réfrigérateur à une température de l'ordre de 4 à 5 C° de façon à limiter l'activité biologique. Par conséquent, les analyses ont été effectuées sur des échantillons à structure interne intacte et n'ayant jamais été séchés. Les mesures de la rétention en eau ont été obtenues à des potentiels de -33 kPa et -1500 kPa, supposés correspondre respectivement à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent. Pour caractériser la courbe de la rétention en eau dans les parcelles du site de Corso, les valeurs de rétention en eau ont été obtenues à des pressions de 1,4, 7, 10, 30, 70, 100, 500 et 1500 kPa. Les déterminations ont été réalisées en utilisant des dispositifs pneumatiques suivant la méthode de Richards and al (1948). Les mottes ont été disposées sur une pâte de kaolinite préalablement trempée à -10² hPa de façon à établir une continuité satisfaisante entre l'eau de l'échantillon et la membrane ou la plaque poreuse du dispositif (Bruand *et al.* 1996). La teneur en eau massique est mesurée après sept jours de mise sous pression (de telle façon à avoir atteint l'équilibre, quelque soit la texture de l'échantillon et leur taille) par passage à l'étuve à 105 C° pendant 24 heures.

Les teneurs en eau volumique pour deux valeurs de potentiel variant de -330 hPa (θ_{330}) à -15000 hPa (θ_{15000}) ont été calculées en multipliant les teneurs en eau massique par la densité apparente de l'échantillon (D_a).

3.2.1.2. Densité apparente

Les mesures de densité apparente (D_a) ont été déterminées sur le terrain à l'aide de la méthode du cylindre en utilisant des cylindres de 500 ou 1000 cm³, selon les cas. Trois mesures ont été effectuées pour chaque horizon. Elle a été calculée après séchage à 105 C° pendant 24 heures à l'aide de la relation suivante :

$$D_a = \frac{M_s}{V_c} \quad (3-1)$$

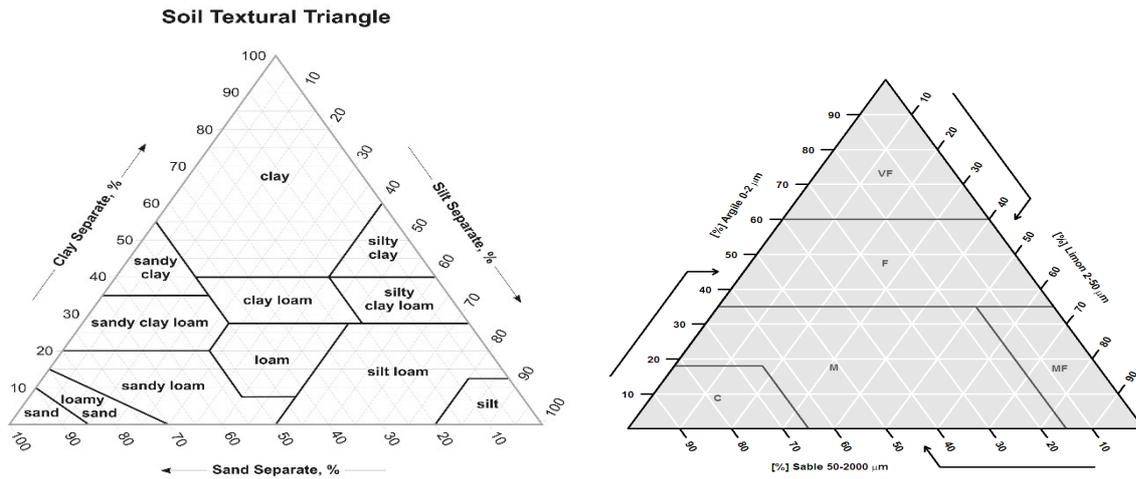
Avec M_s : masse des sols séchés à 105 C° contenu dans le cylindre,
 V_c : volume du cylindre.

3.2.1.3. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été réalisée en cinq fractions sans décarbonatation par sédimentation (Méthode de Robinson, 1922). La méthode consiste en la dispersion des particules minérales d'un échantillon de sol et en la stabilisation de cet état dispersé dans des conditions bien définies. Après destruction de la matière organique par l'eau oxygénée (H₂O₂) sur une prise d'essai d'environ 10 g par ajout d'hexaméthaphosphate de sodium et de NaOH 1N, les différentes classes de particules ont été séparées par sédimentation pour les fractions fines (<50 µm) et par tamisage pour les fractions de taille supérieure. La détermination des fractions les plus fines (< 50 µm) s'effectue au moyen de 3 prélèvements successifs (à la pipette dite « de Robinson ») dans une suspension de sol en cours de sédimentation. La fraction des sables fins est séparée par passage sur tamis de 50 µm et sous courant d'eau de la suspension après prélèvement des fractions fines.

3.2.1.4. Stratification texturale

Les premières études, ou applications agronomiques, des stratifications basées sur la texture ont été effectuées par Jamagne et al (1977). Dans ce travail, la stratification texturale a été utilisée dans le but d'étudier la sensibilité des FPT et l'influence de la taille des particules solides, en utilisant les classes texturales suivant le triangle USDA. Nous avons regroupés échantillons en trois classes de particules en fonction de leurs tailles selon une variante texturale proposée par la FAO, (1990) transposée sur le triangle textural USDA (Figure 7).



Triangle textural USDA (1951)

Triangle textural proposé par la FAO (1990)

Figure 7. Variante texturale utilisée dans la stratification.

3.2.2. Analyses chimiques du sol

Les échantillons prélevés ont été analysés au niveau du laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Les paramètres ont été mesurés selon les méthodes et normes présentées dans le tableau 10.

Tableau 10. Paramètres chimiques, méthodes et normes employés

Paramètres	Normes / Méthodes
C (%)	Oxydation sulfo-chromique à froid (Méthode de Walkley et Black, 1934) avec dosage par colorimétrie des ions Cr 3+
Réserves minérales	
CaCO ₃ Actif (%)	MéthodeDrouineau-Galet, Norme NF X 31-106 (AFNOR, 1987)
CaCO ₃ Total (%)	Méthode du calcimètre de Bernard
Complexe absorbant	
Ca ⁺⁺ (méq/100g)	Percolation de l'échantillon avec une solution normale d'acétate d'ammonium à pH 9. Le dosage du Calcium et du magnésium se fait par colorimétrie à flux continu. Le dosage du sodium et du potassium se fait par photométrie de flamme.
Mg ⁺⁺ (méq/100g)	
K ⁺ (méq/100g)	
Na ⁺⁺ (méq/100g)	
Solution du sol	
pH	Mesure du pH-eau par la méthode électrométrique
	Norme AFNOR X31-103 (1988) qualité des sols
	Méthode de la pâte saturée
Conductivité électrique (mmhos.cm ⁻¹)	<ul style="list-style-type: none"> • Saturation de 100 g d'échantillon à analyser • Pendant 24 heures. • Centrifuger. • Mesurer la conductivité électrique

3.3. Critères de validation

Les FPTs sont régulièrement évaluées en effectuant une comparaison des valeurs qu'elles prédisent aux valeurs mesurées (Pachepsky et Rawls, 1999). Pour discuter la validité des FPTs développées, nous avons utilisé plusieurs types de critères : l'erreur moyenne (EM), le coefficient de détermination (R²), l'erreur moyenne quadratique (EMQ), le degré d'accord (d), le critère d'information d'Akaike (AIC) et l'erreur moyenne géométrique (EMG).

3.3.1. Erreur moyenne (EM)

L'erreur moyennedeprédiction(EM)renseignesurlebiaisdel'estimation.Elleest calculéeà l'aidedelarelationsuivante :

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_p - \theta_m) \quad (3-2)$$

Avec n , nombre d'horizons,
 θ_p , teneur en eau volumique prédite,
 θ_m , teneur en eau volumique mesurée.

L'estimation est d'autant moins biaisée que ME est proche de 0. Lorsque ME est positive, les FPTs testés surestiment θ_m et lorsqu'elle est négative, les FPTs testés sous-estiment θ .

3.3.2. Coefficient de détermination (R^2)

Le R^2 ou coefficient de détermination mesure la qualité de l'ajustement des estimations de l'équation de régression :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_p - \bar{\theta})^2}{\sum_{i=1}^n (\theta_m - \bar{\theta})^2} \quad (3-3)$$

Un R^2 proche de 1 est suffisant pour dire que l'ajustement est bon.

3.3.3. Erreur moyenne quadratique (EMQ)

Bien qu'elle ne permette pas de séparer biais et précision, l'erreur quadratique moyenne (EMQ) est une estimateur de qualité de la prédiction qui a été très fréquemment utilisé dans la littérature sur les fonctions de pédotransfert. Elle se calcule à l'aide de la relation suivante :

$$EMQ = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_p - \theta_m)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3-4)$$

Ainsi, plus l'erreur moyenne quadratique (EMQ) est faible, meilleure est l'estimation.

3.3.4. Degré d'accord (d)

L'indice d'accord (d), élaboré par Willmott (1981) comme un module standardisé de la mesure d'erreur de prédiction du modèle, varie entre 0 et 1. Proche de 1, il indique une correspondance meilleure entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites, la valeur nulle indique l'absence d'accord (Willmott, 1981).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_p - \theta_m)^2}{\sum_{i=1}^n [|(\theta_p - \bar{\theta}_m)| + |(\theta_m - \bar{\theta}_m)|]^2} \quad (3-5)$$

3.3.5. Critère d'information d'Akaike (AIC)

$$AIC = n \ln \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_p - \theta_m)^2 \right] + 2k \quad (3-6)$$

Avec k, le nombre des inputs du modèle.

Les plus petites valeurs de AIC (le plus négatif) correspondent au meilleur modèle.

3.3.6. Erreur moyenne géométrique (EMG)

L'EMG indique la symétrie ou l'appariement entre les données mesurées et prédites :

$$EMG = \exp \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{\theta_p}{\theta_m} \right) \right] \quad (3-7)$$

La valeur EMG inférieures et supérieure à 1 indiquent la sous-estimation et la surestimation du modèle.

3.4. Estimation des paramètres de Van Genuchten

Le logiciel Hydrus1D® a été utilisé pour modéliser les rétentions en eau dans les sols d'étude. Ce programme résout numériquement l'équation de Richards (1931) qui décrit l'écoulement de l'eau dans les sols à saturation variable (Šimůnek et al., 2009):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (3-8)$$

Où θ : teneur volumique en eau du sol ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$),

t : temps (heure),

Z : coordonnée spatiale verticale en cm (positive à partir du bas vers le haut dans le programme HYDRUS- 1D),

K : conductivité hydraulique insaturée [$\text{L} \cdot \text{T}^{-1}$]

h : potentiel matriciel en (cm).

La solution numérique de l'équation (1) nécessite la connaissance de deux fonctions hautement non linéaires, à savoir la courbe de rétention d'eau du sol $\theta(h)$, et la fonction de conductivité hydraulique non saturée $K(h)$. L'une des équations les plus populaires et flexibles décrivant $\theta(h)$ a été développée par Van Genuchten (1980) dans l'équation (8).

L'équation de rétention d'eau du sol de Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) a été employée :

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (3-9)$$

Où θ_r et θ_s sont les teneurs en eau résiduelle et saturée ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) respectivement, et α (cm^{-1}) et n sont les facteurs de forme de la courbe de rétention en eau du sol. Le paramètre 'm' a été calculé comme suit: $m = 1 - 1/n$.

Les paramètres de Van Genuchten ont été estimés indirectement en utilisant le code Rosetta (Schaap et al. 2001) intégré dans le logiciel Hydrus 1D pour chaque échantillon à partir de certaines caractéristiques du sol, à savoir, le sable (S %), le limon (L %) , le pourcentage d'argile (A %), la densité apparente (Da), la teneur en eau volumétrique à -33 kPa et la teneur en eau volumétrique à -1500 kPa, avec l'option de cinq niveaux d'entrée :

- H1: classes texturales (système USDA)
- H2: Argile + Limon + Sable
- H3: Argile + Limon + Sable + Da
- H4: Argile + Limon + Sable + Da + teneur en eau volumétrique à -33 kPa
- H5: Argile + Limon + Sable + Da+ teneur en eau volumétrique à -33 kPa + teneur en eau volumétrique à -1500 kPa.

Pour les cinq modèles de Rosetta, les paramètres de Van Genuchten en sortie sont : θ_r ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_s ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), α (cm^{-1}) et n .

Références

- AFNOR X31-103 (1988). Détermination du pH dans une solution de KCL-Méthode électrométrique. In qualité des sols, AFNOR, 1994.
- AFNOR, 1987 – "Norme X31-105, juillet 1982 : Calcaire total, évaluation des carbonates" in "Qualité des sols méthodes d'analyse", p 37-40.
- Ali Tartar, B. 2010. Cartographie de la dynamique de la végétation face à l'urbanisation dans la région de Annaba. Mémoire de Magister. Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie, P 75.
- Bruand, A., Duval, O., Gaillard, H., Darthout, R., 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., Perez-Fernandez, P., Duval, O., Quetin, P., Nicoullaud, B., Gaillard, H., Raison, L., Pessaud, J.F. and Prud'homme, L., 2002. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols: utilisation de classe de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale. *Etud. Gest. Sols*, 9:105-125.
- Douaoui A., 2005. Variabilité Spatiale de la salinité et sa relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du Bas-Chélif. Apport de la géostatistique et de la télédétection. Thèse Doct d'état, INA Alger, 233 p.
- FAO-ISRIC, 1990. Guidelines for profile description, 3rd Edition, Rome.
- Hasbaia O, 2014. Contribution à l'étude de l'impact de la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture : effets sur le sol, sa microflore et les produits agricoles. Mémoire de Magister, ENSA Alger (Algérie) ; 85p.
- Jamagne, M., Bétrémieux, R., Bégon, J.C., Mori, A., 1977. Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bull. Tech. Inf.* 324-325, 627-641.
- Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J., Timlin, D.J., 1999. The current status of pedotransfer functions: Their accuracy, reliability, and utility in field and regional-scale modeling. In *Assessment of Non-point Source Pollution in the Vadose Zone*, Geophys. Monogr, Ser., vol. 108, edited by D. L. Corwin, K. Loague, and T. R. Ellsworth, 223-234, AGU, Washington, D. C.
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1, 318–333.
- Richards, L.A., 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soils. *Soil Sci.*, 66, 105–110.
- Robinson, G.W., 1922. A new method for the mechanical analysis of soils and other dispersions. *J. Agric. Sci.*, 12; 287-291.
- Schaap, M.G., Leij, F.J., Van Genuchten, M.Th., 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol*, 251, 163–176.
- Šimůnek, J., Van Genuchten, R., 2008. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Technical Manual Version 4.0, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, 270p.
- Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituent. *Soil Sci*, 63, 251-263.
- Willmott, C.J., 1981. On the validation of models. *Physical Geography*, 2, 184–194.
- Yahiaoui I., Douaoui A., Zhang Q., Ziane A., 2015. Soil salinity prediction in the Lower Cheliff plain (Algeria) based on remote sensing and topographic feature analysis. *Journal of Arid Land*. 0.1007/s40333-015-0053-9.

Résultats et interprétations

Une première utilisation des fonctions de pédotransfert internationale sur quelques sols algériens

Ce chapitre est une version modifiée du manuscrit intitulé : Touil S., Degré A., Chabaca M.N., 2016. Transposability of pedotransfer functions for estimating water retention of Algerian soils. *Desalination and Water Treatment*, 57(12), 5232-5240

4.1. Evaluation des fonctions de pédotransfert pour estimer la rétention d'eau des sols algériens

Introduction

L'eau est considérée comme une ressource rare dans de nombreuses parties du monde en raison de la concurrence entre ses différentes utilisations telles que l'agriculture irriguée, l'industrie et l'utilisation domestique. Au début du XXI^e siècle, l'agriculture représente environ 70 % des prélèvements d'eau douce dans 95 % de pays en développement (FAO, 2000b). Ainsi, l'amélioration de l'utilisation de l'eau dans l'agriculture irriguée est devenue une préoccupation majeure.

En effet, la connaissance de l'état de l'eau du sol est devenue essentielle pour l'agriculture, l'hydrologie, la météorologie et, de manière générale, pour toutes les applications nécessitant une surveillance environnementale. Pour mieux gérer et comprendre le fonctionnement hydrologique de la couverture du sol, il faut connaître les propriétés hydrauliques du sol (retenue d'eau, conductivité hydraulique). Ces propriétés sont généralement connues pour un nombre très limité de sols en raison de la difficulté des protocoles expérimentaux utilisés pour leur détermination (coûteux et long). Par conséquent, des outils de prédiction ont été développés, appelés "fonctions de pédotransfert" (FPTs), qui se rapportent à la rétention d'eau du sol, propriétés du sol facilement obtenues comme le sable, le limon, l'argile, la teneur en carbone organique et la densité apparente (Bouma, 1989; Van Genuchten et al. 1992).

Malgré le nombre très élevé des FPTs proposées dans la littérature, peu d'études ont eu pour objet de discuter leurs évaluations dans des contextes agropédoclimatiques différents de ceux où elles ont été développées. En revanche, les recherches ont été concentrées sur la discussion de leurs capacités à estimer avec plus ou moins de justesse les teneurs en eau mesurées pour des échantillons qui ont relativement la même nature de constituants du sol (Williams *et al.*, 1992 ; Tietje et Tapkenhinrichs, 1993 ; Kern, 1995 ; Pachepsky *et al.*, 1998 ; Bastet *et al.*, 1998 et 1999 ; Schaap *et al.*, 2001 ; Cornelis *et al.*, 2001 et 2005 ; Wösten *et al.*, 2001 ; Donatelli *et al.*, 2004).

Or, Nemes *et al.*, (2003) ont montré que l'utilisation de FPTs établies à une échelle donnée conduisent à des prédictions erronées quand elles sont appliquées à une plus petite échelle, c'est-à-dire pour des sols correspondant à une gamme de variabilité plus grande. Tomasella *et al.* (2003) ont aussi montré que lorsque des FPTs établies à une échelle donnée sont appliquées à des sols de nature différente, la qualité des prédictions est inférieure à celle enregistree lorsqu'elles sont appliquées à des sols de nature proche.

On peut alors s'interroger sur la pertinence de FPTs établies à partir de sols localisés dans un contexte agropédoclimatique différent lorsqu'elles sont utilisées pour prédire les propriétés de la rétention en eau des sols du territoire algérien.

Dans ce chapitre nous allons discuter l'efficacité de transposer des FPTs sur les sols du Bas Cheliff pour estimer les rétentions en eau (la capacité au champ $\theta_{2,5}$ (à -330 hPa) et au point de flétrissement $\theta_{4,2}$ (à -15000 hPa)).

4.1.1. Base de données d'évaluation

La base de données rassemble 134 échantillons prélevés aléatoirement à partir des sols du Bas Cheliff. La composition granulométrique, la densité apparente (D_a), la teneur en carbone organique (MO) ainsi que les teneurs en eau volumiques aux deux valeurs de potentiel -330 hPa (à pF 2,5), et -15000 hPa (à pF 4,2), sont connues. Cet ensemble comprend 58 horizons de surface A ou L (de 0 à 30 cm de profondeur) et 76 horizons de subsurface E, Bet C (>30 cm de profondeur).

L'équation de rétention d'eau du sol de Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) est décrite comme suit:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (4-1)$$

Où θ_r et θ_s sont, respectivement, la teneur en eau résiduelle et la teneur en eau saturée ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), α (cm^{-1}) et n sont les facteurs de forme de la courbe de rétention en eau du sol. Les paramètres de Van Genuchten (VG) ont été estimés indirectement pour chaque échantillon de sol à partir de quatre niveaux d'intrants de données mesurées, à savoir les pourcentages de sable (S %), de limon (L %) et d'argile (A %) ainsi que la densité apparente (Da) en utilisant le modèle Rosetta-H3 (Schaap et al., 2001). Le paramètre 'm' a été calculé comme suit: $m = 1 - 1/n$ (tableau 11).

Tableau 11. Caractéristiques des sols sélectionnés.

	Granulométrie (%)				Teneur en eau volumique ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)		
	S%	L%	A%	Da ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	MO (g/100g)	pF 2,5	pF 4, 2
Moyenne	17,88	41,65	40,47	1,63	0,98	0,40	0,22
Écart-type	14,59	9,27	14,24	0,21	0,62	0,10	0,08
Minimum	0,0	17,00	4,00	0,60	0,20	0,13	0,05
Maximum	63,00	67,00	70,00	2,00	6,10	0,61	0,45

MO : Matière organique ; Da : Densité apparente ; A%, L%, S% : Pourcentages d'argile, limon et sable respectivement

Tableau 12. Paramètres du modèle Van Genuchten des sols sélectionnés.

	Paramètres de Van Genuchten				
	θ_r	θ_s	α	n	m
Moyenne	0,0696	0,4333	0,0060	1,5175	0,3285
Écart-type	0,0178	0,0498	0,0111	0,2287	0,0852
Minimum	0,0290	0,3078	0,0002	1,1078	0,0973
Maximum	0,1191	0,6141	0,0842	2,3856	0,5808

θ_r : teneur en eau résiduelle; θ_s : teneur en eau volumique du sol à saturation; α : n : m : facteurs de forme du modèle de Van Genuchten

4.1.2. Description des FPTs sélectionnées

Deux principaux types de FPT peuvent être distingués ; FPT point et FPT paramétrique. Les FPTs point estiment les valeurs de l'humidité du sol pour des valeurs de potentiel hydrique fixes (e.g. Rawls et Brakensiek. (1982), Puckett et al., (1985)), alors que les FPTs paramétriques estiment les paramètres des courbes qui décrivent les données observées de la rétention en eau en fonction d'une gamme de pressions (e.g. McCuen et al., (1981), Vereecken et al., (1989)).

Cette étude porte sur l'évaluation des huit FPTs qui tiennent en compte uniquement des caractéristiques de constitution des sols et considérées parmi les plus citées dans la littérature. Ces FPTs sont : Rawls et al. (1982), Ghorbani Dashtak Homae Type1 (GH-1) (2004) pour les FPTs point, et Saxton et al. (1986), Rosetta (Schaap et al. 2002), Ghorbani Dashtak Homae type3 (GH-3) (2004), Vereecken et al. (1989), Rawls and Brakensiek (1989), Campbell (1974) pour les FPTs paramétriques.

Les FPTs à fondement physique n'ont pas été retenues dans l'évaluation réalisée au cours de ce travail parce qu'elles exigent des connaissances détaillées sur la taille des particules solides, données qui ne sont généralement pas disponibles. Le tableau 13 donne un aperçu des variables d'entrées nécessaires aux FPTs utilisées.

4.1.3. Origine des sols utilisés pour établir les FPTs sélectionnées

Les sols utilisés pour développer les FPTs ont des origines qui peuvent être très variables mais d'une façon générale, les chercheurs ont développé des FPTs pour les sols des pays où ils conduisaient leurs recherches. Ainsi, Rawls et al. (1982), Cosby et al. (1984) et Gupta et Larson (1979) ont établi des FPTs pour les sols du continent nord-américain alors que Hall et al. (1977) en ont développé pour la Grande Bretagne, ou encore Vereecken et al. (1989) pour les sols de Belgique et récemment Bruand et al. (1996 et 2003) qui portaient sur un jeu d'échantillons issus de sols de France et Ghorbani Dashtak Homae (2004) sur les sols iraniens.

Plus généralement, l'établissement de FPTs nécessite la connaissance des propriétés de rétention en eau et de caractéristiques de constitution (composition granulométrique, teneur en carbone organique, densité apparente, etc.) d'un ensemble suffisant d'échantillons pour que cela ait un sens, d'un point de vue statistique (robustesse des relations établies) mais aussi pédologique (représentativité par rapport à une variabilité pédologique). Un certain nombre de bases de données de sols, ou parfois plus modestement d'ensembles de sols limités à plusieurs horizons, ont été utilisées pour établir des FPTs. De nombreux travaux ont ainsi utilisés la base de l'USDA aux Etats-Unis (USDA Natural Resource Conservation Service, 1994; Williams et al. 1992; Tietje et Tapkenhirichs, 1993 ; Kern, 1995 ; Leij et al. 1996 et 1999).

Tableau 13. Paramètres d'entrée nécessaires pour le développement des FPTs évaluées

Auteurs	Nombre d'échantillons	Origine des sols	Variables prises en compte					
			<i>pF</i> 2.5	<i>S</i>	<i>L</i>	<i>A</i>	<i>MO</i>	<i>Da</i>
Rawls et al. (1982)	2541	États-Unis	<i>pF</i> 2.5	+		+	+	
			<i>pF</i> 4.2			+	+	
Rawls et Brakensiek (1985)	5320	États-Unis	<i>pF</i> 2.5	+		+		+
			<i>pF</i> 4.2	+		+		+
Vereecken et al. (1989)	182	Belgique	<i>pF</i> 2.5	+	+	+	+	+
			<i>pF</i> 4.2	+	+	+	+	+
Saxton et al. (1986)	<i>np</i>	États-Unis	<i>pF</i> 2.5	+		+		
			<i>pF</i> 4.2	+		+		
Rosetta-H3 (Schaap et al. 2002)	24691	Nord de l'Amérique et de l'Europe	<i>pF</i> 2.5	+	+	+		+
			<i>pF</i> 4.2	+	+	+		+
Campbell (1974)	1400	États-Unis	<i>pF</i> 2.5	+		+		+
			<i>pF</i> 4.2	+		+		+
Ghorbani Dashtak Homae (2004) Type1	234	Iran	<i>pF</i> 2.5	+				+
			<i>pF</i> 4.2			+		
Ghorbani Dashtak Homae (2004) Type3	234	Iran	<i>pF</i> 2.5	+		+		+
			<i>pF</i> 4.2	+		+		+

4.1.4. Résultats

4.1.4.1. Estimation de la teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement

Les résultats montrent que la plupart des méthodes sous-estiment la rétention d'eau du sol aux deux niveaux de potentiel CC et pF. Le paramètre statistique EMG (Tableau 14) a confirmé que seules les FPTs de Rawls et al. (1982), Vereecken et al. (1989), et Saxton et al. (1986) ont surestimé la rétention en eau du sol à -1500 kPa. Les valeurs de EMG de Rawls et al. (1982), GH-1 (2004), sont de 1.001 et 0.924 à la CC et au pF, respectivement, ce qui indique une bonne adéquation entre les valeurs estimées et mesurées de la rétention en eau. Les valeurs de EMQ sont en accord avec celles de EMG. Les valeurs les plus faibles à la CC sont observées pour Rawls et al. (1982) avec $0,077 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ tandis qu'au pF, les deux fonctions de GH-1 (2004) et de Rawls et al. (1982) sont les mieux classées avec des valeurs de $0,064 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ et $0,067 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivement.

En effet, l'allure des relations représentées dans les figures 9 et 10, montre que les rétentions en eau au PF estimées par le modèle de Rawls et al. (1982) sont plus cohérentes aux valeurs mesurées, en comparaison avec les estimations de la FPT de GH-1 (2004). Les résultats de EMQ et ceux de EMG indiquent que les FPT point donnent de meilleures prédictions que les FPT paramétriques.

La valeur AIC, qui considère les entrées du modèle, montre que les meilleures FPTs pour estimer la rétention en eau du sol à la CC sont celles de Rawls et al. (1982) et Saxton et al. (1986) (tableau 14). Ghanbarian-Alavijeh et Liaghat (2009) et Abbasi et al. (2011) ont également constaté que le modèle Saxton et al. (1986) estimait mieux les sols iraniens que les autres FPTs telles que celles de Campbell (1985).

Les FPTs de Ghorbani Dashtak et Homae (2004) ont été développées pour les sols iraniens dans un contexte pédoclimatique plus au moins semblable au nôtre, leurs estimations des rétentions en eau sont meilleures ; les valeurs des critères statistiques confirment que le modèle développé dans un contexte pédoclimatique similaire à celui de la zone d'étude est le plus efficace.

Le modèle Rosetta (H3) intègre une approche basée sur les réseaux neuronaux artificiels afin de prédire les paramètres de la courbe de rétention d'eau de Van Genuchten (tableau 12) en utilisant quatre niveaux d'entrée : les pourcentages d'argile (C%), de limon (L%), de sable (S%) et la densité apparente (Da). Beaucoup d'auteurs comme Schaap et al. (2001), Minasny et McBratney (2002), Ghorbani Dashtaki et Homae (2004) et Khodaverdilo Homae (2004) ont montré que le modèle de Rosetta sous-estime la rétention d'eau. Ceci a été confirmé dans cette étude par la valeur de EMG < 1 (figures 8 et 9).

Tableau 14. Critères statistiques calculés pour évaluer l'estimation de la rétention en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement par les FPTs sélectionnées dans cette étude

	$\Theta (-33 \text{ kPa})$			$\Theta (-1500 \text{ kPa})$		
	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$					
	EMG	EMQ	AIC	EMG	EMQ	AIC
Campbell (1974)	0,315	0,264	- 352,856	0,382	0,118	- 568,299
Rawls et al. (1982)	1,001	0,077	- 683,434	1,139	0,067	- 719,537
Saxton et al. (1986)	0,976	0,082	- 669,143	1,081	0,071	- 707,501
Rawls and Brakensiek (1989)	0,392	0,248	- 371,790	0,714	0,121	- 550,310
Vereecken et al. (1989)	0,874	0,117	- 566,157	1,235	0,080	- 668,066
Rosetta (Schaap et al. 2001)	0,685	0,169	- 467,210	0,665	0,101	- 603,703
GH-1(2004)	0,661	0,157	- 492,779	0,924	0,064	- 733,480
GH-3(2004)	0,655	0,157	- 45,171	0,786	0,076	- 672,374

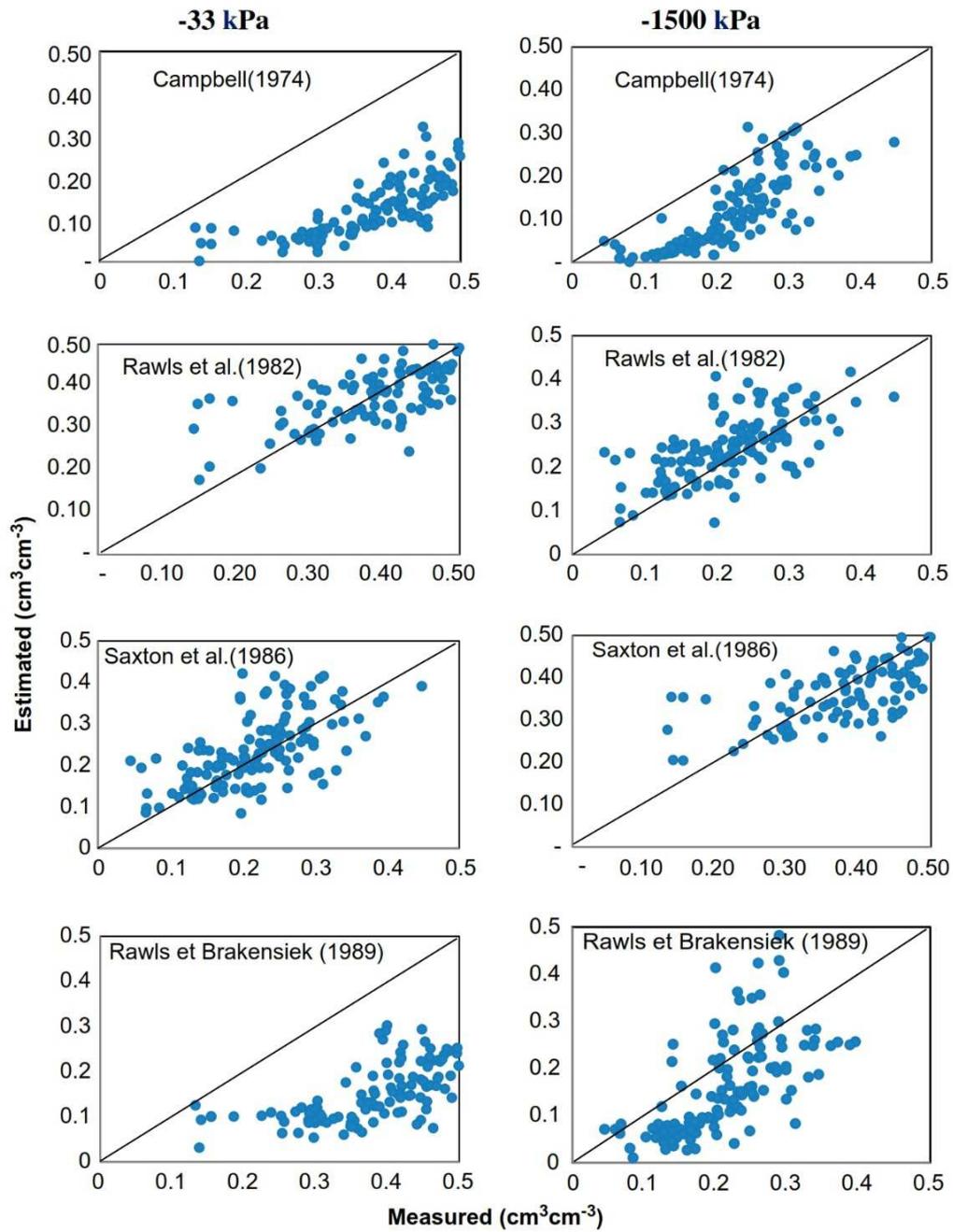


Figure 8. Prédications des rétentions en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement par les FPT sélectionnées dans cette étude

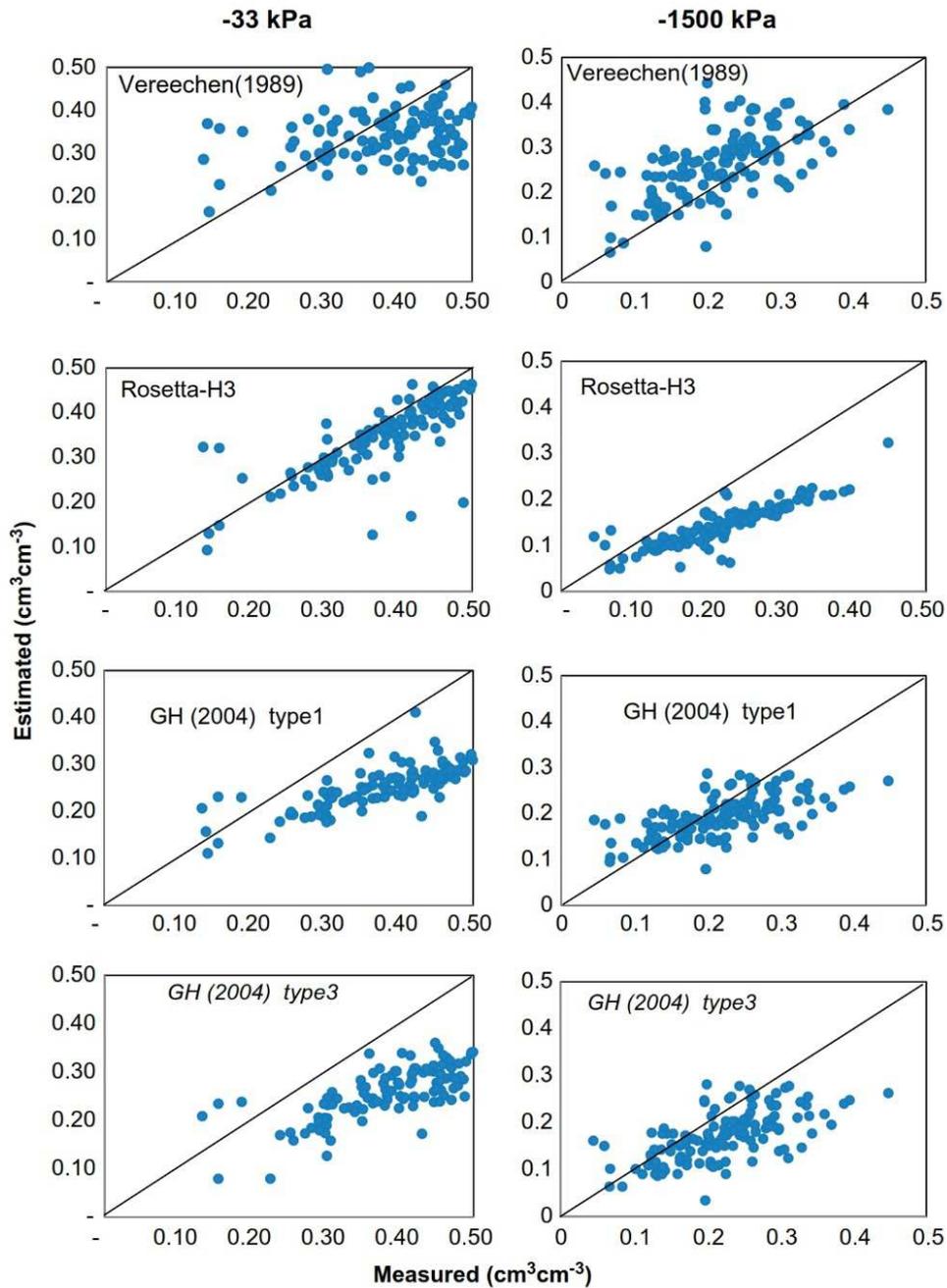


Figure 9. Prédications des rétentions en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement par les FPT sélectionnées dans cette étude (*Suite*).

4.1.5. Discussion

Les raisons pour lesquelles nous avons obtenu de faibles précisions des FPTs évaluées peuvent être dues aux éléments suivants :

4.1.5.1. Données d'application

Tous les échantillons utilisés dans cette étude ont été pris dans un contexte totalement différent du contexte du développement des FPTs évaluées à l'exception de Ghorbani Dashtak et Homae Modèle type 1 (2004). Cela peut indiquer que l'efficacité d'une FPT peut être influencée par l'origine géographique des ensembles de données utilisées dans sa construction (Cornelis et al, 2001; Wagner et al, 2001).

On peut alors conclure que l'application des FPTs dérivées d'un large éventail de sols (hétérogénéité) est plus robuste que les modèles dérivés de données provenant des contextes agropédoclimatiques particuliers. Les résultats montrent que le biais de prédiction le plus faible à -330 hPa et -15000 hPa est enregistré par Rawls et Brakensiek (1985) ($EMQ = 0,25 - 0,121 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) et Campbell (1974) ($EMQ = 0,26 - 0,118 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$). Cela peut être attribué au fait que la texture et la densité apparente des sols du Bas Cheliff ne sont pas dans la gamme de celles utilisées pour développer ces modèles.

Cependant, un grand nombre des données hydrauliques des sols et des propriétés prédictives du sol correspondantes ont été obtenues à partir de trois bases de données (Schaap et al., 1998; Schaap et al., 2001) et ont été utilisées pour le développement des cinq modèles de Rosetta (H1-H5). La performance inférieure du troisième modèle de Rosetta (H3) est due au fait que les sols utilisés dans son développement sont différents des sols nord-africains. La plupart des échantillons utilisés par Rosetta ont été prélevés dans des sols aux climats tempérés et subtropicaux de l'Amérique du Nord et de l'Europe.

4.1.5.2. Matière organique

La majorité des échantillons de sol utilisés dans cette étude sont pauvres en MO. La valeur de la matière organique est inférieure à 16 g.kg^{-1} (Figure 10). Néanmoins, toutes les FPTs évaluées, à l'exception de celles de Ghorbani Dashtaki et Homae (2004), sont basées sur des sols d'Europe ou des États-Unis où les valeurs de la matière organique sont plus élevées que celles des sols algériens. Nemes et al., (2005) ont estimé les valeurs de la MO à $0.9-78.9$, $1.0-64.8$ et $1.0-44.0 \text{ g.kg}^{-1}$ pour l'ensemble des données européennes, hongroises, et américaines, respectivement.

La matière organique affecte la distribution de la taille des pores par le développement de la structure du sol. La présence de débris organiques et la concentration des matières organiques favorisent le développement d'une activité biologique dans le sol qui aboutit à l'évolution de voies tortueuses, et par conséquent à l'établissement d'une porosité continue qui accueille et stocke de l'eau. En effet, dans ce travail, les FPTs point, qui prédisent un peu mieux que les FPTs paramétriques, confirment que la rétention de l'eau du sol est contrôlée par différentes variables indépendantes comme la MO à différents points potentiels et elle n'est pas directement liée aux paramètres de la courbe de rétention d'eau comme le modèle Van Genuchten (Tomasella et al., 2003). En outre, quelles que soient les valeurs de potentiel de l'eau, la teneur en eau du sol à la CC n'est certainement pas une propriété intrinsèque du sol, mais est un paramètre du processus de production du ruissellement et du drainage (perte) de la zone racinaire dans l'ensemble du profil du sol (Romano et al., 2002).

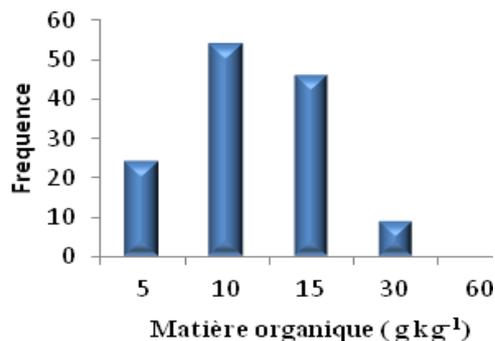


Figure 10. Représentation fréquentielle de la matière organique des échantillons utilisés

4.1.5.3. Modèles mathématiques utilisés

Le formalisme mathématique comme le choix des intrants et des méthodes adoptées dans la modélisation (régressions multiples linéaires ou non linéaires et réseaux neuronaux artificiels, par exemple) joue un rôle décisif dans l'amélioration de l'estimation des FPT. D'après le tableau 14, l'évaluation statistique obtient la

meilleure efficacité pour la FPT de Rawls et Brakensiek (1982) et une bonne classification de la FPT de Vereecken et al. (1989) par rapport à d'autres méthodes, ce qui est expliqué par le fait que ce sont les seuls modèles qui nécessitent des données sur la MO en tant que contribution à -33 kPa. Les FPTs qui utilisent les contenus de la MO comme variables prédictives pour estimer la CC et le PF permanent ont une bonne qualité prédictive (Costa et al., 2013).

Rawls et al. (2003) ont conclu que le carbone organique et la densité apparente améliorent les estimations de la rétention d'eau des sols. Jamison et Kroth (1958), Petersen et al. (1968), Rawls et Brakensiek (1982), De Jong (1983), Rawls et al. (1983), Ambroise et al., (1992) et Kern (1995) ont tous observés que l'inclusion de la teneur en carbone organique comme variable explicative de la rétention en eau est utile pour améliorer les estimations à -33 et -1 500 kPa.

Quant à la qualité des estimations des FPTs de Saxton et al. (1986) à pF 4.2 et GH-1 (2004) à pF 2.5, elle est due au fait que ces deux modèles sont basés sur l'argile et le sable comme inputs. La variation de la quantité d'eau retenue par les sols du Bas Cheliff s'explique d'abord par la variation de la teneur en argile. La variance augmente lorsque le potentiel diminue. En outre, la teneur en argile explique 32 % et 40 % de la variabilité de l'eau retenue dans le sol, lorsque nous passons de -33 à -1 500 kPa (Tableau 15). Des résultats similaires obtenus dans la plaine de la Mitidja (nord de l'Algérie) confirment que le contenu en argile est l'un des principaux facteurs qui contribuent le plus à la rétention d'eau des sols, habituellement à un faible potentiel (Dridi et al., 2012).

Les méthodes de modélisation adoptées dans le développement des FPT, ont révélé que les valeurs de EMQ associées aux EMQ évoluent inversement (Figure 11). Les valeurs de EMQ diminuent lorsqu'on passe d'une régression multiple non linéaire (Rawls et Brakensiek (1985) et Campbell (1974)) et d'une régression basée sur le réseau neuronal artificiel (Rosetta (Schaap et al. 2002)) à une régression multiple linéaire (Rawls et al., 1982, et GH-1 (2004)).

Tableau 15. Coefficients de détermination (R^2) des sols étudiés

Variables	S %	L%	A %	Da (g.cm^3)	Mo (g/100g)
Θ (-330 kPa)	0,529	0,077	0,318	0,266	0,028
Θ (-15000 kPa)	0,490	0,017	0,399	0,207	0,038

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha = 0,05$; Mo : matière organique, Da : densité apparente, A% ; L% ; S% : argile, limon et sable.

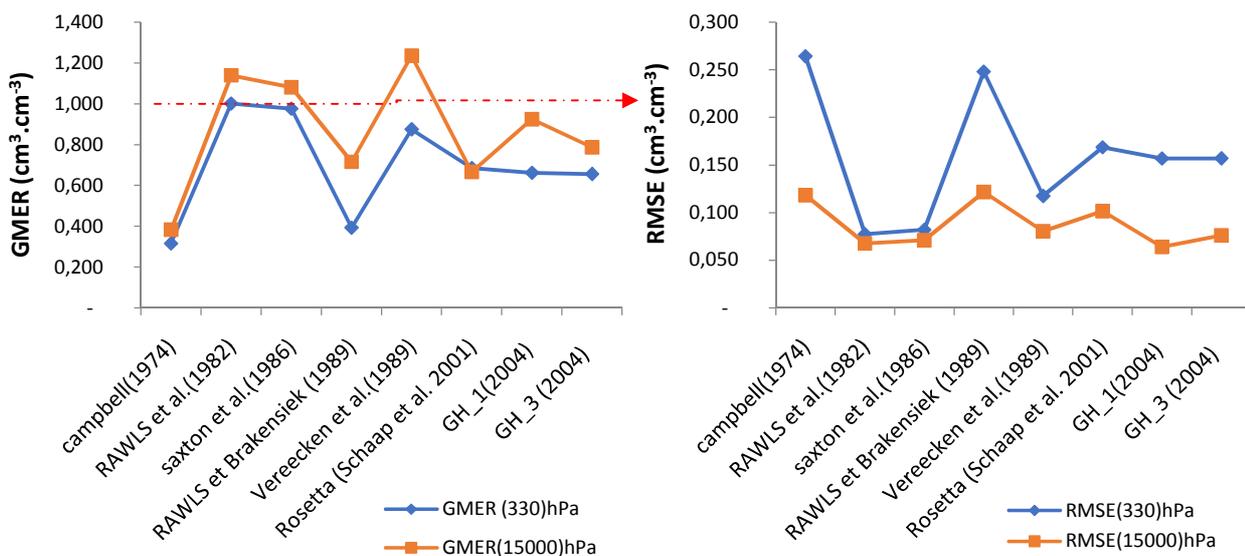


Figure 11. Représentation graphique des critères d'évaluation

Références

- Abbasi Y., Ghanbarian-Alavijeh B., Liaghat A., Shorafa M., 2011. Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil water retention of saline and saline-alkali soils of Iran, *Pedosphere*. 21 230–237.
- Ambroise B., Reutenauer D., Viville D., 1992. Estimating soil water retention properties from mineral and organic fractions of coarse-textured soils in the Vosges Mountains of France, In: *International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. (Eds M.Th. Van Genuchten, F.J. Leij, L.J. Lund). 453–462. (University of California: Riverside, CA).
- Bastet G., Bruand A., Voltz M., Bornand M., Quétin P., 1999. Performance of available pedotransfer functions for predicting the water retention properties of french soils, In : *Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Media*, Riverside, California, October 22-24, 1997, ed. M.Th. Van Genuchten, F.J. Leij and L. Wu, 981-991.
- Bastet, G., Bruand, Quétin A. 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) ,7-28.
- Bouma, J., 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation, *Adv. Soil Sci.* 9, 177– 213.
- Campbell G.S., 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data, *Soil Sci.* 117, 311–314.
- Campbell G.S., 1985. *Soil Physics with BASIC, Transport Models for Soil-Plant System*, Elsevier. Amsterdam.
- Cornelis W.M., Khlosi M., Hartmann R., Van Meirvenne M., and De Vos B., 2005. Comparison of unimodal analytical expressions for the soil-water retention curve, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 1902–1911.
- Cornelis W.M., Ronsyn J., Van Meirvenne M., Hartmann R., 2001. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 638–648.
- Cosby B.J., Hornberger G.M., Clapp R.B., Ginn T.R., 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils, *Water Resour. Res.* 20, 682–690.
- Costa A., Albuquerque J.A., de Almeida J.A., da Costa A., Luciano R.V., 2013 .Pedotransfer functions to estimate retention and availability of water in soils of the state of Santa Catarina, Brazil. *Rev. Bras. Ciênc. Solo.* 37 (4), 889-910.
- De Jong R. , Loebel K., 1982. Empirical relations between soil components and retention at 1/3 and 15 atmospheres, *Can. J. Soil Sci.* 62, 343–350.
- De Jong R., Campbell C.A., Nicholaichuk W., 1983. Water retention equations and their relationship to soil organic matter and particle size distribution for disturbed samples. *Can. J. Soil Sci.*, 63, 291-302.
- Dridi B., Zemmouri S., 2012. Fonctions de pédotransfert pour les vertisols de la plaine de la Mitidja (Algérie) : recherche de paramètres les plus pertinents pour la rétention en eau, *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2012 16(2), 193-201.
- FAO., 2000b. *The State of World Fisheries and Aquaculture*. Rome.
- Ghanbarian-Alavijeh B., Liaghat A. M., 2009. Evaluation of soil texture data for estimating soil water retention curve, *Can. J. Soil Sci.* 89, 461–471.
- Ghorbani Dashtaki Sh., Homae M., 2004. Using geometric mean particle diameter to derive point and continuous pedotransfer functions, In Whrle, N. and Scheurer, M. (eds.) *EuroSoil*. September 4–12. 2004. Freiburg. Germany. 10(30), 1–10.
- Jamison V.C., Kroth E.M., 1958. Available moisture storage capacity in relation to textural composition and organic matter content of several Missouri soils, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 22, 189-192.
- Kern J. S., 1995. Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 1134-1141.
- Khodaverdiloo H, Homae M., 2004. Pedotransfer functions of some calcareous soils, in N. Wöhrle and M. Scheurer, (eds.) *EUROSOIL 2004. Abstracts and Full Papers*. September, 4–12 Freiburg. Germany. 10 (27), 1–11.
- M. Donatelli, Wösten J.H.M., Belocchi G., Acutis M., Nemes A., Fila G., 2004. Methods to evaluate pedotransfer functions, *Elsevier B.V.* 30, 357–411.
- McCuen R.H., Rawls W.J., Brakensiek D.L., 1981. Statistical analysis of the Brooks–Corey and the Green–Ampt parameters across soil textures, *Water Resour. Res.* 17, 1005–1013.

- Minasny B., McBratney A.B., 2002. Uncertainty analysis for pedotransfer functions, *Eur. J. Soil Sci.* 53, 417–429.
- Nemes A., Rawls W. J., Pachepsky Y. A., 2005. Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 1330–1337.
- Nemes A., Schaap M.G., Wösten J.H.M., 2003. Functional evaluation on of pedotransfer functions derived from different scales of data collection, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67 1093–1102.
- Pachepsky Y.A., Crawford J.W., Rawls W.J., 1999. Fractals in soil science: Preface, *Geoderma.* 88, 3–4.
- Pachepsky Y.A., Rawls W.J., (ed.), 2004. Development of pedotransfer functions in soil hydrology, *Dev. Soil Sci.* Elsevier. Amsterdam. 30.
- Pachepsky, Ya., Rawls, W.J., Gimenez, D., Watt, J.P.C., 1998. Use of soil penetration resistance and group method data handling to improve soil water retention estimates, *Soil Tillage Res.* 49, 117–126.
- Petersen G.W., Cunningham R.L., Matelski R.P., 1968. Moisture characteristics of Pennsylvania soils: I. Moisture retention as related to texture, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32, 271–275.
- Puckett W.E, Dane J.H., Hajek B.F., 1985. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 831–836.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L., 1982. Estimating soil water retention from soil properties, *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 108, 166–171.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L., Soni B., 1983. Agricultural management effects on soil water processes. Part I. Soil water retention and Green-Ampt parameters, *Trans. ASAE.* 26, 1747–1752.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L., 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties, H.J. MORELSEYTOUX (ed), *Unsaturated flow in hydrologic modeling - theory and practice*, Dordrecht. Kluwer Academic, 275-300.
- Rawls W. J., Pachepsky Y., Ritchie J. C, Sobecki T. M., Bloodwort H., 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma.* 116-61.
- Romano N., Santini A., 2002. Water retention and storage: Field, in: *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, edited by: H. J. Dane, and G. C.Topp, SSSA Book Series N.5, Madison, WI, USA, pp.721–738.
- Saxton K.E., Rawls W.J., Roemberger J.C., Papendick R.I., 1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 1031-1036,.
- Schaap M.G., Leij F.J., and Van Genuchten M. Th., 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions, *Journal of Hydrology.* 251, 163-176.
- Schaap M.G., Leij F.J., Van Genuchten, M.Th., 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 847–855.
- Tietje, O., Tapkenhinrichs, M., 1993. Evaluation of pedotransfer functions, *Soil Science Society of America Journal.* 57, 1088–1095.
- Tomasella J., Pachepsky Y.A., Crestana S., Rawls W.J., 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67 1085–1092.
- Van Genuchten M.Th., Leij, F.J., 1992. On estimating the hydraulic properties of unsaturated soils, *Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*, Riverside. CA.CA. 11–13. University of California, 1–14.
- Vereecken H., Maes J., Feyen J., Darius P., 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content, *Soil Sci.* 148, 389–403.
- Wagner B., Tarnawski V.R., Hennings V., Müller U., Wessolek G., Plagge R., 2001. Evaluation of pedotransfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set, *Geoderma.* 102, 275–297.
- Williams, J., Ross, P.J., Bristow, K.L., 1992. Prediction of the Campbell water retention function from texture, structure and organic matter, *Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils*, Riverside. University of California.
- Wösten J.H.M., Pachepsky Y.A., and Rawls W.J., 2001. Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics, *J. Hydrol.* 251, 123–150.
- Wösten J.H.M., Van Genuchten M.Th., 1988. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52 1762–1770.

Vers une analyse de sensibilité de l'estimation des fonctions de pédotransfert

Ce chapitre est une version modifiée du manuscrit intitulé : Touil, S., Degré, A., and Chabaca, M. N., 2016. Sensitivity analysis of point and parametric pedotransfer functions for estimating water retention of soils in Algeria, SOIL, 2, 647-657, <https://doi.org/10.5194/soil-2-647>.

4.2. Analyse de sensibilité des fonctions de pédotransfert points et paramétriques pour estimer la rétention d'eau des sols en Algérie

Introduction

L'information prédictive sur la répartition spatiale de l'eau du sol et sa disponibilité pour les plantes permet aux agriculteurs de prendre des décisions efficaces (sur la gestion des nutriments et la couverture végétale, par exemple) afin de maximiser la rentabilité. L'équilibre sol-eau est essentiel dans de nombreux processus qui influencent la croissance des plantes ainsi que la dégradation des sols et des ressources en eau.

Les hydrologues sont souvent confrontés à des situations où les données hydrauliques du sol telles que la rétention d'eau ou la conductivité hydraulique sont indisponibles. Par conséquent, les fonctions de pédotransfert (FPTs) sont utilisées comme alternative pratique pour estimer ces propriétés. L'extrapolation des FPTs dans un contexte agropédoclimatique différent limite leur performance (Touil et al., 2016). Le développement des FPTs locales pourrait être utile pour répondre aux exigences agricoles de la modélisation avec une précision acceptable.

Les courbes de rétention en eau du sol (CRES) sont généralement estimées à l'aide de deux approches : FPT point et FPT paramétriques. Avec les FPTs ponctuelles, la CRES est estimée à des points de pression bien définis (Pachepsky et al., 1996 ; Minasny et al., 1999). L'une des courbes les plus couramment utilisées est le modèle Van Genuchten (1980). Avec des FPTs paramétriques, les paramètres du modèle de Van Genuchten (VG), tels que θ_s , θ_r , α et n , sont estimés en les ajustant aux données, puis en se rapportant ensuite à une corrélation empirique avec les propriétés basiques du sol (Vereecken et al., 1992 ; Wösten et al. 1995, Schaap et al., 1998, Minasny et McBratney, 2002, Rawls et Brakensiek, 1985, Van Genuchten et al., 1992, Wösten et al., 2001, Vereecken et al., 2010). Schaap et al. (2001) ont développé le code Rosetta basé sur la méthode du réseau neuronal artificiel (RNA), qui utilise cinq modèles hiérarchiques pour prédire les paramètres de Van Genuchten, (θ_s , θ_r , α et n), uniquement avec les classes de texture du sol et les données d'entrée (texture, densité apparente [Da] et une ou deux valeurs de teneur en eau à -33 et -1500 kPa).

Les FPTs paramétriques et ponctuelles peuvent être développées à l'aide de méthodes de régression multiple (Lin et al., 1999 ; Mayr et Jarvis, 1999 ; Tomasella et al., 2000).

Environ 97 % des FPTs utilisées dans l'estimation de la rétention d'eau des sols dans les régions tropicales sont basés sur des régressions multiples linéaires et sur des techniques polynomiales de l'ordre- n (Botula et al., 2014).

L'utilisation de FPTs dans des contextes différents de ceux dont elles ont été dérivées peut entraîner une sous-estimation ou une surestimation de la rétention en eau. Plusieurs études ont montré que la rétention en eau des sols est une fonction complexe de la structure et de la composition du sol (Rawls et al., 1991 ; Wösten et al., 2001 ; Rawls et al., 2003 ; Mirus et al., 2015). L'application de FPTs à différentes classes texturales ou structurales pourrait également constituer une source d'incertitude (Bruand et al., 2002 ; Pachepsky et al., 2003). La rétention en eau et la conductivité hydraulique varient largement - et de façon non linéaire - avec le potentiel de l'eau dans le sol. La texture du sol est le principal déterminant des caractéristiques de l'eau retenue dans la plupart des sols agricoles (Saxton et al., 1986). La relation entre la courbe de rétention en eau et la distribution granulométrique (PSD) a été analysée dans de nombreuses études (Jonasson et al., 1992 ; Minasny et al., 2006 ; Ghanbarian et al., 2009 ; Xu Yang et al., 2013 ; Tae -Kyu Lee et al., 2014). La rétention en eau dépend principalement de la texture, mais aussi d'autres facteurs tels que la densité apparente (Da), la structure, la matière organique (MO), la minéralogie des argiles, le phénomène d'hystérésis ayant un impact secondaire (Williams et al., 1983, Saxton et al., 1986, Vereecken et al., 1989, Winfield et al., 2006).

La variabilité de la réponse de la FPT dépend de la variabilité et de l'incertitude d'une ou plusieurs des variables d'entrée. L'analyse de l'incertitude des FPTs disponibles est nécessaire pour minimiser l'erreur d'estimation et identifier sa source. Récemment, les techniques d'analyse de sensibilité et l'analyse de l'incertitude ont commencé à acquérir une attention considérable dans les études des FPTs (Nemes et al., 2006b; Kay et al., 1997; Grunwald et al., 2001; Deng et al., 2009; Moeys et al. , 2012; Loosvelt et al., 2013).

La question est : Quelle variable d'entrée est le principal, ou meilleur, prédicteur complémentaire de rétention en eau et à quel potentiel ? L'analyse de sensibilité globale (ASG) nous permet de voir comment

l'incertitude dans la sortie d'un modèle peut être répartie sur différentes sources d'incertitudes dans les intrants du modèle (Saltelli et al., 2000). Généralement, une ASG est utile pour identifier les variables qui contribuent principalement aux variables de sortie (Jaques et al., 2004).

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- Développer et valider deux approches des FPTs à l'aide de méthodes de régression : des FPTs points pour estimer les rétentions en eau dans les sols algériens à -33 kPa et -1500 kPa; et des FPTs paramétriques pour estimer les paramètres de Van Genuchten
- Étudier l'impact de chaque contribution sur les réponses des FPTs

4.2.1. Caractérisation des sols utilisés

L'ensemble des données utilisées dans cette étude a été collecté à partir de différentes régions situées dans le nord algérien. La base de données est composée de 242 échantillons comprenant les horizons de surface (de 0 à 30 cm de profondeur) et les horizons du sous-sol (30 cm de profondeur). Il est divisé en deux sous-ensembles : le premier sous-ensemble, utilisé pour développer les FPTs, contient 78,1 % des échantillons qui ont été prélevés dans la plaine côtière d'Annaba (13 échantillons), la plaine de Beni Slimane à Médéa (42 échantillons), la plaine Kherba-El Abadia à Ain defla (54 échantillons) et le Bas Cheliff (80 échantillons) ; le second sous-ensemble compte 21,9 % des échantillons et a été constitué afin d'évaluer la qualité des prédictions effectuées. Les sols échantillonnés sont situés dans le plateau de Benziane dans la plaine du sud-ouest du Bas Cheliff. Les caractéristiques physico-chimiques et les propriétés de rétention en eau ont aussi été déterminées par les mêmes méthodes que celles utilisées dans le développement des FPTs. Les statistiques descriptives des ensembles de données sont présentées dans le tableau 16.

L'équation de rétention d'eau du sol de Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) a été employée :

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (4-2)$$

Où θ_r et θ_s sont la teneur en eau résiduelle et saturée ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) respectivement, et α (cm^{-1}) et n les facteurs de forme de la courbe de rétention en eau du sol. Les paramètres de Van Genuchten ont été estimés indirectement pour chaque échantillon de sol à partir de quatre niveaux d'intrants de données mesurées, à savoir, les pourcentages de sable (S%), de limon (L%) et d'argile (A%) ainsi que la densité apparente (Da) en utilisant le modèle Rosetta-H3 (Schaap et al., 2001). Le paramètre m a été calculé comme suit : $m = 1 - (1 / n)$.

Tableau 16. Caractéristiques du sol des ensembles de données développées et validées

	Granulométrie					$\theta_{\text{Volu}} (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	
	S%	L%	A%	Da (g.cm^{-3})	MO (%)	- 33 kPa	-1500 kPa
Echantillons utilisés pour élaborer les FPTs (n=189)							
Moyenne	17.81	39,23	42.97	1.71	0.95	0.44	0.27
Ecart-type	10.32	10.76	13.90	0.20	0.93	0.09	0.08
Min	1.00	9.20	4.00	0.60	0.08	0.13	0.03
Max	50.00	67.00	84.30	2.10	8.40	0.73	0.56
Coefficient de variation (CV)	0.58	0.27	0.32	0.12	0.98	0.21	0.31
Echantillons utilisés pour tester les FPTs (n=53)							
Moyenne	12.50	41.58	45.92	1.49	0.87	0.40	0.21
Ecart-type	14.84	7.62	14.94	0.13	0.50	0.10	0.07
Min	-	29.00	9.00	1.15	0.20	0.14	0.07
Max	59.00	58.00	70.00	1.73	2.74	0.57	0.45
Coefficient de variation (CV)	1.19	0.18	0.33	0.09	0.57	0.24	0.35

S: sable, A: argile, L: limon, Da: densité apparente, MO: matière organique, θ_{Volu} : teneur en eau volumétrique

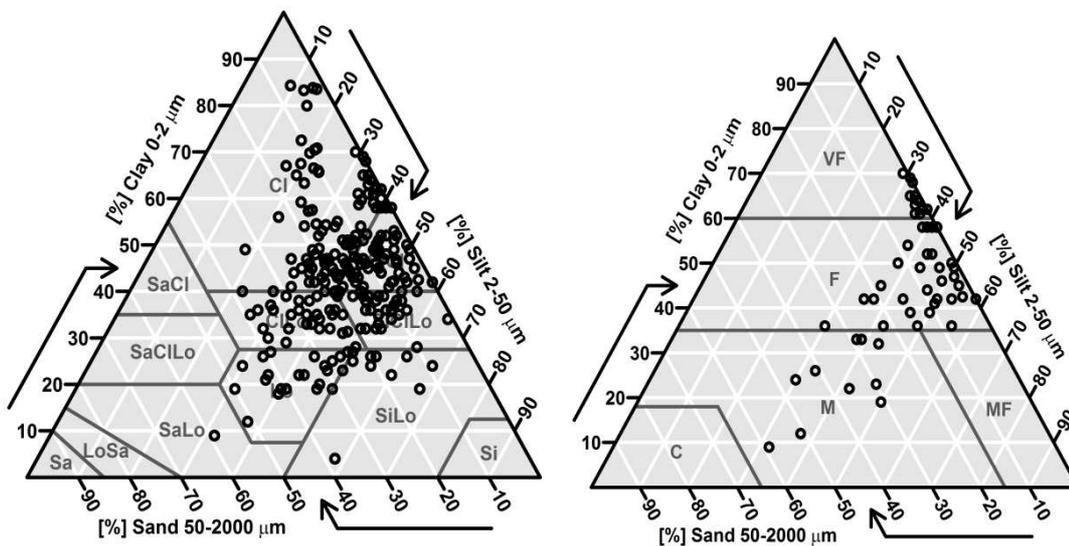


Figure 12. Caractéristiques texturales des échantillons étudiés

(a) Fractions de texture de l'ensemble de données (242 échantillons) selon le système USDA (b): distribution granulométrique de 53 échantillons de validation selon le triangle textural de la FAO (FAO, 1990).

4.2.2.Méthodologie

4.2.2.1.Développement des FPTs

Deux approches ont été utilisées dans cette étude pour développer les FPTs : les FPT de point pour estimer les rétentions en eau pour des points de pression particuliers (h) ; et les FPTs paramétriques pour prédire les paramètres Van Genuchten. Chaque niveau de teneur en eau a des potentiels d'eau sélectionnés de -33 kPa et -1500 kPa et des paramètres de Van Genuchten estimés qui sont liés aux propriétés basiques du sol (c'est-à-dire les pourcentages de sable, de limon et d'argile, le contenu en MO et la Da) en utilisant les techniques de régression multiple (tableau 17). Les variables d'entrée les plus importantes ont été déterminées en utilisant la corrélation de Pearson ($\alpha = 5\%$). Pour les modèles de régression multiplelinéaire (RML), la forme générale des équations résultantes a été exprimée ainsi :

$$Y = a_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 \quad (4-3)$$

Pour les modèles de régression multiple nonlinéaire (RMNL), les équations sont exprimées ainsi :

$$Y = a_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_1^2 + b_4 X_2^2 + b_5 X_1^3 + b_6 X_2^3 + b_7 X_1 * X_2 + b_8 X_1^2 * X_2 + b_9 X_1 * X_2^2 \quad (4-4)$$

Où Y représente la variable dépendante, a_0 est l'intercepte ; $b_1 \dots, b_n$ sont les coefficients de régression, et X_1 à X_4 réfèrent à des variables indépendantes représentant les propriétés basiques du sol.

La qualité de prédiction des FPTs points et paramétriques développées à partir des sols algériens a été ensuite comparée aux trois FPTs de Rosetta (H1, H2 et H3). Nous avons choisi le modèle Rosetta en raison de la souplesse qu'il confère à l'utilisateur dans la saisie des données requises (Stumpp et al., 2009).

Le modèle de Rosetta a également été choisi car il a restitué des prédictions raisonnables dans plusieurs études d'évaluation (*e.g.* Frederick et al., 2004 ; Nemes et al., 2003). Dans notre étude, les trois niveaux de modèle de Rosetta (H1, H2 et H3) ont été sélectionnés pour comparer leurs performances dans les sols algériens car ils ne nécessitent que des données de texture et de densité apparente en entrées, comme c'est le cas des FPTs développés localement.

Tableau 17.Fonctions de pédotransfert développées

FPTs-Point	
a -33 kPa:	$\theta = 0.0246 - 0.0040*S + 0.0012*A + 0.2554*Da + 0.0067 * MO$
a -1500 kPa:	$\theta = - 0.0627 - 0.0029*S + 0.00165*A + 0.1837*Da + 0,0017* MO$
FPTs -Paramétriques	
θ_s	$= 0,44 - 0,0013369*S + 0,0002*A + 0,01771343* Da - 0,0018272* MO$
θ_r	$= 0,09 + 0,000777943*S - 0,000319883*A + 0,000063602*S^2 + 0,000012*A^2 + 0,00000093*S^3 - 0,0000001*A^3$
α	$= 0,003 - 0,0001*S + 0,000089*L + 0,0000054*S^2 - 0,0000045*L^2 - 0,000000073*S^3 + 0,000000045*L^3 + 0,0000077*S*L - 0,000000031*S^2*L - 0,000000062*S*L^2$
n	$= 2,9 - 0,00277395*A - 0,09478943*L - 0,00036644 * A^2 + 0,00202592*L^2 + 0,00000249*A^3 - 0,000015*L^3 + 0,00028374*A*L + 0,00000491*A^2 * L - 0,00000532*A*L^2$

S: sable (%), A: argile (%), L: limon (%), Da: densité apparente (g.cm⁻³), MO: matière organique (%), θ_r et θ_s : teneurs en eau résiduelle et à saturation (cm³ cm⁻³), respectivement, et α (cm⁻¹) et n sont les facteurs de forme du modèle de Van Genuchten.

4.2.2.2. Analyse de la sensibilité globale (ASG)

L’ASG implique de déterminer quelle partie de la variance dans la réponse du modèle est due à la variance de quelle variable d’entrée ou de quel groupe de variables d’entrée. L’impact des paramètres est quantifié en calculant les indices de sensibilité globale.

La méthode de Sobol (Sobol, 1990) est une méthode d’ASG indépendante basée sur la décomposition de la variance. Lorsque le modèle est non linéaire et non monotone, la décomposition de la variance de sortie est encore définie et peut être utilisée. Le modèle de Sobol est représenté par la fonction suivante :

$$Y = f (X_1, X_2, X_3, \dots, X_p) \tag{4-5}$$

Où Y est la sortie du modèle (ou la fonction objective) et X = (X₁,, X_p) est le jeu de variables d’entrée.

$$V (Y) = V (E (Y | X)) + E (Var (Y | X)) \tag{4-6}$$

Où V (Y) est la variance totale dans le modèle, V (E (Y | X)) et E (Var (Y | X)) signifient, respectivement, la variance dans la valeur conditionnelle attendue et la valeur attendue de la variance conditionnelle. Lorsque les variables d’entrée Xi sont indépendantes, la décomposition de la variance du modèle est :

$$V(Y) = \sum_{i=1}^p V_i + \sum_i \sum_j V_{ij} + + \sum_i \sum_j \sum_p V_{ijp} + \dots + V_{1,2,3,\dots,p} \tag{4-7}$$

$$V_i = V [E(Y|X_i)]$$

$$V_{ij} = V [E(Y|X_i, X_j)] - V_i - V_j$$

$$V_{ijp} = V [E(Y|X_i, X_j, X_p)] - V_{ij} - V_{ip} - V_{jp} - V_i - V_j - V_p$$

Où Vi est la proportion de variance due à la variable Xi.

La division de Vi par V (Y) correspond à l’expression de l’indice de sensibilité de premier ordre (Si), de sorte que :

$$S_i = V_i / V(Y) = V[E(Y/X_i)] / V(Y) \quad (4-8)$$

Le terme S_i est la mesure qui garantit un choix éclairé dans les cas où les facteurs sont corrélés (Saltelli et Tarantola, 2002). Cet indice est toujours compris entre 0 et 1, et il représente une mesure appropriée de la sensibilité utilisée pour classer les variables d'entrée par ordre d'importance (Saltelli et Tarantola, 2001).

Afin de quantifier la variation de l'indice de sensibilité (V_{S_i}) d'un facteur d'entrée X_i , nous l'avons fixé à $X_i = X_i^*$ (où X_i^* correspond à la moyenne lorsque la variable suit une distribution normale, et à la médiane lorsque la variable suit une distribution log-normale). Pour calculer de quelle valeur cette hypothèse a changé la variance de Y , nous avons utilisé la formule suivante :

$$V_{S_i} = (V[E(Y/X)] / V(Y) - V[E(Y/X_i = X_i^*)] / V(Y)) * 100 \quad (4-9)$$

- $V_{S_i} > 0$ et S_i proche de 1 indiquent une précision croissante des FPTs;
- $V_{S_i} < 0$ et S_i proche de 1 indiquent une précision croissante des FPTs;
- $V_{S_i} > 0$ et S_i proche de 0 indiquent une diminution de la précision des FPTs;
- $V_{S_i} < 0$ et S_i proches de 0 indiquent une diminution de la précision des FPTs.

En outre, la combinaison de EMQ et de S_i nous a permis de détecter la contribution de chaque variable à l'amélioration de la qualité de prédiction des FPTs.

4.2.3. Discussion des résultats

4.2.3.1. FPTs dérivées

D'après le tableau 18, la plupart des FPTs ont sous-estimé la rétention en eau, à l'exception de la FPT points aux deux points de pression (-33 kPa et -1500 kPa). Le modèle Rosetta H2, qui considère uniquement la texture comme entrée, a donné des valeurs de EM faibles par rapport aux modèles H1 et H3 (-0.0728; -0.0436 cm³ cm⁻³ à -33 kPa et -1500 kPa, respectivement).

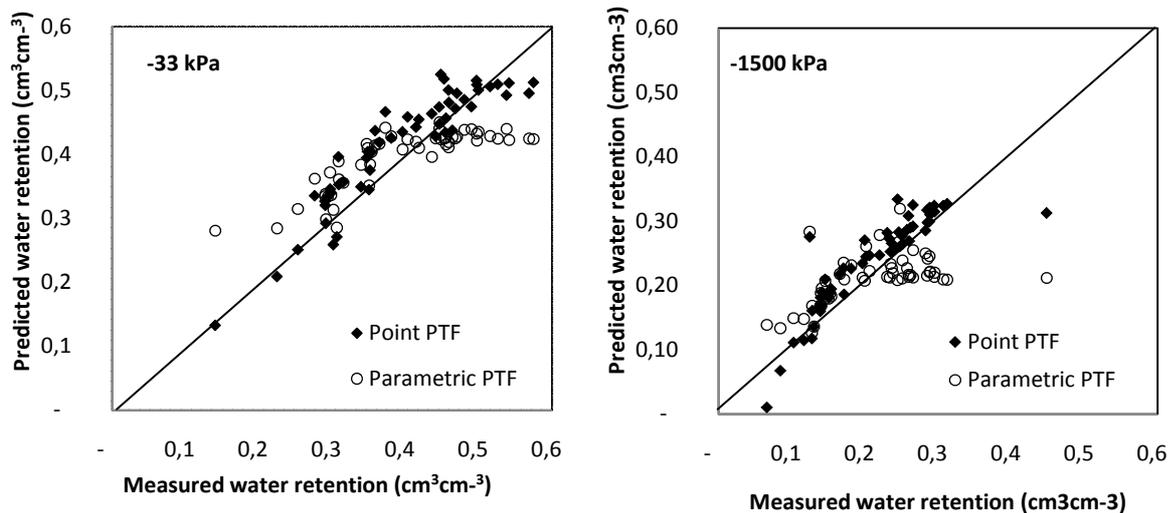


Figure 13. Rétention d'eau du sol mesurée par rapport à la rétention d'eau du sol prédite

Les valeurs EM faibles indiquent une meilleure estimation des FPTs. Elles ont été soulignées après l'application des FPTs point suivies par les FPTs paramétriques (Figure 14).

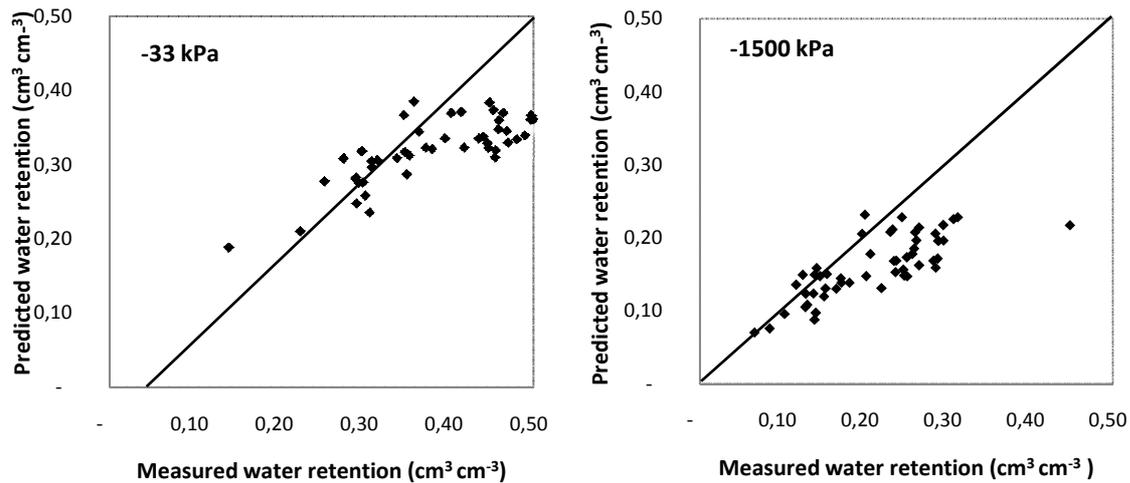


Figure 14. Rétention d'eau du sol mesurée versus prédite par Rosetta H2

L'indice d'accord (d) pour les résultats obtenus a montré que les FPTs point (ponctuelles) étaient plus adaptées aux sols du Bas Cheliff que les FPTs paramétriques (tableau 18), avec des valeurs de 0.9975 et $0.991\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$. Des comparaisons similaires ont été entreprises dans différentes régions par Minasny et al. (1999), Tomasella et al. (2003) et Ghorbani Dashtaki et al. (2010), qui ont tous signalé des différences analogues entre ces deux approches des FPTs. Il n'y a pas eu de différence significative dans les valeurs de EMQ entre les FPTs paramétriques et Rosetta H2 à -1500 kPa (EMQ: $0,0605\text{ cm}^3\text{ cm}^{-3}$ et $0,0636\text{ cm}^3\text{ cm}^{-3}$, respectivement).

Tableau 18. Critères d'évaluation d'estimation de la rétention en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement par les FPTs.

			-33 kPa	-1500 kPa
EM ($\text{cm}^3\text{ cm}^{-3}$)	FPT Points	MLR	0.0188	0.0261
	FPT Paramétriques	MNLR	-0.0016	-0.0020
	Rosetta	H1	-0.0902	-0.0458
		H2	-0.0728	-0.0436
H3		-0.0991	-0.0552	
EMQ ($\text{cm}^3\text{ cm}^{-3}$)	FPT Points	MLR	0.0414	0.0444
	FPT Paramétriques	MNLR	0.0613	0.0605
	Rosetta	H1	0.1170	0.0738
		H2	0.0970	0.0636
H3		0.1280	0.0749	
d ($\text{cm}^3\text{ cm}^{-3}$)	FPT Points	MLR	0.9975	0.9911
	FPT Paramétriques	MNLR	0.9938	0.9775
	Rosetta	H1	0.9623	0.9427
		H2	0.9775	0.9597
H3		0.9519	0.9331	

Parmi les cinq modèles testés dans les sols du Bas Cheliff, les FPTs de point (RML) dérivées d'une base de données provenant de certains sols algériens avaient les valeurs EMQ les plus faibles (0,041 et 0,044 cm³ cm⁻³ à -33 kPa et -1500 kPa, respectivement). Des performances équivalentes ou supérieures aux FPTs dérivées par des méthodes de régression multiple ont été rapportées dans certaines études (Minasny et al., 1999, Nemes et al., 2003).

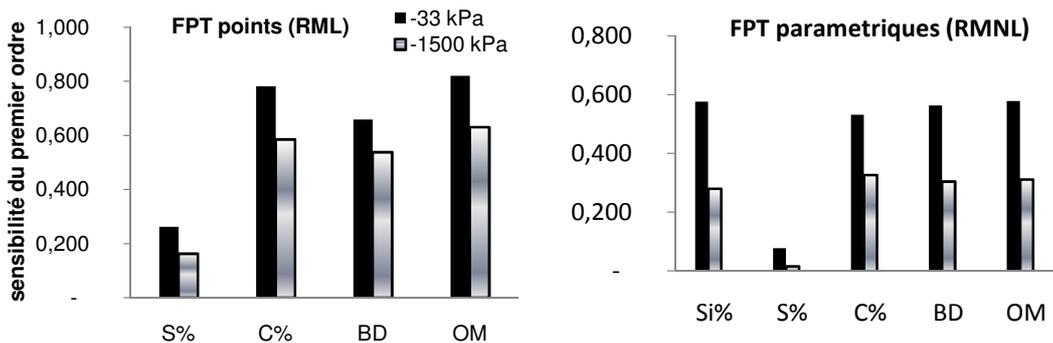
Cependant, les modèles non linéaires (FPTs paramétriques) ont donné une meilleure estimation que les modèles de Rosetta, basés sur RNA (EMQ: 0,0613 et 0,0605 cm³ cm⁻³ à -33 kPa et -1500 kPa, respectivement). Les valeurs EMQ et EM des trois modèles Rosetta ont également montré que H2 était meilleur que H1 ou H3 (tableau 18, figure 14).

4.2.3.2. Indice de sensibilité (Si) avant la stratification texturale

Dans le développement de FPTs, l'utilisation de la texture comme entrée est l'approche habituelle (texture comme expression globale du contenu distribution granulométrique à savoir argile, limon et sable). Sa contribution est fondamentale pour comprendre le processus de la rétention de l'eau à différents points de pression, bien que les caractéristiques physiques et chimiques soient utilisées pour décrire la courbe de rétention, comme la Da et la MO.

L'importance de chaque variable d'entrée a été évaluée par le premier ordre de sensibilité Si. Il est clair que pour les FPTs qui ont été développées, le pourcentage de la MO (MO%) et de l'argile (A%) sont les variables ayant le plus grand impact (figure 15). Pour les FPTs points (RML), les estimations les plus sensibles sont aux deux points de pression (Si: 0,821; 0,782 à -33 kPa et 0,630; 0,585 à -1500 kPa pour MO % et A%, respectivement). Le pourcentage de limon (L%) est classé en seconde place dans les FPTs paramétriques (0,576 à -33 kPa) après la MO, suivie de Da et A% (figure 16). Les valeurs de Si ont placé la teneur en sable en troisième place dans le RML (0,262; 0,162), ce qui indique que son impact sur le modèle paramétrique est quasi-insignifiant, avec des valeurs très faibles (Si: 0,077; 0,017) à -33 kPa et -1500 kPa, respectivement).

La qualité de prédiction des FPTs ponctuelles (MLR) peut être expliquée, premièrement, en tenant compte des caractéristiques de base du sol en tant qu'entrée à partir des informations texturales et structurales fournies par la Da. Deuxièmement, les FPTs de point (RML) sont principalement basées sur ces variables d'entrée, contrairement aux FPTs de paramètres (RMNL), qui ont des entrées autres que la texture, Da et MO, ainsi que des paramètres supplémentaires (paramètres VG: θ_r , θ_s , α , n).



(S : sable, C : argile, Si : limon, BD : densité apparente, OM : matière organique)

Figure 15. Indice de la sensibilité du premier ordre.

4.2.3.3. Analyse de sensibilité et incertitude des FPTs après la stratification texturale

La sensibilité des méthodes de régression multiple (linéaire et non linéaire) utilisée pour développer des FPTs à partir des caractéristiques basiques du sol pour estimer la rétention en eau des sols pour les différentes classes texturales a été analysée. Nous avons regroupé les échantillons en trois catégories de classes texturales (Figure 17) conformément aux directives de la FAO (FAO, 1990): très fine: TF (12 échantillons); fine : F (31 échantillons); et moyenne : M (10 échantillons).

Les résultats ont montré qu'après le regroupement textural, seule la classe texturale moyenne présentait une amélioration de l'estimation de la qualité des FPTs. Une meilleure prédiction à -1500 kPa a été fournie par les FPTs point (EMQ = 0,027 cm³ cm⁻³) et FPTs paramétriques (EMQ = 0,038 cm³ cm⁻³) à -1500 kPa (Figure 17).

Tableau 19. Variation du premier indice de sensibilité dans les différentes classes de texture du sol

		L (%)		S (%)		A (%)		Da (g/cm ³)		MO (%)		
Class-tex		V _{Si}	A.E	V _{Si}	A.E	V _{Si}	A.E	V _{Si}	A.E	V _{Si}	A.E	
RML	à -33 kPa	TF	Abs	-1.2		-0.4		-50.5	-	4.6		
		F	Abs	-43.2	-	-10.7	-	-39.9	-	0.2		
		M	Abs	-103.3	-	-27.5	+	-44.4	+	-5.7		
	à -1500 kPa	TF	Abs	-0.3		0.9		-27.3	-	1.1		
		F	Abs	-46.2	-	-20.7	-	-41.6	-	0.1		
		M	Abs	-86.4		-52.9	-	-22.9	-	-2.3		
RMNL	à -33 kPa	TF	0.4		-0.2		0.1		-0.1		-0.05	
		F	-1.6		-40.9		-1.1		-2.5		-0.1	
		M	15.0		-5.2		15.1	+	21.6	+	22.3	+
	à -1500 kPa	TF	-4.6		-0.3		-1.8		-1.4		-0.5	
		F	28.6	+	18.9	-	4.6		0.4		0.1	
		M	-36.7	-	-16.7	-	-22.6	-	8.9		-8.4	

Abs: absent dans le modèle, V_{Si}: variation du premier indice de sensibilité ; A.E: amélioration de l'estimation ; TF : très fine ; F : fine ; M : moyenne

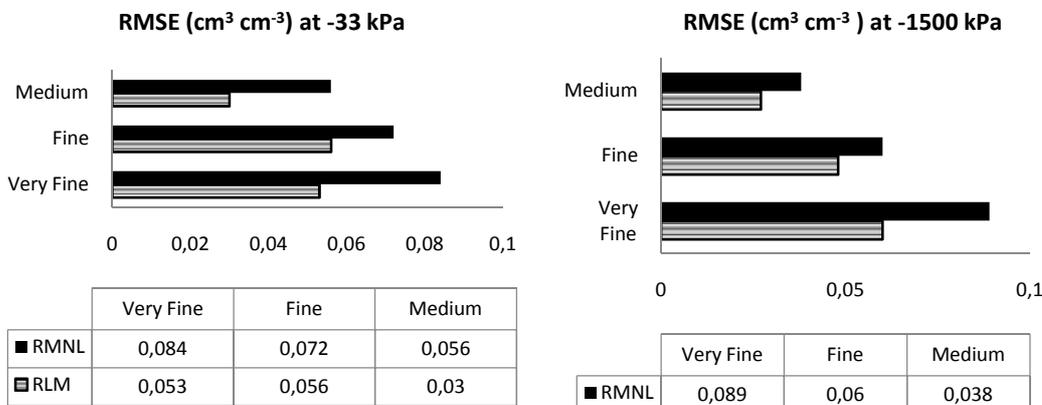


Figure 16. Valeurs d'erreur carrée moyenne (EMQ) calculées pour les différentes classes de textures

a) Texture

Après la stratification texturale, les FPTs points et paramétriques sont toujours sensibles principalement à la fraction de sable dans les classes fines et moyennes (tableau 19). La variation du premier S_i dans les FPTs point était significativement plus grande dans la classe de texture moyenne aux deux points de pression (-33 kPa et -1500 kPa). Dans la RMNL, le sable a eu le plus d'influence, notamment en ce qui concerne la classe fine (-40,9%, 18,9% à -33 kPa et 1500 kPa) et la classe moyenne (-16,7% à -1500 kPa).

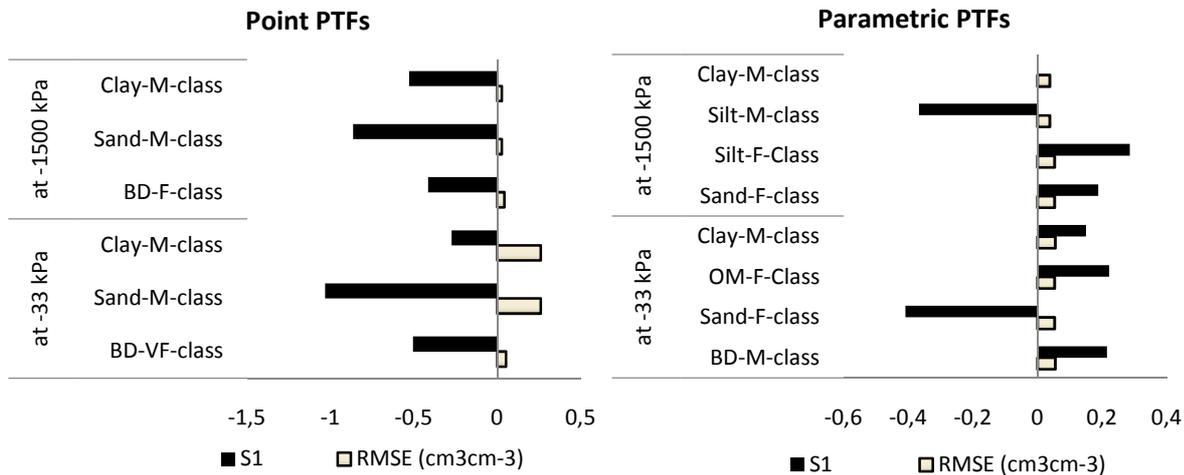


Figure 17. Variation de l'indice de première sensibilité avec EMQ après le groupement de textures

L'indice de sensibilité du premier ordre (S_i) quantifie l'influence de l'incertitude de chaque variable sur la sortie. Il indique la partie de variabilité de sortie expliquée par la variabilité des entrées. Après avoir calculé la variation de S_i , il a été confirmé que les FPTs développées sont encore plus influencées par la variabilité du sable à -33 kPa qu'à -1500 kPa. Cet impact s'explique par l'irrégularité de la dispersion de la teneur en sable dans la base de données de validation, avec un coefficient de variation (CV) d'environ 119 % par rapport aux autres variables d'entrée (33 %, 18 %, 9 % et 57 % pour l'argile, le limon, la Da et la MO, respectivement). Cette hétérogénéité dans la série de données du sable a clairement influencé l'incertitude de la réponse des FPTs.

En ce qui concerne la matrice de corrélation (tableau 20), les fractions d'argile et de limon sont significativement corrélées avec la teneur en sable. Saltelli et Tarantola (2002) ont observé que lorsque X_1 et X_2 étaient corrélés avec un troisième facteur X_3 , le S_i calculé dépendait de la force de cette corrélation ainsi que de la distribution de X_3 . Dans ce cas, l'influence de l'indice pourrait être influencée par cette association statistique car elle explique la valeur élevée de S_i du sable par rapport aux autres variables.

Tableau 20. Matrice de corrélation de Pearson entre les caractéristiques basiques du sol dans l'ensemble de données de validation de 53 échantillons de sol

Variabes	L (%)	S (%)	A (%)	Da (g.cm ⁻³)	MO (%)
L%	1				
S %	-0.334	1			
A %	-0.159	-0.878	1		
Da (g/cm3)	0.164	-0.185	0.11	1	
MO (g/100g)	-0.174	-0.166	0.263	-0.19	1

Les valeurs en caractères gras diffèrent de 0 à un niveau de signification $\alpha = 0,05$, L: limon, S:

sable, A: argile, Da: densité apparente, MO: matière organique

Nous avons observé que les FPTs points (RML) ont produit des erreurs d'estimation plus faibles lorsque la variation du premier ordre de S_i du sable est la plus importante (RML dans la classe moyenne: EMQ 0,030 cm³ cm⁻³, 0,027 cm³ cm⁻³ avec $V_{Si} = 103\%$ et $86,4\%$ à -33 kPa et -1500 kPa, respectivement). Une variation négative du S_i de la teneur en sable lorsque celle-ci a été fixée, et cela est apparent dans toutes les classes de texture (tableau 19). Ceci s'explique par la relation proportionnelle entre le sable et la teneur en argile, en particulier dans l'ensemble de données de validation avec une texture argileuse dominante. Une sensibilité insignifiante du sable a été enregistrée dans les textures très fines. Rawls et al. (2003) ont observé que 10 % de sable fournissaient une augmentation de la rétention en eau du sol à faible teneur en argile et une diminution de la rétention en eau à des sols dont la teneur en argile est supérieure à 50 %.

La relation entre les paramètres de la courbe de rétention en eau de Van Genuchten (en particulier n et α) et la distribution granulométrique a été examinée dans de nombreuses études (par exemple, Minasny et al., 2007, Benson et al., 2014) afin d'expliquer pourquoi l'impact du sable augmente dans les classes de texture fine après l'application des FPTs paramétriques. Cela s'explique par la présence prédominante du sable et de la teneur en argile comme intrants dans les FPTs paramétriques. Pour les sols ayant une teneur en argile comprise entre 35 % et 70 %, la teneur en eau est fortement influencée par le pourcentage du sable dans le sol (Loosvelt et al., 2013).

En outre, lorsque la teneur en sable d'un échantillon atteint 60 %, le taux de séchage du sol devient plus rapide et la capacité d'absorption d'eau sera plus faible. Lorsque la teneur en sable est faible à 20 %, les petits pores occupent une grande partie de la structure des pores, ce qui rend le sol compact (Hao et al., 2015).

Dans la classe de texture moyenne, il y avait une précision croissante pour les FPTs à -33 kPa après la fixation du contenu en argile. Cela s'explique par le pourcentage réduit d'argile dans la classe de texture moyenne (moyenne du pourcentage d'argile ($A\%$) = 23%), ce qui a entraîné moins d'erreurs à -33 kPa.

La qualité d'estimation des FPTs a diminué lorsqu'elles ont été appliquées à des échantillons de sol avec un contenu en argile > 60 % (figure 17). Dans la classe très fine, une sensibilité insignifiante a été enregistrée à toutes les pressions définies dans cette étude. Dans cette classe, la variation de l'argile était beaucoup plus faible car c'est la seule fraction solide dominante, ce qui pourrait expliquer la variation la plus faible de S_i après la fixation de ($A\%$). Le plus grand impact de l'argile ($A\%$) a été observé à -1500 kPa dans les FPT points et paramétriques dans différentes classes de textures (Figure 17). L'argile est un prédicteur majeur pour l'estimation du point de flétrissement permanent des sols (Minasny et al., 1999).

Le pourcentage de limon a été introduit comme variable explicative uniquement dans les FPTs paramétriques (RMNL). Cette fraction est connue par sa capacité à retenir l'eau à des potentiels d'eau de sol moyens et élevés. Les résultats de l'analyse de la sensibilité globale ont montré que le pourcentage de limon a un impact plus important sur l'estimation des FPTs paramétriques à -1500 kPa qu'à -33 kPa. Après la stratification texturale, une variation importante du premier ordre de S_i a été observée dans la classe texturale moyenne (-36,7% à -1500 kPa). Les valeurs les plus faibles ont été enregistrées dans la classe très fine. Il était clair que le pourcentage de limon ($L\%$) a un rôle important dans l'estimation des paramètres de VG (α , n), et que son utilisation comme entrée influence l'estimation dans les classes moyennes et fines.

Il y a une précision croissante enregistrée dans la classe fine à -1500 kPa. Avec le limon et l'argile comme intrants, une meilleure estimation est enregistrée. La variation de la teneur en eau disponible pour les plantes est plus liée au sable et au limon qu'aux teneurs en argile (Reichert et al., 2009).

b) Densité apparente

Il s'agit de la deuxième variable la plus influente sur la réponse des FPTs-RML dans toutes les classes de textures. La variation importante de l'indice de sensibilité est notée principalement dans la classe texturale très fine à -33 kPa ($V_{si} = -50, 5\%$). Dans les FPTs paramétriques, la Da a influencé la classe moyenne à -33 kPa. La précision de l'estimation est remarquée à -33 kPa dans la classe moyenne lors de la fixation de la Da pour les deux approches des FPTs développées (Tableau 19). La classe de texture très fine représentait 16 échantillons de surface (0 à 30 cm) avec une dominance de la texture argileuse. Dans une étude similaire sur les sols argileux, la teneur en eau volumique est fortement liée à l'inverse de la Da à la capacité au champ (Bruand et al., 1996). L'inclusion de la Da comme entrée fournit des informations sur le volume des pores, ce qui peut influencer la performance des FPTs lorsqu'elles sont appliquées sur des sols à forte teneur en argile.

En outre, l'information structurelle du sol caractérisée par des mesures de la Da est une mesure indirecte de l'espace des pores et est principalement affectée par la texture et la structure. Pour les sols sans structure, principalement des sols à texture grossière et moyenne, la distribution de la taille des pores peut être décrite de manière satisfaisante par la distribution de la taille des particules. La texture moyenne est liée en général à la distribution des pores, car les grandes particules donnent lieu à de gros pores entre elles et ont donc une influence majeure sur la courbe de rétention en eau (Arya et Paris, 1981; Nimmo, 2004). Avec la Da et la texture comme entrées dans les FPTs points (RML), les valeurs prédites obtenues sont très proches de celles mesurées.

c) Matière organique

La variation du Si liée au contenu en MO est presque négligeable après la stratification texturale. Cela pourrait s'expliquer, d'une part, par la faible teneur en MO dans les échantillons de sol algériens. Lal (1979) n'a trouvé aucun effet de la MO sur la rétention en eau. Danalatos et al. (1994) ont attribué cela à la teneur en MO qui était généralement faible dans leurs échantillons. D'autre part, l'homogénéité des données pour la MO dans chaque classe texturale a réduit la variation de la réponse FPT. La précision croissante des FPT paramétriques, cependant, était apparente pour les sols à texture moyenne à -33 kPa, où la MO est utilisée comme entrée pour prédire la teneur en eau saturée (θ_s). La rétention en eau à -33 kPa est plus fortement influencée par le carbone organique qu'à -1500 kPa (Rawls et al., 2003).

L'analyse de sensibilité réalisée par Rawls et al. (2003) pour étudier le rôle de la matière organique en tant que prédicteur, a montré que la rétention en eau des sols à texture grossière est beaucoup plus sensible aux changements de la teneur en carbone organique que dans les sols à texture fine. Bauer et Black (1981) ont constaté que l'effet du carbone organique sur la rétention en eau dans les échantillons perturbés était important dans les sols sableux et les sols à texture moyenne et fine.

Références

- 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.
- Aubert, G., 1978. *Méthodes d'analyses des sols*, Edit. C.R.D.P. Marseille, 189.
- Benson, C., Chiang, I., Chalermyanont, T., Sawangsurriya, A., 2014. Estimating Van Genuchten Parameters α and n for Clean Sands from Particle Size Distribution Data, *From Soil Behavior Fundamentals to Innovations in Geotechnical Engineering*, 410-427.
- Botula, Y. D., Van Ranst, E., Cornelis, W.M., 2014. Pedotransfer functions to predict water retention of soils from the humid tropics: a review, *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 38, 679-698.
- Bruand, A., Duval, O., Gaillard, H., Darthout, R., 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., Perez-Fernandez, P., Duval, O., Quetin, P., Nicoullaud, B., Gaillard, H., Raison, L., Pessaud, J.F. and Prud'homme, L., 2002. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols: utilisation de classe de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale. *Etud. Gest. Sols*, 9:105-125.
- Chastaing, G., Gamboa, F., Prieur, C., 2011. Generalized Hoeffding-Sobol Decomposition for Dependent Variables - Application to Sensitivity Analysis. *Electronic Journal of Statistics*, 0 (0000), 1935-7524, DOI: 10.1214/1549578041000000000.
- Danalatos, N.G., Kosmas, C.S., Driessen, P.M., Yassoglou, N., 1994. Estimation of the draining soil moisture characteristics from standard data as recorded in soil surveys. *Geoderma*, 64, 155 – 165.
- Deng, H.L., Ye, M., Schaap, M.G., Khaleel, R., 2009. Quantification of uncertainty in pedotransfer function-based parameter estimation for unsaturated flow modeling. *Water Resour. Res.*, 45, W04409.
- Ghanbarian-Alavijeh, B., Liaghat, A.M., 2009. Evaluation of soil texture data for estimating soil water retention curve, *Can. J. Soil Sci.*, 89, 461–471.
- Ghanbarian-Alavijeh, B., Liaghat, A., Huang, G.H., Van Genuchten, M.Th., 2010. Estimation of the Van Genuchten soil water retention properties from soil textural data. *Pedosphere*, 20(4), 456–465.
- Ghorbani Dashtaki, S., Homaei, M., Khodaverdiloo, H., 2010. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use Manage.*, 26, 68-74.
- Grunwald, S.; McSweeney, K.; Rooney, D.J.; Lowery, B., 2001. Soil layer models created with profile cone penetrometer data. *Geoderma*, (103), 181-201.
- Hao, D.R., Liao, H.J., Ning, C.M., and Shan, X.P., 2015. The microstructure and soil water characteristic of unsaturated loess. *Unsaturated Soil Mechanics - from Theory to Practice*, Proceedings of the 6th Asia Pacific Conference on Unsaturated Soils (Guilin, China, 23-26 October 2015), Edited by Zhenghan Chen, Changfu Wei, De'an Sun, and Xongfu Xu, 163–167, DOI: 10.1201/b19248-22.
- Jacques, J., Lavergne, C., Devictor, N., 2004. Sensitivity analysis in presence of model uncertainty and correlated inputs. In *Proceedings of SAMO2004*.
- Jacques, J., Lavergne, C., Devictor, N., 2006. Sensitivity analysis in presence of model uncertainty and correlated inputs. *Reliability Engineering & System Safety*, 91, 1126–1134.
- Jonasson, S.A., 1992. Estimation of the Van Genuchten parameters from grain-size distribution. p. 443-451. In M. Th. Van Genuchten et al. (ed.) *Proc. of the Int. Workshop Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*, Riverside, CA. 11-13 Oct. 1989, Univ. of California, Riverside.
- Kay, B.D., da Silva, A.P., Baldock, J.A., 1997. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: predictions using pedotransfer functions. *Can. J. Soil Sci.*, 77, 655–667.
- Khodaverdiloo, H., Homaei, M., Van Genuchten, M.Th., Dashtaki, S.G., 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *J. Hydrol.*, 399, 93–99.
- Lal, R., 1979. Physical properties and moisture retention characteristics of some Nigerian soils. *Geoderma* 21, 209 – 223.
- Lin H.S., McInnes K.J., Wilding L.P., Hallmark C.T., 1999. Effects of soil morphology on hydraulic properties: II. Hydraulic pedotransfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 955–961.
- Loosvelt, L., Vernieuwe, H., Pauwels, V.R.N., De Baets, B., Verhoest, N.E.C., 2013. Local sensitivity analysis for compositional data with application to soil texture in hydrologic modelling, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 461–478.

- Mayr, T., Jarvis, N.J., 1999. Pedotransfer functions to estimate soil water retention parameters for a modified Brooks-Corey type model. *Geoderma*, 91, 1–9.
- Minasny, B. and McBratney, A.B., 2007. Estimating the water retention shape parameter from sand and clay content. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71, 1105–1110.
- Minasny, B., A.B. McBratney, A.B., 2002. Uncertainty analysis for pedotransfer functions. *Eur. J. Soil Sci.*, 53, 417-429.
- Minasny, B., McBratney, A.B., Bristow, K., 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer function for water-retention curves. *Geoderma*, 93(3–4), 225–253.
- Mirus, B.B., 2015. Evaluating the importance of characterizing soil structure and horizons in parameterizing a hydrologic process model. *Hydrological Processes*, 29(21), 4611-4623.
- Moeys, J., Larsbo, M., Bergström, L., Brown, C.D., Coquet, Y., Jarvis, N.J., 2012. Functional test of pedotransfer functions to predict water flow and solute transport with the dual-permeability model MACRO. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(7), 2069-2083.
- Nemes, A., Rawls, W.J., Pachepsky, Y.A., Van Genuchten, M.T., 2006b. Sensitivity analysis of the nonparametric nearest neighbor technique to estimate soil water retention. *Vadose Zone J.* 5 (4), 1222–1235.
- Nemes, A., Schaap, M.G., Wösten, J.H.M.: Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67, 1093–1102, 2003.
- Nimmo, J.R., 2004. Porosity and Pore Size Distribution. In Hillel, D., ed. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, London, Elsevier, 3, 295-303.
- Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J., Timlin, D.J., 1999. The current status of pedotransfer functions: Their accuracy, reliability, and utility in field and regional-scale modeling. In *Assessment of Non-point Source Pollution in the Vadose Zone*, Geophys. Monogr, Ser., vol. 108, edited by D. L. Corwin, K. Loague, and T. R. Ellsworth, 223-234, AGU, Washington, D. C.
- Pachepsky, Y.A., Timlin, D., Varallyay, G., 1996. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60(3), 727 – 733.
- Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J., 2003. Soil structure and pedotransfer function. *Eur. J. Soil Sci.* (54), 443-452.
- Rawls, W., Pachepsky, Y., Ritchie, J., 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116, 61–76.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. p. 293–299. In E.B. Jones and T.J. Ward (ed.) *Proc. Symp. Water shed Management in the Eighties*, Denver, CO. 30 Apr.–1 May 1985, Am. Soc. Civil Eng., New York.
- Rawls, W.J., Pachepsky Y.A., Shen, M.H., 2001. Testing soil water retention estimation with the MUUF pedotransfer model using data from the southern United States. *Journal of Hydrology*, 251, 177-185.
- Rawls, W.J.; gish, T.J., Brakensiek, D.L., 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Adv. Soil Sci.*, 16, 213-234.
- Reichert, J.M., Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.J., Horn, R., Håkansson, I., 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Tillage Res.*, 102, 242–254.
- Richards, L.A., 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soils. *Soil Sci.*, 66, 105–110.
- Robinson, G.W., 1922. A new method for the mechanical analysis of soils and other dispersions. *J. Agric. Sci.*, 12.
- Saltelli A., Tarantola, S., 2001. On the relative importance of input factor in mathematical models. Revised for *Journal of American Statistical Association*.
- Saltelli, A., aTarantola, S., 2002. On the Relative Importance of Input Factors in Mathematical Models. *Journal of the American Statistical Association*, 97(459), 702-709.
- Saltelli, A., Chan, K., 2000. *Sensitivity Analysis*, Scott M. (Eds), John Wiley and Sons publishers, Probability and Statistics Series.
- Saxton, K.E., Rawls, W.L., Rosenberger, J.S., Papendick, R.I., 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50, 1031-1036.
- Schaap, M.G., F.J. Leij., 1998b. Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. *Soil Tillage Res.*, 47, 37–42.
- Schaap, M.G., Leij, F.J., Van Genuchten, M.Th., 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.*, 251, 163–176.
- Sobol, I.M., 1990. On sensitivity estimation for nonlinear mathematical models, *Matematicheskoe Modelirovanie* (in Russian), translated in: *Math. Model. Comput.*, 2(1), 112-118.

- Stumpff, C., Engelhardt, S., Hofmann, M., Huwe, B., 2009. Evaluation of Pedotransfer Functions for Estimating Soil Hydraulic Properties of Prevalent Soils in a Catchment of the Bavarian Alps. *European Journal of Forest Research*, 128(6), 609-620.
- Tae-Kyu Lee, Hee-Myong Ro., 2014. Estimating soil water retention function from its particle-size distribution. *Geosciences Journal*, 18 (2), 219-230.
- Tomasella, J., Pachepsky, Y.A., Crestana, S., Rawls, W.J., 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67 1085–1092.
- Tomasella, J.; Hodnett, M.G. & Rossato, L., 2000. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:327- 338.
- Touil S., Degré A., Chabaca M.N., 2016. Transposability of pedotransfer functions for estimating water retention of Algerian soils. *Desalination and Water Treatment*, 57(12), 5232-5240.
- Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- Van Genuchten, M.Th., Leij, F.J., and Yates, S.R., 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Report No. EPA/600/2-91/065. R. S. Kerr Environmental Research Laboratory, U. S. Environmental Protection Agency, Ada, OK, 85.
- Van Genuchten, M.Th., Leij, F.J., Lund, L.J. (ed.), 1992. Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. U.S. Salinity Lab., Riverside, CA.
- Vereecken, H., Diels, J., Vanorshoven, J., Feyen, J., Bouma, J., 1992. Functional evaluation of pedotransfer functions for the estimation on of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 1371–1378.
- Vereecken, H., Feyen, J., Maes, J., Darius, P., 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Sci*, 148, 389-403.
- Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M.G., Van Genuchten, M.Th., 2010. Using pedotransfer functions to estimate the Van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: A review. *Vadose Zone J.*, 9, 795-820.
- Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituent. *Soil Sci*, 63, 251-263.
- Willmott, C.J, Wicks, D.E., 1980. An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. *Physical Geography*, 1, 59–73.
- Willmott, C.J., 1981. On the validation of models. *Physical Geography*, 2, 184–194.
- Winfield, K.A., Nimmo, J.R., Izbicki, J.A., Martin, P.M., 2006. Structural Influences on Water-Retention Properties of Alluvial Deposits. *Vadose Zone Journal*, (5), 706-719.
- Wösten, J.H.M., Finke, P.A., Jansen, M.J.W., 1995. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. *Geoderma*, 66, 227–237.
- Wosten, J.H.M., 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, J.H.M., Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J., 2001. Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol*, 251, 123–150.
- Xu Yang and Xueyi You., 2013. Estimating Parameters of Van Genuchten Model for Soil Water Retention Curve by Intelligent Algorithms. *Appl. Math. Inf. Sci.*, 7 (5), 1977-1983.

*Impact de l'irrigation par les eaux usées épurées sur la
courbe de rétention en eau*

4.3. Impact de l'irrigation par les eaux usées épurées sur la courbe de rétention en eau

Introduction

L'Algérie est un pays semi-aride, voire aride (200 à 400 mm de précipitations annuelles) et les ressources en eau sont faibles, irrégulièrement distribuées dans le temps comme dans l'espace, la bande côtière recevant davantage de précipitations (Kettab, 2001). Les ressources en eaux conventionnelles sont limitées. Les potentialités hydriques naturelles de l'Algérie sont estimées actuellement à 18 milliards de m³ par an (Mozas et Ghosn, 2013). L'irrigation occupe une place importante dans la consommation d'eau (62 % de la demande totale du pays). Déjà limitées, ces ressources seront vraisemblablement insuffisantes pour les décennies à venir du fait de l'accroissement de la population, du développement de l'industrie, de l'essor de l'agriculture irriguée et des effets du réchauffement climatique.

Comme beaucoup d'autres pays, l'Algérie explore différentes alternatives pour diversifier ses ressources en eaux non conventionnelles : développement d'infrastructures de dessalement d'eau de mer pour la consommation en eau potable sur les zones côtières, utilisation des eaux saumâtres en irrigation, exploitation des eaux usées épurées (EUE) pour l'irrigation des terres agricoles et pour l'industrie, recharge artificielle des nappes par les eaux de crues et les eaux usées épurées.

La réutilisation des EUE en irrigation est une pratique très répandue dans les régions du monde affectées par les pénuries d'eau, en particulier dans les régions arides et semi-arides. La pénurie d'eau d'irrigation transforme les eaux usées traitées en une source attrayante d'eau pour l'agriculture irriguée (Pescod., 1992, Hamilton et al., 2007). Au niveau mondial, environ 20 millions d'hectares de terres ont été irrigués avec des eaux usées épurées et la quantité augmentera considérablement au cours des prochaines décennies à mesure que le stress hydrique s'intensifiera (Chen et al., 2013c). Son importance continuera d'augmenter avec la réduction de la disponibilité de l'eau douce et l'augmentation des contraintes hydriques sévères dans les régions méditerranéennes (Schacht et al., 2014). Cependant, en raison de l'origine et la composition de cette eau, sa réutilisation devrait être gérée d'une manière rationnelle et contrôlée dans un objectif de maîtriser et de minimiser les risques sanitaires et environnementaux liés à cette pratique. Avant l'application des eaux usées épurées sur les terres agricoles, il faut respecter les normes de qualification après traitement pour des paramètres tels que la conductivité électrique (CE) et le taux d'adsorption de sodium (SAR). Les matières en suspension et la matière organique sont également d'autres paramètres qui pourraient être pris en compte (Abedi-Koupai et al., 2006).

L'irrigation par les EUE peut influencer les paramètres physicochimiques et microbiologiques du sol (Singh et Agrawal, 2012) tels que sa rétention en eau (Aiello et al., 2007, Taghvaian et al., 2008) et sa structure. Les activités biochimiques au niveau de la rhizosphère peuvent être aussi influencées par des facteurs spécifiques relatifs à la composition des EUE, comme les apports d'éléments minéraux tels que les ETM (Éléments Traces Métalliques), microorganismes, de la matière organique et de grandes concentrations en sels solubles qui peuvent conduire à des niveaux de salinité du sol intolérables pour la plupart des plantes ou des cultures de paysage, en particulier dans les sols lourds (Chen et al. 2013a, Chen et al. 2013b, Lyu et Chen, 2016, Kaboosi, 2016). « L'un des principaux problèmes associés à l'irrigation au moyen d'EUE est l'augmentation de sodium (Na²⁺) échangeable dans le sol, car il est présent en concentrations élevées dans les eaux usées (Hayes et al., 1990, Papadopoulos et Stylianou, 1991, Magesan et al. 1999, Jnad et al., 2001) » (Oliveira et al., 2016).

Sepaskhah et al (2010) ont expliqué que la réduction de la conductivité hydraulique se produit principalement dans la profondeur du sol de 0-50 mm en raison de l'application des eaux usées. Tarchouna et al (2010) ont conclu que la conductivité hydraulique a significativement diminué dans un sol à texture sableuse irriguée par les EUE à long terme, mais elle est restée suffisante pour réduire la salinisation du sol. Guy (2011) a montré que les risques probables de changements défavorables dans la stabilité structurale des sols et de leurs propriétés hydrauliques suite à l'irrigation avec les EUE peuvent provenir des niveaux élevés de la matière organique dissoute, de solides en suspension, de taux d'adsorption de sodium et de salinité dans les EUE. Bedbabis et al (2013) ont observé une diminution significative du pH, du taux d'infiltration et une augmentation significative de la MO, du SAR et de la CE dans des sols soumis à l'irrigation par les EUE après quatre ans. Dans le même contexte, Assouline et al (2011, 2013) ont montré que l'irrigation par les EUE à

long terme affecte la structure et les propriétés hydrauliques du sol, notamment la rétention en eau et la conductivité hydraulique à cause de l'augmentation du pourcentage de sodium échangeable. Bardhan et al (2016) ont montré que les EUE affectent la porosité structurale via le rétrécissement des macros et mésopores (> 70 et 30-70 μm , respectivement). Paudel et al (2016) ont montré que les EUE contiennent des concentrations élevées de composants salins et des particules organiques et inorganiques en suspension par rapport à l'eau douce, ce qui peut entraîner une dégradation de la structure du sol et réduire la conductivité hydraulique, augmenter le potentiel osmotique, réduire l'aération et la croissance racinaire.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail pour étudier l'impact de l'irrigation par les EUE sur la courbe de rétention en eau du sol dans des parcelles ayant été soumises à ce type d'irrigation sur des périodes de 8 et 13 ans, situées dans la wilaya de Boumerdes.

L'étude comporte :

- Une évaluation physicochimique des sols ;
- Une évaluation de l'impact de la réutilisation des EUE sur la courbe de rétention en eau des sols.

4.3.1. Caractérisation physicochimique des sols irrigués par les EUE

Pour l'étude physico-chimique des sols, les échantillons ont été prélevés d'une manière systématique à la tarière dans les trois parcelles (P1 : irriguée par les EUE pendant 8 ans, P2 : irriguée par les EUE pendant 13 ans, PT : témoin irriguée par l'eau de forage) aux profondeurs de H1 : 0-20cm, H2 : 20-40cm et H3 : 40-60 cm. Quant à la granulométrie, les prélèvements réalisés sur les parcelles montrent que les sols ont la même texture. L'analyse décrit la dominance des sables et des limons, alors que les argiles sont faibles ; d'après le triangle de texture, on définit que la texture est sablo-limoneuse. Dans cette partie, nous nous contenterons de présenter les résultats à la profondeur 0-20cm uniquement (Tableau 21). Les mesures de la densité apparente montrent qu'il n'y a pas de différence majeure entre les trois profondeurs du point de vue densité apparente.

Afin d'évaluer l'effet de l'irrigation par des EUE sur les propriétés chimiques des sols, les résultats des analyses dans des parcelles étudiées seront présentés et discutés ci-dessous dans la partie résultats et discussions.

Tableau 21. Propriétés physiques des sols des trois parcelles étudiées

Origines des sols	Granulométrie (%)			Densité apparente (g.cm^3)
	Sable (%)	Limón (%)	Argile (%)	
Parcelle P1	48	30	16	1,45
Parcelle P2	50	28	17	1,45
Parcelle témoin PT	45	33	17	1,40

4.3.2. Analyse statistique des données

Dans cette étude, l'analyse de la variance (ANOVA) à deux facteurs est utilisée. Nous cherchons à déterminer s'il existe une différence significative entre les différentes parcelles et, si tel est le cas, quelle est la parcelle la plus influencée par l'irrigation avec les eaux usées épurées. Pour comparer l'effet des EUE sur la rétention en eau du sol, des comparaisons multiples par paires ont été effectuées à la suite d'ANOVA à deux facteurs. Cette procédure a été utilisée pour séparer les moyennes de ces retentions en eau du sol aux niveaux alpha de 0,05, 0,01 et 0,001 en utilisant le test de Tukey (HSD). Ce test post-hoc (ou test de comparaisons multiples) peut être utilisé pour déterminer les différences significatives entre les moyennes de groupes dans une analyse de variance.

4.3.3. Résultats et discussions

4.3.3.1. Caractérisation physico-chimique des sols

Les résultats de la caractérisation physico-chimique des horizons des sols étudiés sont portés dans le tableau 22.

Tableau 22. Caractérisation physico-chimique des sols irrigués et témoin

Parcelle	Prof (cm)	pH-eau	pH-KCl	CaCO ₃ T %	MO %
P1	0-20	6,70	6,49	0,17	2,17
	20-40	6,83	6,60	0,17	0,72
	40-60	6,73	6,50	0,17	1,38
P2	0-20	6,66	6,03	0,17	1,31
	20-40	6,50	5,88	00	0,55
	40-60	6,38	5,80	00	0,26
PT	0-20	6,92	6,45	0,17	1,29
	20-40	6,75	6,25	0,17	1,93
	40-60	6,71	6,17	00	0,88

CaCO₃ T% : Calcaire total ; MO : Matière organique

4.3.3.2. Calcaire total et pH du sol

Les résultats des analyses montrent que le taux de calcaire total (CaCO₃ T) est très faible dans les trois horizons. Ce taux concorde avec l'absence d'effervescence au HCl et indique le caractère non calcaire des sols étudiés.

Les valeurs du pH-eau indiquent une légère acidité des sols. A l'échelle des profils pédologiques, on constate que les valeurs du pH-eau sont du même ordre de grandeur et ne varient pas significativement avec la profondeur (tableau 22). En revanche, au niveau du premier horizon (0 – 20cm), le pH-eau est plus faible dans les échantillons prélevés dans le sol irrigué par les EUE que dans le sol de la parcelle témoin.

Les valeurs du pH-KCl indiquent également une légère tendance à l'acidité des sols. Dans le premier niveau, il est de 6.45 dans la parcelle témoin et varie entre 6.03 et 6.49 dans les parcelles P1 et P2 respectivement. Dans le deuxième niveau, la parcelle témoin indique un pH-KCl de 6.25, les parcelles P1 et P2 indiquent des valeurs de 5.88 et 6.25 respectivement. Enfin, le dernier niveau de profondeur du sol témoin indique la valeur la plus faible de 6.17 tandis que les valeurs des parcelles P1 et P2 sont comprises entre 5.80 et 6.50, respectivement.

4.3.3.3. Effet de l'irrigation par les EUE sur la salinité du sol

Pour étudier l'évolution de la salinité du sol, nous avons procédé à l'analyse de la conductivité électrique de la pâte saturée du sol (CEe).

L'examen de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée des sols (CEe) montre que les sols étudiés ont une faible salinité, ainsi, la CEe mesurée n'atteint pas la barre de 4 mS/cm (4 mmhos/cm). En effet, les sols présentant une CEe voisine de 4 mS/cm sont considérés comme sols modérément salés (Tedeschi, et al., 2005).

La salinité varie entre 0,94 et 1,93 mmhos/cm dans le niveau 0-20 cm et 1,16 mmhos/cm dans le sol témoin, entre 0,84 et 1,4 mmhos/cm dans le second niveau 20-40 cm et 1,13 mmhos/cm dans le témoin et entre 1,16 et 2,81 mmhos/cm dans le niveau de 40-60 cm, contre 0,61 mmhos/cm dans le sol témoin.

En comparant les résultats des trois parcelles, on remarque que la conductivité électrique du sol irrigué par les EUE pendant 8 ans a augmenté de 0,77 mmhos/cm de différence dans le premier niveau, tandis que la valeur la plus faible est constatée dans la parcelle P2 (irriguée pendant 13 ans par les EUE) (Figure 18). L'irrigation par des EUE à court terme a entraîné une légère augmentation de la salinité dans l'horizon 0-20 cm. Kaboosi (2016) montre que, par rapport à l'eau conventionnelle, l'utilisation des eaux usées épurées pendant 8 ans a provoqué une légère augmentation de la salinité du sol. L'augmentation de la salinité du sol irrigué est due essentiellement à la qualité des EUE chargées en sels.

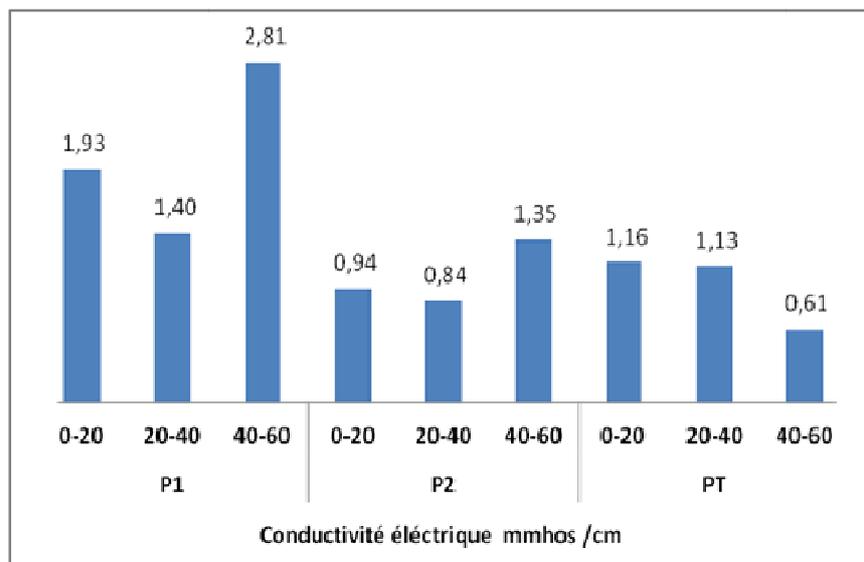


Figure 18. Variation de la conductivité électrique dans les parcelles étudiées

4.3.3.4. Matière organique

Dans les parcelles étudiées le taux maximum en matières organiques (2,17 %) est détecté dans le niveau de surface de la parcelle P1 (tableau 22). D'une manière générale, les teneurs les plus élevées ont été rencontrées dans le premier niveau (0-20 cm) pour les trois sols. On remarque également que les teneurs en MO du sol diminuent avec la profondeur, sauf pour la parcelle (P2) où la teneur en matière organique semble très élevée dans le second niveau de profondeur (40 – 60cm).

En revanche, le taux de MO détecté dans le sol témoin non irrigué est de l'ordre de 1,94 %. On remarque toutefois que pour certains points d'échantillonnage, les teneurs en MO sont moins importantes que celles enregistrées dans le sol témoin. La valeur la plus élevée est enregistrée dans le niveau 0-20 cm du sol irrigué pendant 8 ans par les EUE.

En effet, l'irrigation avec les EUE n'entraîne pas de façon systématique une accumulation de matière organique dans le sol et le phénomène inverse peut même être observé. Suite à leur richesse en éléments fertilisants et en oligoéléments, les EUE stimulent l'activité microbologique du sol (Magesan, et al., 2000, Ramirez-Fuentes, et al., 2002), favorisant ainsi la minéralisation du carbone organique du sol, lorsque les conditions sont favorables, ce qui entraîne une baisse du taux de la MO dans le sol (Solis, et al., 2005, Da Fonseca et al., 2007).

4.3.3.5. Impact de l'irrigation par les EUE sur la courbe de rétention en eau du sol (CRES)

Les rétentions en eau aux potentiels 1 - 4 - 7 - 10 - 30 - 70 - 100 - 500 - 1500 (kPa) ont été déterminées afin de caractériser les courbes de rétention des trois sols P1, P2 et PT (Figure 19)

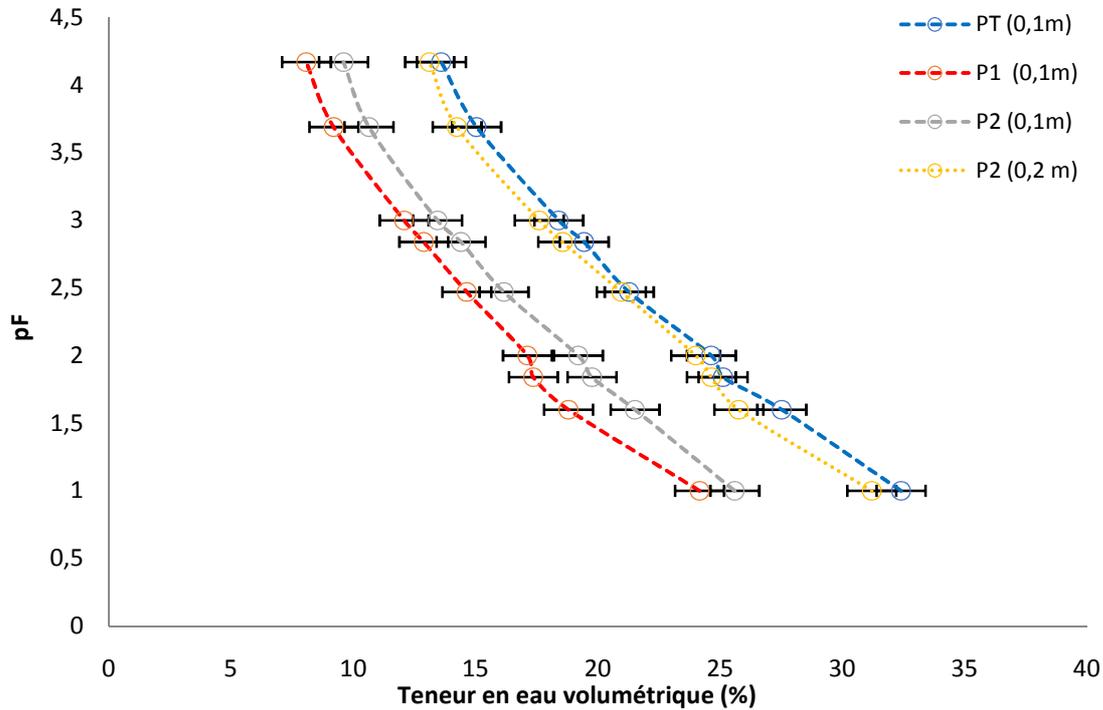


Figure 19. Courbes de rétention mesurées par la méthode de Richards (1948) pour les parcelles d'étude d'impact des EUE (P1, P2) et la parcelle témoin.

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) à deux facteurs accordent les allures des courbes de retentions en eau (figure 19), et indiquent qu'il existe une différence très hautement significative ($p < 0,001$) entre les parcelles en matière de capacité de retentions en eau (tableau 23).

L'analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% des parcelles deux à deux faites par le test du Tukey (HSD) montre une haute signification entre la parcelle PT et la parcelle P1 (0,10 m), P2 (0,10 m). La même tendance est remarquée entre P1 (0,10 m), P2 (0,20 m). Cependant aucune signification n'est enregistrée entre PT et P2 (0,20 m). L'ordre de croissance de la différence entre les parcelles est présenté dans le tableau 23.

Tableau 23. Résultats de l'analyse de la variance Type I (Sum of Squares)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Parcelles	3	311,240	103,747	16,830	< 0,0001***
Succion (kPa)	2	839,367	419,683	68,082	< 0,0001***

Codes de signification : '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05

Tableau 24. Analyse du test du Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95 %

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
PT vs P1	6,749	5,540	2,759	< 0,0001	Oui
P2 (0,2) vs P1	5,973	4,903	2,759	0,000	Oui
PT vs P2 (0,1)	5,047	4,143	2,759	0,002	Oui
P2 (0,2) vs P2 (0,1)	4,271	3,506	2,759	0,009	Oui
P2 (0,1) vs P1	1,702	1,397	2,759	0,513	Non
PT vs P2 (0,2)	0,776	0,637	2,759	0,919	Non

Valeur critique du Tukey = 3,901

L'utilisation des EUE à court terme (P1 : 8 ans) a causé une réduction à une moyenne de 33 % de la capacité du sol à retenir l'eau à 10 cm de profondeur par rapport à la parcelle témoin (PT). En effet, à long terme (P2: 13 ans), la réduction de cette capacité est moins importante par rapport à P1 (8 ans) à une moyenne de 24 % (figure 20). Cela peut être expliqué d'une part par le rôle de la densité du système racinaire de la vigne de 13 ans à cette profondeur qui se développe bien tout autour du bulbe humide du goutteur par rapport à la vigne de 8 ans. Les racines jouent un rôle primordial dans l'amélioration de la structure du sol et dans la stabilité structurale.

Keith et al., (2015) suggèrent que les sols influencés par les racines (sols de la rhizosphère) sont moins poreux en raison de l'agrégation accrue. D'autres part, la présence élevée des sels et des composants organiques accumulés dans l'horizon 0-20 cm est due à l'utilisation des EUE (figure 19). En effet, ces concentrations peuvent avoir des effets potentiellement négatifs sur la qualité du sol, comme la réduction de la conductivité hydraulique (K(h)) et la stabilité de l'agrégat du sol notamment dans la couche supérieure de 10 cm d'un sol limoneux (Schacht et Marschner 2015).

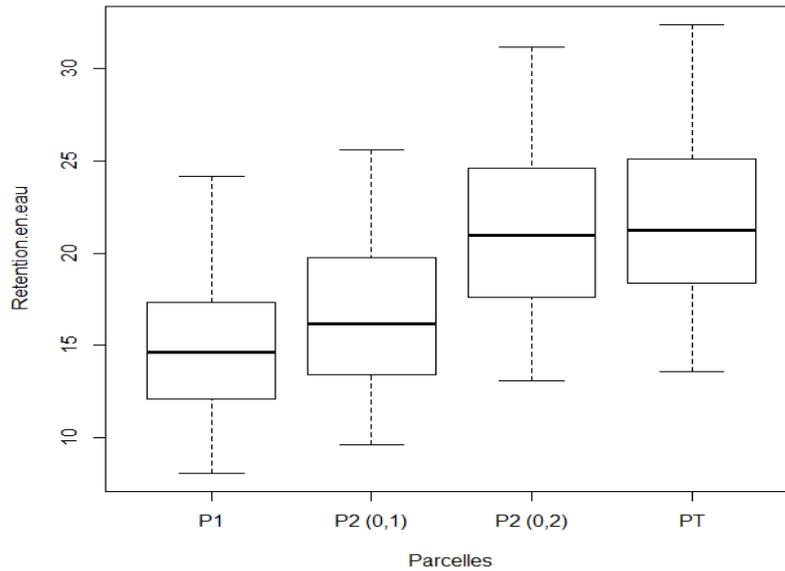


Figure 20. Variation de la réserve utile des parcelles étudiées

L’impact des EUE devient plus important dans les très hautes pressions de succion (VHP > 100 kPa) et les hautes pressions de succion (HP : 1-100 kPa) dans les deux parcelles irriguées par les EUE (Figure 20). A moyen terme (P1, 8 ans), l’impact le plus important dans la couche supérieure (0-10 cm) apparaît dans les gammes de pression 0-100 kPa (Figure 21-a), tandis qu’à long terme (P2, 13 ans), la réduction de la capacité de la rétention en eau est beaucoup plus nette dans les VHP pressions de succion (Figure 21-b).

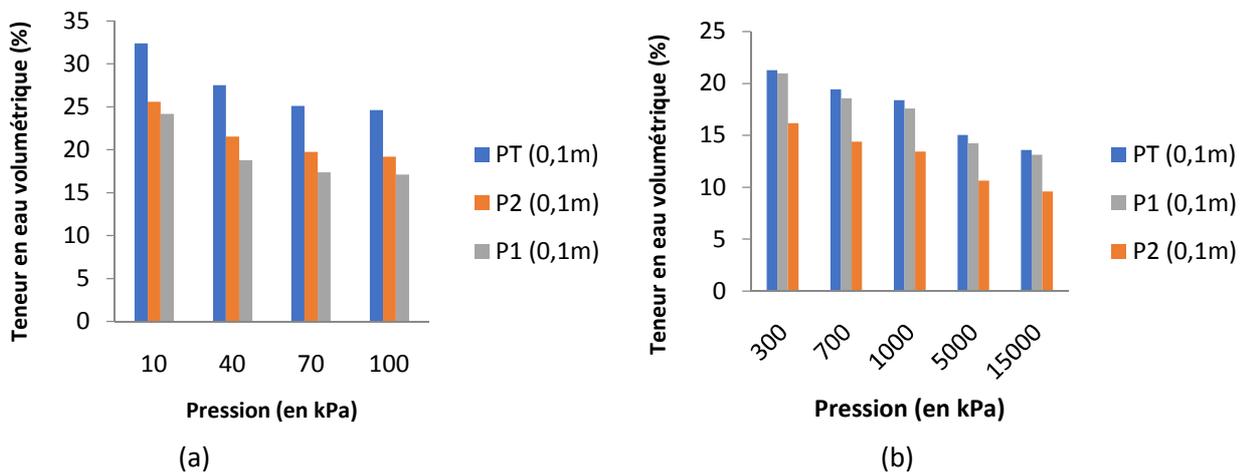


Figure 21. Variation de la rétention en eau dans les parcelles étudiées

(a)Variation de la rétention en eau dans HP (0-100 kPa);(b)Variation de la rétention en eau VHP (> 100kPa)

A long terme, l’irrigation avec des EUE a induit deux impacts sur les courbes de rétention en eau. La courbe de la couche (0-10 cm) irriguée par les EUE pour les parcelles P1 et P2 montre moins de capacités de rétention d’eau et indique que la couche supérieure du sol retient moins l’eau que quand elle est irriguée par l’eau de forage. D’autre part, les résultats de la couche de 10 - 20 cm dans la parcelle P2révèlent une plus grande capacité de rétention d’eau. Cela, pourrait s’agir de l’effet de la profondeur.

Les effets opposés de l'application des EUE sur les couches 0-10 et 10-20 cm pourraient être dus à l'augmentation du rayon des pores moyens pour la couche supérieure alors qu'il diminue pour la couche 10-20 cm où l'impact est plus faible, cela suggère que des facteurs supplémentaires qui influencent les propriétés de la rétention en eau du sol, tels que la dimension et la connectivité des pores et le colmatage des pores, pourraient également être affectés (Assouline et al., 2011).

Les EUE présentent une salinité acceptable pour l'irrigation agricole mais nous avons constaté que ces eaux ont entraîné, à moyen terme, une légère augmentation de la salinité dans les horizons de surface du sol. Afin d'éviter les risques de salinisation des sols, les EUE utilisées doivent être surveillées régulièrement et les normes de réutilisation doivent être respectées. L'application d'insecticides ou de fongicides doit être menée d'une manière raisonnable et selon les normes et règles spécifiques afin de protéger le sol. Par conséquent, des études complémentaires sont recommandées pour améliorer la qualité de l'eau d'irrigation spécifique aux sites étudiés et la gestion de la lixiviation, ce qui semble crucial pour éviter une détérioration de la qualité du sol en raison de l'irrigation avec les EUE, particulièrement si cette pratique se généralise dans le contexte de la raréfaction des ressources.

4.3.4. Conclusion

La demande croissante des eaux conventionnelles, le manque, et l'irrégularité des précipitations transforment les eaux usées épurées (EUE) en une source d'eau attrayante pour l'agriculture irriguée en Algérie. L'objectif principal de cette étude visait à évaluer l'impact de 8 et 13 ans d'irrigation avec les EUE sur la courbe de la rétention en eau des sols deux parcelles à Boumerdes, comparé à l'utilisation de l'eau conventionnelle dans une troisième parcelle. Il a été également abordé une évaluation de cet impact sur les propriétés physico-chimiques des sols étudiés dans les couches de 0-20, 20-40 et 40-60 cm.

Les EUE présentent une salinité acceptable pour l'irrigation agricole, cependant leur réutilisation à long et moyen terme a entraîné une augmentation de la salinité dans les horizons de surface des sols étudiées.

Les sols des parcelles étudiées sont très pauvres en matière organique. Les teneurs les plus élevées de la MO rencontrées dans les niveaux superficiels suggèrent une accumulation de la matière organique suite à l'irrigation par les EUE.

Nous avons également étudié l'influence de la qualité de l'eau d'irrigation à différentes profondeurs de sol. En comparaison avec les résultats observés sur la parcelle irriguée par l'eau de forage, la capacité de rétention en eau des parcelles irriguées par les EUE est réduite dans les couches supérieures (0 à 10cm) mais devient plus importante dans les couches (10 à 20cm).

L'utilisation des EUE a causé une réduction à une moyenne de 33 % et 24 % de la capacité du sol à retenir l'eau par rapport à la parcelle témoin (PT) à 10 cm

Références

- Abedi-Koupai J., Mostafazadeh-Fard B., Afyuni M., Bagheri M.R., 2006. Effect of treated wastewater on soil chemical and physical properties in an arid region, *Plant Soil Environ.*, 52, 335–344.
- Aiello R., Cirelli G.L., Consoli S., 2007. Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil and tomato fruits: a case study in Sicily (Italy). *Agric Water Manag* 93:65–72.
- André Musy ([cours], Laboratoire d'Hydrologie et Aménagements (HYDRAM), Institut des Sciences et Technologies de l'Environnement (ISTE), Ecole Polytechnique Fédérale (EPFL), 2005), *Hydrologie Générale*. <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/>.
- Assouline, S., and Narkis K., 2011. Effects of long-term irrigation with treated wastewater on the hydraulic properties of a clayey soil, *Water Resour. Res.*, 47, W08530, doi:10.1029/2011WR010498.
- Assouline, S., Narkis, K., 2013. Effect of Long-Term Irrigation with Treated Wastewater on the Root Zone Environment. *Vadose Zone Journal*. 12. . 10.2136/vzj2012.0216.
- Bardhan, G., Russo, D., Goldstein, D., Guy, L., 2016. Changes in the hydraulic properties of a clay soil under long-term irrigation with treated wastewater. *Geoderma*. 264. 1-9. 10.1016/j.geoderma.2015.10.004.
- Bedbabis, S., & Rouina, Bechir & Boukhris, Makki & Ferrara, Giuseppe. 2013. Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate. *Journal of environmental management*. 133C. 45-50. 10.1016/j.jenvman.2013.11.007.
- Bond WJ. Effluent irrigation – an environmental challenge for soil science. *Aust J Soil Res*. 1998;36:543-55. doi:10.1071/S98017.
- Chen W., Lu S., Jiao W., Wang M., Chang A.C., 2013a. Reclaimed water: a safe irrigation water source. *Environ Dev* 8:74–83.
- Chen W., Lu S., Pan N., Jiao W., 2013b; Impacts of long-term reclaimed water irrigation on soil salinity accumulation in urban green land in Beijing. *Water Resour Res* 49:1–10.
- Chen W., Lu S., Pen C., Jiao W., Wang M., 2013c. Accumulation of Cd in agricultural soil under long-term reclaimed water irrigation. *Environ Pollut* 178:294–299.
- Da Fonseca, A.F., Herpin, U., De Paula, A.M., Victoria, R.L., Melfi, A.J., 2007. Agricultural use of treated sewage effluents: agronomic and environmental implications and perspectives for Brazil. *Scientia Agricola* 64, 194–209.

- Hamilton A.J., Stagnitti F., Xiong X.Z., Kreidl S.L., Benke K.K., Maher P., 2007. Wastewater irrigation: the state of play. *Vadose Zone J* 6:823–840.
- Hayes AR, Mancino CF, Pepper IL. Irrigation du gazon avec des effluents d'égouts secondaires. I: Qualité de l'eau du sol et des lixiviats. *Agron J.* 1990; 82: 938-43. doi: 10.2134 / agronj1990.00021962008200050020x.
- Jnad I, Lesikar B, Kenimer A, Sabbagh G. Subsurface drip dispersal of residential effluent. I: Soil chemical characteristics. *Trans Am Soc Agric Eng.* 2001;44:1149-57. doi:10.13031/2013.6443
- Kaboosi K., 2016. The assessment of treated wastewater quality and the effects of mid-term irrigation on soil physical and chemical properties (case study: bandargaz-treated wastewater). *Appl Water Sci.* doi:10.1007/s13201-016-0420-5.
- Keith D. A., 2015. Assessing and managing risks to ecosystem biodiversity. *Austral Ecology*, 40: 337–346. doi:10.1111/aec.12249.
- Kettab, A.,2001. Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision. *Desalination.* 136. 25-33. 10.1016/S0011-9164(01)00161-8.
- Levy, G., 2011. Review: Impact of long-term irrigation with treated wastewater on soil-structure stability - The Israeli experience. *Israel Journal of Plant Sciences.* 59. 95-104. 10.1560/IJPS.59.2-4.95.
- Lyu S., Chen W., 2016. Soil quality assessment of urban green space under long-term reclaimed water irrigation. *Environ Sci Pollut Res* 23(5):4639–4649.
- Magesan G.N., Williamson J.C., Yeates G.W., LloydJones A.R., 2000. Wastewater C:N ratio effects on soil hydraulic conductivity and potential mechanisms for recovery. *Biores. Technol.*, 71: 21–27.
- Magesan GN, Williamson JC, Sparling GP, Schipper LA, Lloyd-Jones AR. Hydraulic conductivity in soils irrigated with wastewaters of differing strengths: field and laboratory studies. *Aust J Soil Res.* 1999;37:391-402. doi:10.1071/S98030.
- Mozas M., Ghosn A., 2013. *État des lieux du secteur de l'eau en Algérie.* Paris (France) : IPEMed. 25 p. (Études & Analyses).
- Oliveira, Pedro Carlos Pacheco de, Gloaguen, Thomas Vincent, Gonçalves, Roberta Alessandra Bruschi, Santos, Dionei Lima, & Couto, Carolina Fonseca. 2016. Soil Chemistry after Irrigation with Treated Wastewater in Semiarid Climate. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40, e0140664. Epub May 31, 2016. <https://dx.doi.org/10.1590/18069657rbcs20140664>.
- Papadopoulos I, Stylianou Y. Trickle irrigation of sunflower with municipal wastewater. *Agric Water Manage.* 1991;19:67-75. doi:10.1016/0378-3774(91)90063-O.
- Paudel I, Cohen S., Shaviv A., Bar-Tal A., Bernstein N., Heuer B., Ephrath J., 2016. Impact of treated wastewater on growth, respiration and hydraulic conductivity of citrus root systems in light and heavy soils. *Tree Physiology.* 2016;36:770–785. doi: 10.1093/treephys/tpw013.
- Pescod M.B., 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, No. 47, p 113.
- Ramirez-Fuentes E., Lucho-Constantino C., Escamilla-Silva E., Dendooven L., 2002. Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time, *Bioresource Technol.* 85, 179–187.
- Schacht, K., & Marschner, B., 2015. Treated wastewater irrigation effects on soil hydraulic conductivity and aggregate stability of loamy soils in Israel. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 63(1), pp. 47-54. Retrieved 9 Sep. 2017, from doi:10.1515/johh-2015-0010.
- Schacht, K., Chen, Y., Tarchitzky, J., Lichner, L., Marschner, B., 2014. Impact of treated wastewater irrigation on water repellency of Mediterranean soils. *Irrig. Sci.*, 32, 369-378
- Sepaskhah, A.R., Sokoot, M., 2010. Effects of wastewater application on saturated hydraulic conductivity of different soil textures. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173, 510–516. doi:10.1002/jpln.200800220.
- Singh A., Agrawal M., 2012. Effects of waste water irrigation on physical and biochemical characteristics of soil and metal partitioning in *Beta vulgaris* L. *Agric Res* 1(4):379–391.
- Taghvaiian S., Alizadeh A., Danesh S., 2008. The effects of wastewater usage as irrigation water on soil physical and some chemical properties. *Iran Irrig Drain J*, 1(1), 49–60.
- Tarchouna G.L, & Merdy, Patricia & Raynaud, Michel & Pfeifer, Hans-Rudolf & Lucas, Yves. (2010). Effects of long-term irrigation with treated wastewater. Part I: Evolution of soil physico-chemical properties. *Applied Geochemistry.* 25. 1703-1710.
- Tedeschi A., Dell'aquila R., 2005. Effects of irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics. *Agric. Water Manage.*, 77, 308-322. DOI:10.1016/j.agwat.2004.09.036

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.

5

Discussion générale, conclusion et perspectives

Synthèse des résultats

- ✓ Huit FPTs point et FPTs paramétriques ont été évaluées pour prédire la rétention en eau à la capacité au champ θ_{CC} (à -330 hPa) et au point de flétrissement θ_{pF} (à -15000 hPa) pour les sols du Bas Cheliff de l'Algérie. Les critères d'évaluation ont montré que les meilleurs modèles d'estimation de la rétention d'eau sont ceux de Rawls et Ghorbani Dashtaki et Homae Type 1 (GH-1) à CC et pF respectivement.
- ✓ Les FPTs points produisent moins d'erreurs comparativement aux FPTs paramétriques.
- ✓ Les FPTs ponctuelles développées produisent des estimations plus précises que les FPTs paramétriques. Cependant, les FPTs paramétriques dérivées pour estimer les paramètres de la courbe de rétention de Van Genuchten ont fourni de meilleures estimations que les modèles de Rosetta.
- ✓ L'analyse de sensibilité globale (ASG), menée dans le but de caractériser la rétention en eau et ses facteurs déterminants, a montré que le formalisme mathématique des FPTs et leurs variables d'entrée réagissent différemment en termes de point de pression bien déterminé et de la classe de texture dans laquelle le modèle est appliqué.
- ✓ Après le regroupement textural, les deux approches des FPTs développées (point et paramétrique) étaient toujours sensibles, principalement à la fraction de sable, dans les classes de textures fines et moyennes à -33 kPa plutôt qu'à -1500 kPa. Ces résultats illustrent une meilleure précision de l'estimation à -33 kPa dans la classe moyenne pour les deux approches de FPT lors de la fixation du pourcentage d'argile (C%) et de la densité apparente (Da). D'autre part, la précision des estimations des FPTs a diminué lorsqu'elles ont été appliquées à des échantillons de sol ayant une teneur en argile supérieure à 60%. Après la stratification texturale, la matière organique a enregistré la variation la plus faible du premier ordre de sensibilité.
- ✓ D'autre part, et dans une perspective de mieux évaluer l'impact de l'irrigation par les eaux non conventionnelles (eaux usées épurées) sur la rétention en eau des sols en Algérie, l'étude de parcelles irriguées par les EUE dans la région côtière de Boumerdes a indiqué une réduction de la capacité du sol à retenir l'eau. A court et à long terme, l'irrigation avec des EUE a un impact considérable sur les courbes de rétention en eau à 10 cm et à 20 cm de profondeur. La couche supérieure du sol (0 à 10 cm) retient moins les EUE que quand elle est irriguée par l'eau de forage. L'impact des EUE devient plus important dans les hautes pressions de succion (HP : 10-1000 cm) et très haute pression de succion. (VHB : > 1000 cm) Ceci est attribué aux augmentations induites par les EUE, de la salinité des sols, qui est un indicateur important pour la qualité du sol.

De nombreuses fonctions de pédotransfert (FPTs) ont été élaborées dans le monde pour contourner les exigences techniques que requiert la mesure directe de la rétention en eau des sols. Toutefois, bien qu'elles aient pour but de simplifier l'estimation de la rétention en eau, elles restent limitées à leurs contextes de développement. Jusqu'à présent, il n'existe pas de FPT universelle reconnue par tous et applicable à tous les types de sols.

En Algérie, la faible couverture spatio-temporelle des données sur les propriétés hydrauliques des sols a considérablement freiné le développement des FPTs locales et peu de recherches approfondies ont été menées dans ce domaine. Pourtant, la connaissance du comportement hydraulique des sols est nécessaire, particulièrement dans la situation que vit l'agriculture algérienne depuis plusieurs années et qui a incité le pays à s'orienter vers la réutilisation des eaux non conventionnelles afin d'assurer les ressources nécessaires au développement agricole. Toutefois, cette pratique étant assez récente en Algérie, ses impacts sur les sols restent encore peu connus.

C'est dans ce contexte d'actualité que s'inscrit cette thèse et tente de répondre à ces problématiques à travers des objectifs croisés et complémentaires. La contribution majeure de cet essai original porte sur l'élaboration de FPTs locales qui soient assez robustes pour étudier et prédire la rétention en eau de sols algériens, principalement situés en climat semi-aride. Ces fonctions constituent une plateforme qui vise à fournir des modèles simples à appliquer, vérifiables et adaptés au contexte agropédoclimatique algérien.

Transposabilité des FPTs, quelle pertinence et quelles limites sur les sols algériens ?

La première partie de ce travail a abordé la question de la transposabilité des FPTs. Il existe autant de FPTs que de contextes étudiés ou de buts recherchés, c'est pourquoi une sélection adéquate des FPTs à appliquer est une étape importante pour permettre une comparaison efficace et pragmatique en vue de l'élaboration de FPTs locales.

De nombreuses études ont été menées pour tester les différentes FPTs et prédire la rétention en eau des sols. Dans cette thèse, nous avons appliqué huit FPTs existantes dans la littérature pour prédire la rétention en eau de quelques sols algériens dans l'optique de sélectionner les meilleurs modèles qui s'adaptent à notre contexte pédoclimatique. Les huit FPTs point et paramétriques ont été sélectionnées après une analyse bibliographique de leurs performances dans différents contextes à travers le monde.

En termes de la réutilisabilité des FPTs, il a été recommandé dans plusieurs études qu'une FPT donnée ne soit pas extrapolée au-delà de la région ou du type de sol utilisé dans son développement, car elle peut perdre sa validité. La FPT de Ghorbani (GH-1) a donné de meilleures estimations car elle a été développée dans un environnement semi-aride plus ou moins similaire au contexte pédoclimatique du Bas Cheliff. La FPT de Rawls et al. (1982) s'avère assez flexible en ce qui concerne l'application dans cette étude. Ce modèle a été dérivé à partir d'un large éventail de sols (hétérogénéité), ce qui le rend plus robuste que les modèles dérivés à partir de données provenant des contextes pédoclimatiques particuliers.

Il est intéressant de discuter le concept général de développement des FPTs du point de vue bases de données, choix des variables d'entrée et formalismes mathématiques utilisés. En effet, bien que le modèle Rosetta H3 repose sur un jeu de 24691 échantillons et utilise 4 niveaux d'entrée (sable, limon, argile et densité apparente), son application dans cette étude montre qu'il sous-estime la rétention en eau et rejoint les conclusions d'études similaires menées notamment en Australie, en Iran et aux Etats-Unis. Ceci peut s'expliquer par l'important contraste entre les climats tempérés et subtropicaux d'Europe et d'Amérique du Nord dont sont issus les échantillons de Rosetta et le climat semi-aride à aride du Bas Cheliff.

Prédiction de la rétention en eau des sols algériens, quels sont les inputs-clé et complémentaires ?

Les FPTs point développées dans le cadre de cette thèse prédisent un peu mieux la rétention en eau des sols étudiés que les FPTs paramétriques car ces dernières se limitent à l'estimation de leurs paramètres de calage sans réelle relation avec le sens physique. Les FPTs point présentent des formalismes simples à utiliser et à appliquer pour des valeurs ponctuelles de potentiel. Ceci peut être expliqué par le fait que la rétention en eau des sols est contrôlée par différentes variables indépendantes à différents points de potentiel d'eau du sol, et ces différences ne sont pas directement liées aux paramètres de la courbe de rétention d'eau tel que le modèle de Van Genuchten. Les résultats ont également montré qu'après la classification texturale, seule la classe de texture moyenne présentait une amélioration de l'estimation de la qualité des FPTs.

Parmi les cinq modèles testés dans les sols du Bas Cheliff, les FPTs point dérivées en utilisant les régressions multiples linéaires avaient les meilleures estimations. Cependant, les modèles non linéaires (FPTs paramétriques) ont donné une meilleure estimation que les modèles de Rosetta, basés sur les réseaux de neurones artificiels. Si le principe des FPTs repose sur l'utilisation d'une base de données simplifiée - généralement associées à la texture du sol, à la densité apparente et au taux de matière organique - le choix des variables d'entrée à retenir ainsi que des formalismes mathématiques à utiliser (régression, réseaux de neurones artificiels, etc.) a également un impact direct dans l'amélioration de leur estimation de la rétention d'eau.

Les sols étudiés dans cette thèse ont un taux en MO très faible. L'analyse de sensibilité globale (ASG) menée dans la deuxième partie de ce travail a révélé qu'après la stratification texturale, l'impact de la MO sur la rétention en eau était insignifiant. Ce résultat vient contredire les hypothèses des FPTs appliquées précédemment qui considèrent la MO comme l'un des inputs-clé dans la prédiction de la rétention en eau des sols. Une réponse analogue est observée pour le sable. En effet, l'ASG indique qu'après classement textural, la rétention en eau des sols algériens étudiés s'avère très sensible à la fraction de sable alors que leur pourcentage est faible.

Partant de ces constats, il devient évident que la sélection des variables d'entrée des FPTs ne peut reposer uniquement sur une logique statistique basée sur la corrélation entre les caractéristiques du sol, mais bien plus que cela. Une réflexion au sens physique lors de l'identification des inputs des FPTs s'impose et doit tenir compte de la constitution du sol en termes de taux et quantités de ses différentes composantes.

Quel avenir pour les FPTs dans l'agriculture algérienne ?

Les modèles développés dans cette étude en utilisant des techniques de régression linéaire et non linéaire ont déjà expérimenté la prise en compte d'une base de données composée uniquement de quelques sols algériens avec des résultats encourageants. Ces premiers résultats ouvrent une voie prometteuse pour l'avenir des FPTs dans l'agriculture algérienne.

Dans cette région où le climat est semi-aride à aride, une grande partie de l'humidité nécessaire à la croissance des cultures est fournie par l'irrigation. L'expérience indique l'opportunité de maintenir un niveau minimum d'humidité du sol à la réserve facilement utilisable pour la plupart des cultures. L'eau d'irrigation est ensuite appliquée lorsque le niveau d'humidité du sol chute à environ 50 % de cette réserve. Le souci de ramener le sol à la capacité au champ à chaque irrigation conditionne la disponibilité de l'eau et nécessite d'obtenir des estimations précises telles que les propriétés hydrauliques (rétention en eau, conductivité hydraulique).

Les FPTs locales peuvent fournir une connaissance plus approfondie de ces propriétés hydriques pour un meilleur pilotage de l'irrigation, mais aussi un outil de prédiction simplifié et fiable pour répondre à de nombreuses préoccupations des agriculteurs dans des régions où le manque de données et de protocoles constitue un frein notamment l'information prédictive sur la rétention en eau du sol aux deux points caractéristiques de la capacité au champ et du point de flétrissement.

Bien que les FPTs développées dans cette thèse aient fourni des résultats satisfaisants pour certains sols du nord de l'Algérie, ce travail se veut, avant tout, une amorce au développement de FPTs dédiées aux sols algériens. L'approche développée dans ce travail doit être perfectionnée et affinée et peut contribuer à ouvrir des perspectives plus larges quant à l'application de ces FPTs, d'abord sur d'autres sols algériens, puis, dans une optique plus lointaine mais tout aussi intéressante, à des sols soumis à des contextes agropédoclimatiques similaires au nôtre afin de tester leur efficacité. Il est, dès lors, envisageable d'enrichir la base de données utilisée dans le cadre de cette thèse, ainsi que la recherche de la représentativité et diversité des caractères pédologiques des différentes régions dans notre contexte.

Réutilisation des eaux usées épurées dans l'agriculture, quel impact sur la rétention en eau du sol ?

Si l'utilisation de ressources en eau alternatives, comme les eaux usées épurées (EUE) peut offrir des opportunités pour compléter le manque d'eau, aider à augmenter les gains financiers agricoles, elle peut aussi modifier les propriétés physiques et chimiques du sol. La dernière partie de cette thèse s'est intéressée aux effets de la qualité de l'eau sur la courbe de rétention en eau des sols.

Dans les régions arides et semi arides, la salinisation des sols est identifiée comme un processus majeur de la dégradation des terres irriguées. Sous un système d'irrigation goutte à goutte, l'utilisation des EUE pendant 13 ans et 8 ans peut provoquer une salinisation au niveau des horizons de surface qui affecte négativement les propriétés de la rétention en eau des sols. La réserve utile des sols étudiés était systématiquement plus faible

en surface dans les échantillons issus des parcelles irriguées par les EUE par rapport au sol irrigué par l'eau de forage.

Cependant, la capacité d'un sol à retenir l'eau n'est pas uniquement proportionnelle à la durée d'irrigation avec les EUE, ce qui implique de considérer le système racinaire des cultures ainsi que les pratiques d'irrigation comme des facteurs additionnels susceptibles d'influencer la rétention en eau. L'irrigation constitue un facteur de développement stratégique pour l'agriculture algérienne et pour une meilleure gestion des EUE, l'enjeu consiste à assurer une évaluation régulière et périodique de leur impact sur le sol et une recherche des solutions adaptées pour résoudre les éventuels problèmes pouvant en résulter.

Les résultats préliminaires de cette thèse illustrent la complexité de ce thème et incitent à des recherches plus poussées, non pas seulement en termes de qualité des eaux mais également de pratiques culturales, de propriétés porales du sol et de méthodes d'irrigation, impliquant ainsi l'ensemble du système eau-sol-plante. Les traitements opérés au niveau des stations d'épuration des eaux doivent également prendre en considération les risques potentiels liés à cette pratique et pouvant affecter les sols.

Perspectives et recherches futures

1. Les moyens d'améliorer le développement et l'application des FPTs doivent mettre l'accent sur l'identification, la validation et l'intégration des relations qui existent entre les différentes propriétés du sol. Bien que certaines inconnues persistent, comme relier les paramètres hydrauliques et biogéochimiques aux paramètres aux propriétés du sol, ou faire intervenir les paramètres du bilan hydrique comme variables d'entrées dans les FPTs, celles-ci révèlent des pistes intéressantes à explorer et peuvent donner des meilleures estimations de ces modèles.
2. L'une des solutions pouvant être envisagée au problème de l'applicabilité des FPTs à plus grande échelle - ou plus précisément à la généralisation des FPTs - est l'utilisation de bases de données constituées d'informations hétérogènes qui prennent en charge la variabilité et la diversité des contextes agropédoclimatiques. Les FPTs devraient englober la variabilité des propriétés de la rétention en eau de telle sorte que l'estimation des paramètres de calage permette de valider et d'assurer en toute confiance des extrapolations à différentes échelles prenant en compte la variation spatiale des sols.
3. Nous avons montré dans cette thèse que la capacité de rétention en eau d'un sol est fortement susceptible de varier selon le nombre d'années d'irrigation et la qualité des eaux d'irrigation. Ces résultats doivent mener, dans un futur travail, à approfondir la compréhension des mécanismes qui mènent à l'évolution de la courbe de rétention (probablement microbiens) et aux impacts tant sur la qualité du sol et de l'eau souterraine que sur la production. La microbiologie du sol joue probablement un rôle important, et les propriétés de rétention en eau du sol ne peuvent être directement reliées aux paramètres du sol que l'on mesure habituellement.
4. En plus des améliorations méthodologiques, des études expérimentales sont nécessaires pour dériver des FPTs pour des modèles complexes tels que les flux de solutés. Les avancées récentes des techniques d'observations et de mesures non invasives permettent de caractériser les sols à des micro-échelles afin d'établir la relation entre les échelles à laquelle les processus hydrodynamiques ont lieu et celle à laquelle le fonctionnement hydrique du sol est observé et géré. Les modèles de transfert d'eau et de solutés doivent être intégrés et/ou couplés à la compréhension de la structure des sols et sa représentation. Un défi important reste à relever pour développer une approche modélisatrice qui sera appliquée sur des sols algériens irrigués par des eaux usées épurées pour caractériser et modéliser les transferts eau-solutés en prenant en compte la structure réelle du sol, notamment le réseau poral.