
Prédiction de la courbe de rétention d'eau du sol à l'aide des fonctions de pedotransfert (PTFs)

Mohamed Lamara* — Zohra Derriche**

* Laboratoire de recherche de Génie Civil, Université de Laghouat, Route de Gardahia, BP 37G, Algérie, lrm3a_md@yahoo.fr

** Ecole Nationale des Travaux Publics (ENTP), Gharidi, view Kouba BP 227, Algérie, derrichez@hotmail.com

*RÉSUMÉ. Les propriétés hydrauliques des sols non saturés sont indispensables pour traiter les problèmes d'écoulement et transfert de masse à travers les sols. L'une des propriétés hydrauliques essentielle est la courbe de rétention d'eau du sol. Les mesures directes de cette propriété sont coûteuses et longues ; en conséquence des modèles sont développés pour la prédire sur la base des indices texturaux du sol. Ces modèles sont connus sous le nom fonctions de pedotransfert **FPTs** (Pedotransfer functions). Estimer indirectement la courbe caractéristique est très intéressant compte tenu de la simplicité et l'économie qui caractérise la procédure. L'objectif de cette étude est d'apprécier la précision relative aux différents modèles dans l'évaluation de la courbe de rétention pour deux sols : le sable de dune d'El-Oued et le limon de Jossigny. Sur la base des résultats obtenus dans cette étude, on peut stipuler que pour certains modèles la variabilité associée à la courbe prédite est de même ordre que celle donnée par les modèles de corrélation.*

*ABSTRACT: Unsaturated soil hydraulic properties are central to deal with seepage and mass transfer problems through soils. One of these essential hydraulic properties is the soil water retention curve. Direct measurements of this property are costly and time consuming; therefore models are developed for its prediction on the basis of soil textural indexes. These models are known as pedotransfer functions (**PTFs**). Indirect estimation of the soil water retention curve is very interesting due to the simplicity and economy characterising the procedure. The aim of this study is the assessment of the variability of different models in predicting the soil water retention curves for two soils, the dune sand from El-Oued region and Jossigny silt. On the basis of the results, we can advance that for certain models the variability associated to the predicted curve is in the same order as that given by the fitting models.*

MOTS-CLÉS: courbe de rétention, modèles de corrélation, fonctions de pedotransfert, variabilité

KEY WORDS: retention curve, fitting models, pedotransfer functions, variability

1. Introduction

Les modèles qui simulent l'écoulement de l'eau à travers les sols non saturés ont été largement développés et adoptés avec un certain succès dans le domaine des sciences du sol. L'application de ces modèles est néanmoins subordonnée à la disponibilité des propriétés hydrauliques. Plus particulièrement, deux caractéristiques doivent être déterminées: la relation $\theta(\psi)$, relation entre la teneur en eau et la charge capillaire, nommée communément la courbe de rétention d'eau du sol ainsi que la relation $k(\psi)$, appelée fonction de conductivité hydraulique en non saturé.

Bien que ces relations possèdent une grande importance à nos jours dans divers domaines de géoenvironnement, elles ne sont pas systématiquement disponibles aux laboratoires. La raison principale est que leur mesure directe est difficile, longue et très coûteuse pour obtenir enfin un ensemble complet de données. Vu la complexité des procédures expérimentales et étant donné l'importance de l'incertitude associée habituellement avec les résultats des propriétés hydrauliques, il devient très improbable que des percées majeures dans le développement des techniques expérimentales, changeront cette situation dans un avenir très proche.

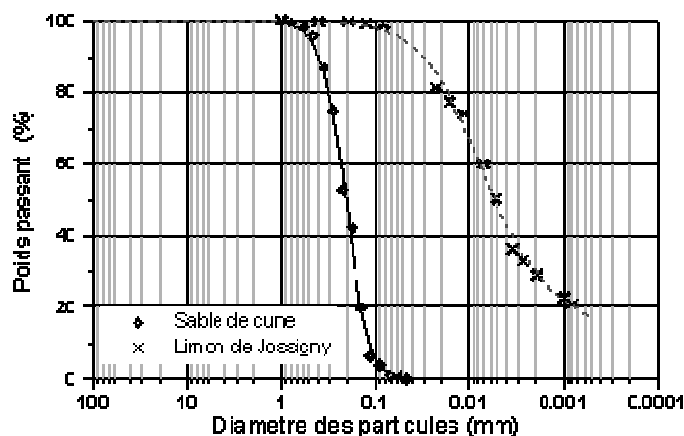
Alternativement des procédures sont développées pour prédire la courbe de rétention d'eau du sol à partir des propriétés du sol facilement mesurables, comme la distribution granulométrique, la teneur en matières organiques et la densité sèche du sol. Ces modèles sont connus sous le nom fonctions de pedotransfert **FPTs** (Pedotransfert functions **PTFs**). Réellement, la question principale à propos de l'importance de toute fonction de pedotransfert est sa capacité de prédire raisonnablement les propriétés hydrauliques.

Dans cet article on va présenter les courbes de rétention du sol obtenue par lissage des points expérimentaux à l'aide de différents modèles pour deux sols, à savoir le sable de dune d'El-Oued (Algérie) et le limon de Jossigny (France). Par la suite ces courbes sont prédites à l'aide des fonctions de pedotransfert, deux modèles statistiques sont considérés ceux de Vereecken et *al.*, (1989) et Scheinost et *al.*, (1997) plus un modèle semi-empirique de Zapata et *al.*, (2000). Enfin une comparaison, basée sur la variabilité qui caractérise les estimations des différents modèles est réalisée.

2. Texture des sols

Deux types de sol sont considérés dans cette étude: Le Sable d'El-Oued et le Limon de Jossigny. Le premier c'est un sable de Dune de région d'El-Oued provenant de Sahara algérien. D'un point de vue minéralogique, c'est un sable presque exclusivement siliceux, avec les grains de quartz représentant en moyenne 90 % du matériau. La distribution granulométrique du sol est donnée dans la figure 1, il s'agit d'un sable mal gradué. Le deuxième sol est un limon peu plastique

provenant du site de Jossigny situé à l'est de Paris (France). Les caractéristiques d'identification $w_1 \% = 37.3$, et $I_p \% = 9.3$. La courbe granulométrique est montrée sur la figure 1, on peut noter que le limon de Jossigny est constitué à 98.8 % par fraction inférieure à 80 μm dont 29 % inférieure à 2 μm . L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X montre que ce limon est composé en grande partie de quartz (65 %), de Feldspath sodique (10 %), et fraction argileuse.



suivant les chemins de drainage et mouillage (Lamara et *al.*, 2008). La courbe de succion est déterminée tout d'abord sur un matériau complètement saturé de succion nulle, qui est soumis à des succions croissantes. Ensuite le matériau est soumis à la diminution progressive de la succion ce qui va entraîner le mouillage graduelle du sol (Figure 2.a). La densité sèche des échantillons est de 1.80 et la teneur en eau moyenne à la saturation est environ 17.8 %.

Pour le limon de Jossigny les courbes caractéristiques suivant les deux chemins de drainage et mouillage sont obtenues à l'aide de la méthode des profils instantanés (Figure 2.b) avec mesure de la succion à l'aide de tensiomètre (Amroui, 1996). Les échantillons sont reconstitués par compactage statique, avec un double piston pour avoir un échantillon plus au moins homogène, à une densité sèche égale 1.65 et la teneur en eau à la saturation est de 22.21 %.

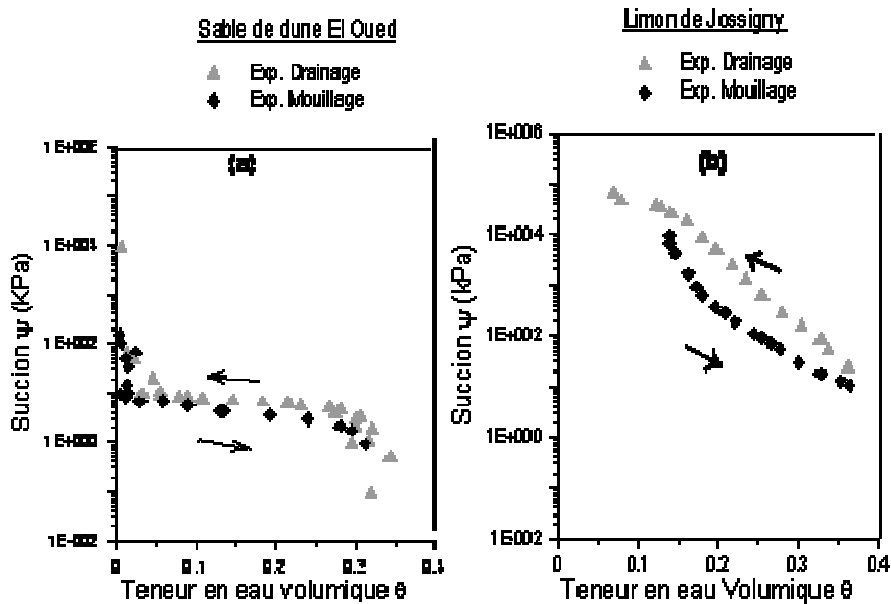


Figure 2. Les points expérimentales pour la courbe de rétention d'eau du sol suivant les deux chemins de drainage et de mouillage a)- Sable de Dune b)- Limon de Jossigny

3.2. Modèles de corrélation

Pratiquement les études du sol non saturées exigent que la courbe de rétention d'eau du sol soit continue pour qu'elle soit facilement intégrée dans les modèles de simulations numériques. Les résultats expérimentaux sont souvent représentés par un ensemble de points éparpillés sur toute la gamme de succion. Plusieurs modèles mathématiques sont proposés pour la corrélation des données expérimentales de la courbe caractéristique. Dans ce cas uniquement quelques points expérimentaux sont nécessaires pour obtenir la courbe complète. Dans cette étude quatre modèles de lissage sont considérés pour ajuster les points expérimentaux de la courbe de rétention d'eau du sol suivant les chemins de drainage. Les modèles considérés sont ceux de Gardner (1958), Brooks et al., (1963), van Genuchten (1980) et Fredlund et al., (1994) leurs expressions sont regroupées dans le tableau 1.

Auteur	Equation	Paramètres d'ajustement
Gardner (1958)	$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / (1 + q\psi^n)$	Q: n : Paramètre du modèle
Brooks & Corey (1964)	$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [a/\psi]^\lambda$	A : succion d'entrée d'air λ : indice de distribution de la taille des pores
Van Genuchten (1980)	$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha\psi)^n]^m$	α , n et m sont les paramètres du modèle.
Fredlund & Xing (1994)	$\theta(\psi) = \theta_s \cdot C(\psi) \left[1 / \ln(\exp(1) + (\psi/a)^n) \right]^m$ $C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/h_r)}{\ln(1 + 10^6/h_r)}$	A, n et m sont les paramètres du modèle. h_r : la succion matricielle correspondant à la teneur en eau résiduelle.

Tableau 1. Expressions des modèles de corrélation pour la courbe de rétention d'eau de sol.

Les courbes de rétention d'eau obtenues par ces modèles de lissage sont illustrées sur les figures 3-a et 3-b pour le sable de dune et le limon de Jossigny respectivement.

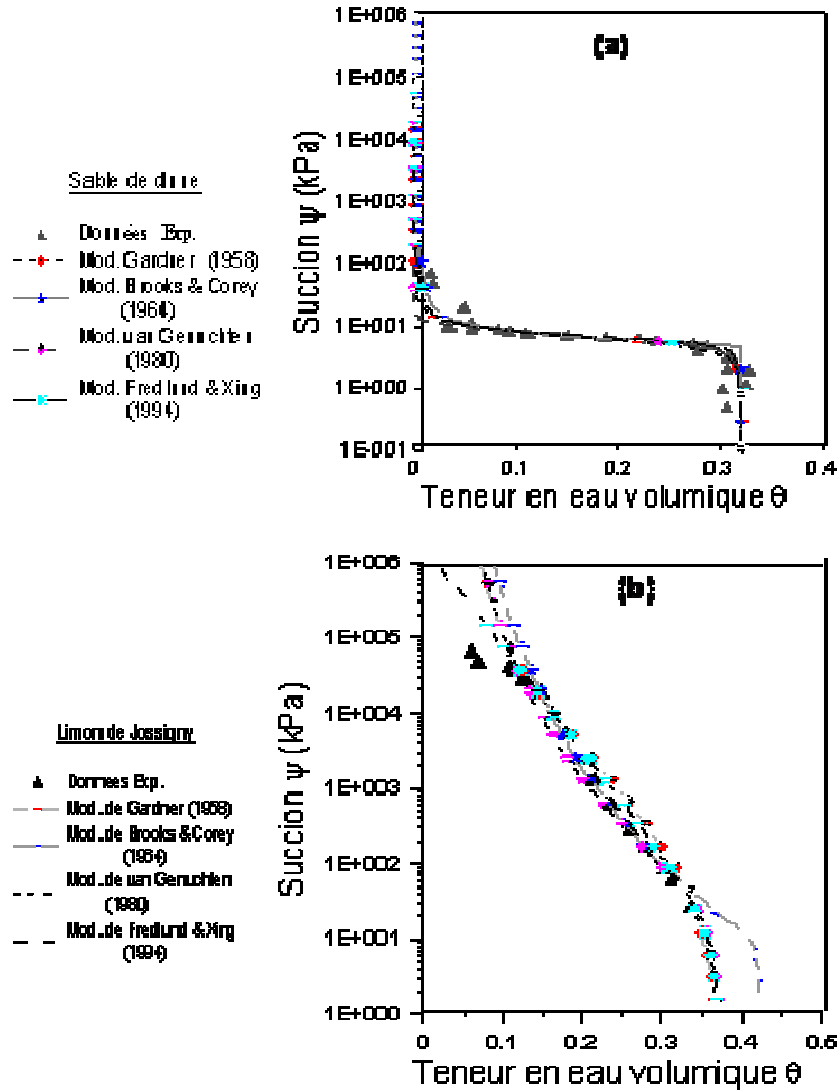


Figure 3. Les courbes de rétention d'eau du sol suivant le chemin de drainage ajustés avec différents modèles de corrélation a)- Sable de dune, b)- Limon de Jossigny.

Pour le sable de dune, on peut noter que la forme des courbes obtenues, est en accord avec les courbes de succion correspondant aux sols sableux. Le sol perd la totalité de son humidité, environ 80 % entre les succions 3.12 kPa ($pF = 1.58$) et 20 kPa ($pF = 2.3$). Cela s'explique par l'effet de l'uniformité des particules du sable engendrent d'espaces poreux plus ou moins similaires dans le sol. Globalement les modèles donnent une bonne corrélation aux résultats expérimentaux. La valeur d'entrée d'air **AEV**, environ 3.12 kPa, est correctement estimée par la plupart du modèles, sauf que le modèle de Brooks et *al.*, qui présente une discontinuité dans ce point.

En ce que concerne le limon de Jossigny l'allure des la courbe obtenue par divers modèles est loin d'être sigmoïdale et semble d'être linéaire sur une large gamme de succion. De plus les quatre modèles de lissage divergent dans la zone de grandes succions ce qui peut être attribuée au manque de précision dans les données expérimentales. Dans la zone de saturation tous les modèles à l'exception de celui de Brooks et *al.*, donnent des courbes plus au moins similaire. La valeur d'entrer **AEV** d'air pour le sol est estimée autour de 20 kPa.

4. Fonction de Pedotransfert (*PTFs*)

La plupart des modèles de prédiction présentés dans la littérature, sont construits sur la base de plusieurs approches, qui peuvent être classées en trois groupes majeurs. Le premier groupe de **PTFs** estime la teneur en eau du sol au niveau de certaines valeurs de la succion matricielle (Gupta et *al.*, 1979). Le deuxième groupe de **PTFs** prédisent les paramètres d'une équation analytique : Brookes et *al.*, (1964) (Rawls et *al.*, 1985), ou l'équation de van Genuchten (1980) (Vereecken et *al.*, 1989; Scheinost et *al.*, 1997). Cela est fait à travers une régression linéaire multiple. Le troisième Groupe de **PTFs** est basé sur l'analyse du concept physique du phénomène de la rétention d'eau. L'analyse implique la conversion de la distribution granulométrique (information texturale) à une distribution de la dimension du pore qui à son tour est reliée à la teneur en eau et à la succion correspondante, (Arya et *al.*, 1981; Haverkamp et *al.*, 1986). Réellement, la question principale à propos de l'importance de toute fonction de pedotransfert est sa capacité à prédire raisonnablement les propriétés hydrauliques du sol.

Dans cette étude deux **PTFs** celles de Vereecken et *al.*, (1989) et Scheinost et *al.*, (1997), appartenant au deuxième groupe, sont utilisées pour prédire les courbes de rétention du deux sols. Les courbes de rétention sont obtenues aussi à l'aide d'un modèle semi-empirique celui de Zapata et *al.*, (2000), qui tente de relier les paramètres de l'équation de Fredlund et *al.*, (1994) aux indices texturaux du sol.

Les résultats de prédiction des courbes caractéristiques par les trois modèles sont illustrés sur les figures 4-a pour le sable de dune et figure 4-b pour le limon de Jossigny. Ces courbes sont représentées ensemble avec les points expérimentaux et la meilleure courbe de lissage obtenue (Fredlund et *al.* 1994).

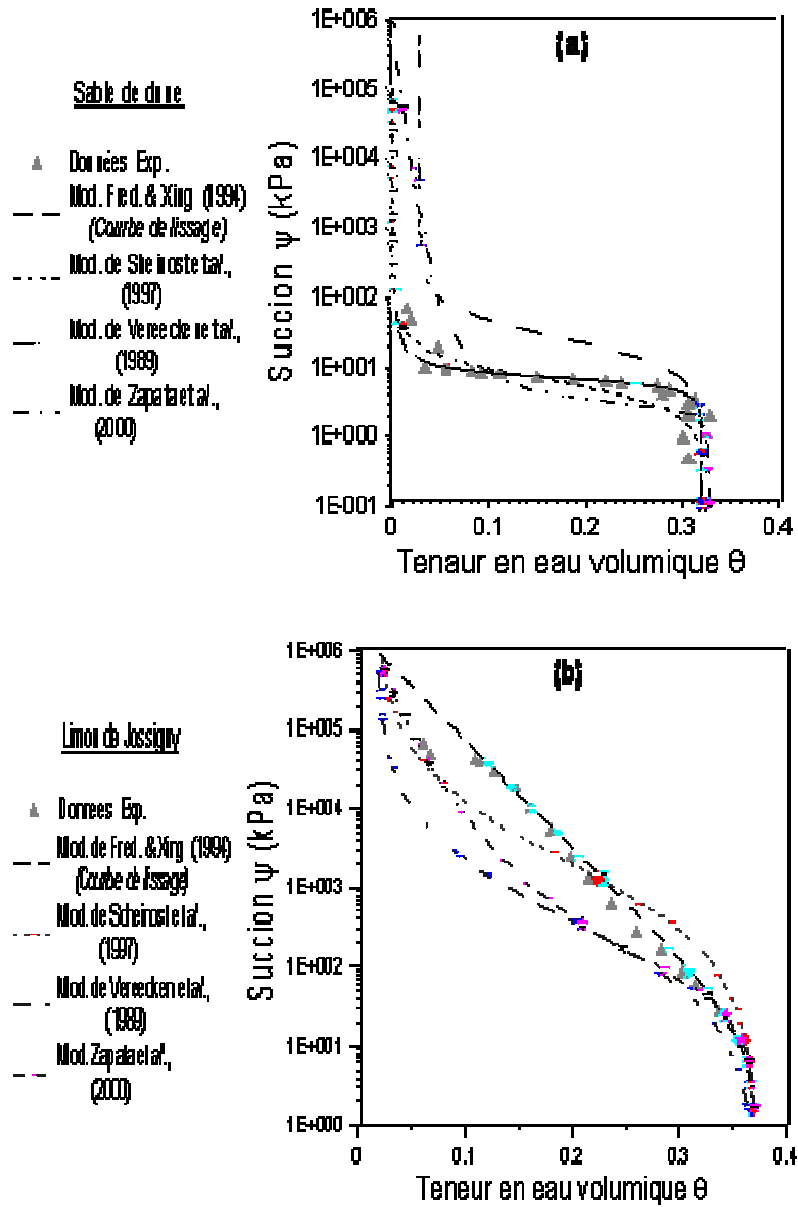


Figure 4. Les courbes de rétention d'eau du sol obtenues par les modèles de prédiction a)- Sable de Dune b)- Limon de Jossigny.

En ce que concerne le sable de dune, il est bien apparent que le modèle de Scheinost et *al.*, (1997) donne les meilleures prédictions. La courbe caractéristique donnée par le modèle de Zapata et *al.*, (2000), malgré sa nature semi-empirique, est bonne dans la zone de faible succion, cependant elle est moins précise dans la zone de grandes succions. La courbe caractéristique obtenue par le modèle de Vereecken et *al.*, (1989), au delà de la valeur d'entrer d'air, s'écarte substantiellement des données expérimentales.

Pour le limon de Jossigny les résultats sont mitigés. Vu l'incertitude sur les données expérimentales on ne peut pas trancher quel est le modèle de prédiction qui donne des meilleurs résultats. Néanmoins on peut noter que le modèle de Scheinost et *al.*, (1997) donne une courbe d'allure sigmoïdale et sillonne les données expérimentales. Les deux autres modèles donnent aussi des courbes de forme sigmoïdale mais restent loin des résultats expérimentaux.

5. La variabilité associée à la courbe caractéristique

Qu'elle soit mesurée ou prédite, il y a toujours incertitude associée avec la courbe de rétention d'eau du sol, et celui aura un impact sur les études des sols non saturés qui font usage de cette propriété. Dans la pratique, il est improbable, qu'un ingénieur examine plusieurs modèles pour corrélérer les données expérimentales de la courbe caractéristique. Il peut être utile de savoir la grandeur de l'erreur attendu lorsqu'une seule équation est considérée.

Dans ce travail, la précision relative aux différents modèles considérés est exprimée à travers une variabilité, qui évaluée par rapport à la meilleure estimation. A chaque niveau de succion, la teneur en eau obtenue par le modèle en question est comparée à la teneur en eau donnée par le modèle possédant la meilleure corrélation, qui est dans ce cas le modèle de lissage de Fredlund et *al.*, (1994). La variabilité associée à chaque modèle est exprimée comme un pourcentage de la teneur en eau en saturation.

$$\text{Variabilite \%} = \frac{|\theta_i - \theta_{ifr}|}{\theta_{sat}} \times 100 \quad [1]$$

Pour le sable de dune, les variabilités associées avec les cinq modèles de corrélation sont représentées dans la figure 5a, et celles relatives aux trois modèles de prédiction sont illustrées sur la figure 5b. Les zones (A), (B), (C), (D) représente respectivement, la zone de saturation, la zone d'entrer d'air, la zone de désaturation et la zone résiduelle.

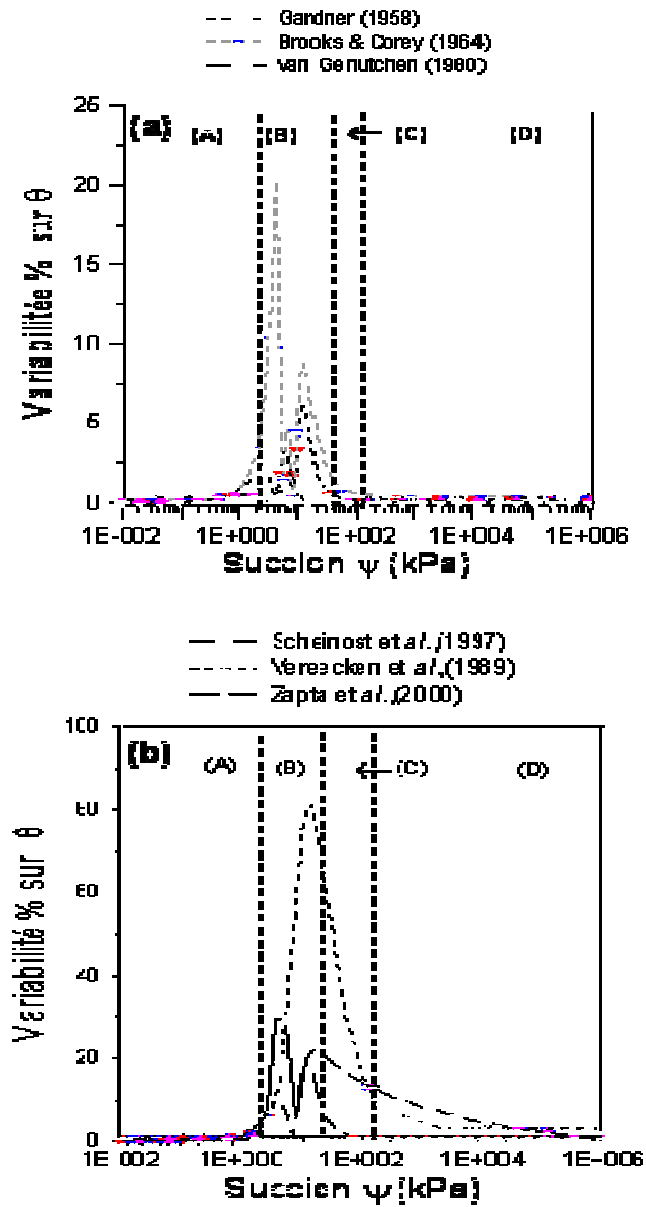


Figure 5. Variabilités associées à la courbe de rétention d'eau du sol pour le sable de dune a)- Modèles de lissage, b)- Modèles de prédiction

Pour chaque modèle la variabilité maximale est observée dans la zone d'entrée d'air. On peut conclure de la figure 5a, que le modèle de van Genuchten (1980) possède en général la meilleure performance avec une variabilité inférieure à 2%. Le modèle de Gardner (1958) donne des performances plutôt acceptables (variabilité maximale moins de 8%). Cependant le modèle de Brooks et *al.*, (1964), engendre une variabilité de l'ordre de 20 % dans de la région d'entrée d'air.

Il peut être noté de la figure 4b que le modèle de Scheinost et *al.*, (1997) donne la meilleure prédiction à la courbe caractéristique comparée à celui des deux autres modèles. Cette constatation est confirmée dans la figure 5b dans laquelle le modèle de Scheinost et *al.*, (1997) présente une variabilité maximale inférieure à 20%. La variabilité associée au modèle de Zapata et *al.*, (2000) reste aussi faible et ne dépasse pas les 30%. Cependant comme il est attendu le modèle de Vereecken et *al.*, (1989) présente une variabilité importante allant jusqu'à 80 %. Sur la base de ces résultats, on peut conclure que la fonction de pédotransfert de Scheinost et *al.*, (1997) donne une bonne estimation à la courbe de rétention d'eau du sol, avec une variabilité maximale comparable à celles données par les modèles de lissage.

Les figures 6 illustrent les variabilités associées à la courbe de rétention de limon de Jossigny, obtenue par les différents modèles. On voit que pour tous les modèles de lissage (Figure 6a) les variabilités dans la zone d'entrée d'air sont faibles, cependant les variabilités, au-delà d'une succion de 10^4 kPa, augmentent rapidement, alors que normalement dans la zone de teneur en eau résiduelle les courbes doivent converger et atteindre des variabilités pratiquement nulles.

Les variabilités associées aux modèles de prédiction (Figure 6b) sont faibles pour des succions modérées mais elles augmentent dans la zone de désaturation, pour atteindre des variabilités de l'ordre de 40 à 50 % pour les modèles de Scheinost et *al.*, (1997) et Zapata et *al.*, (2000) et plus de 70 % pour le modèle de Vereecken et *al.*, (1989).

Les grandes variabilités observées et la diversification des résultats obtenus pour le limon de Jossigny peuvent être attribués, comme il est cité plus haut, au manque de précisions dans les données expérimentales. Une étude plutôt intéressante (Zapata et *al.*, 2000), qui a analysé la variabilité et l'incertitude associée avec la mesure directe de la courbe caractéristique, a montré que l'opérateur, la méthode utilisée ainsi bien que la gamme de succions a couvert dans l'étude résultent en une variabilité considérable dans les données de la courbe caractéristique mesurée.

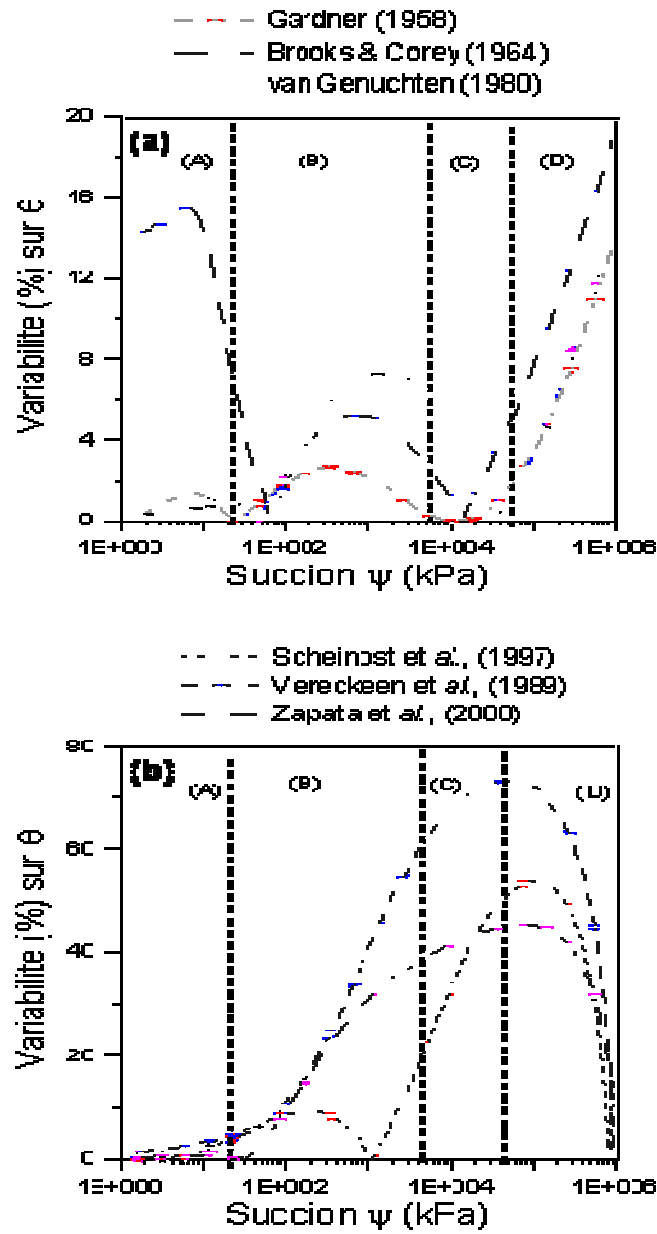


Figure 6. Variabilités associées à la courbe de rétention d'eau du sol pour le limon de Jossigny a)- Modèles de lissage, b)- Modèles de prédiction.

6. Conclusion

Généralement la courbe de rétention d'eau du sol n'est pas une propriété qui est régulièrement déterminée dans les laboratoires de mécanique du sol. Donc en absence de données expérimentales, on peut estimer cette courbe à l'aide des modèles de prédiction basés sur la texture du sol. Selon cette étude, ces modèles peuvent donner des approximations plus ou moins acceptables pour cette propriété hydraulique du sol.

On a montré dans ce travail, au moins pour le sable de dune étudié, que la précision associée aux modèles de prédiction est comparable à celle des modèles de corrélation. Le manque de précision dans la prédiction de la courbe caractéristique pour le limon de Jossigny est fort probablement dû à un défaut de précision dans les données expérimentales.

A la lumière des résultats obtenus, on peut conclure que la fonction de pedotransfert de Scheinost et *al.*, (1997) est plus adéquate pour estimer la courbe caractéristique de différents sols en particulier les sols sableux.

La tendance actuelle consiste à établir des fonctions de pedotransfert pour déterminer les paramètres d'un modèle mathématique pour la relation $\theta(h)$. A ce propos il est intéressant de relever que les FPT les plus représentatives sont celles qui relient les paramètres qui ont un sens physique aux caractéristiques texturales du sol.

7. Bibliographie

- Amraoui N., Etude de l'infiltration dans les sols fin non saturés, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure de Géologie Nancy 1996.
- Arya L. M., Paris J. F., « A physico-empirical Model to predict the soil moisture Characteristic from particle-size distribution and bulk density data », Soil Science Society of America Journal, 1981, 45, p.1023-1030.
- Brookes R. H., Corey C. T., « Hydraulic properties of porous media. Hydrology », Colorado State Univ., Fort Collins CO, 1964, Paper N° 3
- Fredlund D.G., Xing A., « Equation for the soil-water characteristic curve », Canadian Geotechnical Journal, 1994, Vol. 31, p. 521-532.
- Gardner W. R., « Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table », Soil Science, 1958, Vol. 85, p.228-232.
- Gupta. S. C., Larson, W. E., « Estimating Soil Water Retention Characteristics from Particle Size Distribution, Organic Matter Percent, and Bulk Density », Water Resources Research, 1979, Vol. 15, No. 6, p. 325-339.
- Haverkamp R., Parlange J.Y., « Predicting the water retention curve from particle-size distribution: 1. Sandy soils without organic matter », Soil Science, 1986, 142, p. 325-339.

- Lamara M., Derriche Z., « Prediction of unsaturated hydraulic properties of dune sands on drying and wetting paths », *Electronic Journal of Geotechnical Engineering, EJGE*, 2008, Vol 13, Bund. B.
- Rawls, W.J., D.L., « Brakensiek., "Prediction of soil water properties for hydrologic modelling », In: *Watershed Management in the Eighties*. Eds. Jones, E and Ward, T.J. Proceedings of a Symposium ASCE, Denver, Colorado. 1985, ASCE, New York. p. 293-299.
- Scheinost A.C., Sinowski W., Aurswald K., « Regionalization of soil-water retention curves in a highly variable soil scape : I. Developing a new pedotransfer function », *Geoderma*, 1997, 78, p.129-143.
- van Genuchten M. T., « A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils », *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44, p. 892-898.
- Vereecken H., Maes J., Feyen J. Darius P., « Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content », *Soil Science*, 1989, 148 (6), p.389-403.
- Zapata C.E., Houston W.N., Houston S.L. Walsh K.D., « Soil-water characteristic curve variability », In *Proceedings of Advances in unsaturated geotechnics, Sessions Geo-Denver*, 2000, p. 84-121.