

# Validité de l'estimation des propriétés de rétention en eau de sols syriens à partir de fonctions et classes de pédotransfert développées pour des sols français

H. Al Majou<sub>(1, 3)</sub>, R. Kaba<sub>(2)</sub>, W. Almesber<sub>(1)</sub> et A. Bruand<sub>(3)</sub>

- 1) Département des Sciences du Sol, Faculté Agronomique, Université de Damas, PO Box 30621, Damas, Syrie
- 2) General Commission for Scientific Agricultural Research (GCSAR), Al-Qamishli Agricultural Research Center, Al-Qamishli, Syria
- 3) Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO), Université d'Orléans, CNRS/INSU, BRGM, 1A rue de la Férollerie, 45071 Orléans Cedex 2, France

\*: Auteur correspondant: hassan.almajou@univ-orleans.fr

## RÉSUMÉ

Afin de répondre au déficit de données relatives aux propriétés de rétention en eau des sols de Syrie, des fonctions continues et classes de pédotransfert (respectivement FPT et CPT) établies pour des sols du territoire français ont été testées sur un jeu de sols échantillonnés dans quatre régions de Syrie. Les échantillons ont été prélevés lorsque les sols se trouvaient en conditions hydriques proches de la capacité au champ (période hivernale). La composition des échantillons et leur teneur en eau à sept valeurs de potentiel ont été déterminées. Le biais de prédiction est calculé à l'aide de l'erreur moyenne de prédiction (EMP), la précision et la qualité globale de la prédiction ont été calculées à l'aide de l'écart type de prédiction (ETP) et l'erreur quadratique moyenne (EQM). Les résultats montrent que ce sont des FPT établies à partir de la teneur en eau à la capacité au champ qui conduisent à la prédiction de meilleure qualité, en particulier lorsqu'elles ont été établies après stratification par classe de texture. Cette amélioration de la prédiction après stratification par classe de texture serait liée au fait que la forme de la courbe de rétention en eau varie en fonction de la texture, un point de la courbe n'ayant par conséquent pas le même sens selon la classe de texture. Les valeurs des biais de prédiction et précisions enregistrées avec les FPT et CPT étudiées sont proches de celles enregistrées lorsque ces mêmes FPT et CPT ont été testées sur des sols issus du territoire français. Enfin, de tels résultats sont encourageants et en faveur de l'utilisation de fonctions de pédotransfert établies pour des sols d'une zone pédoclimatique à des sols d'une autre zone pédoclimatique.

## Mots clés

Fonctions de pédotransfert, texture, densité apparente, biais de prédiction, précision.

**SUMMARY****VALIDITY OF THE PREDICTION OF THE SOIL WATER RETENTION PROPERTIES OF SYRIAN SOILS WITH CONTINUOUS AND CLASS PEDOTRANSFER FUNCTIONS DEVELOPED WITH FRENCH SOIL**

To address the lack of data on water retention properties of the Syrian soils, continuous and class pedotransfer functions (FPT and CPT, respectively) established for soils of the French territory were tested on soils originating from four regions of Syria. The samples were collected when the soil water content was near field capacity in winter. The composition of the samples and their water content at seven water potentials were determined. The prediction bias is calculated using the average prediction error (EMP), the precision using the standard error of prediction (ETP) and global quality of the prediction with the mean quadratic error (EQM). The results show that the best prediction was recorded with the FPT established with the water content at field capacity, in particular when they were established after stratification by texture class. This improvement in prediction after stratification by texture class is linked to the fact that the shape of the water retention curve varies with texture, a point of the curve not bringing the same information according to the class of texture. The values of the prediction bias and precision recorded with the FPT and CPT studied are close to those recorded when these FPT and CPT were tested on soils originating from the French territory. Finally, such results are encouraging and support the use pedotransfer.

**Key-words**

Pedotransfer functions, texture, bulk density, bias of prediction, precision.

**RESUMEN****VALIDEZ DE LA ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE RETENCIÓN EN AGUA DE SUELOS SIRIOS A PARTIR DE FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA DESARROLLADAS PARA LOS SUELOS FRANCESES**

Para responder al déficit de datos relativos a las propiedades de retención en agua de suelos de Siria, se probaron funciones continuas y clases de pedotransferencia (respectivamente FPT y CPT) establecidas para suelos del territorio francés sobre un juego de suelos muestreados en cuatro regiones de Siria. Se recogieron las muestras cuando los suelos se encontraban en condiciones hídricas cercanas de la capacidad de campo (periodo invernal). Se determinaron la composición de las muestras y su contenido en agua a siete valores de potencial. Se calculó el sesgo de predicción con ayuda del error medio de predicción (EMP), se calcularon la precisión y la calidad global de la predicción con ayuda de la desviación estándar de predicción (ETP) y del error cuadrático medio (EQM). Los resultados muestran que las FPT establecidas a partir del contenido en agua a la capacidad de campo conducen a una predicción de mejor calidad, en particular cuando fueron establecidas tras estratificación por clase de textura. Este mejoramiento de la predicción tras estratificación por clase de textura sería ligado al hecho que la forma de la curva de retención en agua varía en función de la textura, un punto de la curva no tiene, consecuentemente, el mismo sentido según la clase de textura. Los valores de los sesgos de predicción y precisiones registrados con las FPT y CPT estudiadas son cercanos de los registrados cuando se probaron estas mismas FPT y CPT sobre suelos procedentes del territorio francés. En fin, estos resultados son alentadores y a favor del uso de funciones de pedotransferencia establecidas para suelos de una zona pedoclimática a suelos de otra zona pedoclimática.

**Palabras clave**

Función de pedotransferencia, textura, densidad aparente, sesgo de predicción, precisión.

La connaissance des propriétés hydriques des sols, en particulier des propriétés de rétention en eau, est une donnée clé d'une gestion appropriée des sols en zone méditerranéenne, semi-aride et aride. Ces propriétés ne sont généralement connues que pour un nombre restreint de sols en raison de la lourdeur et du coût des mesures. Pour répondre à la nécessité de connaître ces propriétés hydriques, des outils de prédiction dénommés «fonctions de pédotransfert (FPT)» ou «classes de pédotransfert (CPT)» ont été développés. Elles ont fait l'objet d'un très grand nombre de travaux aux cours de ces dernières décennies (e.g. Gupta et Larson, 1979; Rawls *et al.*, 1982; Pachepsky *et al.*, 1996; Cornelis *et al.*, 2001; Wösten *et al.*, 2001; Bruand *et al.*, 2003; Bruand *et al.*, 2004; Al Majou *et al.*, 2007; Nasta *et al.*, 2009; Nemes *et al.*, 2009). Elles permettent d'estimer ces propriétés à partir de caractéristiques physiques ou chimiques du sol (composition granulométrique, densité apparente, teneur en carbone organique, capacité d'échange cationique, etc.).

Les FPT ont été le plus souvent établies par régression multilinéaire et correspondent alors à autant de modèles empiriques décrivant la façon dont les propriétés de rétention en eau sont reliées aux caractéristiques de constitution du sol. Dans la plupart des cas, il s'agit soit de relations entre la teneur en eau à des valeurs de potentiels particulières et des caractéristiques de constitution du sol (e.g. Rawls *et al.*, 1982; Bastet *et al.*, 1999; Saxton et Rawls, 2006), soit de relations entre les paramètres d'un modèle de courbe décrivant la variation de la teneur en eau en fonction du potentiel et des caractéristiques de constitution du sol (e.g. Bastet *et al.*, 1999; Pachepsky *et al.*, 1999). Dans ce dernier cas, les relations permettent d'estimer la teneur en eau de façon continue aux différentes valeurs de potentiel (e.g. Rawls *et al.*, 1982; Rawls *et al.*, 1991), ou d'estimer les paramètres du modèle de courbe qui décrit l'évolution de la teneur en eau en fonction du potentiel (Minasny *et al.*, 1999; Vereeken *et al.*, 1989).

Par ailleurs, des CPT ont aussi été développées. Elles permettent d'estimer les propriétés hydriques après avoir regroupé et classé les sols selon leurs caractéristiques (Nemes, 2002; Bruand *et al.*, 2003; Bruand *et al.*, 2004; Pachepsky *et al.*, 2006). Des teneurs en eau volumiques à 7 valeurs de potentiel variant de -10 hPa ( $pF = 1$ ) à -15000 hPa ( $pF = 4,2$ ) ont ainsi été proposées en fonction soit du type d'horizon et de sa texture, soit du type d'horizon, de sa texture et de sa densité apparente (Bruand *et al.*, 2003; Bruand *et al.*, 2004; Al Majou *et al.*, 2005; Al Majou *et al.*, 2007). Les CPT restent des outils faciles à utiliser car elles exigent peu d'information sur le sol par rapport aux FPT plus sophistiquées et plus exigeantes. En revanche, elles sont fréquemment considérées comme conduisant à des prédictions de moindre qualité que les FPT (Wösten *et al.*, 1995).

Parmi les questions encore largement discutées, il y a celle de la qualité de la prédiction des propriétés de rétention en eau enregistrée quand des FPT ou des CPT établies à partir des sols d'une zone pédoclimatique sont employées pour des sols

d'une autre zone-pédoclimatique (Wösten *et al.*, 1999; Nemes *et al.*, 2003). En zone aride et semi-aride, bien que la disponibilité de l'eau soit l'un des principaux facteurs limitant la production agricole, peu de travaux ont concerné la prédiction des propriétés de rétention en eau des sols (Dridi *et al.*, 2011; Monawesh, 2013; Wösten *et al.*, 2013). C'est le cas de la Syrie où l'étude des propriétés de rétention en eau n'a fait l'objet que de très peu de travaux publiés (Sommer *et al.*, 2012; Khlosi *et al.*, 2013). Pour pallier cette situation, l'objectif de cette étude est de discuter les performances de FPT et de CPT établies à partir de sols du territoire français lorsqu'elles sont utilisées pour des sols de Syrie localisés en zone méditerranéenne, semi-aride ou aride.

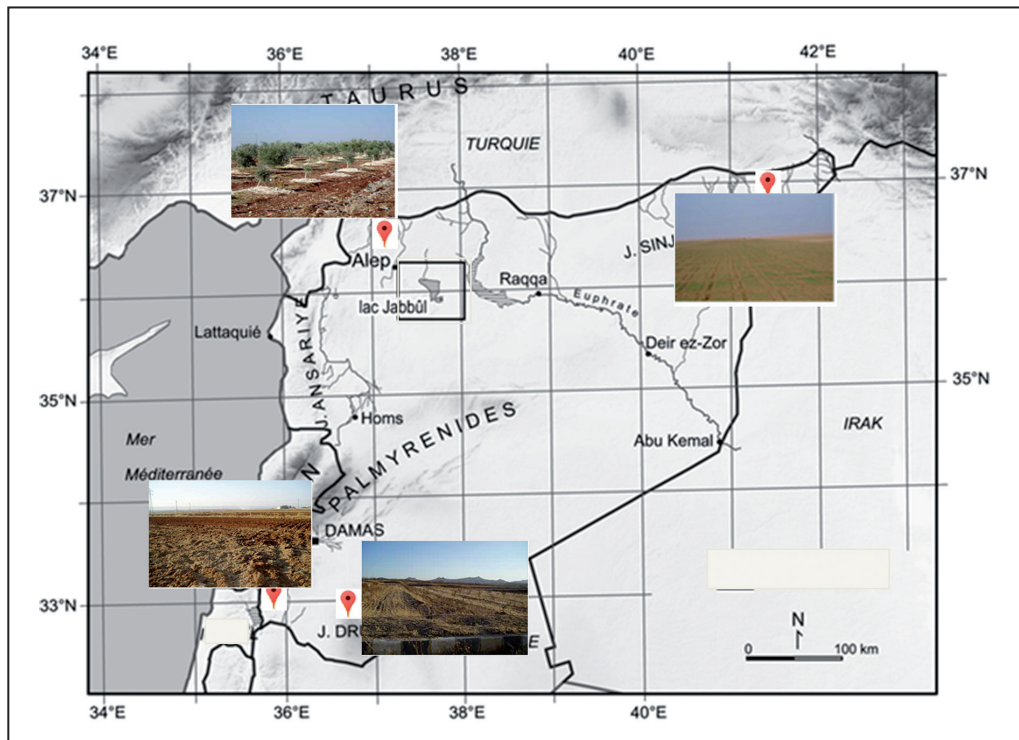
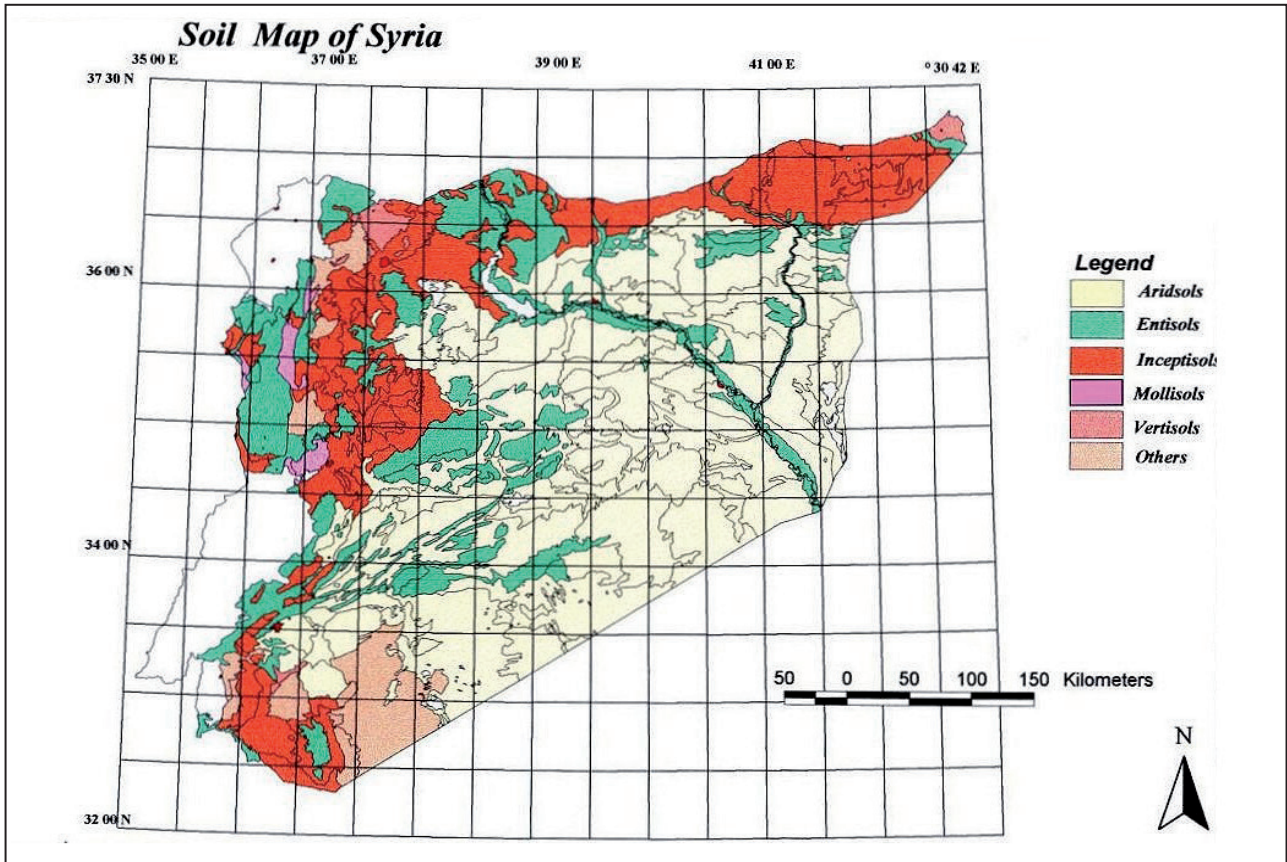
## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Les sols étudiés

Les échantillons de sol ont été prélevés en Syrie entre les latitudes 32 et 37°N et les longitudes 35 à 42°E (*figure 1b*). Le climat est de type méditerranéen à méditerranéen dégradé, semi-aride ou aride (Rigot, 2006). Excepté au nord-ouest et à l'ouest, le climat est de type méditerranéen le long de la côte, la continentalité et l'aridité contribuent à une dégradation rapide du climat méditerranéen quand on s'éloigne de la côte. Le pays tout entier connaît une très longue saison sèche estivale et chaude avec une température pouvant atteindre 40°C, et les pluies hivernales décroissent lorsque l'on s'éloigne du littoral. Un ensemble de 30 horizons (16 horizons A et L et 14 horizons E, B ou C) issu de sols appartenant à quatre sites a été prélevé de telle façon à rendre compte de plusieurs zones agro-climatiques de Syrie. Les sols échantillonnés sont développés sur des matériaux parentaux carbonatés et volcano-sédimentaires (roches basaltiques), et appartiennent à des sols de type Aridisol, Inceptisol, et Vertisol (Ilaiwi, 1980; Yuksel, 1982; Land Classification and Soil Survey of the Syrian Arab Republic, 1982) ou Calcisol, Gypsisol, Inceptisol et Vertisol (van Liere, 1995) (*figure 1a*). Pour chaque horizon échantillonné, la composition granulométrique sans décarbonatation, la densité apparente des mottes et horizons, la teneur en carbone organique, la teneur en CaCO<sub>3</sub> et la capacité d'échange cationique (CEC) ont été déterminées (Baize, 2000; Bruand et Tessier, 2000). Pour la détermination des propriétés de rétention en eau, des échantillons ont été prélevés sous la forme des volumes non perturbés (blocs de dimensions décimétriques) lorsque le sol était en conditions hydriques proches de la capacité au champ (rpendant les mois de décembre et janvier). Les teneurs en eau volumiques aux 7 valeurs de potentiel -10 hPa ( $pF = 1$ ), -33 hPa ( $pF = 1,5$ ), -100 hPa ( $pF = 2$ ), -330 hPa ( $pF = 2,5$ ), -1000 hPa ( $pF = 3$ ), -3300 hPa ( $pF = 3,5$ ), -15000 hPa ( $pF = 4,2$ ), ont été réalisées en utilisant des dispositifs pneumatiques (Bruand *et al.*, 1996).

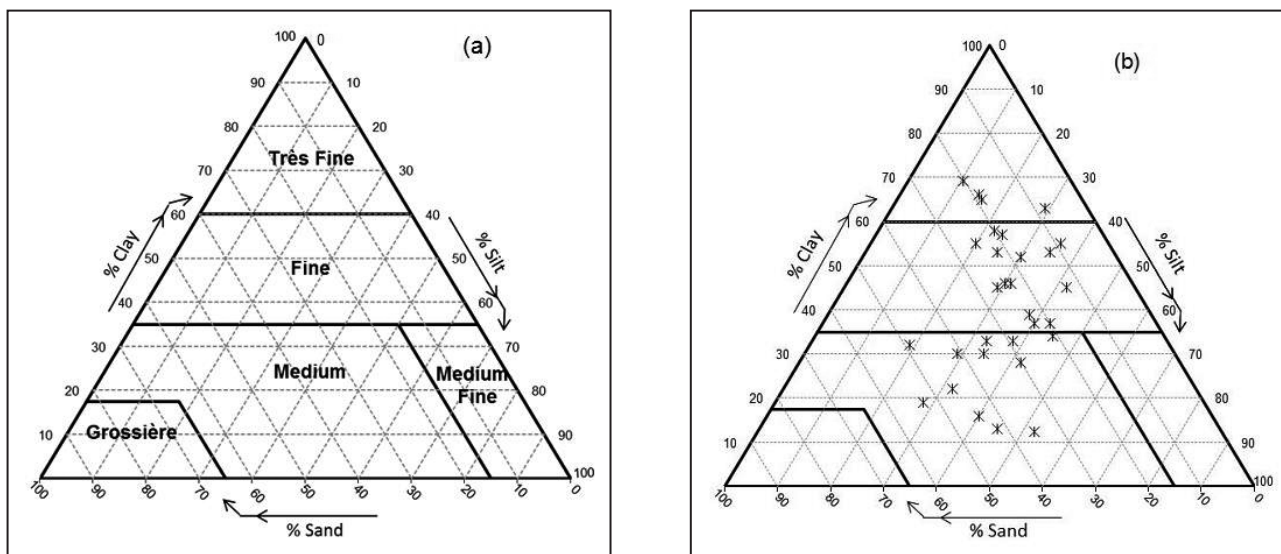
Figure 1 - Carte des sols de Syrie (a) et localisation des échantillons (b) prélevés (d'après Ilaoui, 1980; Rigot, 2006).

Figure 1 - Soil map of Syria and location of the sampling sites (after Ilaoui, 1980; Rigot, 2006).



**Figure 2** - Triangle de texture utilisé (Commission of the European Communities, 1985) (a), texture des échantillons utilisés pour tester la validité des FPT et CPT sélectionnées (b).

**Figure 2** - Texture triangle used (Commission of the European Communities, 1985) (a), texture of the samples used to test the validity of the selected FPT and CPT (b).



**Tableau 1** - Coefficients de régression (a' et b') et coefficients de détermination (R<sup>2</sup>) enregistrés pour les FPT utilisant la teneur en eau volumique à la capacité au champ comme prédicteur (Al Majou et al., 2008a).

**Table 1** - Regression coefficients a' and b', and coefficient of determination (R<sup>2</sup>) recorded for the PTFs established by simple regression by using the volumetric water content at field capacity as predictor (Al Majou et al., 2008a).

		Teneur en eau volumique (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )						
		θ1,0	θ1,5	θ2,0	θ2,5	θ3,0	θ3,5	θ4,2
<b>FPT sans stratification en fonction de la texture</b>								
Toutes textures	a'	0,0745***	0,0385***	-0,0091	-0,0329***	-0,0673***	-0,0611***	-0,0593***
	b'	0,8766***	0,9394***	1,0286***	1,0164***	1,0252***	0,8851***	0,7535***
	R <sup>2</sup>	0,77	0,86	0,90	0,87	0,79	0,66	0,52
<b>FPT après stratification en fonction de la texture</b>								
Très Fine	a'	-0,0516	0,0467	0,0584	0,0580	0,0724	0,1946***	0,0801
	b'	1,2359***	0,9515***	0,8915***	0,8386***	0,7639***	0,3733**	0,5910***
	R <sup>2</sup>	0,87	0,85	0,87	0,85	0,85	0,59	0,69
Fine	a'	0,0391	0,0410*	0,0165	0,0304	0,0192	0,0603**	0,1184***
	b'	0,9827***	0,9473***	0,9677***	0,8665***	0,8437***	0,6415***	0,3789***
	R <sup>2</sup>	0,81	0,86	0,86	0,78	0,79	0,67	0,44
Medium	a'	0,1180***	0,0901***	0,0607***	0,0471**	0,0410*	0,0536**	0,0706**
	b'	0,7207***	0,7618***	0,7991***	0,7479***	0,6735***	0,5022***	0,2908**
	R <sup>2</sup>	0,48	0,60	0,69	0,65	0,55	0,39	0,11

$\theta h = a' + (b' \times q_{FC})$  avec  $q_h$ : teneur en eau volumique (cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>) au potentiel matriciel h, et  $q_{FC}$ : teneur en eau volumique (cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>) à la capacité au champ;

\*\*\* P = 0,001; \*\* P = 0,01; \* P = 0,05.

**Tableau 2** - CPT par classe de texture (texturale), de texture et de densité apparente (texturo-structurale) et de texture et densité apparente (texturo-structurale) après stratification en fonction du type d'horizon sélectionnées (Al Majou *et al.*, 2008b).

**Table 2** - Selected class-PTFs by class of texture (textural), of both texture and bulk density (texturo-structural), and of both texture and bulk density (texturo-structural) after stratification by type of horizon (topsoil and subsoil) (Al Majou *et al.*, 2008b).

Texture	Da (g, cm <sup>-3</sup> )	Teneur en volumique (cm <sup>3</sup> , cm <sup>-3</sup> )						
		θ1,0	θ1,5	θ2,0	θ2,5	θ3,0	θ3,5	θ4,2
<b>CPT texturales</b>								
Très Fine		0,457	0,439	0,426	0,404	0,387	0,352	0,327
Fine		0,405	0,390	0,374	0,351	0,333	0,299	0,266
Medium		0,336	0,318	0,300	0,273	0,244	0,204	0,164
<b>CPT texturo-structurales</b>								
Très Fine	1,30 ≤ Db < 1,50	0,463	0,443	0,430	0,408	0,386	0,346	0,330
Fine	1,20 ≤ Db < 1,40	0,444	0,429	0,411	0,380	0,364	0,325	0,281
Medium	1,20 ≤ Db < 1,40	0,361	0,340	0,320	0,285	0,253	0,202	0,154
<b>CPT texturo-structurales (horizons de surface)</b>								
Très Fine	1,10 ≤ Db < 1,30	0,468	0,450	0,431	0,402	0,378	0,332	0,293
Fine	1,20 ≤ Db < 1,40	0,453	0,431	0,410	0,382	0,378	0,324	0,293
Medium	1,20 ≤ Db < 1,40	0,372	0,353	0,335	0,302	0,270	0,214	0,164
<b>CPT texturo-structurales (horizons de subsurface)</b>								
Très Fine	1,30 ≤ Db < 1,50	0,463	0,443	0,430	0,408	0,386	0,346	0,330
Fine	1,20 ≤ Db < 1,40	0,440	0,429	0,411	0,379	0,358	0,325	0,276
Medium	1,20 ≤ Db < 1,40	0,340	0,317	0,293	0,254	0,222	0,179	0,134

## Les FPT et CPT testées

Un jeu de fonctions de pédotransfert (FPT) et de classes de pédotransfert (CPT) développé par Al Majou *et al.* (2008a et b) pour les sols de France a été sélectionné. Elles correspondent aux FPT et CPT ayant conduit aux meilleures prédictions lorsqu'elles ont été appliquées à des sols localisés en France:

- des FPT établies en utilisant la teneur en eau volumique à la capacité au champ *in situ* sans stratification préalable en fonction de la texture dans le triangle de texture européen (FPT sans stratification texturale), et après stratification en fonction de la texture dans le triangle de texture (FPT texturales) (CEC, 1985) (*figure 2a, tableau 1*);
- des CPT établies pour chaque classe de texture dans le triangle de texture européen (CPT texturales), puis pour chaque classe de texture et de densité apparente (CPT texturo-structurales), et enfin pour chaque classe de texture et de densité apparente après stratification en fonction du type d'horizon (surface et subsurface) (*figure 2a, tableau 2*);
- enfin, des CPT établies, après stratification par classe de tex-

ture dans le triangle de texture européen (CPT texturales continues) (CEC, 1985), pour les paramètres du modèle de courbe de rétention en eau de van Genuchten (van Genuchten, 1980) obtenues en utilisant le programme RETC (van Genuchten *et al.*, 1991) (*figure 2a, tableau 3*).

## Critères utilisés pour évaluer l'efficacité des FPT et CPT

Pour discuter les performances des FPT et CPT utilisées, nous avons utilisé plusieurs types de critères:

- L'erreur moyenne de prédiction (EMP) qui renseigne sur le biais de l'estimation. Elle est calculée à l'aide de la relation suivante:

$$EMP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_{pi} - \theta_{mi})$$

avec n, nombre de points de potentiel pour chaque horizon (n = 7 dans le cas de cette étude),  $\theta_{pi}$ , teneur en eau volumique

**Tableau 3** - CPT texturales sélectionnées pour les paramètres du modèle de courbe de rétention en eau de van Genuchten (1980) en fonction du type d'horizon (surface et subsurface) (Al Majou *et al.*, 2008a).

**Table 3** - Selected textural class-PTFs for the parameters of the van Genuchten's model according to the type of horizon (topsoil and subsoil) (Al Majou *et al.*, 2008a).

	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$	$m$
Horizons de surface					
Très Fine	0,010	0,587	5,9433	1,0658	0,0617
Fine	0,010	0,477	0,6153	1,0652	0,0612
Medium	0,010	0,428	0,4467	1,1000	0,0909
Horizons de subsurface					
Très Fine	0,010	0,472	0,0745	1,0499	0,0475
Fine	0,010	0,437	0,1334	1,0632	0,0594
Medium	0,010	0,388	0,1851	1,0992	0,0903

prédite au potentiel  $i$ ,  $\theta_{mi}$ , teneur en eau volumique mesurée au potentiel  $i$ .

- L'écart type de prédiction (*ETP*) qui renseigne sur la précision de l'estimation. Plus il sera faible, plus l'estimation pourra être considérée comme précise. Il se calcule à l'aide de la relation suivante:

$$ETP = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(\theta_{pi} - \theta_{mi}) - EMP]^2 \right\}^{1/2}$$

- L'erreur quadratique moyenne (*EQM*). Bien qu'elle ne permette pas de séparer biais et précision, elle est considérée comme un estimateur global de qualité de la prédiction et ce critère a été très fréquemment utilisé dans la littérature sur les fonctions de pédotransfert. Il se calcule à l'aide de la relation suivante:

$$EQM = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_{pi} - \theta_{mi})^2 \right\}^{1/2}$$

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Les caractéristiques des sols

Les horizons étudiés ne possèdent pas d'éléments grossiers (*tableau 4*) et sont de texture « Fine », « Très Fine » et « Medium » dans le triangle de texture Européen (CEC, 1985) (*figure 2b*). Si l'on attribue les valeurs de capacité d'échange cationique essentiellement à la phase argileuse, celles-ci indiquent que les minéraux argileux de type smectite dominant (*tableau 4*). Des analyses en diffraction des rayons X réalisées pour 12 horizons le confirment (non publié).

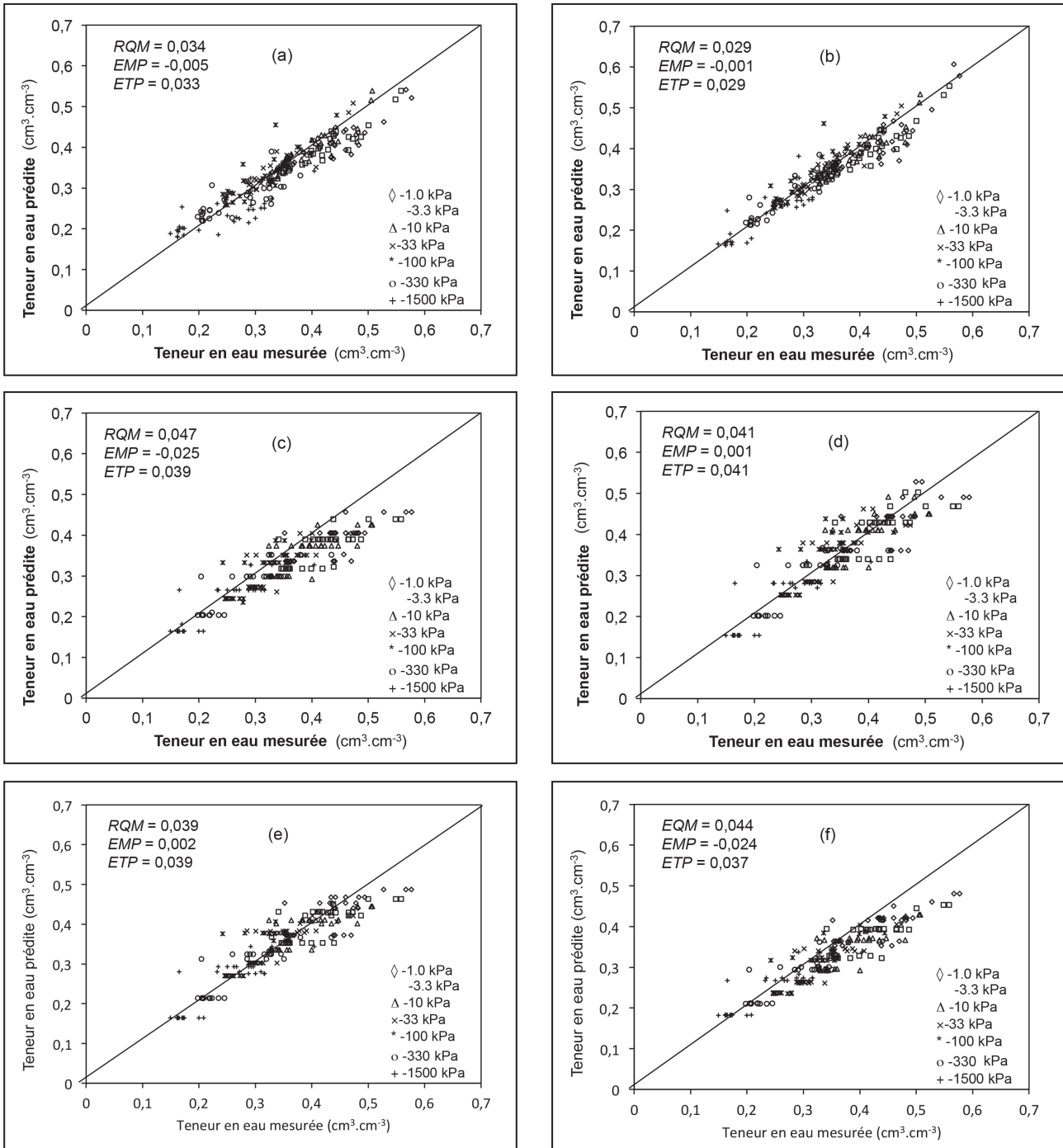
### Biais de prédiction

Les valeurs d'EMP indiquent que les biais de prédiction varient de -0,025 à 0,002  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  (*figure 3*). Le biais de prédiction en valeur absolue le plus faible est enregistré avec les CPT par classe de texture et de densité apparente (CPT texturo-structurales) ( $|EMP| = 0,001 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ , *figures 3d*), et avec les FPT utilisant la teneur en volumique à la capacité au champ après stratification par classe de texture (FPTtexturales) ( $|EMP| = 0,001 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$  *figures 3b*) alors que le biais le plus élevé l'est avec les CPT utilisant la classe de texture comme prédicteur (CPT texturales) ( $|EMP| = 0,025 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ , *figures 3c*). Pour les CPT texturales, la sous-estimation de la teneur en eau s'expliquerait par le nombre réduit d'horizons de texture Très Fine et Fine, en particulier pour les horizons de surfaces (A et L) dans l'ensemble de sols utilisé pour établir les CPT proposées par Al Majou *et al.* (2008b) alors qu'ils sont nombreux dans l'ensemble de sols syrien étudié. Lorsque l'on stratifie par classe de texture et de densité apparente (CPT Texturo-structurales), on enregistre une diminution du biais de prédiction en valeur absolue ( $|EMP|$  décroît de 0,025 à 0,001  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ , *figures 3c et d*) conformément à ce qui avait été observé par Al Majou *et al.* (2008b), la densité apparente permettant de rendre compte de l'état structural et conduisant à un biais plus faible.

Avec les FPT qui utilisent la teneur en eau à la capacité au champ comme prédicteur (Al Majou *et al.*, 2008a), le biais de prédiction est en valeur absolue faible à très faible, que ce soit sans ou avec stratification par classe de texture ( $|EMP| = 0,005$  et 0,001  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ , *figures 3a et b*). Ce faible biais de prédiction s'explique par le fait que la teneur en eau à la capacité au champ peut être considérée comme étant l'approximation d'un point de la courbe de rétention en eau. Ce plus faible biais de prédiction enregistré après stratification par classe de texture (FPT texturales) (*figure 3b*) serait liée au fait que la forme de la courbe de

**Figure 3** - Validité des différentes FPT (a et b) et CPT (c, d, e, f) sélectionnées: FPT utilisant la teneur en eau à la capacité au champ comme prédicteur sans aucune stratification préalable (a) et après stratification par classe de texture (b) (Al Majou *et al.*, 2008a); CPT par classe de texture (c), par classe de texture et de densité apparente (d) et classe de texture et de densité apparente après stratification par type d'horizon (e) (Al Majou *et al.*, 2008b); CPT par classe de texture pour les paramètres du modèle de courbe proposé par van Genuchten (1980) (f) (Al Majou *et al.*, 2008a).

**Figure 3** - Validity of the different selected FPTs (a, b) and CPTs (c, d, e, f): FPTs without any stratification (a) and after stratification by class of texture (b) (Al Majou *et al.*, 2008a); CPTs by class of texture (c), by class of texture and bulk density (d), and by class of texture and bulk density after stratification according to the type of horizon (e) (Al Majou *et al.*, 2008b); CPTs by class of texture for the parameters of the van Genuchten's model (1980) (f) (Al Majou *et al.*, 2008a).





**Tableau 4** - Caractéristiques de l'ensemble de sols étudié.**Table 4** - Characteristics of the soils selected.

	Éléments grossiers (%)	Granulométrie (%)			CO	CaCO <sub>3</sub>	CEC	Da	Teneur en eau volumique (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )						
		>2000	<2	2-50					2-50	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup>	g.cm <sup>-3</sup>	q <sub>1,0</sub>	q <sub>1,5</sub>
	µm														
Moyenne	<1	41,4	32,8	27,8	1,18	63,7	36,5	1,22	0,436	0,417	0,388	0,344	0,307	0,277	0,239
Ecart type	–	16,0	9,8	11,7	0,96	77,9	7,3	0,10	0,061	0,058	0,055	0,050	0,051	0,062	0,067
Minimum	–	12,2	11,6	8,0	0,36	7,2	23,7	1,04	0,352	0,341	0,324	0,285	0,242	0,198	0,149
Maximum	–	69,1	53,3	53,0	3,9	310,0	49,2	1,41	0,577	0,559	0,507	0,474	0,444	0,435	0,404

rétention en eau varie en fonction de la texture, un point de la courbe de rétention n'ayant pas le même sens en fonction de la texture quant à la forme de la courbe de rétention en eau.

Enfin, les sous-estimations obtenues (EMP = -0,024 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>, figure 3f) avec les CPT par classe de texture pour les paramètres du modèle de van Genuchten (1991) (CPT texturales continues) peuvent s'expliquer par l'imprécision initiale de la teneur eau « mesurée » estimée par la fonction de van Genuchten. Elles seraient liées aussi à la nature plus smectitique de la phase argileuse dans les horizons étudiés que dans ceux utilisés par Al Majou *et al.* (2008a), la quantité d'eau retenue étant alors plus élevée que prédit par les CPT établies par ces mêmes auteurs.

### Précision des prédictions

La précision de la prédiction est la plus élevée avec les FPT en utilisant la teneur en eau volumique à la capacité au champ, et une légère amélioration est enregistrée lorsque l'on stratifie par classe de texture à (0,029 ≤ ETP ≤ 0,033 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>) (figures 3a et b). Elle est en effet plus faible avec les CPT sélectionnées (0,037 ≤ ETP ≤ 0,041 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>) (figure 3c, d, e et f). Cette moindre précision des CPT par rapport aux FPT peut être liée à la très large gamme de composition granulométrique dans les classes de texture du triangle Européen. A titre d'exemple, rappelons qu'un horizon de texture Fine peut avoir une teneur en argile variant de 35 à 60 %, en limon de 40 à 60 % et en sable de 0 à 65 %. Des valeurs moyennes au sein de telles classes de texture ne peuvent être que des prédicteurs de précision limitée.

### Erreur quadratique moyennes des prédictions

L'erreur quadratique moyenne (EQM) la plus faible est enregistrée avec les FPT utilisant la teneur en eau volumique à la

capacité au champ avec stratification en fonction de la texture, (EQM = 0,029 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>) (figure 3b). C'est en effet pour ces FPT que le biais de prédiction (EMP) et la meilleure précision (ETP) ont été enregistrés (figure 3). Les CPT étudiées ne conduisent pas à des EQM sensiblement différentes (0,039 ≤ EQM ≤ 0,047 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>) (figures 3c, d, e et f). C'est cependant avec les CPT établies par classe de texture et de densité apparente, et après stratification par type d'horizon (surface et subsurface) que l'EQM le plus faible est enregistrée (EQM = 0,039 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>) (figure 3e).

## SYNTHESE ET CONCLUSION

Ce travail s'était fixé pour objectif de discuter de la validité de différentes FPT et CPT établies pour des sols du territoire français lorsqu'elles sont utilisées pour prédire les propriétés de rétention en eau de sols de Syrie. L'étude des performances des FPT sélectionnées dans cette étude a mis en évidence un faible biais variant en valeur absolue de 0,1 à 0,5 % volumique avec une précision variant de 2,9 à 3 % volumique, lorsque la teneur en eau volumique à la capacité au champ sans et après stratification en fonction de la texture, est utilisée comme prédicteur, traduisant ainsi une qualité satisfaisante des prédictions de la teneur eau des sols de Syrie étudiés.

Concernant les CPT, la meilleure estimation a été enregistrée avec les CPT texturo-structurales, et avec les CPT texturo-structurales après stratification par type d'horizon (biais compris entre 0,1 et 0,2 % volumique avec une précision variant de 3,9 à 4 % volumique). Une estimation de moindre qualité a été enregistrée avec les CPT établies par classe de texture (CPT texturales), et avec CPT texturales pour les paramètres du modèle de van Genuchten, (CPT texturales continues) sans doute en raison d'une différence de minéralogie des argiles entre les sols syriens de cette étude et ceux utilisés

pour établir les FPT et/ou CPT sélectionnées. Bien que les valeurs des biais de prédiction et précisions enregistrées avec les FPT et CPT étudiées ne puissent être comparées avec celles enregistrées avec ces mêmes FPT et CPT lorsqu'elles ont été testées sur des sols du territoire français, le nombre d'horizons dans les échantillons test étant très supérieur au nombre d'horizons utilisé dans notre étude, ces valeurs sont néanmoins très proches.

Enfin, il ressort de cette étude que bien que les sols syriens se soient formés dans un contexte pédoclimatique différent de celui à l'origine des sols utilisés pour développer les FPT et CPT sélectionnées, la qualité des prédictions est satisfaisante. Cela serait dû au fait que les grandeurs utilisées comme prédicteurs sont suffisamment intégratrices des différences pédoclimatiques pour rendre compte du contexte pédoclimatique. De tels résultats sont encourageants car ils révèlent que des FPT et CPT sont extrapolables à d'autres contextes pédoclimatiques que celui pour lequel elles ont été développées.

## REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une coopération scientifique franco-syrienne. Elle a été soutenue par l'ambassade de France à Damas, l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) et le Labex Voltaire (ANR-10-LABEX-100-01).

## BIBLIOGRAPHIE

- Al Majou H., Bruand A., Nicoulaud B., Duval O., Dupont J., 2005 - Premiers Résultats de Validation des Classes de Pédotransfert établies à partir de la Base de Données SOLHYDRO 1.0: Application à des sols de la Région Centre. *Etude et Gestion des Sols*, vol. 12, n° 3 pp. 221-228.
- Al Majou H., Bruand A., Duval O., Cousin I., 2007 - Variation of the water retention properties of soils: validity of class-pedotransfer functions. *C.R. Geoscience*, 339, pp. 632-639.
- Al Majou H., Bruand A., Duval O., 2008a - Use of in situ volumetric water content at field capacity to improve prediction of soil water retention properties. *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 88, n° 4, pp. 533-541.
- Al Majou H., Bruand A., Duval O., Le Bas C., Vautier A., 2008b - Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and the type of horizon. *Soil Use and Management*, vol. 24, n° 4, pp. 383-391.
- Baize D., 2000 - Guide des analyses en pédologie. INRA Paris,
- 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, 22-24, pp. 981-992.
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darhout R., Jamagne M., 1996 - Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols: Importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, vol. 3, n° 1, pp. 27-40.
- Bruand A., Tessier D., 2000 - Water retention properties of the clay in soils developed on clayey sediments: Significance of parent material and soil history. *European Journal of Soil Science*, vol. 51, n° 4, pp. 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*, vol. 19, n° 3, pp. 232-242.
- Bruand A., Duval O., Cousin I., 2004 - Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO: Une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, vol. 11, n° 3, pp. 323-334.
- Commission of the European Communities (CEC), 1985 - Soil map of the European Communities. Scale 1: 1000000. CEC-DGVI, Luxembourg.
- Cornelis W.M., Ronsyn J., Van Meirvenne M., Hartmann R., 2001 - Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. *Soil Science Society of America Journal*, 65: 638 - 648. doi: 10.2136/sssaj2001.653638x.
- Dridi B., Dilmi A., 2011 - Poids des différentes caractéristiques des sols dans l'estimation de leur rétention en eau. *Etude et Gestion des Sols*, vol.18, n° 4, pp. 247-258.
- van Genuchten M.Th., 1980 - A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 44, pp. 892-898.
- van Genuchten M.Th., Leij F.J., Yates S.R., 1991 - The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. USDA Salinity Laboratory, Riverside, CA, United States Environmental Protection Agency, document EPA/600/2-91/065
- Gupta S.C., Larson W.E, 1979 - Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent and bulk density. *Water Resour. Res.*, 15: 1633 -1635. doi: 10.1029/WR015i006p01633.
- Khlosi M., Cornelis W.M., Douaik A., Hazzouri A., Habib H. Gabriels, D., 2013 - Exploration of the Interaction between Hydraulic and Physicochemical Properties of Syrian Soils. *Vadose Zone Journal*, 12 (4). doi: 10.2136/vzj2012.0209.
- Ilaiwi M., 1980 - ACSAD report on soil of Syria and Lebanon scale 1:1000000. Land Classification and Soil Survey of the Syrian Arab Republic, 1982 - (Reconnaissance Soil Survey of Syria, 1:500,000). Louis Berger International Inc., Remote Sensing Institute South Dakota University, United States Agency for International Development, Washington DC, Vol 2.
- 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, pp. 225-253.
- Mohawesh O., 2013 - Assessment of pedotransfer functions (PTFs) in predicting soil hydraulic properties under arid and semi-arid environments. *Journal of Agriculture Sciences*, vol. 9, n° 4, pp. 475-492.
- Nasta P., Kamai T., Chirico G.B., Hopmans J., Romano R., 2009 - Scaling soil water retention functions using particle-size distribution. *J. Hydrol.* 374: 223 -234. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.06.007.
- Nemes A., 2002 - Unsaturated soil hydraulic database of Hungary: HUNSODA, Agrokémia és Talajtan, 51, pp. 17-26.
- Nemes A., Schaap M.G., Wösten J.H.M., 2003 - Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. *Soil Science Society of America Journal*, 67, pp. 1093 -1102.
- Nemes A., Timlin, D.J., Pachepsky, Y.A., Rawls. W.J., 2009 - Evaluation of the Rawls *et al.* (1982) pedotransfer functions for their applicability at the U.S. national scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1638 -1645. doi: 10.2136/sssaj2008.0298.
- 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.* (1996), 60: 727 -733. doi: 10.2136/sssaj.03615995006000030007x.
- Pachepsky Y.A., Rawls W.J., 1999 - Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, pp. 1748-1757.

- Pachepsky Y.A., Rawls W.J., Lin H.S., 2006 - Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma*, 131, pp. 308-316.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Saxton, K.E., 1982 - Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE*, 26, pp. 1747-1752.
- Rawls W.J., Gish T.J., Brakensiek D.L., 1991. Estimation soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Advance in Soil Science*, By Springer- VerlagNew-York Inc, 16, pp. 213-234.
- Rigot J-B., 2006 - L'évolution ralentie du milieu naturel dans la steppe aride du nord de la Syrie à l'Holocène. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, n° 4, pp. 259-274.
- Saxton K. E., Rawls W.J., 2006 - Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 70: pp. 1569-1578.
- Sommer R., Piggins C., Haddad A., Hajdibo A., Hayek P., Khalil Y. - Simulating the effects of zero tillage and crop residue retention on water relations and yield of wheat under rainfed semiarid Mediterranean conditions. *Field Crops Research*, (2012), 132, pp. 40 -52
- Van Liere W.J., 1995 - Classification and rational utilisation of soils. Report to the Government of Syria. *FAO, Rome*, 151 p.
- 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, pp. 389-403.
- 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, pp. 227-237.
- Wösten J.H.M., Lilly A., Nemes A., Le Bas C., 1999 - Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90, pp. 169-185.
- Wösten, J.H.M., Pachepsky, Y.A. Rawls, W.J., 2001 - Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251, pp. 123-150.
- Wösten J.H.M, Verzandvoort S.J.E, Leennaars J.G.B, Hoogland T, Wesseling J.G., 2013 - Soil hydraulic information for river basin studies in semi-arid regions. *Geoderma*, 195-196, pp. 79-86. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.11.021.
- Yuksel H., 1982 - Land classification/soil survey project of the Syrian Arab Republic. Contract USAID-C-1644.

