

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

A. Bruand₍₁₎, O. Duval₍₂₎ et I. Cousin₍₂₎

(1) ISTO, UMR 6113 CNRS UO, Université d'Orléans, Géosciences, BP 6759, 45067 Orléans Cedex 2

(2) INRA, Unité de Science du Sol, Centre de Recherche d'Orléans, BP 20619, 45166 Olivet Cedex

RÉSUMÉ

La base de données SOLHYDRO regroupe un ensemble de mesures des propriétés de rétention en eau acquies en France sur des horizons de sols depuis une quinzaine d'années. Cette base de données est utilisée pour proposer des propriétés de rétention en eau des horizons de sol en fonction de leurs caractéristiques. Dans un premier temps, des valeurs de teneur en eau volumique à 7 potentiels de l'eau variant de -10 ($\theta_{1,0}$) à $-15\,000$ ($\theta_{4,2}$) hPa sont proposées en utilisant le type d'horizon (horizons A d'une part, horizons E, B et C d'autre part) et sa texture. Dans un second temps, pour accroître la précision et réduire le biais lors de l'estimation, des valeurs de teneur en eau volumique sont proposées en utilisant cette fois le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. Une estimation par excès et par défaut de la réserve en eau utile est aussi proposée dans chaque cas. Ces différents jeux de valeurs constituent une première proposition qui a vocation à être précisée et élargie lorsque la base SOLHYDRO disposera d'un nombre de données supplémentaires suffisant.

Mots clés

Classe de pédotransfert, réserve en eau utile, capacité au champ, point de flétrissement permanent

SUMMARY

ESTIMATION OF WATER RETENTION PROPERTIES USING THE DATABASE SOLHYDRO: A proposition combining the type of horizon, its texture and its bulk density.

The database SOLHYDRO groups water retention properties of soils that have been measured since fifteen years. That database was first used to establish class pedotransfer functions for the water retention properties by grouping horizons according to the horizon type (A horizons on one hand, E, B and C horizons on the other hand) and its texture (table 1). Then, in order to increase the accuracy and reduce the bias of the prediction, another set of class pedotransfer functions was established by grouping according to the type of horizon, its texture and bulk density (figures 2 and 3). Thus, for classes combining either the horizon type and its texture, or the horizon type,

its texture and bulk density, volumetric water contents at 7 water potentials ranging from -10 hPa ($\theta_{1,0}$) to -15000 hPa ($\theta_{4,2}$) are proposed (tables 1 and 3). An over- and underestimation of the available water capacity is also proposed for each of these classes (table 2). Finally, these class pedotransfer functions correspond to a first proposition that will be improved when new data are available in SOLHYDRO.

Key-words

Class pedotransfer function, available water capacity, field capacity, permanent wilting point

RESUMEN

ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE RETENCIÓN EN AGUA DE LOS SUELOS A PARTIR DEL BANCO DE DATOS SOLHYDRO : Una primera propuesta que combina el tipo de horizonte, su textura y su densidad aparente.

El banco de datos SOLHYDRO agrupa un conjunto de medidas de las propiedades de retención en agua adquiridas en Francia en los horizontes de suelos desde una quincena de años. Este banco de datos se utiliza para proponer propiedades de retención en agua de los horizontes de suelos en función de sus características. En un primer tiempo, valores de contenidos en agua volúmicos a 7 potenciales de agua que varían de -10 a -1500 hPa son propuestas usando el tipo de horizonte (horizontes A de un lado, horizontes E, B y C del otro lado) y su textura. En un segundo tiempo, para aumentar la precisión y disminuir el error de la estimación, valores en agua volúmica son propuestas usando esta vez el tipo de horizonte, su textura y su densidad aparente. Una estimación por exceso y por falta de la reserva en agua aprovechable es así propuesta en cada caso. Estos diferentes juegos de valores constituyen una primera propuesta que tiene vocación a ser precisada y alargada cuando el banco SOLHYDRO tendrá un número de datos suplementarios suficientes.

Palabras clave

Clase de pedotransferencia, reserva en agua aprovechable, capacidad de campo, punto de marchitez.

Après avoir réalisé de nombreuses déterminations dans le cadre des travaux de cartographie des sols du département de l'Aisne, Jamagne *et al.* (1977) publiaient une synthèse sous la forme d'un tableau faisant correspondre aux classes du triangle de texture des valeurs de teneur en eau massique à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent. Des valeurs de densité apparente étaient aussi proposées pour chaque classe de texture, permettant ainsi la conversion des teneurs en eau massiques en teneur en eau volumique et, in fine, le calcul de la réserve en eau utile en mm par cm de sol. Le tableau publié par Jamagne *et al.* (1977) repris par Baize (2000), a été très largement utilisé en France depuis sa publication, en particulier par les pédologues et les agronomes. Aucun autre jeu de données n'ayant été proposé jusqu'à ce jour pour l'ensemble des classes du triangle de texture, il est encore très fréquemment utilisé aujourd'hui, même s'il a été montré que certaines valeurs proposées pouvaient conduire à une estimation très biaisée des propriétés de rétention en eau, en particulier pour les textures argileuses et les potentiels élevés (i.e. faibles pF) (Bruand *et al.*, 1996 et 2002).

Durant les trois dernières décennies, de nombreuses propositions ont été faites dans la littérature internationale pour estimer les propriétés de rétention en eau (e.g. Hall *et al.*, 1977; Gupta et Larson, 1979; Rawls *et al.*, 1982 et 1983; Bouma et van Lanen, 1987; Bastet *et al.*, 1998 et 1999; Bastet, 1999; Wösten *et al.*, 2001). Afin d'améliorer le jeu de données proposé par Jamagne *et al.* (1977), un programme de mesures a été développé à l'INRA à partir des années 90. Il a permis la constitution d'une base de données (SOLHYDRO) qui rassemble l'ensemble de ces mesures et qui est gérée par l'Unité de Science du Sol de l'INRA d'Orléans. Outre leurs teneurs en eau massiques à différents potentiels mesurés au laboratoire, les échantillons sont renseignés en termes de type d'horizons, de classes de textures et de densité apparente. Cette base de données

a été utilisée pour plusieurs études (Bruand *et al.*, 1996, 2002 et 2003). Actuellement, le nombre d'horizons caractérisés par des teneurs en eau à 7 potentiels est d'environ 340 dans SOLHYDRO. Seuls 85 horizons A et 217 horizons E, B et C non ou faiblement carbonatés ont été utilisés dans cette étude. Notre objectif est de reprendre les données disponibles dans SOLHYDRO pour proposer des jeux de valeurs de teneur en eau à différentes valeurs de potentiel en fonction de la composition des sols. De tels jeux de données seront tout d'abord proposés en ne prenant en compte que le type d'horizon et sa texture, puis le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. Les classes de texture utilisées sont celles du triangle de l'Aisne. L'ensemble des données disponible dans SOLHYDRO ne reflétant pas l'ensemble des classes granulométriques, les valeurs proposées dans cet article sont une première proposition qui évoluera en fonction des nouvelles données qui viendront l'enrichir. Par conséquent, il s'agit d'un travail en cours sur lequel nous faisons le point tant la demande en provenance des pédologues et agronomes est grande pour disposer de nouveaux outils d'estimation des propriétés de rétention en eau.

METHODES UTILISEES POUR MESURER LA DENSITE APPARENTE ET LES PROPRIETES DE RETENTION EN EAU

Les méthodes employées pour déterminer les propriétés de rétention ont été publiées dans plusieurs articles auxquels nous renvoyons le lecteur (Bruand *et al.*, 1996; Bruand *et al.*, 2002). Rappelons cependant que les échantillons sont prélevés dans une fosse creusée en période hivernale lorsque le sol se trouve dans un état hydrique proche de la capacité au champ. Ils sont prélevés sous la forme de blocs ou de mottes de dimensions décimétriques,

Figure 1 - Dispositif de cellule à pression utilisé pour mesurer la teneur en eau des mottes soumises à un potentiel donné.

Figure 1 - Pressure cell apparatus used to measure the water content of clods at different potentials.

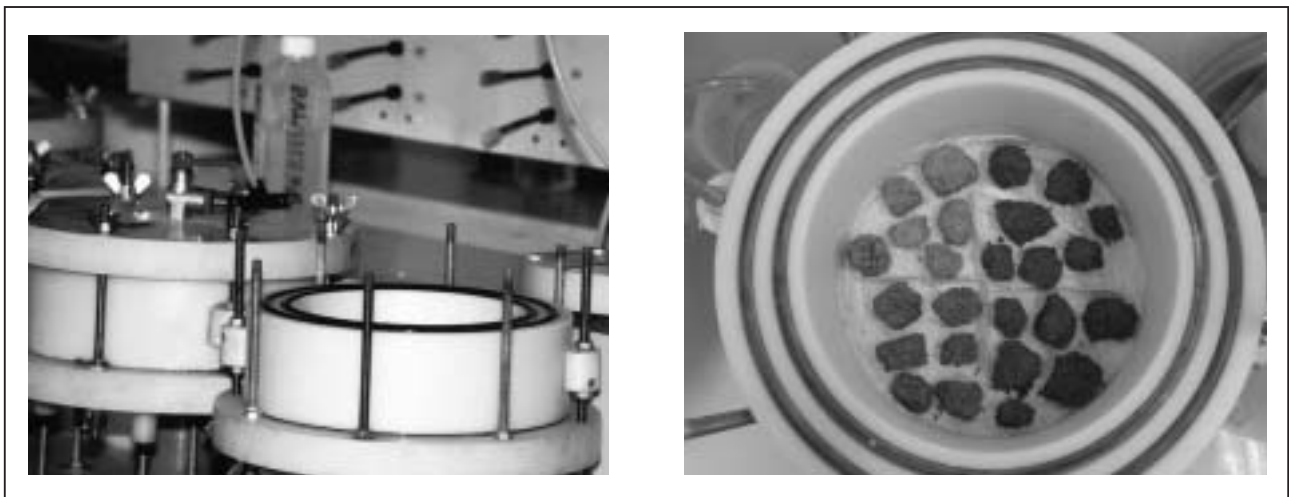


Tableau 1 - Teneurs en eau volumiques moyennes en fonction du type d'horizon et de la texture**Table 1** - Mean volumetric water contents according to both the horizon type and texture

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

* densité apparente moyenne des horizons et écarts types correspondants

conservés dans cet état dans des boîtes hermétiques à une température de l'ordre de 4 – 5 °C de façon à réduire l'activité biologique. Les analyses sont ensuite effectuées sur des échantillons de taille pluri-centimétrique (échantillon dénommé communément « motte ») à structure intacte et n'ayant jamais été ni séchés, ni réhumectés (figure 1). La densité apparente des mottes (D_a^m) dans l'état correspondant à celui lors du prélèvement a été mesurée à l'aide de la méthode au pétrole (Monnier *et al.*, 1973) excepté pour certains

horizons sablo-argileux, sablo-limoneux et sableux. Pour ces horizons, D_a^m a été déduite des mesures effectuées sur des cylindres de volume proche de celui des mottes. La densité apparente des horizons (D_a^h) a été mesurée à l'aide de cylindres de 500 ou 1 236 cm³. Les teneurs en eau volumiques présentées ci-après sont calculées à partir des valeurs de teneur en eau massique déterminées au laboratoire et de D_a^h .

ESTIMATION DES PROPRIETES DE RETENTION EN EAU EN UTILISANT LE TYPE D'HORIZON ET SA TEXTURE

Teneur en eau volumique moyenne à différents potentiels

Nous avons dans un premier temps regroupé les horizons en deux catégories, les horizons A d'une part et les horizons E, B et C d'autre part, leur état structural et leur teneur en carbone organique étant suffisamment différents pour que cela justifie leur séparation. Dans un second temps et pour chaque catégorie d'horizon, nous avons regroupé les horizons en fonction de leur texture et calculé les teneurs en eau volumiques moyennes et les écarts types associés aux 7 valeurs de potentiel (*tableau 1 et annexe*).

Estimation de la réserve utile

Les comparaisons effectuées entre les valeurs de θ obtenues au laboratoire sur des échantillons non perturbés et celles mesurées sur le terrain dans des conditions proches de la capacité au champ ont montré que θ à la capacité au champ était généralement compris entre $\theta_{1,5}$ (θ à pF = 1,5) et $\theta_{2,0}$ (θ à pF = 2,0). Nous avons par conséquent calculé une approximation par excès de la réserve en eau utile en calculant $\theta_{1,5} - \theta_{4,2}$ (teneur en eau volumique à pF = 1,5 moins celle à pF = 4,2) et une autre par défaut en calculant $\theta_{2,0} - \theta_{4,2}$ (teneur en eau volumique à pF = 2,0 moins celle à pF = 4,2, *tableau 2*) à partir des valeurs proposées dans le *tableau 1*.

Si l'on compare ces approximations de la réserve en eau utile aux valeurs proposées par Jamagne *et al.* (1977), on constate que dans les deux cas, c'est-à-dire qu'elle soit calculée par excès ou par défaut, les valeurs obtenues sont plus faibles que celles proposées par Jamagne *et al.* (1977) pour les textures argileuses (ALO, AL et A) et les textures limono-argileuses (LA, LAS et LSA), que ce soit pour les horizons A ou pour les horizons E, B et C. En revanche, pour les textures sableuses (S et SL) et limoneuses (LM, LMS et LS), les valeurs obtenues sont plus élevées. Pour les textures SA et AS, les valeurs proposées sont selon les cas soit supérieures, soit inférieures. Concernant les différences avec les valeurs proposées par Jamagne *et al.* (1977), rappelons que ces valeurs étaient pour l'essentiel basées sur des mesures réalisées au laboratoire sur des échantillons de sols préalablement séchés à l'air et tamisés à 2 mm. Il est probable que l'état « perturbé » des échantillons utilisés soit pour une bonne part à l'origine des différences enregistrées. Enfin, on constate aussi que les écarts types associés aux valeurs moyennes sont élevés en raison d'états structuraux différents selon les horizons au sein d'une même classe de texture (Annexe).

ESTIMATION DES PROPRIETES DE RETENTION EN EAU EN UTILISANT LE TYPE D'HORIZON, SA TEXTURE ET SA DENSITE APPARENTE

Si l'on désire améliorer la précision et réduire le biais lors de l'estimation des propriétés de rétention en eau, il faut alors associer la densité apparente qui renseigne sur l'état structural de l'horizon. La densité apparente apparaît alors comme étant un troisième critère de regroupement (*figure 2*). Cependant, c'est ici la densité apparente de l'horizon (D_a^h) qui est proposée comme critère de classification et non celle de mottes de dimensions centimétriques (D_a^m) comme dans les études antérieures (Bruand *et al.*, 2002 et 2003). En fait, il n'y a pas contradiction avec ces études mais c'est par souci de simplification de la démarche pour l'utilisateur que nous utilisons D_a^h . En effet, le classement est encore effectué à l'aide de D_a^m , car c'est à cette échelle que la densité apparente est liée à un volume de pores qui est effectivement efficace pour la rétention de l'eau, mais nous nous sommes efforcés de rendre cette étape transparente pour l'utilisateur des jeux de valeurs que nous proposons.

Exposé de la démarche

L'analyse de la différence entre D_a^m et D_a^h a montré que les horizons A se distinguent par rapport aux horizons E, B et C. En effet, cette différence est plus élevée et plus variable pour les horizons A que pour les horizons E, B et C. Ceci est la conséquence de la présence d'un volume plus élevé de pores de grande dimension (pores structuraux liés à l'activité biologique, au travail du sol, au climat) dans les horizons A. Nous avons par conséquent séparé les horizons A des horizons E, B et C pour que le passage de D_a^m à D_a^h puisse être différent dans ces deux cas (*figure 2*). Ensuite, au sein de l'ensemble rassemblant les horizons A, puis au sein de celui rassemblant les horizons E, B et C, nous avons réparti les horizons en sous ensembles en fonction de leur texture selon les classes du triangle de texture. Enfin, lors d'une troisième étape, les horizons ont été séparés en fonction des valeurs de D_a^m de façon à constituer des classes combinant texture et D_a^m .

L'effectif d'horizons A étant très inférieur (85 horizons) à celui des horizons E, B et C (217 horizons), nous avons utilisé des classes de $\Delta D_a^m = 0,2$ pour les horizons A et de $\Delta D_a^m = 0,1$ pour les horizons E, B et C pour disposer d'au moins 3 individus pour les classes combinant des valeurs de texture et de D_a^m pour lesquelles nous proposons des valeurs de teneur en eau à différents potentiels.

Les limites de classe de D_a^m ont été fixées de telle façon à correspondre à des limites de classe de D_a^h définies au dixième de densité apparente (*étape a, figure 3*). Connaissant la différence entre D_a^m et D_a^h pour les horizons A d'une part, et les horizons E, B et C d'autre part, nous avons calculé les limites de classe de D_a^m de la façon suivante (*étape b, figure 3*):

$$D_a^m = D_a^h + \delta$$

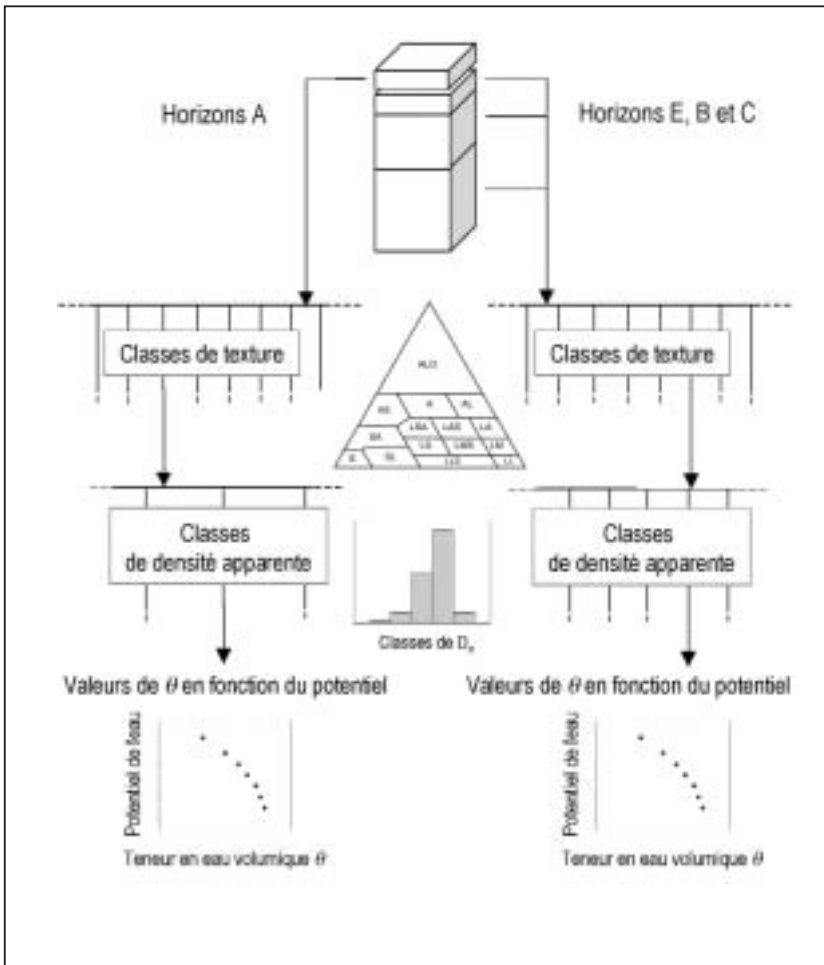
Tableau 2 - Réserve en eau utile (RU) des horizons A et E, B, C en fonction de leur texture seule, puis de leur texture et de leur densité apparente.

Table 2 - Available water capacity for A horizons and E, B, C horizons according to their texture, then to both their texture and bulk density.

Type d'horizon	Texture	Réserve en eau en mm cm ⁻¹				
		Sans prise en compte de Da		Da horizon	Avec prise en compte de Da	
		$\theta_{1,5} - \theta_{4,2}$ (pF1,5 - pF 4,2)	$\theta_{2,0} - \theta_{4,2}$ (pF 2,0 - pF 4,2)		$\theta_{1,5} - \theta_{4,2}$ (pF1,5 - pF 4,2)	$\theta_{2,0} - \theta_{4,2}$ (pF 2,0 - pF 4,2)
A	ALO	1,42	1,24	1,10 1,30	1,53 1,56	1,30 1,31
	AL	1,49	1,36	1,30 1,50	1,53 1,50	1,41 1,41
	AS	1,73	1,73	1,30	1,80	1,58
	A	-	-	-	-	-
	LA	1,88	1,73	1,30 1,50	1,81 1,85	1,71 1,76
	LAS	1,82	1,67	1,30 1,50	1,84 1,73	1,72 1,67
	LSA	1,63	1,43	1,50	1,55	1,48
	LM	2,28	2,13	1,30 1,50	2,37 2,33	2,26 2,19
	LMS	1,94	1,83	1,30 1,50	1,98 2,00	1,83 1,92
	LS	1,73	1,62	1,70	1,77	1,72
	LLS	-	-	-	-	-
	LL	-	-	-	-	-
	SA	1,47	1,28	1,70	1,52	1,34
	SL	1,74	1,31	1,50 1,70	1,57 1,89	1,28 1,49
	S	0,83	0,60	1,30 1,50	1,00 0,72	0,72 0,49
E, B, C	ALO	1,24	1,12	1,25 1,35 1,45 1,55 1,65	1,67 1,25 1,23 1,01 0,75	1,49 1,04 1,12 0,93 0,68
	AL	1,29	1,13	1,35 1,45 1,55 1,65	1,42 1,30 1,27 1,14	1,26 1,20 1,11 1,04
	AS	1,15	0,95	1,55 1,65 1,75	1,28 1,15 0,98	1,10 1,01 0,85
	A	1,10	0,93	1,65 1,75	1,18 0,96	1,07 0,87
	LA	1,68	1,49	1,45 1,55	1,81 1,78	1,55 1,57
	LAS	1,65	1,48	1,55 1,65	1,68 1,63	1,44 1,50
	LSA	1,50	1,27	1,55 1,65	1,41 1,48	1,08 1,24
	LM	2,15	2,07	1,55	2,42	2,36
	LMS	2,19	1,96	1,55	2,11	1,80
	LS	-	-	-	-	-
	LLS	-	-	-	-	-
	LL	-	-	-	-	-
	SA	1,26	1,03	1,65	1,34	1,07
	SL	1,55	1,16	1,55	1,74	1,44
	S	1,27	0,73	1,65	1,32	0,92

Figure 2 - Présentation générale de la démarche suivie pour estimer les propriétés de rétention en eau en combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente.

Figure 2 - General presentation of the approach used to establish class pedotransfer functions by combining the horizon type, its texture and bulk density.



avec δ égal à 0,11 pour les horizons A, et égal à 0,04 pour les horizons E, B et C. Ces valeurs de δ correspondent à la différence moyenne entre D_a^m et D_a^h calculée pour l'ensemble des horizons A dans le premier cas et pour l'ensemble des horizons E, B et C dans le second.

Pour toutes les classes de texture et D_a^m ainsi obtenues et regroupant au moins 3 individus, nous avons calculé les valeurs moyennes de W aux différentes valeurs de potentiel (étape c, figure 3). Les valeurs de W ont été transformées en teneur en eau volumique (θ) à l'aide de valeurs de D_a^h correspondant au milieu de chaque classe de D_a^h (étape d, figure 3). A l'issue de ce traitement, seuls 76 horizons A et 187 horizons E, B et C ont été utilisés lors de cette seconde étape.

Enfin, pour chaque jeu de 7 valeurs de θ correspondant à une classe de texture et une valeur de D_a^h , nous avons ajusté le modèle de van Genuchten (1980) et recalculé les valeurs de θ aux mêmes 7 valeurs de potentiel à partir de la courbe ajustée (étape e, figure 3). De la sorte, nous avons lissé les jeux de valeurs obtenus à partir de mesures et les avons rendus plus cohérents.

Jeux de valeurs proposés pour les horizons A

Pour les horizons A, des jeux de valeurs de θ sont proposés pour 12 des 15 classes du triangle de texture (tableau 3). En effet, un nombre trop faible de résultats d'analyses était disponible pour les classes Argile (A) pour que de telles valeurs puissent être proposées. Par ailleurs, pour les classes Limon Léger (LL) et Limon Léger Sableux (LLS), aucune analyse n'était disponible.

Pour 8 de ces 12 classes de texture, deux jeux de valeurs de θ sont proposés selon D_a^h . L'influence de D_a^h est variable selon la texture. Pour les textures ALO, LAS, LMS et S, la teneur en eau θ à une valeur de potentiel donnée décroît lorsque D_a^h augmente et la différence augmente en importance dans le sens ALO, LAS, LMS, S. Pour la texture SL, les valeurs de $\theta_{1,0}$ et $\theta_{1,5}$ sont très proches pour $D_a^h = 1,5$ et $1,7$ puis θ est nettement plus faible lorsque D_a^h augmente. Enfin, pour les textures AL, LA et LM, on observe soit une faible diminution, soit une faible augmentation de θ . De telles différences ne sont pas significatives en raison de la variabilité associée à chacune des valeurs de θ .

Comme précédemment, nous avons calculé deux approximations de la réserve en eau utile en calculant $\theta_{1,5} - \theta_{4,2}$ (teneur en eau volumique à $pF = 1,5$ moins celle à $pF = 4,2$) et $\theta_2 - \theta_{4,2}$ (teneur en eau volumique à $pF = 2,0$ moins celle à $pF = 4,2$, tableau 2) à partir des valeurs proposées dans le tableau 3.

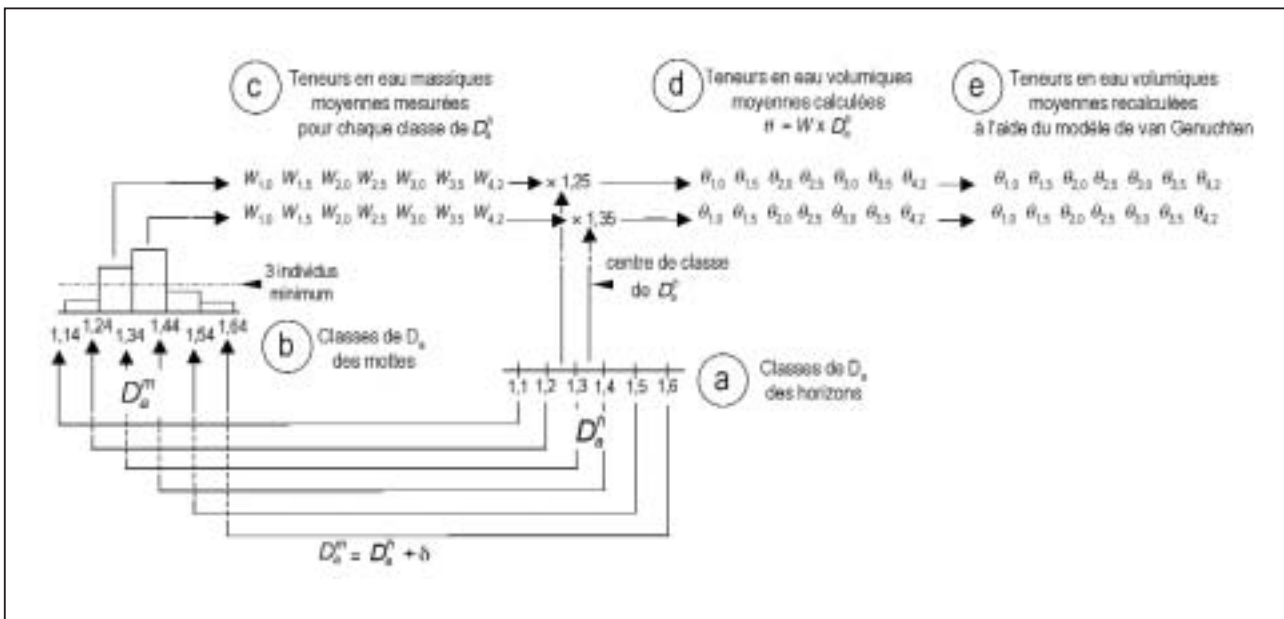
Jeux de valeurs proposés pour les horizons E, B et C

Pour les horizons E, B et C, des jeux de valeurs de θ sont également proposés pour 12 des 15 classes du triangle de texture (tableau 3). En effet, un nombre trop faible de résultats d'analyses était disponibles pour les classes Limon Sableux (LS) pour que des valeurs de θ puissent être proposées et, comme pour les horizons A, aucune analyse était disponible pour les textures Limon Léger (LL) et Limon Léger Sableux (LLS).

Pour 7 de ces 12 classes de texture, plu-

Figure 3 - Présentation détaillée de la façon dont la densité apparente de l'horizon (D_a^h) et celle des mottes (D_a^m) sont utilisées pour estimer les propriétés de rétention en eau au sein de chaque classe de texture (cas des horizons E, B, C).

Figure 3 - Detailed presentation of the approach that uses the horizon and clod bulk density to establish class pedotransfer functions.



sièrs jeux de valeurs de θ sont proposés selon D_a^h . On note alors que les valeurs de θ à un potentiel donné diminuent nettement lorsque D_a^h augmente excepté pour la texture LA pour lesquelles les variations de θ en fonction de D_a^h ne sont pas significatives. On observe aussi que, au sein d'une même classe de texture, lorsque le potentiel diminue, la différence de teneur en eau enregistrée en fonction de D_a^h décroît. Ainsi, pour les textures AL, AS et A, les valeurs de θ_{15000} sont proches lorsque D_a^h varie.

Comme pour les horizons A, nous avons à nouveau calculé deux approximations de la réserve en eau utile en calculant $\theta_{1,5} - \theta_{4,2}$ et $\theta_2 - \theta_{4,2}$ (tableau 2) à partir des valeurs proposées dans le tableau 3. Pour toutes les textures on note une diminution de la réserve en eau lorsque D_a^h augmente excepté pour les textures LAS et LSA pour lesquelles on enregistre une légère augmentation.

CONCLUSION

Les propriétés de rétention en eau proposées dans cette étude constituent une première proposition. Deux jeux de valeurs sont disponibles selon que l'on connaît le type d'horizon et sa texture, ou le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. Cette proposition sera améliorée dès que l'on disposera d'un nombre substantiel de nouveaux résultats dans la base de données SOLHYDRO. Cela permettra en particulier de proposer des jeux de valeurs pour les textures LL, LLS et LS pour lesquelles cela n'a pas été possible et d'élargir la gamme de variation de D_a^h pour chaque texture, en particulier pour les horizons A. Avec un jeu de données plus large, il sera aussi

possible de discuter l'influence de la teneur en CaCO_3 , en particulier dans la fraction granulométrique argile.

BIBLIOGRAPHIE

- Baize D., 2000 - Guide des analyses en pédologie. INRA Paris, 257 p.
- Bastet G., 1999 - Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert : développement de nouvelles approches. Thèse Université d'Orléans, 214 p.
- Bastet G., Bruand A., Quétin P., Cousin I., 1998 - Estimation des propriétés de rétention en eau à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT) : Une analyse bibliographique. Etude et Gestion des Sols, 1, 7-28.
- 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 : 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.
- Bouma J., van Lanen H.A.J., 1987 - Transfer functions and threshold values : from soil characteristics to land qualities. p 106-111. In : Beek K.J., P.A. Burrough and D.E. McCormack (eds.), Proc. ISSS/SSSA Workshop on Quantified Land Evaluation Procedures. Int. Inst. for Aerospace Surv. and Earth Sci., Publ. No 6, Enschede, The Netherlands.
- 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, 3(1), 27-40.
- Bruand A., Pérez Fernández P. and Duval O., 2003 - Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. Soil Use Management, 19, 232-242.
- Bruand A., Pérez Fernández P., Duval O., Quétin P., Nicoulaud B., Gaillard H., Raison L., Pessaud J.F. and Prud'Homme L., 2002 - Estimation des pro-

Tableau 3 - Teneurs en eau volumiques proposées pour les horizons A en fonction de leur texture et de leur densité apparente.**Table 3** - Volumetric water contents proposed for the A horizons according to both their texture and bulk density

Type d'horizon	Texture	Da horizon	Teneur en eau volumique en cm ³ cm ⁻³						
			$\theta_{1,0}$	$\theta_{1,5}$	$\theta_{2,0}$	$\theta_{2,5}$	$\theta_{3,0}$	$\theta_{3,5}$	$\theta_{4,2}$
A	ALO	1,1	0,432	0,420	0,397	0,365	0,334	0,303	0,267
		1,3	0,429	0,414	0,389	0,356	0,325	0,294	0,258
	AL	1,3	0,353	0,349	0,336	0,308	0,274	0,237	0,195
		1,5	0,356	0,354	0,345	0,322	0,290	0,250	0,204
	AS	1,3	0,490	0,391	0,369	0,332	0,283	0,222	0,211
	A	-	-	-	-	-	-	-	-
	LA	1,3	0,331	0,328	0,310	0,289	0,247	0,198	0,146
		1,5	0,348	0,345	0,336	0,310	0,267	0,216	0,160
	LAS	1,3	0,344	0,340	0,327	0,296	0,253	0,206	0,155
		1,5	0,323	0,322	0,315	0,295	0,256	0,205	0,149
	LSA	1,5	0,291	0,288	0,281	0,258	0,222	0,179	0,133
	LM	1,3	0,342	0,341	0,330	0,271	0,185	0,127	0,104
		1,5	0,343	0,339	0,326	0,287	0,228	0,167	0,108
	LMS	1,3	0,347	0,341	0,325	0,288	0,241	0,193	0,143
		1,5	0,311	0,308	0,300	0,272	0,223	0,165	0,108
	LS	1,7	0,280	0,279	0,274	0,255	0,215	0,160	0,102
	LLS	-	-	-	-	-	-	-	-
	LL	-	-	-	-	-	-	-	-
	SA	1,7	0,293	0,285	0,267	0,235	0,202	0,169	0,134
	SL	1,5	0,285	0,269	0,241	0,203	0,170	0,141	0,113
1,7		0,294	0,270	0,230	0,181	0,143	0,111	0,081	
S	1,3	0,198	0,161	0,133	0,108	0,091	0,075	0,060	
	1,5	0,144	0,125	0,102	0,082	0,070	0,060	0,053	
E, B, C	ALO	1,25	0,523	0,515	0,496	0,464	0,429	0,391	0,347
		1,35	0,453	0,439	0,418	0,392	0,368	0,344	0,314
		1,45	0,414	0,409	0,398	0,376	0,350	0,321	0,286
		1,55	0,388	0,384	0,377	0,360	0,338	0,313	0,283
		1,65	0,337	0,334	0,328	0,315	0,300	0,282	0,259
	AL	1,35	0,373	0,367	0,352	0,322	0,290	0,258	0,226
		1,45	0,359	0,355	0,345	0,323	0,295	0,263	0,225
		1,55	0,363	0,355	0,339	0,313	0,287	0,260	0,228
		1,65	0,350	0,345	0,335	0,315	0,290	0,263	0,231
	AS	1,55	0,368	0,358	0,341	0,314	0,289	0,262	0,231
		1,65	0,319	0,313	0,299	0,276	0,252	0,227	0,198
		1,75	0,302	0,296	0,283	0,263	0,243	0,222	0,198
	A	1,65	0,353	0,348	0,337	0,315	0,290	0,262	0,230
		1,75	0,320	0,316	0,307	0,289	0,269	0,247	0,220
	LA	1,45	0,357	0,345	0,319	0,286	0,241	0,204	0,164
		1,55	0,355	0,346	0,325	0,287	0,249	0,210	0,168
	LAS	1,55	0,345	0,336	0,311	0,269	0,231	0,197	0,167
		1,65	0,318	0,314	0,301	0,272	0,235	0,195	0,152
	LSA	1,55	0,335	0,304	0,271	0,237	0,211	0,187	0,163
		1,65	0,283	0,275	0,251	0,208	0,172	0,146	0,128
LM	1,55	0,351	0,350	0,344	0,297	0,201	0,135	0,108	
LMS	1,55	0,352	0,342	0,312	0,252	0,200	0,161	0,130	
LS	-	-	-	-	-	-	-	-	
LLS	-	-	-	-	-	-	-	-	
LL	-	-	-	-	-	-	-	-	
SA	1,65	0,281	0,265	0,238	0,203	0,176	0,153	0,131	
SL	1,55	0,245	0,236	0,202	0,156	0,122	0,081	0,061	
S	1,65	0,203	0,170	0,129	0,093	0,069	0,052	0,038	

Annexe - Ecarts types des teneurs en eau moyennes et des réserves en eau (RU) en fonction du type d'horizon et de la texture

Annexe - Standard deviation of mean water content and available water capacity according to both the horizon type and texture

Type d'horizon	Texture	Ecarts types (cm ³ cm ⁻³) des teneurs en eau moyennes							Écarts types (mm cm ⁻¹) des RU	
		$\theta_{1,0}$	$\theta_{1,5}$	$\theta_{2,0}$	$\theta_{2,5}$	$\theta_{3,0}$	$\theta_{3,5}$	$\theta_{4,2}$	$(\theta_{1,5} - \theta_{4,2})$	$(\theta_{2,0} - \theta_{4,2})$
A	ALO	0,031	0,018	0,021	0,018	0,018	0,016	0,011	0,22	0,24
	AL	0,032	0,025	0,024	0,021	0,026	0,025	0,019	0,22	0,22
	AS	-	-	-	-	-	-	-		
	A	-	-	-	-	-	-	-		
	LA	0,045	0,040	0,031	0,023	0,033	0,033	0,019	0,42	0,32
	LAS	0,045	0,037	0,038	0,032	0,035	0,035	0,028	0,27	0,30
	LSA	0,034	0,034	0,026	0,022	0,016	0,020	0,021	0,38	0,34
	LM	0,019	0,019	0,014	0,024	0,039	0,024	0,010	0,14	0,15
	LMS	0,028	0,024	0,023	0,025	0,034	0,023	0,021	0,21	0,28
	LS	-	-	-	-	-	-	-		
	LLS	-	-	-	-	-	-	-		
	LL	-	-	-	-	-	-	-		
	SA	0,033	0,042	0,044	0,035	0,048	0,028	0,030	0,30	0,26
	SL	0,058	0,058	0,060	0,053	0,047	0,041	0,034	0,41	0,33
S	0,061	0,027	0,025	0,019	0,015	0,015	0,015	0,16	0,22	
E, B, C	ALO	0,072	0,065	0,061	0,055	0,053	0,049	0,041	0,42	0,40
	AL	0,048	0,044	0,044	0,041	0,039	0,036	0,026	0,34	0,38
	AS	0,044	0,041	0,039	0,043	0,033	0,031	0,031	0,24	0,20
	A	0,044	0,033	0,028	0,032	0,029	0,029	0,026	0,29	0,27
	LA	0,064	0,061	0,058	0,054	0,050	0,045	0,041	0,38	0,37
	LAS	0,024	0,023	0,018	0,026	0,030	0,032	0,028	0,24	0,24
	LSA	0,023	0,017	0,020	0,024	0,034	0,032	0,019	0,53	0,49
	LM*	0,020	0,022	0,025	0,025	0,022	0,026	0,007	0,20	0,24
	LMS	0,042	0,047	0,051	0,039	0,041	0,028	0,017	0,45	0,50
	LS	-	-	-	-	-	-	-		
	LLS	-	-	-	-	-	-	-		
	LL	-	-	-	-	-	-	-		
	SA	0,039	0,024	0,042	0,049	0,058	0,043	0,045	0,27	0,23
	SL*	0,047	0,031	0,012	0,030	0,035	0,038	0,029	0,31	0,27
S	0,055	0,051	0,036	0,045	0,035	0,028	0,017	0,43	0,25	

* Ecart type calculé sur moins de 5 échantillons

priétés de rétention en eau des sols : Utilisation de classes de pédotransfert après stratification texturale et texturo-structurale. *Etude et Gestion des Sols*, 9, 105-125.

van Genuchten M.Th., 1980 - A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.

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(6), 1633-1635.

Hall D.G., Reeve M.J., Thomasson A.J., Wright V.F., 1977 - Water retention, porosity and density of field soils. Technical Monograph. N°9. Soil Survey of England & Wales, Harpenden.

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. *Bulletin*

Technique d'Information. 324-325, 627-641.

Monnier G., Stengel P., Fiès J.C., 1973 - Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Annales Agronomiques*, 24, 533-545.

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

Rawls W.J., Brakensiek D.L., Soni B., 1983 - Agricultural management effects on soil water processes, Part I. Soil water retention and Green and Ampt infiltration parameters. *Trans. ASAE*, 26, 1747-1752.

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

