



**HAL**  
open science

## Prédiction des propriétés de rétention en eau des sols : outils disponibles et perspectives.

Ary Bruand, Isabelle Cousin, Guy Richard

### ► To cite this version:

Ary Bruand, Isabelle Cousin, Guy Richard. Prédiction des propriétés de rétention en eau des sols : outils disponibles et perspectives.. 6èmes Rencontres de la Fertilisation Raisonnée et de l'Analyse de Terre - GEMAS-COMIFER, 2003, Blois, France. pp.87-96. hal-00079412

**HAL Id: hal-00079412**

**<https://insu.hal.science/hal-00079412v1>**

Submitted on 12 Jun 2006

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **PREDICTION DES PROPRIETES DE RETENTION EN EAU DES SOLS : OUTILS DISPONIBLES ET PERSPECTIVES**

Ary BRUAND<sup>1</sup>, Isabelle COUSIN<sup>2</sup> et Guy RICHARD<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ISTO, Université d'Orléans, UMR 6113 CNRS-UO, Géosciences, BP 6759, 45067 Orléans Cedex 2.

<sup>2</sup>INRA, Unité de Science du Sol, BP 20619, 45166 Olivet Cedex.

<sup>3</sup>INRA, Unité d'Agronomie, Rue Fernand Christ, 02007 Laon Cedex.

## **Introduction**

La prédiction des propriétés de rétention en eau des sols a fortement mobilisé la communauté des physiciens du sol au cours des trois dernières décennies. La raison en est simple : la connaissance de ces propriétés est nécessaire à l'appréciation des potentialités d'un sol à supporter telle ou telle culture. De très nombreux travaux ont par conséquent été conduits dans ce domaine. On doit cependant reconnaître qu'il reste beaucoup à faire tant la « demande » se fait de plus en plus exigeante. S'il ne s'agissait dans les années 70 que d'estimer la « réserve utile » d'un sol, c'est l'ensemble de la courbe représentant la quantité d'eau présente dans un sol en fonction de l'énergie avec laquelle elle est retenue par ce sol qu'il est nécessaire aujourd'hui de connaître. Il ne s'agit plus seulement d'apprécier globalement l'aptitude d'un sol à mettre en réserve de l'eau. L'enjeu, c'est la connaissance fine des transferts couplés d'eau et de solutés vers la plante mais aussi vers les eaux superficielles et souterraines. Un examen rapide des outils disponibles pour prédire les propriétés de rétention en eau pourrait laisser penser que peu de progrès ont été faits. Cette impression tient au fait que parallèlement à l'amélioration des outils de prédiction des propriétés de rétention en eau, ce sont les exigences des gestionnaires des ressources en sol et en eau qui ont considérablement évolué.

## **A. Les outils disponibles**

La mesure des propriétés de rétention en eau étant particulièrement lourde, de nombreux chercheurs ont très tôt cherché à prédire ces propriétés à partir de caractéristiques du sol beaucoup plus aisément mesurables. Des relations ont ainsi été établies entre des caractéristiques de la composition du sol (granulométrie et teneur en matière organique très fréquemment) et les quantités d'eau présentes dans le sol à des états hydriques particuliers (capacité au champ et point de flétrissement). De telles relations constituaient autant de « fonctions de pédotransfert » (FPT) telles qu'elles ont été nommées par la suite par des chercheurs néerlandais (Bouma et van Lanen, 1987 ; Bouma, 1989).

### **1. Les fonctions de pédotransfert**

Les FPT permettent par conséquent de prédire les propriétés de rétention en eau à partir de données disponibles (Bastet *et al.*, 1998). Des FPT ont été aussi développées pour d'autres propriétés comme la densité apparente, la stabilité structurale ou encore la conductivité hydraulique mais c'est pour les propriétés de rétention en eau que le plus grand nombre de travaux a été réalisé. De façon plus générale, le terme « pédotransfert » signifie « transfert de l'information pédologique ». On peut de la sorte établir un lien entre *ce que nous avons* et *ce dont nous avons besoin*.

Les FPT ont été établies à partir de jeux de données dont les caractéristiques peuvent être très variables (taille du jeu de données, méthodologies utilisées pour déterminer les propriétés de rétention en eau, types de sol constituant le jeu de données).

### **2. Les bases de données**

Plusieurs bases de données ont été constituées, en particulier aux Etats-Unis (USDA Natural Resource Conservation Service, 1994 ; Leij *et al.*, 1996 et 1999). Elles rassemblent des sols pour lesquels ont été mesurées à la fois les propriétés de rétention en eau et des caractéristiques de composition analogues à celles que l'on acquiert généralement lors d'une étude de sols. Ce sont ces bases de données qui constituent la matière première pour établir et valider des FPT.

En Europe, une base de données (HYPRES) a été développée en rassemblant des données disponibles, soit un ensemble de 5521 horizons de sols (Lilly, 1997 ; Lilly *et al.*, 1999 ; Wösten *et al.*, 1999). Un site web (<http://www.macaulay.ac.uk/hypres/>) permet de prendre connaissance de la structure de la base et des données disponibles. Dans cette base, qui est appelée à s'enrichir de nouvelles données au cours des prochaines années, les sols des différentes nations sont très inégalement représentés (Tableau 1). Ainsi 731 sols proviennent des Pays Bas alors que seuls 171 sont issus de France. Il en va de même pour les différents types de sol qui sont eux aussi très inégalement représentés pour chaque pays.

**Tableau 1.** Origine des données présentes dans la base HYPRES (d'après Wösten *et al.*, 1999)

Pays	Nombre d'horizons
Belgique	785
Danemark	350
Angleterre	423
France	171
Allemagne	2309
Grèce	138
Italie	194
Irlande du Nord	15
Portugal	104
Ecosse	170
Slovaquie	58
Espagne	54
Suède	19
Pays Bas	731
Total	5521

### 3. Les outils disponibles en France

En France, on a pendant longtemps utilisé les résultats des travaux effectués dans le département de l'Aisne bien qu'ils ne permettent de prédire que les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement en fonction de la texture (Jamagne *et al.*, 1977). La nécessité de prédire la teneur en eau pour un nombre plus élevé de valeurs d'état hydrique a conduit l'équipe de l'INRA de Science du Sol d'Orléans à développer un programme de mesures pour des sols représentatifs de grandes zones agricoles. Dans le même temps, il a aussi été montré que les FPT issues de bases de données développées aux Etats-Unis ou aux Pays-Bas ne pouvaient être utilisées de façon satisfaisante pour les sols de France (Bastet *et al.*, 1999). Parallèlement, pour les besoins du programme de cartographie à 1/250 000 de la Région Languedoc-Roussillon, l'équipe INRA de Science du Sol de Montpellier a réalisé un ensemble de mesures pour des sols représentatifs à l'échelle régionale. Une base d'environ 600 horizons de sols s'est ainsi constituée au cours des années 90.

Cette base a conduit au développement de FPT qui relie la teneur en eau massique ( $W$ ) aux valeurs de potentiel de  $-33$ ,  $-100$ ,  $-330$   $-1000$   $-3300$  et  $-15\ 000$  hPa, soit respectivement  $pF = 1.5$ ,  $2.0$ ,  $2.5$ ,  $3.0$ ,  $3.5$  et  $4.2$ , à l'aide de relations de la forme :

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

avec  $a$  : ordonnée à l'origine et  $b$ ,  $c$ ,  $d$  et  $e$  : quatre coefficients qui varient selon la valeur du potentiel,  $Da$  : densité apparente,  $CO$  : teneur en carbone organique en g/100g,  $Ar$  : pourcentage d'argile et  $Li$  : pourcentage de limon (Tableau 2) (Bastet, 1999).

**Tableau 2.** Coefficients et ordonnée à l'origine pour les fonctions de pédotransfert de la forme  $W = a + b (Da) + c (CO) + d (Ar) + e (Li)$  permettant de calculer les teneurs en eau à six valeurs de potentiel (modifié d'après Bastet, 1999).

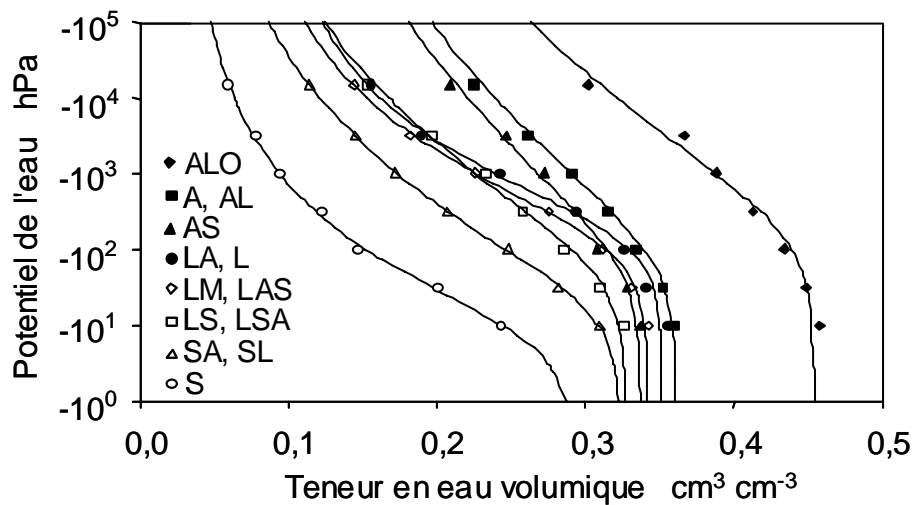
Potentiel		$W = a + b (Da) + c (CO) + d (Ar) + e (Li)$				
hPa	pF	a	b	c	d	e
-33	1,5	0,4543	-0,2087	-0,0058	0,0020	0,0007
-100	2,0	0,2983	-0,1407	0,0076	0,0021	0,0012
-330	2,5	0,2663	-0,1489	0,0153	0,0034	0,0010
-1000	3,0	0,1679	-0,0960	0,0129	0,0036	0,0008
-3300	3,5	0,1519	-0,0879	0,0064	0,0036	0,0005
-15 000	4,2	0,2800	-0,1418	0,0010	0,0026	-0,0001

$W$  : teneur en eau massique en  $g\ g^{-1}$  ;  $Da$  : densité apparente ;  $CO$  : teneur en carbone organique en  $g\ 100g^{-1}$  ;  $Ar$  : pourcentage d'argile ;  $Li$  : pourcentage de limon.

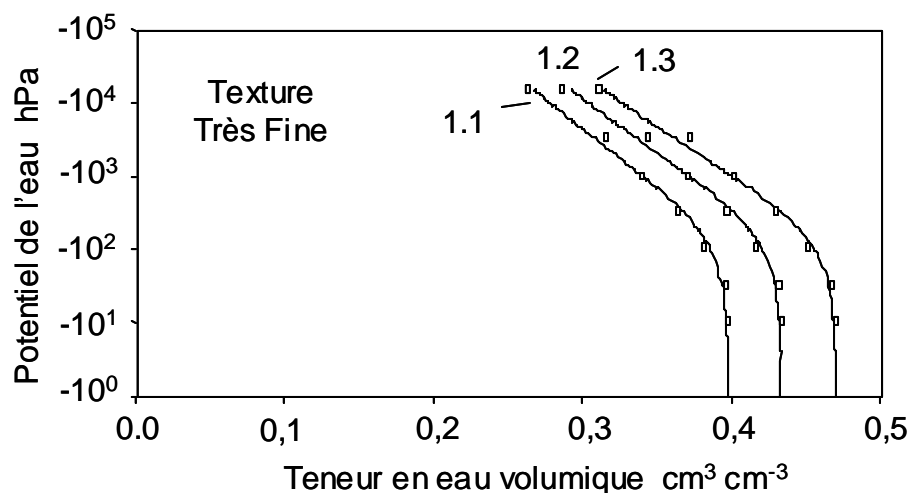
D'autres travaux ont permis l'établissement de fonctions de pédotransfert qui ne requièrent qu'une connaissance plus approximative de la composition du sol (appartenance à des classes de composition et/ou type de sol). Ainsi, des teneurs en eau volumiques ont été proposées en fonction de la seule texture du sol (Figure 1). Il est cependant recommandé de coupler à la texture, une valeur de densité apparente de telle façon à améliorer la précision de la prédiction et réduire son biais. Des teneurs en eau volumiques sont alors proposées en fonction de classes qui combinent texture et densité apparente (Figure 2) (Bruand *et al.*, 2002 et 2003). Il faut ici préciser que la densité apparente n'a pas la même valeur selon l'échelle à laquelle elle est mesurée (Figures 2 et 3). En effet, lorsqu'elle est mesurée à l'échelle de l'horizon, des pores de grande taille peuvent être pris en compte (en particulier dans les horizons de surface) sans que cela n'ait de conséquence pour les propriétés de rétention en eau. Une faible densité apparente ne signifiera pas alors obligatoirement un volume de pores élevé et actif pour la rétention d'eau (Bruand *et al.*, 1996 et 2002). C'est dans ce cas un prédicteur de médiocre qualité. En revanche, la densité apparente mesurée à l'échelle de volumes de dimension centimétrique (*i.e.* « à l'échelle de la motte ») rend compte de variations de volumes de pores qui sont dans leur grande majorité actifs pour la rétention de l'eau. C'est alors un prédicteur de grande qualité pour les propriétés de rétention en eau. La situation idéale est de disposer à la fois de la densité apparente à l'échelle de l'horizon (nécessaire à la conversion de la teneur en eau massique en teneur en eau volumique) et de celle à l'échelle de volumes de taille centimétrique (prédicteur pertinent des propriétés de rétention en eau).

De nombreuses FPT issues de la littérature internationale permettent aussi de calculer les propriétés de rétention en eau des sols. Ces FPT ont été établies avec des sols d'origine très variable qu'il convient de connaître pour pouvoir apprécier la qualité de l'estimation obtenue. Le programme SOILPAR (Acutis et Donatelli, 2001), téléchargeable à l'adresse web suivante (<http://www.sipeaa.it/ASP/ASP2/SOILPAR.asp>), permet de déterminer, à

partir de données granulométriques et de densité apparente que l'utilisateur précise, les teneurs en eau selon différentes FTP.



**Figure 1.** Courbes de rétention proposées en fonction de la texture du sol (d'après Bruand *et al.*, 2002).



**Figure 2.** Courbes de rétention en eau proposées pour la classe de texture « Très Fine » (*Very Fine*, teneur en argile > 60 %) du triangle de texture FAO en fonction de trois valeurs de densité apparente de l'horizon (1.1, 1.2 et 1.3) mais pour une même valeur de densité apparente à l'échelle de la motte (1.37) (d'après Bruand *et al.*, 2003).

#### 4. Précision des prédictions

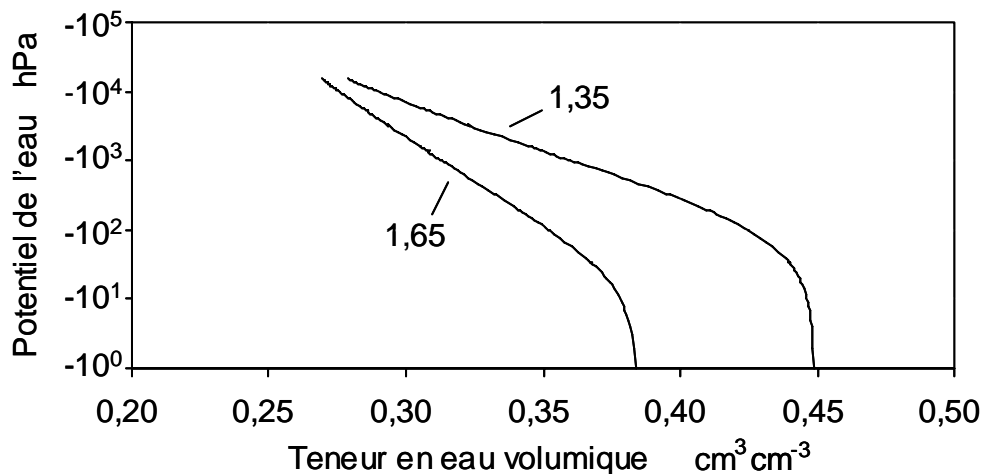
Si de nombreuses études ont eu pour objectif l'établissement de FPT, un nombre beaucoup plus restreint a cherché à quantifier la précision des

estimations et, de façon plus générale, à valider les FPT disponibles (Williams et al., 1992 ; Tietje et Tapkenhinrichs, 1993 ; Kern, 1995).

Plusieurs critères peuvent être utilisés pour discuter la précision des prédictions effectuées à l'aide de FPT. Parmi ces critères, l'écart quadratique moyen (*EQM*), qui est celui qui a été le plus fréquemment utilisé, s'écrit :

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum (\theta_m - \theta_p)^2}{n}}$$

avec  $\theta_m$  et  $\theta_p$ , teneurs en eau volumiques respectivement mesurée et prédite, et  $n$ , le nombre de sols. Les valeurs de *EQM* varient selon les études de 0,02 à 0,11  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  (Wösten et al., 2001). Les valeurs les plus faibles ont été enregistrées pour des sols regroupés en sous-ensembles présentant une certaine homogénéité (type de pédogenèse, type de matériau parental, etc). Quant aux valeurs les plus élevées, elles sont été enregistrées avec des FPT qui utilisent la texture comme seul prédicteur.



**Figure 3.** Courbes de rétention en eau proposées pour deux sols de texture « Fine » (36 % < teneur en argile < 60 %) du triangle de texture FAO, l'un possédant une densité apparente de 1,35 à l'échelle de l'horizon et de la motte et l'autre, une densité apparente de 1,65 à ces deux échelles.

Il est en effet important de considérer la gamme de sols sur laquelle ont été définies les différentes fonctions de pédotransfert : si la FPT a été initialement déterminée dans un contexte très précis de pédogenèse ou de matériau parental, elle sera très précise et non biaisée si on l'utilise dans le même contexte. Dans un contexte différent, elle conduira à des estimations totalement erronées. En revanche, si la FPT a été déterminée sur un grand nombre d'horizons de sols différents, couvrant de larges territoires et des contextes agropédoclimatiques variés, elle sera utilisable sur des sols très

variés mais sera en revanche peu précise. Il importe donc que l'utilisateur définisse a priori, selon l'application qui l'intéresse, s'il souhaite une estimation très précise et accepte donc un risque de biais élevé, ou une estimation peu précise mais relativement fiable.

## **B. Perspectives**

Si certaines études ont eu pour objectif l'établissement de FPT « universelles », c'est-à-dire permettant une prédiction des propriétés de rétention en eau précise et non biaisée quelles que soient les caractéristiques des sols (composition, type, usage), on sait aujourd'hui qu'il n'existe pas de réponse générale à la question de la prédiction des propriétés de rétention en eau.

L'amélioration de la qualité des FPT pour un ensemble de sols passera par une meilleure connaissance de ce qui détermine la précision et le biais de la prédiction. On pourra alors choisir les FPT les plus adaptées aux sols pour lesquels on souhaite prédire les propriétés de rétention en eau.

### **1. Poursuivre les programmes de mesure**

En complément aux études en cours qui exploitent les jeux de données disponibles, il est nécessaire de poursuivre des programmes de mesures des propriétés de rétention en eau et, de façon plus générale, des propriétés hydrauliques des sols (rétention et conductivité). A l'échelle du territoire français, on ne dispose encore que d'une connaissance très fragmentaire des propriétés hydrauliques des principaux sols représentatifs. Certains sols ont fait l'objet d'études détaillées alors que bien d'autres ont été ignorés jusqu'alors. C'est encore le cas de nombreux sols de grandes zones de culture. Par ailleurs, un nombre très limité d'études a été réalisé dans les zones où l'activité agricole est essentiellement vouée à l'élevage. C'est aussi le cas dans les zones forestières.

La poursuite de programmes de mesure devrait cependant reposer sur une analyse préalable de la représentativité géographique des grands types de sol à l'échelle du territoire national et des données dont nous disposons pour chacun. En croisant « représentativité géographique », « nature des données disponibles » et « pression anthropique », il devrait être possible de compléter de façon cohérente la base de données déjà établie.

### **2. Mieux prendre en compte l'usage du sol**

L'usage du sol n'est pas explicitement pris en compte lorsqu'il s'agit d'établir ou d'utiliser des FPT, on considère généralement qu'il intervient par l'intermédiaire des variations de densité apparente qu'il génère. Or, une même valeur de densité apparente ne signifiera pas obligatoirement la même chose pour les propriétés de rétention en eau s'il agit d'un horizon de surface sous forêt, sous prairie permanente ou sous culture. Cela est dû à des différences de distribution de taille des pores alors que globalement le volume total de pores ne varie pas.



Pour les sols cultivés en particulier, l'état structural de l'horizon cultivé, et par conséquent sa densité apparente, varie notablement au cours de l'année. Au delà de cette dynamique annuelle de l'état structural, c'est l'hétérogénéité de cet état au sein de l'horizon cultivé qui n'est que très rarement prise en compte (Richard *et al.*, 2001). Il y aurait lieu de s'y intéresser car il apparaît que les propriétés de rétention en eau peuvent être très variables au sein d'un horizon cultivé.

### **3. Ne plus éviter les sols caillouteux**

Les sols caillouteux, ou de façon plus générale à éléments grossiers, ne sont que rarement étudiés tant la mesure de leurs propriétés de rétention en eau est source de difficultés méthodologiques. L'attitude la plus fréquente consiste à considérer que les éléments grossiers sont sans effet sur les propriétés de rétention en eau du sol hormis un effet strictement stérique. Or, non seulement les cailloux peuvent posséder leur propre porosité et contribuer aux propriétés de rétention en eau du sol (Coutadeur *et al.*, 2000 ; Cousin *et al.*, 2003) mais la fraction fine présente entre les éléments grossiers semble être plus poreuse qu'elle ne l'est lorsqu'ils sont absents.

L'absence de données pour les sols caillouteux est d'autant plus gênante que c'est pour ces sols que les questions relatives à la gestion de l'eau se posent avec le plus d'acuité.

### **4. Conduire une analyse fonctionnelle**

La connaissance des propriétés de rétention en eau ne constitue pas une fin en soi. Elle est nécessaire pour décrire les transferts d'eau et de soluté vers les plantes, vers les eaux superficielles ou souterraines. L'analyse de la qualité des FPT ne peut se limiter à l'étude de l'erreur sur les teneurs en eau du sol prédites. Elle doit en effet aller jusqu'à l'étude de l'erreur induite sur le fonctionnement hydrique du sol et ses conséquences pour les flux d'eau et de soluté.

En procédant de la sorte, il sera possible de faire porter les études à venir plus sur tel domaine de la courbe de rétention en eau plutôt que sur tel autre en raison de son importance pour le fonctionnement du système sol-plante-atmosphère étudié.

## **Conclusion**

La communauté internationale reste très fortement mobilisée sur la question de la prédiction des propriétés de rétention en eau des sols. Les travaux sont cependant essentiellement focalisés sur l'analyse des jeux de données disponibles plutôt que sur l'acquisition de nouveaux. Il s'agit là d'une étape nécessaire à l'issue de laquelle il sera possible de conduire de nouveaux programmes d'acquisition. Alors, nous disposerons de jeux de données permettant l'établissement de FPT et leur utilisation à des différentes

échelles et nous éviterons, comme encore trop souvent aujourd'hui, d'avoir recours :

- (i) soit à des FPT établies à partir de jeux de données représentatifs à l'échelle d'un pays, voire d'un continent, mais de très médiocre qualité dès lors qu'elles sont utilisées à l'échelle d'une région ou, encore pire, d'une zone de plus petite taille ;
- (ii) soit à des FPT établies à partir d'un jeu de données représentatif de quelques types de sols, voire d'une unité de paysage, mais de très médiocre qualité lorsqu'elles sont utilisées à l'échelle d'une région ou, encore pire, d'un territoire national.

### Références bibliographiques

- Acutis M. Donatelli M., 2003. SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 373-377.
- Bastet G., 1999. Estimation des propriétés de rétention en eau à l'aide de fonction de pédotransfert : Développement de nouvelles approches. Thèse Université d'Orléans, 123 p.
- Bastet G., Bruand A., Quéting P. et Cousin I., 1998. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT) : Une analyse bibliographique. *Etude et Gestion des Sols*, 5(1), 7-28.
- Bastet G., Bruand A., Voltz M., Bornand M., Quéting P., 1999. Performance of available pedotransfer functions for predicting the water retention properties of french soils. In : *Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Media*, Riverside, California, October 22-24, 1997, ed. M.Th. van Genuchten, F.J. Leij and L. Wu, 981-991.
- Bouma J., van Lanen H.A.J., 1987. Transfer functions and threshold values : from soil characteristics to land qualities. p 106–111. In: Beek K.J., P.A. Burrough and D.E. McCormack (eds.), *Proc. ISSS/SSSA Workshop on Quantified Land Evaluation Procedures*. Int. Inst. for Aerospace Surv. and Earth Sci., Publ. No 6, Enschede, The Netherlands.
- Bouma J., 1989 – Land qualities in space and time. p. 3–13. In: J. Bouma and A.K. Bregt (ed.) *Proc. ISSS Symp. On land qualities in space and time*, Wageningen, the Netherlands. 22-26 Aug. 1988. Pudoc. Wageningen.
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R., Jamagne M., 1996. Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols* 3, 27–40.
- Bruand A., Perez Fernandez P., Duval O., Quéting Ph., Nicoullaud B., Gaillard H., Raison L., Pessaud J.F., Prud'Homme L., 2002. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols : Utilisation de classes de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale. *Etude et Gestion des Sols*, 9, 105-125.
- Bruand A., Perez 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*, In Press.

- Cousin I., Nicoullaud B., Coutadeur C., 2003. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. *Catena*, 53, 97-114.
- Coutadeur C., Cousin I., Nicoullaud B., 2000. Influence de la phase caillouteuse sur la réserve en eau des sols. Cas des sols de la Petite Beauce. *Etude et Gestion des Sols*. 7, 191-205.
- Kern J.S., 1995. Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 1134-1141.
- 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.
- Leij F., Alves W.J., van Genuchten M.Th., Williams J.R., 1996. The UNSODA Unsaturated Soil Hydraulic Database. User's Manual Version 1.0. EPA/600/R-96/095. National Risk Management laboratory, Office of Research and Development Cincinnati, OH.
- Leij F.J., Alves W.J., van Genuchten M.Th., Williams J.R., 1999. The UNSODA unsaturated soil hydraulic database. In: M.Th. van Genuchten and F.J. Leij (eds.) *Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*. Proceedings of the International Workshop, Riverside, California, October 22-24, 1997, 1269-1281.
- Lilly A., 1997. A description of the HYPRES database (Hydraulic properties of European Soils). In: Bruand A., Duval O., Wösten J.H.M., Lilly A. (Eds.). *The use of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology Research*. Proceedings Second Workshop of the Project Using Existing Soil Data to Derive Hydraulic Parameters for Simulation Modelling in Environmental Studies and in Land Use Planning. Orléans, France, 10-12 October 1996, pp. 161-184.
- Lilly A., Wösten J.H.M., Nemes A., Le Bas C., 1999. The development and use of the HYPRES database in Europe. In: M.Th. van Genuchten and F.J. Leij (eds.) *Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*. Proceedings of the International Workshop, Riverside, California, October 22-24, 1997, 1283-1204.
- Richard G., Cousin I., Sillon J.F., Bruand A., Guérif J., 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: Consequences on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52, 49-58.
- Tietje O., Tapkenhinrichs M., 1993. Evaluation of pedotransfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 1088-1095.
- USDA Natural Resource Conservation Service, 1994. National Soil Pedon Database, Lincoln, NE.
- Williams R.D., Ahuja L.R., Naney J.W., 1992. Comparison of methods to estimate soil water characteristics from soil texture, bulk density and limited data. *Soil Science*, 153, 172-184.
- Wösten J.H.M., Lilly A., Nemes A., Le Bas C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90, 169-185.
- 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.