

Comparaison de fonctions de pédotransfert nationales et européennes pour prédire les propriétés de rétention en eau des sols

Le jeu d'échantillons utilisé a été constitué en plusieurs étapes durant les vingt dernières années¹.

Lors d'une première étape, seuls des horizons de texture argileuse ont été prélevés afin de poursuivre les travaux qui avaient été initiés dans le cadre du programme de recherche Européen « SOLAR » (Tessier et Bruand, 1985 ; Sorani *et al.*, 1987 ; Bruand *et al.*, 1988 ; Tessier *et al.*, 1989 ; Tessier, 1991). Les propriétés de rétention en eau ont été déterminées à -330 hPa et -15000 hPa et les échantillons sont issus de sols localisés pour la plupart dans le sud-est (région Bourgogne) et l'est du bassin parisien (région Lorraine). La teneur en eau au moment du prélèvement ainsi que la masse volumique de mottes de dimensions centimétriques ont aussi été déterminées dans ce même état (Bruand, 1990).

¹ Le jeu de données s'est initialement constitué lors de travaux effectués à l'Unité de Science du Sol du Centre INRA d'Orléans. Il s'est ensuite enrichi des mesures effectuées à l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans.

Des mesures de densité apparente à l'échelle de l'horizon ont aussi été très tôt réalisées sur les sols échantillonnés.

Durant les années 90, le jeu d'échantillons s'est élargi à d'autres textures et les propriétés de rétention en eau ont été mesurées pour 5 à 7 valeurs de potentiel. Les sols échantillonnés sont localisés dans l'ensemble du bassin parisien (Régions Ile-de-France, Centre, Nord Pas de Calais, Bourgogne, Lorraine). D'autres secteurs sont aussi échantillonnés : Pays de Caux, piémont pyrénéen et marais de l'Ouest. C'est sur la base de ce nouveau jeu de données composé de 392 horizons auquel a été ajouté un jeu de données (370 horizons) issu de la cartographie du Languedoc Roussillon à l'échelle du 1/250 000 que sont réalisés les travaux de Bastet (1999) et Bastet *et al.* (1998a, 1998b et 1999). C'est aussi sur la base de ce nouveau jeu de données que se poursuivent les travaux sur l'établissement de fonctions de pédotransfert (Bruand *et al.*, 1994 ; Bruand et Tessier, 2000 ; Bruand *et al.*, 2002 ; Bruand *et al.*, 2003 ; Morvan *et al.*, 2004).

Au début de cette étude, le jeu de données nommé « base de données SOLHYDRO » était constitué de 320 horizons dont 90 horizons de surface A et L et 230 horizons de sub-surface E, B et C. Nous avons poursuivi l'échantillonnage de façon à améliorer la représentativité de l'échantillonnage, en particulier par rapport à la texture et au type d'horizon (horizons A et L d'une part et horizons E, B et C d'autre part). Cette poursuite de l'échantillonnage a aussi permis de constituer un jeu de données pour discuter la validité des fonctions de pédotransfert. Enfin, l'échantillonnage complémentaire a permis d'incorporer à la base de données des horizons issus de sols développés sur une large gamme de matériaux parentaux : des formations sédimentaires argileuses ou marneuses, des formations résiduelles sur séries sédimentaires calcaires, des alluvions de textures très variées, des colluvions, des alluvions anciennes et des formations superficielles limoneuses. Les sols développés sur des produits d'altération de roches métamorphiques ou intrusives sont en revanche très peu représentés. Ce jeu de données complémentaire qui représente notre contribution à la base de données SOLHYDRO correspond à un ensemble de 133 horizons dont 47 horizons de surface A et L (0–30 cm) et 86 horizons de sub-surface E, B et C (>30 cm).

Une base de données comprenant de 456 horizons a ainsi été obtenue à l'issue de l'ensemble des campagnes d'échantillonnage (Figure 2.1). Les sols échantillonnés représentent une large gamme de texture, de densité apparente, et de matériaux. Les horizons sont développés dans différents matériaux parentaux : des formations sédimentaires argileuses ou marneuses, des formations résiduelles sur séries sédimentaires

calcaires, des alluvions de texture variées, des colluvions, des alluvions anciennes et des formations superficielles limoneuses. Les teneurs moyennes en argile, limon et sable sont respectivement de 29,3%, 43,8% et 26,9%. La capacité d'échange cationique moyenne est de $14,8 \text{ cmol}_+.\text{kg}^{-1}$ et les teneurs en eau moyennes varient de $0,354 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ (-10 hPa) à $0,187 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ (-15000 hPa). La teneur moyenne en carbone organique est de $6,0 \text{ g.kg}^{-1}$. Les horizons de sub-surface (E, B et C) représentent 70 % de l'ensemble des horizons et par conséquent les échantillons de surface (A et L) 30 % de l'ensemble des horizons.

II. METHODES DE MESURE UTILISÉES

A. Prélèvement des échantillons

Les campagnes d'échantillonnage se sont déroulées en période hivernale lorsque les sols étaient en conditions hydriques proches de la capacité au champ, c'est-à-dire la plupart du temps environ 48 heures après une période pluvieuse. Les échantillons ont été prélevés à partir de fosses pédologiques sous la forme de volumes non perturbés (blocs ou mottes) de dimensions décimétriques. Ils ont été conservés dans des boîtes hermétiques à la teneur en eau correspondant à leur état lors du prélèvement, en chambre froide ou au réfrigérateur à une température de l'ordre de 4 à 5 °C de telle façon à limiter l'activité biologique (Bruand *et al.*, 1996 ; Bruand *et al.*, 2002).

Dans chaque horizon échantillonné, des échantillons perturbés ont aussi été prélevés pour les analyses qui ont été réalisées au laboratoire d'analyse de sols de l'INRA à Arras.

B. Détermination de la densité apparente

Pour pratiquement tous les horizons échantillonnés, des mesures de densité apparente (la masse volumique aux unités près) ont été réalisées sur des mottes de dimensions centimétriques dans l'état correspondant à celui lors du prélèvement. Ces mesures ont été réalisées à l'aide de la méthode au pétrole (Monnier *et al.*, 1973) excepté pour les horizons de texture sablo-argileuse, sablo-limoneuse et sableuse pour lesquels la cohésion était trop faible pour qu'une telle mesure soit réalisable. La densité apparente (D_a^m) est donnée par la relation :

$$D_a^m = m_s \times \rho_k / m_k \times \rho_w$$

avec m_k : masse de kerdane (ester de pétrole) déplacé par l'échantillon, m_s : masse de l'échantillon séché à 105°C, ρ_k : masse volumique du kerdane (0,782 g cm⁻³), ρ_w : masse volumique de l'eau (1 g cm⁻³) (Figure 2.2, a). Les valeurs moyennes ont été obtenues sur une dizaine de mottes.

La densité apparente des horizons étudiés (D_a^h) a été déterminée sur le terrain à l'aide de la méthode au cylindre en utilisant des cylindres de 500 ou 1000 cm³ selon les cas. Elle a été calculée après séchage à 105°C pendant 24 h à l'aide de la relation suivante :

$$D_a^h = M_s / V_c$$

avec M_s : masse de sol séché à 105°C contenu dans le cylindre, V_c : volume du cylindre. Trois mesures ont été effectuées pour chaque horizon (Figure 2.2, b, c).

C. Mesure des propriétés de rétention en eau

Les déterminations ont porté sur des mottes de dimensions le plus souvent centimétriques (5 à 20 cm³) obtenues par fragmentation à la main à partir des échantillons non perturbés prélevés qui étaient eux de dimensions décimétriques (300 à 1000 cm³). Les analyses ont par conséquent été effectuées sur des échantillons à structure interne intacte et n'ayant jamais été séchées (Figure 2.3, a, b). Sept teneurs en eau massiques (W) ont été déterminées pour des valeurs de potentiel de -10 hPa ($W_{1.0}$), -33 hPa ($W_{1.5}$), -100 hPa ($W_{2.0}$), -330 hPa ($W_{2.5}$), -1000 hPa ($W_{3.0}$), -3300 hPa ($W_{3.5}$) et -15000 hPa ($W_{4.2}$). Les déterminations ont été réalisées en utilisant des dispositifs pneumatiques. Les mottes ont été disposées sur une pâte de kaolinite préalablement ressuyée à -10² hPa de façon à établir une continuité satisfaisante entre l'eau de l'échantillon et la membrane ou la plaque poreuse du dispositif (Bruand *et al.*, 1996). Ce dispositif s'apparente à celui qui a été utilisé par Tessier et Berrier (1979) mais il permet, selon le dispositif utilisé, de mettre à l'équilibre de 20 à 40 mottes dans une même cellule de pression (Figure 2.3, c, d). La teneur en eau est mesurée après sept jours de mise sous pression (de telle façon à avoir atteint l'équilibre quelle que soit la texture des échantillons et leur taille) par passage à l'étuve à 105°C pendant 24h. Pour chaque détermination, la teneur en eau correspond à la moyenne donnée par 10 à 15 mottes.

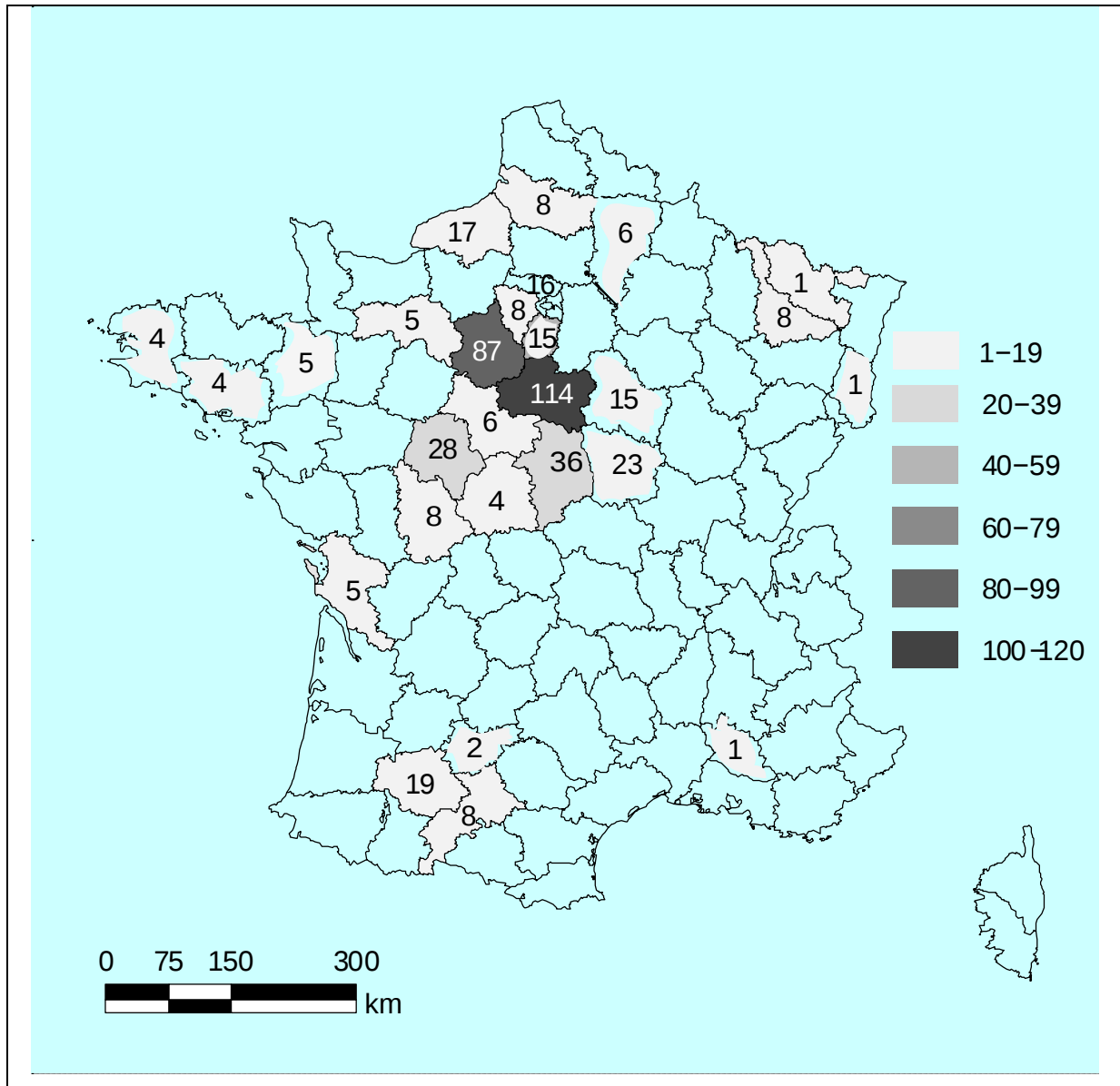


Figure 2.1 : Localisation des sols étudiés (nombre d'horizons prélevé par département) pour mesurer les propriétés de rétention en eau (ensemble de 456 horizons).

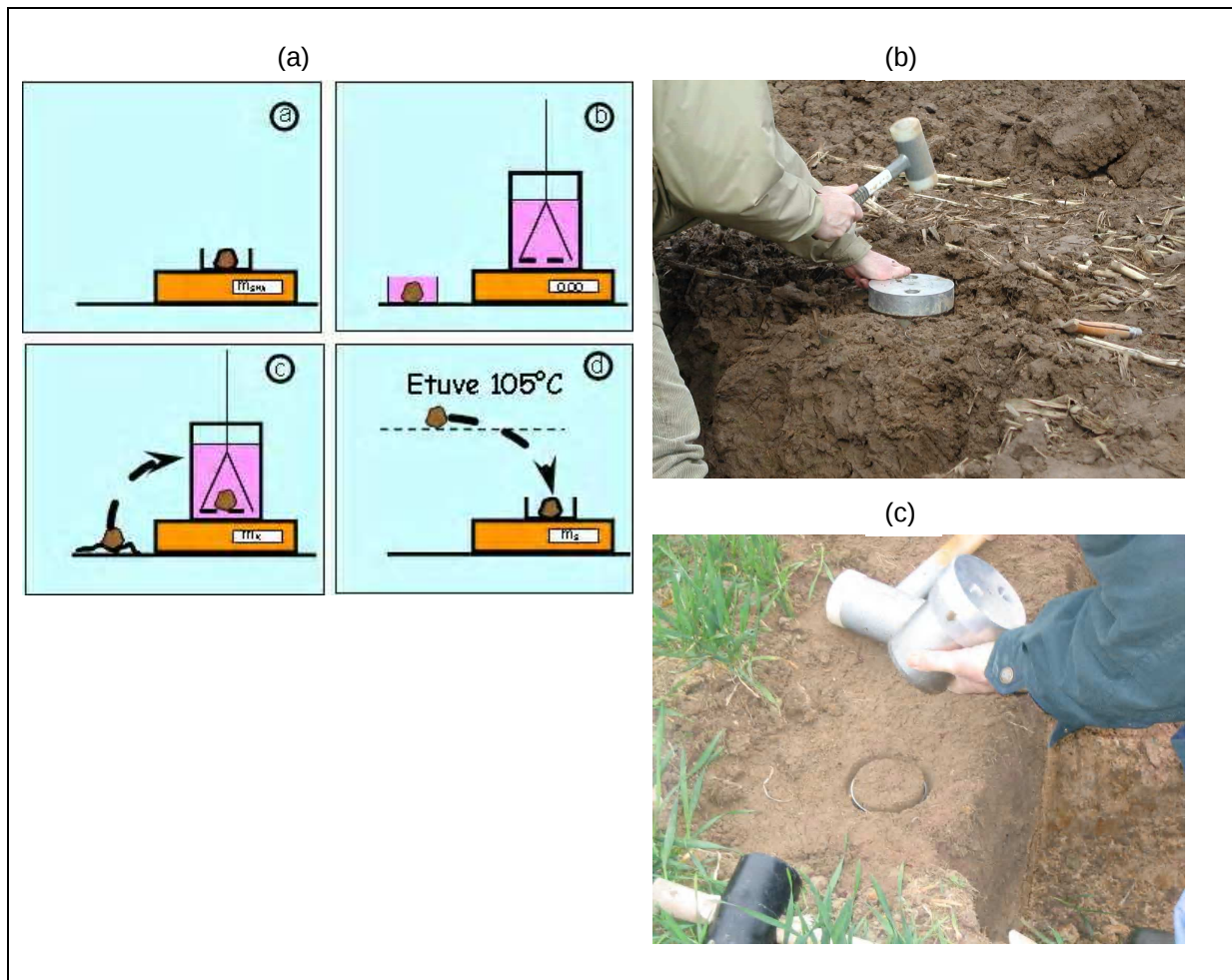


Figure 2.2 : (a) Schéma représentant la détermination de la densité apparente des mottes ($D_{a,m}$) au labo, (b,c) mesure la densité apparente des horizons ($D_{a,h}$) sur le terrain.



Figure 2.3 : (a) Echantillons de taille décimétrique non perturbés (blocs ou mottes) collectés sur le terrain, (b) mottes disposées sur une pâte de kaolinite, (c et d) cellule à pression utilisée pour mesurer la teneur en eau des mottes mises à l'équilibre avec un potentiel donné.

Les teneurs en eau volumique ont été calculées en multipliant les teneurs en eau massiques par la densité apparente de l'horizon (D_a^h). Comme pour les teneurs en eau massiques, les teneurs en eau volumique (θ) ont donc été obtenues pour sept valeurs de potentiel variant de -10 hPa (θ_{10}) à -15000 hPa (θ_{15000}).

D. Analyses physico-chimiques

Les analyses physico-chimiques ont été réalisées au Laboratoire d'Analyse des Sol de l'INRA à Arras. Pour chaque échantillon, il a été procédé à une analyse granulométrique en cinq fractions (argile : $< 2 \mu\text{m}$; limon fin : $2-20 \mu\text{m}$; limon grossier : $20-50 \mu\text{m}$; sable fin ($50-200 \mu\text{m}$ et sable grossier : $0,2-2 \text{ mm}$) sans décarbonatation par sédimentation (AFNOR, 1996 ; AFNOR NF X 31-107). La méthode consiste en la dispersion des particules minérales d'un échantillon de sol et en la stabilisation de cet état dispersé dans des conditions bien définies. Après destruction de la matière organique par l'eau oxygénée (H_2O_2) sur une prise d'essai d'environ 10 g par ajout d'hexamétaphosphate de sodium et de $\text{NaOH } 1\text{N}$, les différentes classes de particules ont été séparées par sédimentation pour les fractions fines ($< 50\mu\text{m}$) et par tamisage pour les fractions de taille supérieure. La détermination des fractions les plus fines ($< 50 \mu\text{m}$) s'effectue au moyen de 3 prélèvements successifs (à la pipette dite de Robinson) dans une suspension de sol en cours de sédimentation. La fraction des sables fins est séparée par passage sur tamis de $50 \mu\text{m}$ et sous courant d'eau de la suspension après prélèvement des fractions fines.

La capacité d'échange cationique (CEC) et les cations échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+) ont été déterminés selon les échantillons au pH du sol par échange avec du chlorure de cobaltihexamine (Méthode à la cobaltihexamine) ou en milieu tamponné à $\text{pH} = 7$ (Méthode Metson)². Dans le cas de Cobaltihexamine (Ciesielski et Sterckemann, 1997), la détermination de la concentration en ions cobaltihexamine restée en solution après échange avec l'échantillon permet de calculer la quantité fixée sur ce dernier et d'en déduire la valeur de sa CEC. Cette caractéristique permet d'envisager la détermination de la quasi totalité des cations échangeables quel que soit niveau d'acidité du sol. Dans le cas de la méthode Metson, la détermination de la CEC comprend trois étapes : (i) l'échantillon est d'abord saturé en ions ammonium (NH_4^+) par percolations successives d'une solution d'acétate d'ammonium ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{NH}_4$) à 1 mol/L , (ii) le pouvoir tampon de cette dernière permet de ramener le pH du milieu aux environs de 7, ce qui constitue une des caractéristiques essentielles de la méthode, (iii) après avoir éliminé l'excès d'ions ammonium par percolations

² Le jeu d'échantillons ayant été constitué sur une vingtaine d'années, certains échantillons ont été analysés alors que la méthode respectant le pH du sol n'était pas au catalogue du Laboratoire d'Analyse des Sols d'Arras.

d'alcool éthylique, on procède ensuite à leur échange par une solution de chlorure de sodium à 1 mol/L. Les ions ammonium déplacés sont dosés par spectrophotométrie sur la solution précédente, une fois filtrée. Les concentrations trouvées sont converties en $\text{cmol}_{(+)}/\text{kg}$ (centimoles de charges positives par kilogramme de sol sec).

Les cations échangeables peuvent être déterminés par agitation (et non par percolation) de l'échantillon en présence d'une solution d'acétate d'ammonium (extraction des cations échangeables à l'acétate d'ammonium) à 1 mol/L. Après filtration, l'extrait est récupéré en vue du dosage des cations passés en solution (Annexe 4).

E. Diffraction des Rayons X de la fraction < 2 μm

La minéralogie de la fraction < 2 μm de 12 horizons issus de 8 profils de sols³ a été étudiée par diffractométrie des rayons X. La sélection de ces 12 horizons s'est effectuée à partir des diffractogrammes de rayons X obtenus sur les échantillons sous la forme de poudre. La fraction < 2 μm des horizons sélectionnés a ensuite été étudiée sous la forme de dépôts orientés préparés selon le protocole décrit par Robert et Tessier (1974) (Annexe 5).

Le faisceau de rayons X est diffracté sur un réseau de plans cristallins selon la loi de Bragg :

$$2 \times d \times (\sin \theta) = n \times \lambda$$

avec d : distance entre deux plans réticulaires, θ : angle entre le faisceau incident et les plans réticulaires ; n : ordre de la diffraction, λ : longueur d'onde de la source produisant les rayons X. Connaissant les angles θ , on peut estimer les distances réticulaires d du réseau cristallin.

Les échantillons sous forme de poudre ont été analysés à l'aide d'un diffractomètre INEL XRM 3000 en transmission équipé d'un détecteur courbe INEL CPS 120 et d'un tube à anticathode CO 35 kV 35mA. Les échantillons (terre fine < 2 mm, séché à l'air) ont été broyés à l'aide d'un mortier agate. La poudre obtenue a ensuite été introduite dans un capillaire de Mark diamètre 0,5 mm, verre 14.

La fraction < 2 μm extraite par sédimentation (Figure 2.4) a été déposée sur une lame de verre lisse, puis séchée à l'air (24 h) à l'abri de la poussière. La phase argileuse ainsi

³ Ces 12 horizons ont été sélectionnés afin d'étudier la relation entre la minéralogie de la phase < 2 μm et son aptitude à retenir l'eau.

préparée sous la forme d'un dépôt orienté (lame orientée) a été étudié à l'aide d'un diffractomètre à rayons X horizontal de type Thermo Electron ARL'XTRA équipé d'un détecteur solide Si (Li) à anticathode Cu.

F. Mesure de la surface spécifique externe

La fraction < 2 µm développe une surface spécifique élevée qui interagit fortement avec l'eau. On distingue généralement (i) la surface spécifique externe qui correspond à la surface enveloppe de particules élémentaires et qui ne prend par conséquent pas en compte la surface développée par l'espace interfoliaire (surface interne) des minéraux argileux lorsque celui-ci est accessible aux molécules d'eau, (ii) et la surface spécifique totale qui correspond à la somme des surfaces spécifiques externe et interne.

La surface spécifique externe a été déterminée pour la fraction < 2 mm séchée à 105 °C des 12 échantillons sélectionnés pour l'étude de la minéralogie de la fraction argile. La méthode utilisée a été la méthode BET (Fripiat *et al.*, 1971) (Figure 2.5). Le principe de cette méthode consiste à recouvrir la surface externe développée par les particules du sol d'une monocouche de molécules d'azote par adsorption à la température de l'azote liquide. La détermination de la surface externe utilise par conséquent l'isotherme d'adsorption d'azote qui permet de déterminer le volume de gaz adsorbé en une monocouche. Le volume de cette monocouche est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$SA_{BET} = (CSA \times N_a \times V_m) / (A \times B)$$

avec CSA : surface moléculaire de l'azote (nm²), VM : volume de la monocouche (cm³/g), N_a : nombre d'Avogadro (atomes/mol) = 6,023.10²³, A : volume STP de la mole d'azote = 22414 cm³, B : facteur de conversion d'unité = 10¹⁸ nm²/m².

III. VALIDATION DES FONCTIONS DE PEDOTRANSFERT

Pour discuter la validité des fonctions de pédotransfert proposées, nous avons utilisé plusieurs types de critères : l'erreur moyenne de prédiction (*EMP*) ou *mean error of prediction* (*MEP*), l'écart type de prédiction (*ETP*) et l'écart quadratique moyen (*EQM*) ou *root mean square error* (*RMSE*).

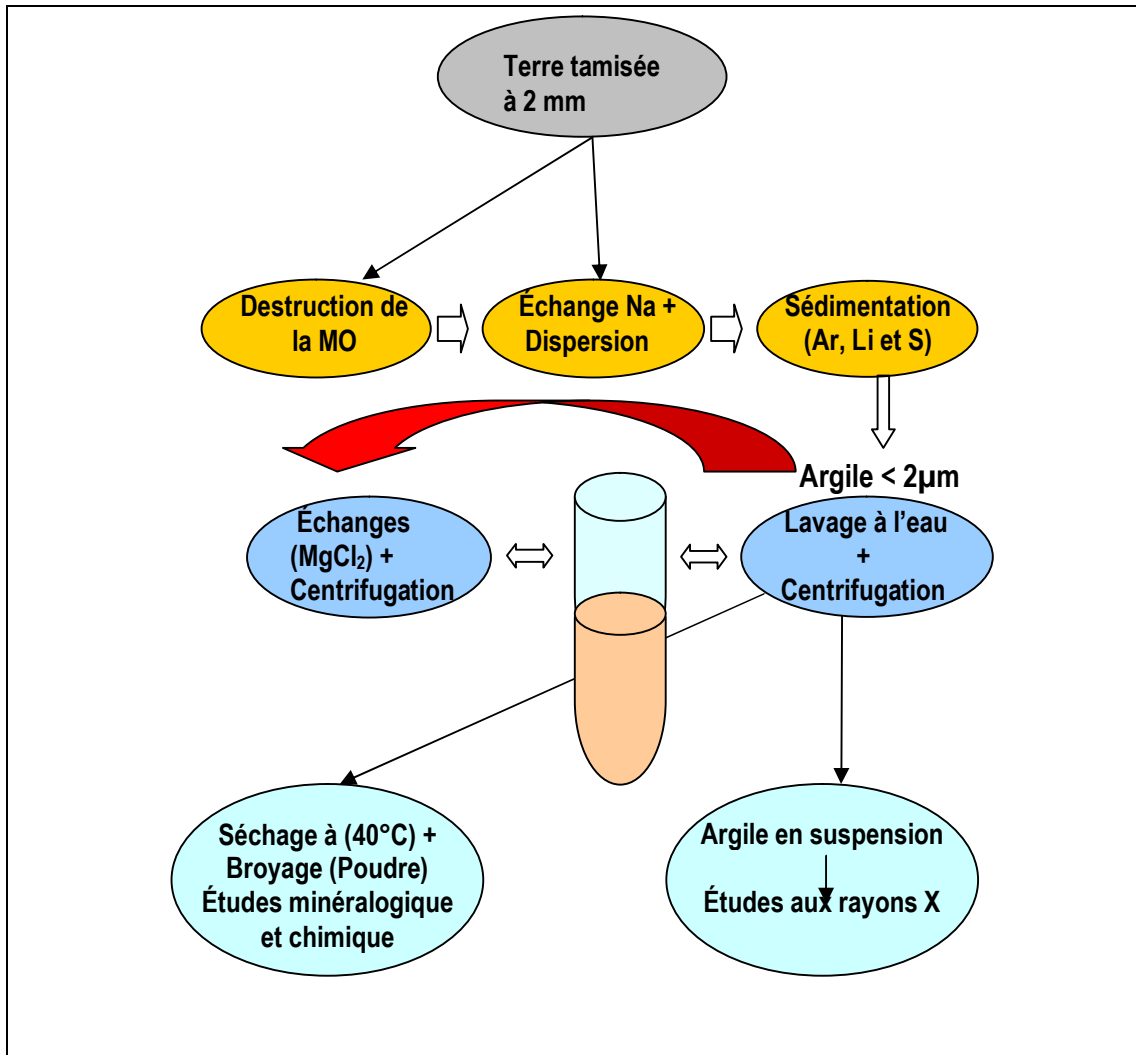


Figure 2.4 : Schéma d'extraction des fractions argileuses (< 2µm) pour une étude minéralogique (Étude à l'aide des rayons X, Robert et Tessier, 1974).



Figure 2.5 : Photographie montrant le dispositif utilisé pour mesurer la surface spécifique BET (Analyseur de surface).

A. L'erreur moyenne de prédiction

L'erreur moyenne de prédiction (*EMP*) 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 d'horizons, θ_p , la teneur en eau volumique prédite et θ_m , la teneur en eau volumique mesurée. L'estimation est d'autant moins biaisée que *EMP* est proche de 0. Lorsque *EMP* est positif, les FPT testées surestiment θ et lorsqu'il est négatif, les FPT testées sous-estiment θ .

B. L'écart type de prédiction

L'écart type de prédiction (*ETP*) 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 :

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

C. L'erreur quadratique moyenne

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

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

Ainsi, plus l'écart type de prédiction est faible, meilleure est l'estimation.

**Comparaison de fonctions de
pédotransfert nationales et européennes
pour prédire les propriétés de rétention en
eau des sols**

Parmi les nombreuses fonctions de pédotransfert (FPT) qui ont été développées depuis plusieurs dizaines d'année, les classes de fonctions de pédotransfert (CFPT) n'ont fait l'objet que d'un nombre très limité d'études car leurs performances sont généralement considérées comme étant très limitées. A l'opposé, les fonctions de pédotransfert continues (FPTC), qui permettent une prédiction des propriétés de rétention en eau en rendant compte de façon continue de la variation des caractéristiques de composition du sol, ont fait l'objet de nombreux travaux. Dans ce chapitre nous discutons les performances de CFPT et FPTC établies à partir de la base de données nationale SOLHYDRO 1.0 et nous les comparons à celles obtenues avec des CFPT et FPTC établies avec la base de données européenne HYPRES.

Les résultats montrent que, excepté pour les CFPT développées avec la base européenne HYPRES, les biais obtenus sont faibles à très faibles ($-0,015 \leq \text{EMP} \leq 0,016 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$). Il n'y a pas, par conséquent, de différence sensible de qualité des fonctions de pédotransfert en terme de biais de prédiction en fonction des CFPT et FPTC utilisées. Les CFPT texturales développées avec SOLHYDRO 1.0 qui sont de simples jeux de valeurs moyennes de teneur en eau volumique pour chaque classe de texture conduisent à des prédictions de qualité analogue à celle obtenue avec les autres CFPT et FPTC testées, celles-ci étant toutes plus sophistiquées et plus exigeantes quant au nombre et à la nature des caractéristiques de sols requises par la prédiction. Concernant cette fois la précision, des différences importantes apparaissent en fonction des CFPT et FPTC utilisées. On enregistre une meilleure précision avec les CFPT et FPTC développées avec la base de données SOLHYDRO 1.0 ($0,037 \leq \text{ETP} \leq 0,047 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) par rapport à celle enregistrée avec les CFPT et FPTC développées avec HYPRES ($0,050 \leq \text{ETP} \leq 0,060 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$). De telles valeurs de précision n'en demeurent pas moins faibles quelle que soit la base de données utilisée. Enfin, concernant l'apport de la prise en compte couplée par des CFPT de la composition granulométrique et de la structure, par l'intermédiaire respectivement de la texture et de la densité apparente, les résultats obtenus dans cette étude ne montrent pas d'amélioration très sensible de la prédiction comme permettaient de l'envisager les résultats enregistrés antérieurement.

Among the numerous pedotransfer functions (PTFs) that were developed, class-PTFs received little attention because their accuracy is considered as limited. On the other hand, continuous-PTFs that enable prediction of the water retention properties by taking into account continuously the variation of basic soil properties were widely studied. In this study, we analyse the performance of class-PTFs (Tables 3.2 and 3.3) and continuous-PTFs (Table 3.4) developed with the French soil database SOLHYDRO 1.0 (Table 3.1). We compare their performance with those recorded with the more sophisticated class-PTFs and continuous-PTFs developed with the European database HYPRES that gather together hydraulic properties of European soils.

Results showed that the class-PTFs and continuous-PTFs established with SOLHYDRO (Annex 6) led to better or similar prediction performance than the one recorded respectively with class-PTFs and continuous-PTFs established with HYPRES. A greater quality of the prediction was particularly recorded for the precision of the prediction and would be related to the larger range of soil types and characteristics in HYPRES than in SOLHYDRO when compared to the variation in the test data set. Among the class-PTFs studied, the simplest ones, i.e. the textural class-PTFs led to pretty good quality of prediction (bias = $-0.003 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ and precision = $0.045 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) with respect to the high availability of the basic soil data required to use them. Indeed, the texture in a triangle comprising five classes was the only one information required for stratification. Finally, taking into account both the texture and structure using the texturo-structural class-PTFs did not decrease the bias and slightly increased the precision.

Thus, our results showed that simple class-PTFs should be still considered as valuable tools for predicting the water retention properties of soils, particularly at scales for which semi-quantitative or qualitative basic characteristics such as the texture are the only characteristics available.

Chapitre III

Comparaison de fonctions de pédotransfert nationales et européennes pour prédire les propriétés de rétention en eau des sols¹

I. INTRODUCTION

Les modèles qui simulent les transferts couplés d'eau et de solutés dans les sols requièrent la connaissance des propriétés hydriques de leurs différents horizons. Ces propriétés ne sont généralement connues que pour un nombre restreint de sols en raison de la lourdeur des protocoles utilisés pour leur détermination. C'est pourquoi des outils de prédiction ont été développés. Ces outils, dénommés « fonctions de pédotransfert » (FPT), relient les propriétés hydriques à des propriétés du sol beaucoup plus aisément accessibles comme la teneur en argile, la teneur en carbone organique ou encore la densité apparente (Bouma et van Lanen, 1987). De nombreuses fonctions de pédotransfert ont été développées pour les propriétés de rétention en eau durant les trois dernières décennies (Wösten *et al.*, 2001).

Les FPT ont été le plus souvent établies par régression multilinéaire et correspondent alors à autant de modèles empiriques décrivant de façon continue (FPTC) la relation pouvant exister entre les caractéristiques du sol (composition granulométrique, teneur en carbone organique ou matière organique, densité apparente) et ses propriétés de rétention en eau.

¹ Ce chapitre a été publié dans la revue *Etude et Gestion des Sols* : AL MAJOU H., BRUAND A., DUVAL O., COUSIN I., 2007 – Comparaison de fonctions de pédotransfert nationales et européennes pour prédire les propriétés de rétention en eau des sols. *Etude et Gestion des Sol*, 14, 103-116.

Des FPTC ont aussi été établies entre les caractéristiques du sol et les paramètres d'un modèle de courbe décrivant la variation de la teneur en eau (θ) en fonction du potentiel (Bastet *et al.*, 1999 ; Wösten *et al.*, 2001 ; Pachepsky *et al.*, 2006). En outre, de telles FPTC permettent d'estimer la teneur en eau de façon continue aux différentes valeurs de potentiel (e.g. Rawls *et al.*, 1982 ; Gupta et Larson, 1979 ; Rawls *et al.*, 1991), ou d'estimer les paramètres du modèle de courbe qui décrit l'évolution de (θ) en fonction du potentiel (Vereecken *et al.*, 1989 ; Minasny *et al.* 1999 ; Wösten *et al.*, 2001).

Les classes de fonctions de pédotransfert (CFPT), quant à elles, permettent de faire correspondre des propriétés hydriques à des classes des sols. Elles sont souvent présentées comme conduisant à une estimation de moins bonne qualité par rapport à celle obtenue avec des FPTC (Wösten *et al.*, 1995). La plupart des CFPT fournissent des teneurs en eau moyennes à des valeurs particulières de potentiel ou une courbe des teneurs en eau moyennes pour chaque classe de texture (Nemes, 2002 ; Bruand *et al.*, 2003 et 2004). En raison de la gamme de variation de la distribution des particules, de la minéralogie de l'argile, de la nature des matières organiques et de l'état structural dans chaque classe de texture, les propriétés de rétention en eau des différents sols peuvent varier significativement (Leij *et al.*, 1999 ; Wösten *et al.*, 1999). En dépit de leur possible imprécision, les CFPT restent des outils faciles à utiliser car elles exigent peu d'informations sur le sol. Elles sont par conséquent bien adaptées à prédire les propriétés de rétention en eau à l'échelle d'un pays ou d'un continent, échelles auxquelles les données disponibles sur les sols sont le plus souvent au mieux des caractéristiques moyennes ou des appartenances à des classes de composition.

Devant le nombre élevé de CFPT et FPTC proposé dans la littérature, il est aujourd'hui tentant d'utiliser des CFPT et FPTC pour des sols du territoire français alors qu'elles ont été établies à partir de sols n'appartenant pas au territoire français. Or, Nemes *et al.*, (2003) ont montré que l'utilisation de CFPT et FPTC établies à une échelle donnée conduisent à des prédictions de qualité dégradée quand elles sont appliquées à une plus petite échelle, c'est-à-dire pour des sols correspondant à une gamme de variabilité plus grande. Tomasella *et al.*, (2003) ont aussi montré que lorsque des CFPT ou FPTC établies à une échelle donnée sont appliquées à la même échelle mais en revanche pour des sols de nature très différente, la qualité des prédictions est inférieure à celle enregistrée lorsqu'elles sont appliquées à des sols de nature proche. On peut alors s'interroger sur la pertinence de CFPT et FPTC établies à partir de sols localisés en dehors du territoire français lorsqu'elles sont utilisées pour des sols du territoire français. Dans cette étude, notre objectif est de discuter pour des sols du territoire français la validité de CFPT et FPTC établies à partir de la base de données

SOLHYDRO 1.0 elle-même composée d'horizons issus de sols du territoire français, et de comparer les résultats obtenus avec ceux enregistrés avec des CFPT et FPTC développées à partir de la base de données européenne HYPRES (Wösten *et al.*, 1999).

II. MATERIEL ET METHODES

A. La base de données SOLHYDRO 1.0

La base de données SOLHYDRO 1.0 rassemble 320 horizons qui ont été prélevés dans des sols de type Cambisol, Luvisol, Planosol, Albeluvisol, Podzol et Fluvisol (ISSS Working Group R.B., 1998), ces sols étant localisés principalement dans le bassin de Paris. Pour chacun de ces horizons, la composition granulométrique, la densité apparente, la teneur en carbone organique, la teneur en CaCO_3 et la capacité d'échange cationique ainsi que les teneurs en eau volumiques aux 7 valeurs de potentiel -10 hPa ($\theta_{1,0}$ à $pF = 1,0$), -33 hPa ($\theta_{1,5}$ à $pF = 1,5$), -100 hPa ($\theta_{2,0}$ à $pF = 2,0$), -330 hPa ($\theta_{2,5}$ à $pF = 2,5$), -1000 hPa ($\theta_{3,0}$ à $pF = 3,0$), -3300 hPa ($\theta_{3,5}$ à $pF = 3,5$) et -15000 hPa ($\theta_{4,2}$ à $pF = 4,2$), sont connues (Bruand *et al.*, 2004). La base SOLHYDRO 1.0 comprend 90 horizons de surface A ou L (de 0 à 30 cm de profondeur) et 230 horizons de subsurface E, B et C (> 30 cm de profondeur) (Tableau 3.1).

B. La base de données de validation

Un ensemble de 107 horizons comprenant 39 horizons de surface A et L et 68 horizons de subsurface E, B et C a été constitué afin de comparer la qualité des prédictions effectuées avec les CFPT et FPTC développées à partir de SOLHYDRO 1.0 et de celles établies à partir de la base de données HYPRES (Tableau 1.3) (Wösten *et al.*, 1999). Les horizons appartiennent à des sols de type Cambisols, Luvisols et Fluvisols (ISSS Working Group R.B., 1998). Les sols échantillonnés sont situés dans le sud du bassin de Paris. Les caractéristiques physico-chimiques et les propriétés de rétention en eau ont aussi été déterminées avec les mêmes méthodes que celles utilisées pour SOLHYDRO 1.0.

Tableau 3.1: Caractéristiques des horizons utilisés pour établir les classes de fonctions de pédotransfert et les fonctions de pédotransfert continues à partir de la base de données SOLHYDRO 1.0 et caractéristiques du jeu de données utilisé pour la validation.

	Granulométrie (%)			CO g.kg ⁻¹	CaCO ₃ g.kg ⁻¹	CEC cmol _c .kg ⁻¹	D _a g.cm ⁻³	Teneur en eau volumique (cm cm ⁻³)						
	<2 µm	2- 50 µm	50- 2000 µm					θ _{1.0}	θ _{1.5}	θ _{2.0}	θ _{2.5}	θ _{3.0}	θ _{3.5}	θ _{4.2}
Horizons utilisés pour établir les classes de fonctions de pédotransfert (CFPT) et fonctions de pédotransfert continues (FPTC)														
Tous horizons (n = 320)														
moyenne	28,9	46,2	24,9	5,7	65	14,3	1,53	0,350	0,335	0,316	0,289	0,257	0,220	0,179
écart type	15,1	20,8	23,9	4,9	189	8,0	0,15	0,067	0,065	0,070	0,070	0,075	0,074	0,070
minimum	1,9	2,8	0,1	0,0	0,0	0,8	1,00	0,123	0,100	0,080	0,056	0,048	0,033	0,013
maximum	92,9	82,1	90,1	28,8	982	52,8	1,84	0,606	0,596	0,586	0,558	0,510	0,462	0,370
Horizons de surface A et L (n = 90)														
moyenne	21,2	49,0	29,8	11,0	47	14,3	1,48	0,331	0,315	0,294	0,268	0,233	0,187	0,141
écart type	11,8	23,2	28,1	4,8	131	7,6	0,14	0,062	0,061	0,066	0,068	0,070	0,062	0,050
minimum	3,2	6,4	2,2	2,5	0,0	3,4	1,10	0,123	0,100	0,095	0,077	0,066	0,040	0,026
maximum	63,7	82,1	89,9	28,8	544	39,1	1,77	0,469	0,459	0,404	0,372	0,375	0,319	0,259
Horizons de profondeur E, B et C (n = 230)														
moyenne	32,0	45,0	23,0	3,6	71	14,2	1,55	0,357	0,343	0,325	0,297	0,267	0,233	0,194
écart type	15,3	19,8	21,7	3,0	207	8,2	0,15	0,068	0,068	0,072	0,072	0,076	0,075	0,071
minimum	1,9	2,8	0,1	0,0	0,0	0,8	1,00	0,134	0,103	0,080	0,056	0,048	0,033	0,013
maximum	92,9	79,8	90,1	28,0	982	52,8	1,84	0,606	0,596	0,586	0,558	0,510	0,462	0,370
Horizons utilisés pour tester les CFPT et FPTC développées à partir de SOLHYDRO 1.0 et HYPRES														
Tous horizons (n = 107)														
moyenne	30,2	40,6	29,2	6,6	38	15,8	1,51	0,356	0,332	0,312	0,287	0,261	0,224	0,202
écart type	15,4	24,3	28,6	5,3	134	10,8	0,13	0,075	0,079	0,082	0,084	0,086	0,083	0,080
minimum	1,9	4,1	1,6	0,0	0,0	0,6	1,10	0,161	0,121	0,099	0,072	0,045	0,041	0,033
maximum	78,7	80,3	91,8	28,2	656	50,2	1,77	0,534	0,498	0,482	0,457	0,440	0,396	0,369
Horizons de surface A et L (n = 39)														
moyenne	25,1	46,7	28,2	12,0	34	15,3	1,46	0,364	0,334	0,312	0,286	0,256	0,208	0,186
écart type	13,4	24,9	29,2	4,7	106	10,9	0,12	0,080	0,083	0,084	0,081	0,085	0,077	0,075
minimum	4,1	6,7	1,8	1,2	0,0	10,0	1,13	0,178	0,151	0,121	0,108	0,091	0,075	0,063
maximum	56,1	80,3	88,9	28,2	432	46,4	1,70	0,534	0,490	0,477	0,442	0,433	0,374	0,339
Horizons de profondeur E, B et C (n = 68)														
moyenne	33,1	37,2	29,7	3,6	41	16,2	1,54	0,350	0,328	0,310	0,286	0,263	0,231	0,210
écart type	15,9	23,5	28,5	2,5	148	10,8	0,13	0,071	0,077	0,081	0,086	0,086	0,084	0,080
minimum	1,9	4,1	1,6	0,0	0,0	0,6	1,10	0,161	0,121	0,099	0,072	0,045	0,041	0,033
maximum	78,7	75,9	91,8	14,7	656	50,2	1,77	0,513	0,498	0,482	0,457	0,440	0,396	0,369

C. Les CFPT développées avec SOLHYDRO 1.0 et HYPRES

Plusieurs jeux de CFPT ont été établis à partir de SOLHYDRO 1.0. Des CFPT ont ainsi été établies :

- pour chaque classe de texture dans le triangle de texture européen (CEC, 1985) (Figure 3.1) en ne tenant compte que de la texture (CFPT texturales) (Tableau 3.2) ;
- puis en séparant les horizons de surface A et L, et ceux de sub-surface E, B et C au sein de chaque classe de texture (Tableau 3.2).

Des CFPT ont ensuite été établies :

- en tenant compte à la fois de la texture et de la densité apparente (CFPT texturo-structurales) (Tableau 3.3) ;
- puis tout en séparant une nouvelle fois les horizons de surface A et L, et ceux de sub-surface E, B et C au sein de chaque classe couplant texture et densité apparente (Tableau 3.3).

Chaque jeu de CFPT est alors composé de 10 ensembles de 7 valeurs de teneur en eau moyenne (5 pour les horizons de surface et 5 pour ceux de sub-surface).

Un jeu de CFPT développé par Wösten *et al.* (1999) à partir de la base de données européenne HYPRES a aussi été utilisé. Pour chaque classe de texture dans le triangle de texture européen (CEC, 1985), Wösten *et al.* (1999) ont proposé des valeurs pour les paramètres du modèle de courbe de rétention en eau de van Genuchten (1980) qui ont été obtenues en utilisant le programme RETC (van Genuchten *et al.*, 1991). La teneur en eau volumique aux 7 valeurs de potentiel -10 hPa ($\theta_{1.0}$), -33 hPa ($\theta_{1.5}$), -100 hPa ($\theta_{2.0}$), -330 hPa ($\theta_{2.5}$), -1000 hPa ($\theta_{3.0}$), -3300 hPa ($\theta_{3.5}$) et -15000 hPa ($\theta_{4.2}$) a été calculée pour chaque horizon en utilisant la courbe de rétention en eau.

D. Les FPTC développées avec SOLHYDRO 1.0 et HYPRES

Des FPTC ont été développées à partir de la base de données SOLHYDRO 1.0 par régression multilinéaire pour les 7 valeurs de teneur en eau $\theta_{1.0}$, $\theta_{1.5}$, $\theta_{2.0}$, $\theta_{2.5}$, $\theta_{3.0}$, $\theta_{3.5}$, $\theta_{4.2}$. De telles FPTC ont été fréquemment utilisées dans la littérature. Dans cette étude, elles sont de la forme :

$$\theta = a + (b \times \%Ar) + (c \times \%Li) + (d \times \%CO) + (e \times D_a)$$

avec θ , la teneur en eau volumique à une valeur de potentiel donnée, %Ar et %Li, le pourcentage de la teneur en argile et en limon, %CO, la teneur en carbone organique, D_a la densité apparente de l'horizon et a , b , c , d et e , les coefficients de la régression multilinéaire. Les valeurs des paramètres pour chaque valeur de θ sont données dans le Tableau 3.4.

Les FPTC développées par Wösten *et al.* (1999) à partir de la base de données européenne HYPRES ont aussi été utilisées. Ces FPTC consistent en des relations entre chaque paramètre de la courbe de rétention en eau selon le modèle de van Genuchten (1980) et les caractéristiques de constitution de l'horizon (composition granulométrique, teneur en carbone organique, densité apparente et une variable prenant la valeur 0 ou 1 selon qu'il s'agit d'un horizon de surface ou de sub-surface). La teneur en eau volumique à sept valeurs de potentiel ($\theta_{1.0}$, $\theta_{1.5}$, $\theta_{2.0}$, $\theta_{2.5}$, $\theta_{3.0}$, $\theta_{3.5}$, $\theta_{4.2}$) a ainsi été calculée pour chaque horizon en utilisant ces FPTC.

E. Analyse de la performance des CFPT et FPTC

Pour discuter la validité globale des fonctions de pédotransfert utilisées, nous avons calculé l'erreur moyenne de prédiction (EMP) et l'écart type de prédiction (ETP) pour l'ensemble des horizons considérés et pour les différents potentiels comme suit :

$$EMP_{moy} = \frac{1}{n' \cdot n} \sum_{j=1}^{n'} \sum_{i=1}^n (\theta_{p,j,i} - \theta_{m,j,i})$$

$$ETP_{moy} = \left\{ \frac{1}{n' \cdot n} \sum_{j=1}^{n'} \sum_{i=1}^n [(\theta_{p,j,i} - \theta_{m,j,i}) - EMP_{moy}]^2 \right\}^{1/2}$$

avec n , nombre de points de potentiel pour chaque horizon ($n=7$ dans le cas de cette étude), n' , le nombre d'horizons considérés ($n' \leq 107$ dans cette étude), $\theta_{p,j,i}$, teneur en eau volumique prédite au potentiel i pour l'horizon j , $\theta_{m,j,i}$, teneur en eau volumique mesurée au potentiel i pour l'horizon j . La prédiction est d'autant moins biaisée que EMP_{moy} est proche de 0. Par ailleurs, les FPT surestiment la teneur en eau lorsque EMP_{moy} est positif et la sous-estiment lorsque EMP_{moy} est négatif. L'écart type (ETP) renseigne sur la précision de la prédiction, et cette précision est d'autant plus élevée que EMP_{moy} est faible.

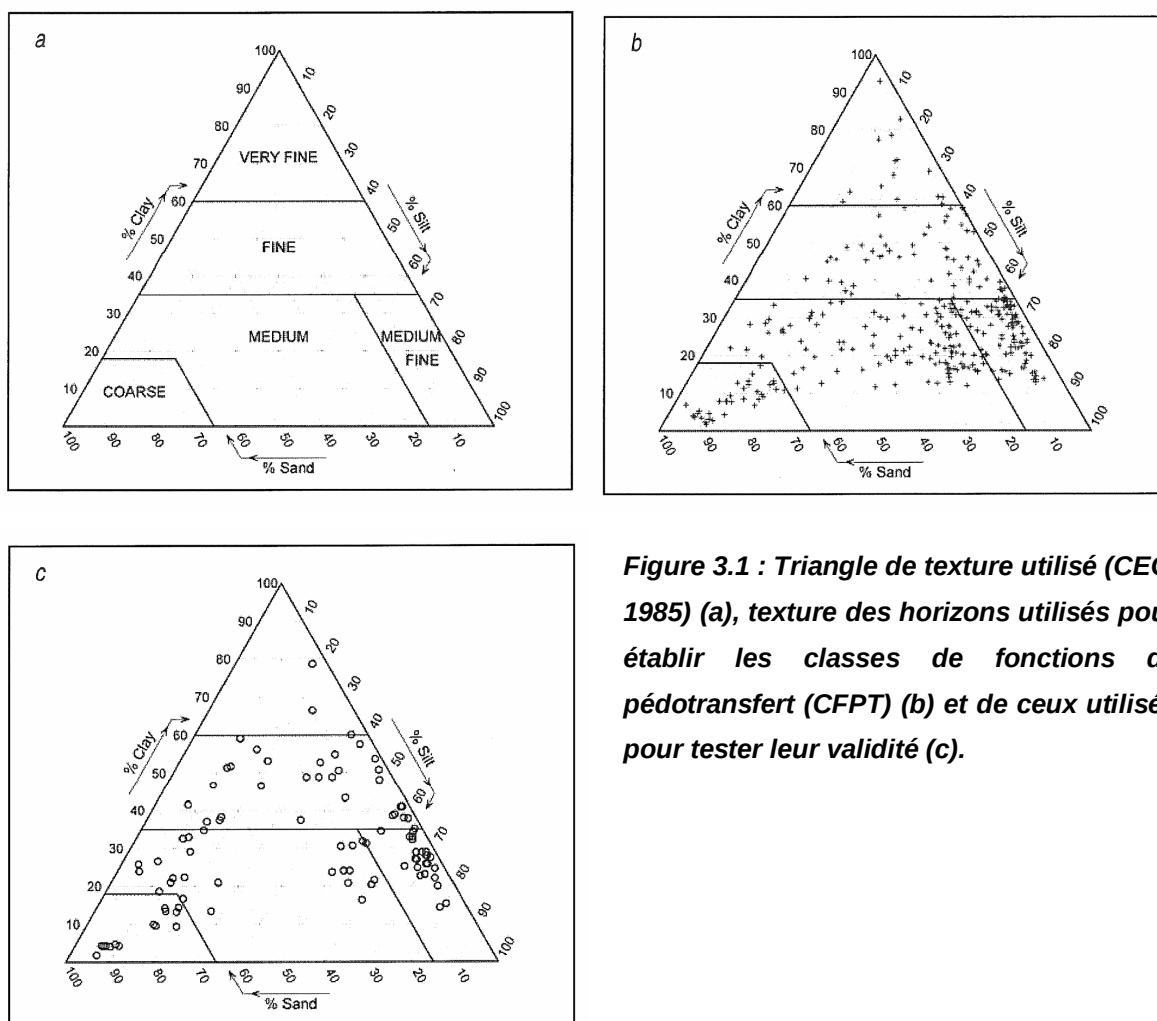


Figure 3.1 : Triangle de texture utilisé (CEC, 1985) (a), texture des horizons utilisés pour établir les classes de fonctions de pédotransfert (CFPT) (b) et de ceux utilisés pour tester leur validité (c).

Tableau 3.2 : Classes de fonctions de pédotransfert (CFPT) texturales développées avec SOLHYDRO 1.0 sans et après stratification par type d'horizon.

	Teneur en eau volumique (cm ³ .cm ⁻³)						
	$\theta_{1,0}$	$\theta_{1,5}$	$\theta_{2,0}$	$\theta_{2,5}$	$\theta_{3,0}$	$\theta_{3,5}$	$\theta_{4,2}$
Tous horizons (n = 320)							
Très Fine (n = 15)	0,455	0,437	0,424	0,402	0,385	0,357	0,322
Fine (n = 60)	0,399	0,388	0,373	0,351	0,331	0,301	0,254
Medium Fine (n = 96)	0,356	0,342	0,327	0,298	0,254	0,210	0,173
Medium (n = 117)	0,334	0,320	0,302	0,273	0,242	0,203	0,156
Grossière (n = 32)	0,249	0,224	0,181	0,149	0,120	0,100	0,076
Horizons de surface A et L (n = 90)							
Très Fine (n = 1)	0,439	0,411	0,393	0,367	0,341	0,308	0,259
Fine (n = 6)	0,411	0,384	0,369	0,345	0,339	0,292	0,238
Medium Fine (n = 35)	0,350	0,335	0,322	0,297	0,249	0,198	0,152
Medium (n = 28)	0,335	0,323	0,308	0,287	0,256	0,199	0,140
Grossière (n = 20)	0,264	0,241	0,200	0,164	0,133	0,113	0,086
Horizons de subsurface E, B et C (n = 230)							
Très Fine (n = 14)	0,456	0,438	0,426	0,404	0,389	0,361	0,327
Fine (n = 54)	0,398	0,389	0,373	0,352	0,330	0,302	0,256
Medium fine (n = 61)	0,360	0,347	0,330	0,298	0,257	0,216	0,185
Medium (n = 89)	0,334	0,319	0,300	0,269	0,238	0,205	0,161
Grossière (n = 12)	0,223	0,196	0,149	0,125	0,099	0,078	0,059

Tableau 3.3 : Classes de fonctions de pédotransfert (CFPT) texturo-structurales développées avec SOLHYDRO 1.0 sans et après stratification en fonction du type d'horizon.

		Teneur en eau volumique (cm ³ .cm ⁻³)						
		$\theta_{1.0}$	$\theta_{1.5}$	$\theta_{2.0}$	$\theta_{2.5}$	$\theta_{3.0}$	$\theta_{3.5}$	$\theta_{4.2}$
Tous horizons (n = 320)								
Très Fine (n =15)	1,10≤ D _a <1,30	0,498	0,473	0,451	0,423	0,405	0,371	0,330
	1,30≤ D _a <1,50	0,459	0,439	0,428	0,405	0,385	0,352	0,328
	1,50≤ D _a <1,70	0,359	0,359	0,361	0,353	0,347	0,340	0,294
Fine (n = 32)	1,00≤ D _a <1,20	0,519	0,499	0,494	0,461	0,431	0,373	0,281
	1,20≤ D _a <1,40	0,452	0,443	0,421	0,385	0,373	0,340	0,271
	1,40≤ D _a <1,60	0,391	0,378	0,361	0,344	0,321	0,289	0,250
	1,60≤ D _a <1,80	0,338	0,334	0,325	0,307	0,291	0,275	0,244
Medium Fine (n = 96)	1,20≤ D _a <1,40	0,348	0,338	0,323	0,291	0,232	0,188	0,153
	1,40≤ D _a <1,60	0,359	0,343	0,328	0,298	0,258	0,211	0,175
	1,60≤ D _a <1,80	0,353	0,345	0,329	0,303	0,263	0,230	0,190
Medium (n = 117)	1,20≤ D _a <1,40	0,354	0,337	0,314	0,278	0,245	0,193	0,140
	1,40≤ D _a <1,60	0,346	0,329	0,310	0,275	0,235	0,193	0,146
	1,60≤ D _a <1,80	0,320	0,307	0,293	0,270	0,248	0,214	0,167
	1,80≤ D _a <2,00	0,296	0,289	0,274	0,266	0,258	0,231	0,186
Grossière (n = 32)	1,40≤ D _a <1,60	0,241	0,210	0,164	0,135	0,106	0,093	0,075
	1,60≤ D _a <1,80	0,253	0,231	0,188	0,156	0,126	0,103	0,077
Horizons de surface A et L (n = 90)								
Très Fine (n = 1)	1,10≤ D _a <1,30	0,439	0,411	0,393	0,367	0,341	0,308	0,259
Fine (n = 6)	1,20≤ D _a <1,40	0,422	0,388	0,370	0,347	0,348	0,293	0,240
	1,40≤ D _a <1,60	0,401	0,379	0,367	0,344	0,331	0,290	0,235
Medium Fine (n = 35)	1,20≤ D _a <1,40	0,346	0,336	0,321	0,293	0,232	0,187	0,152
	1,40≤ D _a <1,60	0,353	0,335	0,322	0,299	0,261	0,206	0,153
Medium (n=28)	1,20≤ D _a <1,40	0,364	0,352	0,330	0,296	0,261	0,204	0,144
	1,40≤ D _a <1,60	0,338	0,324	0,311	0,299	0,266	0,205	0,145
	1,60≤ D _a <1,80	0,301	0,291	0,279	0,260	0,236	0,184	0,127
Grossière (n=20)	1,40≤ D _a <1,60	0,241	0,207	0,164	0,135	0,106	0,092	0,075
	1,60≤ D _a <1,80	0,284	0,269	0,229	0,188	0,155	0,131	0,095
Horizons de subsurface E, B et C (n = 230)								
Très Fine (n = 14)	1,10≤ D _a <1,30	0,510	0,486	0,462	0,434	0,418	0,384	0,345
	1,30≤ D _a <1,50	0,459	0,439	0,428	0,405	0,385	0,352	0,328
	1,50≤ D _a <1,70	0,359	0,359	0,361	0,353	0,347	0,340	0,294
Fine (n = 54)	1,00≤ D _a <1,20	0,559	0,548	0,541	0,506	0,476	0,418	0,305
	1,20≤ D _a <1,40	0,446	0,436	0,415	0,377	0,358	0,332	0,266
	1,40≤ D _a <1,60	0,387	0,376	0,359	0,343	0,319	0,289	0,252
	1,60≤ D _a <1,80	0,338	0,334	0,325	0,307	0,291	0,275	0,244
Medium Fine (n = 61)	1,20≤ D _a <1,40	0,352	0,343	0,325	0,285	0,240	0,206	0,184
	1,40≤ D _a <1,60	0,363	0,348	0,331	0,299	0,258	0,213	0,184
	1,60≤ D _a <1,80	0,353	0,345	0,329	0,303	0,263	0,230	0,190
Medium (n = 89)	1,20≤ D _a <1,40	0,340	0,317	0,293	0,254	0,222	0,179	0,134
	1,40≤ D _a <1,60	0,349	0,331	0,309	0,267	0,224	0,189	0,146
	1,60≤ D _a <1,80	0,324	0,311	0,295	0,272	0,251	0,220	0,175
	1,80≤ D _a <2,00	0,296	0,289	0,274	0,266	0,258	0,231	0,186
Grossière (n=12)	1,60≤ D _a <1,80	0,223	0,196	0,149	0,125	0,099	0,078	0,059

Tableau 3.4 : Coefficients des régressions multilinéaires et coefficients de détermination (R^2) des fonctions de pédotransfert continues (FPTC) développées avec SOLHYDRO 1.0 sans et après stratification par le type d'horizon.

		Potentiel de l'eau (hPa)						
		-10	-33	-100	-330	-1000	-3300	-15000
Tous horizons (n = 320)	a	0,4701 ^{***}	0,3556 ^{***}	0,2620 ^{***}	0,1301 ^{***}	0,0184	-0,0504	-0,0786 ^{**}
	b	0,0026 ^{***}	0,0029 ^{***}	0,0034 ^{***}	0,0038 ^{***}	0,0045 ^{***}	0,0047 ^{***}	0,0045 ^{***}
	c	0,0006 ^{***}	0,0008 ^{***}	0,0012 ^{***}	0,0012 ^{***}	0,0008 ^{***}	0,0005 ^{***}	0,0003 ^{***}
	d	-0,0006	-0,0002	0,0002	0,0010	0,0017 ^{***}	0,0012 ^{**}	0,0004
	e	-0,1447 ^{***}	-0,0939 ^{***}	-0,0647 ^{***}	-0,0084	0,0398 [*]	0,0697 ^{***}	0,0710 ^{***}
	R ²	0,59	0,64	0,69	0,74	0,77	0,82	0,86
Horizons de surface A et L (n = 90)	a	0,1553 [*]	0,1159	0,0204	-0,0722	-0,2026 ^{***}	-0,1912 ^{***}	-0,0737 [*]
	b	0,0023 ^{***}	0,0023 ^{***}	0,0027 ^{***}	0,0033 ^{***}	0,0044 ^{***}	0,0045 ^{***}	0,0038 ^{***}
	c	0,0008 ^{***}	0,0010 ^{***}	0,0014 ^{***}	0,0016 ^{***}	0,0011 ^{***}	0,0005 ^{***}	0,0002 ^{***}
	d	0,0040 ^{**}	0,0041 ^{***}	0,0041 ^{***}	0,0037 ^{***}	0,0044 ^{***}	0,0037 ^{***}	0,0020 ^{***}
	e	0,0294	0,0384	0,0676 [*]	0,1032 ^{***}	0,1613 ^{***}	0,1463 ^{***}	0,0672 ^{***}
	R ²	0,56	0,62	0,75	0,81	0,83	0,87	0,90
Horizons de subsurface E, B et C (n = 230)	a	0,5917 ^{***}	0,5167 ^{***}	0,4272 ^{***}	0,2820 ^{***}	0,1831 ^{***}	0,0756 [*]	-0,0379
	b	0,0023 ^{***}	0,0027 ^{***}	0,0031 ^{***}	0,0037 ^{***}	0,0043 ^{***}	0,0045 ^{***}	0,0045 ^{***}
	c	0,0006 ^{***}	0,0008 ^{***}	0,0011 ^{***}	0,0010 ^{***}	0,0007 ^{***}	0,0005 ^{***}	0,0004 ^{***}
	d	-0,0023 [*]	-0,0026 ^{**}	-0,0023 [*]	-0,0020	-0,0018	-0,0014	1*10 ⁻⁵
	e	-0,2113 ^{***}	-0,1849 ^{***}	-0,1564 ^{***}	-0,0919 ^{***}	-0,0502 [*]	-0,0006	0,0453 ^{**}
	R ²	0,64	0,69	0,69	0,72	0,74	0,79	0,83

$\theta = a + (b \times \%Ar) + (c \times \%Li) + (d \times \%CO) + (e \times D_a)$ avec θ teneur en eau volumique à une valeur de potentiel.

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

III. RESULTATS

A. Validité des CFPT texturales et texturo-structurales développées avec SOLHYDRO

1.0 Sans stratification par type d'horizon

Les CFPT texturales développées à partir de la base de données SOLHYDRO 1.0 conduisent à un très faible biais de prédiction (Figure 3.2, Annexe 6). L'utilisation des CFPT texturo-structurales n'améliorent pas le biais de prédiction déjà très faible avec les CFPT texturales. La précision de la prédiction est en revanche légèrement améliorée lorsque l'on passe des CFPT texturales aux CFPT texturo-structurales. Les résultats enregistrés par classe de texture ne montrent pas d'amélioration nette du biais et de la précision lorsque l'on passe des CFPT texturales aux CFPT texturo-structurales.

B. Validité des CFPT texturales et texturo-structurales développées avec SOLHYDRO

1.0 Après stratification par type d'horizon

L'utilisation de CFPT texturales établies après stratification par le type d'horizon, c'est-à-dire en séparant les horizons de surface A et L d'une part, et des horizons de subsurface E, B et C, d'autre part, n'améliore pas la performance des CFPT (Figures 3.3 et 3.4, Annexe 6). En effet, les valeurs des EMP et ETP sont similaires avec et sans stratification en fonction du type d'horizon. Il en va de même avec les CFPT texturo-structurales (Figures 3.3 et 3.4).

C. Comparaison des CFPT développées avec SOLHYDRO 1.0 et HYPRES

La distinction des horizons de surface et de subsurface permet de comparer les performances des CFPT texturales et texturo-structurales développées à partir de la base de données SOLHYDRO 1.0 avec celles des CFPT établies à partir Wösten et al. (1999) à partir de la base de données européenne HYPRES. Les résultats montrent que le biais de prédiction est plus faible avec les CFPT texturales et texturo-structurales établies avec SOLHYDRO 1.0 que celui enregistré avec les CFPT établies avec la base de données HYPRES (Figures 3.3 et 3.4, Annexe 6). Les résultats montrent aussi que les CFPT texturales et texturo-structurales développées en utilisant la base de données SOLHYDRO 1.0 conduisent à une précision meilleure que celle obtenue avec les CFPT développées avec HYPRES.

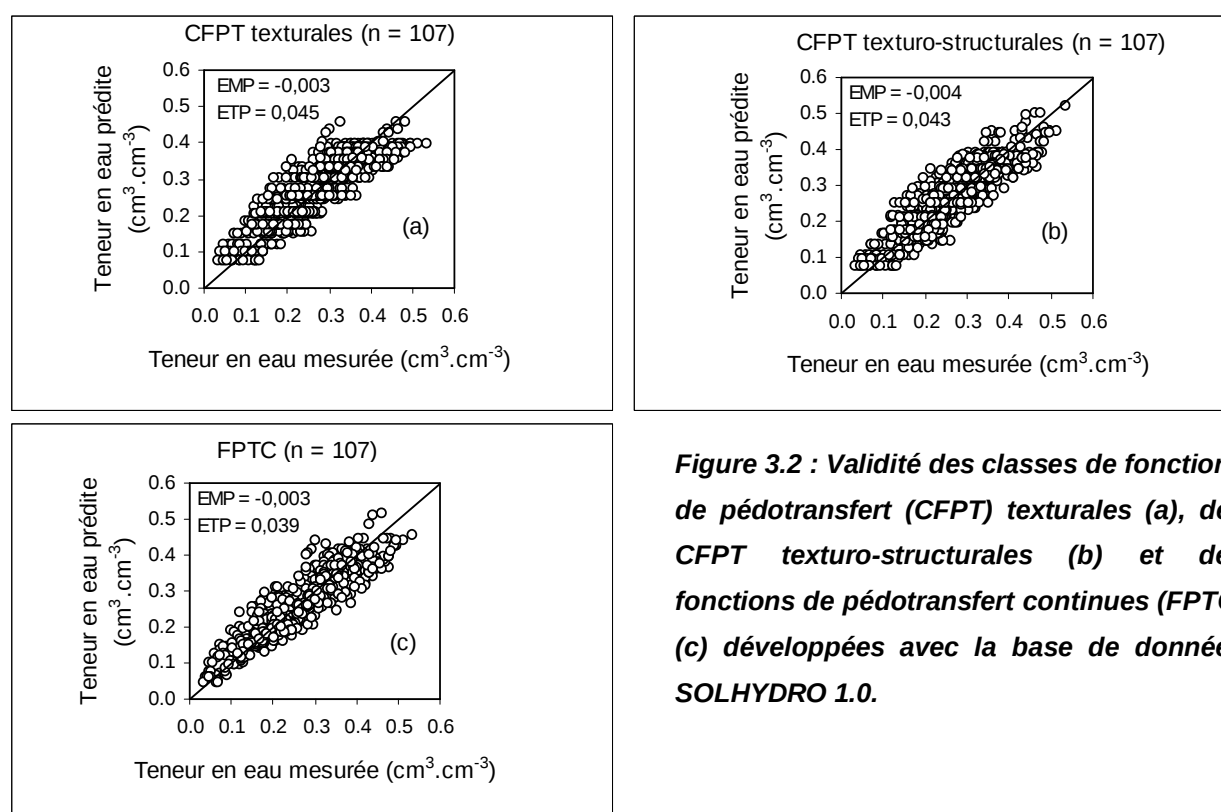


Figure 3.2 : Validité des classes de fonctions de pédotransfert (CFPT) texturales (a), des CFPT texturo-structurales (b) et des fonctions de pédotransfert continues (FPTC) (c) développées avec la base de données SOLHYDRO 1.0.

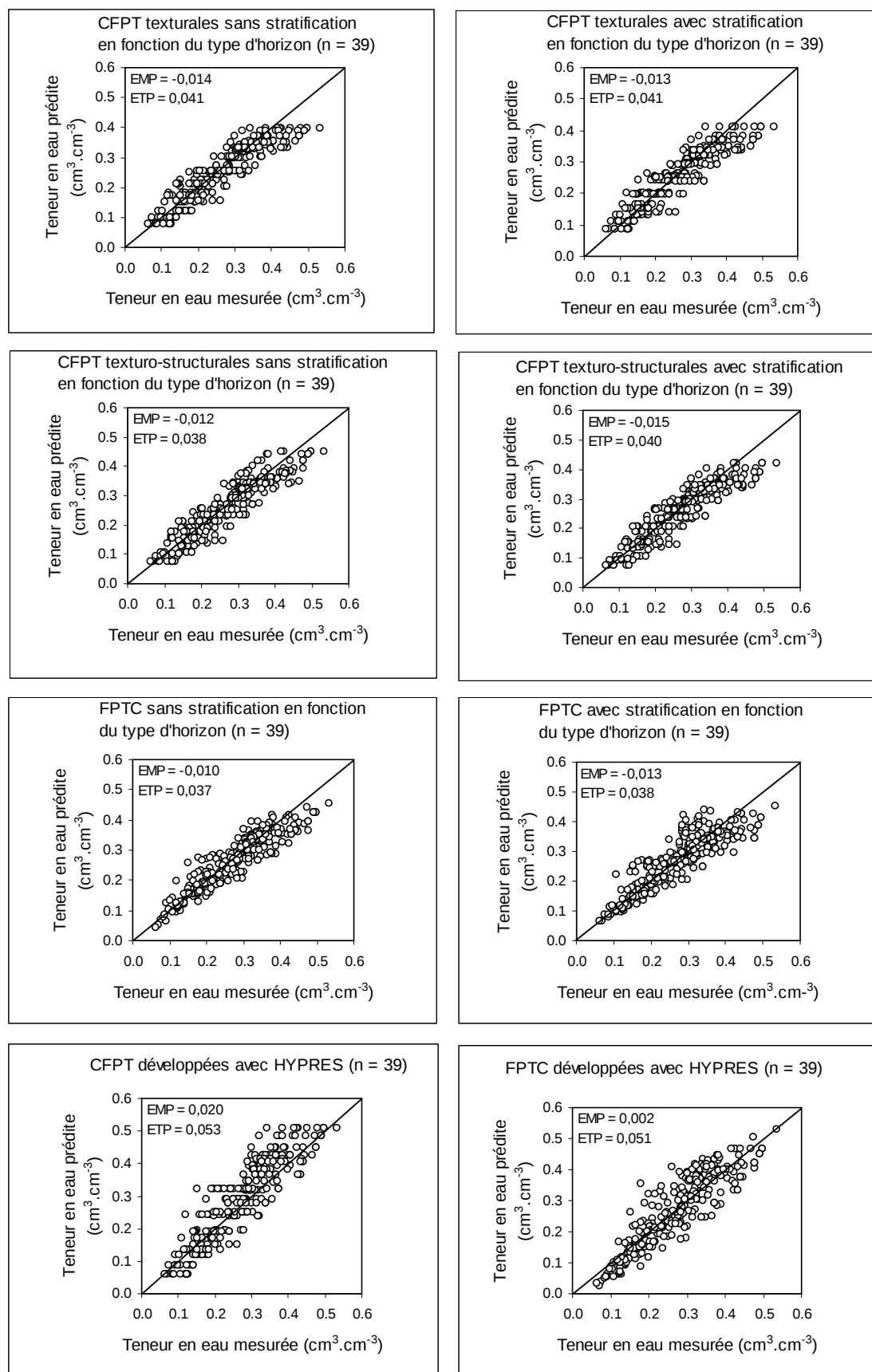


Figure 3.3 : Validité des classes et fonctions de pédotransfert développées avec la base de données SOLHYDRO 1.0 et HYPRES pour les horizons de surface A, L (n = 39).

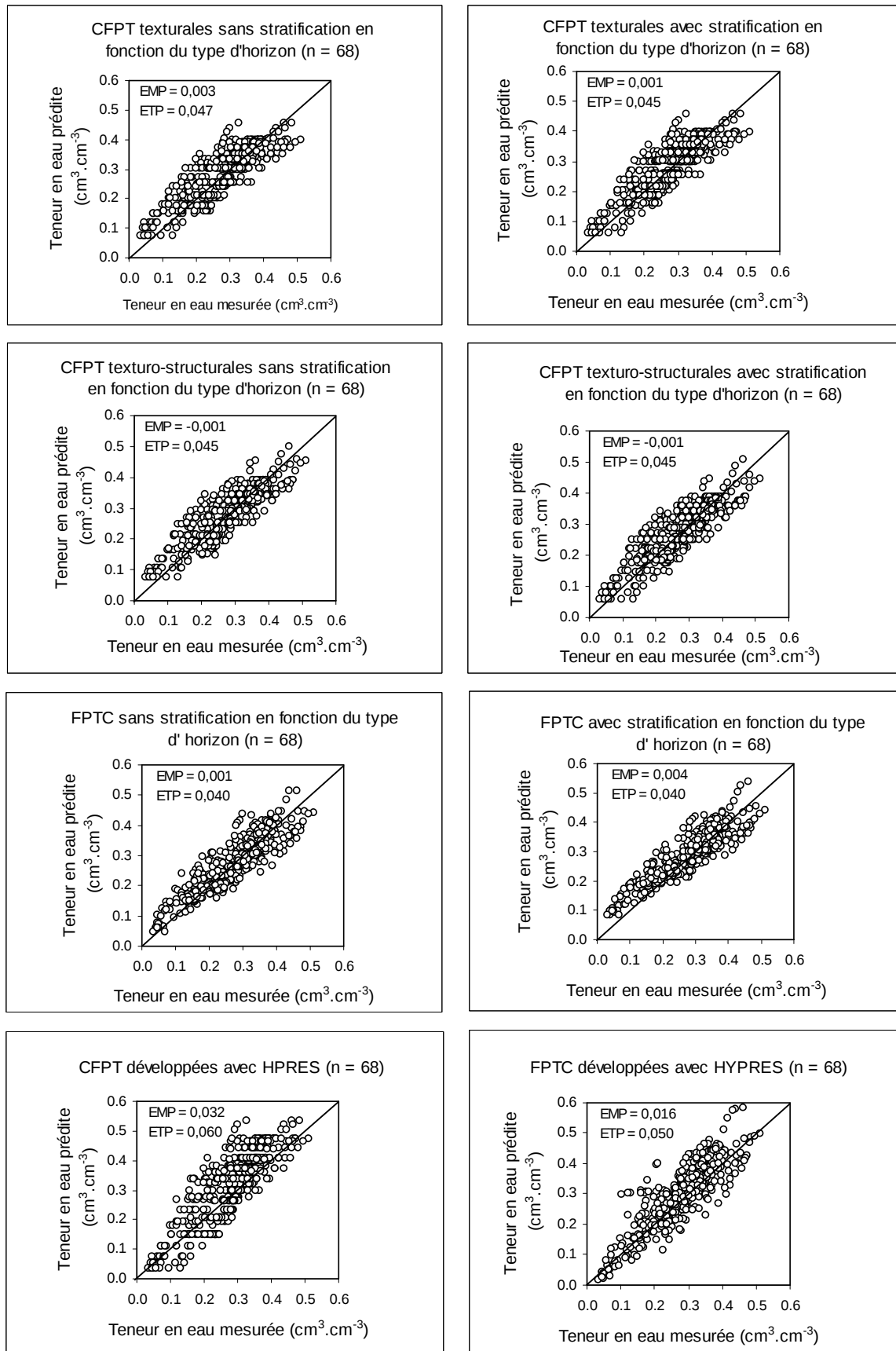


Figure 3.4 : Validité des classes et fonctions de pédotransfert développées avec la base de données SOLHYDRO 1.0 et HYPRES pour les horizons de subsurface E, B et C (n = 68).

Après avoir séparé les horizons de surface et ceux de profondeur, l'analyse par classe de texture montre que les biais enregistrés avec les CFPT texturales et texturo-structurales développées avec SOLHYDRO 1.0 sont similaires ou voisins pour les horizons appartenant à une même classe de texture (Annexe 6). Il en va de même pour la précision. Les résultats montrent aussi que l'utilisation des CFPT développées avec la base de données HYPRES conduit à des résultats de qualité inférieure, excepté pour la classe Medium Fine. En effet, excepté pour cette classe, le biais et la précision sont respectivement supérieurs et inférieurs à ceux enregistrés avec les CFPT texturales et texturo-structurales développées avec SOLHYDRO 1.0.

D. Validité des FPTC développées avec SOLHYDRO 1.0

Les FPTC développées avec SOLHYDRO 1.0, qui sont des régressions multilinéaires, sous-estiment légèrement la teneur en eau ($EMP = -0,003 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) (Figure 3.2, Annexe 6). Après stratification en fonction du type d'horizon, le biais d'estimation est plus élevé pour les horizons de surface A et L, comme pour les horizons de subsurface E, B et C. Le biais est d'ailleurs plus élevé pour les horizons de surface ($EMP = -0,013 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) que pour les horizons de subsurface ($EMP = 0,004 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) (Figures 3.3 et 3.4). Ces différents biais d'estimation sont similaires à ceux enregistrés avec les CFPT texturales et texturo-structurales pour les horizons de surface A et L d'une part, et de subsurface E, B et C d'autre part.

E. Comparaison des FPTC développées avec SOLHYDRO 1.0 et HYPRES

Les FPTC développées à partir de HYPRES conduisent à un biais qui est plus faible pour les horizons de surface que pour les horizons de profondeur. Ce biais est en valeur absolue inférieur pour les horizons de surface à celui obtenu avec les FPTC développées avec SOLHYDRO 1.0. Pour les horizons de subsurface, c'est l'opposé qui est enregistré. La précision enregistrée avec les FPTC développées avec SOLHYDRO 1.0 est en revanche supérieure à celle enregistrée avec les FPTC développées avec HYPRES, tant pour les horizons de surface que pour ceux de subsurface.

IV. DISCUSSION ET CONCLUSION

Les biais obtenus avec les différentes CFPT et FPTC développées avec SOLHYDRO 1.0 sont faibles à très faibles ($-0,015 \leq EMP \leq 0,004 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) alors qu'il est significativement

plus élevé avec les CFPT développées avec la base européenne HYPRES ($EMP = 0,032 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$). Si l'on écarte ce dernier cas, il n'y a pas, par conséquent, de différence sensible de qualité des fonctions de pédotransfert en terme de biais de prédiction en fonction des CFPT et FPTC utilisées. Les CFPT texturales développées avec la base de données nationale SOLHYDRO 1.0 qui sont de simples jeux de valeurs moyennes de teneur en eau volumique pour chaque classe de texture conduisent donc à des prédictions de qualité analogue à celle obtenue avec les autres CFPT et FPTC testées. Il en ressort que des CFPT et FPTC plus sophistiquées que les CFPT texturales développées avec SOLHYDRO 1.0 et plus exigeantes que celles-ci quant au nombre et à la nature des caractéristiques de sols requises par la prédiction, ne conduisent pas à une amélioration des prédictions.

Concernant cette fois la précision, des différences importantes apparaissent en fonction des CFPT et FPTC utilisées. La précision est supérieure avec les CFPT et FPTC développées avec la base de données SOLHYDRO 1.0 ($0,037 \leq ETP \leq 0,047 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) à ce qu'elle est avec celles développées avec HYPRES ($0,050 \leq ETP \leq 0,060 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$). De telles précisions n'en demeurent pas moins faibles quelles que soient les bases de données utilisées.

Les résultats obtenus montrent par conséquent que de « simples » CFPT texturales qui ne sont que des jeux de teneur en eau volumique moyenne à 7 valeurs de potentiel et pour les 5 classes de texture, permettent une prédiction des propriétés de rétention en eau avec une qualité équivalente, voire dans certains cas même meilleure, à celle enregistrée avec des CFPT ou des FPTC plus sophistiquées. A cela, il faut sans doute ajouter aussi, comme l'ont noté Wostën *et al.* (2001) que l'utilisation de FPT établies à partir d'un ensemble de sols correspondant à une gamme de variation différente de celle de l'ensemble de sols auquel on les applique, est à éviter. Ainsi, si la base HYPRES inclut des sols du territoire national, il n'en reste pas moins qu'elle correspond à une gamme de variation de sols qui est beaucoup plus large que les sols du territoire national. Nos résultats sont par ailleurs cohérents avec ceux enregistrés par Nemes *et al.* (2003) qui ont montré que les prédictions obtenues avec des FPT établies à l'échelle d'un continent étaient de moindre qualité qu'avec celles obtenues avec des FPT établies à l'échelle d'un pays.

Concernant l'apport de la prise en compte couplée de la composition granulométrique et de la structure par l'intermédiaire respectivement de la texture et de la densité apparente, les résultats obtenus dans cette étude ne montrent pas d'amélioration très sensible de la prédiction. S'il n'est pas envisageable d'enregistrer une réduction du biais avec la CFPT texturo-structurales tant il est déjà faible avec les CFPT texturales développées avec

SOLHYDRO 1.0, la précision qui est en revanche faible avec les CFPT texturales ($ETP = 0,045 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) s'accroît très légèrement avec les CFPT texturo-structurales ($ETP = 0,043 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$). L'analyse après stratification par le type d'horizons montre des résultats très proches lorsque l'on compare les CFPT texturales et texturo-structurales développées avec SOLHYDRO 1.0 pour les horizons de surface A et L ($EMP = -0,013$ et $-0,015 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ et $ETP = 0,041$ et $0,040 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) et les horizons de subsurface E, B et C ($EMP = 0,001$ et $-0,001 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ et $ETP = 0,045$ et $0,045 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$). Le biais plus élevé enregistré avec les horizons de surface est sans doute en partie la conséquence des difficultés qu'il y a à mettre en relation les propriétés de rétention en eau des horizons travaillés L avec leur composition granulométrique tant leur état structural peut être variable, ainsi que la conséquence des difficultés qu'il y a à rendre compte de cet état structural et de ce que cela implique pour la géométrie de l'espace poral à l'aide de la seule densité apparente (Richard *et al.*, 2001).