

# Détermination de la variation spatio-temporelle de la teneur en eau lors d'une infiltration verticale en utilisant la méthode TDR

BOUCHEMELLA Salima<sup>1</sup> & ALIMI-ICHOLA Ibrahim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Univ. Souk Ahras. Laboratoire INFRARES, Département de Génie civil, Algérie.  
[Sali.bouchemella@gmail.com](mailto:Sali.bouchemella@gmail.com)

<sup>2</sup>Insa de Lyon, Laboratoire LGCIE, France. [ibrahimalimiichola8@msn.com](mailto:ibrahimalimiichola8@msn.com)

---

*RÉSUMÉ.* Ce travail présente un essai d'infiltration verticale dans une colonne de limon de Florensac, effectué par la méthode TDR (Time Domain Reflectometry). Cette méthode consiste à mesurer le temps de parcours d'une onde EM dans un matériau qui dépend grandement de la teneur en eau, ce qui permet de déterminer la constante diélectrique  $\epsilon$ . La teneur en eau volumique est déduite par la suite en utilisant une loi empirique générale  $\theta=f(\epsilon)$  établie par Topp et al. (1980). De cet essai d'infiltration, nous évaluons le taux et la vitesse d'infiltration, nous estimons la perméabilité du sol, la sorptivité et la diffusivité en utilisant le modèle de Philip. La détermination de la courbe de rétention par la méthode des papiers filtres et la méthode des solutions salines a permis de déduire, à chaque instant, les profils de succion à partir des profils hydriques mesurés. Le modèle de van Genuchten-Mualem (1980,1976) a été utilisé pour la modélisation de la courbe de rétention et de la courbe de conductivité hydraulique.

*ABSTRACT.* This work presents a vertical infiltration test in Florensac silt column, carried out by TDR method (Time Domain Reflectometry). This method consists in measuring an EM wave travelling time in a material, which largely depends on the water content, and allows determining the dielectric constant  $\epsilon$ . The volumetric water content is calculated using the general empirical law  $\theta = f(\epsilon)$  established by Topp et al. (1980). From this infiltration test we assess the rate and infiltration rate, estimate soil permeability, sorptivity and diffusivity using the Philip model. The determination of the retention curve by the filter papers method and the saline solutions method allowed deducing, at each time, the suction profiles from the hydric profiles. van Genuchten- Mualem model (1980,1976) was used to model the retention curve and the hydraulic conductivity curve.

*MOTS-CLÉS :* infiltration verticale, essai TDR, teneur en eau, succion, méthode des solutions salines, méthode des papiers filtres.

*KEY WORDS:* vertical infiltration, TDR test, water content, suction, saline solution method, filter paper method.

---

## 1. Introduction

L'infiltration est une composante primordiale dans le cycle de l'eau pénétrant dans le sol à partir de la surface. La distribution de cette eau dans les zones non saturées est largement conditionnée par ses propriétés hydriques (sa rétention hydrique, sa conductivité hydraulique et l'histoire du transport de l'eau en profondeur présentée sous forme de profils hydriques  $\theta(t,z)$  ou sous forme de profils de potentiel de pression dans le sol  $h(t,z)$ ). Différentes méthodes sont utilisées pour décrire l'infiltration des eaux dans les sols non saturés et pour la prévision de l'avancement de l'humidité en profondeur. Parmi les méthodes expérimentales il existe des méthodes destructives [BRU 56], qui ont évolué vers des techniques non destructives telles que la gammamétrie [ROL 02- TAB 99- VAC 68] et la méthode de TDR (Time Domain Reflectometry) [GAI 00- GAI 02].

Dans ce travail, on présente un essai d'infiltration non destructif fait sur le limon de Florensac, en utilisant la méthode TDR pour le suivi des variations spatio-temporelles de la teneur en eau qui interviennent lors de l'infiltration. On décrit en premier lieu les principales caractéristiques du matériau étudié, par la suite on expose la méthodologie expérimentale, ainsi que l'instrumentation employée pour la mesure de la teneur en eau pour la représentation des profils hydriques. La courbe de rétention est mesurée par la méthode des papiers filtres et la méthode des solutions salines. La modélisation de cette dernière ainsi que la courbe de conductivité hydraulique a été effectuée en utilisant le modèle de van Genuchten-Mualem (1980-1976) [VAN 80], ce qui permet de déduire, à chaque instant, les profils de succions à partir des profils hydriques mesurés.

## 2. Essai d'infiltration et mesure de la teneur en eau par la méthode TDR

### 2.1. Principe de la méthode TDR

La méthode TDR est devenue une méthode établie pour mesurer à la fois la teneur en eau d'un sol ( $\theta$ ) et sa conductivité électrique ( $\sigma_a$ ). Elle est basée sur la mesure du temps de parcours ( $t$ ) et l'atténuation de l'amplitude d'une impulsion électromagnétique lancée le long d'une ligne de transmission (TL) de longueur ( $L$ ). La constante diélectrique  $\varepsilon$  est déduite du temps de passage d'une onde électrique à l'intérieur du matériau par le biais d'une sonde. L'utilisation de la constante diélectrique pour la détermination de la teneur en eau est bien appropriée ; avec différents sols et pour la même teneur en eau, on obtient la même valeur de  $\varepsilon$  [GAI 00- GAI 02]. La constante diélectrique du sol est calculée à partir du temps de transit d'une impulsion électromagnétique à travers le sol, le long de la sonde selon [TOP 80], par :

$$\varepsilon = \left( \frac{c.t}{2L} \right)^2 \quad [1]$$

avec :  $\varepsilon$ : la constante diélectrique ;  $c$ : la vitesse de la lumière, vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans l'espace (m/s) ;  $L$  : longueur de la tige de la sonde (m) ;  $t$  : temps de transit (s.)

### 2.2. Détermination de la teneur en eau volumique

De nombreuses mesures de la teneur en eau ont été réalisées en parallèle à des mesures de constantes diélectriques par [TOP 80], afin de donner finalement naissance à une loi empirique générale  $\theta=f(\varepsilon)$  (équation 2), qui peut être utilisée pour plusieurs types de sol, mais pour des teneurs en eau volumiques comprises entre 0 et 0.45 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ). Cette loi retenue dans ce travail est décrite par :

$$\theta = -0.053 + 0.029\varepsilon - 5.510^{-4}\varepsilon^2 + 4.310^{-6}\varepsilon^3 \quad [2]$$

## 3. Description de l'essai

L'essai consiste à effectuer une infiltration verticale par le haut sur une colonne de sol composée d'anneaux en plexiglas emboîtés les uns dans les autres. Les anneaux utilisés ont un diamètre intérieur de 10.6cm et une hauteur de 5cm. L'essai est effectué sur un limon de Florensac dont les caractéristiques géotechniques sont présentées sur le tableau 1. En revanche le tableau 2 présente les conditions initiales et aux limites de l'essai.

**Tableau 1. Caractéristiques géotechniques du limon de Florensac.**

Sol	% éléments < 80µm	% éléments < 2µm	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>p</sub> (%)	I <sub>p</sub> (%)	VBS	w <sub>opt</sub> (%)	(γ <sub>dopt</sub> /γ <sub>w</sub> )	(γ <sub>s</sub> /γ <sub>w</sub> )
Limon de Florensac	83.97	4.8	27.85	18.61	9.24	1.66	14.8	1.8	2.65

**Tableau 2. Conditions initiales et limites de l'essai.**

Sol	w <sub>i</sub> (%)	d <sub>d</sub> =(γ <sub>d</sub> /γ <sub>w</sub> )	n
Limon de Florensac	16	1.54	0.418

Avec: w<sub>L</sub>: limite de liquidité, w<sub>p</sub>:limite de plasticité, I<sub>p</sub>=Indice de plasticité, VBS: valeur de bleu méthylène; w<sub>opt</sub>: teneur en eau optimale Proctor; (γ<sub>dopt</sub>/γ<sub>w</sub>): densité sèche maximale Proctor, (γ<sub>s</sub>/γ<sub>w</sub>): densité des grains solides, w<sub>i</sub>: teneur en eau massique initiale de l'échantillon, d<sub>d</sub>=(γ<sub>d</sub>/γ<sub>w</sub>): densité sèche initiale de l'échantillon, n: la porosité

La colonne montée est composée de 5 anneaux, emboîtés les uns dans les autres par l'intermédiaire de gorge et d'épaulement pratiqués sur chaque anneau, formant une colonne de hauteur 25cm, et serrés avec un système de serrage assurant l'étanchéité de la colonne. Les sols des anneaux sont alors en contact. Seulement quatre anneaux sont munis de sondes TDR. La sonde est insérée au milieu de l'échantillon de sol pendant le compactage (figure1) à une densité sèche d<sub>d</sub>=1.54 inférieure à celle du Proctor. Elles sont installées à quatre niveaux dont la position à partir du haut, selon la désignation des sondes, est indiquée comme suit: (G24, 75mm), (G23, 125mm), (G29, 175mm) et (G22, 225mm). Ces quatre niveaux permettent de bien suivre l'évolution des changements de la teneur en eau sur la hauteur de l'échantillon. L'essai d'infiltration est effectué sous une charge hydraulique h<sub>0</sub>=50cm, assurée par la position fixe de la bouteille de Mariotte. Une fois l'infiltration lancée, les mesures TDR sont effectuées à un pas de temps de 2mn. Et on suit au cours du temps, la quantité d'eau percolée à travers l'échantillon, en notant le niveau d'eau sur la bouteille de Mariotte. On note aussi au cours du temps le volume d'eau récupéré en bas de la colonne.

**Figure 1. Mode opératoire de l'essai TDR**

#### 4. Résultats et discussions

##### 4.1. Courbes d'infiltration et vitesses d'écoulement

A partir des lectures directes sur la bouteille de Mariotte, et à partir de la pesée de l'eau collectée à la sortie, on trace la courbe d'infiltration cumulée et de sortie en fonction du temps. La figure 1 montre qu'au début de l'essai, l'infiltration est caractérisée par sa rapidité due à la forte succion du sol, puis elle continue avec un débit constant caractérisé par une progression linéaire de l'infiltration au cours du temps. Le régime permanent est obtenu à t=100 heures où le débit infiltré devient indépendant du temps. Après 102 heures de temps d'infiltration, l'eau arrive à la partie inférieure de la colonne de sol et commence à sortir. Contrairement à l'eau infiltrée, l'eau sort lentement (Figure 2a).

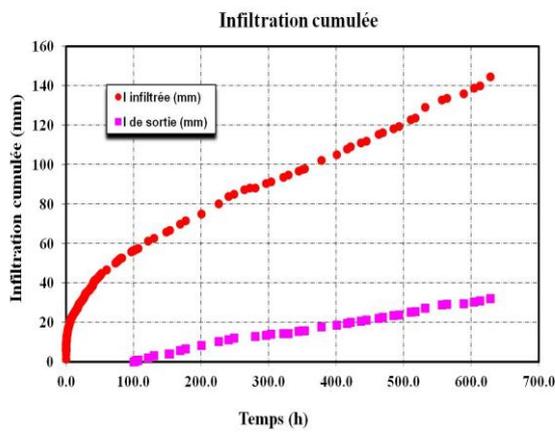


Figure 2a. Courbe d'infiltration cumulée.

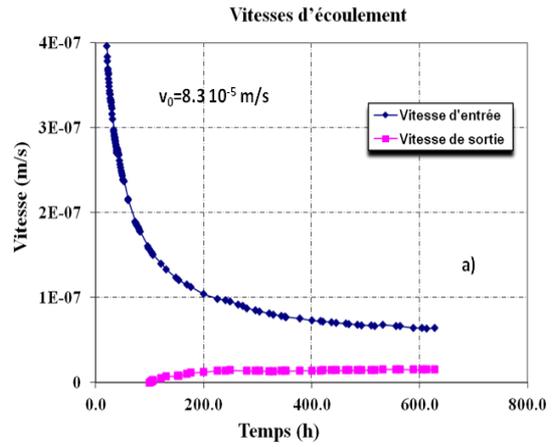


Figure 2b. Vitesse de l'eau infiltrée et de sortie.

Les vitesses d'entrée et de sortie de l'eau présentées sur la figure 2b, sont déterminées à partir du rapport de l'infiltration sur la section du sol. On remarque que la vitesse d'infiltration est très forte au début de l'essai. La vitesse initiale d'infiltration ( $v_0$ ) est estimée à  $8.3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ , et elle diminue en fonction du temps, au fur à mesure que la succion du sol diminue. La figure montre aussi, qu'après un certain temps d'infiltration (300h), les vitesses d'entrée et de sortie varient très peu mais le volume infiltré demeure supérieur au volume sortant. On applique la loi de Darcy avec ces deux vitesses et le gradient hydraulique entre l'entrée et la sortie de la colonne pour connaître l'évolution du coefficient de perméabilité au cours de la saturation.

#### 4.2. Sorptivité, transmissivité et diffusivité

Philip [PHI 69] dans son modèle d'infiltration a proposé une fonction du flux en fonction de la racine carrée du temps. On trace l'infiltration mesurée en fonction de la racine carrée du temps,  $I(\sqrt{t})$  présentée sur la figure 3. On fait après la régression de ces points, tantôt par une régression polynomiale d'ordre 2 pour la fonction de Philip (équation 3) exprimée par:

$$I(t) = S\sqrt{t} + At \quad [3]$$

Et tantôt par une régression linéaire passant par l'origine pour la fonction de Philip à l'origine (équation 4):

$$I(t) = S\sqrt{t} \quad [4]$$

A partir des deux courbes précédentes, on détermine la valeur de la sorptivité S, qui représente la pente des courbes. Ces valeurs sont indiquées sur le tableau 4. On constate que la valeur de la transmissivité "A" est négative. Ce qui est en désaccord avec la définition de la transmissivité. Donc le modèle de Philip avec transmissivité (équation 3) n'est pas utilisable malgré le bon coefficient de corrélation ( $R^2=0.9856$ ).

La diffusivité du milieu peut être déterminée à partir de la sorptivité par la relation suivante:

$$D^* = \frac{\pi S^2}{4(\theta_s - \theta_i)^2} \quad [5]$$

Avec: S: la sorptivité [ $\text{cm}/\text{mn}^{0.5}$ ];  $\theta_i$ : la teneur en eau volumique initiale [ $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ];  $\theta_s$ : la teneur en eau volumique à saturation [ $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ].

Tableau 4. Valeurs de Sorptivité, transmissivité et diffusivité.

Modèles	$\theta_i(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$S(\text{cm}/\text{mn}^{0.5})$	$A(\text{cm}/\text{mn})$	$D^* (\text{cm}^2/\text{min})$
Philip	0.2462	0.0827	-8.00E-05	0.0394
Philip à l'origine	0.2462	0.0724	-	0.03016

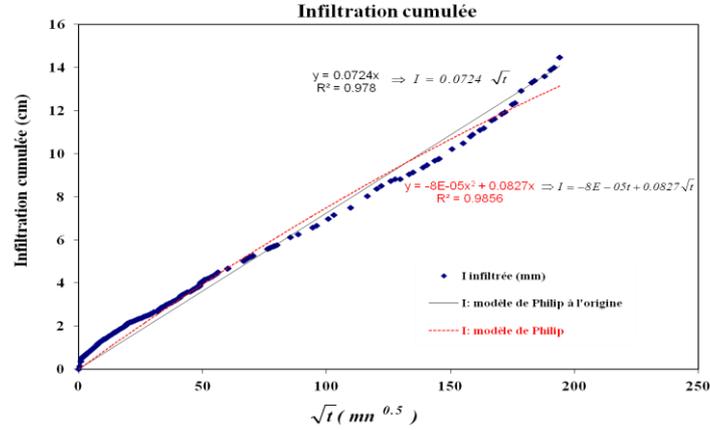


Figure 3. Infiltration cumulée en fonction de la racine du temps  $I(\sqrt{t})$ .

### 4.3. Perméabilité

La figure 4 représente l'évolution du coefficient de perméabilité en fonction du temps. Le coefficient de perméabilité est calculé d'après l'équation de Darcy, pour un gradient hydraulique  $i=2$ , à partir de la vitesse d'eau infiltrée et de la vitesse d'eau récupérée. Le coefficient de perméabilité est surestimé au début de l'infiltration pour la courbe  $K_{\text{entrée}}$  et sous estimé pour la courbe  $K_{\text{sortie}}$ . La perméabilité du sol est déterminée lorsque les deux courbes se rejoignent et tendent vers la même valeur. Ce qui correspond à la saturation complète du sol. Cet état n'a pas été atteint au cours de notre essai. Néanmoins, on peut considérer la valeur de  $K_s$  à la saturation comprise entre  $2.13 \cdot 10^{-8}$  et  $5 \cdot 10^{-9}$  (m/s).

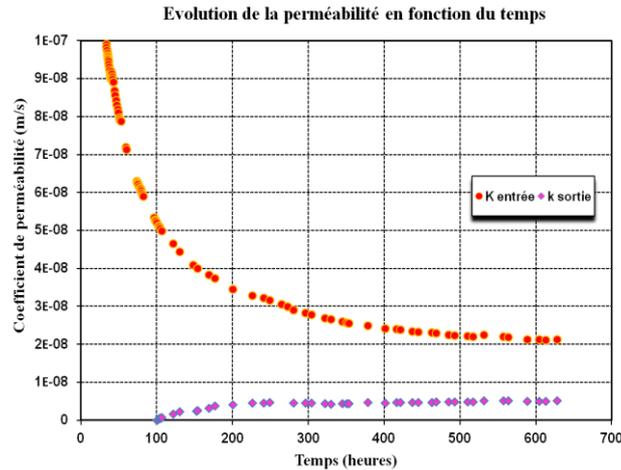


Figure 4. Evolution du coefficient de perméabilité du limon de Florensac en fonction du temps.

### 4.4. Profils hydriques

L'évolution de la teneur en eau le long de la colonne du sol est contrôlée par les sondes TDR ; chaque sonde donne des signaux dont les allures reflètent cette évolution. Par le traitement des signaux des sondes, on détermine le point (a) et le point (b), présentés sur la figure 5, qui permettent de déterminer la longueur "l" et d'après l'équation (1), on détermine la constante diélectrique  $\epsilon$ . La teneur en eau à l'instant t est calculée ensuite par l'équation (2) [TOP 80].

La figure 6 présente les profils d'humidité dans le limon de Florensac. La figure montre qu'il a fallu 176 heures pour saturer la colonne du limon de Florensac, et que l'eau n'est plus retenue en surface (à 7.5cm) ; par contre elle commence à stagner à la profondeur de 12.5cm jusqu'à saturation avant les couches supérieures, conséquence de l'effet gravitaire. La teneur en eau volumique de saturation est estimée à  $0.429(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ . Ce qui correspond à la porosité du sol, donc dans ce cas, tous les pores sont remplis d'eau ( $S_r=100\%$ ).

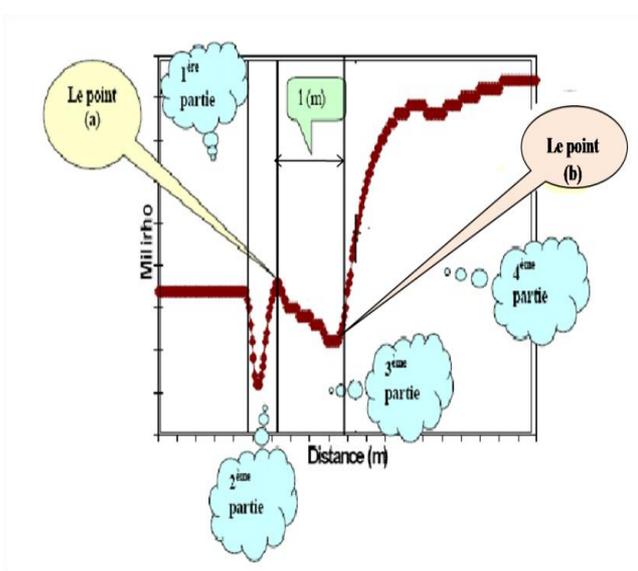


Figure 5. Allure d'un signal TDR.

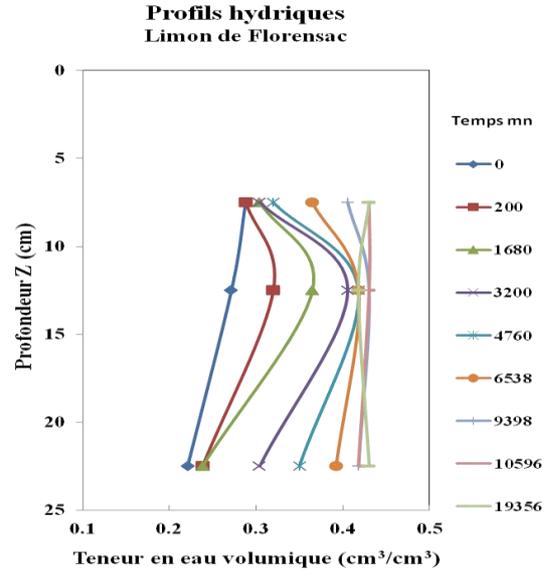


Figure 6. Profils hydriques du limon de Florensac.

#### 4.5. Courbe de rétention

##### 4.5.1. Mesure de la courbe de rétention

Afin de déterminer les capacités d'absorption du sol, des essais de mesure de succion par la méthode du papier filtre (contact method), sont réalisés à différentes teneurs en eau. Pour des mesures de succion élevée, nous avons opté pour la méthode à succion imposée, la méthode des solutions salines. Les teneurs en eau des échantillons sont déterminées par pesée. Les points mesurés de la succion et de la teneur en eau volumique par ces deux méthodes pour le chemin d'humidification sont présentés par la courbe illustrée sur la figure 7. D'après la figure 7, la succion la plus forte qui a été appliquée égale à un  $pF=6.20$  correspond à une teneur volumique de  $0.018 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  soit une teneur en eau massique de 0.95%. La teneur en eau résiduelle est proche de cette valeur.

Courbe de rétention mesurée du limon de Florensac

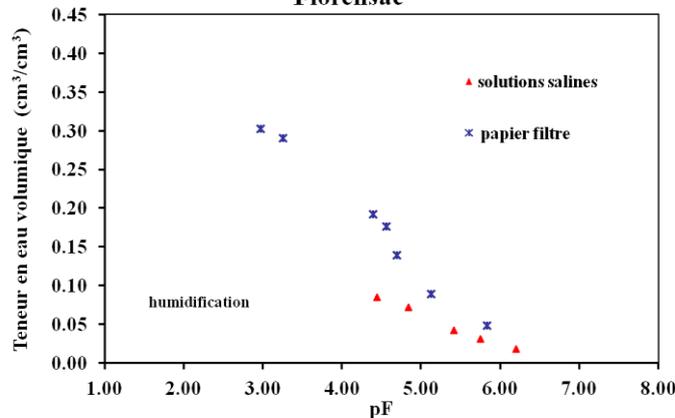


Figure 7. Courbe de rétention mesurée du limon de Florensac

##### 4.5.2. Modélisation de la courbe de rétention

La modélisation de la courbe de rétention mesurée, permet d'avoir une continuité de la courbe, de la teneur en eau résiduelle jusqu'à la teneur en eau à saturation; elle permet aussi d'obtenir des valeurs de succion correspondant à des valeurs de teneur en eau qui ne sont pas données par la mesure. Cette modélisation est effectuée en utilisant le modèle de van Genuchten-Mualem (1980-1976) (équation 6a). L'ajustement des paramètres des modèles empiriques est effectué en utilisant le logiciel d'ajustement RETC.

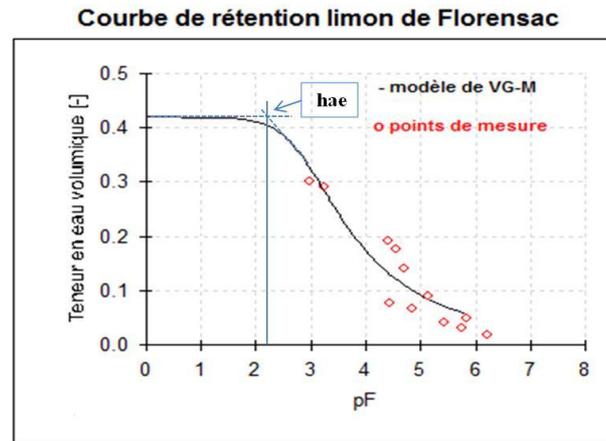
$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (\alpha h)^n]^{-m} \quad [6a]$$

Avec:  $\theta_e$ : teneur en eau volumique normalisée [ $L^3/L^3$ ];  $\theta_s$ : teneur en eau volumique à saturation [ $L^3/L^3$ ];  $\theta_r$ : teneur en eau volumique résiduelle [ $L^3/L^3$ ];  $\alpha$ : paramètre lié à la pression d'entrée d'air [ $L^{-1}$ ];  $n$ : coefficient adimensionnel, lié à la distribution des tailles des pores ( $n \geq 1$ );  $m$ : coefficient adimensionnel de Mualem, lié à  $n$  comme suit:  $m=1-1/n$ .

L'ajustement des points de mesures avec le modèle de van Genuchten-Mualem (1980-1976) donne les valeurs des paramètres indiquées au tableau 5. Les paramètres du modèle sont obtenus avec un coefficient de corrélation  $R^2=0.863$ . Les deux courbes calculée et mesurée sont présentées sur la figure 8. La pression d'entrée d'air  $h_{ae}$  déduite de la courbe calculée correspond à un  $pF=2.2$  ( $h_{ae}=158.49\text{cm}$ ).

**Tableau 5.** Paramètres de la courbe de rétention du modèle de van Genuchten-Mualem

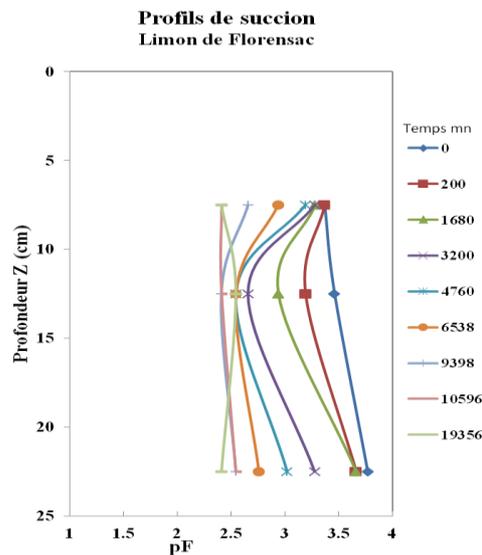
$\theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\theta_r(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$n$	$m$	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	$R^2$
0.42	0.018	1.334	0.249	1.67E-03	0.863



**Figure 8.** Courbe de rétention mesurée et calculée par le modèle de van Genuchten-Mualem du limon de Florensac

#### 4.6. Profils de succion

Les variations spatio-temporelles des  $pF$  présentés sur la figure 9 sont calculées à partir des profils hydriques et de la courbe de rétention présentée par l'équation 6, en utilisant les valeurs ajustées des paramètres (tableau 5).



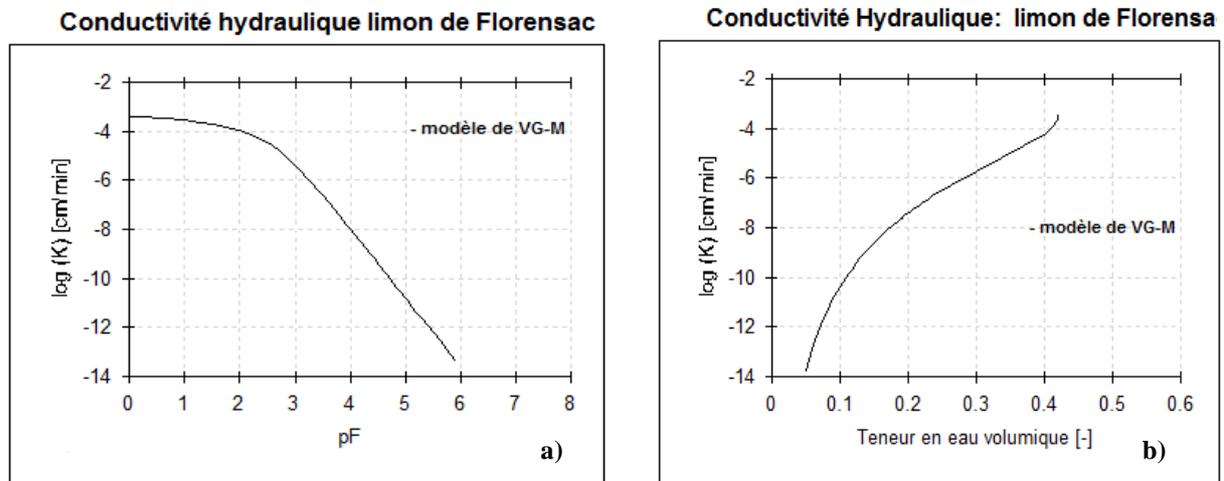
**Figure 9.** Profils de succion du limon de Florensac

#### 4.7. Modélisation de la courbe de conductivité hydraulique

En utilisant les résultats de la modélisation de la courbe de rétention (tableau 5), les deux courbes de conductivité hydraulique  $K(\theta)$  et  $K(pF)$ , présentées sur la figure 10, sont calculées avec le modèle van Genuchten - Mualem (équations 6b et 6c), en prenant une valeur approximative de la conductivité à saturation de  $K_s=5.10^{-8}$  (m/s).

$$K(\theta) = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{0.5} \left[ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right]^2 \text{ et } K(h) = K_s \frac{\left\{ 1 - (\alpha h)^{n-1} [1 + (\alpha h)^n]^{-m} \right\}^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad [6b,6c]$$

Avec:  $\theta_e$ : teneur en eau volumique normalisée [ $L^3/L^3$ ];  $\theta_s$ : teneur en eau volumique à saturation [ $L^3/L^3$ ];  $\theta_r$ : teneur en eau volumique résiduelle [ $L^3/L^3$ ];  $K_s$ : conductivité hydraulique à saturation [ $L.T^{-1}$ ];  $\alpha$ : paramètre lié à la pression d'entrée d'air [ $L^{-1}$ ];  $n$ : coefficient adimensionnel, lié à la distribution des tailles des pores ( $n \geq 1$ );  $m$ : coefficient adimensionnel de Mualem, lié à  $n$  comme suit:  $m=1-1/n$ .



**Figure10.** Courbe de conductivité hydraulique a)  $\log K(pF)$  et b)  $\log K(\theta)$  calculées par le modèle de van Genuchten- Mualem

#### 5. Conclusion

Cette étude nous a permis le suivi de l'évolution de la variation de la teneur en eau en profondeur dans une colonne de sol non saturé (limon de Florensac) grâce à la méthode de TDR. Cet essai nous a permis de déterminer entre autres, les courbes d'infiltration, les vitesses d'infiltration, la sorptivité, la transmissivité et la diffusivité. Il a permis également de déterminer les profils hydriques et de succion. De cet essai nous avons tiré les points suivants: i) La méthode TDR permet de bien suivre l'évolution de la teneur en eau en profondeur dans le sol au cours du temps. Néanmoins, elle nécessite un travail préparatif en amont considérable, et une interprétation rigoureuse des signaux des sondes TDR. ii) Le modèle d'infiltration de Philip ne peut pas être utilisé pour tous les types de sol pour la détermination de la transmissivité (transmissivité négative dans le cas du limon de Florensac). iii) Les profils de succion sont déterminés indirectement et nécessitent la détermination expérimentale de la courbe de rétention ainsi que la modélisation de cette dernière en choisissant un modèle reliant la teneur en eau et la succion.

#### 6. Bibliographie

[BRU 56] BRUCE R.R., and KLUTE A., "The measurement of soil diffusivity". *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Vol. 20, 458-462, (1956). 33

[GAI 00] GAIDI L., and ALIMI-ICHOLA I., Etude des caractéristiques hydrodynamiques des sols par la méthode TDR (Time Domain Reflectometry). *Bulletin of engineering geology and Environment*, V. 59, N° 3, 247-255. (2000).

[GAI 02] GAIDI L., Transfert par infiltration de l'eau et du soluté dans les sols non saturés, utilisation de la méthode TDR Thèse de Doctorat, LGCIE Laboartory, Insa- Lyon, France (2002).

- [PHI 69] PHILIP J. R., "Theory of infiltration". Adv. Hydroscience, 5, 215-305. (1969).
- [ROL 02] ROLLAND S., , Transfert hydrique dans les sols argileux gonflants: influence du confinement . Thèse de doctorat, INPL. Nancy. (2002).
- [TAB 99] TABANI P., Transfert hydrique dans des sols déformables. Thèse de doctorat, INPL. Page .173. (1999).
- [TOP 80] TOPP G.C., DAVIS J.L., and ANNAN A.P., Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, vol. 16, n° 3, 574-582. (1980).
- [VAC 68] VACHAUD G., Contribution à l'étude des problèmes d'écoulements en milieux poreux non saturés. Thèse de doctorat. Faculté des sciences de l'université de Grenoble, 159. (1968).
- [VAN 80] VAN GENUCHTEN M. TH. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated. *Soil Sci. Am. J.*, 44, 892-898 (1980).