

# Étude couplée des transferts thermo-hydriques d'un sol fin compacté soumis à des cycles thermiques

## Coupled study of thermo-hydric transfers in a compacted fine soil subjected to thermal cycles

Rawan EL YOUSSEF, Sandrine ROSIN-PAUMIER\*, Adel ABDALLAH

*Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000, Nancy, France*

\**sandrine.rosin@univ-lorraine.fr*

**RESUME :** Le stockage de chaleur dans les sols constitue une solution prometteuse pour répondre aux enjeux de la transition énergétique. Cependant, la compréhension des mécanismes couplés de transfert eau–chaleur est essentielle pour prédire le comportement des sols non saturés soumis à des variations cycliques de la température. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est d'analyser l'influence de la température sur le comportement hydrique d'un sol fin compacté pour évaluer l'importance des transferts en phase vapeur. Des essais de séchage en colonne ont été réalisés dans des conditions isothermes (20 °C), et non isothermes avec un chauffage par la base (30 et 40°C) et une surface exposée à l'évaporation. Le dispositif expérimental, équipé de papiers filtre et de capteurs de température, a permis de suivre l'évolution spatio-temporelle de la teneur en eau, des succions et de la température. Les mesures ont servi à établir les courbes de rétention et de conductivité hydraulique non saturée. À 40 °C, la dispersion des points traduit une forte perturbation induite par la coexistence de zones maintenues humides par l'effet de la condensation et d'autres fortement asséchées (El Youssef et al. 2025). À 30 °C, la courbe paraît en revanche plus homogène malgré la mise en évidence de l'existence d'un effet de changement de phase liquide-vapeur. Par ailleurs, la conductivité hydraulique non saturée diminue sous des succions intermédiaires, et augmente sous les fortes succions, traduisant l'effet des transferts de vapeur (Saito et al., 2006, Sakai et al. 2009). L'analyse des flux hydriques et des pressions de vapeur confirme que les gradients thermiques induisent des redistributions internes d'humidité qui ne peuvent être négligées. Le cycle thermique 40–20 °C a permis de mettre en évidence la réversibilité partielle des transferts hydriques, soulignant la nécessité d'intégrer les couplages thermo-hydriques dans les modèles prédictifs.

**ABSTRACT:** Heat storage in soils is a promising solution to address the challenges of the energy transition. Understanding the coupled mechanisms of heat–moisture transfer is essential for predicting the behavior of unsaturated soils subjected to cyclic temperature variations. In this context, the objective of this study is to analyze the influence of temperature on the hydraulic behavior of a compacted fine soil in order to assess the importance of vapor-phase transfers. Column drying tests were carried out under isothermal conditions (20 °C) and non-isothermal conditions with basal heating (30 and 40 °C) and an evaporative surface. The experimental setup, equipped with filter papers and temperature sensors, enabled monitoring of the spatio-temporal evolution of water content, suction, and temperature. The measurements were used to establish the water retention curves and the unsaturated hydraulic conductivity curves. At 40 °C, the dispersion of the data points reflects a strong disturbance induced by the coexistence of zones kept moist by condensation and others strongly dried (El Youssef et al. 2025). At 30 °C, the curve appears more homogeneous, despite clear evidence of liquid–vapor phase change effects. Furthermore, the unsaturated hydraulic conductivity decreases under intermediate succions and increases under high succions, highlighting the role of vapor transfers (Saito et al., 2006; Sakai et al., 2009). The analysis of water fluxes and vapor pressures confirms that thermal gradients induce internal moisture redistributions that cannot be neglected. Thermal cycle of 40–20 °C revealed the partial reversibility of moisture transfers, emphasizing the need to account for thermo-hydric couplings in predictive models.

**Mots-clés:** Sols non saturés ; Stockage de chaleur ; Transfert thermo hydrique ; Cycles thermiques ; Phase vapeur.

## 1 INTRODUCTION

Les solutions de stockage thermique en géotechnique suscitent un intérêt croissant face aux défis actuels liés à la transition énergétique (Brandl, 2006). Les ou-

vrages tels que les stockages saisonniers dans les remblais de sols compactés reposent en grande partie sur les propriétés thermo-hydriques des sols non saturés, dont le comportement conditionne l'efficacité des transferts de chaleur (Gao et al., 2020). Les variations

thermiques auxquelles ces ouvrages sont soumis peuvent modifier d'une manière significative l'état hydrique du sol, influençant à la fois ses performances énergétiques et son comportement hydromécanique. Plusieurs travaux ont montré que la réponse thermique des sols dépend fortement de leur état hydrique. La conductivité thermique augmente avec la densité sèche et la teneur en eau du matériau (Abu-Hamdeh, 2001; Brandl, 2006), tout comme la capacité thermique (Abu-Hamdeh, 2003). D'autres études se sont intéressées à l'effet de la température sur la courbe de rétention et de conductivité hydraulique non saturée (Tang et Cui, 2005; Haghghi et al., 2012 ; Yang et al., 2024). Une conclusion commune est qu'à une même valeur de succion et pour une même densité sèche, la capacité de rétention d'eau diminue lorsque la température augmente, tandis que la réduction de la viscosité de l'eau favorise l'écoulement dans le réseau poreux et accroît ainsi la conductivité hydraulique non saturée

Dans les conditions réelles de fonctionnement des systèmes de stockage, les sols sont soumis à des gradients thermiques importants susceptibles d'altérer la succion, la distribution de l'eau et les pressions de vapeur (McCartney et al., 2014). De nombreuses études théoriques et numériques ont mis en évidence l'influence de ces gradients sur la migration de vapeur et la condensation interne (Liu et al., 2016; Gao et al., 2020). Toutefois, malgré ces avancées, les données expérimentales restent limitées, en particulier pour des conditions de chauffage représentatives des stockages thermiques. L'impact de la distribution hydrique induite par la chaleur sur les courbes de rétention, de conductivité hydraulique non saturée, ou encore le comportement global des systèmes de stockage demeure insuffisamment quantifié. L'effet des cycles thermiques appliqués aux sols compactés est particulièrement peu documenté, alors même qu'il constitue un mode de sollicitation courant dans les stockages saisonniers ou les échangeurs géothermiques intermittents. Cette lacune limite l'amélioration des modèles thermo-hydriques et l'optimisation de la conception des systèmes géotechniques destinés au stockage de chaleur. Dans ce contexte, cette étude vise à analyser l'influence d'un gradient de température appliqué à un sol fin compacté, dans le but d'améliorer la compréhension du comportement thermo-hydrique sous des conditions réalistes et d'apporter des éléments pour orienter les stratégies d'ingénierie dédiées au stockage thermique dans les remblais de sol.

## 2 MATERIELS ET METHODES

Cette section présente le sol testé, la préparation des échantillons et l'approche expérimentale développée pour étudier le séchage du sol dans des conditions

isothermes et non isothermes. Un premier essai a été réalisé à l'aide de moules en plastique afin d'assurer la fiabilité des mesures de teneur en eau et de succion, en s'appuyant sur la méthode des profils instantanées (Wind, 1966). Une fois cette configuration vérifiée, elle a été utilisée pour analyser l'impact de la température en réalisant des essais de séchage non isothermes et en étudiant la réponse du sol soumis à des cycles thermiques.

### 2.1 Propriétés du sol étudié

Les essais ont été réalisés sur un sol limoneux prélevé à Plaisir, dans la région parisienne, appelé le limon de Plaisir (LP) dont les propriétés sont résumées dans le Tableau 1. Le sol a été préparé selon une procédure rigoureuse incluant un séchage, un broyage et un tamisage à 2 mm (Boukelia et al., 2016). Sa granulométrie montre qu'environ 20 % des particules ont une taille inférieure à 2  $\mu\text{m}$  et 41 % sont inférieures à 80  $\mu\text{m}$ , confirmant sa nature limoneuse (ISO, 2024) et sa classification comme un sol fin peu plastique (A1) (GTR, 2000). Boukelia et al. (2016) ont identifié l'état de compactage optimal pour le sol permettant d'améliorer l'efficacité du stockage thermique, correspondant à une teneur en eau (w) de 16,3 % et à une densité sèche ( $\rho_d$ ) de 1,72  $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (soit 95 % du Proctor optimal).

Tableau 1. Caractéristiques du Limon de Plaisir

<b>Composition</b>	
Quartz	81%
Carbonate de Calcium	5% calcite, 8% dolomite
Feldspath	3%
Minéraux argileux	5%
<b>Taille des particules</b>	
Passant à 80 $\mu\text{m}$	41%
Passant à 2 $\mu\text{m}$	20%
<b>Teneur en carbonate</b>	
$\text{CaCO}_3$	0,8
<b>Optimum Proctor normal</b>	
$\rho_d$ ( $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1,81
$w_{\text{OPN}}$ (%)	16,3
<b>Limites d'Atterbeg</b>	
$w_L$ (%)	30,69
$w_P$ (%)	21,55

### 2.2 Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental (Figure 1) a été développé à l'aide de cellules en plastique, d'une épaisseur de 15 mm et d'un diamètre de 36,4 mm. Ces cellules ont été conçues avec de rainures fines permettant l'insertion de thermocouples (Figure 1.c), garantissant ainsi une mesure précise de la température à l'intérieur de la colonne de sol. Les éprouvettes de sol sont compactées

à l'état initial de compactage directement dans les cellules pour chaque colonne. Chaque échantillon est ensuite scellé individuellement pendant 24 heures afin de permettre une homogénéisation. Cinq échantillons sont ensuite superposés pour former une colonne de 75 mm de hauteur. Une série de papiers filtre secs (Whatman 42, n° de catalogue 1442-055), protégés par une paire de papiers filtre de plus grand diamètre (Whatman 42, n° de catalogue 1442-090), sont intercalés entre les échantillons. La pesée régulière des papiers filtre permet de suivre les profils de succion matricielle du sol  $\Psi_h$  ( $h$  représentant la distance à l'interface). Après l'assemblage de la colonne, celle-ci est scellée afin d'atteindre un équilibre hydraulique pendant 24 heures à  $20 \pm 1$  °C.

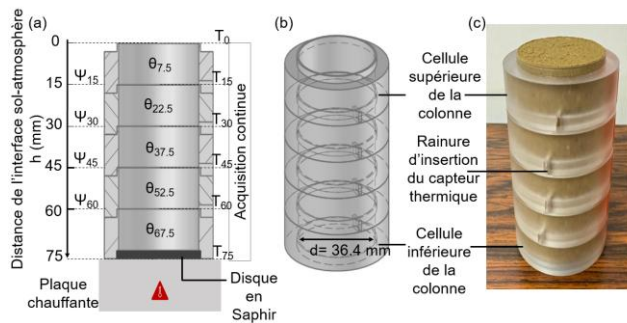


Figure 1. a) Conception des moules en plastique ; b) Vue 3D ; c) Dispositif expérimental avec rainures d'insertion des capteurs thermiques.

Pour les essais non isothermes et cycliques, les colonnes sont placées sur une plaque de régulation thermique de marque Decagon, capable de contrôler la température dans une plage de -10 à +90 °C avec une précision de  $\pm 1$  °C. Un disque en saphir de même diamètre interne que les cellules (36,4 mm), est placé à la base de la colonne afin d'assurer une conduction thermique optimale. Les températures locales sont mesurées à l'aide de thermocouples (RS Pro type K, 1/0,2 mm de diamètre, précision  $\pm 1,5$  °C). Ils sont insérés entre les cellules, au niveau des papiers filtre ( $T_{15}$  ;  $T_{30}$  ;  $T_{45}$  ;  $T_{60}$ ) (Figure 1.a). Un capteur supplémentaire est utilisé pour mesurer la température ambiante ( $T_0$ ), tandis qu'un autre capteur contrôle la température à la base de la colonne ( $T_{75}$ ), entre le disque de saphir et la plaque chauffante. L'ensemble des capteurs est connecté à un système informatique permettant l'enregistrement et le suivi en temps réel de l'évolution des températures.

### 2.3 Détermination de la succion matricielle

La méthode des papiers filtre (ASTM D5298-16) est une technique simple et efficace permettant de mesurer une large gamme de valeurs de succion du sol. Elle repose sur une courbe de calibration qui relie la teneur

en eau du papier filtre à la succion matricielle du sol, à condition que le temps nécessaire à l'équilibre soit respecté. Des essais préliminaires ont montré qu'un intervalle de trois heures était suffisant pour atteindre l'équilibre entre le papier filtre et le sol compacté. A température constante, la succion peut être déterminée à partir de l'équation de calibration proposée par Amraoui (1996) établie pour des papiers filtres initialement secs (Whatman n° 40) :

$$\text{Log } \Psi = \begin{cases} 5.3344 - 0.0882 w_f & \text{pour } w_f < 39.8 \% \\ 2.4778 - 0.0165 w_f & \text{pour } w_f \geq 39.8 \% \end{cases} \quad (1)$$

Où  $\Psi$  (kPa) est la succion et  $w_f$  la teneur en eau massique (%) du papier filtre.

Sous des températures variables, il est nécessaire de tenir compte de l'effet de la température sur la courbe de calibration du papier filtre afin d'assurer une estimation fiable de la succion du sol. Pour cela, la correction proposée par Haghghi et al. (2012) couvrant une gamme de températures comprise entre 10 et 50 °C a été appliquée :

$$\text{Ln } \Psi = \frac{(a+b.w_f+c.T+d.w_f.T)}{(1+f.w_f+g.T+h.w_f.T)} \quad (2)$$

Où  $T$  (K) est la température, et  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $f$ ,  $g$ , et  $h$  sont des paramètres constants déterminés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Paramètres constants optimisés proposés par Haghghi et al. (2012)

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
a	$1,09 \cdot 10^1$	f	$1,91 \cdot 10^{-2}$
b	$-6,4 \cdot 10^{-2}$	g	$-3,65 \cdot 10^{-3}$
c	$-4,06 \cdot 10^{-2}$	h	$-7,65 \cdot 10^{-5}$
d	$2,19 \cdot 10^{-4}$		

## 2.4 Programme expérimental

### 2.4.1 Essais de séchage isotherme E1

L'essai E1 est réalisé dans des conditions de température de référence, à une température constante de  $20 \pm 1$  °C. Après avoir atteint l'équilibre hydrique, la surface supérieure de la colonne est ouverte afin de permettre le séchage. À intervalles réguliers, la colonne est soigneusement démontée. Les échantillons de sol ont été pesés sur une balance de précision de  $\pm 0,001$  g, tandis que les papiers filtres ont été pesés sur une balance (METTLER AE200) avec une précision de  $\pm 0,0001$  g, puis replacés à leur position initiale. Ces mesures permettent de suivre l'évolution des profils de teneur en eau volumique et de succion matricielle du

sol. Les essais ont été poursuivis jusqu'à la stabilisation des teneurs en eau mesurées, soit pendant 11 jours.

#### 2.4.2 Essais de séchage non isothermes (E2 et E3)

Les essais E2 et E3 sont réalisés dans des conditions non isothermes. Après avoir atteint l'équilibre hydrique, les colonnes sont placées sur une plaque chauffante maintenue à  $40 \pm 1^\circ\text{C}$  et  $30 \pm 1^\circ\text{C}$  respectivement. La surface supérieure de la colonne est exposée à l'air ambiant de la salle climatisée à  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . Trois séries de pesées sont effectuées chaque jour sur les échantillons de sol et les papiers filtres, en respectant un intervalle minimum de 3 heures entre chaque mesure. Parallèlement, les températures aux niveaux des papiers filtre sont enregistrées en continu à l'aide des thermocouples insérés dans la colonne. Chaque essai est poursuivi jusqu'à stabilisation de la teneur en eau du sol, soit pendant 8 jours pour les 2 essais.

#### 2.4.3 Essai cyclique EC1

Pour réaliser l'essai cyclique, noté EC1, la colonne équilibrée a été placée sur une plaque chauffante maintenue à une température de  $40^\circ\text{C}$  pendant une durée de trois jours (72h). Durant toute la période de l'essai, la surface supérieure de la colonne a été exposée à l'air ambiant à  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  afin de permettre l'évaporation. A la fin de la phase de chauffage, la plaque chauffante est arrêtée mais le suivi a continué cinq jours. Cette seconde phase correspond à la période de refroidissement et de rééquilibrage hydrique du sol. L'essai a donc couvert une durée totale de 8 jours (192h). Les éprouvettes de sol ainsi que les papiers filtres ont été pesés à intervalles réguliers de 3 à 4h, et les températures ont été suivies entre chaque éprouvette de sol comme lors des essais non isothermes E2 et E3.

## 3 RESULTATS

### 3.1 Evolution des teneurs en eau et succions

Au début de chaque essai ( $t = 0$  h), la distribution de l'eau est homogène dans chaque colonne avec une valeur de  $27,3 \pm 0,4$  %, indiquant un état d'équilibre initial entre les différentes couches (Figure 2.a, Figure 3.a, Figure 4.a, Figure 5.a).

L'essai isotherme E1 montre que l'évaporation intense au sommet conduit à une diminution de la teneur en eau volumique ( $\theta$ ) du sommet vers la base (Figure 2.a) ce qui induit l'apparition d'un gradient de succion qui se développe depuis l'interface sol atmosphère (Figure 2.b). En 3 jours, la teneur en eau à 7,5 cm de l'interface sol atmosphère ( $\theta_{7,5}$ ) chute de

27,0 % à 6,3 % puis à 5,8% en 11 jours, tandis que  $\theta_{67,5}$  reste à 17,9 %.

Pour les essais non isothermes E2 et E3, le gradient thermique vertical (Figure 3.c et Figure 4.c) modifie nettement les profils hydriques: le chauffage à la base entraîne une chute rapide de  $\theta_{67,5}$  de 27,0% à 2,1 % pour E2 (Figure 3.a) et de 27,8% à 4,7% pour E3 (Figure 4.a), en 3 jours. En haut de la colonne  $\theta$  diminue de 26,8% à 9,9% pour E2 et de 26,9 % à 8,3 % à cause de l'évaporation. L'augmentation de la pression de vapeur en base induit un transfert d'humidité vers le haut sous forme de vapeur, provoquant une légère augmentation temporaire de  $\theta$  aux profondeurs intermédiaires ( $\theta_{22,5}$ ,  $\theta_{37,5}$ , et  $\theta_{52,5}$ ) et une diminution de succion ( $\Psi_{15}$ ,  $\Psi_{30}$  et  $\Psi_{45}$ ) (Figure 3.b et Figure 4.b), phénomène plus marqué à  $40^\circ\text{C}$  qu'à  $30^\circ\text{C}$ . Par la suite, l'évaporation redevient dominante et toutes les couches se dessèchent progressivement, jusqu'à atteindre une  $\theta$  inférieure à 4,5 % d'eau à la fin de l'essai E3.

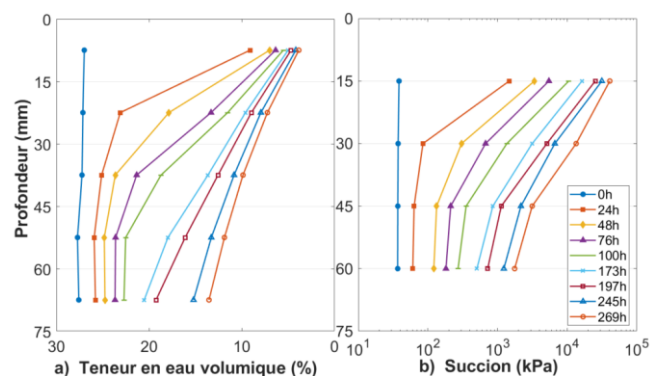


Figure 2. E1 isotherme : a) Profils des teneurs en eau ; b) Profils de succions.

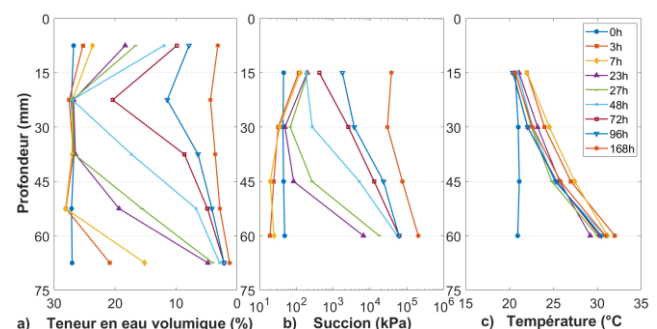


Figure 3. E2 non isotherme : a) Profils des teneurs en eau ; b) Profils de succions ; c) Profils de température.

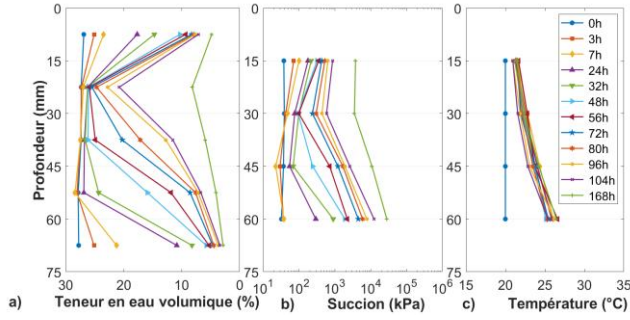


Figure 4. E3 non isotherme : a) Profils des teneurs en eau ; b) Profils de succions ; c) Profils de température.

Dans l'essai cyclique EC1 (Figure 5), la phase de chauffage (0–72 h) reproduit les mécanismes observés à 40 °C : un fort gradient de suction se met en place et la teneur en eau diminue fortement en profondeur ( $\theta_{67,5}$  passant de 27,6 % à 3,9 %). Lors du refroidissement à 20 °C, une inversion temporaire des flux apparaît, se traduisant par une légère remontée de  $\theta$  en bas, tandis que la surface continue de s'assécher. Une fois la température stabilisée autour de 22 °C, un nouvel équilibre se met en place et le séchage progresse depuis la surface vers la base. À la fin du cycle, le dessèchement reste plus marqué en haut ( $\theta_{7,5} \approx 2$  %) qu'en bas ( $\theta_{67,5} \approx 4,8$  %), dépassant celui observé dans les essais isothermes et non isothermes précédents

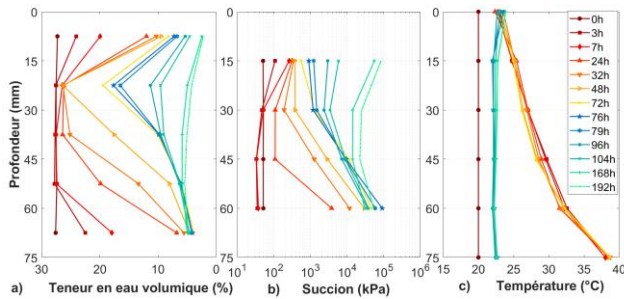


Figure 5. EC1 cyclique : a) Profils de teneur en eau ; b) Profils de succions ; c) Profils de température.

### 3.2 Courbe de rétention de l'humidité

Les profils de suction et de teneur en eau volumique obtenus permettent de déterminer les courbes de rétention du sol (SWRC) pour chaque essai (Figure 6). Pour chaque profondeur correspondant à un papier filtre, la teneur en eau est calculée comme la moyenne des teneurs en eau des deux échantillons de sol adjacents en contact avec ce papier. Le modèle de van Genuchten a été choisi pour ajuster la courbe de l'essai isotherme E1 selon l'équation suivante :

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{((1 + |\alpha \psi|)^n)^m} \quad (3)$$

Où  $\theta_s$  est la teneur en eau volumique à saturation,  $\theta_r$  est la teneur en eau volumique résiduelle,  $\alpha$  (en

$\text{kPa}^{-1}$ ) est un paramètre inversement proportionnel à de la pression d'entrée d'air, et  $m$  et  $n$  sont des paramètres de forme liés à la distribution de la taille des pores, avec la contrainte  $m=1-1/n$ .

La courbe de rétention obtenue dans l'essai isotherme E1 reproduit fidèlement le comportement hydrique d'un sol fin compacté et s'accorde avec les résultats de Lahoori (2020) réalisée sur le même sol et dans des conditions initiales proches, ce qui valide son utilisation comme courbe de référence à 20 °C.

La comparaison avec les essais non isothermes (Figure 6) met en évidence l'influence de la température. À 30 °C (E3), un léger décalage vers des teneurs en eau plus faibles apparaît dès les succions intermédiaires, tandis qu'à 40 °C (E2), l'effet est plus marqué, avec une forte dispersion liée aux phénomènes de condensation et de redistribution interne. Lorsque le gradient thermique est moins intense, comme dans E3, le séchage reste plus homogène et la relation eau–suction est plus régulière.

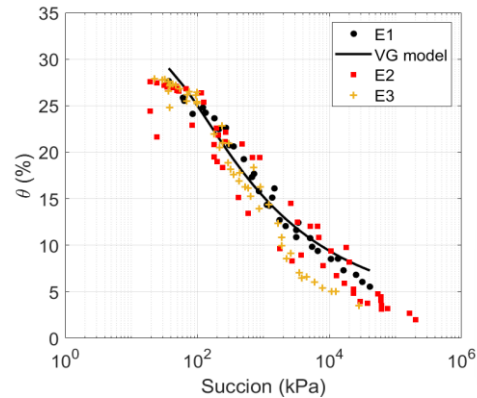


Figure 6. Comparaison entre SWRC du limon de Plaisir obtenues à partir des essais monotones isotherme E1 et non isothermes E2 et E3.

Dans l'essai cyclique EC1 (Figure 7), le comportement observé lors de la phase chaude est similaire à celui de l'essai non isotherme. Cependant, lors de l'arrêt de la plaque chauffante, une réhumidification temporaire des couches profondes apparaît, suivie d'un nouveau séchage. La courbe de rétention obtenue présente alors une hystérésis notable, traduisant les effets combinés d'évaporation, de condensation et de redistribution interne de l'eau. Dans ce contexte, la courbe de rétention ne représente plus une loi unique et intrinsèque, mais plutôt une superposition de réponses locales influencées par la variabilité des flux couplés chaleur–eau.

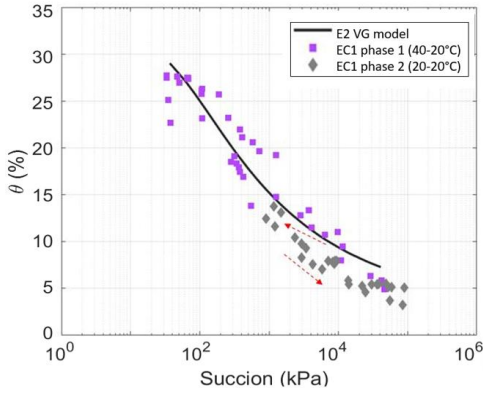


Figure 7. SWRC du limon de Plaisir obtenue à partir de l'essai cycliques EC1.

### 3.3 Conductivité hydraulique non saturée

Les profils de teneur en eau et de succion permettent de déterminer respectivement la vitesse d'écoulement ( $v$ ) et le gradient hydraulique ( $d\Psi/dz$ ) sur chaque intervalle. La conductivité hydraulique non saturée ( $k_u$ ) est ensuite calculée pour l'essai isotherme E1 en appliquant la loi généralisée de Darcy :

$$k_u = \frac{v}{\frac{d\Psi}{dz}} \quad (4)$$

La perméabilité est directement liée à la viscosité de l'eau : plus la viscosité est élevée, plus la perméabilité est faible. Par conséquent, pour les essais non isothermes, la perméabilité du sol est déterminée selon la norme française (NF X30-442, 2008) :

$$k_u = k_{u(T^{\circ})} \frac{\eta_T}{\eta_{20^{\circ}}} \quad (5)$$

Avec :

$$\frac{\eta_T}{\eta_{20^{\circ}}} = \exp(2,44 \cdot 10^{-2}(20 - T) + 1,8 \cdot 10^{-4}(20 - T)^2 + 2,5 \cdot 10^{-6}(20 - T)^3)$$

Où  $k_u$  est la conductivité hydraulique à 20°C,  $k_u(T)$  est la conductivité hydraulique à la température  $T$ ,  $\eta_{20}$  est la viscosité dynamique à 20°C,  $\eta_T$  est la viscosité dynamique à la température  $T$ .

La courbe de référence montre la diminution attendue de la conductivité hydraulique avec l'augmentation de la succion (Figure 8). L'ajout d'une courbe isotherme issue d'un essai de plus grande durée et d'un échantillon initialement saturé (El Youssef et al., 2025) permet de couvrir un domaine de succions plus large pour comparer les essais non isothermes. Sous l'effet d'un gradient thermique, la conductivité hydraulique adopte toutefois un comportement différent : aux succions intermédiaires, elle tend à diminuer par rapport à la référence, tandis qu'aux succions élevées, elle devient plus importante, particulièrement à 40 °C. Cette évolution traduit un changement des mécanismes de transfert : à faible succion, le transport est dominé par l'eau capillaire, alors qu'à forte succion, les flux d'eau adsorbée et

surtout de vapeur deviennent prépondérants et sont intensifiés par l'augmentation de température.

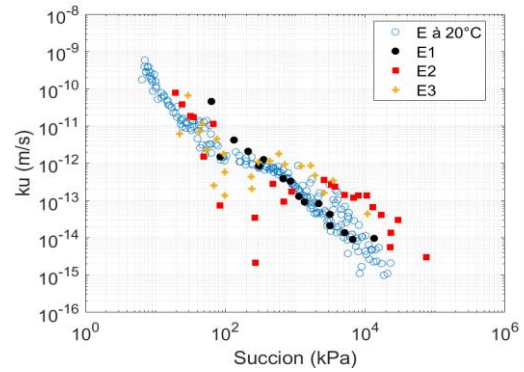


Figure 8. Courbes de conductivité hydraulique non saturée du limon de Plaisir obtenues à partir des essais monotones isotherme E1 et non isothermes E2 et E3.

Au début du cycle thermique EC1, lorsque la plaque chauffante est maintenue à 40°C, la courbe de conductivité hydraulique (Figure IV-8) reproduit le comportement observé lors de l'essai non isotherme E2. Lorsque la température de la plaque revient à 20°C, la trajectoire de la courbe évolue de manière non monotone, caractéristique d'un phénomène d'hystérésis thermique.

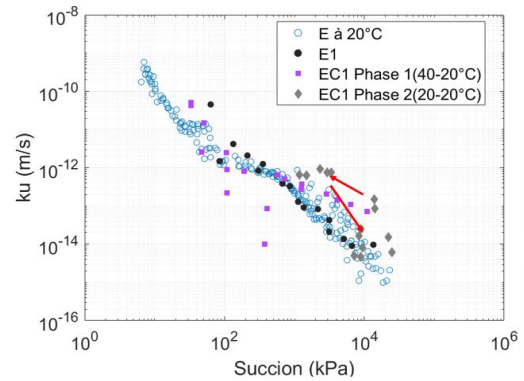


Figure 9. Courbe de conductivité hydraulique non saturée obtenue à partir de l'essai cyclique EC1.

## 4 DISCUSSIONS

### 4.1 Evolution des flux hydriques

Le flux volumique d'eau par unité de surface ( $q$ ) (Figure 10), a été calculé directement à partir de la variation de la masse d'eau  $\Delta m$  (g) mesurée pour chaque éprouvette dans chaque colonne entre deux intervalles de mesure successifs  $\Delta t$  (heures), en utilisant l'équation suivante :

$$q = \frac{\Delta m}{\rho \cdot A \cdot \Delta t} \quad (6)$$

Où  $\rho$  est la densité de l'eau ( $\text{g/cm}^3$ ) et  $A$  est la surface de section transversale de l'échantillon ( $\text{cm}^2$ ).

À 20 °C, le transfert d'eau est entièrement contrôlé par l'évaporation en surface, ce qui entraîne un

séchage progressif depuis le sommet vers la base ; les couches profondes restent humides plus longtemps et ne commencent à se dessécher qu'après environ 70 heures (Figure 10.a). Sous gradient thermique, un flux d'eau apparaît dès les premières heures à la base de la colonne dans l'essai E2 (Figure 10.b), alors qu'aucun flux n'était observé dans les conditions isothermes. Ce gradient favorise l'évaporation en profondeur et le transport de vapeur vers les zones supérieures, conformément aux observations rapportées par McCartney et al. (2014). L'essai E3 présente des phénomènes similaires, mais avec des flux moins intenses (Figure 10.c), confirmant que l'ampleur du gradient thermique conditionne directement l'intensité du flux de vapeur généré.

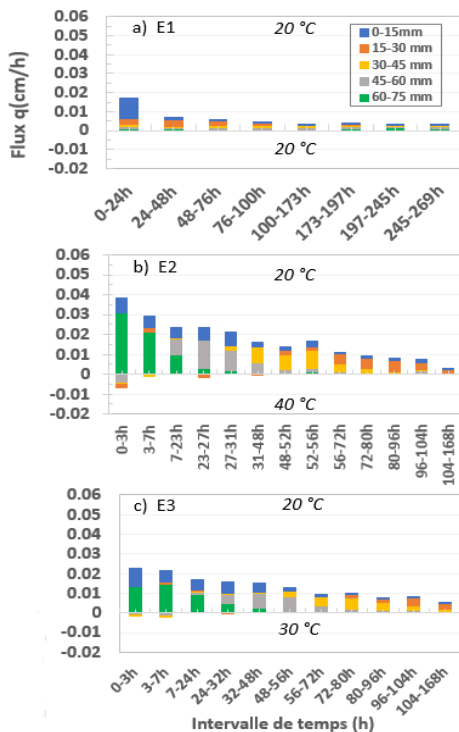


Figure 10. Evolution du flux hydrique à différentes profondeurs pour l'essai : a) isotherme E1 ; b) non isotherme E2 ; c) non isotherme E3.

Pour l'essai cyclique, à partir de 72 h, lorsque la plaque revient à 20 °C, le gradient thermique disparaît, ce qui inverse le flux d'eau vers le bas (Figure 11) et ramène rapidement le comportement vers celui de l'essai isotherme. Le transport devient alors contrôlé principalement par l'évaporation de surface, entraînant un dessèchement progressif et plus lent depuis le sommet de la colonne.

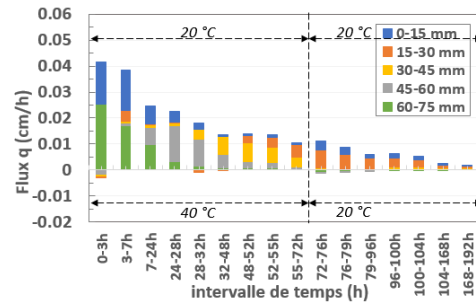


Figure 11. Evolution du flux hydrique à différentes profondeurs lors du cycle thermique EC1.

## 4.2 Evolution de la pression de vapeur

Pour mieux interpréter les différences observées en termes de teneur en eau, de succion et de flux d'humidité entre les essais, il est important de prendre en compte l'impact de l'écoulement en phase vapeur. Les rapports  $P_v(T)/P_{v,sat}(T)$  sont calculés pour chaque essai en utilisant l'équation suivante :

$$P_v(T) = P_{v,sat}(T) \exp\left(-\frac{\Psi M_w g}{R T}\right) \quad (7)$$

Où  $\Psi$  (m) est la succion exprimée en hauteur équivalente de colonne d'eau,  $M_w$  (kg/mol) est la masse molaire de l'eau,  $g$  (m/s<sup>2</sup>) est l'accélération gravitationnelle,  $R$  (J/mol·K) est la constante universelle des gaz et  $T$  (K) est la température.

Dans l'essai isotherme E1, le rapport  $P_v/P_{v,sat}$  diminue progressivement du sommet vers la base sous l'effet d'un front de séchage qui avance lentement dans la colonne (Figure 12.a).

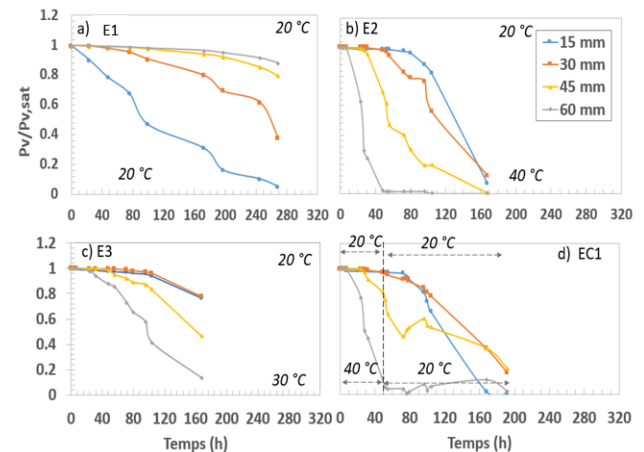


Figure 12. Evolution du rapport de la pression de vapeur  $P_v/P_{v,sat}$  calculé à différentes profondeurs pour l'essai : a) E1 ; b) E2 ; c) E3 ; d) cyclique EC1.

Sous 40 °C (E2), l'évaporation intense à la base provoque une chute rapide du rapport  $P_v/P_{v,sat}$  (Figure 12.b) et une migration de vapeur vers le haut, où une zone de condensation temporaire apparaît, avant que l'ensemble de la colonne ne s'assèche fortement sous l'action du gradient thermique. À 30 °C (E3), la diminution du rapport reste observable mais plus lente et moins marquée (Figure 12.c), en raison

d'un gradient thermique plus faible. Dans l'essai cyclique EC1, le chauffage induit également une baisse rapide du rapport en profondeur (Figure 12.d), suivie lors du refroidissement d'un léger pic lié à une inversion momentanée du flux hydrique ; le séchage reprend ensuite dans toute la colonne une fois le gradient thermique dissipé.

## 5 CONCLUSIONS

Cette étude avait pour objectif d'analyser l'influence des gradients thermiques sur les transferts hydriques dans un sol fin compacté. Les essais isothermes ont permis d'établir un comportement de référence dominé par l'évaporation en surface et la progression régulière du front de séchage. Les essais non isothermes ont montré que le chauffage en profondeur intensifie l'évaporation à la base, favorise la migration de vapeur vers les zones plus froides et peut conduire à des phases transitoires de condensation et de réhumidification. L'intensité de ces mécanismes augmente clairement avec le gradient thermique, comme le montrent les différences entre l'essai E3 (30 °C) et l'essai E2 (40 °C). L'essai cyclique confirme que les alternances de chauffage et de refroidissement génèrent des inversions temporaires des flux hydriques avant un retour à un état dominé par l'évaporation en surface.

Ces résultats soulignent la complexité des interactions thermo-hydriques dans les sols fins compactés et mettent en évidence le rôle majeur des transferts vapeur-liquide dans les conditions thermiques représentatives du stockage de chaleur. Ils ouvrent plusieurs perspectives importantes pour la suite : l'intégration de ces phénomènes dans des modèles numériques thermo-hydriques afin d'améliorer la prédiction des transferts couplés, l'étude de l'impact de cycles thermiques répétés sur la redistribution interne de l'eau et sur la durabilité du sol, et enfin l'analyse de la fissuration induite par les gradients thermiques et hydriques. Cette dernière apparaît comme un enjeu essentiel, car la formation de fissures pourrait modifier la conductivité hydraulique et accélérer le dessèchement, influençant directement l'efficacité des systèmes géotechniques de stockage thermique.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abu-Hamdeh, N.H., 2003. Thermal properties of soils as affected by density and water content. *Biosystems engineering* 86, 97–102. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00112-0](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00112-0)
- Abu-Hamdeh, N.H., 2001. SW—Soil and water: measurement of the thermal conductivity of sandy loam and clay loam soils using single and dual probes. *Journal of Agricultural Engineering Research* 80, 209–216. <https://doi.org/10.1006/jaer.2001.0730>
- Amraoui, N., 1996. Étude de l'infiltration dans les sols fins non saturés. (PhD Thesis). Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Boukelia, A., Rosin-Paumier, S., Masrouri, F., Le Borgne, T., 2016. Stockage de chaleur dans les sols compactés., in: *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur*.
- Brandl, H., 2006. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique* 56, 81–122. <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.2.81>
- El Youssef, R., Rosin-Paumier, S., Abdallah, A., 2025. Determination of the Unsaturated Hydraulic Parameters of Compacted Soil Under Varying Temperature Conditions. *Geotechnics* 5, 38. <https://doi.org/10.3390/geotechnics5020038>
- Gao, Y., Dong, S., Wang, C., Chen, Y., Hu, W., 2020. Effect of thermal intensity and initial moisture content on heat and moisture transfer in unsaturated soil. *Sustainable Cities and Society* 55, 102069. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102069>
- Haghighi, A., Medero, G.M., Marinho, F.A., Mercier, B., Woodward, P.K., 2012. Temperature effects on suction measurement using the filter paper technique. *Geotechnical testing journal* 35, 83–90.
- ISO, 2024. Qualité du sol - Détermination de la répartition granulométrique de la matière minérale des sols - Méthode par tamisage et sédimentation - Amendement 1, NF ISO 11277/A1,.
- Lahoori, M., 2020. Thermo-hydro-mechanical behavior of an embankment to store thermal energy (PhD Thesis). PhD thesis, Université de Lorraine.
- Liu, X., Xu, W., Zhan, L., Chen, Y., 2016. Laboratory and numerical study on an enhanced evaporation process in a loess soil column subjected to heating. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A* 17, 553–564. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1600246>
- McCartney, J., Coccia, C.J.R., Alsharif, N.A., Stewart, M.A., Baser, T., Traore, T., Goode III, J.C., 2014. Unsaturated soil mechanics in geothermal energy applications. eScholarship, University of California.
- Tang, A.-M., Cui, Y.-J., 2005. Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay. *Can. Geotech. J.* 42, 287–296. <https://doi.org/10.1139/t04-082>
- Wind, G.P., 1966. Capillary conductivity data estimated by a simple method.
- Yang, Y., Yang, L., Zhao, D., Guo, Y., Lin, J., Jiang, F., Huang, Y., Zhang, Y., 2024. Thermal Effects on the Soil Water Retention Curves and Hydraulic

Properties of Benggang Soil in Southern China.  
Water 16. <https://doi.org/10.3390/w16020238>