

---

# Effet de température des cycles thermiques sur les propriétés thermiques des sols compactés

**BOUKELIA Ahmed<sup>1</sup>, ROSIN-PAUMIER Sandrine<sup>1</sup>, MASROURI Farimah<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> LEMTA (CNRS, UMR 7563), Université de Lorraine, cnrs, lemta, F-54000 Nancy  
sandrine.rosin@univ-lorraine.fr

---

*RÉSUMÉ. L'effet de la température et des cycles thermique sur les paramètres thermiques est étudié sur deux sols compactés. Les résultats montrent que la conductivité, la capacité thermique et la diffusivité thermique augmentent légèrement avec l'augmentation de la température. Cette augmentation est plus importante dans le cas des éprouvettes compactées du côté sec de la courbe de compactage. L'effet des cycles thermiques sur les propriétés thermiques est réversible après plusieurs cycles de chauffage – refroidissement.*

*ABSTRACT. The effect of the temperature and heating-cooling cycles on the thermal parameters of two compacted soils is studied. The results showed that thermal conductivity, the thermal capacity and thermal diffusivity of samples increase with temperature increase. This increase was larger for samples compacted on the dry side of the compaction curve. The application of cyclic temperature variations to the samples showed reversible evolutions in the thermal properties after a heating-cooling cycle*

*MOTS-CLÉS : sols compactés, température, paramètres thermiques.*

*KEY WORDS: compacted soils, temperature, thermal parameters.*

---

## 1. Introduction

La connaissance des propriétés thermiques des sols est nécessaire dans de nombreux projets géotechniques tels que le stockage des déchets radioactifs [RUT02], l'enfouissement des câbles de haute tension [DEL11], la géothermie de surface [BRA06]. Les paramètres thermiques qui gouvernent le transfert de chaleur dans le sol sont : la conductivité thermique ( $\lambda$ ) qui caractérise l'habilité du sol à conduire de la chaleur sous un gradient de température, la capacité thermique ( $C$ ) qui représente la capacité à emmagasiner la chaleur et la diffusivité thermique ( $\alpha$ ) qui caractérise le rayon d'influence autour de la source de chaleur. Ces caractéristiques thermiques ( $\lambda$ ,  $C$  et  $\alpha$ ) dépendent des paramètres physiques du sol : la densité, la teneur en eau, la minéralogie, la taille et l'arrangement des grains. Plusieurs études ont montré que la conductivité thermique augmente avec la densité sèche et la teneur en eau du matériau [ABU01] [BRA06], tout comme la capacité thermique [ABU03]. La composition minéralogique et la méthode de préparation de matériau influencent également les propriétés thermiques des sols [TAN05]. Par ailleurs, quelques rares études se sont intéressées à l'effet de la température sur les propriétés thermiques des sols [SMI13] [HIR00]. Les résultats de ces études montrent que les paramètres thermiques changent légèrement pour des températures entre 30°C et 50 °C et de façon plus prononcée au-delà de 50°C.

L'objectif de cette étude est de quantifier l'effet de la température et des cycles thermiques sur les trois paramètres thermiques ( $\lambda$ ,  $C$  et  $\alpha$ ) des sols compactés.

## 2. Matériaux et méthodes

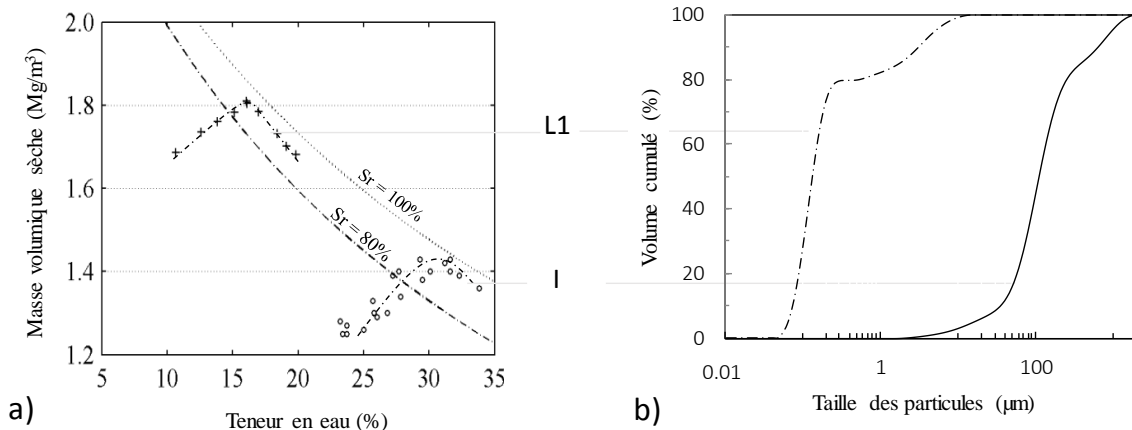
### 2.1. Caractérisation des matériaux

Deux différents types de sols sont étudiés : un limon (L1) et un matériau sablo-argileux composé d'un mélange sable d'Hostun et d'illite (SI). Les matériaux sont tout d'abord séchés, broyés puis tamisés à 2 mm avant d'être quartés et utilisés pour les différentes expérimentations. Le limon contient 80% de quartz, 7% de dolomite, 5% de calcite, 5% de matériaux argileux et 3% de feldspath. La granulométrie est obtenue par tamisage et essais de sédimentométrie, environ 20% des particules sont de la classe des fines (inférieure à 0,002 mm). D'autres

paramètres sont mesurés tels que les limites de liquidité ( $w_L=27\%$ ), et de plasticité ( $w_P=21\%$ ), l'indice de plasticité ( $IP=6$ ) [AFN93] et la valeur au bleu de Méthylène (MBV de 1,85 g/100g) [AFN99a]. La teneur en eau optimale ( $w_{OPN}=16\%$ ) et la masse volumique sèche maximale ( $\rho_{dmax}=1,81\text{Mg/m}^3$ ) sont déterminées par un essai de compactage Proctor normal (Figure 1a) [AFN99b]. Une campagne d'analyse analogue a été réalisés sur l'Illite, les résultats sont comparés à ceux du limon dans le tableau 1 et les figures associées (Fig. 1a et 1b). Ce second matériau, composé à 77% d'Illite, 12% de kaolinite et 12% de calcite est classé A

**Tableau 1.** Essais d'identification réalisés sur les matériaux.

Materiau	wP %	wL %	IP	VBM g/100g	w <sub>OPN</sub> %	$\rho_{dmax}$ Mg/m <sup>3</sup>	GTR (2000)
Illite (I)	34	65	31	5.41	31	1.43	A3
Limon de Plaisir (L1)	21	27	6	1.85	16	1.81	A



**Figure 1.** Courbes de compactage Proctor normal (a) et courbe granulométriques (b) pour chaque matériau.

Pour préparer les éprouvettes à des teneurs en eau et densités voulues, les matériaux secs et broyés sont initialement humidifiés et conservés dans des sacs hermétiques pendant 24h afin d'homogénéiser la teneur en eau. Puis les éprouvettes de 116 mm de hauteur et 152 mm de diamètre sont préparées par compactage dynamique dans un moule CBR. Pour étudier l'effet d'une variation de température, les éprouvettes préparées à différentes teneurs en eau et densités le long de la courbe Proctor sont isolées avec du papier aluminium et placées dans des boîtes hermétiques afin de limiter la variation de la teneur en eau. Les éprouvettes sont ensuite portées à des températures de 1 à 50°C dans une enceinte climatique thermorégulée.

## 2.2. Mesure des propriétés thermiques

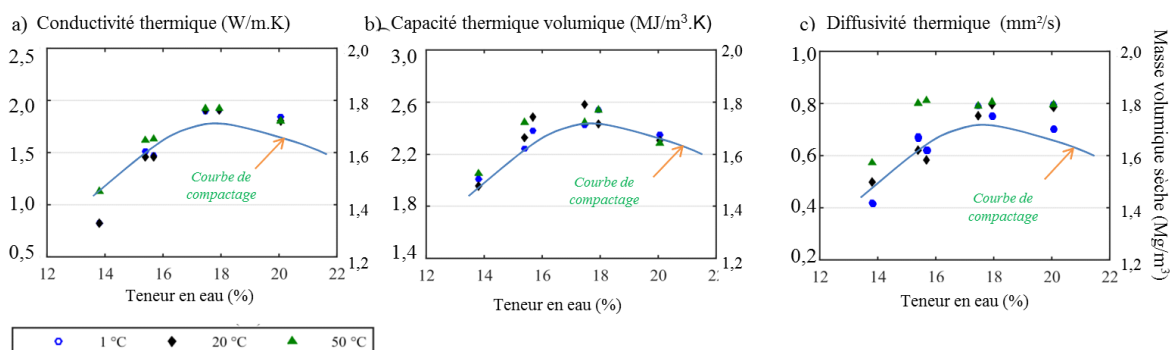
Les propriétés thermiques des éprouvettes sont mesurées à l'aide d'un conductimètre thermique KD2 Pro Decagon©. Deux sondes sont utilisées : une double sonde nommée SH1 et une sonde simple nommée TR1. La sonde SH1 est composée de deux tiges de 30 mm de longueur et de 1,3 mm de diamètre espacées de 6 mm. L'une des tiges porte l'élément de chauffe et la seconde mesure la température. Cette sonde permet de mesurer les conductivités thermiques ( $\lambda$ ) allant de 0,2 à 2 W/m.K, la capacité thermique volumique (C) allant de 0,2 à 4 MJ/m<sup>3</sup>.K et la diffusivité thermique ( $\alpha$ ) allant de 0,1 à 1 mm<sup>2</sup>/s. La sonde TR1, composée d'une tige simple (2,4 mm de diamètre et 100 mm de longueur) portant l'élément de chauffe et de mesure est utilisée pour mesurer la conductivité thermique lorsqu'elle est supérieure à 2 W/m.K. Toutes les mesures ont une précision de  $\pm 10\%$ .

## 3. Résultats obtenus

### 3.1. Effet de la température sur les paramètres thermiques des sols

L'effet de la température est étudié entre 1° et 50 °C pour le matériau sablo-argileux (SI) et entre 20° et 50 °C pour le limon (L1). La gamme de variation de la température étudiée (1° - 50°C) est choisie selon le potentiel d'utilisation des sols compactés à proximité des sources de chauffage et de refroidissement. Les éprouvettes ont

été préparées à différents teneurs en eau et masses volumiques sèches avec la même énergie de compactage (Proctor normal).



**Figure 2.** Effet de la température sur : (a) conductivité thermique, (b) capacité thermique volumique et (c) diffusivité thermique de SI.

La Figure 2 montre que le refroidissement de 20 à 1 °C des éprouvettes a un effet négligeable sur les propriétés thermiques, quelles que soient la densité et la teneur en eau initiale des éprouvettes.

En revanche, une augmentation de la température de 20 à 50 °C provoque une augmentation visible de  $\lambda$  du côté sec de la courbe de compactage (Figure 2a). Pour ces éprouvettes, le degré de saturation ( $S_r$ ) est faible et le chauffage du sol provoque un transfert de vapeur à travers la porosité ouverte ce qui provoque une augmentation de la conductivité thermique. Après l'optimum, pour toutes les éprouvettes,  $\lambda$  n'est pas modifié par le changement de la température. Cela est principalement lié au fort taux de saturation ( $S_r = 90\%$ ) qui n'autorise plus les flux de vapeur.

Une légère augmentation de la capacité thermique en fonction de la température est constatée pour le matériau L1 (Figure 3).

Le comportement de  $\alpha$  est le même que  $\lambda$ . Une augmentation de la diffusivité thermique du sol SI est observée du coté sec de l'optimum Proctor (Figure 2c). Cette augmentation est due à l'augmentation de la conductivité thermique.

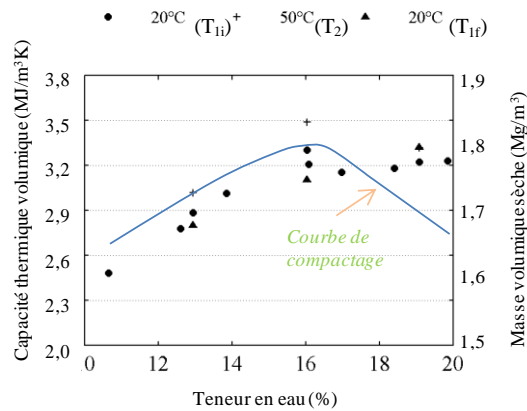
### 3.2. Effet de cycles de température sur les paramètres thermiques des sols

L'effet des cycles de chauffage-refroidissement entre 20°et 50°C est étudié pour L1. Des éprouvettes de limon L1 compactées à l'optimum Proctor sont soumises aux cycles P1 et P2 de température.  $\lambda$  est mesuré à la fin des 2 premiers paliers (T1i et T2) et en fin de l'essai T1f (Tableau 2). La conductivité thermique de L1 augmente légèrement à 50 °C. Le même résultat est obtenu pour SI.  $\lambda$  diminue à la fin de l'essai (T1f), mais reste légèrement supérieur à la valeur mesurée initialement (T1i) malgré la diminution de la teneur en eau des éprouvettes.

**Tableau 2.** Programme thermique appliqué aux éprouvettes et résultats obtenus pour des éprouvettes L1 compactées à l'optimum.

Programme	T 1		T2		NB cycle	$\lambda(W/m.K)$		
	T°C	Temps	T°C	Temps		T1i	T2	T1f
P1	20	9h	50	9h	60	2,36	2,60	2,54
P2	20	2h	50	4h	60	-	-	2,49
P3	20	9h	50	9h	4	-	-	-

Des mesures de la capacité thermique sont effectuées sur trois éprouvettes l'une compactée du coté sec de la courbe de compactage, la seconde à l'optimum Proctor et la troisième du coté humide. Les résultats des mesures réalisées lors des premiers paliers (T1i et T2) et à la fin du programme (T1f) sont comparés avec les données obtenues à 20 °C en Figure 3.



**Figure 3.** Effet du programme thermique P3 sur la capacité thermique volumique d'éprouvettes L1 préparées à diverses densités et teneurs en eau.

A 50 °C, une augmentation de la capacité thermique de l'ordre de 20% est obtenue. Les mesures finales réalisées à 20 °C (T1f) donnent des résultats similaires aux valeurs initiales (T1i). Une réversibilité du comportement est donc observée.

#### 4. Conclusion

L'effet de la température et des cycles thermiques sur les paramètres thermiques des sols ont été étudiés. Les résultats montrent que la variation de la température entre 20 et 50°C provoque une légère augmentation des paramètres thermiques. Cette augmentation est plus importante dans le cas des éprouvettes compactés du côté sec de la courbe de compactage. L'effet de la température sur la conductivité thermique, la capacité thermique et la diffusivité thermique est réversible après plusieurs cycles de chauffage-refroidissement.

Les sols compactés du côté humide de l'optimum Proctor ont une bonne habilité à stocker de la chaleur : une capacité thermique maximale et conductivité thermique optimale assurant un bon échange entre le sol et la géo-structure.

#### 5. Bibliographie

- [AFN93] AFNOR. NF P94-051 - Sols : Détermination des limites d'Atterberg. Ass. Fr. de Norm., Paris, France, p. 15, 1993.
- [AFN99a] AFNOR NF EN 933-9 - Part 9 : Methylene blue test. Ass. Fr. de Norm., Paris, France, p. 12, 1999a.
- [AFN99b] AFNOR NF P94-093 - Sols : Détermination des références de compactage d'un matériau. Ass. Fr. de Normalisation, Paris, France, p. 18, 1999b.
- [ABU01] Abu-Hamdeh N. H., « Measurement of the Thermal Conductivity of Sandy Loam and Clay Loam Soils using Single and Dual Probes », *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, 80(2), 209–216.
- [ABU03] Abu-Hamdeh N. H., « Thermal Properties of Soils as affected by Density and Water Content », *Biosystems Engineering*, 86(1), 2003, 97–102.
- [BLA11] Blanck G., Cuisinier O., Masroufi F., « Effet d'un traitement non traditionnel acide sur le comportement mécanique de trois limons », 20<sup>e</sup> Congrès Français de Mécanique, 2011, 1–6.
- [BRA06] Brandl H., « Energy foundations and other thermo-active ground structures », *Géotechnique*, 56(2), 2006, 81–122.
- [DEL11] De Lieto Vollaro, R., Fontana, L., & Vallati, A., « Thermal analysis of underground electrical power cables buried in non-homogeneous soils », *Applied Thermal Engineering*, 31(5), 772–778.
- [EKW06] Ekwue E. I., Stone R. J., Bhagwat D., « Thermal Conductivity of Some Compacted Trinidadian Soils as affected by Peat Content », *Biosystems Engineering*, 94(3), 2006, 461–469.
- [ESL14] Eslami H., « Comportement Thermo-Hydrromécanique Des Sols Au Voisinage Des Geo-Structures Energetiques », Thèse de doctorat, université de lorraine, Nancy, 2014, 213p.
- [FLE93] Fleureau J., Indarto S., « Comportement du limon de Jossigny remanié soumis à une pression interstitielle négative », *Revue française de géotechnique*, 62, 1993, 59–66.
- [HIR00] Hiraiwa Y., Kasubuchi T., « Temperature dependence of thermal conductivity of soil over a wide range of temperature (5 - 75°C) », *European Journal of Soil Science*, 51(2), 2000, 211–218.
- [RUT02] Rutqvist, J., Wu, Y.-S., Tsang, C.-F., & Bodvarsson, G., « A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow , heat transfer , and deformation in fractured porous rock », *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(4), 429–442.
- [SMI13] Smits K.M., Sakaki T., Howington S., Peters J., Illangasekare T., « Temperature Dependence of Thermal Properties of Sands across a Wide Range of Temperatures (30 - 70°C) », *Vadose Zone Journal*, 12(1), 2013.
- [TAN05] Tang, A., « Effet de la température sur le comportement des barrières de confinement », Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2005, 201 pp.