

STOCKAGE DE CHALEUR DANS LES SOLS COMPACTES

HEAT STORAGE IN THE COMPACTED SOILS

A. Boukelia^{1,2}, S. Rosin-Paumier,¹ F. Masroui¹, T. Leborgne³

¹ LEMTA (CNRS, UMR 7563), Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy, France

² ESITC de Metz, Metz, France

³ Bouygues TP, Paris, France

RESUME - L'effet de la teneur en eau, de la densité sèche et de la température sur les paramètres thermiques est étudié sur quatre sols compactés. Les résultats montrent que la conductivité, la capacité thermique et la diffusivité des matériaux atteignent un maximum aux alentours de l'optimum Proctor. L'augmentation de la température provoque une légère augmentation des paramètres thermiques.

ABSTRACT - The coupled effect of the water content, dry density and temperature on the thermal parameters is studied. The results showed that thermal conductivity and diffusivity reached a maximal value near to the optimum water content, whereas the volumetric heat capacity reached a plateau on the wet side of the compaction curve. Thermal properties of soils increased with temperature.

Mots clefs : sols compactés, température, paramètres thermiques.

Keywords: 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 (Rutqvist et al, 2002), l'enfouissement des câbles de haute tension (De Lieto Vollaro et al, 2011), la géothermie de surface (Brandl, 2006). Les paramètres thermiques qui gouvernent le transfert de chaleur dans le sol sont : la conductivité thermique (λ) 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 (α) qui caractérise le rayon d'influence autour de la source de chaleur. Ces caractéristiques thermiques (λ , C et α) 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 (Abu-Hamdeh 2001 ; Brandl 2006), tout comme la capacité thermique (Abu-Hamdeh 2003). La composition minéralogique et la méthode de préparation de matériau influencent également les propriétés thermiques des sols (Tang 2005). Par ailleurs, quelques rares études se sont intéressées à l'effet de la température sur les propriétés thermiques des sols (Smits et al. 2013, Hiraiwa et Kasubuchi 2000). 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.

Les études couplant l'effet combiné de la teneur en eau initiale et de la densité sur les paramètres thermiques sont également rares. Ekwue et al. (2006) ont étudié l'effet de la teneur en eau et de la densité sur la conductivité thermique de trois types de sols compactés. Les résultats ont montré que la conductivité thermique présente un maximum aux alentours de l'optimum Proctor.

L'objectif de cette étude est de quantifier l'effet couplé de la teneur en eau, de la densité sèche initiales et de la température sur les trois paramètres thermiques (λ , C et α) des sols compactés.

2. Matériaux et méthodes

Quatre différents types de sols sont étudiés : un limon (L1), 2 mélanges sable-limon (SL2 et SL3) et un mélange sable-illite (SI). Les matériaux sont préparés à différentes teneurs en eau et compactés à l'énergie Proctor normal. Les caractéristiques thermiques des sols : la conductivité thermique (λ), la capacité thermique volumique (C) et la diffusivité thermique (α) sont ensuite mesurées avec un conductimètre thermique *KD2 Pro*.

2.1. Propriétés des matériaux

Les propriétés des matériaux étudiés sont présentées dans cette partie. Le Tableau 1 résume la minéralogie des matériaux utilisés. Le matériau illitique utilisé, nommé Arginotech®, provient de l'est de l'Allemagne. Les limons utilisés dans cette étude nommés, limon de Plaisir, limon de Jossigny et limon de Xeuilley proviennent du bassin parisien.

Tableau 1 : Caractéristiques minéralogiques des matériaux.

Matériau	Ref.	Quartz	Calcium/carbonate	Feldspath	Minéraux argileux
Illite	I	traces	12% calcite	traces	77% Illite 10% Kaolinite
Limon de Plaisir	L1	81%	5% calcite 7% Dolomite	3%	5%
Limon de Jossigny	L2	98%	traces	1%	1%
Limon de Xeuilley	L3	83%	2%	3%	11%
Sable d'Hostun	S	97,4%	traces		

Les caractéristiques des matériaux comprenant, la distribution de la taille des grains, les limites d'Atterberg (AFNOR, 1993), la surface spécifique, la teneur en carbonate sont résumées dans le Tableau 2. La distribution de la taille des grains de l'illite est déterminée à l'aide d'un granulomètre laser Mastersizer 2000© (Eslami, 2014). La distribution de la taille des grains du limon de Plaisir est réalisée par sédimentométrie (AFNOR, 1992) et par tamisage par voie humide (AFNOR, 1995) sur le limon initialement broyé et tamisé à 2mm. Pour les limons de Xeuilley et de Jossigny, la distribution de la taille des grains est issue de la bibliographie (Fleureau & Inderto (1993) et Blanck et al. (2011)).

A partir des résultats d'identification et selon le GTR (2000), I et L2 sont des matériaux plastiques de classe respectivement, A3 et A2, tandis que L1 et L3 sont des matériaux peu plastiques de classe A1 et A2.

Tableau 2 : Caractéristiques des matériaux : I, L1 déterminées dans cette étude ; L2 selon Fleureau & Inderto (1993), et L3 selon Blanck et al. (2011).

Propriétés	I	L1	L2	L3
Distribution de la taille des grains				
Passant à 80 µm	100	41	80	95
Passant à 2 µm	85	20	28	25
Limites d'Atterberg				
Limite de plasticité (%)	34	20,6	16 - 19	28
Limite de liquidité (%)	65	27,3	37	37
Indice de plasticité	31	6,7	18 - 21	9
Surface spécifique				
VBS (g/100g)	5,41	1,85	-	3,1

La teneur en eau optimale et la densité sèche maximale des matériaux sont déterminées à partir des courbes de compactage réalisées à l'aide de l'essai Proctor normal (AFNOR, 1999). Dans cette étude, les matériaux sont utilisés seuls ou en mélange avec 50 % du sable d'Hostun. Les masses volumiques maximales des matériaux et les teneurs en eau à l'optimum des différents matériaux sont présentés dans le Tableau 3. Les courbes de compactage pour les matériaux L1, SL2, SI et SL3 utilisés dans la suite de l'étude sont présentées en Figure 1.

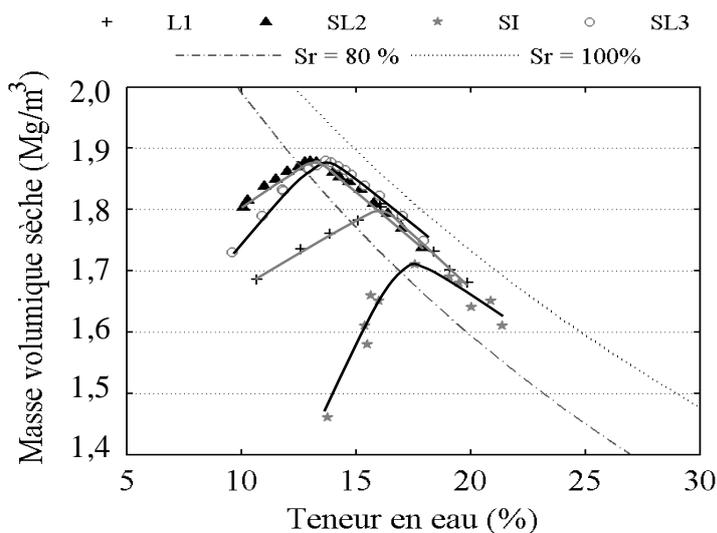


Tableau 3 : Compactage Proctor.

sol	ρ_d (Mg/m ³)	w_{OPN} (%)
I	1,42	31,5
L1	1,81	16,0
L2	1,75	15,5
L3	1,66	19,2
SI	1,73	17,9
SL2	1,89	16,6
SL3	1,88	13,7

Figure 1: Courbes de compactage des matériaux L1, SL2, SI et SL3.

Les masses volumiques maximales des limons L2 et L3 et de l'illite I sont respectivement de 1,75 - 1,66 et 1,42 Mg/m³ (Tableau 3). Le mélange avec du sable a permis une translation des courbes de compactage des sols vers les densités plus élevées, pour atteindre 1,89 – 1,88 et 1,73 Mg/m³ pour SL2 – SL3 et SI respectivement.

2.2. Préparation des éprouvettes

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 sur les propriétés thermiques des deux matériaux SI et L1, les éprouvettes préparées à différentes teneurs en eau et densités 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.

2.3. 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 (λ) allant de 0,2 à 2 W/m.K, la capacité thermique volumique (C) allant de 0,2 à 4 MJ/m³.K et la diffusivité thermique (α) allant de 0,1 à 1 mm²/s. La sonde TR1 (2,4 mm de diamètre et 100 mm de longueur) est utilisée pour mesurer la conductivité thermique lorsqu'elle est supérieure à 2 W/m.K. Toutes les mesures ont une précision de $\pm 10\%$. Le Tableau 4 résume les paramètres thermiques des matériaux seuls ou mélangés avec du sable et compactés à l'optimum Proctor normal.

Tableau 4 : Mesure des caractéristiques thermiques à l'optimum des matériaux et le sable à l'état dense saturé à 20°C.

Matériaux	λ (W/m K)	C (MJ/m ³ K)	α (mm ² /s)
S	2,38	3,05	0,78
I	0,92	3,25	0,28
L1	2,48	3,25	0,76
L3	1,26	2,80	0,45
SI	1,92	2,44	0,79
SL2	2,95	2,88	1,02
SL3	2,84	3,13	0,91

Pour améliorer les paramètres thermiques des limons, l'ajout de 50% de sable qui a une conductivité thermique et une capacité thermique volumique plus élevées a été effectué. On constate qu'avec la même énergie de compactage, par exemple pour le mélange SL3, une densité plus importante est obtenue et des paramètres thermiques du mélange sont à la fois plus élevés que ceux du sable ou du limon L3 (Tableau 4). Ceci peut être dû à une forte augmentation de la densité du mélange. La variation de la minéralogie a également modifié les paramètres thermiques. Par exemple dans le cas de l'illite I, la conductivité thermique est passée de $\lambda_I = 0,920$ W/m.K à $\lambda_{SI} = 1,915$ W/m.K pour le mélange SI.

3. Résultats obtenus

3.1. Effet couplé de la teneur en eau et de la densité initiales sur les paramètres thermiques

Les paramètres thermiques λ , C et α mesurés pour différents points des courbes de compactage seront étudiés successivement dans cette partie.

3.1.1. Effet sur la conductivité thermique

Les résultats des mesures présentés en Figure 2 montrent que la conductivité thermique des matériaux augmente du côté sec de la courbe de compactage jusqu'à atteindre un maximum aux alentours de l'optimum Proctor. Cette augmentation est due à l'augmentation de la masse volumique sèche et de la teneur en eau des éprouvettes. En dépassant l'optimum, la conductivité thermique diminue sur le côté humide de la courbe de compactage. Cela peut s'expliquer par la diminution de la masse volumique sèche. La comparaison de la conductivité thermique des quatre matériaux (L1, SI, SL2 et SL3) montre que les conductivités thermiques des mélanges SL2 et SL3 sont très proches et nettement plus importante que celles des éprouvettes L1 et SI (Figure 2a). La valeur élevée de la conductivité thermique de ces mélanges serait liée à la masse volumique sèche et la teneur en quartz.

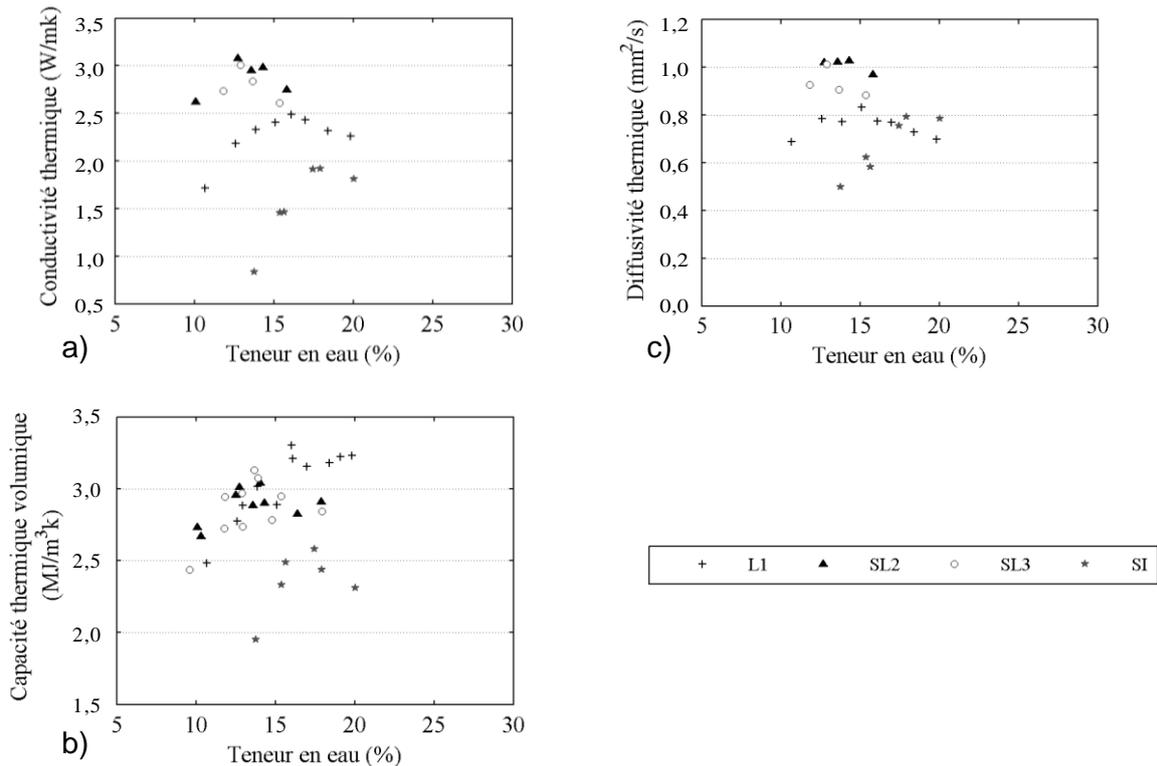


Figure 2 : Effet couplé de la densité et de la teneur en eau sur : (a) la conductivité thermique, (b) la capacité thermique volumique et (c) la diffusivité thermique.

3.1.2. Effet sur la capacité thermique volumique

La capacité thermique volumique des matériaux augmente du côté sec de la courbe de compactage jusqu'à atteindre un plateau en dépassant l'optimum Proctor pour les trois matériaux à l'exception de SI (Figure 2b). Cette augmentation est due à l'augmentation de la masse volumique sèche et de la teneur en eau. En dépassant l'optimum Proctor l'effet de la diminution de la masse volumique sèche est compensé par l'augmentation de la teneur en eau permettant de limiter la variation de la capacité thermique volumique. Contrairement à la conductivité thermique, la capacité thermique de ces sols apparaît moins sensible à des variations de la densité et de la teneur en eau. En comparant avec l'eau pure qui a une capacité thermique de 4,2 MJ/m³.K, les matériaux étudiés ont une bonne aptitude à stocker de la chaleur. Par exemple le limon de Plaisir L1 permet d'atteindre une capacité thermique de 3,25 MJ/m³.K soit 77% de la capacité thermique de l'eau.

3.1.3. Effet sur la diffusivité thermique

La diffusivité thermique étant directement reliée à la conductivité thermique, elle suit le même type de variation que la conductivité thermique. Elle augmente du côté sec de la courbe de compactage et diminue après avoir atteint une valeur maximale aux alentours de l'optimum Proctor (Figure 2c). Les mélanges SL2 et SL3 ont une diffusivité plus importante que les autres matériaux étudiés.

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

L'effet de la température est étudié entre 1° et 50 °C pour le matériau SI et entre 20° et 50 °C pour L1. L'effet des cycles de chauffage-refroidissement entre 20° et 50°C est étudié pour L1.

3.2.1. Effet de la température sur les paramètres thermiques

La Figure 3 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 initiales des éprouvettes.

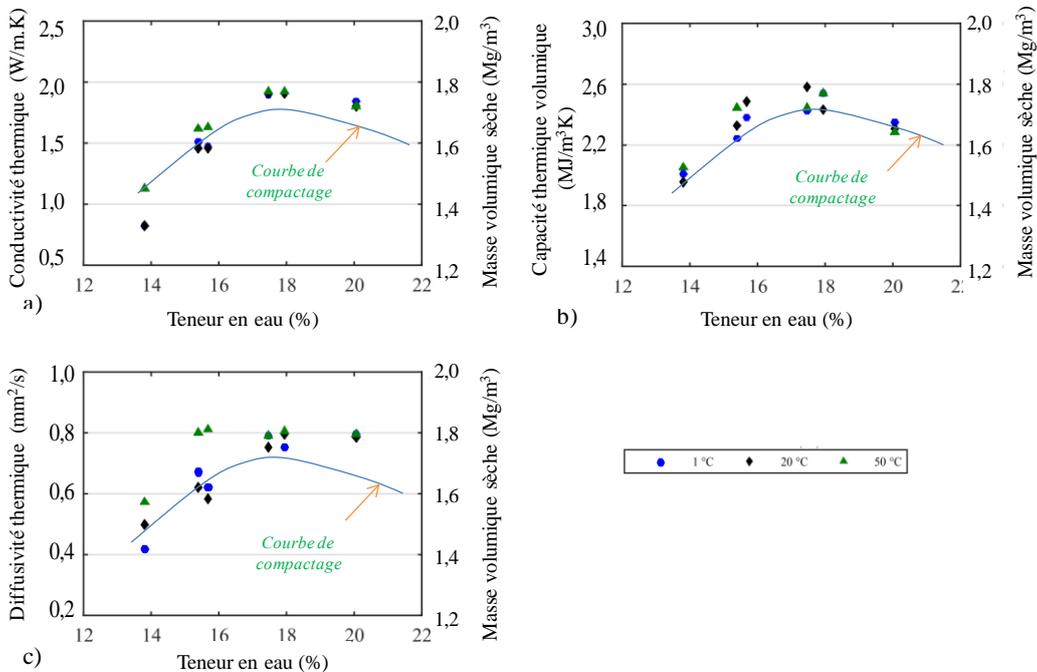


Figure 3 : Effet de la température sur : (a) conductivité thermique, (b) capacité thermique volumique et (c) diffusivité thermique de SI.

En revanche, une augmentation de la température de 20 à 50 °C provoque une augmentation visible de λ du côté sec de la courbe de compactage (Figure 3a). 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, S_r est de l'ordre de 90% pour toutes les éprouvettes et λ n'est plus modifiée par le changement de la température car la porosité du sol n'est pas ouverte.

Une légère augmentation de la capacité thermique en fonction de la température est constatée pour le matériau L1 (Figure 4).

Le comportement de α est le même que λ . Une augmentation de la diffusivité thermique du sol SI est observée du côté sec de l'optimum Proctor (Figure 3c). Cette augmentation est due à l'augmentation de la conductivité thermique.

3.2.2. Effet des cycles sur les paramètres thermiques

Des éprouvettes de limon L1 compactées à l'optimum Proctor sont soumises aux cycles P1 et P2 de température. λ est mesuré à la fin des 2 premiers paliers (T1i et T2) et en fin de l'essai T1f (Tableau 5).

La conductivité thermique de L1 augmente légèrement à 50 °C. Le même résultat est obtenu pour SI. λ 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 5 : Programme thermique appliqué aux éprouvettes et résultats obtenus pour des éprouvettes L1 compactées à l'optimum.

Programme	T 1		T 2		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 côté sec de la courbe de compactage, la seconde à l'optimum Proctor et la troisième du côté 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 4.

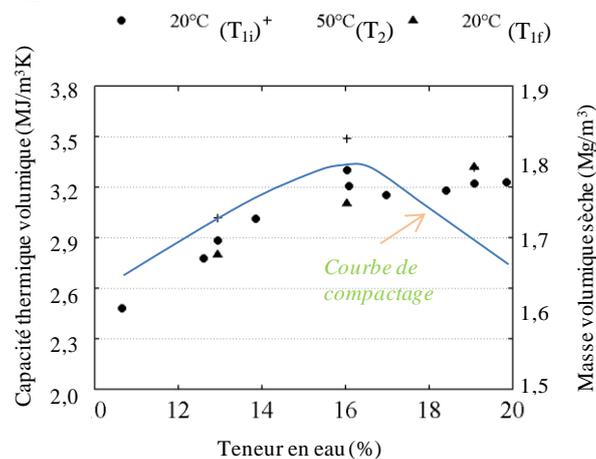


Figure 4 : Effet du programme thermique P3 sur la capacité thermique volumique d'éprouvettes L1 préparées à diverses densités et teneurs en eau.

Une augmentation de C à 50 °C est obtenue. Les mesures finales de C à 20 °C (T1f) donnent les mêmes résultats qu'au début des cycles (T1i). La quasi réversibilité du comportement est donc observée.

4. Conclusion

L'effet couplé de la teneur en eau, de la densité et la variation de la température sur les paramètres thermiques des sols ont été étudiés. Les résultats montrent que dans les sols limoneux étudiés, la conductivité et la diffusivité augmentent jusqu'à atteindre une valeur maximale aux alentours de l'optimum Proctor, ensuite elle diminue du côté humide de la courbe de compactage. La capacité thermique augmente du côté sec de la courbe de compactage jusqu'à atteindre un plateau en dépassant l'optimum Proctor. L'ajout du sable a permis d'augmenter la densité et d'améliorer les paramètres thermiques des sols. La variation de la température entre 20 et 50°C provoque une légère augmentation des paramètres thermiques. L'effet de la température sur la conductivité thermique et la diffusivité thermique est réversible après application de cycles thermiques.

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. Références bibliographiques

- Abu-Hamdeh, N.H. (2001). Measurement of the Thermal Conductivity of Sandy Loam and Clay Loam Soils using Single and Dual Probes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80(2), 209–216.
- Abu-Hamdeh, N.H. (2003). Thermal Properties of Soils as affected by Density and Water Content. *Biosystems Engineering*, 86(1), 97–102.
- Blanck, G., Cuisinier, O., & Masroui, F. (2011). Effet d'un traitement non traditionnel acide sur le comportement mécanique de trois limons Résumé : Abstract : 20ème Congrès Français de Mécanique pp. 1–6.
- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81–122.
- De Lieto Vollaro, R., Fontana, L., & Vallati, A. (2011). Thermal analysis of underground electrical power cables buried in non-homogeneous soils. *Applied Thermal Engineering*, 31(5), 772–778.
- Ekwue, E.I., Stone, R. J., & Bhagwat, D. (2006). Thermal Conductivity of Some Compacted Trinidadian Soils as affected by Peat Content. *Biosystems Engineering*, 94(3), 461–469.
- Eslami, H. (2014). Comportement Thermo-Hydrromécanique Des Sols Au Voisinage Des Geo-Structures Energetiques. thèse doctorat, université de lorraine, Nancy, p213
- Fleureau, J., & Inderto. (1993). Comportement du limon de Jossigny remanié soumis à une pression interstitielle négative. *Revue française de géotechnique.*, pp. 59–66.
- Hiraiwa, Y., & Kasubuchi, T. (2000). Temperature dependence of thermal conductivity of soil over a wide range of temperature (5-75°C). *European Journal of Soil Science*, 51(2), 211–218.
- Rutqvist, J., Wu, Y.-S., Tsang, C.-F., & Bodvarsson, G. (2002). 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.
- Smits, K., Sakaki, T., Howington, S., Peters, J., & Illangasekare, T. (2013). Temperature Dependence of Thermal Properties of Sands across a Wide Range of Temperatures (30 - 70°C). *Vadose Zone Journal*, 12(1).