
Effet couplé des paramètres de compactage et de la température sur les propriétés thermiques des sols.

Boukelia, A.^{1,2}, Rosin-Paumier, S.¹, Eslami, H.^{1,2}, Masrouri, F.¹

¹ LEMTA – CNRS UMR 7563, Université de Lorraine, Vandoeuvre-lès-Nancy, F-54500, France.

² ESITC de Metz, Metz.

RÉSUMÉ. La mise en place de méthodes permettant d'emmagasinier la chaleur dans le sol engendre des questionnements sur l'impact des variations de températures sur les propriétés thermiques des matériaux et sur la possibilité d'optimiser l'efficacité de ces procédés dans le cas où le massif de stockage est anthropique (sols compactés). En effet, à proximité des échangeurs, la modification de la température pourrait provoquer une évolution du volume des constituants des sols et des propriétés d'écoulement de l'eau, ce qui pourrait engendrer une variation des propriétés thermiques du matériau. Dans cette étude, des essais sont réalisés afin de quantifier l'effet couplé de la teneur en eau (w), de la densité sèche (ρ_d) et de la température (T) sur les paramètres thermiques (λ , C and α) de différents sols compactés argileux ou limoneux. Pour les 5 matériaux testés, les résultats montrent une augmentation de la conductivité thermique (λ) du côté sec de la courbe de compactage jusqu'à atteindre un maximum aux alentours de l'optimum Proctor. Les capacités thermiques calorifiques mesurées (C) évoluent dans le même intervalle de variation pour les 5 matériaux malgré leur différence de minéralogie, ρ_d , w et de texture. Enfin, la diffusivité thermique ($\alpha = \lambda/C$) suit la même évolution que λ . Les résultats montrent une augmentation des propriétés thermiques avec l'augmentation de la température, plus particulièrement marqué dans l'intervalle 40-70 °C. Cette augmentation est plus importante pour les éprouvettes compactées du côté sec de la courbe de compactage.

ABSTRACT.

The incorporation of heat exchangers into compacted soils in order to store energy leads to changes in the temperature of the adjacent soil. The temperature variations affect the physical properties of soil inducing changes in the thermal properties. In order to optimize the efficiency of these innovative systems, the aim of this study was to better understand the coupled effect of water content (w), dry density (ρ_d) and temperature variations (T) on the thermal properties (λ , C and α) of compacted soils. This experimental study showed that, at 20°C, the thermal conductivity (λ) of 5 compacted soils increased on the dry side of the compaction curve until to reach a maximum near to the optimum. Despite the large variety of mineralogy, density, water content and grain arrangement, C always varied in the same range. Therefore, the thermal diffusivity ($\alpha = \lambda/C$) varies in the same way than λ . The variation of λ in the temperature range of 1 to 20°C was not evidenced but a slight increases of λ was measured in the range 20°C and 40°C and this trend was clearly confirmed in the range of 40°C to 70°C. This increase was larger for samples compacted on the dry side of the compaction curve.

MOTS-CLÉS : essais de laboratoire; conductivité thermique; température; sols compactés; illite; limon.

KEY WORDS: laboratory tests; thermal conductivity; temperature; compacted soils; illite; loam.

1. Introduction

Afin de répondre aux enjeux environnementaux liés au réchauffement climatique, le recours à des énergies décarbonnées est de plus en plus sollicité. L'utilisation d'énergie photovoltaïque se développe rapidement mais se heurte à un problème de stockage d'énergie entre les périodes propices à la production d'énergie (été) et les périodes où les besoins énergétiques sont importants (hivers). Un des moyens potentiellement intéressants pour le stockage d'énergie et son utilisation ultérieure est l'équipement des remblais, des terrassements, des massifs de terre (etc...) par des circuits géothermiques pour l'échange de chaleur. La mise en place des méthodes permettant d'emmagasiner la chaleur dans le sol engendre des questionnements sur l'impact des variations de températures sur les propriétés des matériaux [ESL14] et sur la possibilité d'optimiser l'efficacité de ces procédés dans le cas où le massif de stockage est anthropique (sols compactés).

Les caractéristiques du sol compacté influençant l'efficacité du stockage sont la nature minéralogique, les paramètres de compactage (teneur en eau et densité), la conductivité thermique et la capacité thermique [ABU01, ABU03, TAN05, BRA06]. Par exemple une augmentation de la teneur en silice du matériau augmente ses propriétés thermiques [TAN05]. Différents modèles ont été développés pour prendre en compte ces évolutions [FAR82] [DON15]. Dans ces modèles, pour différents paramètres de sol, les propriétés thermiques sont considérées à température ambiante, l'effet de la variation de la température sur ces propriétés n'a été que très peu étudié. Pourtant, à proximité des échangeurs thermiques, la modification de la température pourrait provoquer une évolution du volume des constituants des sols et des propriétés d'écoulement de l'eau, ce qui pourrait engendrer une variation des propriétés thermiques du matériau.

L'objectif de cet article est de quantifier l'effet couplé de la teneur en eau, de la densité sèche et de la température sur les paramètres thermiques des sols.

2. Matériaux et méthodes

Cinq matériaux compactés ont été étudiés : un matériau illitique, un limon, un mélange sable-matériau illitique (50-50) et deux mélanges sable-limon (50-50). Les propriétés thermiques des sols sont mesurées à différents états de compactages et diverses températures de 1 à 70°C.

2.1. Propriétés des matériaux

Le Tableau 1 résume la minéralogie des matériaux utilisés. Le matériau illitique (I), nommé Arginotech®, provient de l'est de l'Allemagne. Les limons nommés, limon de Plaisir (LP), limon de Jossigny (LJ) et limon de Xeuilley (LX) 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	LP	81%	5% calcite 7% Dolomite	3%	5%
Limon de Jossigny	LJ	98%	Traces	1%	1%
Limon de Xeuilley	LX	83%	2%	3%	11%
Sable d'Hostun	S	97,4%	Traces		

Les caractéristiques des matériaux comprenant, la distribution de la taille des particules solides, les limites d'Atterberg [AFN93], la surface spécifique [AFN99a], la teneur en carbonate [AFN96] 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© [ESL14] [AFN09]. La distribution de la taille des grains du limon de Plaisir est réalisée par sédimentométrie [AFN92] et par tamisage par voie humide [AFN95] 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 [FLE93, BLA11].

A partir des résultats d'identification et selon le GTR [GTR00], I et LJ sont des matériaux plastiques de classe respectivement, A3 et A2, tandis que LP et LX sont des matériaux peu plastiques de classe A1 et A2.

Tableau 2. Caractéristiques des matériaux : I [ESL14], LP déterminées dans cette étude ; LJ [FLE93] et LX [BLA11].

Propriétés	I	LP	LJ	LX
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 [AFN99]. Dans cette étude, les matériaux sont utilisés seuls ou en mélange avec 50 % de sable d'Hostun (référéncés S-I, S-LJ et S-LX). Les courbes de compactage Proctor normal pour les matériaux utilisés dans cette étude sont présentées en Figure 1.

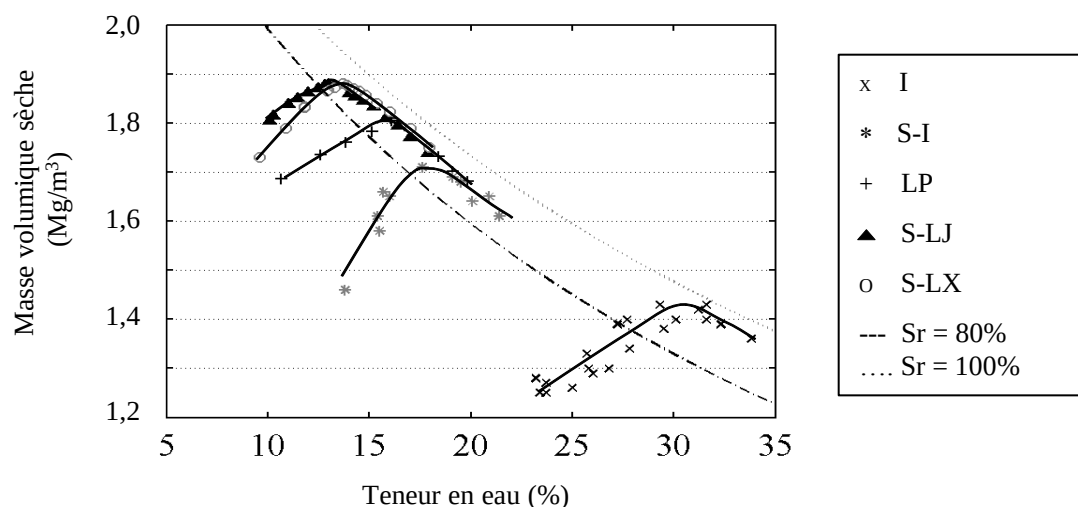


Figure 1. Courbes de compactage des matériaux I, S-I, LP, S-LJ et S-LX.

Les masses volumiques maximales des matériaux et les teneurs en eau à l'optimum des différents matériaux sont présentés dans le Tableau 3. Les masses volumiques maximales des limons I, LJ et LX sont respectivement de 1,42 – 1,75 et 1,66 Mg/m^3 . Le mélange avec du sable a permis une translation des courbes de compactage des sols vers les densités plus élevées pour atteindre 1,73 - 1,89 et 1,88 Mg/m^3 pour S-I, S-LJ et S-LX.

Tableau 3. *Masses volumiques maximales et teneurs en eau à l'optimum Proctor normal.*

Matériau	ρ_d (Mg/m ³)	w_{OPN} (%)
I	1,42	31,5
LP	1,81	16,0
LJ	1,75	15,5
LX	1,66	19,2
S-I	1,73	17,9
S-LJ	1,89	16,6
S-LX	1,88	13,7

2.2. Préparation des éprouvettes

Pour préparer les éprouvettes aux teneurs en eau et densités visées, les matériaux secs et broyés sont initialement humidifiés et conservés dans des sacs hermétiques pendant 24 h afin d'homogénéiser leur teneur en eau. Puis des 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 S-I et I, 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 70 °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, les capacités thermiques volumiques (C) allant de 0,2 à 4 MJ/m³.K et les diffusivités thermiques (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 les conductivités thermiques supérieures à 2 W/m.K. Les mesures des propriétés thermiques ont une précision de $\pm 10\%$.

3. Résultats expérimentaux

Dans cette partie, l'évolution des propriétés thermiques en fonction des propriétés de compactage des éprouvettes est observée tout d'abord à 20°C puis à diverses températures allant de 1 à 70°C.

3.1. Effet couplé de la teneur en eau et de la masse volumique sèche sur les propriétés thermiques à 20°C.

L'effet des propriétés de compactage sur les paramètres thermiques des sols compactés est étudié en réalisant des mesures au conductimètre thermique sur des éprouvettes préparées en différents points de la courbe Proctor normal (Figure 2). Cinq matériaux de granulométrie et minéralogies variées sont étudiés « I, S-I, LP, S-LJ et S-LX ».

Les résultats montrent que la conductivité thermique des matériaux augmente du côté sec de la courbe de compactage jusqu'à atteindre un maximum à proximité de l'optimum. Cette observation est cohérente avec la littérature [EKW06]. En effet, l'éprouvette est composée de solide, d'air et d'eau qui ont chacun une conductivité thermique différente. La phase solide présente la conductivité thermique la plus élevée puis l'eau et enfin l'air avec λ la plus petite. Ainsi, pour les matériaux les plus secs et avec une faible masse volumique sèche, la part d'air est importante, la conductivité thermique est donc très faible, plus on se rapproche de l'optimum Proctor, plus la part d'air diminue au profit des phases solides et liquides, plus conductrices, la conductivité thermique augmente alors fortement. De plus avec l'augmentation de la masse volumique, les contacts entre les particules sont plus nombreux ce qui augmente la conductivité thermique de l'ensemble. À des degrés de saturation de 90-95%, la valeur maximale de λ est atteinte.

Du côté humide de la courbe de compactage, les évolutions divergent en fonction de la minéralogie du matériau. Les matériaux siliceux (S-I, LP, S-LJ et S-LX) voient leur conductivité thermique diminuer tandis que

pour les matériaux silicatés (I), λ reste quasiment à son niveau maximal. Ces évolutions sont cohérentes avec les propriétés physiques des matériaux étudiés. Du côté humide de la courbe de compactage, la teneur en eau augmente tandis que la densité diminue. De plus, comme le degré de saturation reste quasiment identique sur cette partie de la courbe, tout se passe comme si les molécules d'eau prenaient la place des grains solides. Or, λ_{quartz} ($7,7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) est supérieur à λ_{eau} ($0,61 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) [BRI89], la conductivité des éprouvettes composées de quartz diminue donc rapidement. En revanche, pour éprouvettes I, au vu de la faible différence de conductivité thermique entre l'eau et l'illite ($\lambda_{\text{illite}} = 1,9 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), leur conductivité thermique conserve des valeurs proches de celles de l'optimum.

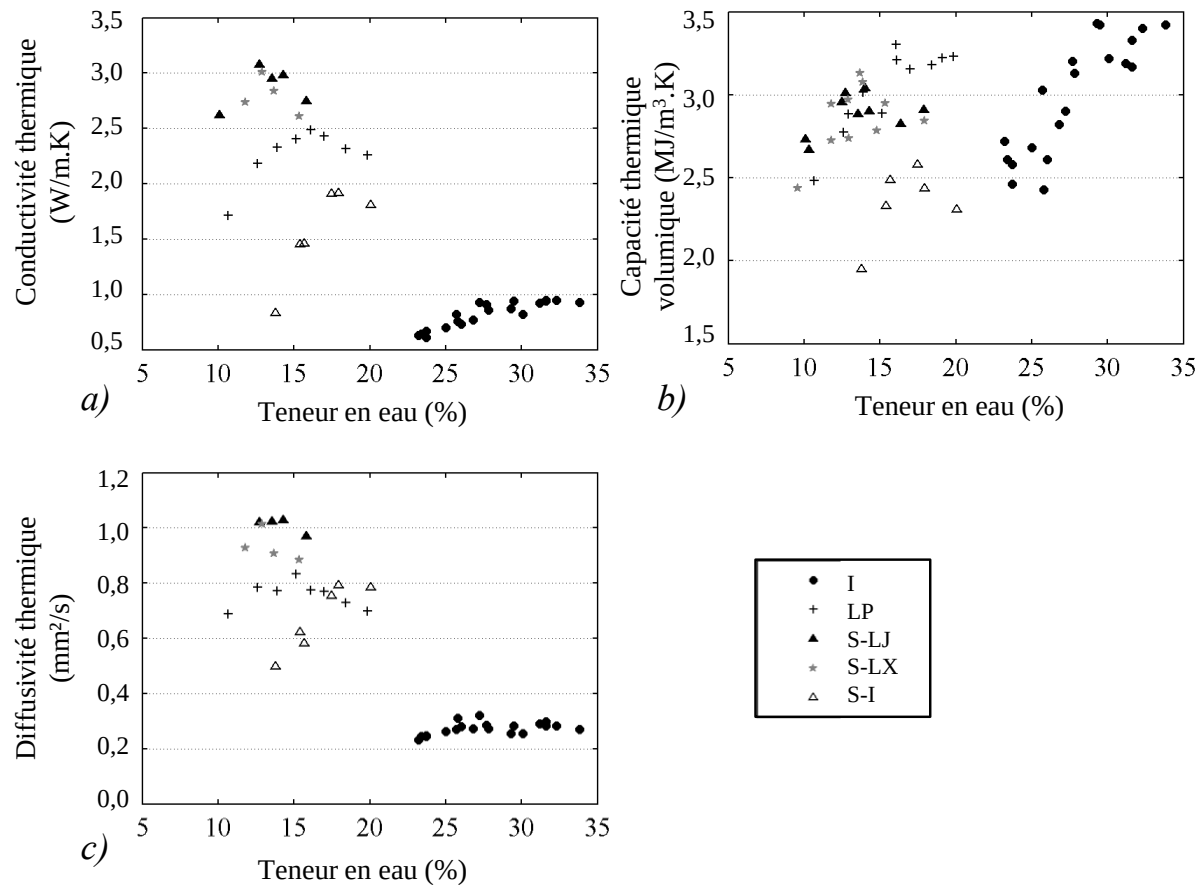


Figure 2. Evolution des paramètres thermiques le long des courbes de compactage Proctor normal des matériaux I, LP, S-LJ, S-LX et S-I.

Les capacités thermiques volumiques des éprouvettes augmentent du côté sec de la courbe de compactage pour atteindre un maximum à proximité de l'optimum Proctor normal. Du côté humide, les valeurs restent élevées ou diminuent faiblement. La gamme de variation de ce paramètre est du même ordre pour les 5 matériaux étudiés. La diffusivité thermique suit la même évolution que la conductivité thermique, en cohérence avec son mode de détermination ($D = \lambda/C$). Les diffusivités thermiques des mélanges sable-limons (S-LJ et S-LX) sont trois fois supérieures à celles du matériau illitique.

3.2. Effet d'une modification de la température des éprouvettes sur leurs paramètres thermiques.

L'effet de la température sur les propriétés thermiques est étudié dans un intervalle de 1° à 70°C . Des éprouvettes de matériau illitique (I, Figure 3) et du mélange sable-matériau illitique (S-I, Figure 4) sont préparées à différentes teneur en eau par compactage dynamique (énergie Proctor normal).

La Figure 3a présente l'évolution de la conductivité thermique (λ) du matériau illitique, pour toutes les températures testées ($1^\circ - 40^\circ - 70^\circ\text{C}$), les résultats montrent des évolutions cohérentes avec celles observées à 20°C : la conductivité thermique augmente fortement pour les éprouvettes préparées du côté sec de l'optimum et se stabilisent du côté humide de l'optimum. Les valeurs de conductivité thermique des éprouvettes sont modifiées par les variations de température. Si l'effet reste minime aux températures de 1° à 40°C , il est particulièrement

visible à 70 °C. λ augmente avec l'augmentation de la température. Cette évolution, confirmée par les mesures réalisées sur le mélange sable-matériau illitique (Figure 4a) et en accord avec la bibliographie [HIR00] [SMI13] peut s'expliquer par plusieurs phénomènes complémentaires. D'une part, λ de l'eau et des particules du sol augmentent avec la température. D'autre part, la dilatation des particules entraîne une augmentation du contact entre les particules ce qui conduit à augmenter la conductivité thermique des éprouvettes. Cependant, ces explications sont valables pour toutes les éprouvettes et ne permettent pas d'expliquer l'augmentation plus marquée pour les éprouvettes aux plus faibles teneurs en eau.

Il est possible d'expliquer ces différences en considérant la participation des transferts de chaleur par phase vapeur [DEV87]. Dans un sol saturé, le flux de chaleur progresse par diffusion entre les particules solides et les particules d'eau. Des mouvements de convection peuvent participer au transfert de chaleur mais vu la faible perméabilité des matériaux, ce phénomène reste minoritaire. Dans un sol non saturé, et plus particulièrement en cas de faible taux de saturation, comme on en trouve du côté sec de la courbe de compactage, le matériau est constitué de grains solides, d'eau et d'air. La conductivité thermique de l'air est faible sauf si son degré d'humidité est élevé. La vapeur d'eau se déplace dans le réseau poreux augmentant ainsi la conductivité thermique des matériaux. Lorsque l'air est chaud, il peut atteindre des degrés d'humidité plus important ce qui augmente encore sa participation au transfert thermique.

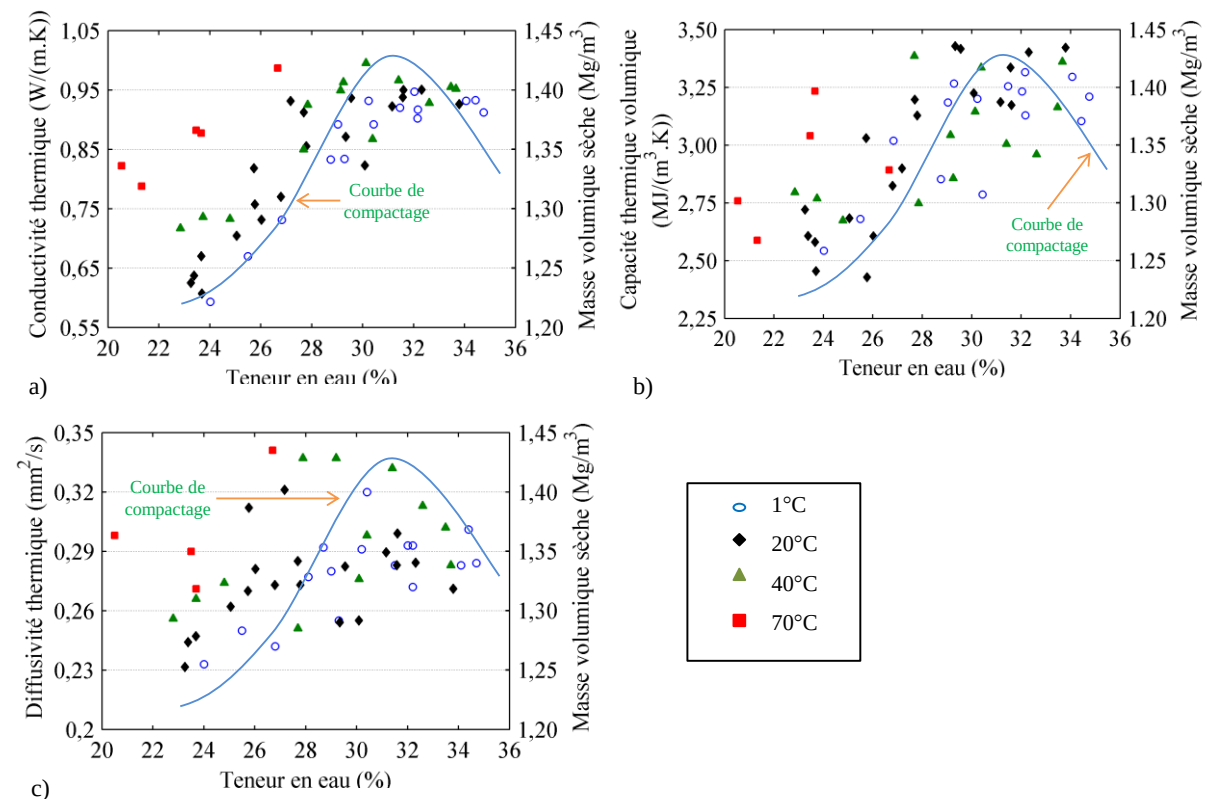


Figure 3. Conductivité thermique (a), capacité thermique volumique (b) et diffusivité thermique (c) mesurées à 1, 20, 40 et 70 °C sur des éprouvettes de matériau illitique préparées le long de la courbe Proctor normal.

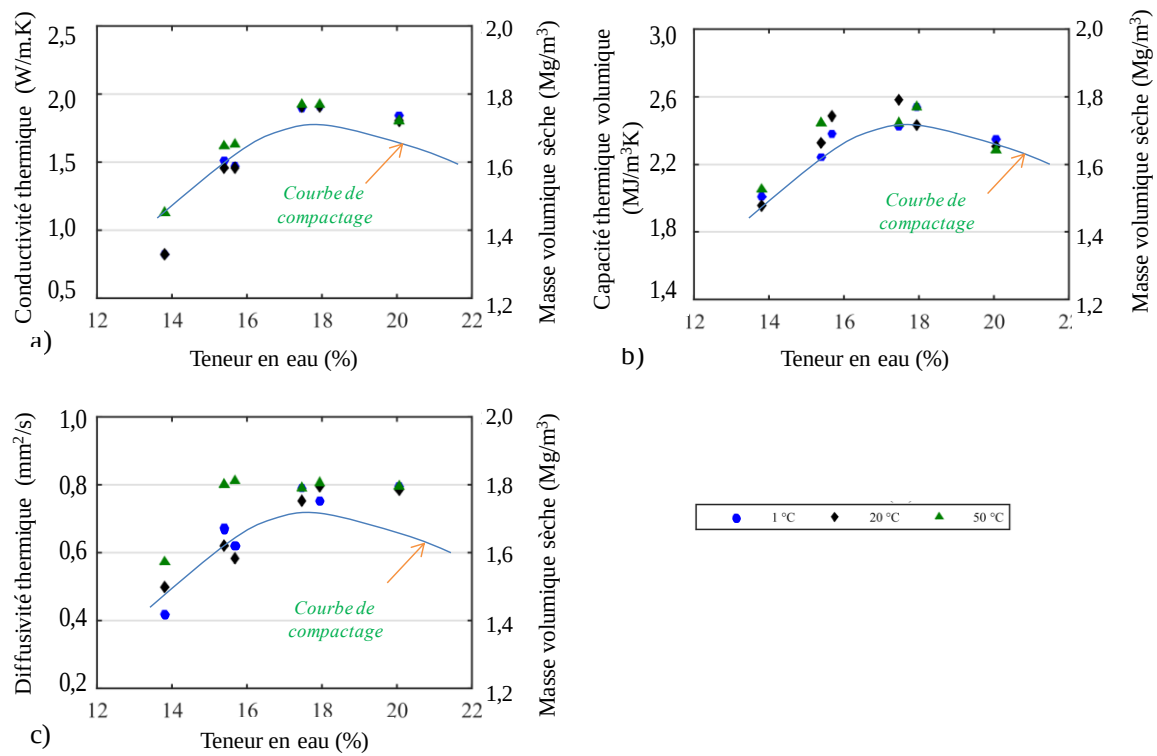


Figure 4. Conductivité thermique (a), capacité thermique volumique (b) et diffusivité thermique (c) mesurées à 1, 20 et 50 °C sur des éprouvettes confectionnées à partir d'un mélange de sable et de matériau illitique préparées le long de la courbe Proctor normal.

L'évolution globale de la capacité thermique volumique montre une augmentation de C_v avec l'augmentation de w (Figure 3b et Figure 4b). Sachant que la variation de la capacité thermique de l'eau avec la variation de température de 1 ° à 70 °C est de moins de 1%, il est assez logique que la température ait un faible effet sur ce paramètre. Les valeurs mesurées de la diffusivité thermique (D) pour le matériau illitique sont assez dispersées, en lien avec la faible amplitude de variation de ce paramètre. Pour le mélange sable-matériau illitique (Figure 4c), l'évolution de D est cohérente avec les évolutions de λ et C_v .

4. Conclusion

Dans la présente étude, 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. L'effet des propriétés de compactage sur les paramètres thermiques des sols compactés est étudié en réalisant des mesures au conductimètre thermique sur des éprouvettes préparées en différents points de la courbe Proctor normal. Cinq matériaux de granulométrie et minéralogies variées sont étudiés : un matériau illitique et trois limons du bassin parisiens étudiés seuls ou en mélange avec du sable.

Les résultats montrent que la conductivité thermique des matériaux augmente du côté sec de la courbe de compactage sous l'effet cumulé de l'augmentation de la teneur en eau et de la masse volumique sèche des éprouvettes. Une valeur maximale de la conductivité thermique est atteinte à proximité de l'optimum pour tous les matériaux étudiés. Du côté humide de la courbe de compactage, les évolutions divergent en fonction de la minéralogie du matériau. Les matériaux siliceux voient leur conductivité thermique diminuer tandis que pour les matériaux silicatés, λ reste quasiment à son niveau maximal. Cette différence d'évolution s'explique par les différences de conductivité thermique des minéraux constitutifs des matériaux.

Ainsi cette étude montre que, pour une énergie de compactage identique, la conductivité thermique des sols compactés évolue fortement en fonction de leur masse volumique sèche et de leur teneur en eau mais également de leur minéralogie. En revanche, la gamme de variation de la capacité thermique volumique est du même ordre de grandeur quel que soit le matériau étudié.

L'effet de la température sur les propriétés thermique est étudié dans un intervalle de 1° à 70°C pour des éprouvettes fabriquées à partir du matériau illitique seul ou en mélange avec du sable. Les résultats montrent une augmentation des propriétés thermiques en fonction de l'augmentation de la température particulièrement visible

pour les températures les plus importantes (40 ° à 70 °C). Cette évolution s'explique par l'augmentation de la conductivité thermique des composants et la dilatation des particules avec l'augmentation de la température, qui entraîne une augmentation du contact entre les particules. De plus, une augmentation plus importante est mesurée pour les éprouvettes compactées du côté sec de la courbe de compactage. Cette différence en fonction de la teneur en eau des matériaux peut s'expliquer par des mouvements de convection de la phase gazeuse plus ou moins chargée en humidité au sein du réseau poreux.

Les conclusions de cette étude montrent que la prise en compte de l'évolution de la température pour l'évaluation de la conductivité thermique des sols doit être intégrée dans les modèles prédictifs de comportement thermique des massifs, surtout lorsqu'il s'agit de massifs non saturés. Ces résultats, implémentés dans les modèles numériques, permettront d'optimiser l'utilisation de ces systèmes de stockage d'énergie thermique.

5. Remerciements

Les auteurs remercient C. Fontaine du laboratoire IC2MP (Poitiers, France) pour les analyses minéralogiques et la région Lorraine pour son soutien.

6. Références bibliographiques

- [AFN92] AFNOR NF P94-057 - Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation. Association Française de Normalisation, Paris, France, 1992, 17p.
- [AFN93] AFNOR NF P94-051 - Sols : reconnaissance et essais ; Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle- Limite de plasticité au rouleau. Association Française de Normalisation, Paris, France, 1993, 15p.
- [AFN94] AFNOR XP P 94-041 : Sols : Reconnaissance et Essais – Identification granulométrique – Méthode de tamisage par voie humide. Association Française de Normalisation, Paris, France, 1994, 12p.
- [AFN96] AFNOR NF P 94-048 : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la teneur en carbonate – Méthode du calcimètre. Association Française de Normalisation, Paris, France, 1996, 11p.
- [AFN99a] AFNOR NF EN 933-9 - Tests for geometrical properties of aggregates - Part 9 : Assessment of fines - Methylene blue test. Association Française de Normalisation, Paris, France, 1999, 12p.
- [AFN99b] AFNOR NF P94-093 - Sols : Reconnaissance et essais Détermination des références de compactage d'un matériau. Essai Proctor Normal-Essai Proctor Modifié. Ass. Française de Normalisation, Paris, France, 1999, 18p.
- [AFN09] AFNOR ISO 13320: Particle size analysis – Laser diffraction methods. Association française de normalisation, Paris, France, 2009, 60p.
- [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., Masrouri F., « Effet d'un traitement non traditionnel acide sur le comportement mécanique de trois limons », 20^e Congrès Français de Mécanique, 2011, 1–6.
- [BRA06] Brandl H., « Energy foundations and other thermo-active ground structures », *Géotechnique*, 56(2), 2006, 81–122.
- [BRI89] Brigaud F., Vasseur G., « Mineralogy, porosity and fluid control on thermal conductivity of sedimentary rocks », *Geophysical Journal International* 98/3, 1989, 525–542.
- [DEV87] De Vries D., « The theory of heat and moisture transfer in porous media revisited », *Int.J.Heat Mass Transfer*, 30(7), 1987, 1343-1350.
- [DON15] Dong Y., McCartney J.S., Lu N., « Critical Review of Thermal Conductivity Models for Unsaturated Soils », *Geotech Geol Eng.*, 2015, 15p.
- [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-Hydromécanique Des Sols Au Voisinage Des Geo-Structures Energetiques, Thèse de doctorat, université de lorraine, Nancy, 2014, 213p.
- [FAR82] Farouki O.T., Thermal properties of soils, North-Holland Publ. Co., 1982.
- [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.
- [GTR00] GTR. 2000. Réalisation des remblais et des couches de forme. Lab. Central des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- [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.
- [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.M., Effet de la température sur le comportement des barrières de confinement, Thèse doctorat, École des Ponts Paris Tech, Paris, 2005, 207p.