

ACCUTHER : UN STOCKAGE GÉOTHERMIQUE PILOTÉ DANS UN SOL RECONSTITUÉ ET STRUCTURÉ

ACCUTHER : MANAGED GEOTHERMAL STORAGE IN A STRUCTURED AND COMPACTED SOIL

Tangi LE BORGNE¹, Vincent HAMONET¹, Sébastien ROLLAND²

¹*Bouygues Travaux Publics, Guyancourt, France*

²*Bouygues Energies et Services, St Quentin-en-Yvelines, France*

RÉSUMÉ – AccuTherTM est un concept de stockage géothermique dans un ouvrage en terre. Un tel dispositif utilise les propriétés thermiques des sols compactés. Le limon de Plaisir compacté du côté humide de l'optimum Proctor a les meilleures capacités à stocker et à restituer de l'énergie thermique. L'ajout de kaolinite augmente la conductivité thermique du mélange alors que l'ajout de chaux la diminue.

ABSTRACT—AccuTherTM is a concept of geothermal storage in earthwork. This device uses the thermal properties of compacted soils. The silt of Plaisir, compacted on the wet side of the optimum Proctor, has the best capacity to store and restore thermal energy. The addition of kaolinite increases the thermal conductivity of the mixture while adding lime decreases it.

1. Introduction

Le concept AccuTherTM est né de la volonté d'utiliser des ouvrages de terrassement pour des fonctionnalités énergétiques. Utiliser les propriétés des matériaux constitutifs pour stocker de la chaleur s'est imposé comme présentant le meilleur potentiel, et les premières estimations thermiques ont montrées que le concept, à conditions égales, était technico économiquement assez proche mais plus efficient qu'un champ de sondes sèches verticales qui constitue le dispositif de référence en stockage inter saisonnier.

Un remblai, dans lequel est disposé judicieusement un ensemble 3D de canalisations, est parcouru par un fluide caloporteur, permettant d'échanger avec le sol de la chaleur (ou du froid).

Les performances et les dimensions de cet échangeur thermique sont fonctions des caractéristiques thermiques des matériaux et de la géométrie du champ de sondes.

Un système de pilotage de l'ensemble du dispositif, établi au moyen de simulations thermiques numériques, permet de répondre aux besoins thermiques du client, en termes de taux de couverture, de fréquence de stockage/déstockage.

Les études d'optimisation des performances et des dimensions d'un dispositif AccuTher passent par :

- L'obtention à partir des matériaux disponibles sur site des caractéristiques thermiques (capacité, conductivité et diffusivité) adaptés pour obtenir une structuration du remblai, afin de disposer de zones conductrices, stockeuses, ou isolantes thermiquement. Pour cela, on peut travailler sur les paramètres de mise en œuvre : densité, teneur en eau ou sur l'amélioration des matériaux par ajout d'adjuvant, tout en conservant des propriétés mécaniques satisfaisantes.

- La réalisation d'une simulation numérique de l'échangeur, pour optimiser :
 - La longueur de chaque boucle de l'échangeur
 - L'écartement entre chaque tuyau, dans les 3 dimensions
 - Le diamètre des tuyaux, la vitesse de circulation du fluide
 - la structuration et le volume de l'ouvrage.

Cette étude ne concernera que les caractéristiques thermiques des matériaux.

2. les propriétés thermiques des sols compactés

Les paramètres thermiques des sols caractérisant la capacité à stocker et à restituer de l'énergie thermique sont la conductivité thermique (λ), la diffusivité thermique (α), et la capacité thermique (C). La relation entre ces trois paramètres est donnée par :

$$\alpha = \frac{\lambda}{c} \quad (1)$$

Les caractéristiques thermiques d'un matériau dépendent des paramètres physiques du sol compacté. Certains auteurs ont par exemple étudié l'importance de la minéralogie pour les propriétés thermiques, le quartz aurait, en effet, une conductivité thermique et une diffusivité thermique plus élevées que les autres principaux constituant des sols (Farouki, 1981). La répartition des différentes phases dans un sol influe également sur les paramètres thermiques, lorsque la proportion de la phase gazeuse augmente dans le sol, les caractéristiques thermiques diminuent (Oschner et al., 2001). Enfin, plusieurs auteurs ont montré que la conductivité thermique ou la diffusivité thermique augmente avec les paramètres de mise en œuvre des sols, masse volumique sèche et teneur eau (Abu-Hamdeh, 2001 ; Tang, 2005 ; Brandl, 2006).

L'objectif de cette étude est de quantifier l'effet des paramètres de mise en œuvre et l'effet de traitement sur les paramètres thermiques d'un sol compacté.

3. Caractérisation du sol employé

Dans cette étude, le matériau utilisé est un limon dénommé « limon de Plaisir » provenant de l'ouest du bassin parisien.

Les caractéristiques du limon de Plaisir sont données dans le tableau 1, ainsi que la courbe granulométrique (figure 1). Ce matériau est un limon peu argileux, classé A1 selon la norme NF P11-300 (1992).

Tableau 1. Caractéristiques du limon de Plaisir

Dmax (mm)	Passant à 2mm (%)	Passant à 80 μ m (%)	Passant à 2 μ m (%)	VBS
5	99,5	35,1	16,3	1,7

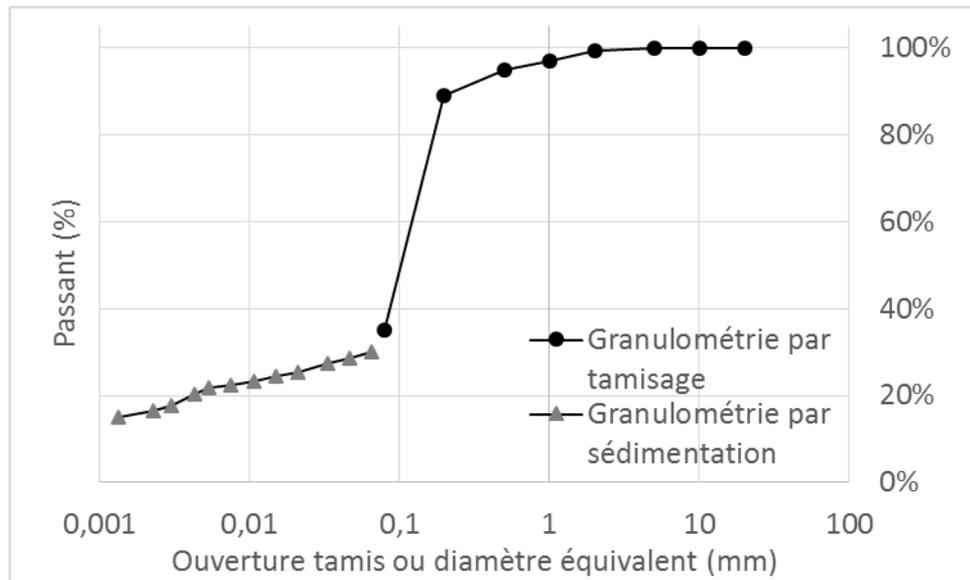


Figure 1. Courbes granulométriques du limon de Plaisir

Les teneurs en eau optimales et les masses volumiques sèches maximales du limon de Plaisir naturel ou traité ont été déterminées à partir de l'essai Proctor normal. La courbe de compactage du limon de Plaisir, ainsi que les indices de portance immédiats (IPI) en fonction de la teneur en eau sont donnés dans la figure 2. La teneur en eau optimale est de 14,3% et la masse volumique sèche maximale est de $1,80 \text{ Mg.m}^{-3}$.

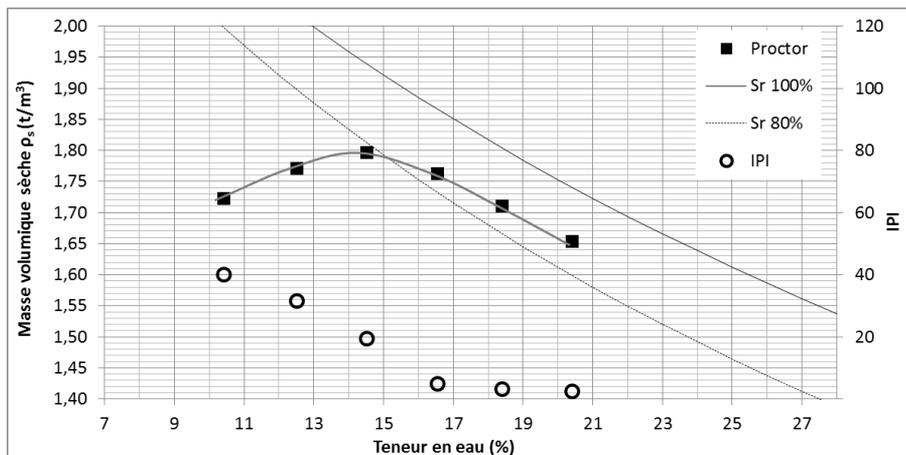


Figure 2. Courbes de compactage et d'indice de portance immédiat du limon de Plaisir

Les références de compactage du limon traité à la chaux et traité à la kaolinite sont données dans le tableau 2. Elles ont été obtenues par la réalisation d'essai Proctor normal.

Tableau 2. Références de compactage du limon traité

Matériaux	Teneur en eau optimale (%)	Masse volumique sèche maximale (Mg.m^{-3})
Limon de Plaisir + 3% CaO	16,9	1,72
Limon de Plaisir + 3% kaolinite	14,6	1,82

4. Essais mis en œuvre

Dans cette étude, les paramètres thermiques mesurés sont la conductivité thermique et la diffusivité thermique.

4.1. Mesure de la conductivité thermique

La conductivité thermique λ est la quantité de chaleur par unité de temps passant à travers une section de sol sous un gradient de température unitaire appliqué dans la direction de ce flux de chaleur. Elle est exprimée en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Dans cette étude, la conductivité thermique est mesurée par la technique du fil chaud. Cette méthode de mesure en régime quasi-établi est fondée sur la détermination de l'élévation de la température en fonction du temps d'une source thermique linéaire encastrée entre deux éprouvettes de mêmes caractéristiques. Une sonde fil (figure 3) a été utilisée pour mesurer la conductivité thermique, cette sonde possède une plage de mesure comprise entre $0,02$ à $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Pour chaque couple d'éprouvette, dix mesures de conductivité thermique ont été réalisées.

4.2. Mesure de la diffusivité thermique

La diffusivité thermique α caractérise l'aptitude d'un matériau à transmettre la chaleur. α est exprimée en $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$. Une valeur élevée de la diffusivité implique une aptitude à des changements de température rapides et importants.

Dans cette étude, la diffusivité thermique est mesurée par la technique de l'anneau chaud. Une sonde anneau (figure 4) a été utilisée pour mesurer la conductivité thermique, cette sonde possède une plage de mesure comprise entre $1\cdot 10^{-7}$ à $1\cdot 10^{-4} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$. Pour chaque couple d'éprouvette, dix mesures de diffusivité thermique ont été réalisées.



Figure 3. Sonde fil

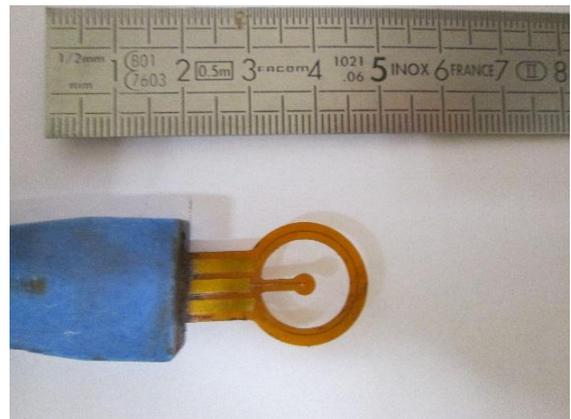


Figure 4. Sonde anneau

5. Résultats expérimentaux

La conductivité thermique et la diffusivité thermique ont été déterminées pour le limon de Plaisir naturel et traité à la kaolinite ou à la chaux compacté à différente teneur en eau, différente masse volumique et différent dosage.

5.1. Influence des paramètres de mise en œuvre

Les valeurs de conductivité thermique et de diffusivité thermique du limon de plaisir naturel sont présentées dans la figure 5. Pour des éprouvettes compactées à la masse volumique sèche maximale et à la teneur en eau optimale, la conductivité thermique moyenne est de $2,45 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et la diffusivité thermique moyenne est de $9,8.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$.

Pour un taux de compactage donné, la conductivité thermique moyenne augmente quand la teneur en eau augmente, alors que la diffusivité reste stable.

Lorsque le taux de compactage des éprouvettes diminue à 95% de la masse volumique sèche optimale, la conductivité thermique diminue alors que la diffusivité reste stable.

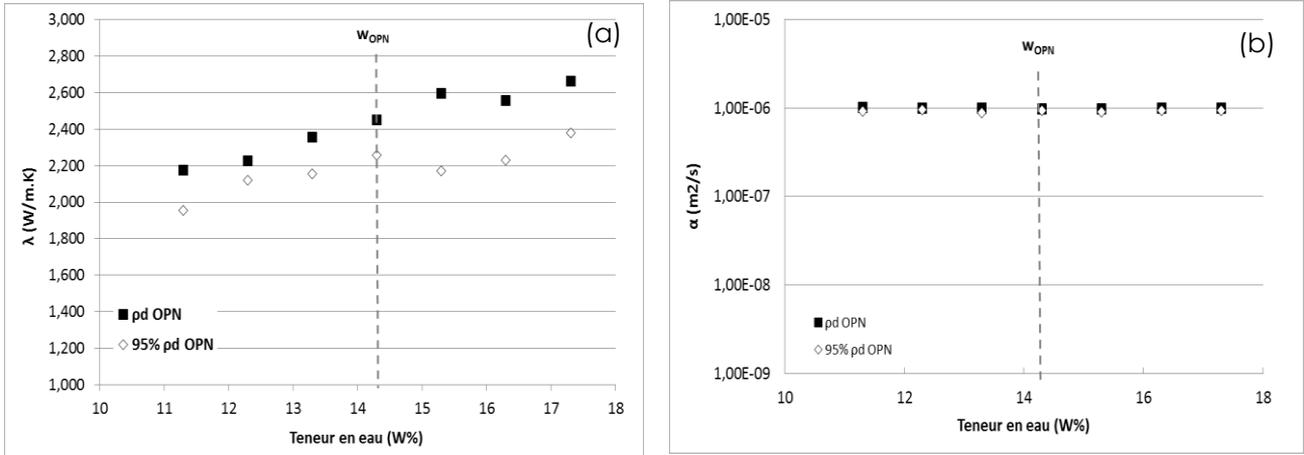


Figure 5. Conductivité thermique (a) et diffusivité thermique (b) en fonction de la teneur en eau du limon de Plaisir naturel

5.2. Influence d'un traitement à la kaolinite

Les valeurs de conductivité thermique et de diffusivité thermique du limon de plaisir naturel et traité à 3% de kaolinite sont présentées dans la figure 6. Pour des éprouvettes de limon traité à 3% de kaolinite et compactées à la masse volumique sèche maximale et à la teneur en eau optimale, la conductivité thermique moyenne est de $2,77 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et la diffusivité thermique moyenne est de $1,0.10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$.

Le matériau traité à la kaolinite possède une conductivité thermique 13% plus forte par rapport au matériau naturel. La diffusivité reste stable malgré l'ajout de kaolinite.

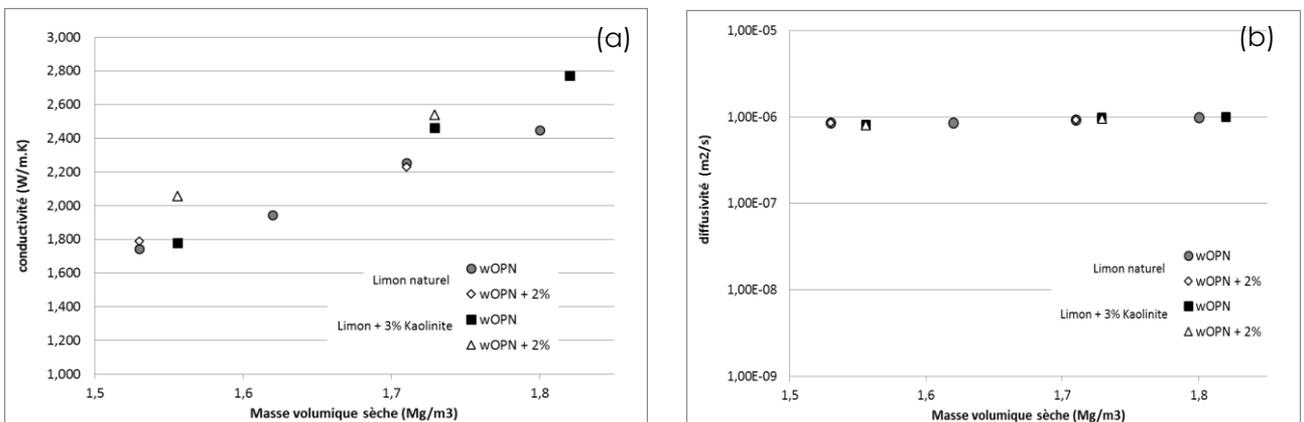


Figure 6. Conductivité thermique (a) et diffusivité thermique (b) en fonction de la masse volumique sèche du limon de Plaisir naturel et traité à 3% de kaolinite

5.3. Influence du dosage en kaolinite

Les valeurs de conductivité thermique et de diffusivité thermique du limon de plaisir traité à 1%, 3% et 5% de kaolinite sont présentées dans la figure 7. Pour des éprouvettes de limon traité à 1% de kaolinite et compactées à la masse volumique sèche maximale et à la teneur en eau optimale, la conductivité thermique moyenne est de $2,61 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et la diffusivité thermique moyenne est de $1,0.10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, pour le limon traité à 5% de kaolinite, la conductivité thermique moyenne est de $2,83 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et la diffusivité thermique moyenne est de $8,9.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$

L'augmentation du dosage de kaolinite améliore la conductivité thermique : pour le limon traité à 1% de kaolinite de 6,5%, pour le limon traité à 3% de kaolinite de 13% et pour le limon traité à 5% de kaolinite de 15,5% par rapport au matériau naturel. La diffusivité reste stable malgré l'augmentation du dosage en kaolinite.

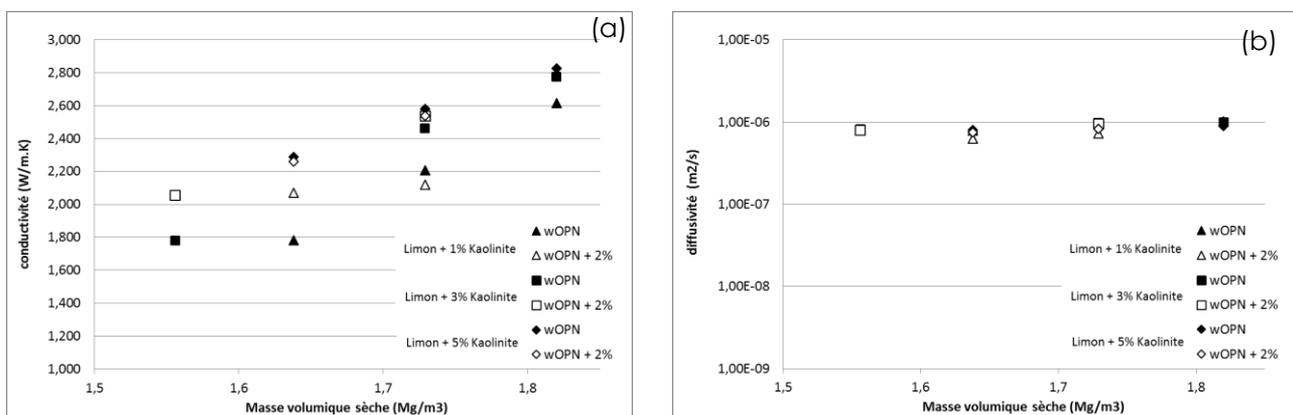


Figure 7. Conductivité thermique (a) et diffusivité thermique (b) en fonction de la masse volumique sèche du limon de Plaisir traité à différents dosages de kaolinite

5.4. Influence d'un traitement à la chaux vive

Les valeurs de conductivité thermique et de diffusivité thermique du limon de plaisir naturel et traité à 3% de chaux vive sont présentées dans la figure 8. Pour des éprouvettes de limon traité à 3% de chaux vive et compactées à la masse volumique sèche maximale et à la teneur en eau optimale, la conductivité thermique moyenne est de $2,21 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et la diffusivité thermique moyenne est de $8,7.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$.

Le limon traité à la chaux vive possède une conductivité thermique 10% plus faible par rapport au matériau naturel. La diffusivité reste stable malgré l'ajout de chaux vive.

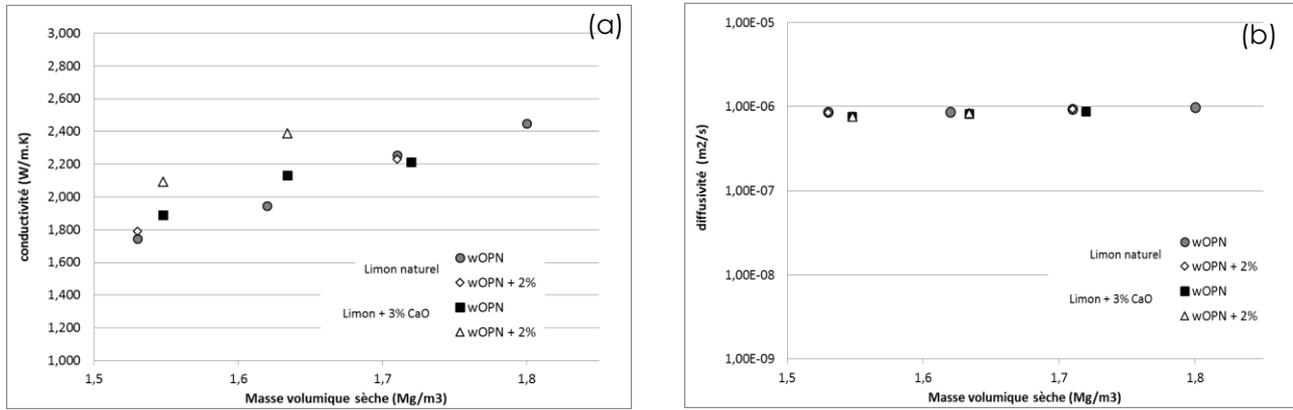


Figure 8. Conductivité thermique (a) et diffusivité thermique (b) en fonction de la masse volumique sèche du limon de Plaisir naturel et traité à 3% de chaux vive.

5.5. Influence du temps de cure

Les valeurs de conductivité thermique et de diffusivité thermique du limon de plaisir traité à 3% de chaux vive pour différents temps de cure sont présentées dans la figure 9. Pour un temps de cure de 14 jours, la conductivité thermique moyenne est de $2,18 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et la diffusivité thermique moyenne est de $9,2.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, pour un temps de cure de 28 jours, la conductivité thermique moyenne est de $2,23 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et la diffusivité thermique moyenne est de $8,8.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$.

L'augmentation du temps de cure ne modifie pas la conductivité thermique et la diffusivité thermique du matériau traité à la chaux vive.

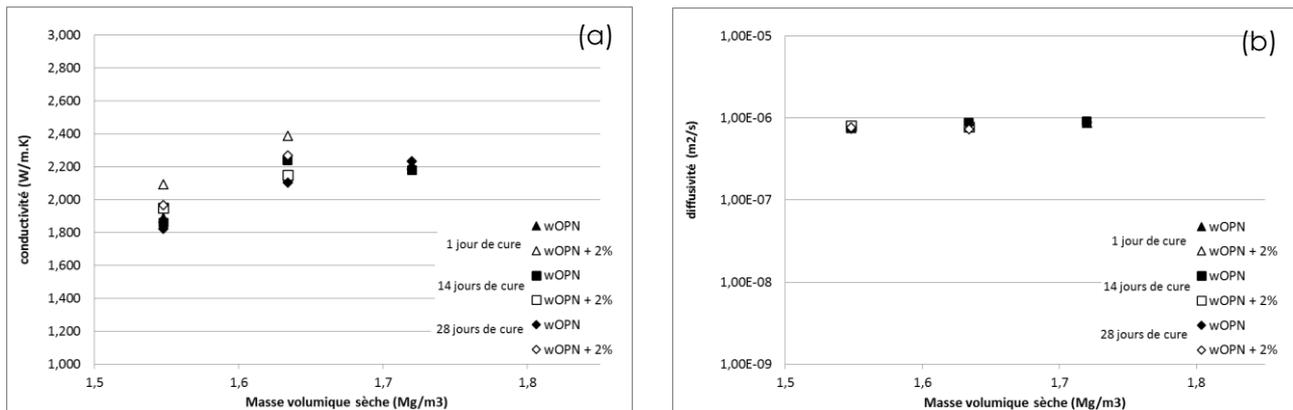


Figure 9. Conductivité thermique (a) et diffusivité thermique (b) en fonction de la masse volumique sèche du limon de Plaisir traité à 3% de chaux vive pour différents temps de cure.

6. Conclusions et Discussions

L'objectif de cette étude est de quantifier l'effet des paramètres de mise en œuvre et l'effet de traitement sur les paramètres thermiques d'un sol compacté.

Pour une masse volumique donnée, la conductivité thermique du limon de Plaisir est plus forte du côté humide et pour une même teneur en eau, la conductivité thermique du limon de Plaisir est plus faible pour une masse volumique plus faible. Pour les teneurs en

eau et masses volumiques testées dans cette étude, la diffusivité thermique n'a pas varié de façon significative.

L'ajout de kaolinite au limon de Plaisir augmente la masse volumique maximale du mélange, cet ajout augmente également la conductivité thermique par contre la diffusivité ne varie pas de façon significative. L'ajout de chaux vive au limon de Plaisir diminue la masse volumique maximale du mélange, l'ajout de chaux vive diminue également la conductivité thermique alors que la diffusivité thermique ne varie pas de façon significative.

Le limon de Plaisir traité à la kaolinite et compacté du côté humide de l'optimum Proctor a les meilleures capacités à stocker et à restituer de l'énergie thermique.

7. Références

- 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. doi:10.1006/jaer.2001.0730
- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81–122. doi:10.1680/geot.2006.56.2.81
- Tang, A. M. (2005). *Effet de la température sur le comportement des barrières de confinement*. Thèse doctorat, École des Ponts Paris Tech, Paris, p207.
- Farouki (1981). Thermal properties of soils. Cold Regions Research and Engineering laboratory, USA corps of engineers, Hanover, USA.
- Ochsner T.E., Horton R. and Ren T.(2001). A new perspective on soil thermal properties. Soil science society of America journal, vol. 65, pp1641–1647