

ÉVALUATION DES PERFORMANCES DES GÉOTEXTILES NON-TISSÉS-AIGUILLETÉS POUR L'ISOLATION THERMIQUE DES GÉOSTRUCTURES ÉNERGÉTIQUES

ASSESSMENT OF THE PERFORMANCES OF NONWOVEN NEEDLE-PUNCHED GEOTEXTILES TO THERMALLY INSULATE ENERGY GEOSTRUCTURES

Mojdeh LAHOORI ¹, Guillaume STOLTZ ², Sandrine ROSIN-PAUMIER ¹, Yves JANNOT ¹
1 Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54500 Nancy, France

2 Irstea Aix-En-Provence, 3275 Route Cézanne, CS 40061 13182 Aix-en-Provence, France

RÉSUMÉ – Les géostructures énergétiques sont des ouvrages (fondations profondes, murs armés, remblais, etc.) où le massif de sol est utilisé alternativement comme réservoir/puits de chaleur. Les échanges de chaleur se font grâce à des échangeurs thermiques inclus directement dans le massif de sol (remblai par exemple) ou dans des éléments de structures (pieux par exemple). La présente étude a pour objet l'étude des performances de géotextiles non-tissés-aiguilletés pour l'isolation thermique de remblais équipés pour le stockage de chaleur. Quatre produits d'épaisseurs et type de fibres variables (vierges ou recyclées) ont été testés par différentes méthodes d'évaluation (en régime variable ou continu) de la conductivité thermique. L'influence de la contrainte normale de compression et de l'état hydrique des produits sur la conductivité thermique a été investiguée. Enfin, des mesures de conductivité thermique d'un géotextile en contact d'un sol de type limon compacté ont également été réalisées.

Mots-clés : Géosynthétiques, isolation thermique, géostructures énergétiques, conductivité thermique, transfert d'eau.

ABSTRACT – Energy geostructures are earthworks (deep foundations, reinforced walls, embankments, etc.) where soil is used alternatively as heat reservoir and heat well. Heat exchanges occur thanks to heat exchanger directly included in the soil mass (backfill for example) or in structural elements (deep foundation for example). This study aims to study the performances of nonwoven needle-punched geotextiles to thermally insulate backfills equipped for heat storage. The thermal conductivity of four products with various thickness and type of fibers (virgin or recycled) were tested by two assessment methods (steady-state or variable flow regimes). The effect on thermal conductivity of normal stress and moisture content of tested specimens were also investigated. Lastly, some measurements of thermal conductivity of a geotextile directly in contact with a compacted loam were performed.

Keywords: geosynthetic, thermal insulation, energy geostructures, thermal conductivity, water migration.

1. Introduction

Face à une population mondiale croissante et à une demande en énergie qui suit la même tendance, l'utilisation des énergies renouvelables, dont le solaire fait partie, constituent des sources à développer. Le principal frein à l'essor de cette énergie verte est lié au caractère fluctuant de la ressource. Ainsi, le stockage de l'énergie solaire dans les massifs de types sols ou rocheux est un sujet actuel d'intérêt car il permettrait d'accroître les possibilités d'utilisation de cette ressource (Stojanović et Akander, 2010). La technique de stockage de chaleur a fait l'objet de développements ces dernières années et peut s'envisager maintenant comme application pratique (Jradi et al., 2017). Parmi les différentes méthodes pour stocker la chaleur (Abedin et Rosen, 2011), l'une d'elles consiste à stocker la chaleur dans un solide ou un liquide, sans changement de phase (Cao, 2010). Le stockage peut être saisonnier, dans ce cas la chaleur est stockée en été et utilisée en hiver. Il est possible de stocker de la chaleur dans un massif de sol par l'intermédiaire d'un forage (Gao et al., 2015) ou d'un remblai, dans lequel est inséré un réseau tubulaire contenant le fluide caloporteur (Figures 1a et 1b).

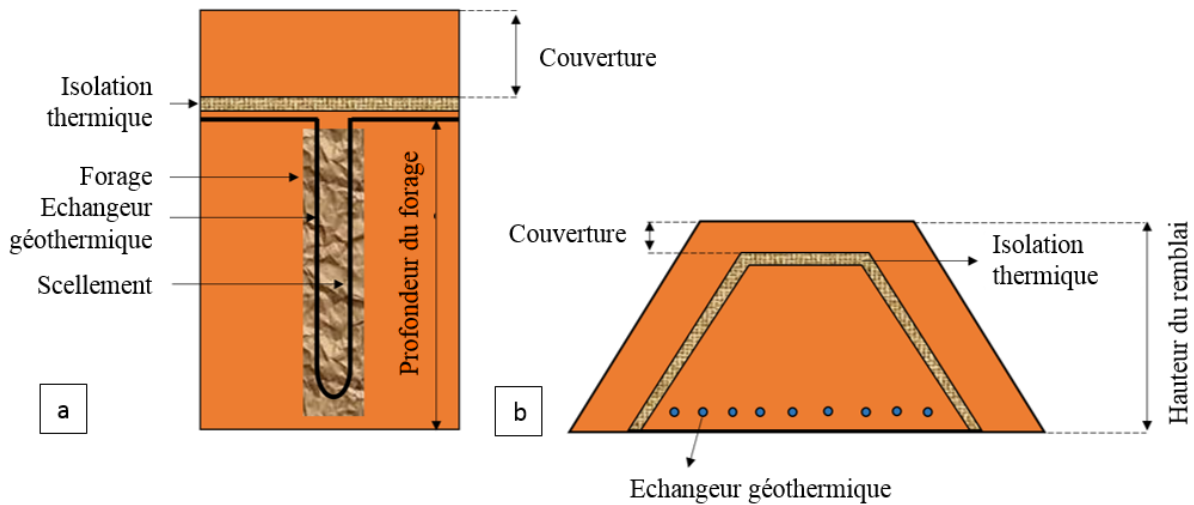


Figure 1. Schéma de principe d'un système échangeur de chaleur intégré dans un forage ainsi qu'un remblai.

Un remblai est un ouvrage constitué de sol compacté en couches superposées (Hilf, 1991). Il est généralement utilisé dans des projets routiers ou ferroviaires mais peut également être mis en œuvre à la base d'un immeuble. Dans un remblai, l'insertion du réseau d'échangeur thermique est simple car réalisé au fur et à mesure de la construction de l'ouvrage. Ce mode de stockage de chaleur, déjà mis en œuvre à titre expérimental (Jradi et al., 2017), est appelé à se développer dans les prochaines années.

D'autres études ont montré la possibilité de stocker de la chaleur sur des périodes relativement courtes (quelques semaines), pour utiliser cette chaleur sur une période de temps relativement équivalente. Pour optimiser cette technique, un des problèmes principaux consiste à maîtriser les pertes de chaleur durant la période de stockage, c'est-à-dire l'intersaison (l'automne), dans le cas d'un stockage saisonnier (Fantucci et al., 2015). Dans la littérature, différentes solutions d'isolation sont proposées pour limiter les pertes de chaleur, comme les laines et mousses utilisées autour de cuves d'eau utilisées pour stocker la chaleur (Schmidt et al., 2003, Baetens et al., 2010 ; Al Homoud, 2005). Mais dans le cas de remblais de stockages géothermiques, étant donné les grandes surfaces à recouvrir, les contraintes sont différentes : le matériau d'isolation doit être fin, économique, facile à mettre en œuvre et résistant aux effets de la compression sur les propriétés d'isolation thermique (Figure 1b).

Dans cette application d'isolation thermique, les géosynthétiques et plus précisément des géotextiles non tissés aiguilletés, pourraient être des matériaux de choix. Au regard des fonctions classiques de ces produits définies dans la norme NF EN ISO 10318 (AFNOR, 2015), cette fonction d'isolation thermique est nouvelle.

Pour évaluer la performance de géotextiles non tissés aiguilletés en tant qu'isolant thermique, les propriétés thermiques de ces matériaux doivent être mesurées. Les méthodes de mesures de la conductivité thermique sont classées selon deux grands types de méthodes : en régime permanent et en régime variable (Vieira et al., 2017). Les méthodes actuellement utilisées pour mesurer la conductivité thermique de matériaux isolants sont nombreuses (He, 2005 ; Coquard et al., 2006 ; Bolatürk, 2006 ; Gustafsson, 1987 ; Singh and Bouazza, 2013). Parmi les méthodes en régime permanent, la méthode de la plaque chaude est généralement utilisée pour mesurer la conductivité thermique d'un matériau plat et homogène, tout en permettant une répétabilité et une reproductibilité satisfaisante (Al-Ajlan, 2006 ; Ali et al. 2016 ; Jannot et al., 2016).

Peu de mesures sur la conductivité thermique des géosynthétiques, et plus spécifiquement sur les géotextiles non tissés aiguilletés sont disponibles dans la bibliographie. Singh and Bouazza (2013) ont réalisé une campagne expérimentale destinée à mesurer la conductivité thermique de géotextiles non tissés aiguilletés, de géosynthétiques bentonitiques et de géomembranes en PEHD. Selon leurs mesures, la conductivité thermique des géotextiles non tissés en polyester se situe entre 0,07 et 0,83 W/mK, valeurs qui dépendent de la teneur en eau, du temps d'immersion dans l'eau et du traitement de surface appliqué aux produits. Les géotextiles non-tissés présentent une conductivité thermique plus faible en raison de leur caractère hydrophobe. Ces valeurs permettent d'envisager l'utilisation des géotextiles non tissés comme matériaux isolants mais l'impact de la contrainte de compression sur leurs performances techniques reste un sujet à traiter.

L'objectif de cette étude est d'évaluer la performance de géotextiles non tissés aiguilletés (4 produits testés) en tant que produits d'isolation thermique dans un remblai utilisé comme stockage de chaleur saisonnier. Trois interactions ont été considérées : l'influence de la contrainte de compression, l'influence de la variation de la teneur en eau et enfin les effets d'interaction thermique entre le sol et le géotextile.

2. Matériels et méthodes

2.1. Propriétés du sol

Le sol utilisé dans cette étude est un limon, nommé limon Plaisir, extrait du bassin parisien. Avant toute utilisation en laboratoire, il a été tamisé au tamis 2 mm après avoir été séché puis broyé. Une caractérisation complète de ce matériau est donnée dans la thèse de Boukélia (2017). Concernant ses propriétés de compactage, mesurées sur la base de l'essai Proctor normal, ce sol présente une masse volumique sèche maximale de 1,8 Mg/m³ obtenue à une teneur en eau optimale de 16,1 %. Ce sol est classé comme A1 selon le GTR (2000). Dans la suite, les mesures thermiques ont été réalisées à l'optimum Proctor.

2.2. Propriétés des géotextiles

Quatre types de géotextiles non tissés aiguilletés ont été testés dans cette étude avec notamment des fibres recyclées (géotextiles R1 et R2) et des fibres vierges (V1 et V2). Ces produits ont des épaisseurs et masses surfaciques différentes et l'ensemble de ces propriétés sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1. Propriétés de géotextiles non tissés aiguilletés.

Ref.	Type de fibres	Épaisseur (10 ⁻³ m)			Masse surfacique (g.m ⁻²)	Masse volumique à 2 kPa (kg.m ³)
		à 2 kPa	à 20 kPa	à 200 kPa		
R1	Recyclées	3,670 ±0,110	3,000 ±0,212	1,817 ±0,100	382,1 ±19,9	104,1 ±0,1
R2	Recyclées	7,113 ±0,408	5,903 ±0,346	3,692 ±0,308	883,4 ±67,7	124,2 ±0,1
V1	Vierges	7,940 ±0,141	7,091 ±0,154	5,396 ±0,269	1207,6 ±61,7	152,1 ±0,2
V2	Vierges	6,824 ±0,118	6,082 ±0,130	3,851 ±0,110	825,6 ±28,2	121,0 ±0,1

2.3. Propriétés thermiques

2.3.1. Fil chaud (méthode transitoire)

La conductivité thermique du limon a été mesurée selon la méthode du fil chaud (sonde KD2 Pro, voir Figure 2). Pour cela, le limon a été compacté en 3 couches dans un moule Proctor, l'éprouvette a été démoulée avant de réaliser la mesure (Figure 2).



Figure 2. a) Sol (Limon Plaisir) compacté dans un moule Proctor, b) Mesure de la conductivité thermique par la technique du fil chauffant.

2.3.2. Plaque chaude (méthode en régime permanent)

Ce dispositif (Figure 3 et Figure 4) a été utilisé pour mesurer la conductivité d'un géotextile seul ou en contact avec un sol. Il consiste en une résistance électrique positionnée entre deux éprouvettes identiques de dimension surfacique $0,01 \times 0,01 \text{ m}^2$. De part et d'autre de cet assemblage, deux plaques en aluminium sont maintenues à la température de 15°C grâce à un système de circulation d'eau. L'ensemble est placé dans une enceinte thermo-régulée à 23°C . Ce dispositif permet de mesurer la conductivité thermique d'un matériau d'épaisseur relativement fine. Les équations utilisées sont décrites et expliquées dans Jannot et al. (2016).

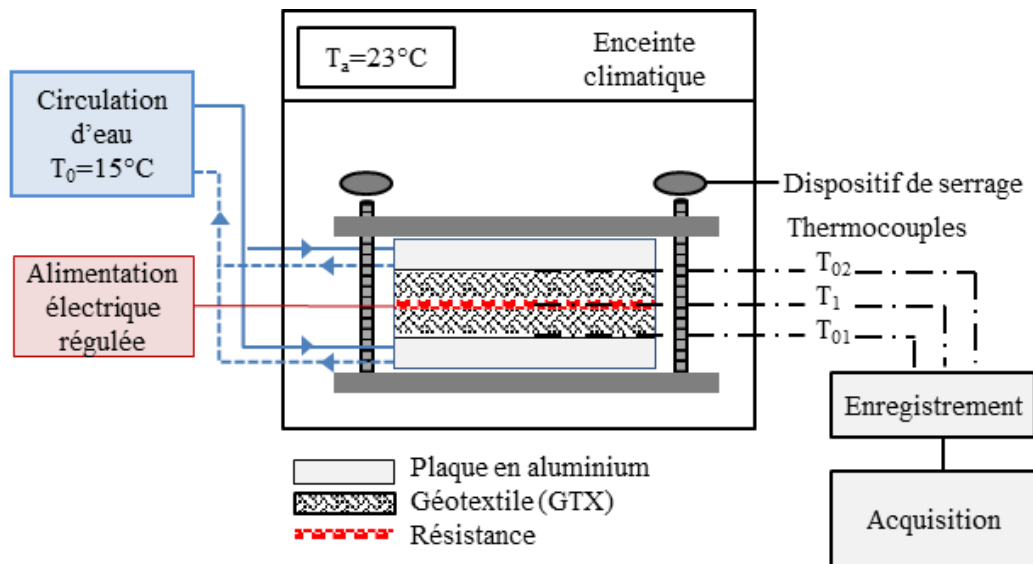


Figure 3. Schéma du dispositif de mesure de la conductivité thermique par la méthode de la plaque chaude où T_1 est la température de l'élément chauffant, T_{01} et T_{02} les températures des plaques d'aluminium et T_a la température de l'air.

Avec le dispositif présenté ci-dessus, en plus de la mesure de la conductivité thermique des 4 géotextiles sélectionnés pour cette étude, la conductivité thermique du limon compacté a été mesurée. Pour cela, le limon compacté est enveloppé dans un film plastique pour éviter le séchage durant la mesure. De même, lors de la mesure de la conductivité thermique du limon au contact d'un géotextile, l'assemblage a été enveloppé dans un film plastique pour favoriser un contact direct entre les deux éléments tout en évitant les pertes d'eau. Enfin, les conductivités thermiques de géotextiles humides ont été mesurées.

2.4. Essai de compression

Pour mettre en correspondance l'épaisseur d'un géotextile avec la contrainte de compression appliquée, des essais de compression (à vitesse de déplacement imposé de $1,08 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) ont été menés sur chaque géotextile jusqu'à une contrainte de 140 kPa .

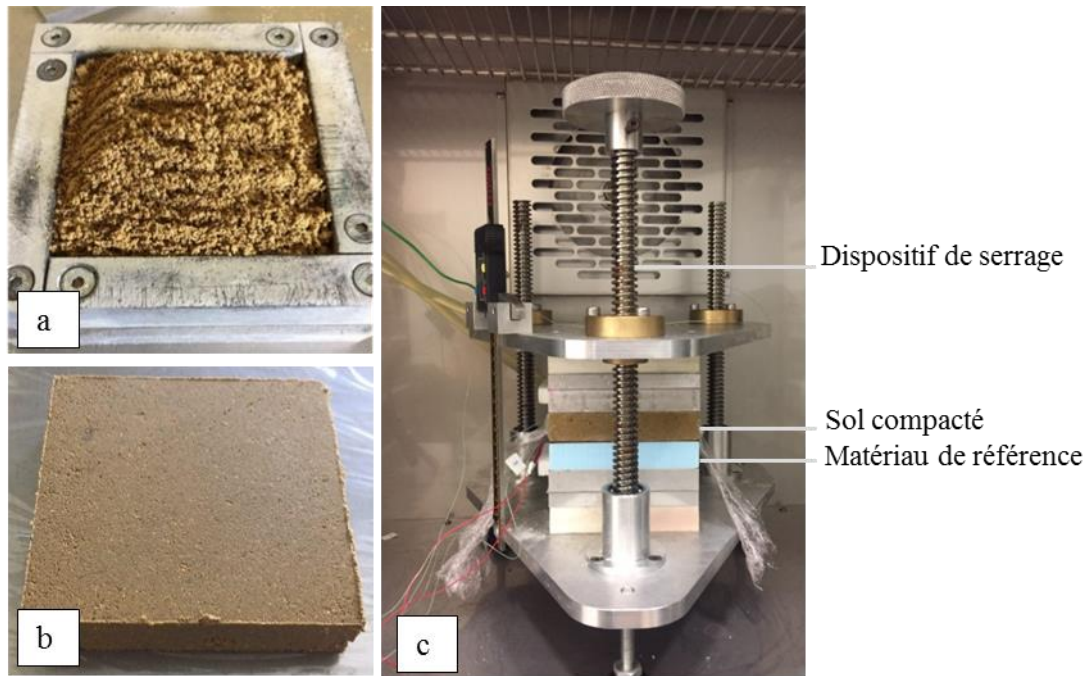


Figure 4. a) Moule de compactage du limon pour l'utilisation de la méthode par plaque chaude b) éprouvette de sol compactée c) dispositif de mesure thermique par plaque chaude.

3. Résultats

3.1. Conductivité thermique du sol

La conductivité thermique du limon compacté, mesurée avec la méthode du fil chaud est de $2,54 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ tandis qu'avec la méthode de la plaque chaude, la conductivité thermique atteint seulement $2,05 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. La différence entre les deux valeurs provient de la différence dans la durée de l'essai. L'essai au fil chaud est un essai court (15 minutes) tandis que l'essai à la plaque chaude est un essai long (48 à 144 heures). Ainsi, lors de l'essai court, la chaleur est transmise à la fois par le matériau et la vapeur d'eau. Dans le cas de l'essai long, le matériau est à l'équilibre, la vapeur d'eau initialement présente s'est condensée et ne participe donc pas à la transmission de la chaleur.

3.2. Variation de la conductivité thermique des géotextiles avec l'épaisseur et la contrainte

Les conductivités thermiques des quatre géotextiles testés ont été mesurées en fonction de leur épaisseur avec la méthode de type plaque chaude. L'épaisseur du géotextile R1 était trop faible être mesurée sur une éprouvette seule ; la mesure a ainsi été réalisée sur 3 éprouvettes superposées. Les résultats sont représentés sur la Figure 5.

La Figure 5 montre de manière générale que la compression des géotextiles conduit à une hausse de leur conductivité thermique. Cette observation s'explique par l'augmentation de densité des produits induit par la compression croissante. Pour les premiers paliers de compression, il apparaît que la relation entre la conductivité thermique et l'épaisseur est pratiquement linéaire. Il existe une épaisseur limite seuil en dessous de laquelle la conductivité thermique augmente fortement, cette évolution est particulièrement visible pour le géotextile R2.

Dans le cas d'un dimensionnement dans un ouvrage, les réductions d'épaisseurs des géotextiles sont induites par l'effet d'une contrainte normale de compression. Ainsi, le niveau de contrainte dans l'ouvrage est une condition essentielle vis-à-vis du dimensionnement du géotextile en tant qu'isolant thermique. Les essais de compression décrits au § 2.4 ont permis de déterminer la relation entre la contrainte de compression et l'épaisseur pour les quatre produits testés. En utilisant cette relation, les résultats de la Figure 5 ont pu être tracés en représentant la conductivité thermique en fonction de la contrainte normale sur la Figure 6. Il est à noter que cette représentation ne prend pas en considération le fluage en compression des produits, puisque les essais de compression ont été menés sur le court terme. À partir de la Figure 6, il peut être conclu que la variation de la conductivité thermique en fonction

de la contrainte de compression est spécifique à chaque produit et ne présente pas une tendance particulière (linéaire, etc.).

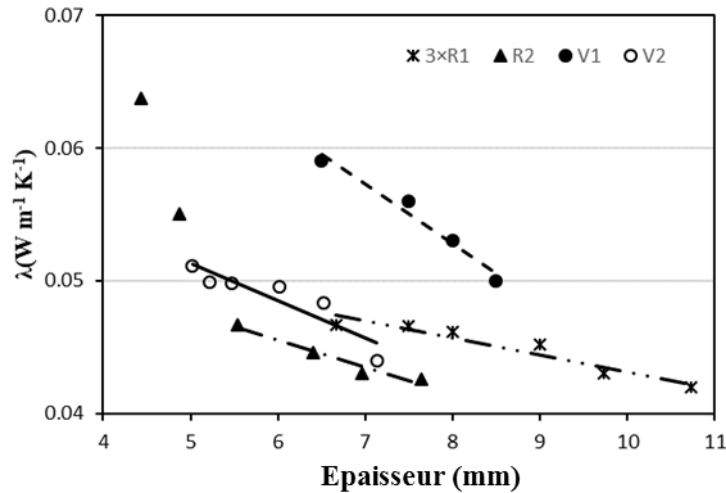


Figure 5. Conductivité thermique des géotextiles en fonction de l'épaisseur des géotextiles testés.

Sur la Figure 6, le trait rouge indique une contrainte verticale de 8 kPa, qui correspondrait à la contrainte appliquée par une couche de matériau de 40cm d'épaisseur disposée au-dessus d'un remblai stockage de chaleur (Figure 1a). Sous cette contrainte, le géotextile V1, le plus épais et de plus forte masse surfacique, est le produit qui présente la conductivité thermique la plus élevée tandis que le géotextile R2 présente la conductivité thermique la plus faible.

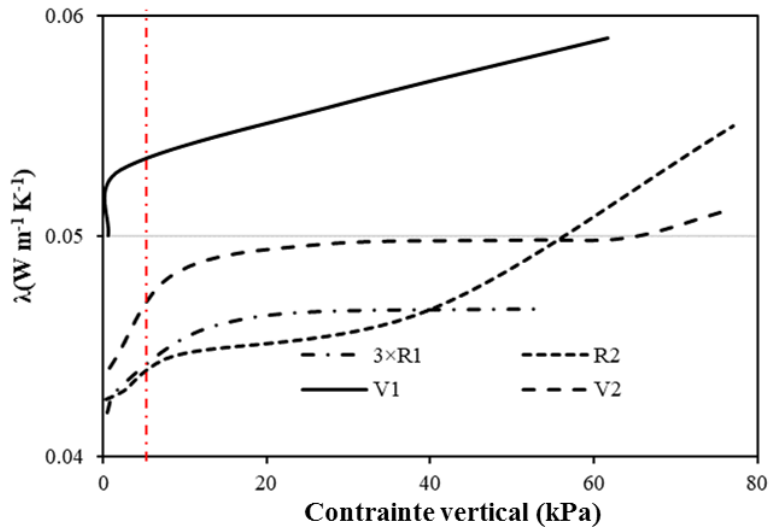


Figure 6. Conductivité thermique des géotextiles en fonction de la contrainte normale appliquée sur les géotextiles testés.

Cependant, ce critère n'est pas suffisant pour juger de l'efficacité du produit. En effet, sous 8 kPa de contrainte normale, les épaisseurs des produits sont différentes. Pour prendre en compte cette différence, le critère à considérer est la résistance thermique, c'est à dire le rapport entre l'épaisseur du matériau et sa conductivité thermique. La Figure 7 représente l'évolution de la résistance thermique des géosynthétiques en fonction de la contrainte normale appliquée. Selon cette représentation, ce sont les trois couches de géotextile R1 qui présentent la plus forte résistance thermique mais ce type de configuration n'est pas réaliste sur site. Au final, les trois géotextiles R2, V1 et V2 offrent une résistance thermique pratiquement égale pour la contrainte de 8 kPa. Ainsi, le géotextile R2 étant le plus économique des trois, il semble être le plus adapté (techniquement et économiquement) pour cette application d'isolant thermique sur le pourtour d'un remblai utilisé comme stockage de chaleur. C'est à partir de ce géotextile que les interactions thermiques avec le sol ont été caractérisées.

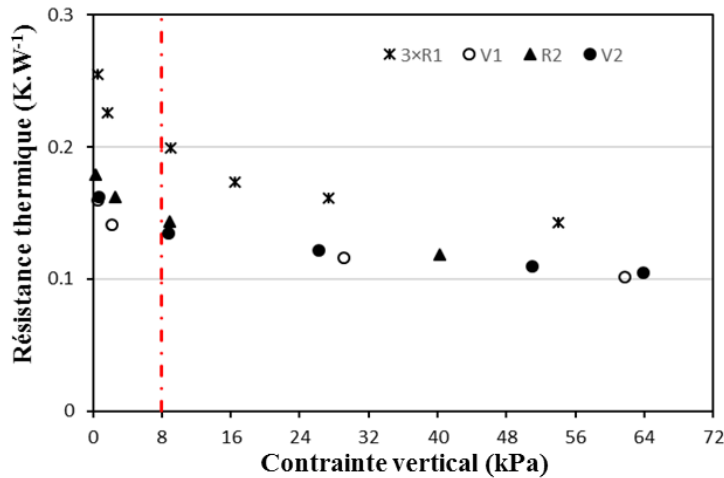


Figure 7. Résistivité thermique des géotextiles testés calculée en fonction de la contrainte normale appliquée sur les géotextiles.

3.3. Conductivité thermique du système sol - géotextile

Dans cette partie, les interactions thermiques entre le limon compacté et le géotextile R2 ont été évaluées. Le tableau 2 rappelle en ligne 1 et 2 les valeurs obtenues pour le limon et le GTX R2 seuls. La conductivité thermique de ces deux matériaux associés est théoriquement de $0.15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ selon l'équation 1.

$$\lambda = \frac{e(\text{sol} + R_2)}{\frac{e(\text{sol})}{\lambda(\text{sol})} + \frac{e(R_2)}{\lambda(R_2)}} \quad (1)$$

où $e(\text{sol})$ et $e(R_2)$ sont les épaisseurs du limon et du GTX (m) tandis que $\lambda(\text{sol})$ et $\lambda(R_2)$ sont les conductivités thermiques des matériaux ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Les lignes suivantes présentent les mesures de conductivité thermique dans différentes configurations. La conductivité thermique du système sol – géotextile mesurée (soit environ $0,47 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) est supérieure à la conductivité thermique théorique. Après la mesure, la masse du géotextile R₂ a augmenté d'un facteur 2 environ tandis que la teneur en eau de l'éprouvette de sol a diminué de 16,6% à l'état initial à environ 10,6% à l'état final. La différence entre la valeur théorique et la valeur mesurée est donc liée à un transfert d'eau entre le géotextile et le sol. La conductivité de thermique du géotextile augmente avec sa teneur en eau comme l'attestent les essais 5 et 6 réalisés sur des géotextiles humides. Ainsi, il est envisagé d'utiliser des géofilms de part et d'autre du géotextile pour éviter la baisse de performance thermique des géotextiles par humidification.

Tableau 2. Conductivités thermiques mesurées sur le sol compacté (limon Plaisir) et le géotextile R2 seuls ou en association avec la méthode de la plaque chaude.

Test n°	Matériau	e (10 ⁻³ m)	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)
1	Limon Plaisir	20	2,05
2	R ₂	7,7	0,04
3	Limon Plaisir et R ₂	2,7	0,42
4	Limon Plaisir et R ₂	2,7	0,51
5	R ₂ humide	7,4	0,12
6	R2 humide	7,3	0,12

. Conclusions

Dans le contexte d'une nouvelle application de stockage de chaleur saisonnière dans des remblais, cette étude a évalué la performance d'isolation thermique de quatre géotextiles non tissés aiguilletés. Il a été montré que, en plus de l'épaisseur et de la conductivité thermique des produits, l'effet de la contrainte normale était un paramètre essentiel à considérer pour un dimensionnement. La résistivité thermique, issue du rapport entre l'épaisseur et la conductivité thermique, est déterminée pour une contrainte donnée et peut ainsi être considérée comme un paramètre dimensionnant dans la mesure où il intègre à la fois l'effet de la contrainte sur l'épaisseur et sur la conductivité thermique.

Aussi, des transferts hydriques entre le géotextile et le sol humide ont pu être mis en évidence. Cette migration d'humidité conduit à une baisse des performances thermiques du géotextile en tant qu'isolant. Pour éviter cela, l'utilisation de géofilms au contact des géotextiles est envisagée pour des applications de type isolation thermique.

Cette étude est une première étape de faisabilité, des investigations supplémentaires sont nécessaires pour évaluer les performances en isolation des géotextiles. En particulier, des expérimentations sur un ouvrage réel seraient importantes pour évaluer l'impact d'une isolation sur l'efficacité du système et prendre en compte les variations thermiques saisonnières.

4. Références bibliographiques

- AFNOR (2015). EN ISO 10318-1: Geosynthetic - Part 1: Terms and definitions. European Committee for Standardization, Brussels.
- Abedin A.H., Rosen M.A. (2011). Critical review of thermochemical energy storage systems. *Open Renewable Energy Journal*, 4, 42-46.
- Al-Ajlan S.A. (2006). Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique. *Applied thermal engineering*, 26(17), 2184-2191.
- Al-Homoud M.S. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and environment*, 40(3), 353-366.
- Ali M.A., Bouazza A., Singh R.M., Gates W.P., Rowe R.K. (2016). Thermal conductivity of geosynthetic clay liners. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(9), 1510-1521.
- Baetens R., Jelle B.P., Thue J.V., Tenpierik M.J., Grynning S., Uvsløkk S., Gustavsen A. (2010). Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. *Energy and Buildings*, 42(2), 147-172.
- Bolattürk A. (2006). Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey. *Applied thermal engineering*, 26(11), 1301-1309.
- Boukelia A. (2016). Physical and numerical modeling of energy geostructures. PhD thesis, University of Lorraine, Nancy, France, 187 p.
- Coquard R., Baillis D., Quenard D. (2006). Experimental and theoretical study of the hot-wire method applied to low-density thermal insulators. *International journal of heat and mass transfer*, 49(23), 4511-4524.
- Fantucci S., Lorenzati A., Kazas G., Levchenko D., Serale G. (2015). Thermal energy storage with super insulating materials: a parametrical analysis. *Energy Procedia*, 78, 441-446.
- Gao L., Zhao J., Tang Z. (2015). A review on borehole seasonal solar thermal energy storage. *Energy Procedia*, 70, 209-218.
- GTR (2000). Réalisation des remblais et des couches de forme. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 102 pages.
- Gustafsson S.E. (1987). Transient hot strip techniques for measuring thermal conductivity and thermal diffusivity. *The Rigaku Journal*, 4(1/2), 16-28.
- He Y. (2005). Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor: Part 1. Theoretical considerations. *Thermochimica acta*, 436(1), 122-129.
- Hilf J.W. (1991). Compacted Fill. In: Fang H.Y. (eds) *Foundation Engineering Handbook*. Springer, Boston, MA, 249-316.
- Jannot Y., Degiovanni A., Grigorova-Moutiers V., Godefroy J. (2016). A passive guard for low thermal conductivity measurement of small samples by the hot plate method. *Measurement Science and Technology*, 28(1), 015008.

- Jradi M., Veje C., Jørgensen B.N. (2017). Performance analysis of a soil-based thermal energy storage system using solar-driven air-source heat pump for Danish buildings sector. *Applied Thermal Engineering*, 114, 360-373.
- Schmidt T., Mangold D., Müller-Steinhagen H. (2003). Seasonal thermal energy storage in Germany. In *ISES solar world congress 14(19)*, p. 2003.
- Singh R.M., Bouazza A. (2013). Thermal conductivity of geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*, 39, 1-8.
- Stojanović B., Akander J. (2010). Build-up and long-term performance test of a full-scale solar-assisted heat pump system for residential heating in Nordic climatic conditions. *Applied Thermal Engineering*, 30(2), 188-195.
- Vieira A, Alberdi-Pagola M, Christodoulides P, Javed S, Loveridge F, Nguyen F, Cecinato F, Maranhã J, Florides G, Prodan I, Van Lysebetten G, Ramalho E, Salciarini D, Georgiev A, Rosin-Paumier S, Popov R, Lenart S, Erbs Poulsen S, Radioti G. (2017) Characterization of ground thermal and thermo-mechanical behaviour for shallow geothermal energy applications. *Energies*, 10, 2044-2095.

