

ARTICLE DE RECHERCHE / RESEARCH ARTICLE

# Évolution des paramètres pressiométriques d'un massif argileux non saturé soumis à des variations monotones et cycliques de la température

Sandrine Rosin-Paumier<sup>1,\*</sup>, Hossein Eslami<sup>1,2,3</sup>, Adel Abdallah<sup>1</sup> et Farimah Masrouri<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54500 Nancy, France

<sup>2</sup> ESITC de Metz, Metz, France

<sup>3</sup> Franki Fondation, Paris, France

**Résumé** – Les récentes avancées technologiques dans le domaine des pompes à chaleurs ont permis de proposer des solutions nouvelles pour le chauffage et le refroidissement des ouvrages. Les géostructures énergétiques consistent à incorporer des échangeurs thermiques dans les éléments enterrés des ouvrages géotechniques. Cependant, l'échange de chaleur conduit à une évolution cyclique de la température du sol adjacent. Ainsi, de nombreuses questions se posent sur l'effet de ces variations de température sur les paramètres hydromécaniques des sols. Ces questions sont importantes puisque les géostructures énergétiques cumulent la fonction d'échangeur thermique et la fonction de portance ou de soutènement. Dans cette étude, quatre massifs de sol ont été compactés dans une cuve de 0,6 m de diamètre et 0,8 m de haut qui est thermo-régulée (1 à 40 °C). Le matériau testé est une argile (illite) compactée à sa teneur en eau optimale soit 31,3 % (essai Proctor normal), et à 90 % de sa masse volumique sèche maximale, soit 1,29 Mg/m<sup>3</sup>. Six essais mini-pressiométriques ont été réalisés dans chaque massif à différentes étapes des sollicitations thermiques appliquées. Les résultats montrent une diminution de la pression limite avec l'augmentation de la température. L'application de plusieurs cycles montre que le 1<sup>er</sup> cycle a un impact prépondérant par rapport aux cycles suivants en particulier, pour la pression de fluage qui tend vers une valeur d'équilibre. En revanche, la pression limite conserve sa dépendance à la température au-delà du 1<sup>er</sup> cycle.

**Mots clés** : sol compacté / géostructures énergétiques / essais pressiométriques / matériau argileux

**Abstract** – Evolution of the pressuremeter test's parameters of a compacted soil subjected to monotonous and cyclic temperature variations. Recent technological advances in the field of heat pumps made it possible to propose new solutions for heating and cooling buildings. Energy geostructures consist in incorporating heat exchangers into buried elements of geotechnical structures. However, the heat exchange leads to a cyclic evolution of the adjacent ground temperature. Thus, many questions arise about the effect of these temperature variations on the hydromechanical parameters of the soil. These issues are important since energy geostructures combine the function of heat exchanger with the bearing or/and retaining functions. In this study, mini-pressuremeter tests were conducted in laboratory on a homogeneous material submitted to different thermal loadings (in the range of 1 to 40 °C). The tested material, an illitic soil, is compacted at its Proctor optimal water content 31.3% and to 90% of its maximal dry density (1.29 Mg/m<sup>3</sup>) in a 0.6 m diameter and 0.8 m height thermo-regulated container. Six tests are performed in each container in different steps of temperature variations. A decrease in creep pressure and limit pressure with increasing temperature was observed. The first cycle induced more important parameter variations than the subsequent cycles especially for the creep pressure that tends towards a constant value. The limit pressure however, remains dependent to temperature variations beyond the first cycle.

**Keywords:** compacted soil / energy geostructures / pressuremeter tests / clay material

\* Auteur de correspondance : [sandrine.rosin@univ-lorraine.fr](mailto:sandrine.rosin@univ-lorraine.fr)

## 1 Introduction

Les géostructures énergétiques sont des ouvrages géotechniques qui permettent un échange thermique entre une structure et le terrain *via* la circulation d'un fluide caloporteur dans un circuit intégré. Ces systèmes utilisent le sol comme une source de chauffage ou de refroidissement pour les bâtiments adjacents (Fromentin *et al.*, 1999 ; Laloui *et al.*, 2003 ; Brandl, 2006 ; Bourne-Webb *et al.*, 2016 ; Loveridge *et al.*, 2017 ; Antoinet *et al.*, 2017). Il peut s'agir, par exemple, de murs de soutènement, de revêtements de tunnel (Zhang *et al.*, 2013) ou de pieux énergétiques (Pahud *et al.*, 1999 ; Moel *et al.*, 2010). L'étude de ces structures est multifactorielle puisqu'elle exige la réalisation d'un bilan thermique pour garantir l'efficacité thermique du système en plus de la reconnaissance géotechnique nécessaire au dimensionnement mécanique de l'ouvrage.

Lors du fonctionnement d'une géostructure énergétique, la température usuelle du sol, de 12 °C en moyenne en région parisienne (Martin, 2013), est susceptible d'être modifiée sur un intervalle maximum de 4 à 30 °C selon Peron *et al.* (2011). Cette évolution thermique pourrait avoir une influence sur le comportement mécanique du système sol-structure. En effet, lors d'une augmentation de température, les corps se dilatent ce qui tend à diminuer la résistance des solides et diminuer la viscosité des liquides. Une augmentation de température devrait donc conduire systématiquement à un rétrécissement du domaine d'élasticité des matériaux. Cependant, les matériaux non saturés, du fait de la présence d'air dans la structure présentent des comportements complexes à anticiper. Ainsi, sur un intervalle de température allant de 26 à 100 °C, Wiebe *et al.* (1998) n'ont observé aucune variation significative de la résistance au cisaillement pour un mélange de sable et de bentonite pour des états proches de la saturation ( $S_r = 98\%$ ). En revanche, pour les degrés de saturation entre 80 et 50 %, la résistance au cisaillement diminue en particulier, pour les degrés de saturation les plus faibles. Dans leurs travaux, Romero *et al.* (2003) ont étudié la compressibilité d'éprouvettes d'argile compactées à deux densités en contrôlant simultanément la succion et la température. Ils ont observé une augmentation de l'indice de compression (Cc) aux températures les plus importantes (80 °C). Uchaipichat et Khalili (2009) ont réalisé de nombreux essais avec un dispositif triaxial modifié rendant possible la caractérisation hydromécanique d'un limon dans un intervalle de température de 20 à 60 °C et à différents états de saturation. Leurs conclusions, confirmées depuis sur d'autres matériaux tels que des matériaux argileux surconsolidés (Gu *et al.*, 2014), indiquent une diminution de l'étendue du domaine élastique avec l'augmentation de la température, c'est-à-dire un ramolissement thermique (*thermal softening*).

L'état de consolidation et de saturation d'un sol a donc un impact sur l'intensité des variations des paramètres hydromécaniques lors de l'application de variations de températures. Cependant, les intervalles de température investigués ne couvrent que partiellement la gamme de variation induite par les géostructures énergétiques (4 à 30 °C selon Peron *et al.*, 2011) et la problématique de la multiplicité des cycles de chauffage-refroidissement du matériau reste peu documentée. De plus, des mesures avec des outils transposables sur le

terrain permettraient de mieux prévoir l'incidence de la fonction énergétique des géostructures sur le comportement mécanique du sol pour garantir la stabilité et la durabilité des ouvrages.

Dans cet article, des essais mini-pressiométriques ont été réalisés pour évaluer les propriétés mécaniques du sol sous différentes sollicitations thermiques. Afin de s'approcher de conditions réelles d'utilisation, les essais ont été réalisés sur des éprouvettes de grande taille, compactées en couches successives et soumises à des variations de température. Les essais pressiométriques sont largement utilisés pour la reconnaissance géotechnique en France, ils peuvent être réalisés sur une large gamme de sols et fournissent, dans les conditions de l'essai, la pression limite ( $P_\ell$ ) indiquant la résistance, la pression de fluage ( $P_f$ ) correspondant à la fin du domaine pseudo-élastique et le module pressiométrique de Ménard ( $E_M$ ), permettant de quantifier la déformabilité du sol. Cet article présente la méthode expérimentale développée pour permettre la réalisation de ces essais dans des conditions de laboratoire sur un matériau pour lequel les conditions initiales de densité et de teneur en eau, ainsi que les sollicitations thermiques sont maîtrisées. Ensuite, les résultats des essais sont présentés et l'impact des variations cycliques de la température sur les paramètres mécaniques du matériau compacté est discuté. Ce type de résultat est important dans le contexte français où les géostructures énergétiques se développent peu en comparaison avec ses voisins européens.

## 2 Matériaux et méthodes

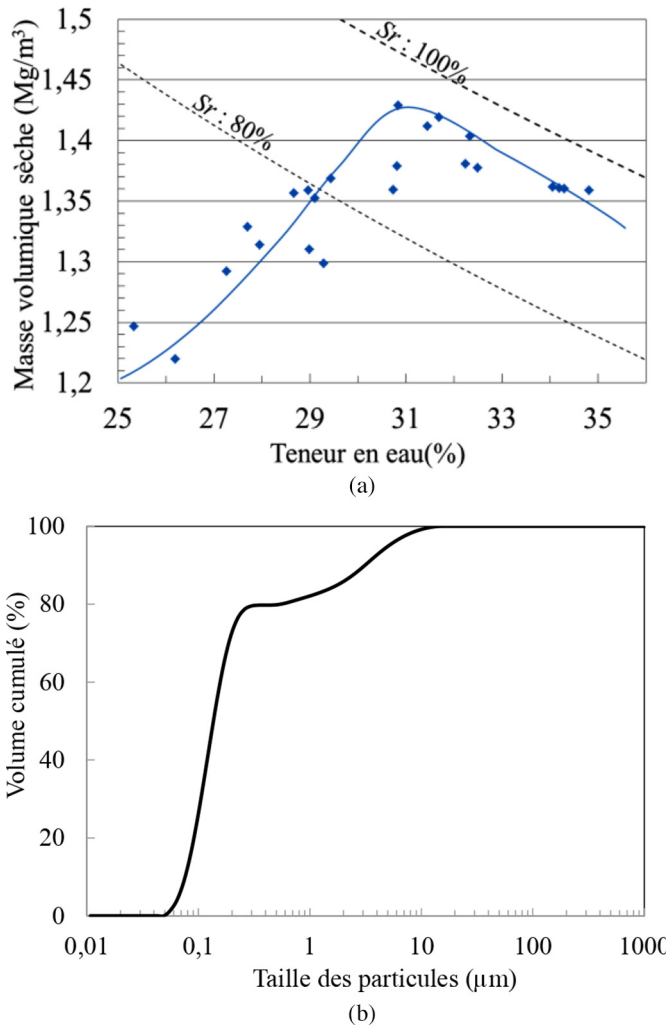
### 2.1 Caractérisation du matériau

Le matériau utilisé, nommé Arginotech<sup>®</sup>, provient de l'est de l'Allemagne, il contient 77 % d'illite, 10 % de kaolinite, 12 % de calcite et des traces de quartz et de feldspath. L'illite est une argile non gonflante que l'on trouve en proportions variables dans de nombreux sols. Selon la bibliographie (Tanaka *et al.*, 1996 ; Graham *et al.*, 2001), l'illite est un matériau dont les propriétés sont susceptibles d'évoluer avec la température.

La limite de liquidité du matériau est de 65 % et la limite de plasticité est de 34 %. L'indice de plasticité du matériau est donc de 31 % (AFNOR, 1993). La courbe de compactage Proctor normal (Fig. 1a) permet de déterminer une teneur en eau optimale de 31,3 % et une masse volumique sèche maximale de 1,43 Mg/m<sup>3</sup> (AFNOR, 1999). La distribution de la taille des particules contenues dans le matériau a été déterminée à l'aide d'un granulomètre laser Mastersizer 2000<sup>®</sup> (Fig. 1b). Selon la norme française pour la classification des sols le matériau est classé comme A3 (GTR, 2000).

### 2.2 Remplissage et instrumentation de la cuve

Le massif étudié est compacté dans une cuve en inox de 800 mm de haut et de 600 mm de diamètre. Des tubes en inox sont soudés aux parois externes de la cuve et reliés à un thermorégulateur (Vulcatherm<sup>®</sup>). L'utilisation d'un mélange d'eau et de monoéthylène (ASCAGEL<sup>®</sup> MEC) permet d'atteindre des températures de 1 °C à 40 °C (Fig. 2). Des gaines isolantes sont placées sur les tubes afin de limiter la



**Fig. 1.** Caractéristiques de l'illite étudiée : (a) courbe de compactage,  $S_r$ : degré de saturation ; (b) distribution de la taille des particules.

**Fig. 1.** Characteristic of the studied illitic soil: (a) Compaction curve,  $S_r$ : the degree of saturation; (b) particle size distribution.

condensation d'eau et de réduire les échanges thermiques avec l'atmosphère. Des plaques de polystyrène extrudé de 40 mm d'épaisseur renforcent l'isolation thermique de l'ensemble.

Le matériau illitique, sous forme de poudre, est mélangé à de l'eau afin d'atteindre une teneur en eau de 31,3 % puis stocké dans des fûts étanches pour une durée minimale de 5 jours afin d'assurer une bonne homogénéisation. Le matériau humide est ensuite compacté dans la cuve au moyen d'un compacteur pneumatique, une plaque métallique de même diamètre que la cuve permet d'homogénéiser la répartition de l'énergie de compactage sur l'intégralité de la surface du matériau. Le massif est compacté en 11 couches de 70 mm d'épaisseur. Sept sondes thermiques (PT100) sont introduites dans le massif au fur et à mesure du compactage afin de suivre l'évolution de la température du massif lors de l'application de la sollicitation thermique. La masse volumique sèche finale visée est de  $\rho_d = 1,29 \text{ Mg/m}^3$ , soit 90 % de la masse volumique sèche maximale. Le massif est alors prêt à subir les sollicitations thermiques appliquées par le thermorégulateur.

### 2.3 Essais mini-pressiométriques dans le massif thermorégulé

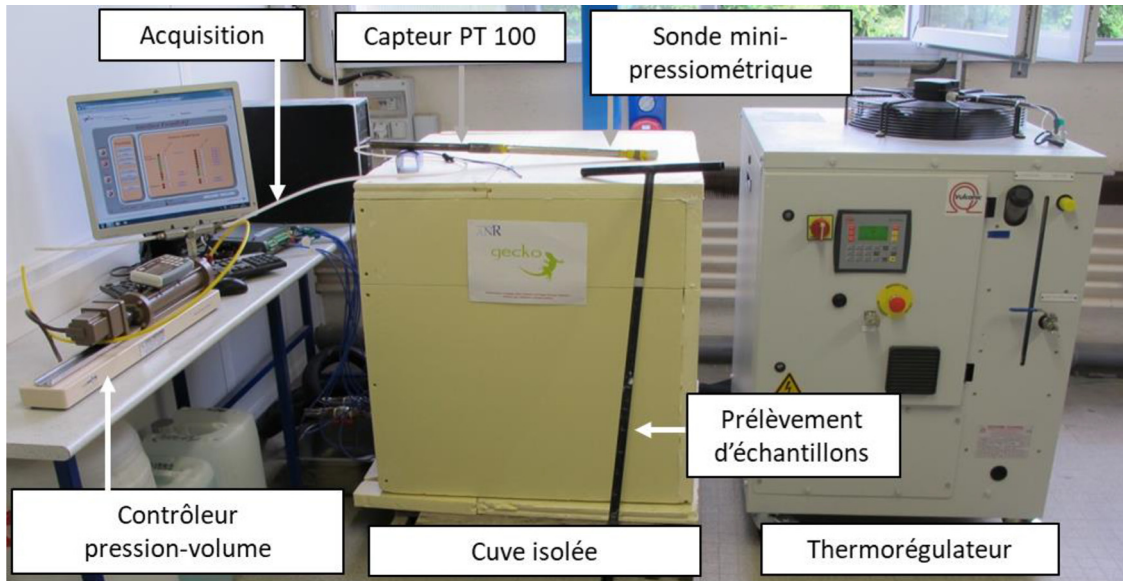
L'essai pressiométrique consiste à dilater radialement une sonde cylindrique placée dans le terrain. Les pressions appliquées et les variations volumiques de la sonde sont mesurées et enregistrées, afin de déterminer la relation entre la pression appliquée et la déformation du sol (AFNOR, 2000). Les essais sont ici réalisés avec une sonde mini-pressiométrique de 380 mm de longueur et 28 mm de diamètre, spécialement conçue pour des essais de laboratoire et calibrée en prenant en compte l'effet de la température (Eslami, 2014). Six essais sont réalisés dans chaque massif afin de limiter les effets de bords et l'influence entre les essais. La position des essais a été définie par Eslami (2014) après la réalisation d'une série d'essais préliminaires. Ainsi, les points d'essai sont régulièrement répartis sur un cercle concentrique à la cuve de rayon deux fois plus petit, c'est-à-dire à 150 mm du bord de la cuve par rotation d'angle  $60^\circ$ .

Préalablement à chaque essai, un forage de 30 mm de diamètre est réalisé et permet d'échantillonner le sol jusqu'à une profondeur de 630 mm. La carotte est découpée en échantillons de 50 à 100 mm de long analysés pour établir la répartition de la teneur en eau et de la densité du matériau en fonction de la profondeur.

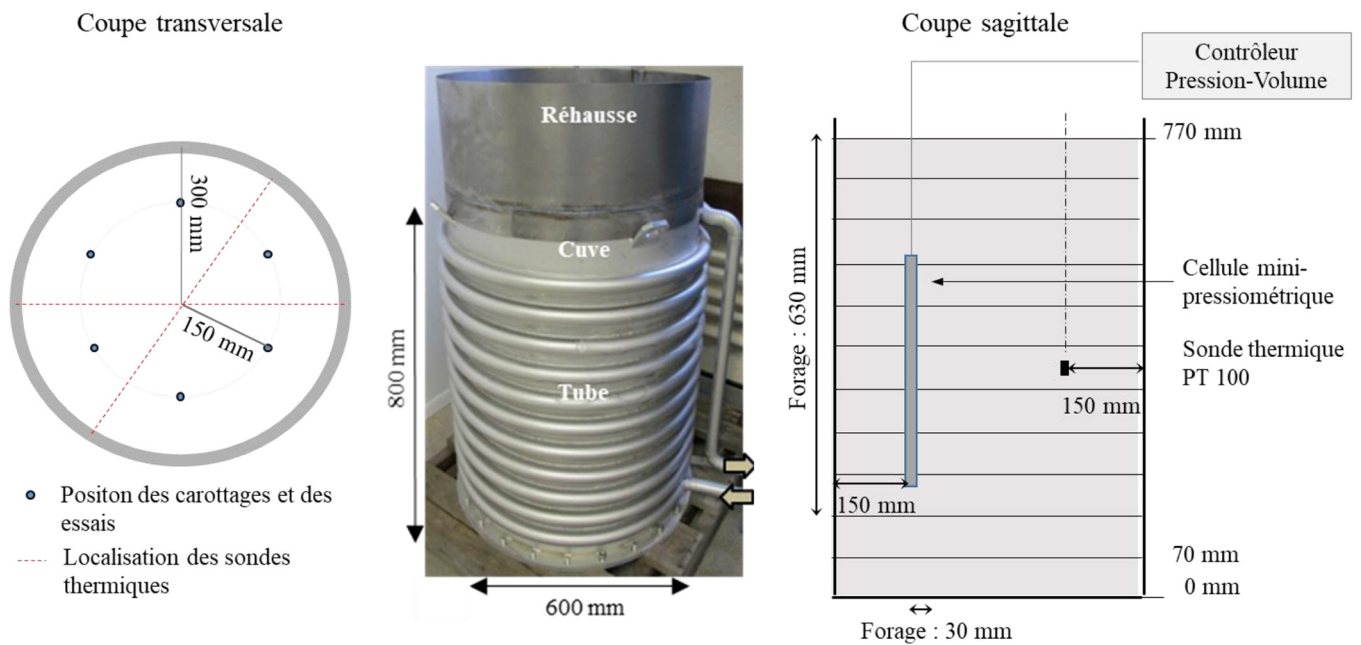
La sonde mini-pressiométrique est insérée dans le forage de façon à ce que le centre soit positionné à 400 mm de profondeur, au milieu de la cuve (Fig. 3). L'essai consiste à imposer des paliers successifs de pression par incréments de 25 kPa à l'aide d'un contrôleur pression/volume (GDS®). Le temps d'atteinte de la pression visée est inférieur à 60 s. Le volume est mesuré à 30 s et 60 s pour chaque incrément de la pression appliquée. Les résultats sont corrigés afin de prendre en compte l'effet d'amortissement lié à la résistance propre de la membrane. De plus, afin de calibrer l'effet de la température sur la résistance de la membrane, des essais d'étalonnage de la sonde ont été réalisés en chambre climatique (Fig. 4). L'essai est arrêté lorsque le volume de la cellule atteint sa capacité d'expansion limite ( $140 \times 10^3 \text{ mm}^3$ ). La courbe pressiométrique comprend trois phases (Fig. 5) : (I) la mise en contact de la paroi de la sonde avec le sol, (II) une augmentation linéaire du volume (paramètre  $m_i$ ) caractéristique du domaine de pseudo-élasticité du sol, et (III) une augmentation plus importante du volume indiquant que le sol a atteint un état plastique. Les résultats sont traités selon la norme NF P94-110-1 (AFNOR, 2000). Le module pressiométrique  $E_M$  est calculé à partir de la pente  $m_i$  calculée en phase II. La pression de fluage,  $P_f$ , est par définition la limite entre les phases II et III de la courbe, elle est définie par interpolation graphique de la courbe de fluage (Fig. 5) conformément à la norme (AFNOR, 2000). La pression limite  $P_\ell$  est la pression mesurée ou extrapolée pour un volume injecté équivalent à deux fois le volume initial de la cavité. Dans notre cas, un forage a été réalisé préalablement à l'essai, ainsi la pression limite  $P_\ell$  est la pression lorsque le volume atteint  $V_\ell$ , avec :

$$V_\ell = V_s + 2V_1, \quad (1)$$

où  $V_s$  ( $\text{mm}^3$ ) est le volume initial de la sonde et  $V_1$  ( $\text{mm}^3$ ) correspond au volume de la sonde au début de la phase pseudo-élastique (Fig. 5).



**Fig. 2.** Cuve en modèle réduit et instrumentation associée.  
**Fig. 2.** Total parts of developed experimental device and instrumentation.



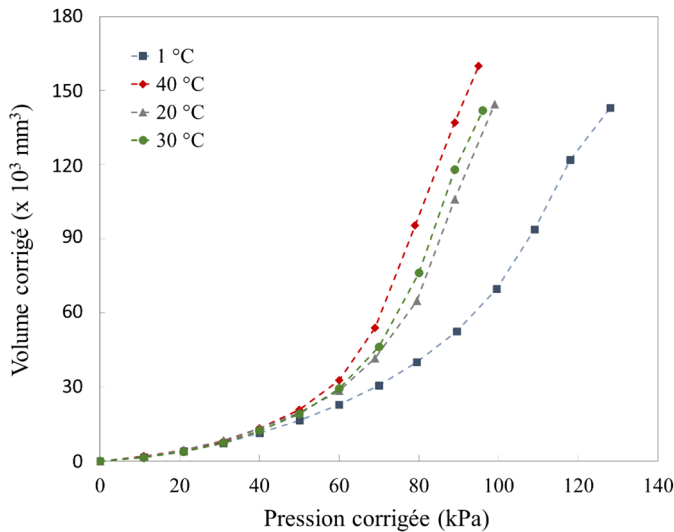
**Fig. 3.** Position des sondes thermiques et des essais pressiométriques dans le massif compacté.  
**Fig. 3.** Thermo-regulated metric scale container and test positioning.

Après chaque essai pressiométrique dans le massif, le forage est refermé par du matériau identique à celui utilisé pour remplir la cuve et une nouvelle sollicitation thermique est appliquée. Une série d’essais préliminaires a permis de vérifier la répétabilité des essais et d’estimer l’incertitude de chacun des paramètres déterminés :  $E_M : \pm 10\%$ ,  $P_f : \pm 5\%$ ,  $P_\ell : \pm 5\%$  (Eslami, 2014).

**2.4 Programme d’essai et référencement**

Dans le cadre de cette étude, 4 massifs d’essais, comprenant chacun six essais mini-pressiométriques ont été réalisés :

un cycle de chauffage-refroidissement (20–40–20 °C) a été appliqué au 1<sup>er</sup> massif, un cycle de refroidissement-chauffage (20–1–20 °C) a été appliqué au 2<sup>e</sup> massif et plusieurs cycles de chauffage-refroidissement entre 1 et 40 °C ont été appliqués au 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> massif. La température initiale est toujours de 20 °C. L’équilibre thermique a été atteint pour chaque palier avant d’effectuer l’essai mini-pressiométrique. Les températures sont contrôlées en différents points du massif au moyen de thermocouples PT100 comme indiqué sur la [figure 3](#). Dans cet article, seules les mesures réalisées à mi-hauteur de la cuve et à 150 mm du bord sont données, soit une



**Fig. 4.** Courbes de calibration de la sonde pressiométrique en fonction de la température.

**Fig. 4.** Calibration curves of the pressiometer probe according to the temperature.

position équivalente au centre de la sonde pressiométrique (Fig. 3). Les essais effectués sont numérotés « Tn », où « T » est la température lors de l'essai (c'est-à-dire 1, 20 ou 40 °C) et « n » un indice qui s'incrémente pour chaque nouvel essai effectué à la même température.

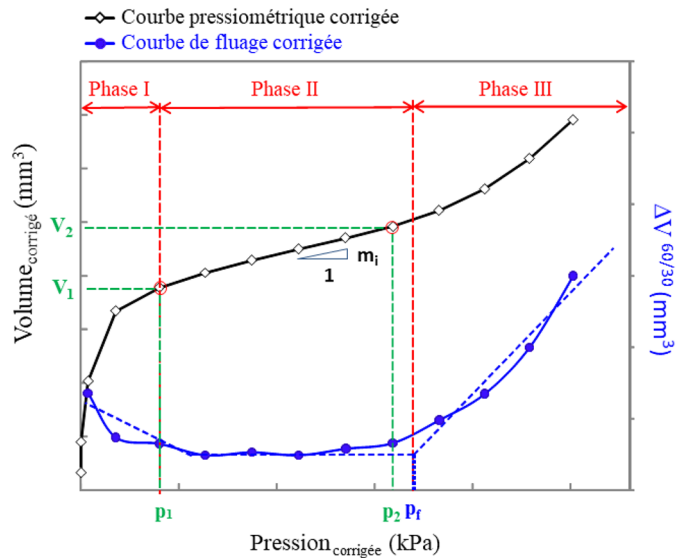
### 3 Résultats

#### 3.1 1<sup>er</sup> massif – 1 cycle de chauffage (20–40–20 °C)

La température du premier massif est successivement portée à 20, 40 puis de nouveau à 20 °C. La température au sein du massif est suivie en continue à l'aide des sondes thermiques. Une fois l'équilibre thermique atteint ( $\pm 1$  °C), soit en moyenne au bout de 65 h, deux essais mini-pressiométriques sont réalisés (Fig. 6a). Ainsi, deux essais ont été effectués à la fin du 1<sup>er</sup> palier à 20 °C (20a, 20b), deux essais ont été réalisés à la fin du palier à 40 °C (40a, 40b) et deux essais à la fin du dernier palier à 20 °C (20c, 20d).

Les valeurs de la teneur en eau et de la masse volumique sèche obtenues à la fin de chaque palier sont moyennées et tracées (Fig. 6b et 6c). Les teneurs en eau mesurées dans ce 1<sup>er</sup> massif lors des forages successifs sont toutes comprises entre 29,5 % et 32 %. Les masses volumiques sèches évoluent de 1,22 à 1,42 Mg/m<sup>3</sup> et ce malgré le compactage du massif en 11 couches. Toutefois, les différents forages montrent les mêmes évolutions avec la profondeur ainsi, le massif peut être considéré comme étant homogène dans le plan horizontal ce qui garantit que les essais sont réalisés dans des conditions similaires. La masse volumique sèche moyenne, dans la zone de réalisation de l'essai (de 200 à 580 mm de profondeur) est de  $1,32 \pm 0,05$  Mg/m<sup>3</sup>. Un problème d'acquisition des données n'a pas permis l'exploitation de l'essai 20a. Les résultats des cinq autres essais sont présentés dans la figure 7.

Les modules pressiométriques ( $E_M$ ), les pressions de fluage ( $P_f$ ), et les pressions limites ( $P_\ell$ ) sont déterminés pour chaque essai (Tab. 1). Les résultats montrent une variation inférieure à



**Fig. 5.** Exploitation d'un essai pressiométrique selon la norme NF P94-110-1 (AFNOR, 2000).

**Fig. 5.** Determination of the pressiometer parameters using the standard NF P94-110-1 (AFNOR, 2000).

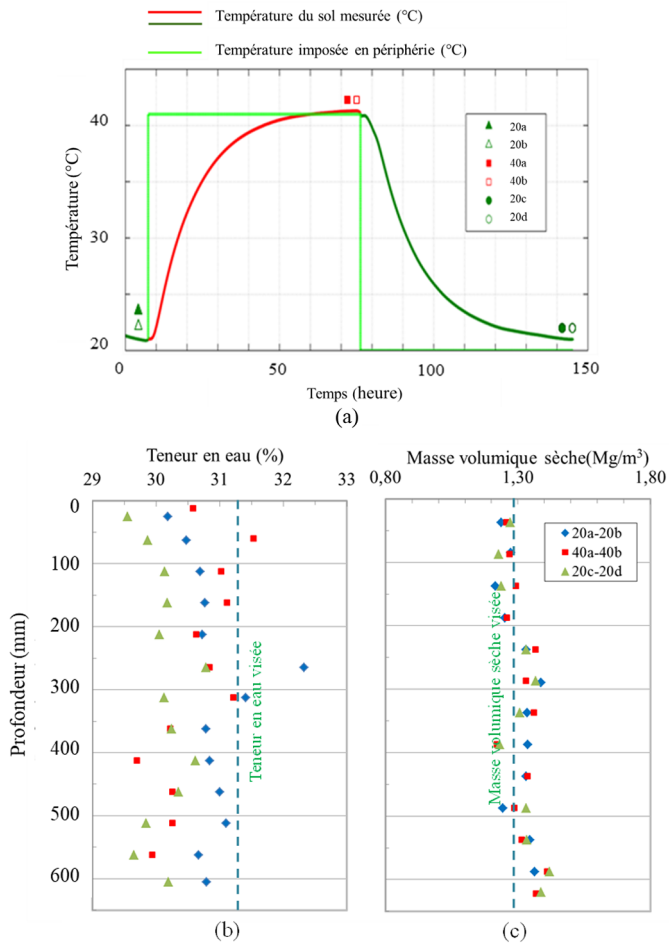
l'incertitude de  $E_M$  avec la température, tandis que les valeurs de  $P_f$  et  $P_\ell$  diminuent lors du chauffage à 40 °C (Tab. 1). La diminution de  $P_f$  confirme la contraction du domaine de pseudo-élasticité de ce sol avec l'augmentation de la température en cohérence avec la littérature (Tanaka *et al.*, 1996; Graham *et al.*, 2001; Cekerevac et Laloui, 2004; Marques *et al.*, 2004; Uchaipichat et Khalili, 2009). Les courbes acquises à 20 °C en fin d'essai (20c et 20d) sont proches de la courbe initiale (20a) malgré le réchauffement à 40 °C. Ainsi, malgré une évolution de ses propriétés à 40 °C, le matériau semble avoir récupéré des propriétés similaires à ses propriétés initiales lorsque la température revient à 20 °C.

#### 3.2 2<sup>e</sup> massif – 1 cycle de refroidissement (20–1–20 °C)

Le deuxième massif est compacté puis successivement porté à 20 °C, 1 °C puis à nouveau à 20 °C. Deux essais pressiométriques sont réalisés à la fin de chaque palier, une fois l'équilibre thermique atteint, soit 2 essais à l'état initial à 20 °C (20e et 20f), puis 2 essais à 1 °C (1a et 1b) et 2 essais lors du dernier palier à 20 °C (20g et 20h) (Fig. 8a).

Pour ce 2<sup>e</sup> massif, les teneurs en eau mesurées lors des forages sont comprises entre 31 % et 32,9 %, et les masses volumiques sèches varient de 1,21 à 1,36 Mg/m<sup>3</sup> (Fig. 8b et 8c). La masse volumique sèche moyenne, dans la zone de réalisation de l'essai (de 200 à 580 mm de profondeur) est de  $1,28 \pm 0,05$  Mg/m<sup>3</sup>.

Les courbes pressiométriques et de fluage sont présentées sur la figure 9. Les résultats montrent que lors d'un refroidissement à 1 °C, la variation de  $E_M$  reste inférieure à l'incertitude. En revanche, une augmentation significative des valeurs de  $P_f$  et  $P_\ell$ , respectivement de 20 % et 10 % est observée (Tab. 2). Ainsi, le domaine pseudo-élastique est plus étendu dans le cas d'un essai à 1 °C que dans le cas d'un essai à

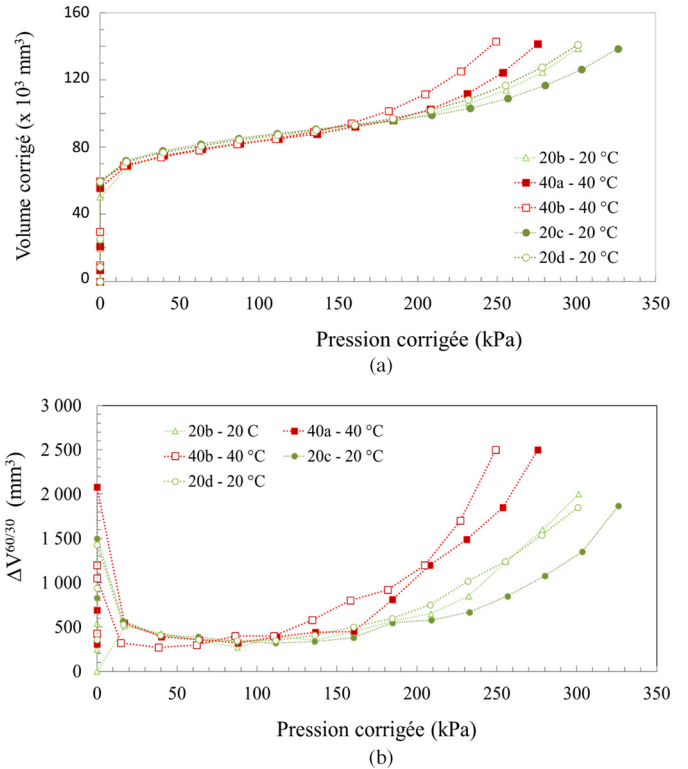


**Fig. 6.** Paramètres du premier massif : (a) évolution de la température au sein du massif à mi-hauteur et à 150 mm du bord de la cuve ; (b) profils moyens de la teneur en eau ; (c) profils moyens de la masse volumique sèche.  
**Fig. 6.** 1<sup>st</sup> massif parameters: (a) temperature variation at 150 mm from the edge of the massif; (b) average moisture content profiles; (c) average dry density profiles.

20 °C traduisant un durcissement du matériau. Les paramètres mesurés pour les essais finaux à 20 °C (20h et 20g) sont légèrement décalés par rapport aux résultats initiaux (20e et 20f). Ainsi, une réversibilité seulement partielle de l’impact de la sollicitation thermique est observée, autrement dit, le matériau a conservé une trace de son passage à 1 °C. Le résultat de cet essai montre que le refroidissement du matériau entraîne un durcissement du matériau, ce qui entraînerait une augmentation de sa résistance. Cependant, lors de l’utilisation des géostructures énergétiques, de nombreux cycles successifs seront appliqués, leur effet cumulé doit être vérifié par l’application de plusieurs cycles consécutifs de chauffage-refroidissement.

### 3.3 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> massifs – Variation cyclique de la température

Deux massifs ont été préparés afin de quantifier l’effet de multiples cycles de chauffage-refroidissement sur les



**Fig. 7.** Courbes pressiométriques (a) et de fluage (b) obtenues dans le premier massif.  
**Fig. 7.** Pressuremeter curves (a) and creep curves (b) obtained in the 1<sup>st</sup> massif.

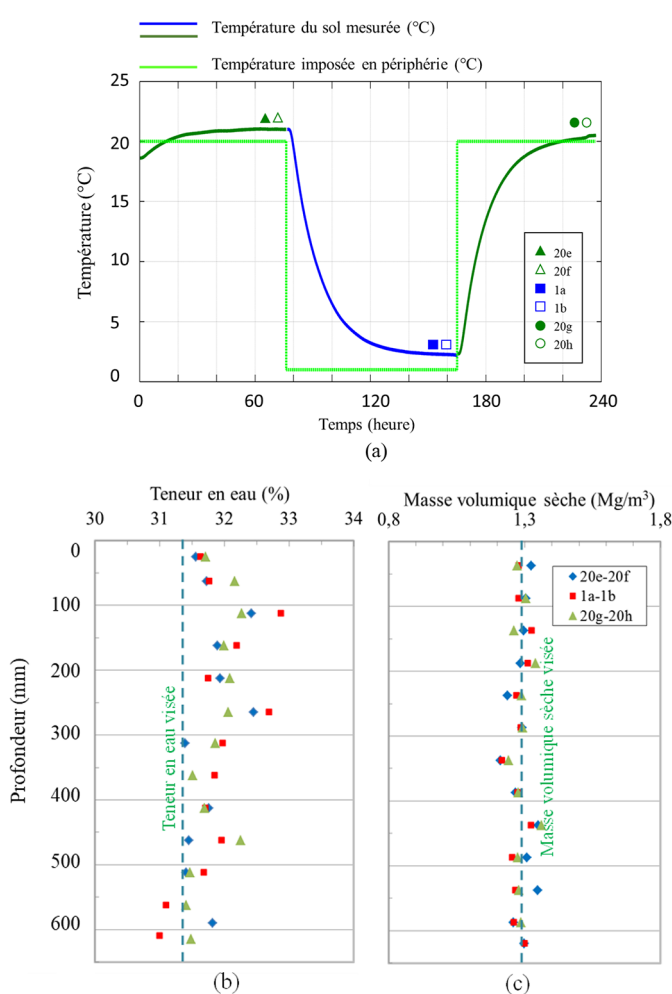
paramètres pressiométriques. Pour ces massifs, la température initiale était de 20 °C puis la température a successivement été portée à 1 °C puis 40 °C. Trois cycles de chauffage/refroidissement sont réalisés pour chaque massif. L’évolution de la température et la position des essais sont reportées sur la figure 10. Pour le 3<sup>e</sup> massif, un essai a été réalisé à 20 °C (20i) puis au cours du premier (1c et 40c) et du dernier cycle (1d, 40d et 1e) (Fig. 11). Pour le 4<sup>e</sup> massif, les essais sont réalisés systématiquement à chaque palier à 1 °C (1f, 1g et 1h) et 40 °C (40e, 40f et 40g) mais la valeur à 20 °C n’a pas été acquise (Fig. 12).

Les tableaux 3 et 4 présentent les teneurs en eau et les densités sèches mesurées sur les carottes prélevées avant les essais mini-pressiométriques réalisés dans les massifs 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup>. Pour ces massifs, comme les précédents, les variations des teneurs en eau et des densités sèches mesurées par carottage sont inférieures à 1 %. La comparaison globale des courbes pressiométriques obtenues (Fig. 11a et 12a) confirme une diminution de l’étendue du domaine pseudo-élastique lors des paliers à 40 °C (*thermal softening*) et une augmentation lors des paliers à 1 °C (*thermal hardening*).

Les paramètres pressiométriques, calculés pour chaque étape sont donnés en tableaux 3 et 4 puis représentés graphiquement en la figure 13. Les évolutions des deux massifs sont comparables l’une avec l’autre. Au cours du premier refroidissement, la pression de fluage  $P_f$  augmente sensiblement (+30 %) pour atteindre une valeur qui peut être considérée comme stable au-delà de cette première sollicitation puisque les évolutions suivantes ne dépassent

**Tableau 1.** Paramètres pressiométriques obtenus lors des essais sur le 1<sup>er</sup> massif (20–40–20 °C).  
**Table 1.** Pressuremeter parameters for the 1st massif (20–40–20 °C).

Essai	T(°C)	Cycle	w(%)	$\rho_d(\text{Mg.m}^{-3})$	$S_r(\%)$	$P_f(\text{kPa})$	$P_\ell(\text{kPa})$	$E_M(\text{kPa})$
20b	20	0	31,0	1,31	78,9	194	355	3,54
40a	40	1	30,1	1,31	76,6	166	321	4,16
40b	40	1	30,4	1,31	77,4	165	288	3,25
20c	20	1	31,1	1,31	79,1	197	379	4,54
20d	20	1	31,1	1,32	80,3	178	352	3,89

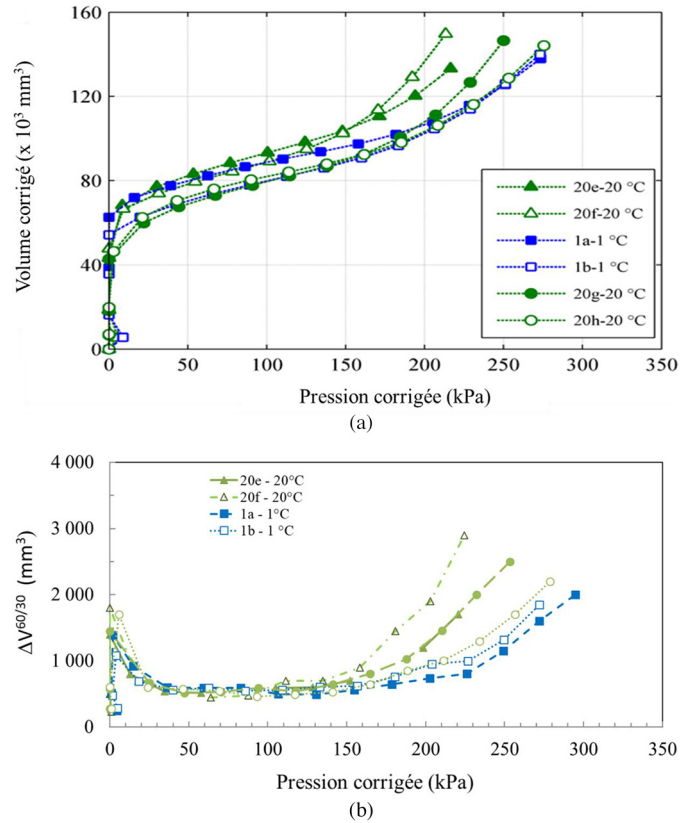


**Fig. 8.** Paramètres obtenus dans le 2<sup>e</sup> massif: (a) évolution de la température au sein du massif à mi-hauteur et à 150 mm du bord de la cuve; (b) profils moyens de la teneur en eau; (c) profils moyens de la masse volumique sèche.

**Fig. 8.** 2<sup>nd</sup> massif parameters: (a) temperature variation at 150 mm from the edge of the massif; (b) average moisture content profiles; (c) average dry density profiles.

pas le domaine d'incertitude de 5 % pour ce paramètre (Fig. 13a et 13b).

L'évolution de la pression limite ( $P_\ell$ ) est nettement plus prononcée, toutes les valeurs mesurées à 40 °C sont inférieures à celles mesurées à 1 °C. Cette évolution, réversible, est vérifiée à chaque palier, le taux de variation est estimé à 1,5 kPa/°C dans la plage de température étudiée (1–40 °C)



**Fig. 9.** Courbes pressiométriques (a) et courbes de fluage (b) obtenues dans le 2<sup>e</sup> massif.

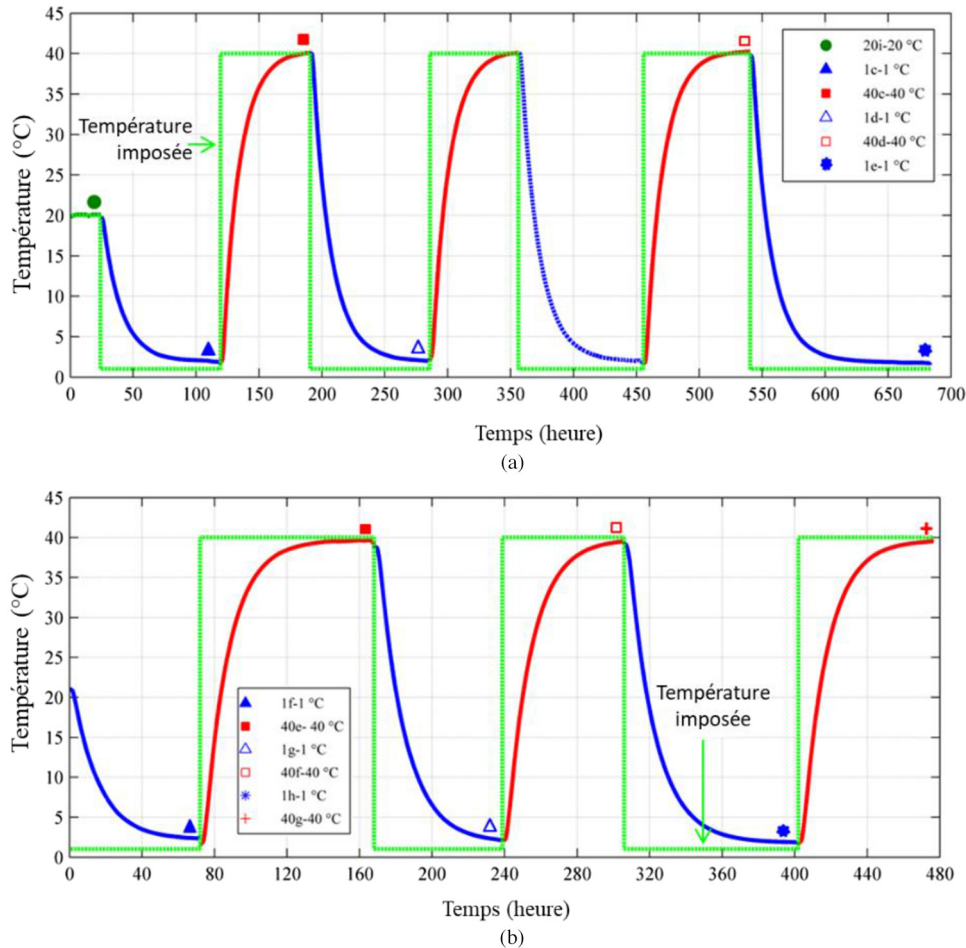
**Fig. 9.** Pressuremeter curves (a) and creep curves (b) obtained in the 2<sup>nd</sup> massif.

(Fig. 13c et 13d). La pression limite est un paramètre dimensionnant pour les fondations des bâtiments. Une diminution de la valeur de  $P_\ell$ , comme c'est le cas à 40 °C se traduit par une diminution de la contrainte de rupture sous chargement vertical. Son évolution doit donc être prise en compte dans les calculs en considérant les situations les plus contraignantes, c'est-à-dire à 40 °C. Une attention doit également être portée pour contrôler la température du massif portant afin d'éviter une dérive des températures du sol au fur et à mesure des cycles.

L'incertitude sur la détermination expérimentale des modules est généralement plus élevée que celle sur la résistance du fait que le module cumule les incertitudes des deux paramètres mesurés (contrainte et déformation) et qu'il est sensible au choix de sa plage de détermination. Cela a été confirmé lors des essais de répétabilité qui ont montré une

**Tableau 2.** Paramètres pressiométriques obtenus lors des essais du 2<sup>e</sup> massif (20–1–20 °C).**Table 2.** Pressuremeter parameters for the 2<sup>nd</sup> massif (20–1–20 °C).

Essai	T(°C)	Cycle	w(%)	$\rho_d(\text{Mg.m}^{-3})$	$S_r(\%)$	$P_f(\text{kPa})$	$P_\ell(\text{kPa})$	$E_M(\text{kPa})$
20e	20	0	31,8	1,34	84,6	132	305	2,47
20f	20	0	32,0	1,26	75,6	133	246	2,28
1a	1	1	32,2	1,29	79,5	181	339	3,4
1b	1	1	31,8	1,27	76,3	163	330	2,68
20g	20	1	32,1	1,27	77,0	157	286	2,36
20h	20	1	31,6	1,24	72,5	162	323	2,97

**Fig. 10.** Évolution des températures au sein des 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> massifs (a et b) à 150 mm du bord de la cuve et chronologie des essais réalisés.**Fig. 10.** Temperature variation at 150 mm from the edge in the 3<sup>rd</sup> (a) and 4<sup>th</sup> (b) massif and the chronology of the pressuremeter tests (points).

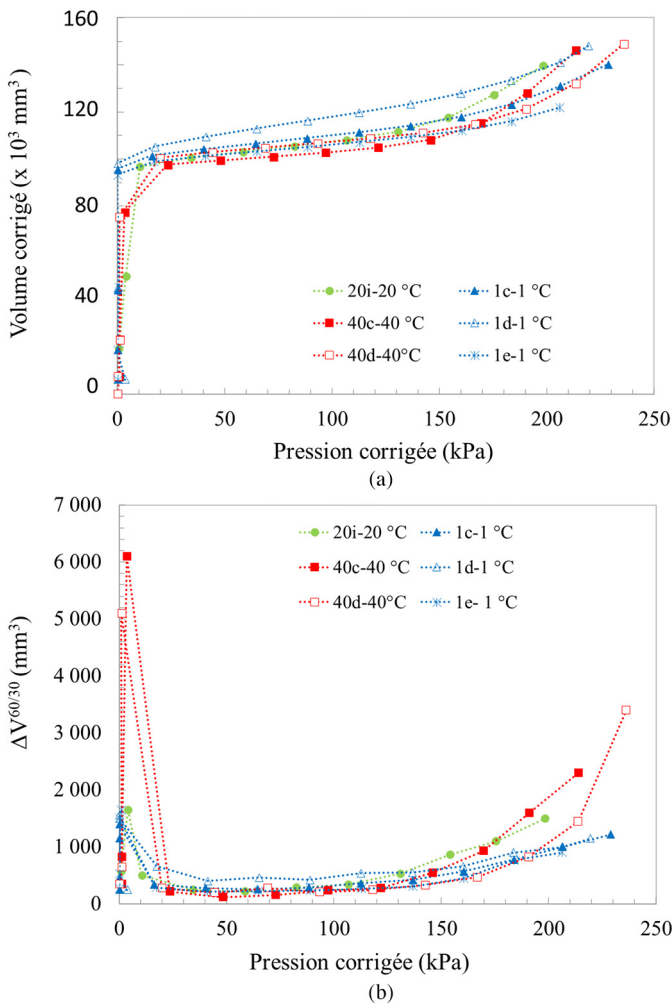
incertitude du module pressiométrique  $E_M$  de 10 %, supérieure aux incertitudes sur les autres paramètres (5 %). Ainsi, les valeurs mesurées présentent une plus grande variabilité et sont plus difficiles à interpréter (Fig. 13e et 13f).

#### 4 Commentaires et conclusion

L'objectif de cet article était de quantifier l'effet des variations cycliques de température sur les paramètres mécaniques d'un sol compacté non saturé soumis à de

nombreux cycles de chauffage-refroidissement. Un protocole expérimental a été mis en place afin de réaliser des essais mini-pressiométriques en laboratoire sur des éprouvettes de grande taille composées de couches successives de sol compacté. Les variations du module pressiométrique ( $E_M$ ), de la pression de fluage ( $P_f$ ) et de la pression limite ( $P_\ell$ ) ont été mesurées dans des conditions thermiques imposées (1–40 °C) sur un sol argileux compacté sélectionné pour sa sensibilité aux variations de température.

Les résultats ont montré une diminution de la pression de fluage et de la pression limite à mesure que la température



**Fig. 11.** Courbes pressiométriques (a) et courbes de fluage (b) obtenues dans le 3<sup>e</sup> massif.

**Fig. 11.** Pressuremeter curves (a) and creep curves (b) obtained in the 3<sup>rd</sup> massif.

**Tableau 3.** Paramètres pressiométriques pour la 3<sup>e</sup> massif: cycles chauffage-refroidissement (20–1–40–1–40–1–40–1 °C).

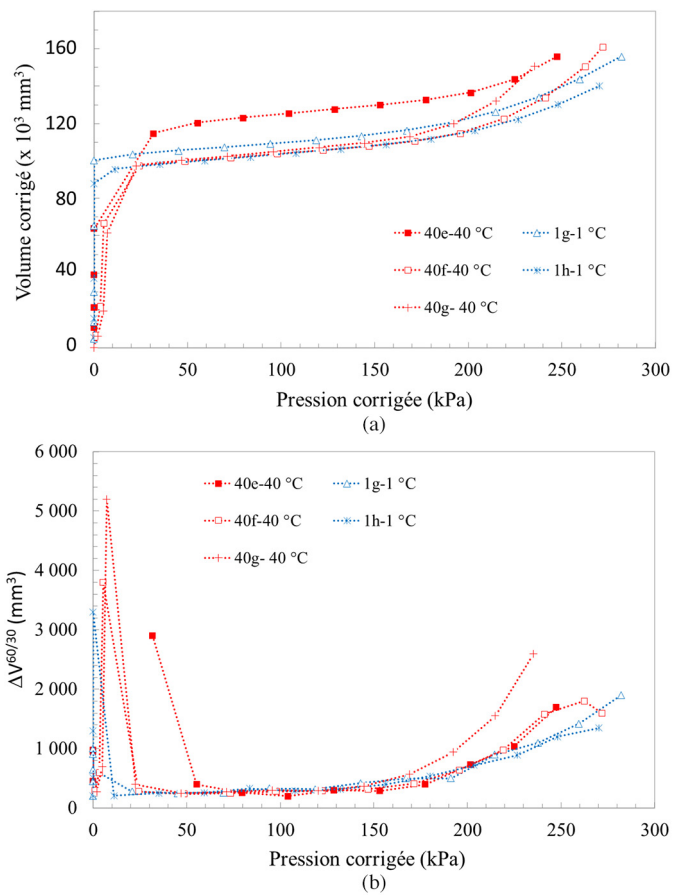
**Table 3.** Pressuremeter parameters for the 3<sup>rd</sup> massif: heating-cooling cycles (20–1–40–1–40–1–40–1 °C).

Essai	T(°C)	w(%)	$\rho_d(\text{Mg.m}^{-3})$	$S_r(\%)$	$P_f(\text{kPa})$	$P_\ell(\text{kPa})$	$E_M(\text{kPa})$
20i	20	31,4	1,25	73,1	103	240	5,51
1c	1	31,4	1,26	74,2	124	303	5,73
40c	40	32,1	1,25	74,7	125	236	7,68
1d	1	31,7	1,25	73,8	123	337	4,16
40d	40	31,5	1,28	76,7	143	270	6,85
1e	1	31,6	1,24	72,5	133	310	5,66

**Tableau 4.** Paramètres pressiométriques pour la 4<sup>e</sup> massif: cycles chauffage-refroidissement (20–1–40–1–40–1–40–1 °C).

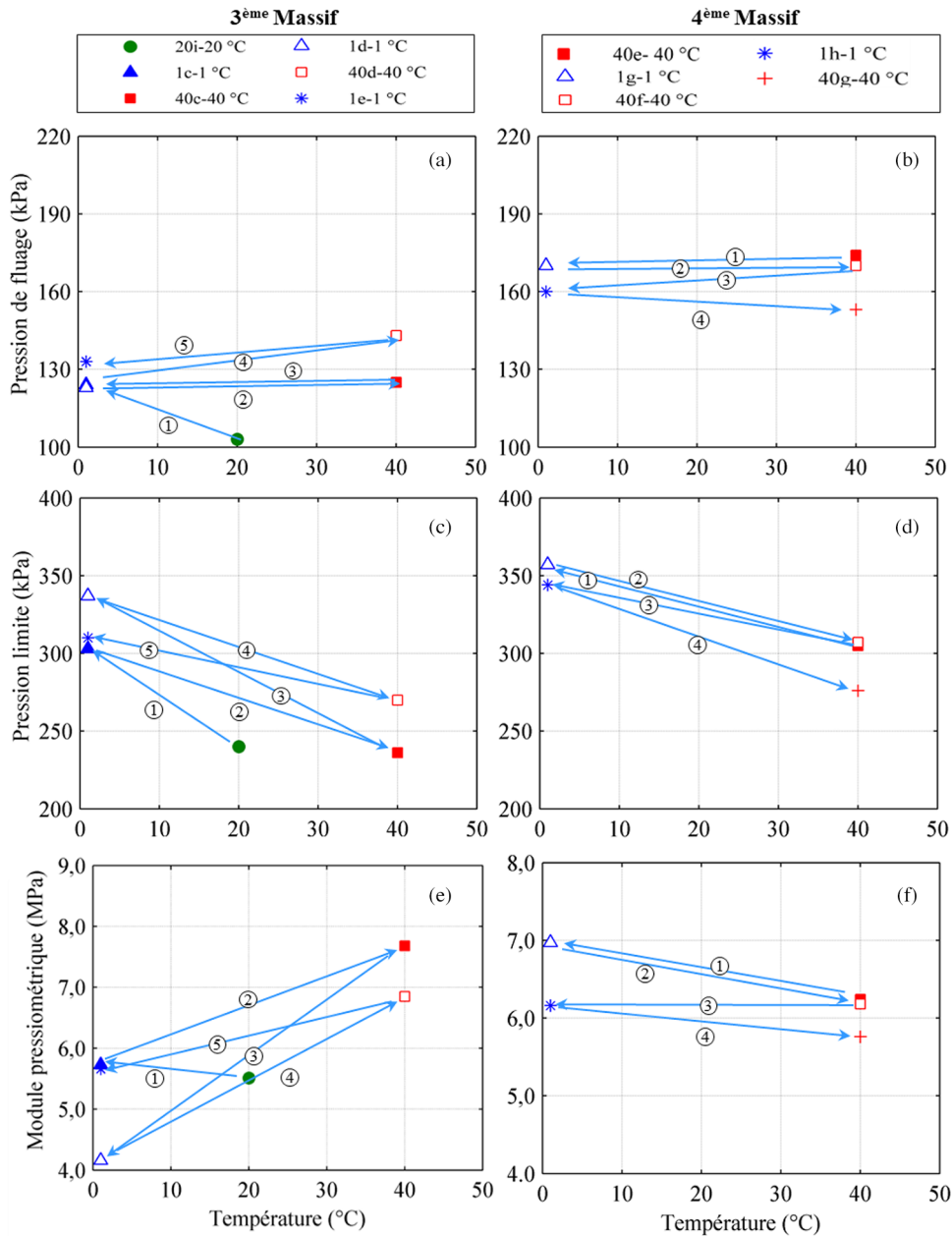
**Table 4.** Pressuremeter parameters for the 4<sup>th</sup> massif: heating-cooling cycles (20–1–40–1–40–1–40–1 °C).

Essai	T(°C)	w(%)	$\rho_d(\text{Mg.m}^{-3})$	$S_r(\%)$	$P_f(\text{kPa})$	$P_\ell(\text{kPa})$	$E_M(\text{kPa})$
40e	40	31,2	1,3	78,2	174	305	6,24
1g	1	31,5	1,24	72,2	170	357	6,97
40f	40	31,2	1,28	75,9	170	307	6,18
1h	1	31,0	1,24	71,1	160	344	6,16
40g	40	31,1	1,25	72,4	153	276	5,76



**Fig. 12.** Courbes pressiométriques (a) et courbes de fluage (b) obtenues dans le 4<sup>e</sup> massif.

**Fig. 12.** Pressuremeter curves (a) and creep curves (b) obtained in the 4<sup>th</sup> massif.



**Fig. 13.** Variation de la pression de fluage ( $P_f$ ) (a, b), de la pression limite ( $P_\ell$ ) (c, d) et du module pressiométrique ( $E_M$ ) (e, f) pour chaque palier du 3<sup>ème</sup> et du 4<sup>ème</sup> massif.

**Fig. .** Variation of creep pressure ( $P_f$ ) (a, b), limit pressure ( $P_\ell$ ) (c, d) and pressurometer modulus ( $E_M$ ) (e, f) with temperature for the 3<sup>rd</sup> (a) and 4<sup>th</sup> (b) massif.

augmente. Ces observations sont cohérentes avec la bibliographie qui décrit une diminution de l'étendue du domaine élastique des sols avec l'augmentation de la température (*thermal softening*) (Uchaipichat et Khalili, 2009).

L'application de 3 cycles thermiques montre que l'effet pour le premier cycle est plus important que pour les cycles suivants. Ce résultat est rencontré pour d'autres types de sollicitations comme par exemple, lors de l'application de cycles de séchage puis réhumidification (Nowamooz et Masrouri, 2008). Le premier refroidissement occasionne une restructuration du matériau qui lui permet d'atteindre un

nouvel équilibre susceptible de supporter des contraintes plus importantes.

Le léger durcissement constaté sur le second massif lors de l'application du cycle de refroidissement (20–1–20), n'est qu'en partie réversible. Ainsi, lors de l'application du second cycle, le matériau, est moins déformable, l'impact du cycle suivant est ainsi moins prononcé et la pression de fluage  $P_f$  atteint une valeur d'équilibre indépendante de la température après plusieurs cycles.

La pression limite ( $P_\ell$ ) diminue légèrement lorsque la température augmente avec un taux d'évolution de 1,5 kPa/°C.

Cette évolution s'avère totalement réversible dans la plage de température étudiée (1–40 °C) et se répète à chaque cycle. La pression limite est un paramètre important dans le calcul de la charge ultime des pieux énergétiques. Par conséquent, la variation de la pression limite en fonction de la température doit être prise en compte lors de l'estimation de la capacité portante des fondations et des pieux géothermiques en particulier, lorsqu'ils sont construits dans des sols sensibles à la température. L'étude de l'interface sol-structure devra également faire l'objet d'une grande attention. Ce point, non traité ici revêt une importance particulière pour les ouvrages.

*Remerciements.* Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet ANR GECKO (GEostructures, Couplage solaire hybride et stocKage d'énergie Optimisé: Solution pour bâtiments à énergie positive). Les auteurs remercient les partenaires du projet.

## Références

- AFNOR NF P94-051 . 1993. Sols: reconnaissance et essais; Détermination des limites d'Atterberg. Paris: Association Française de Normalisation, 15 p.
- AFNOR NF P94-093 . 1999. Sols: reconnaissance et essais; Détermination des références de compactage d'un matériau. Paris: Association Française de Normalisation, 18 p.
- AFNOR NF P94-110-1 . 2000. Sols: reconnaissance et essais; Essai pressiométrique Ménard – Partie 1 : essai sans cycle. Paris: Association Française de Normalisation, 43 p.
- Antoinet E, Demongodin L, Habert J, Pozzi N, Pierson d'Autrey L. 2017. Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en oeuvre des géostructures thermiques. *Rev Fr Geotech* 149(1): 1–120.
- Brandl H. 2006. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique* 56(2): 81–122.
- Bourne-Webb P, Burlon S, Javed S, Kuerten S, Loveridge F. 2016. Analysis and design methods for energy geostructures. *Renew Sustain Energy Rev* 65: 402–419.
- Cekerevac C, Laloui L. 2004. Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. *Int J Numer Anal Methods Geomech* 28: 209–228.
- Eslami H. 2014. Comportement Thermo-hydrromécanique des sols au voisinage des géo-structures énergétiques. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France, 214 p.
- Fromentin A, Pahud D, Laloui L, Moreni M. 1999. Pieux échangeurs : conception et règles de pré-dimensionnement. *Revue française de génie civil* 3(6): 387–421.
- Graham J, Tanaka N, Crilly T, Alfaro M. 2001. Modified Cam-Clay modelling of temperature effects in clays. *Can Geotech J* 38: 608–621.
- GTR. 2000. Guide technique: Réalisation des remblais et des couches de forme. Paris: LCPC, 102 p.
- Gu K, Tang C, Shi B, Hong J, Jin F. 2014. A study of the effect of temperature on the structural strength of a clayey soil using a micropenetrometer. *Bull Eng Geol Environ* 73: 747–758.
- Laloui L, Moreni M, Vulliet L. 2003. Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et échangeur de chaleur. *Can Geotech J* 40(2): 388–402.
- Loveridge F, Low J, Powrie W. 2017. Site investigation for energy geostructures. *Q J Eng Geol Hydrogeol* 50(2): 158–168.
- Marques MES, Leroueil S, Almeida MSS. 2004. Viscous behaviour of St-Roch-de-l'Achigan clay, Quebec. *Can Geotech J* 41: 25–38.
- Martin J-C. 2013. Carte de France des profils de température 0–200 m selon les zones climatiques. Rapport final. BRGM/RP-62281-FR, 17 p.
- Moel M, Bach PM, Bouazza A, Singh RM, Sun JLO. 2010. Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia. *Renew Sustain Energy Rev* 14: 2683–2696.
- Nowamooz H, Masroufi F. 2008. Hydromechanical behaviour of an expansive bentonite/silt mixture in cyclic suction-controlled drying and wetting tests. *Eng Geol* 101: 154–164.
- Pahud D, Fromentin A, Hubbuch M. 1999. Technical Report: Heat exchanger pile system of the dock midfield at the Zurich airport, detailed simulation and optimization of the installation. Switzerland: Swiss Federal Office of Energy.
- Peron H, Lnellwolf C, Laloui L. 2011. A method for the geotechnical design of heat exchanger piles. In: *Proceeding of the GeoFrontiers*, Dallas, Texas, pp. 470–479.
- Romero E, Gens A, Lloret A. 2003. Suction effects on a compacted clay under non-isothermal conditions. *Géotechnique* 53(1): 65–81.
- Tanaka N, Graham J, Crilly T. 1996. Stress-strain behaviour of reconstituted illitic clay at different temperatures. *Eng Geol* 47: 339–350.
- Uchaipichat A, Khalili N. 2009. Experimental investigation of thermo-hydro-mechanical behaviour of an unsaturated silt. *Geotechnique* 54(9): 339–353.
- Wiebe B, Graham J, Tang GX, Dixon D. 1998. Influence of pressure, saturation and temperature on the behaviour unsaturated sand-bentonite. *Can Geotech J* 35: 194–205.
- Zhang G, Xia C, Sun M, Zou Y, Xiao S. 2013. A new model and analytical solution for the heat conduction of tunnel lining ground heat exchangers. *Cold Regions Sci Technol* 88: 59–66.

**Citation de l'article** : Sandrine Rosin-Paumier, Hossein Eslami, Adel Abdallah, Farimah Masroufi. Évolution des paramètres pressiométriques d'un massif argileux non saturé soumis à des variations monotones et cycliques de la température. *Rev. Fr. Geotech.* 2021, 167, 4.