





 Open access • Journal Article • DOI:10.1051/GEOTECH/2021004

Modélisation physique du comportement thermo-mécanique d'un pieu géothermique — [Source link](#)

Anh Minh Tang, Neda Yavari, Van Tri Nguyen, Jean-Michel Pereira ...+1 more authors

Institutions: École des ponts ParisTech, Fugro, Hanoi University of Mining and Geology

Published on: 22 Feb 2021

Share this paper:    

View more about this paper here: <https://typeset.io/papers/modelisation-physique-du-comportement-thermo-mecanique-d-un-47ora13hf1>

1 ***Modélisation physique du comportement***
2 ***thermo-mécanique d'un pieu géothermique***

3

4 **Anh Minh Tang** – anh-minh.tang@enpc.fr – Navier, Ecole des Ponts, Univ Gustave Eiffel,
5 CNRS, Marne-la-Vallée, France.

6 **Neda Yavari** – Fugro France, Nanterre, Ile-de-France, France.

7 **Van Tri Nguyen** – Hanoi University of Mining and Geology, Tuliem, Hanoi, Vietnam.

8 **Jean-Michel Pereira** – Navier, Ecole des Ponts, Univ Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-
9 Vallée, France.

10 **Ghazi Hassen** – Navier, Ecole des Ponts, Univ Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-Vallée,
11 France.

12 **Résumés**

13 Les pieux géothermiques sont les pieux de fondation équipés d'un système échangeur de
14 chaleur entre les locaux qui ont besoin d'être chauffés et/ou rafraîchis et le terrain
15 environnant. Pendant sa durée de vie, un pieu géothermique subit des cycles annuels de
16 température avec une variation de l'ordre d'une vingtaine de degré. Il est donc nécessaire de
17 comprendre l'effet de ces cycles de température sur le comportement mécanique de tels pieux
18 de fondation. Cet article présente une synthèse du programme d'expérimentation mené à
19 l'École des Ponts ParisTech depuis 2010 sur un modèle physique 1xg. Le pieu modèle considéré
20 dans cette étude est un tube creux en aluminium, de 20 mm de diamètre extérieur et de 600
21 mm de longueur, équipé d'un système de contrôle de température. Ce dernier est d'abord
22 soumis à une charge axiale constante appliquée en tête puis à des cycles de variation de
23 température. Le comportement du pieu dans un sable sec et dans une argile saturée a été
24 étudié. Ces expérimentations en modèle réduit ont permis d'identifier les principaux effets des
25 cycles de température sur le comportement d'un pieu géothermique à long terme. Les résultats
26 de cette étude sur modèle réduit sont présentés, les avantages et les inconvénients du modèle
27 physique utilisé sont discutés.

28
29 *Geothermal piles are foundation piles equipped with a system that exchanges heat between the*
30 *buildings, which need to be warmed up and/or cooled down, and the surrounding ground. During*
31 *its life time, a geothermal pile is subjected to annual thermal cycles with an amplitude of around*
32 *twenty degrees Celsius. It is then necessary to understand the effect of these thermal cycles on*
33 *the mechanical behaviour of these foundation piles. This article presents a synthesis of the*
34 *experimental program conducted at the Ecole des Ponts ParisTech since 2010 by using a 1xg*
35 *physical model. The pile considered in this study is an aluminium hollow tube, 20 mm in exterior*
36 *diameter and 600 mm in length, equipped with a temperature control system. During the*
37 *experiments, the pile was subjected first to a constant pile head load prior to the application of*
38 *thermal cycles. The behaviour of the pile in dry sand and saturated clay was investigated. These*
39 *small-scale model experiments allowed us to identify the main effects of thermal cycles on the*
40 *long-term mechanical behaviour of the pile. In this article, the results are presented and the*
41 *advantages/disadvantages of the 1xg physical model are discussed.*

42 **Mots-clefs**

43 Pieux géothermiques, cycles de température, comportement thermomécanique, modèle
44 physique 1xg, comportement à long terme.

45
46 *Geothermal piles, thermal cycles, thermo-mechanical behaviour, 1xg physical model, long-term*
47 *behaviour.*

48

49 **Liste des notations**

50	D_{50}	Diamètre médian (mm)
51	e_{max}	Indice des vides maximal (-)
52	e_{min}	Indice des vides minimal (-)
53	ρ_d	Masse volumique du sol sec (Mg/m ³)
54	ρ_s	Masse volumique des grains solides (Mg/m ³)
55	w_L	Limite de liquidité (%)

56 w_p Limite de plasticité (%)

57 ***Introduction***

58 Les pieux géothermiques (ou pieux énergétiques) sont les pieux de fondation équipés d'un
59 système échangeur de chaleur entre les locaux qui ont besoin d'être chauffés et/ou rafraîchis et
60 le terrain environnant ; on les appelle aussi « fondations thermoactives ». Pendant sa durée de
61 vie, un pieu géothermique subit des cycles annuels de température avec une amplitude de
62 l'ordre d'une vingtaine de degrés. Ces cycles thermiques engendrent des cycles de
63 dilatation/contraction thermique du pieu qui influencent par la suite son comportement
64 mécanique. Il est donc nécessaire de comprendre l'effet de ces cycles thermiques sur le
65 comportement mécanique de tels pieux de fondation.

66
67 Plusieurs travaux de recherche ont été menés pour étudier le comportement thermomécanique
68 des pieux géothermiques. A côté des méthodes théoriques se basant sur le transfert de charge
69 (Suryatriyastuti et al., 2014 ; Pasten et Santamarina, 2014), des méthodes numériques utilisant
70 les éléments finis (Yavari et al., 2014a ; Saggiu et Chakraborty, 2015 ; Olgun et al., 2015 ; Ng et al.,
71 2016 ; Di Donna et Laloui, 2015), les modèles physiques (à l'échelle réelle ou à l'échelle réduite)
72 sont aussi utilisés (Ng et al., 2014 ; Laloui et al., 2003 ; Bourne-Webb et al., 2009). Ces travaux
73 ont mis en évidence les déformations et contraintes additionnelles, dans les pieux, liées à ces
74 variations thermiques, dépendant de l'amplitude des cycles thermiques, des conditions aux
75 limites et des propriétés hydromécaniques du terrain.

76
77 Par rapport aux modèles physiques à l'échelle réelle (essais en place), les modèles à l'échelle
78 réduite (en laboratoire) ont le mérite de pouvoir mieux contrôler les conditions aux limites et
79 multiplier le nombre d'essais (donc le nombre de paramètres à étudier). Quelques expériences
80 ont été réalisées en centrifugeuse (Stewart et McCartney, 2013 ; Ng et al., 2014 ; Ng et al., 2015)
81 mais le nombre de paramètres étudiés reste limité.

82
83 Cet article présente une synthèse du programme d'expérimentation mené à l'École des Ponts
84 ParisTech depuis 2010 sur un modèle physique à l'échelle réduite en laboratoire en condition
85 1xg. Les résultats obtenus, principalement à travers deux thèses de doctorat (Yavari, 2014 ;
86 Nguyen, 2017), ont été publiés dans plusieurs articles (Kalantidou et al., 2012 ; Yavari et al.,
87 2014b ; Yavari et al., 2016 ; Nguyen et al., 2017 ; Nguyen et al., 2019). Dans cet article, nous
88 présentons d'abord le développement du modèle physique d'un pieu géothermique et
89 discutons le choix des dispositifs et procédures d'essai. Ensuite, quelques résultats
90 représentatifs sont montrés dans le cas d'un sable (à l'état sec) et d'une argile (à l'état saturé).

91 ***Développement du modèle physique d'un pieu géothermique***

92
93 Le modèle physique est présenté dans la Figure 1 et les détails sur les dimensions et les
94 capteurs sont présentés dans la Figure 2. Le pieu est installé au milieu d'une cuve remplie de
95 sol compacté. Une structure métallique est utilisée pour maintenir un réservoir d'eau se
96 trouvant au-dessus de pieu. Un capteur de force est installé en tête du pieu pour mesurer la
97 force transmise par le réservoir d'eau sur le pieu. Trois capteurs de déplacement sont attachés
98 à la tête du pieu pour mesurer le tassement/soulèvement du pieu. Cinq jauges de déformation
99 sont collées le long du pieu ; elles permettent de calculer l'effort axial le long du pieu. Plusieurs
100 capteurs de température sont installés dans le sol et à l'intérieur du pieu. Plusieurs capteurs de
101 pression totale sont aussi installés dans le sol à différents endroits et directions. Les détails de
102 ce modèle sont présentés ci-dessous (voir aussi Yavari 2014).

103

104 Le pieu modèle est un tube en aluminium à bout fermé ayant des diamètres intérieur et
105 extérieur de 18 mm et 20 mm, respectivement. Les jauges de déformation sont collées sur la
106 surface extérieure du pieu, à 100, 200, 300, 400, et 500 mm de la pointe du pieu. Après le
107 collage de ces jauges, une couche de sable a été ajoutée et fixée par une colle Araldite, sur toute
108 la surface extérieure du pieu. Le sable utilisé est le sable de Fontainebleau NE34 (avec un
109 diamètre médian $D_{50} = 0,21$ mm, Feia et al., 2016). Ce traitement permet de reproduire la
110 rugosité de la surface d'un pieu foré, technique souvent utilisée pour un pieu énergétique.
111 Après ce traitement, le pieu modèle a été soigneusement étalonné sous différentes charges
112 axiales et températures afin d'établir la relation entre les signaux donnés par les jauges de
113 déformation et les conditions appliquées (effort axial et température). La précision des
114 mesures d'effort axial obtenues par les jauges de déformation est estimée à 20 N (Yavari, 2014).

115
116 Pour contrôler la température du pieu, un cryostat est utilisé. Le réservoir du cryostat, rempli
117 d'eau, est connecté avec un tube métallique (2 mm de diamètre intérieur) plié et inséré à
118 l'intérieur du pieu modèle. Le pieu modèle est lui aussi rempli d'eau pour assurer le bon
119 échange thermique entre sa paroi et le tube échangeur métallique. Une pompe péristaltique
120 assure la circulation d'eau entre le cryostat et le pieu afin de contrôler la température du pieu.

121
122 Pour mesurer la température, les capteurs PT1000 (sonde métallique ayant un diamètre de 5
123 mm et une longueur de 50 mm) sont utilisés. Un capteur est placé à l'intérieur du pieu, à une
124 distance de 300 mm de la pointe. Les autres capteurs sont placés dans le sol, à différentes
125 profondeurs et distances du pieu (voir Figure 2). La température de l'eau dans le cryostat est
126 imposée avec une fluctuation de $\pm 0,1$ °C et la précision des capteurs de température PT1000 est
127 aussi de $\pm 0,1$ °C.

128
129 La pression totale dans le sol est mesurée par des capteurs Kyowa (série PS) installés à
130 différents endroits et orientations. Ces capteurs ont la forme d'une pastille très fine (6 mm de
131 diamètre et 0,6 mm d'épaisseur) et permettent de mesurer la pression totale appliquée sur sa
132 surface dans la gamme de 0 – 100 kPa, avec une précision de ± 1 kPa.

133 **Procédures expérimentales**

134 Les expérimentations ont été réalisées sur du sable de Fontainebleau à l'état sec et de l'argile
135 Kaolin à l'état saturé. Le programme de chargement inclut les essais mécaniques (chargement
136 et déchargement axial en tête du pieu) et les essais thermomécaniques (chargement axial en
137 tête du pieu suivi de cycles de variations de température du pieu en maintenant constante la
138 charge mécanique).

139
140
141 Le sable de Fontainebleau NE34 a une masse volumique des grains solides $\rho_s = 2,65$ Mg/m³,
142 un indice des vides maximal $e_{max} = 0,884$, un indice des vides minimal
143 $e_{min} = 0,557$ (Feia et al. 2016). Le sable est compacté dans la cuve par couche de 100 mm
144 d'épaisseur. La densité moyenne de la couche est contrôlée par la masse du sol utilisé pour
145 compacter. Avant le compactage, le pieu est préalablement fixé dans sa position finale grâce à
146 une barre métallique qui sera enlevée après le compactage. Le compactage du sable est réalisé
147 manuellement grâce à une dame légère en bois pour atteindre une densité sèche $\rho_d =$
148 $1,54$ Mg/m³, correspondant à une densité relative de 50%. Les capteurs de température et de
149 pression totale sont installés au fur et à mesure du compactage. Après le compactage, les
150 mesures par un appareil KD2 Pro donnent une conductivité du sable de $0,2 \pm 0,01$ W/(m.K) et
151 une capacité thermique volumique de $1,2 \pm 0,1$ MJ/(m³.K).

152
153 L'argile Kaolin (Speswhite clay) a une limite de liquidité $w_L = 57\%$, une limite de plasticité
154 $w_p = 33\%$, et une masse volumique des grains solides $\rho_s = 2,60$ Mg/m³ (Frikha, 2010). Pour

155 préparer le massif de sol, l'argile est d'abord mélangée avec de l'eau pour avoir une teneur en
156 eau de 29%. Ensuite, le sol humide est compacté directement dans la cuve par une dame
157 vibrante par couche de 50 mm pour atteindre une densité sèche moyenne de la couche
158 $\rho_d = 1,45 \text{ Mg/m}^3$ (degré de saturation égal à 95% ; indice des vides égal à 0,79). Avant le
159 compactage, le pieu est fixé au préalable dans sa position finale grâce à une barre métallique
160 qui sera retirée après le compactage. Pour compacter le sol autour du pieu, une dame
161 métallique a été utilisée afin de ne pas toucher le pieu pendant le compactage. Un carottage a
162 été réalisé à la fin du compactage montrant que la densité du sol est homogène après le
163 compactage sur toute la profondeur de la cuve (Nguyen et al., 2019). Après le compactage, le
164 massif de sol a été saturé par injection d'eau à partir du bas de la cuve. Dans le premier essai
165 (Yavari, 2014), la saturation du massif d'argile a pris plusieurs mois. Pour accélérer cette étape,
166 une plaque poreuse a été placée au fond de la cuve et une couche géotextile a été installée sur
167 la paroi intérieure de la cuve. Ces dispositifs permettent d'emmener l'eau directement du bas
168 de la cuve vers le haut de l'extérieur du massif de sol. Cela a permis de réduire le temps de
169 saturation du massif à 45 jours (Nguyen et al., 2019). Après la phase de saturation, les mesures
170 par un appareil KD2 Pro donnent une conductivité thermique de l'argile saturée de $1,5 \pm 0,1$
171 W/(m.K) et une capacité thermique volumique de $3,3 \pm 0,3 \text{ MJ/(m}^3.\text{K)}$.

172
173 Le but des essais de chargement mécanique est de déterminer la capacité portante du pieu
174 sous charge axiale. Pour cela, la charge axiale à la tête du pieu est augmentée par palier de 50
175 N. Chaque palier est maintenu pendant une heure, selon le protocole recommandé par la
176 norme Afnor (1999). La charge de rupture du pieu est conventionnellement définie comme
177 l'effort normal appliqué sur le pieu qui produit un déplacement en tête égale à 10% du
178 diamètre du pieu (2 mm dans ce travail).

179
180 Pour les essais de chargement thermomécanique, une charge mécanique est d'abord appliquée
181 en tête du pieu. Ensuite, le pieu est refroidi et/ou réchauffé pendant que la charge mécanique
182 est maintenue constante. L'amplitude des cycles thermiques est de $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ autour de la
183 température initiale du pieu. Cette amplitude est très petite par rapport à des variations de
184 température observées dans des pieux énergétiques qui peuvent atteindre jusqu'à $\pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ (Di
185 Donna et Laloui, 2015). Effectivement, dans le cas d'un pieu modèle réduit, les dimensions du
186 pieu modèle sont de l'ordre de 20 fois plus petites que celles d'un pieu réel. En conséquence, sa
187 déformation sous contrainte mécanique est aussi 20 fois plus petite (Laloui et al., 2006). Pour
188 cette raison, l'amplitude de la variation de température a été diminuée par 20 fois afin de
189 réduire les déformations thermiques de 20 fois dans le modèle réduit (voir Tableau 1).

190 ***Résultats principaux***

191 Plusieurs essais ont été réalisés. Dans cet article quelques résultats représentatifs sont
192 présentés. Dans la suite, les résultats obtenus sur du sable sec sont d'abord présentés. Ensuite,
193 nous présentons les résultats obtenus avec de l'argile à l'état saturé.

194 ***Résultats avec du sable sec***

195 La figure 3 présente les résultats obtenus sur trois essais de chargement mécanique. Dans cette
196 figure, le déplacement normalisé est égal au déplacement mesuré en tête du pieu divisé par le
197 diamètre du pieu. Les résultats obtenus avec trois essais sont très similaires montrant la bonne
198 répétabilité de la procédure expérimentale adoptée. A partir de ces courbes, la charge de
199 rupture du pieu (correspondant à un déplacement normalisé de 10%) a été estimée à 500 N.

200

201 Dans la figure 4, les résultats obtenus pendant un cycle thermique (sous une charge axiale de
202 150 N, soit 30% de la charge de rupture) sont présentés. La température du pieu (ligne rouge) a
203 été maintenue à 22 °C pendant 2 h. Ensuite, elle a été montée à près de 23 °C pendant 2 h. A $t =$
204 4 h, le pieu a été refroidi à 21 °C. Deux heures après, la température du pieu est remontée à sa
205 valeur initiale (22 °C). Pendant ces cycles, la température mesurée en différents points du sol a
206 varié selon la température du pieu montrant un échange thermique entre le pieu et le sol. Les
207 simulations numériques réalisées par Yavari (2014) ont prouvé que la conduction thermique est
208 le mécanisme principal dans cet échange thermique. Concernant le déplacement en tête du
209 pieu, un tassement a été observé à $t = 4$ h correspondant au refroidissement du pieu tandis que
210 les phases de réchauffement n'ont pas engendré de déplacement du pieu.

211
212 Pour mieux comprendre le comportement du pieu pendant un cycle thermique, les résultats de
213 la Figure 4 sont présentés dans la Figure 5 sous une autre forme. Dans cette figure, le
214 déplacement normalisé (remis à zéro au début du cycle) est tracé en fonction de la
215 température du pieu (ligne bleue). A partir de l'état initial, quand la température du pieu
216 augmente d'un degré, le déplacement reste presque inchangé. Par contre, quand la
217 température diminue, le déplacement varie (correspondant à un tassement à la tête du pieu)
218 avec la baisse de température. Pendant la dernière étape de réchauffement, le déplacement
219 reste à nouveau inchangé. Dans cette figure, une courbe d'expansion libre est ajoutée pour
220 représenter le déplacement en tête du pieu dans le cas où la pointe du pieu est fixée et le pieu
221 est libre de dilater/contracter suivant sa température avec le coefficient d'expansion thermique
222 de l'aluminium ($23 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$). Les résultats montrent que le déplacement mesuré pendant la
223 phase de refroidissement est parallèle à la courbe d'expansion libre calculée. Cela signifie que
224 la pointe du pieu n'a pas bougé et le pieu était libre à se contracter pendant cette étape. De
225 plus, si l'on considère que la présence du sol a peu d'influence sur la déformation thermique du
226 pieu, on peut supposer que la pointe du pieu a tassé pendant les deux étapes d'échauffement.
227 D'ailleurs, à l'état final, quand la température du pieu est revenue à la température initiale, un
228 tassement cumulé irréversible est observé.

229
230 Ce tassement irréversible est tracé en fonction du nombre de cycles thermiques pour des essais
231 soumis à différentes charges mécaniques (Figure 6). Quatre essais ont été réalisés sous quatre
232 valeurs de charge mécanique différentes, correspondant à 0%, 20%, 40% et 60% de la charge
233 de rupture du pieu. Trente cycles thermiques ont été réalisés pour chaque essai. Quand le pieu
234 n'est soumis à aucune charge mécanique (0%), le tassement irréversible thermique est
235 négligeable. Dans les autres cas, plus la charge mécanique est grande, plus le tassement
236 irréversible thermique est important. De plus, pour une charge mécanique donnée, le
237 tassement irréversible cumulé augmente rapidement pendant les premiers cycles thermiques
238 puis l'augmentation ralentit progressivement avec le nombre de cycles. Cette tendance est en
239 accord avec le modèle proposé par Pasten et Santamarina (2014) dont les résultats sont
240 présentés sous forme des lignes continues dans la Figure 6.

241
242 Dans la Figure 7, le profil de l'effort axial le long du pieu est présenté pour un essai (20% de la
243 charge de rupture, effort en tête égal à 100 N). Le profil à l'état initial ressemble à un profil
244 classique d'un pieu sous charge axiale (l'effort axial diminue progressivement avec la
245 profondeur). Le premier échauffement augmente légèrement l'effort axial et le premier
246 refroidissement le diminue. Après 30 cycles thermiques, les profils deviennent presque
247 verticaux, comme si les cycles thermiques avaient annulé le frottement entre le sable et le pieu.
248 Il est aussi noté que l'effort axial mesuré dans pieu (à 100 mm de profondeur) est supérieur à la
249 charge imposée. Il est difficile d'attribuer totalement cette différence à un frottement négatif
250 sur la partie haute du pieu mais nous n'avons pas trouvé d'autre explication plus plausible.

251

252 La Figure 8 présente les pressions totales (verticale et horizontale) mesurées à 50 mm sous la
253 pointe du pieu. Les valeurs à l'état initial (10 kPa en pression verticale et 5 kPa en pression
254 horizontale) correspondent aux valeurs théoriques estimées à partir du poids du sol en
255 utilisant un coefficient de pression des terres au repos de 0,5. D'après la relation proposée par
256 Garnier (2001) pour du sable de Fontainebleau normalement consolidé, ce coefficient est égal à
257 0,4. Dans cette étude, le sol serait légèrement surconsolidé et le coefficient de pression des
258 terres au repos devrait être plus grand que 0,4. Ces pressions ont augmenté avec l'application
259 des charges mécaniques mais l'effet des cycles thermiques (sous charge mécanique constante)
260 n'est pas visible.

261 ***Résultats avec de l'argile saturée***

262 La figure 9 présente les résultats obtenus dans le cadre la thèse de Nguyen (2017). Après la
263 saturation du massif d'argile, un essai de chargement mécanique a été réalisé avec un
264 chargement jusqu'à la charge de rupture suivi d'un déchargement complet. La charge de
265 rupture, correspondant à un tassement de 2 mm, c'est-à-dire 10% du diamètre du pieu, a été
266 estimée à 500 N d'après cet essai. Ensuite, les essais thermomécaniques ont été réalisés avec le
267 même massif. D'abord, sans charge en tête du pieu, 30 cycles thermiques ($20\pm 1^\circ\text{C}$) ont été
268 réalisés. A la fin de ces cycles, la charge en tête a été augmentée à 100 N (20% de la charge de
269 rupture) avant la réalisation de 30 cycles thermiques. Cette procédure a été répétée pour 40%
270 et 60% de la charge de rupture.

271
272 Le comportement du pieu sous chaque cycle est similaire à celui dans du sable sec
273 (soulèvement de la tête du pieu pendant l'échauffement et tassement pendant le
274 refroidissement ; possible déplacement irréversible après un cycle). Le déplacement
275 irréversible correspondant à chaque série de 30 cycles thermiques) est présenté dans la figure
276 10. Pour la série sans charge verticale (0%), les premiers cycles thermiques ont entraîné un
277 soulèvement correspondant à 0,15% du diamètre du pieu puis le déplacement irréversible reste
278 constant pendant les cycles suivants. Pour les autres séries, les premiers cycles thermiques ont
279 causé un tassement irréversible. Ce tassement reste stable pour les cycles suivants. Ces
280 résultats ont été bien reproduits par une modélisation numérique utilisant la méthode des
281 éléments finis (Nguyen et al., 2019). Le soulèvement observé dans le cas de 0% de charge
282 mécanique a été expliqué par le relâchement de contrainte autour du pieu suite au
283 déchargement de l'essai mécanique (voir Figure 9). Le tassement irréversible supplémentaire
284 observé dans les cas sous charge mécanique non nulle est expliqué par le fait que les cycles
285 thermiques réduisent progressivement le frottement entre le sol et le pieu (phénomène aussi
286 observé pour le sable sec, montré dans la figure 7). Pour le cas d'une charge égale à 60% de la
287 charge de rupture, à partir de 10 cycles thermiques, le pieu continue à tasser quand le nombre
288 de cycles augmente. Nous avons attribué ce phénomène à un problème technique que nous
289 n'avons pas pu expliquer.

290 ***Discussions***

291 Dans cet article les résultats obtenus dans différents travaux menés à l'École des Ponts
292 ParisTech depuis 2010 pour étudier le comportement thermomécanique d'un pieu énergétique
293 par modèle réduit $1\times g$ sont présentés. Dans cette section, nous discutons les choix techniques
294 adoptés ainsi que les phénomènes observés.

295
296 D'abord, le pieu modèle est un tube à paroi mince en aluminium à bout fermé. Il est choisi
297 pour représenter un pieu rigide par rapport au sol. En termes de transfert thermique, on

298 considère que la conductivité thermique du pieu est très grande par rapport à celle du sol, ce
299 qui implique que la température du pieu est considérée homogène pendant l'essai. Ces
300 hypothèses sont des choix pour simplifier le modèle. En réalité, la plupart des pieux
301 énergétiques sont les pieux forés et leur réalisation en modèle réduit serait très complexe.

302
303 Le système de chargement mécanique à la tête du pieu par un réservoir d'eau permet
304 d'augmenter progressivement la charge appliquée à la tête du pieu en remplissant le réservoir.
305 De plus, il permet de maintenir cette charge constante pendant toute la durée d'essai quand la
306 température est variée. Dans les essais préliminaires, cette charge a été assurée par
307 l'installation de poids en tête du pieu (Kalantidou et al., 2012). Cependant, la mise en place des
308 poids a causé de petits chocs sur la tête du pieu et a influencé légèrement les résultats. Pour
309 maintenir la charge constante à la tête du pieu, un système électronique asservi (par exemple
310 avec une pompe hydraulique et un asservissement basé sur le lecteur du capteur de force)
311 aurait pu être utilisé mais ce système serait plus difficile à mettre en place.

312
313 Les capteurs de pression totale ont été utilisés dans les essais avec du sable sec. La variation de
314 contrainte dans le sol a bien été observée sous chargement mécanique. Par contre, sous des
315 cycles thermiques, ces variations de contraintes sont tellement faibles que les capteurs n'ont
316 pas pu les mesurer. Ces capteurs n'ont pas été utilisés pour les essais dans l'argile car le
317 compactage de l'argile (par une dame vibrante) les aurait endommagés. D'ailleurs, pour le cas
318 de l'argile à l'état saturé, des capteurs de pression totale devraient être accompagnés par des
319 capteurs de pression interstitielle pour avoir une analyse complète de l'état de contrainte.

320
321 Les jauges de déformations collées sur le pieu modèle ont aussi montré correctement la
322 variation du profil de l'effort normal dans le pieu sous chargement mécanique. Lors de cycles
323 thermiques, la variation de ces profils est plus difficile à mesurer car la variation de
324 température entraîne une variation volumique du pieu lui-même, sans compter l'effet de l'état
325 de contraintes sur la déformation du pieu. D'ailleurs, ses jauges ne donnaient plus de signaux
326 quand le sol a été saturé d'eau. Il est possible que ses jauges ne fonctionnent pas quand elles
327 sont en contact avec de l'eau. L'utilisation de fibres optiques (Li et al., 2019) sera une
328 alternative intéressante pour éviter ce problème.

329
330 Concernant le programme d'essai, plusieurs massifs de sables ont été créés et testés. Les
331 résultats montrent une bonne répétabilité des procédures expérimentales appliquées. Par
332 contre, pour l'essai visant à étudier le comportement à long terme sous 30 cycles thermiques,
333 un seul massif de sable a été utilisé pour différentes charges en tête (Figure 8). Nous avons
334 adopté ce choix pour minimiser l'effet de la préparation d'éprouvette sur les résultats afin de
335 mieux observer l'effet de la charge mécanique en tête du pieu. Par contre, pour le cas de l'essai
336 sur l'argile saturée, un seul massif de sol a été utilisé pour l'essai mécanique et les essais
337 thermomécaniques (Figure 9). En fait, la préparation d'un massif d'argile prend beaucoup plus
338 de temps (plusieurs mois) et il est donc difficile de multiplier le nombre d'éprouvettes.

339
340 Les résultats obtenus dans ces travaux ont contribué à la compréhension du comportement
341 thermomécanique d'un pieu géothermique. D'abord, les cycles thermiques entraînent des
342 cycles de dilatation/contraction du pieu lui-même. Dans le sol, sous contraintes et en
343 interaction avec le sol, ces cycles de dilatation/contraction ont tendance à réduire (relâcher) le
344 frottement entre le sol et le pieu. Cela entraîne par la suite des tassements irréversibles si le
345 pieu est soumis à une charge en tête importante. Ces résultats sont en accord avec d'autres
346 observations lors d'essais in situ en vraie grandeur, essais en centrifugeuse ou des calculs
347 numériques/théoriques.

348

349 Les contributions originales de la modélisation physique en condition 1×g ont été
350 principalement la réalisation des essais à long terme avec 30 cycles thermiques. Un cycle
351 thermique, qui nécessite 8 h dans ces études, prend plusieurs mois pour un essai en vraie
352 grandeur (Nguyen, 2017). Il serait donc difficile de réaliser ces essais à long terme en vraie
353 grandeur. Dans ces études, ces essais ont été accompagnés des calculs numériques pour mieux
354 comprendre les phénomènes. Les limitations principales de ce travail sont liées à la
355 considération des effets d'échelle pour différents phénomènes mécaniques et physiques. Pour
356 prendre en compte tous ces effets, il faudrait utiliser un pieu modèle avec des matériaux plus
357 souples que le béton (en plâtre, par exemple, comme dans le cas de Zhao et al., 2020) avec une
358 conductivité thermique faible. Les propriétés mécanique et thermique du sol seraient aussi à
359 modifier. D'ailleurs, les facteurs d'échelle devraient être pris en compte d'une manière plus
360 approfondie dans l'interprétation des résultats.

361 **Conclusions**

362 Un modèle réduit a été développé pour étudier le comportement thermomécanique d'un pieu
363 énergétique. A côté des essais mécaniques pour étudier le comportement du pieu sous charge
364 statique axiale, des essais thermomécaniques ont été réalisés. Ces essais consistent à maintenir
365 la charge mécanique constante en variant la température du pieu pour simuler les cycles
366 thermiques annuels. Le comportement du pieu est observé via les capteurs de force et de
367 déplacement en tête ; les capteurs de température et de contrainte installés sur le pieu et dans
368 le sol complètent le système d'observation de l'interaction sol-pieu. Les essais ont été réalisés
369 avec du sable sec et de l'argile à l'état saturé.

370
371 Les résultats obtenus ont montré une bonne répétabilité des procédures expérimentales
372 adoptées, un bon accord avec les résultats observés par d'autres méthodes (courbe de
373 tassement en fonction de la charge mécanique appliquée ; dilatation/contraction du pieu sous
374 un cycle thermique ; tassement irréversible sous un cycle thermique ; transfert thermique dans
375 le sol ; etc). Ces résultats confirment la validité du modèle physique 1×g pour étudier le
376 comportement thermomécanique d'un pieu énergétique.

377
378 Grâce à ce modèle, le comportement à long terme d'un pieu, sous 30 cycles thermiques
379 annuels, et sous différentes charges mécaniques, a été étudié. Les résultats montrent un
380 déplacement irréversible lors des premiers cycles thermiques tandis que les cycles suivants
381 entraînent moins de déplacement irréversible supplémentaire. Ces résultats ont été discutés à
382 la lumière de calculs numériques et de modèles théoriques pour mieux comprendre les
383 mécanismes mis en jeu.

384 **Remerciements**

385 Une partie de ces travaux a été financée par l'Agence Nationale de la Recherche via le projet
386 PINRJ (ANR-10-JCJC-0908).

387 **Liste de références bibliographiques**

388 AFNOR, 1999. Essai statique de pieu sous un effort axial. NF P 94-150, pp.1-28.

389 Bourne-Webb PJ, Amatya B, Soga K, et al., 2009. Energy pile test at Lambeth College, London:
390 geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Géotechnique* 59: 237–
391 248. Doi: 10.1680/geot.2009.59.3.237

392 Di Donna A, Laloui L, 2015. Numerical analysis of the geotechnical behaviour of energy piles.
393 *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 39(8): 861–888.
394 Doi: 10.1002/nag.2341

395 Feia S, Sulem S, Canou J, Ghabezloo S, Clain X, 2016. Changes in permeability of sand during
396 triaxial loading: effect of fine particles production. *Acta Geotechnica* 11: 1 – 19. Doi:
397 10.1007/s11400-014-0351-y

398 Frikha W, 2010. Etude sur modèle physique du renforcement d'une argile molle par colonnes
399 ballastées. Thèse de doctorat, École Nationale des Ingénieurs de Tunis.

400 Garnier J, 2001. Modèles physiques en géotechnique : I – Evolution des techniques
401 expérimentales et domaines d'application. *Revue Française de Géotechnique* 97 : 3 – 29. Doi :
402 10.1051/geotech/2001097003

403 Kalantidou A, Tang AM, Pereira JM, Hassen G, 2012. Preliminary study on the mechanical
404 behaviour of heat exchanger pile in physical model. *Géotechnique* 62(11) : 1047 - 1051. Doi :
405 10.1680/geot.11.T.013

406 Laloui L, Moreni M, Vulliet L, 2003. Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et
407 échangeur de chaleur. *Canadian Geotechnical Journal* 40: 388–402. Doi: 10.1139/cgj-2014-0403

408 Laloui L, Nuth M, Vulliet L, 2006. Experimental and numerical investigations of the behaviour
409 of a heat exchanger pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in*
410 *Geomechanics* 30(8): 763–781. Doi: 10.1002/nag.499

411 Li ZS, Blanc M, Thorel L, 2020. Using FBGS to estimate the horizontal response of a monopile
412 in a geotechnical centrifuge. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics* 20(3):
413 164-174. Doi: 10.1680/jphmg.19.00022

414 Ng CWW, Shi C, Gunawan A, Laloui L, 2014. Centrifuge modelling of energy piles subjected to
415 heating and cooling cycles in clay. *Géotechnique Letters* 4: 310–316. Doi :
416 10.1680/geolett.14.00063

417 Ng CWW, Shi C, Gunawan A, Laloui L, Liu L, 2015. Centrifuge modelling of heating effects on
418 energy pile performance in saturated sand. *Canadian Geotechnical Journal* 52(8): 1045–1057.
419 Doi: 10.1139/cgj-2014-0301

420 Ng CWW, Ma QJ, Gunawan A, 2016. Horizontal stress change of energy piles subjected to
421 thermal cycles in sand. *Computers and Geotechnics* 78: 54–61. Doi:
422 10.1016/j.compgeo.2016.05.003

423 Nguyen VT, 2017. Thermal and thermo-mechanical behaviour of energy piles. Thèse de
424 doctorat, Université Paris-Est.

425 Nguyen VT, Tang AM, Pereira JM, 2017. Long-term thermo-mechanical behavior of energy pile
426 in dry sand. *Acta Geotechnica* 12(4): 729 – 737. Doi: 10.1007/s11440-017-0539-z

427 NguyenVT, Wu N, Gan Y, Pereira JM, Tang AM, 2019. Long-term thermo-mechanical
428 behaviour of energy pile in clay. *Environmental Geotechnics*. Doi: 10.1680/jenge.17.00106

429 Olgun CG, OzudogruSherif TY, Senol LA, 2015. Long-term performance of heat exchanger
430 piles. *Acta Geotechnica* 10(5): 553–569. Doi: 10.1007/s11440-014-0334-z

431 Pasten C, Santamarina JC, 2014. Thermally Induced Long-Term Displacement of Thermoactive
432 Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 140(5) : 6014003. Doi:
433 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001092

434 Saggu R, Chakraborty T, 2015. Cyclic Thermo-Mechanical Analysis of Energy Piles in Sand.
435 *Geotechnical and Geological Engineering* 33(2): 321-342. Doi: 10.1007/s10706-014-9798-8

436 Stewart MA, McCartney JS, 2013. Centrifuge Modeling of Soil-Structure Interaction in Energy
437 Foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 140(4): 4013044. Doi:
438 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001061

439 Suryatriyastuti ME, Mroueha H, Burlon S, 2014. A load transfer approach for studying the cyclic
440 behavior of thermo-active piles. *Computers and Geotechnics* 55: 378-391. Doi :
441 10.1016/j.compgeo.2013.09.021

442 Yavari N, 2014. Aspects géotechniques des pieux de fondation énergétiques. Thèse de doctorat,
443 Université Paris-Est.

444 Yavari, N., Tang, A.M., Pereira, J.M., Hassen, G., 2014a. A simple method for numerical
445 modelling of mechanical behaviour of an energy pile. *Géotechnique Letters* 4 : 119-124. Doi:
446 10.1680/geolett.13.00053

447 Yavari N, Tang AM, Pereira JM, Hassen G, 2014b. Experimental study on the mechanical
448 behaviour of a heat exchanger pile using physical modelling. *Acta Geotechnica* 9(3): 385-398.
449 Doi: 10.1007/s11440-014-0310-7

450 Yavari N, Tang AM, Pereira JM, Hassen G, 2016. Mechanical behaviour of a small-scale energy
451 pile in saturated clay. *Géotechnique* 66(11): 878 - 887. Doi : 10.1680/jgeot.15.T.026

452 Zhao R, Leung AK, Vitali D, Knappett JA, Zhou Z, 2020. Small-scale modelling of
453 thermomechanical behaviour of reinforced concrete energy piles in soils. *Journal of*
454 *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(4), 04020011. Doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-
455 5606.0002225
456

457
458
459
460

461

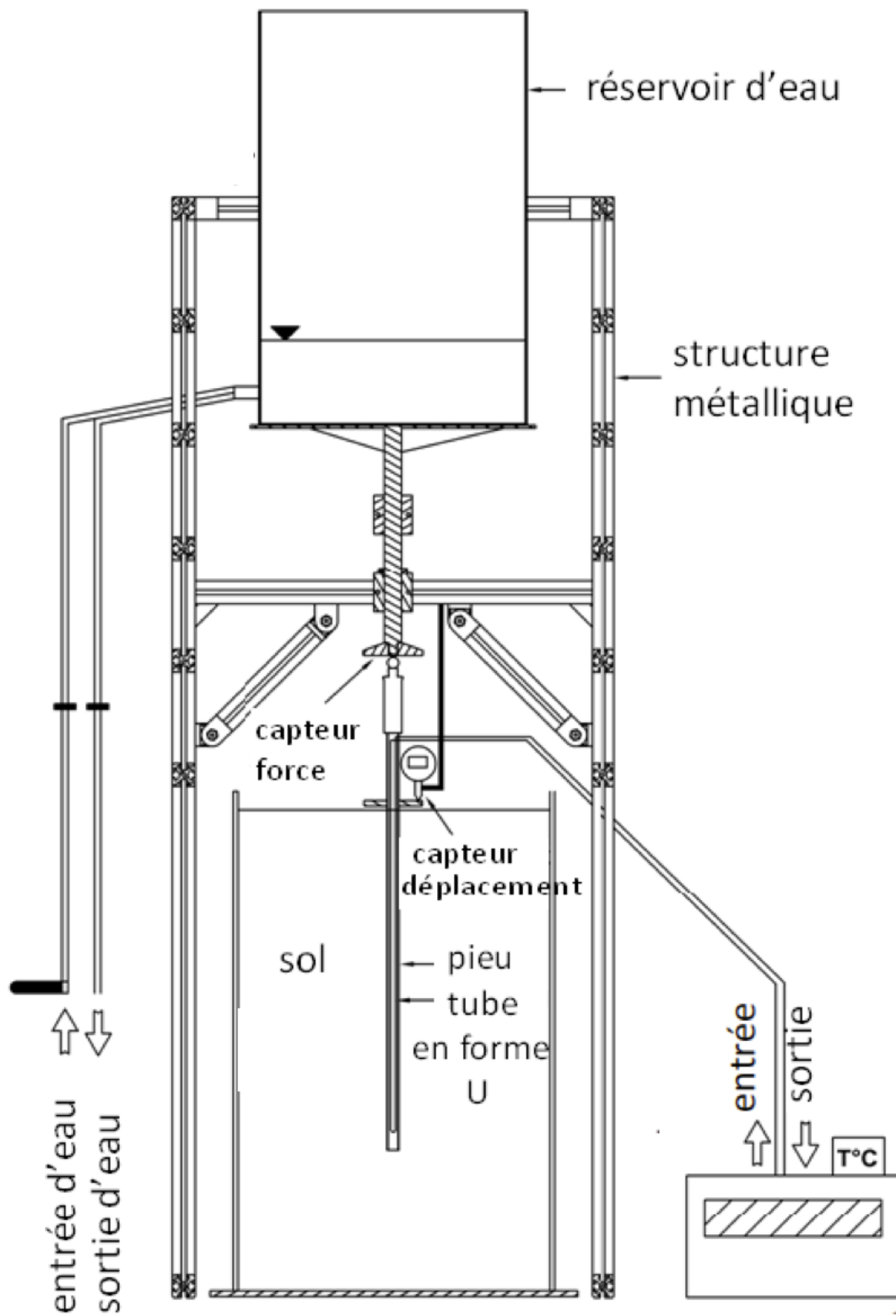
462

463 **Tableau 1. Propriétés du modèle physique et du prototype en vraie grandeur correspondant (*Properties of physical***
464 ***model and the corresponding prototype*)**

Propriété	Modèle physique 1g	Prototype en vraie grandeur
Longueur du pieu (m)	0,600	12,00
Diamètre du pieu (m)	0,020	0,40
Variation de température (°C)	1	20

465

466

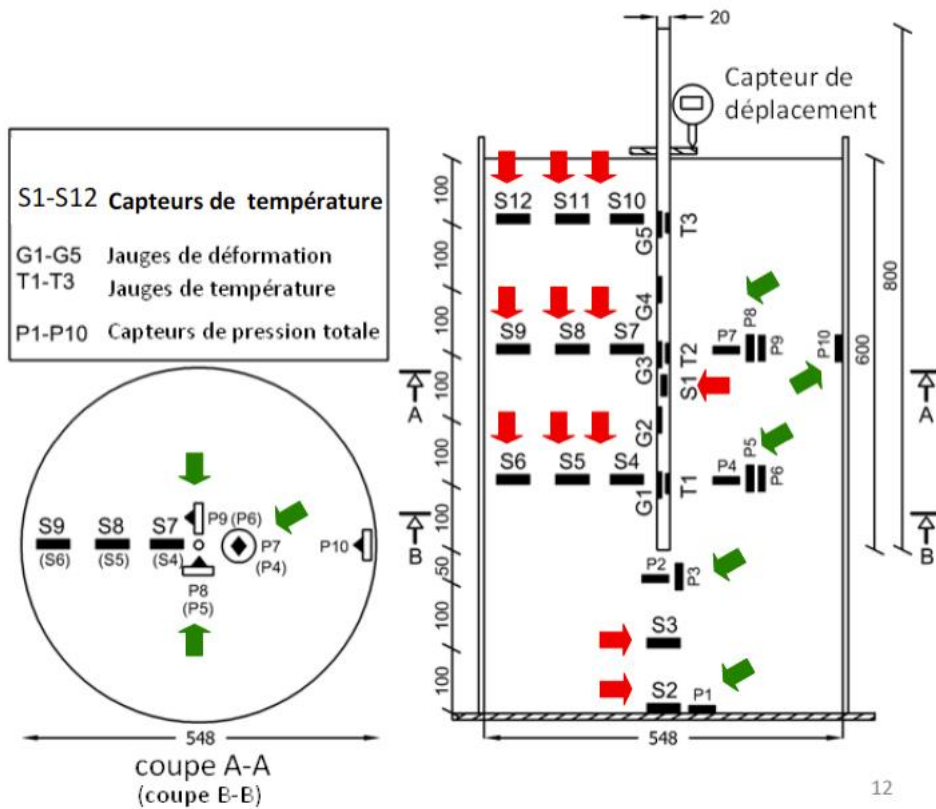


467

468

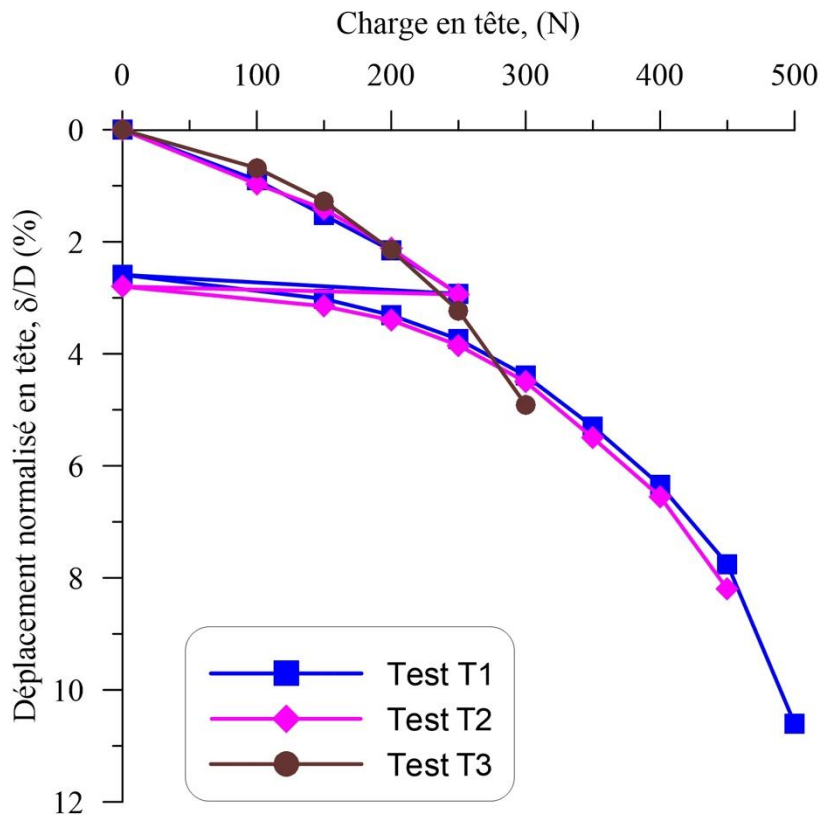
Figure 2. Schéma du modèle réduit d'un pieu géothermique (*Schematic view of the small-scale geothermal pile*)

469



471
 472

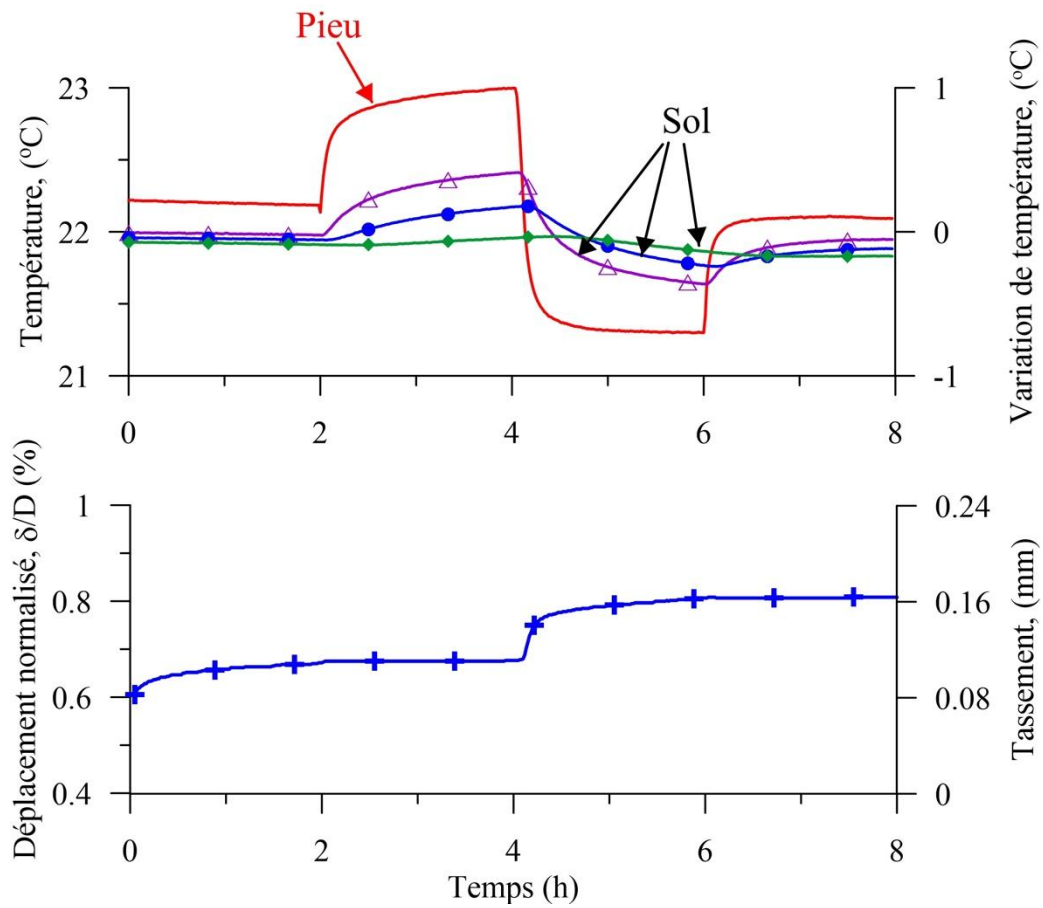
Figure 3. Détails des capteurs du modèle réduit (*Details of the sensors of the small-scale model*)



473

474 **Figure 4. Essais mécaniques sur du sable sec : courbes de chargement-déchargement. (Mechanical tests on dry sand :**
 475 **loading-unloading curves)**

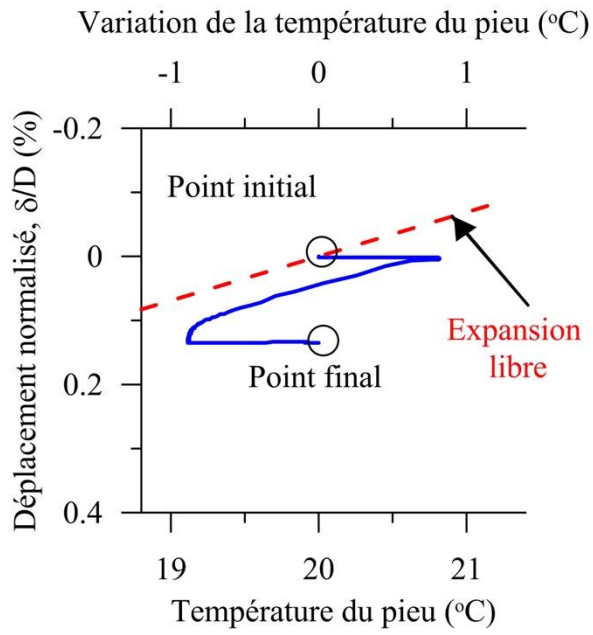
476



477

478 **Figure 5. Résultats typiques d'un cycle thermique : données en fonction du temps. (Typical results of a thermal**

479 **cycle : data versus time).**

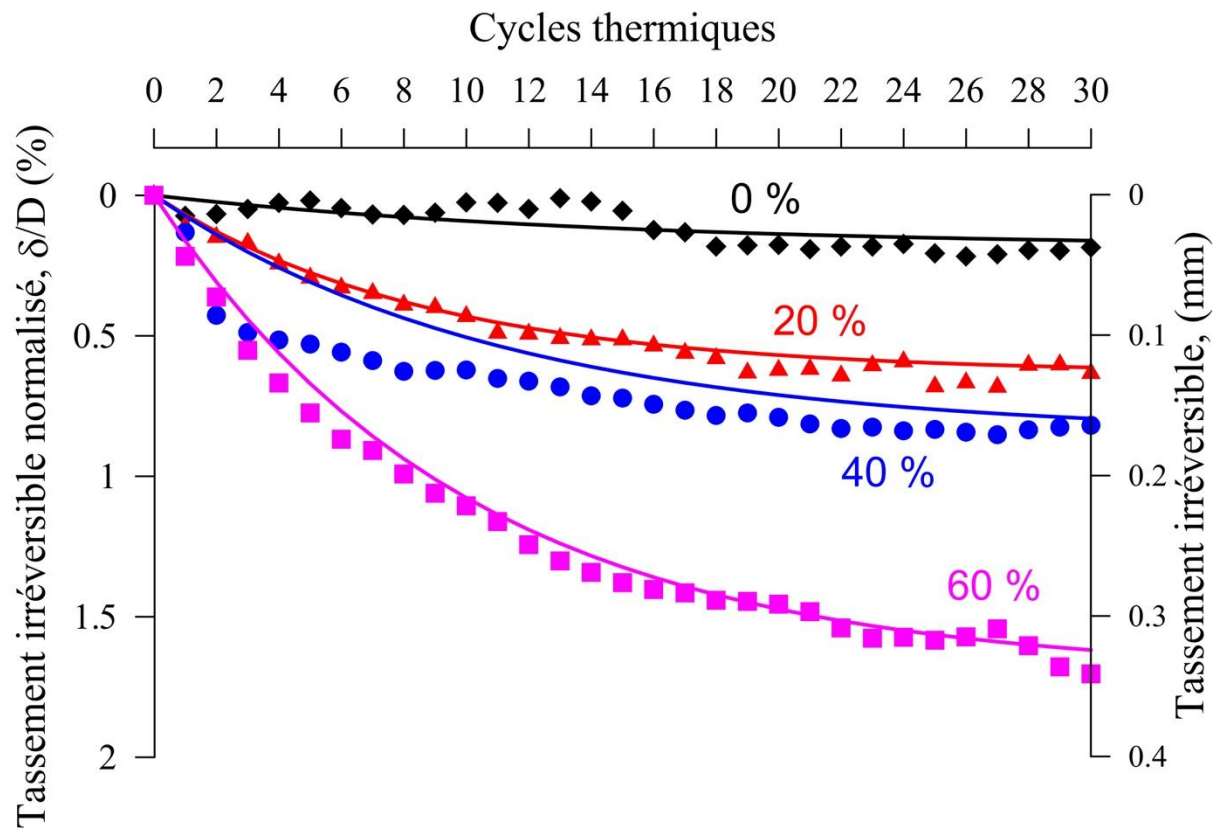


480

481 **Figure 6. Résultats typiques d'un cycle thermique : déplacement en fonction de la température du pieu. (Typical**

482 **results of a thermal cycle : displacement versus pile temperature).**

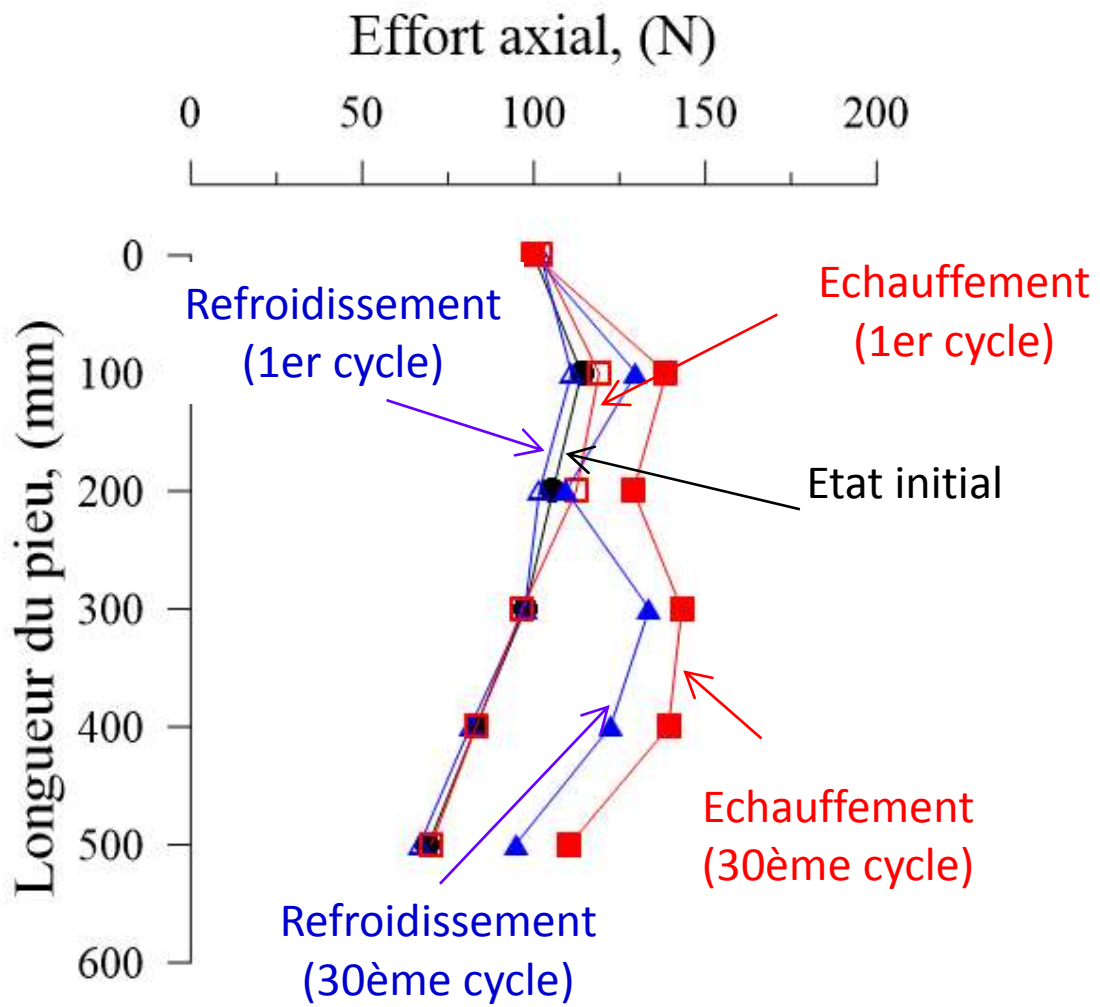
483



484

485 **Figure 7. Essais mécaniques sur du sable sec : tassement irréversible en fonction du nombre de cycles thermiques.**

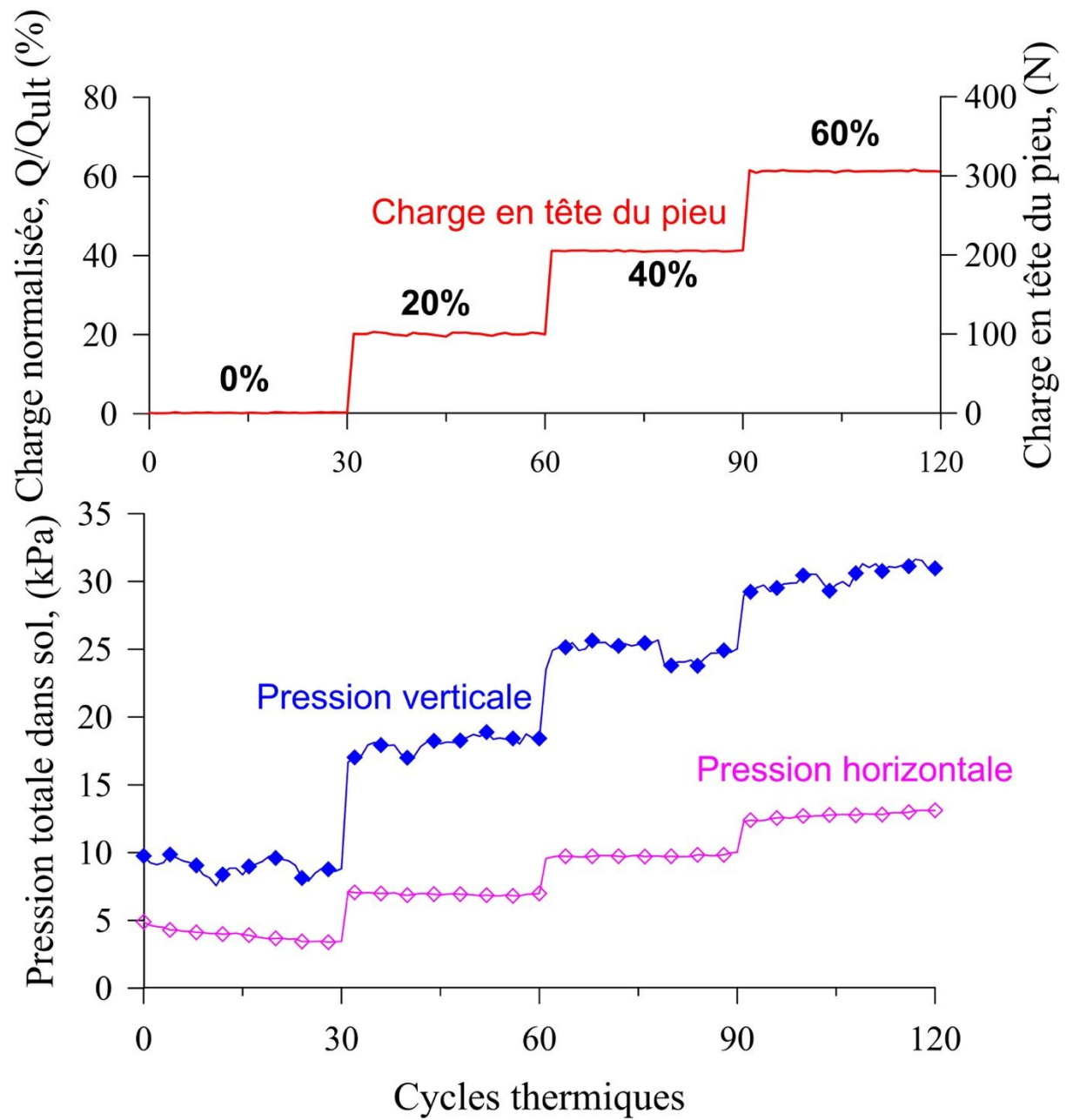
486 *(Mechanical tests on dry sand : irreversible settlement versus number of thermal cycles.)*



487

488 Figure 8. Essais mécaniques sur du sable sec : profils de l'effort axial. (*Mechanical tests on dry sand : axial load*

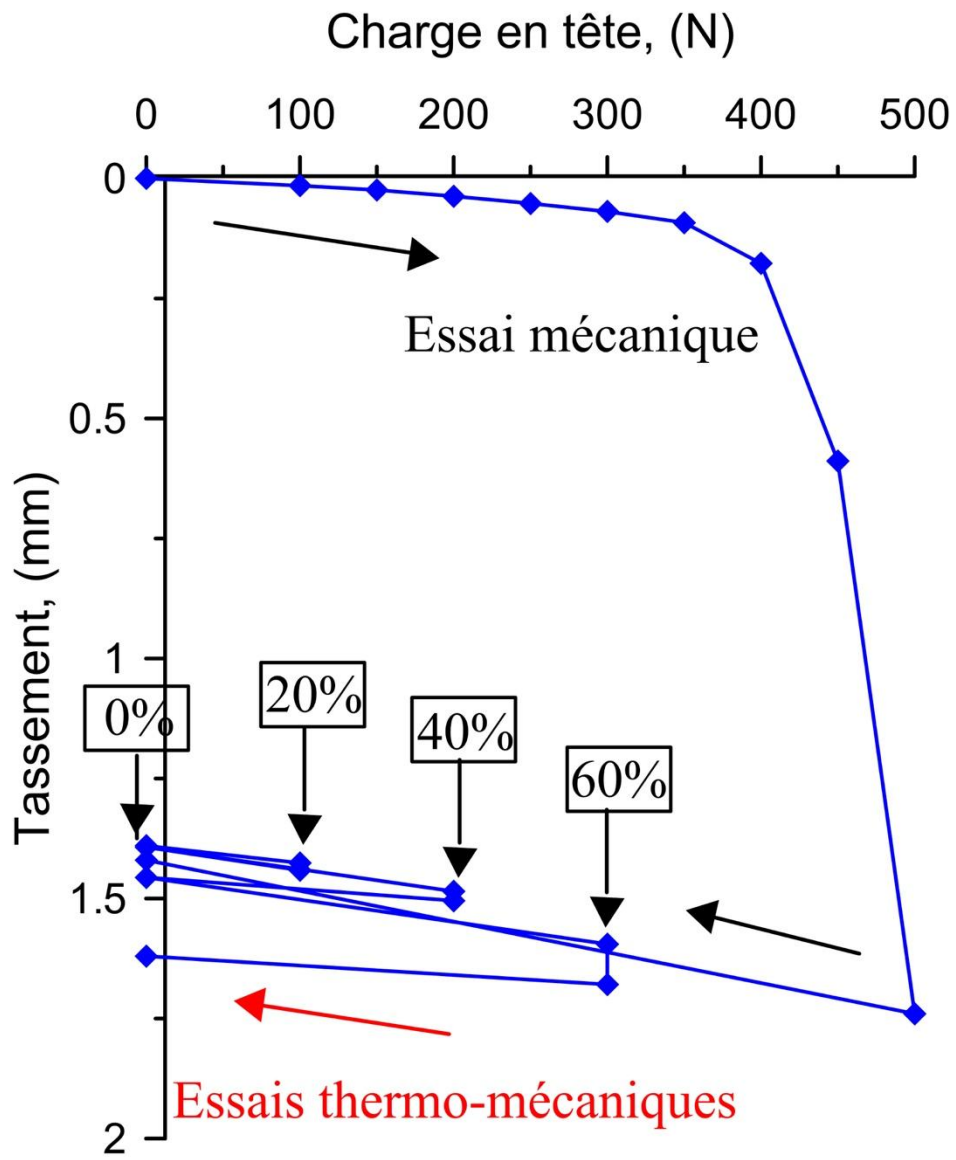
489 *profiles*)



490

491 **Figure 9. Essais mécaniques sur du sable sec : pressions dans le sol sous la pointe du pieu. (Mechanical tests on dry**

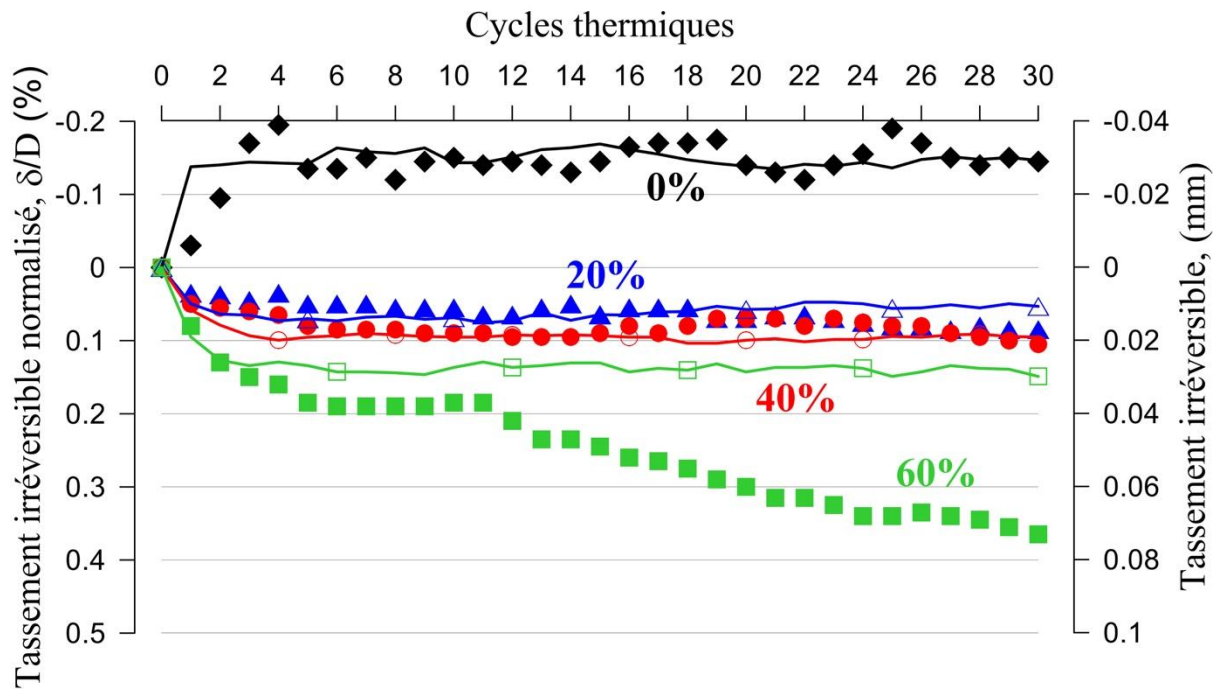
492 **sand : soil pressures beneath the pile toe)**



493

494

Figure 10. Résultats des essais sur l'argile saturée. (Results of tests on saturated clay).



495

496 **Figure 11. Essais mécaniques sur de l'argile saturée : tassement irréversible en fonction du nombre de cycles**

497 **thermiques. (Mechanical tests on saturated clay : irreversible settlement versus number of thermal cycles.)**

498