

# **Justifications géotechniques et structurales des géostrucures thermiques**

***Julien HABERT, Cerema Nord-Picardie***

***05 octobre 2017***

# Sommaire

---

Problématique

Quelques ordres de grandeur

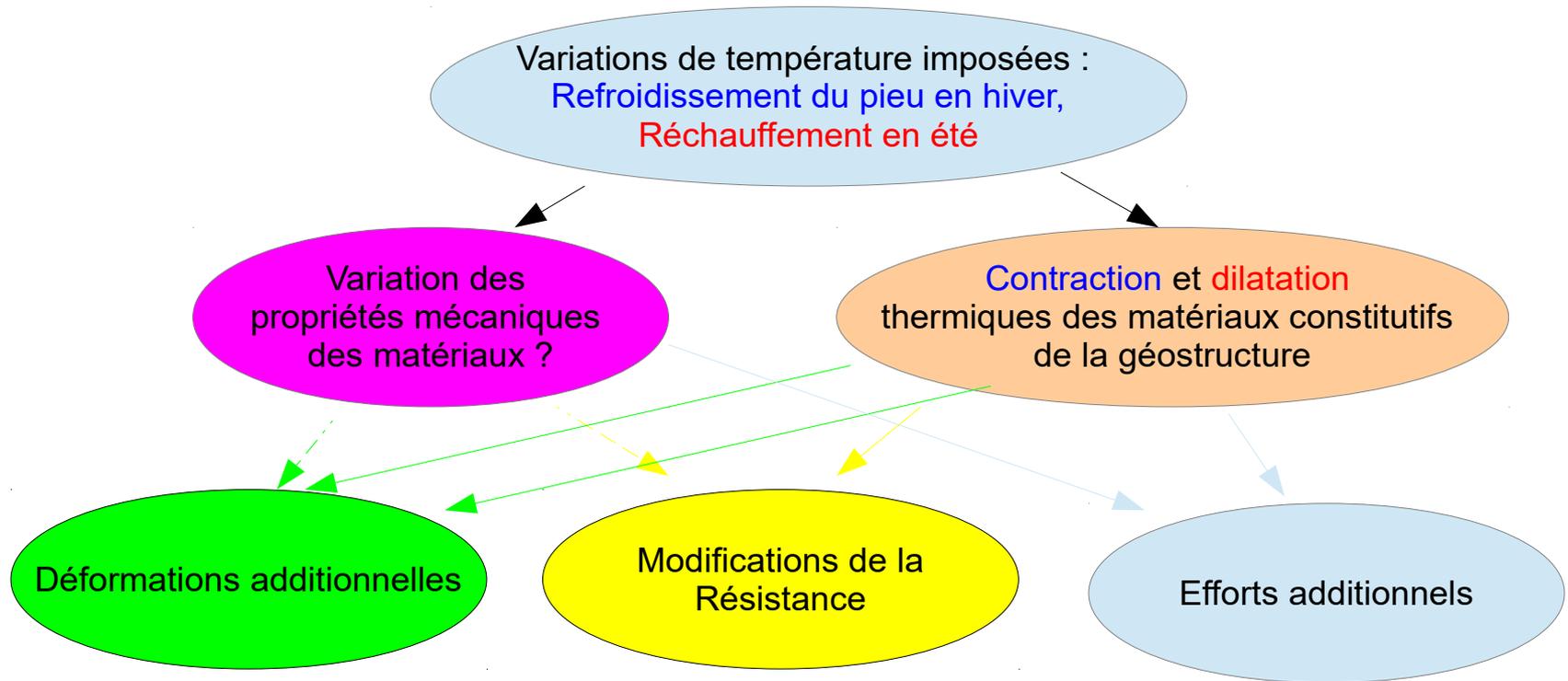
Pratique en dehors de la France

Le processus de justification proposé

Application aux pieux

Autres ouvrages

# Problématique



Par ailleurs, ces cas de chargement ne sont pas traités par les règlements de justification : exemple des pieux, norme NF P94-262 (2012) relative à la justification des fondations profondes...

# Quelques ordres de grandeur

---

Variation des propriétés mécaniques des matériaux ?



Les variations ne peuvent pas être mises en évidence dans la plage de température utilisée, pour des températures comprises entre 0 et 35°C.



***=> ce point ne nécessite pas de traitement particulier***

# Quelques ordres de grandeur : exemple des pieux

Contraction et dilatation  
thermiques du matériau constituant  
le pieu

Coefficient de dilatation thermique du  
béton et de l'acier  
 $\alpha_T = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

*Exemple pour une variation  $\Delta T$  de  $30^\circ\text{C}$*

Pieu supposé libre, Longueur  $L = 20 \text{ m}$

$$\text{Variation de longueur } \Delta L = \alpha_T TL \\ \Rightarrow 7,2 \text{ mm}$$

*Raccourcissement si le pieu est refroidi*  
*Allongement si le pieu est réchauffé*

Pieu supposé bloqué à ses extrémités (pas  
de frottement), Module  $E_y = 10000 \text{ MPa}$

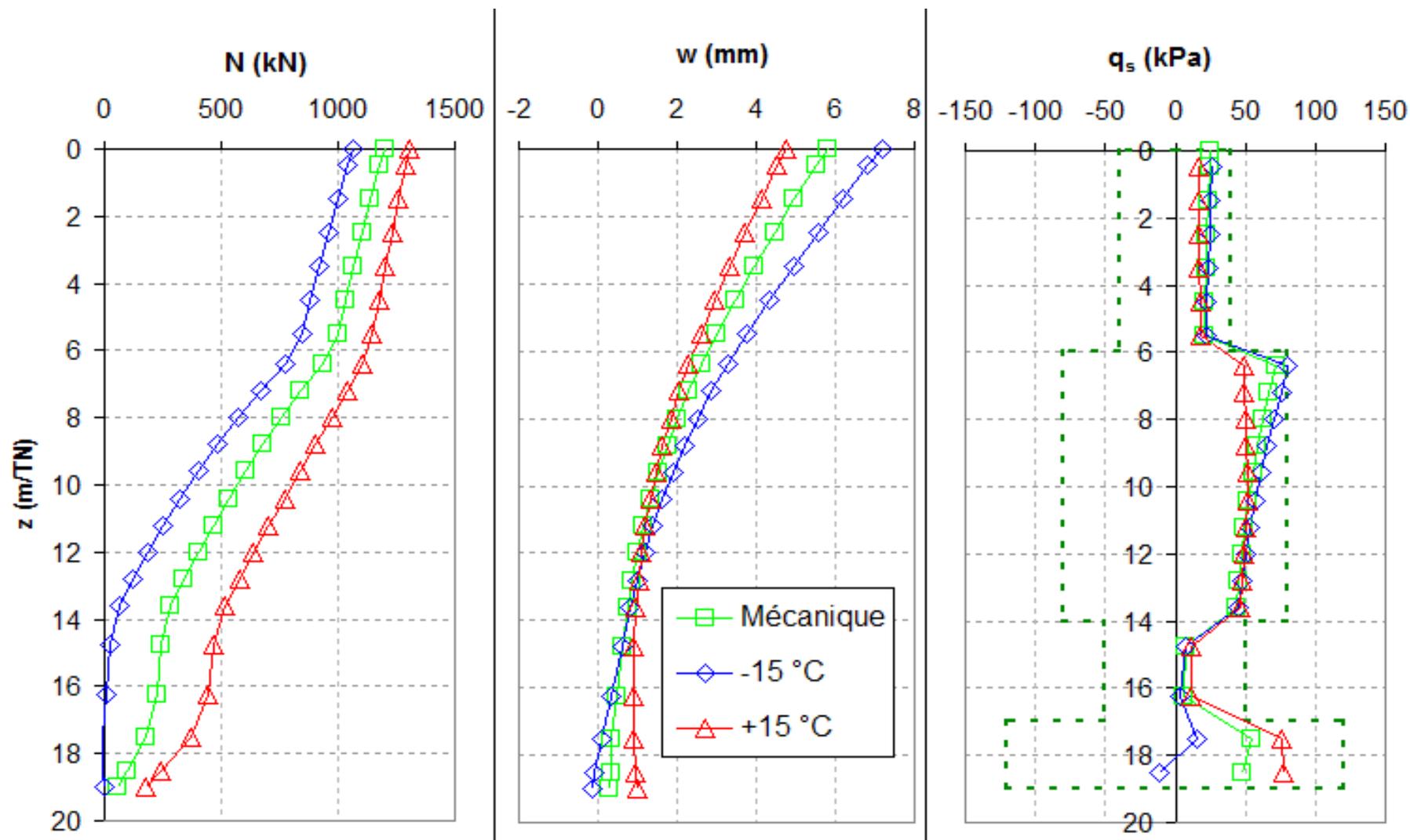
$$\text{Variation de contrainte normale } \Delta\sigma = E\alpha_T \\ \Rightarrow 3,600 \text{ MPa}$$

*Traction si le pieu est refroidi*  
*Compression si le pieu est réchauffé*

Mais le comportement réel est plus complexe:

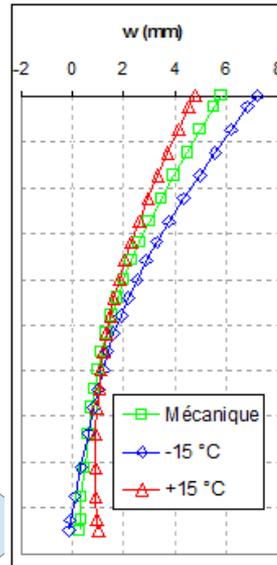
- *Souplesse sous la pointe et en tête du pieu* (structure portée)  $\Rightarrow$  des variations de contrainte sensiblement plus faibles sont obtenues
- *Frottements* le long du pieu,

# Quelques ordres de grandeur



# Quelques ordres de grandeur

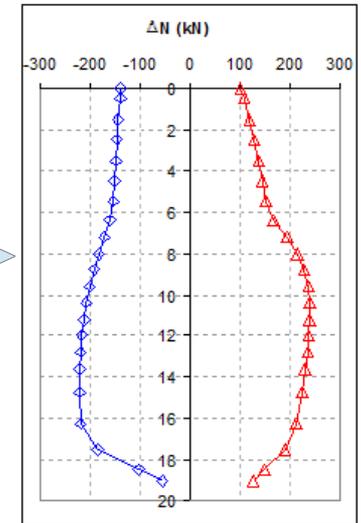
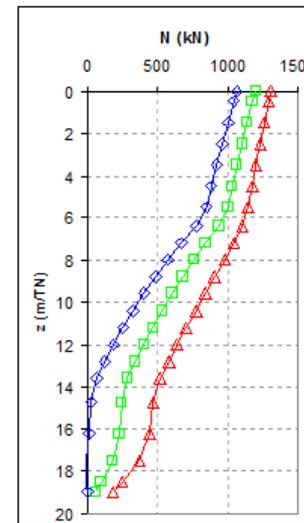
1/ Tassements en tête  $\Delta w_{th}$



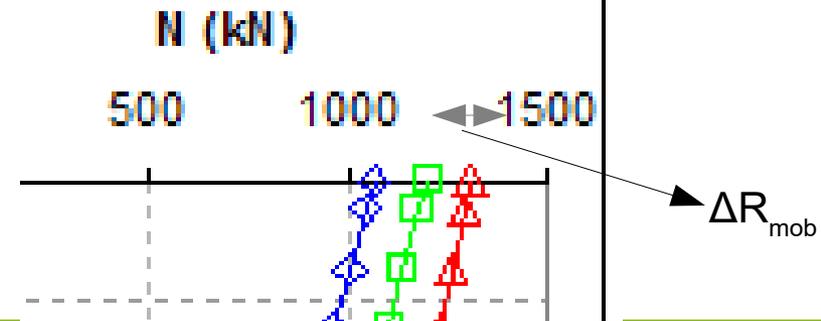
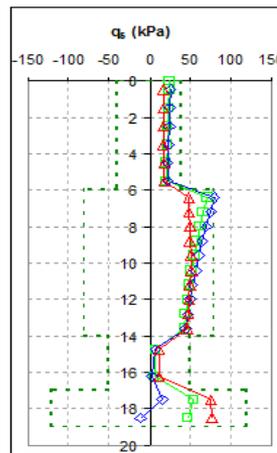
$$\Delta T = -15^{\circ}\text{C} \Rightarrow \Delta w_{th} = 1,4\text{mm}$$

$$\Delta T = +15^{\circ}\text{C} \Rightarrow \Delta w_{th} = -1,0\text{ mm}$$

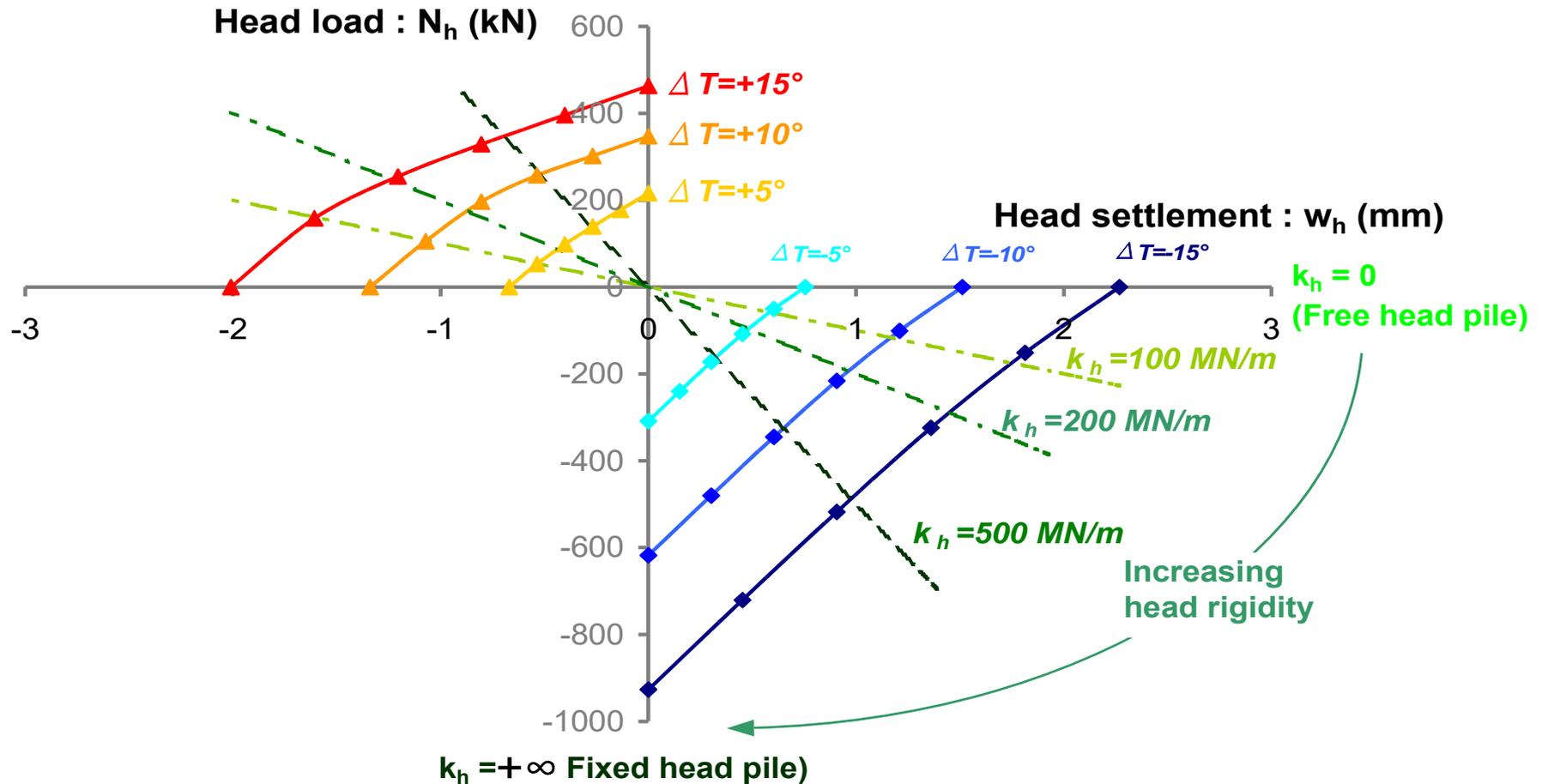
2/ Variations d'effort normale  $\Delta N_{th}(z)$



3/ Mobilisation additionnelle de la résistance  $\Delta R_{mob}$

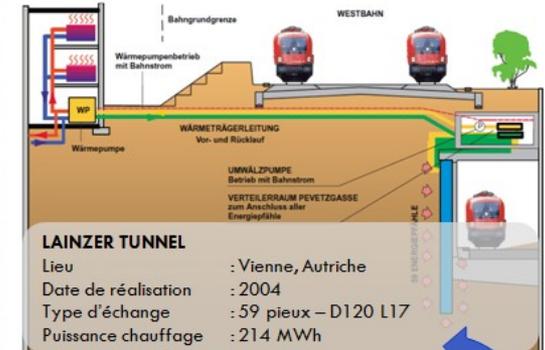
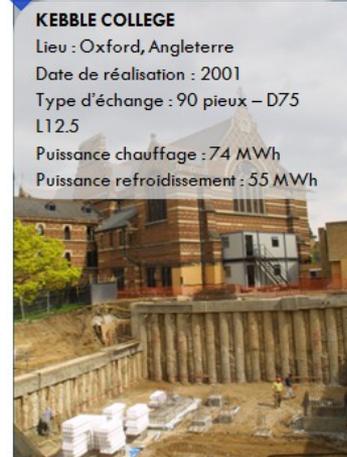
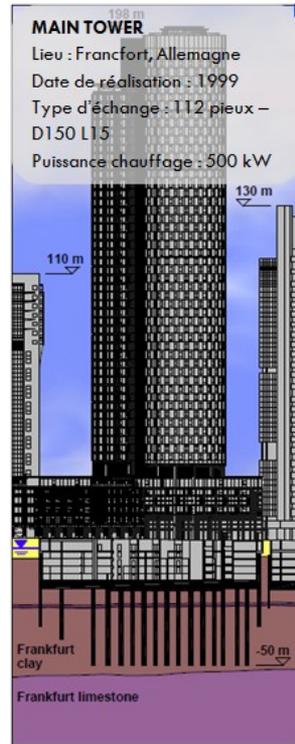


# Importance des conditions en tête de pieux



# Pratique en dehors de la France

Quelques exemples...



Les méthodes de justification des pieux "classiques" sont différentes, mais...

...les géostructures thermiques ne font pas l'objet de vérifications particulières

# Les principes de justification retenus

---

Principes de justification compatibles avec les normes de calcul valables pour les géostructures non thermoactives

Eurocodes

Eurocode 7 : NF  
EN 1997-1

Eurocodes  
structuraux  
\* NF EN 1992  
\* NF EN 1993

NF P94-262 :  
Fondations  
profondes

NF P-94-282 :  
Ecrans de  
soutènement

# Les principes de justification retenus : exemple des pieux

Un pieu énergétique se distingue des pieux « classiques » uniquement par le **chargement thermique supplémentaire**

Le chargement :

- ne s'applique pas en tête
- résulte de déformations internes (d'origine thermique)

Les déplacements sous chargement thermique doivent être estimés

L'appréhension du comportement d'un d'un pieu géothermique nécessite un **calcul d'interaction sol-structure.**

# Les principes de justification retenus : exemple des pieux

Différentes « technologies » de pieu « classiques » peuvent a priori être énergétiques

Pieux forés

Pieux tarière creuse

Pieux foncés

Pieux vissés

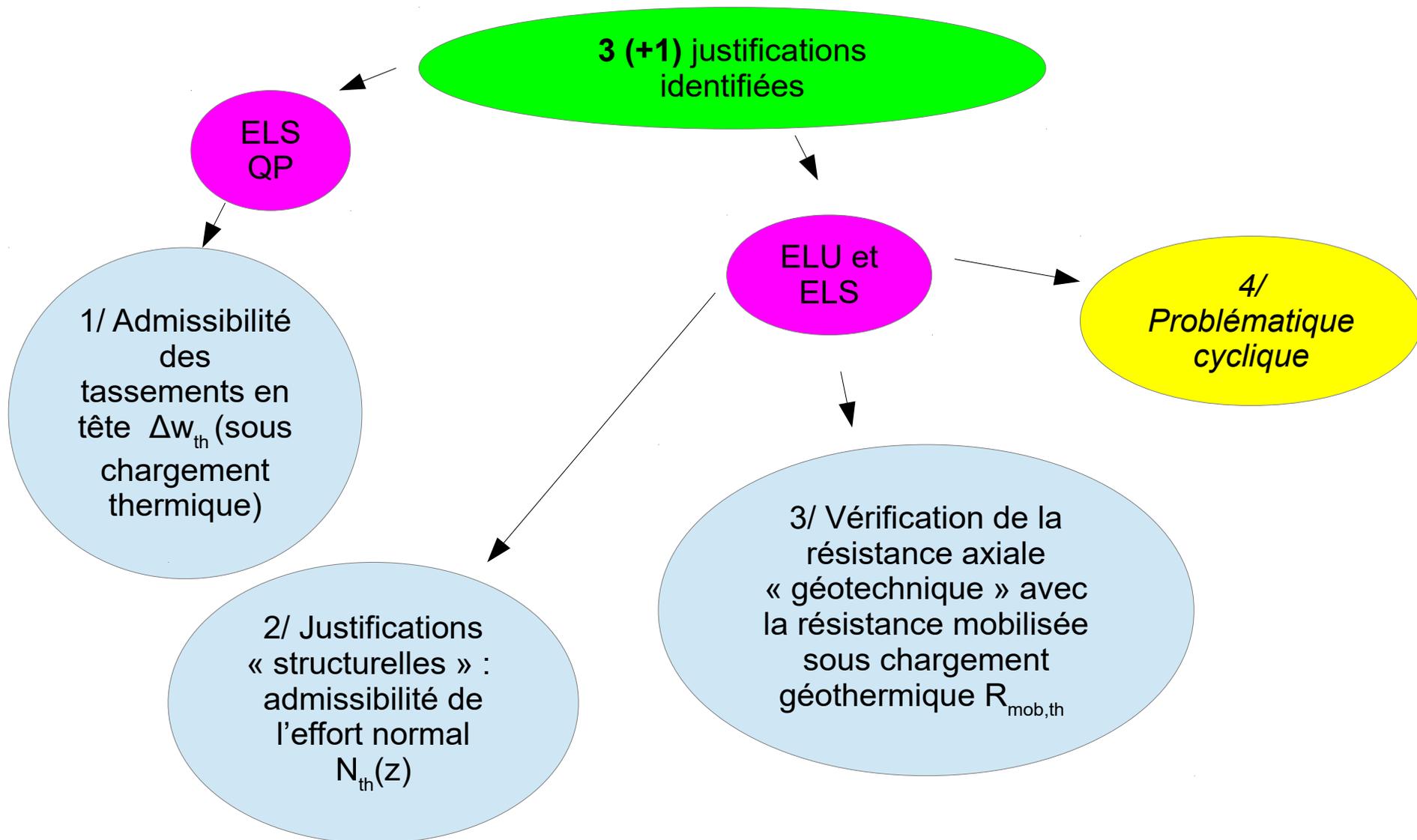
Les propriétés mécaniques des matériaux n'évoluent pas dans les plages de température concernées

Mise en œuvre identique à des pieux « classiques » :

- Mode de soutien des parois/de fonçage
- Bétonnage éventuel
- Matériaux utilisés

**Les propriétés mécaniques**  
(résistances sous la base et par frottement) et **les facteurs de sécurité** sont identiques à ceux d'un pieu « classique »

# Les principes de justification retenus : exemple des pieux



# Les principes de justification retenus

Selon le formalisme des Eurocodes, les effets géothermiques (comme les autres charges) doivent être insérés dans les combinaisons d'action

Statut des charges géothermiques : charges variables

Nécessite la définition des coefficients de combinaison  $\Psi_i$

$$\Psi_0 = 0,6$$

$$\Psi_1 = 0,5$$

$$\Psi_2 = 0,2$$

Différentes combinaisons d'action :

ELU fondamental :

\* Si T est défavorable :  $1.35G + 1.5Q + 1.5\Delta T$

\* Si T est favorable :  $1.35G + 1.5Q + \Delta T$

ELS caractéristique :  $G + Q + \Psi_0 \Delta T$  et  $G + \Delta T + \Psi_0 Q$

ELS quasi-permanents, etc...

# Les principes de justification retenus : exemple des pieux

Afin de ne pas démultiplier inutilement le nombre de calculs, un seul calcul d'interaction sol-pieu uniquement à l'ELS quasi-permanent pour  $\Delta T_{\max}$  et  $\Delta T_{\min}$  pour chaque pieu

1/ Obtention directe des tassements en tête  $\Delta w_{th}$

Variation de résistance mobilisée  $\Delta R_{mob}$

4/ Problématique cyclique

2/ Variations d'effort normale  $\Delta N_{th}(z)$ , pour justification structurelle

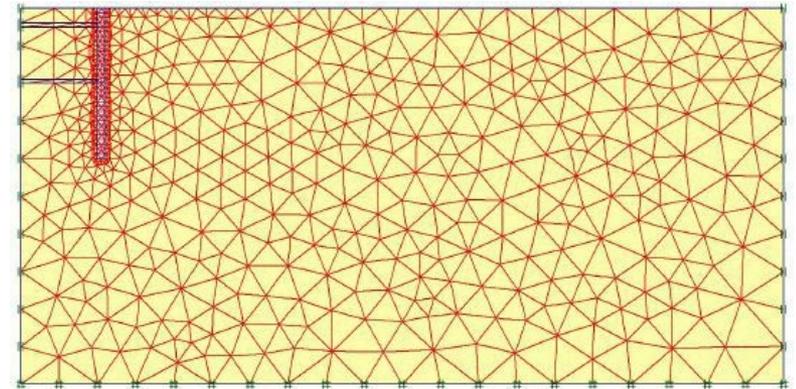
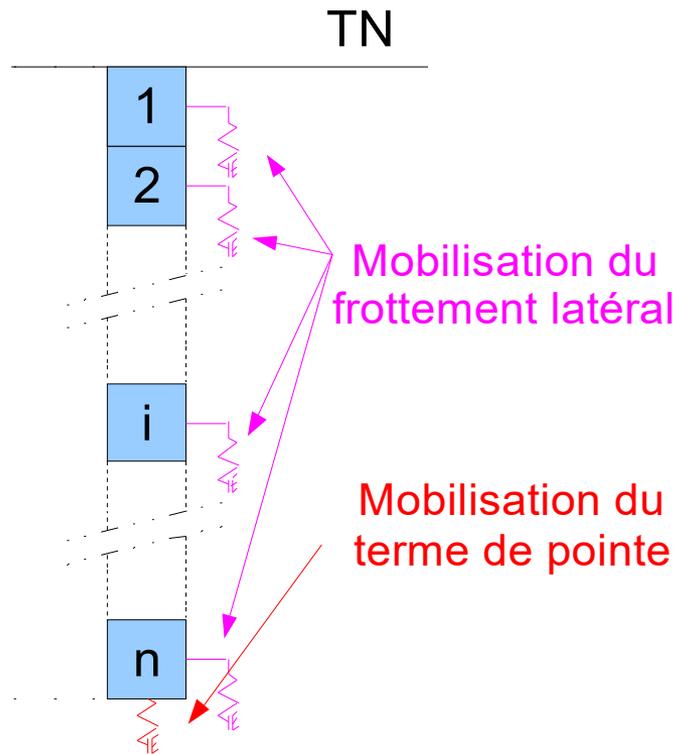
3/ Vérification de la portance

avec coefficients  $\Psi_i$

$\Delta R_{mob}$   
« additionnée »  
aux charges en tête

# Comment modéliser les géostructures thermiques

Différentes approches sont possibles : 1D, 2D, etc.



# Application aux pieux : exemple des méthodes t-z

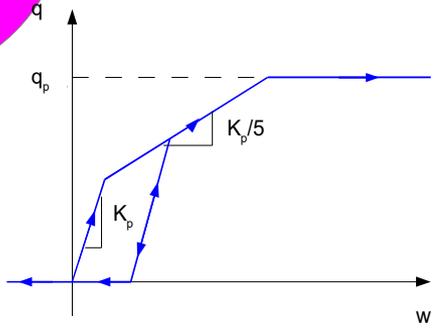
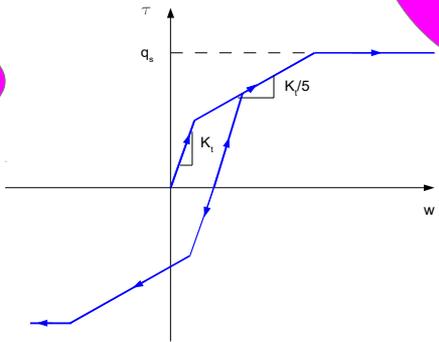
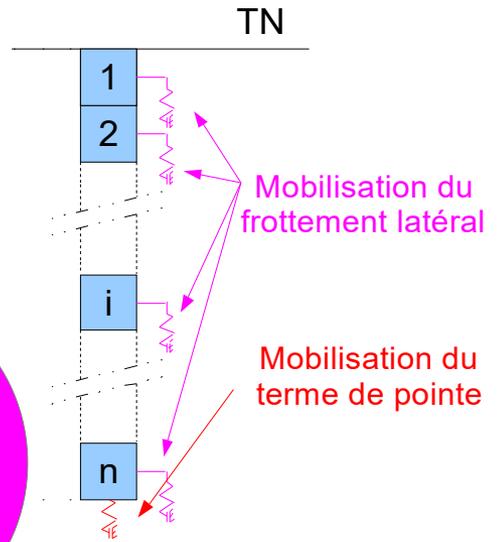
Méthode de calcul retenue :  
méthode des courbes de transfert

Décomposition des déformations en composantes mécanique et thermique  
 $\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^{th}$

Pieu supposé thermo-élastique  
 $\epsilon_v = \alpha_T \Delta T$

Température supposée homogène

Interfaces :  
Frank et Zhao (1982) + réversibilité



$$E_s S \frac{d^2 w}{dz^2} + f_{sol-pieu}(z, w) = 0$$

=> méthode éprouvée sur les expérimentations disponibles !

# Développement d'un outil de calcul spécifique

Pris en compte des conditions aux limites, et notamment de la rigidité de la structure portée

Traitement de listings de pieux

Pieux partiellement équipés

Etc.

Frottement négatif éventuel

=> obtention directe des paramètres précédemment et mise en avant et de leur admissibilité

Tassement différentiel  $< 1/500 L$

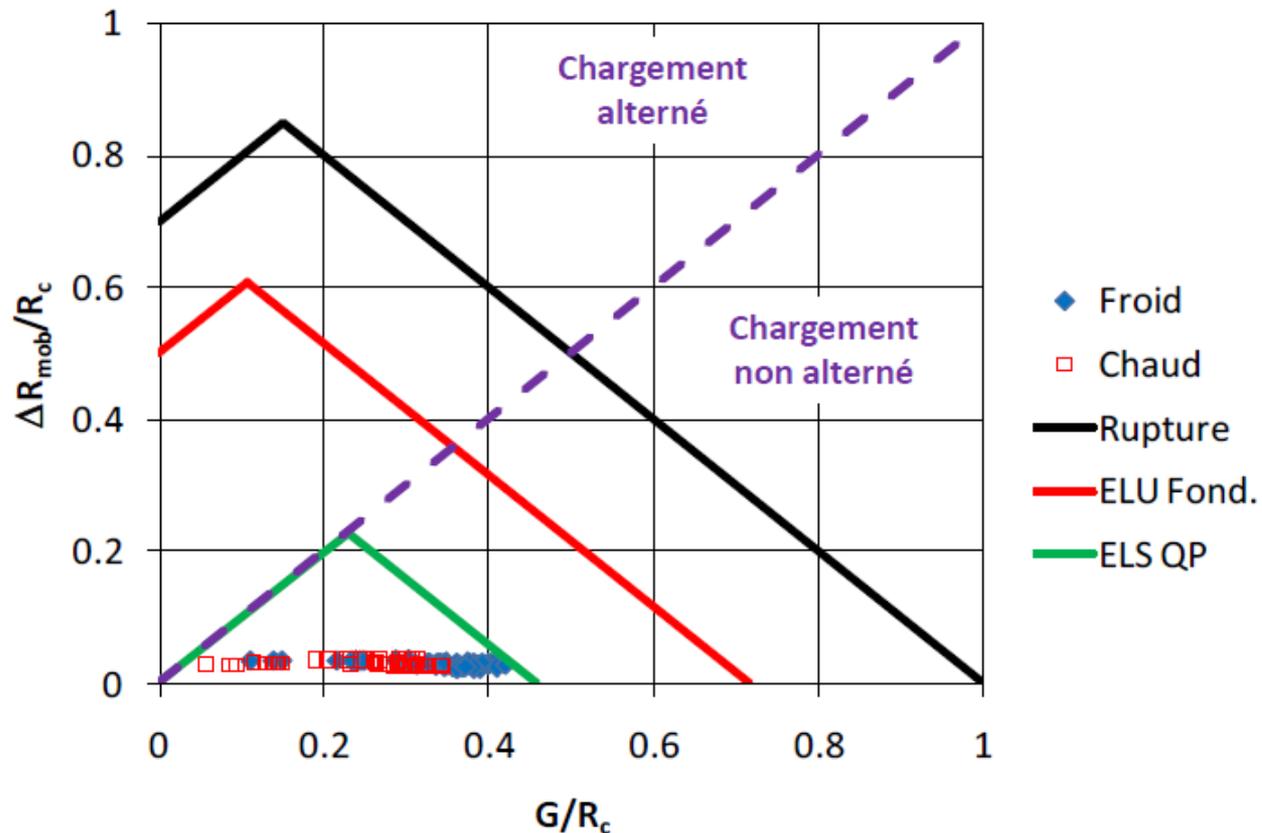
Résistance mobilisée admissible

Contrainte de compression admissible conformément à la norme NF P94-262

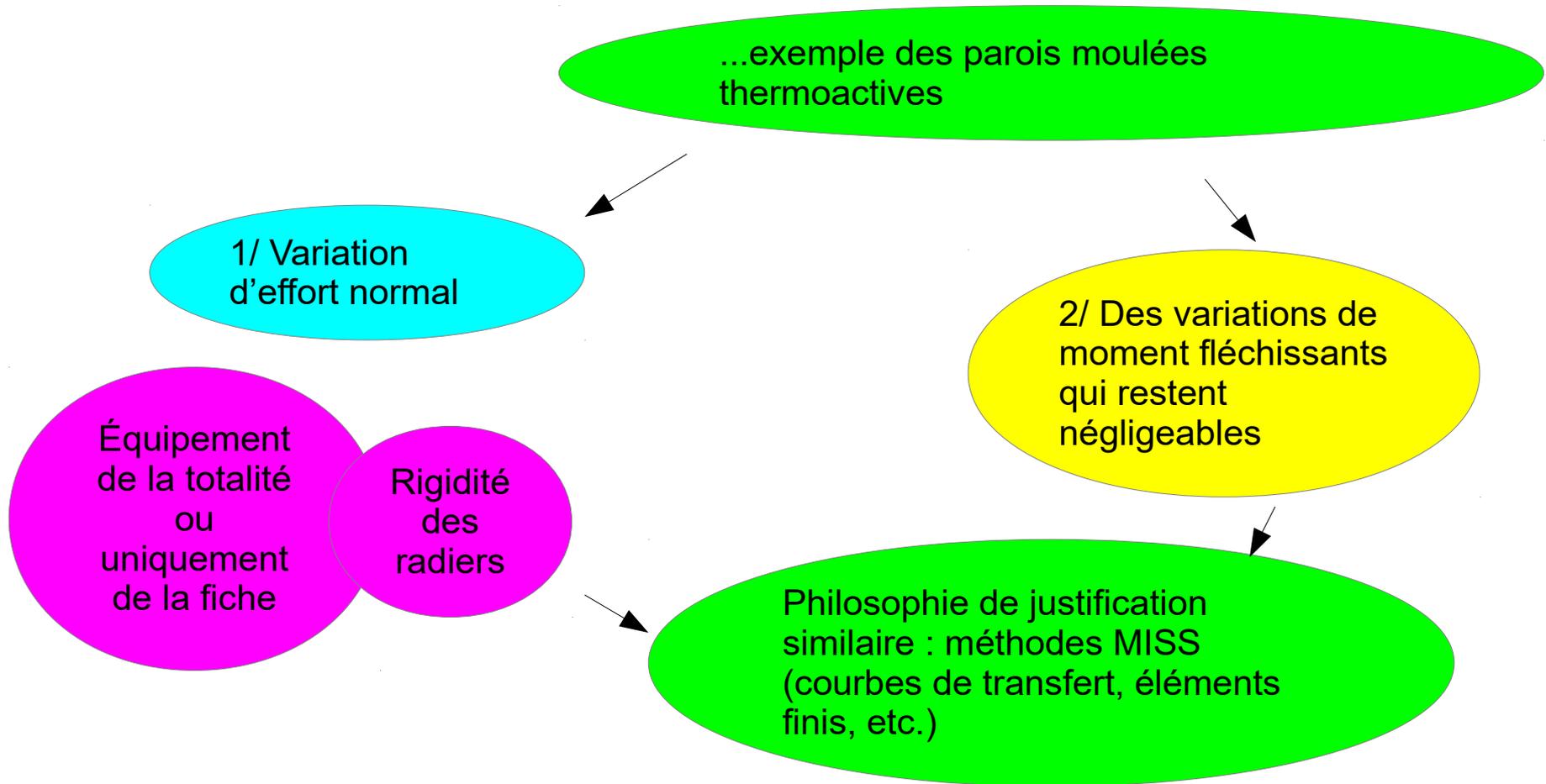
Diagramme cyclique

# Problématique cyclique

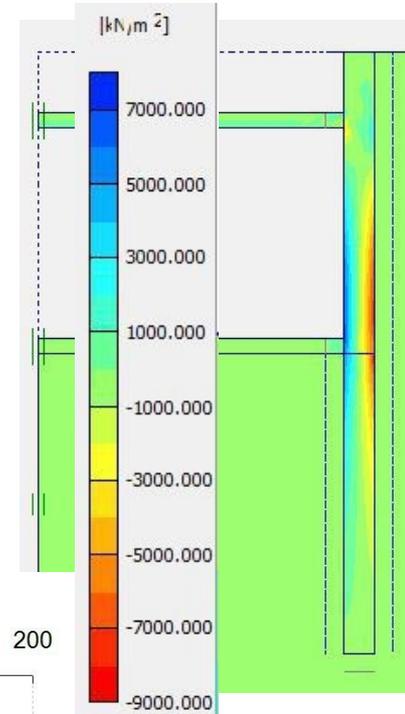
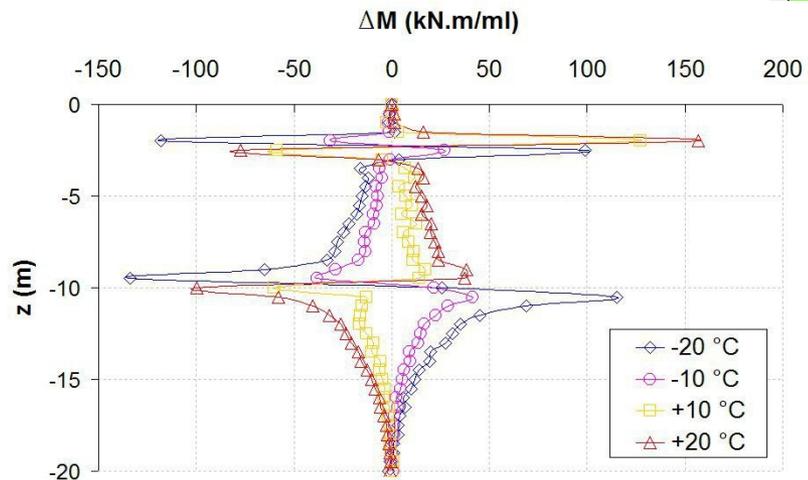
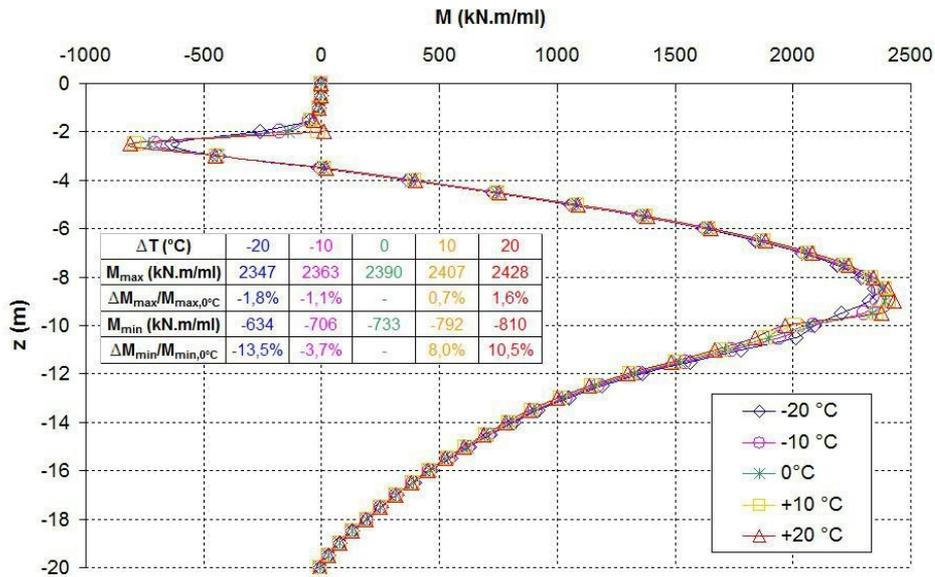
Pour chaque pieu, le rapport  $\Delta R_{mob,th}/R_c$  peut être calculé et reporté dans un diagramme de stabilité cyclique ( $G/R_c ; \Delta R_{mob,th}/R_c$ )



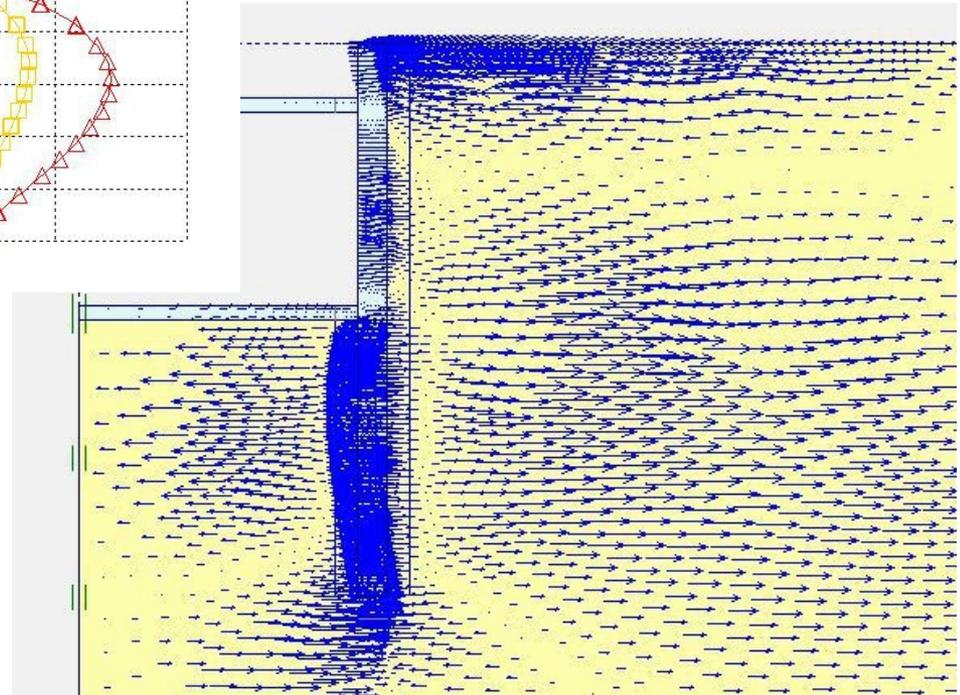
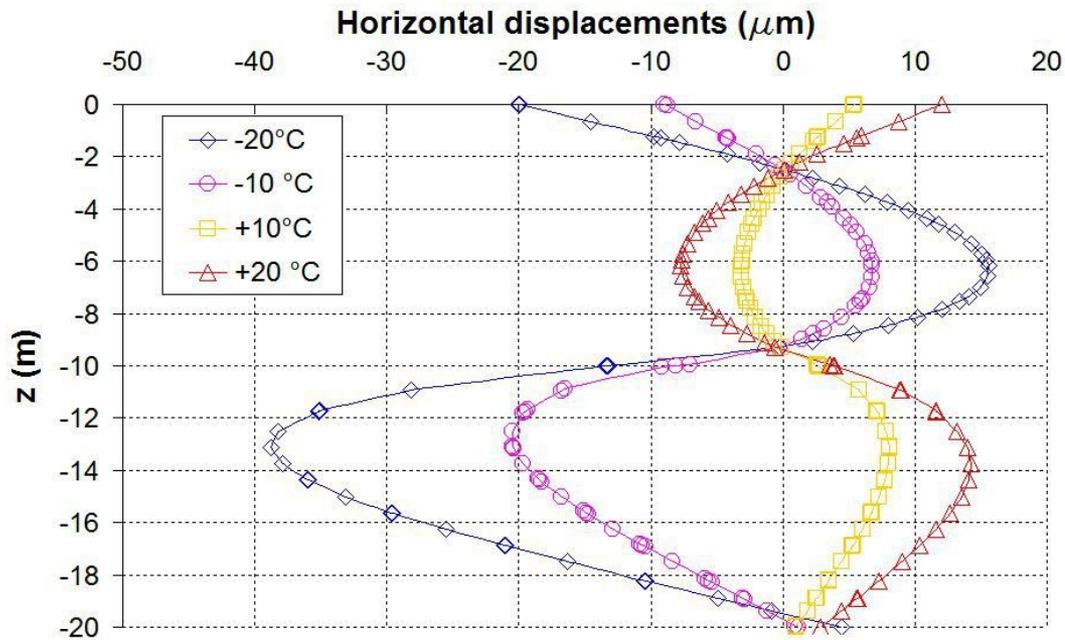
# Application à d'autres géostructures thermoactives



# Exemple des parois moulées (1/2)



# Exemple des parois moulées (2/2)



Merci de votre attention

