

Quelques considérations sur le dimensionnement des pieux géothermiques

ANR GECKO

S.BURLON, IFSTTAR

J.HABERT, CETE NORD-PICARDIE

M.SURYATRIYASTUTI, LGCgE

H.MROUEH, LGCgE

Problématique des pieux géothermiques



Problématique des pieux géothermiques

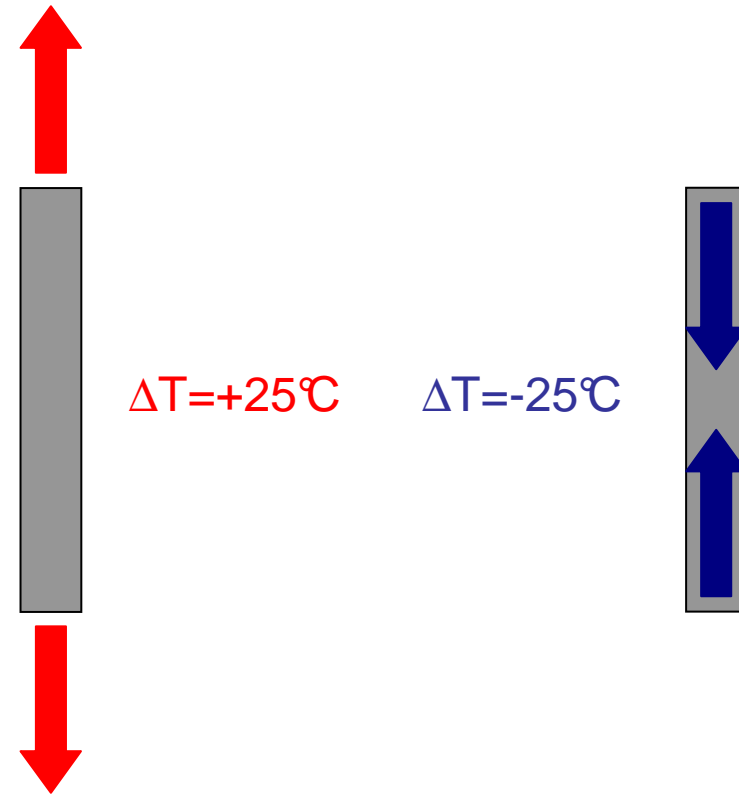
Coefficient de dilatation thermique du béton :

$$\alpha_T = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

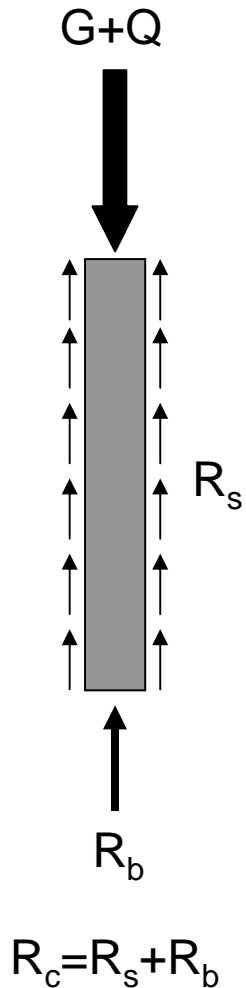
Pour un pieu de longueur $L=20$ m et une variation de température $\Delta T=25^\circ$

→ **3 mm à chaque extrémité du pieu**

- Déplacements des structures portées
- Efforts parasites dans le pieu par dilatation et contraction empêchées
- Dégradation mécanique des sols sous l'effet du chargement cyclique
- Variation des paramètres mécaniques du sol et du béton avec la température
- Influence sur le milieu environnant



Retour sur le fonctionnement d'un pieu



Les règlements imposent de limiter les efforts $G+Q$ à une fraction de la résistance limite du pieu R_c :

-1.35 x 1.4 à l'ELU : $\approx 52\%$ de R_c

-1.4 / (0.5 à 0.7) à l'ELS QP : ≈ 40 à 50% de R_c

-1.1 / 0.7 à l'ELS rare : ≈ 55 à 63% de R_c

Les résultats des essais de chargements indiquent que pour ces taux de chargement ($Q_c = 0.5Q_{pu} + 0.7Q_{su}$ ou $Q_c = 0.7Q_{pu} + 0.7Q_{su}$) :

-la résistance par frottement axial est presque totalement mobilisée en partie supérieure du pieu ;

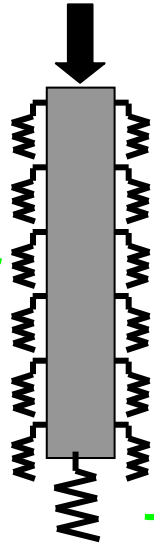
-la résistance par frottement axial est peu mobilisée en partie inférieure du pieu ;

-la résistance de pointe est très peu mobilisée.

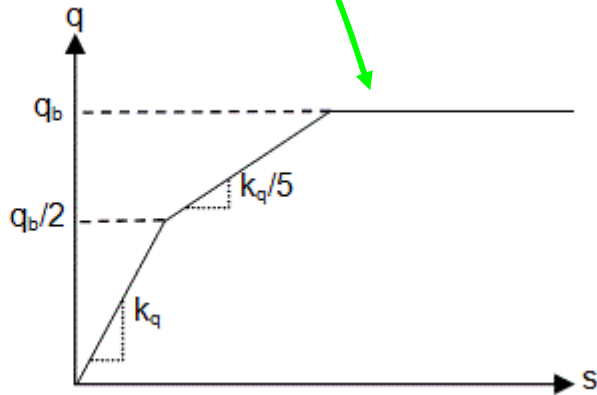
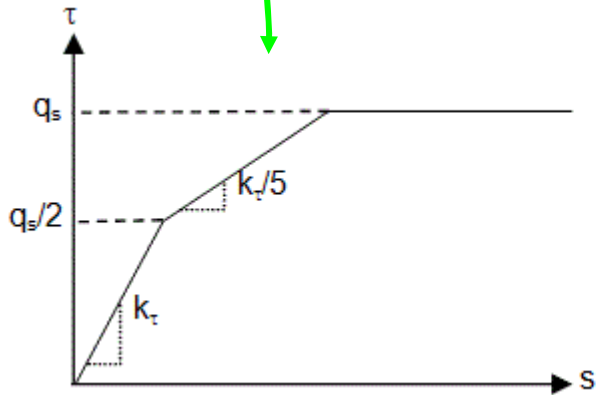
Estimation du tassement d'un pieu

Calcul du tassement d'un pieu par une méthode au coefficient de réaction de type t-z

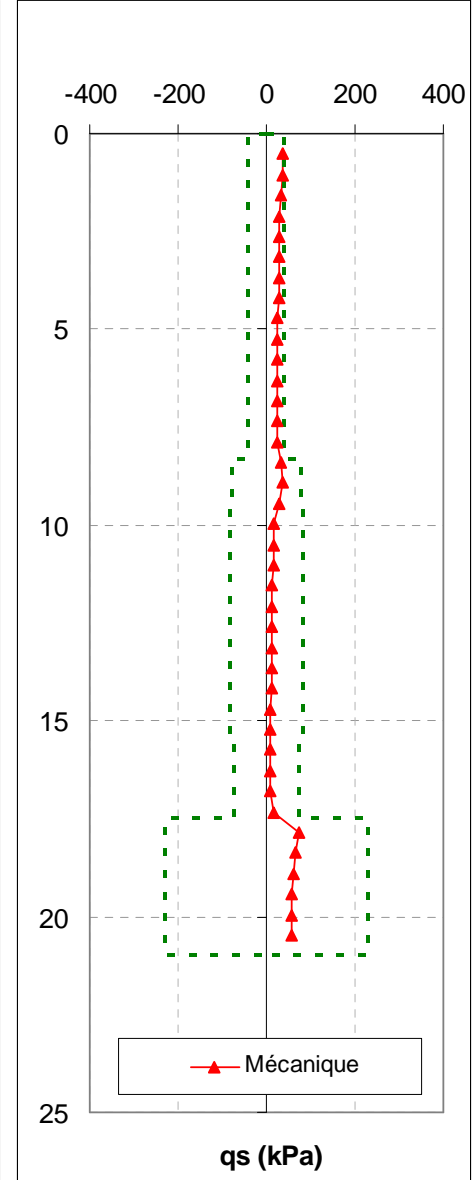
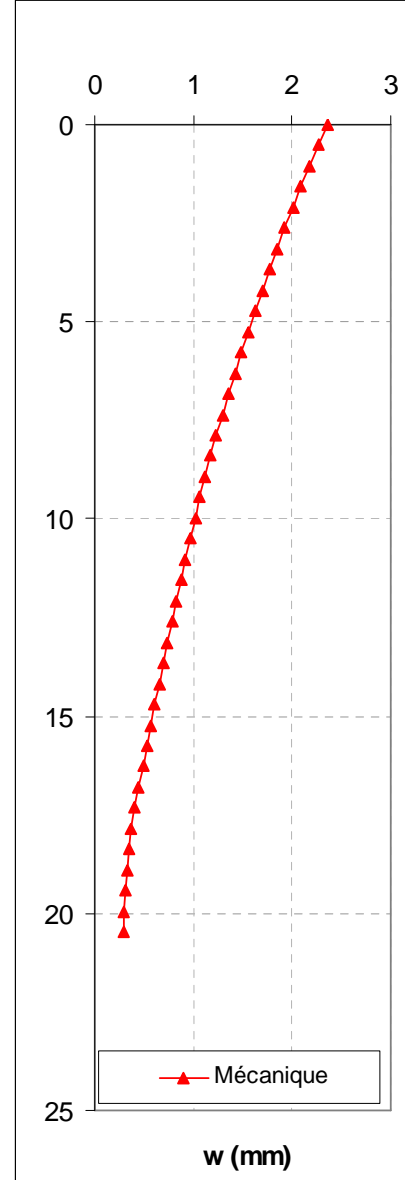
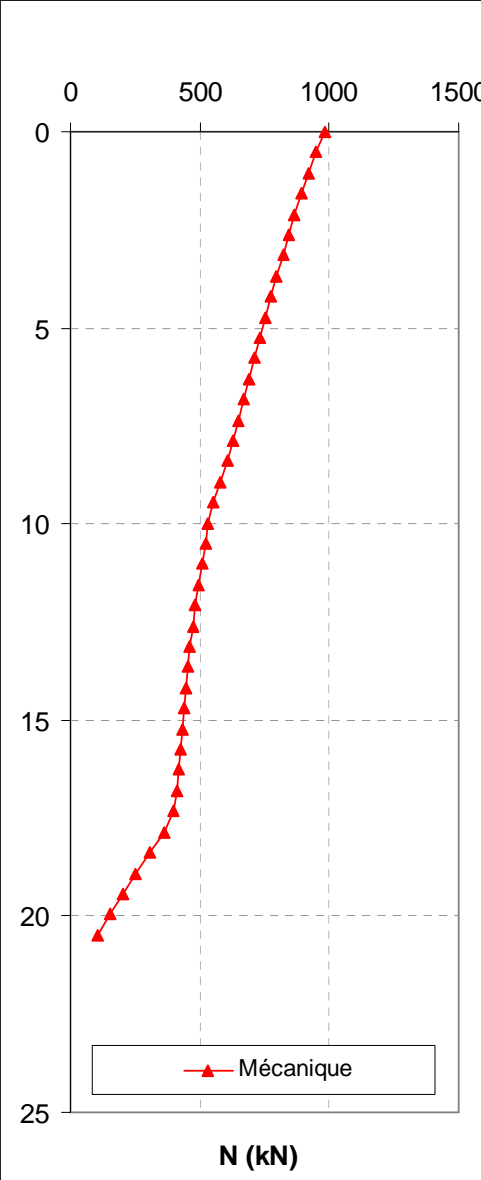
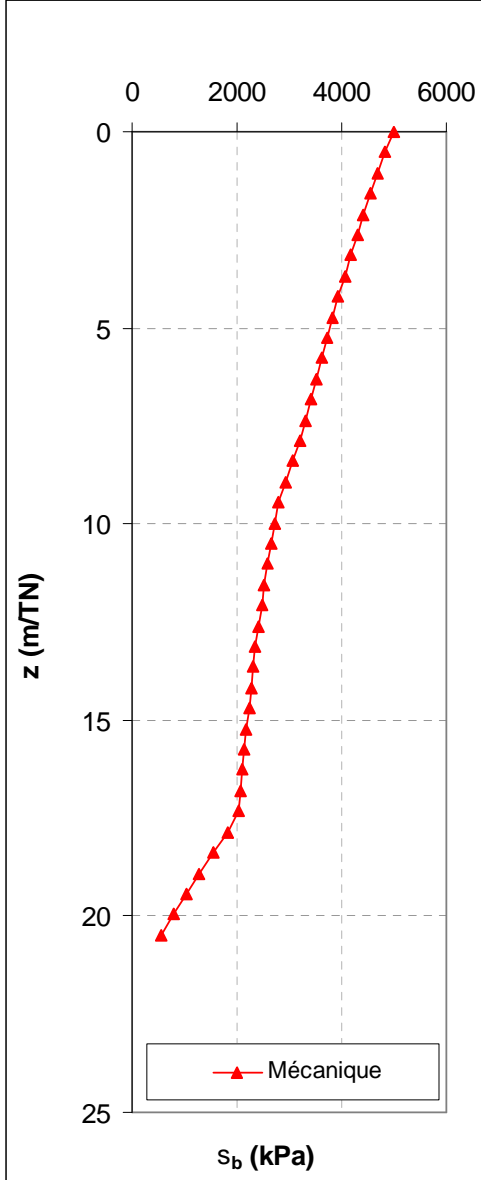
- Loi de réaction pour le frottement axial
- Loi de réaction pour la résistance de pointe



Frank et Zhao



Estimation du tassement d'un pieu



Estimation du tassement d'un pieu

En pointe :

$$-R_{b;mob} = A_b \cdot f_p(w_p) - \epsilon_p = R_{b;mob} / (A_b E_c)$$

Sur le fût :

$$-w_n = w_p + h_n \cdot \epsilon_p / 2$$

$$Q_n = \pi B h_n f_{s;n}(w_n) + R_{b;mob} - \epsilon_n = R_{b;mob} / (A_b E_c)$$

$$-w_{n-1} = w_n + (h_n + h_{n-1}) \cdot \epsilon_n / 2$$

$$Q_{n-1} = \pi B h_{n-1} f_{s;n-1}(w_{n-1}) + Q_n - \epsilon_{n-1} = Q_{n-1} / (A_b E_c)$$

-

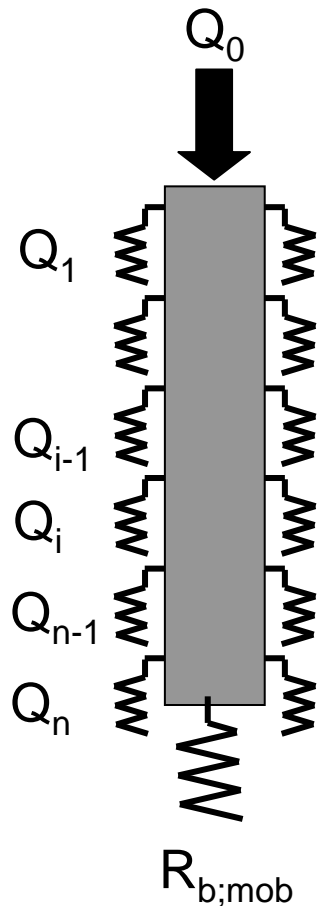
$$-w_i = w_{i+1} + (h_i + h_{i+1}) \cdot \epsilon_{i+1} / 2$$

$$Q_i = \pi B h_i f_{s;i}(w_i) + Q_{i+1} - \epsilon_i = Q_i / (A_b E_c)$$

-

$$-w_0 = w_1 + h_1 \cdot \epsilon_1 / 2$$

$$Q_0 = \pi B h_1 f_{s;1}(w_1) + Q_1$$



Estimation du tassement d'un pieu géothermique

En pointe :

$$-R_{b;mob} = A_b \cdot f_p(w_p) - \epsilon_p = R_{b;mob} / (A_b E_c)$$

Sur le fût :

$$-w_n = w_p + h_n \cdot (\epsilon_p + \epsilon_{th}) / 2$$

$$Q_n = \pi B h_n f_{s;n}(w_n) + R_{b;mob} - \epsilon_n = R_{b;mob} / (A_b E_c)$$

$$-w_{n-1} = w_n + (h_n + h_{n-1}) \cdot (\epsilon_n + \epsilon_{th}) / 2$$

$$Q_{n-1} = \pi B h_{n-1} f_{s;n-1}(w_{n-1}) + Q_n - \epsilon_{n-1} = Q_{n-1} / (A_b E_c)$$

-

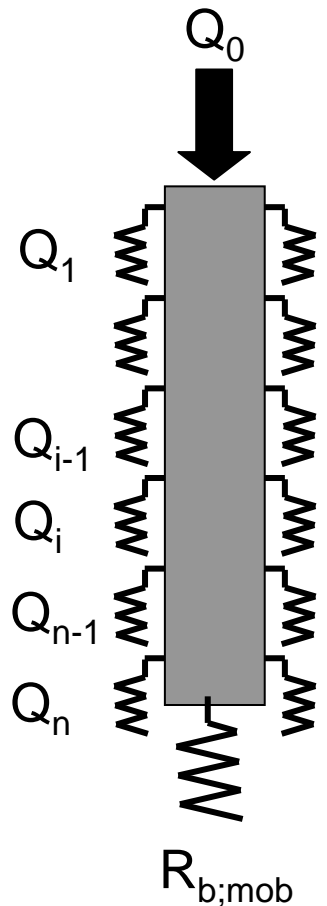
$$-w_i = w_{i+1} + (h_i + h_{i+1}) \cdot (\epsilon_{i+1} + \epsilon_{th}) // 2$$

$$Q_i = \pi B h_i f_{s;i}(w_i) + Q_{i+1} - \epsilon_i = Q_i / (A_b E_c)$$

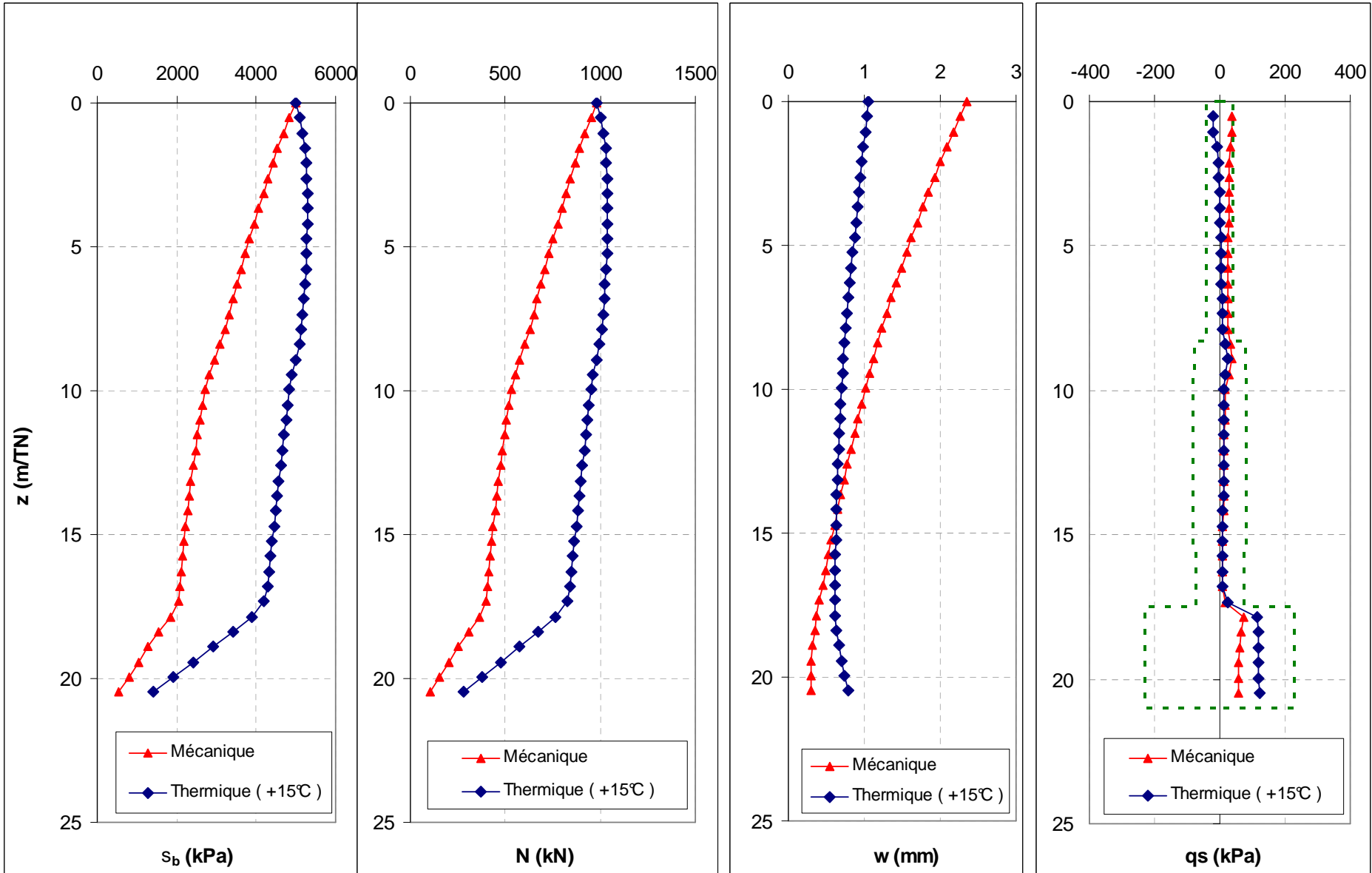
-

$$-w_0 = w_1 + h_1 \cdot (\epsilon_1 + \epsilon_{th}) // 2$$

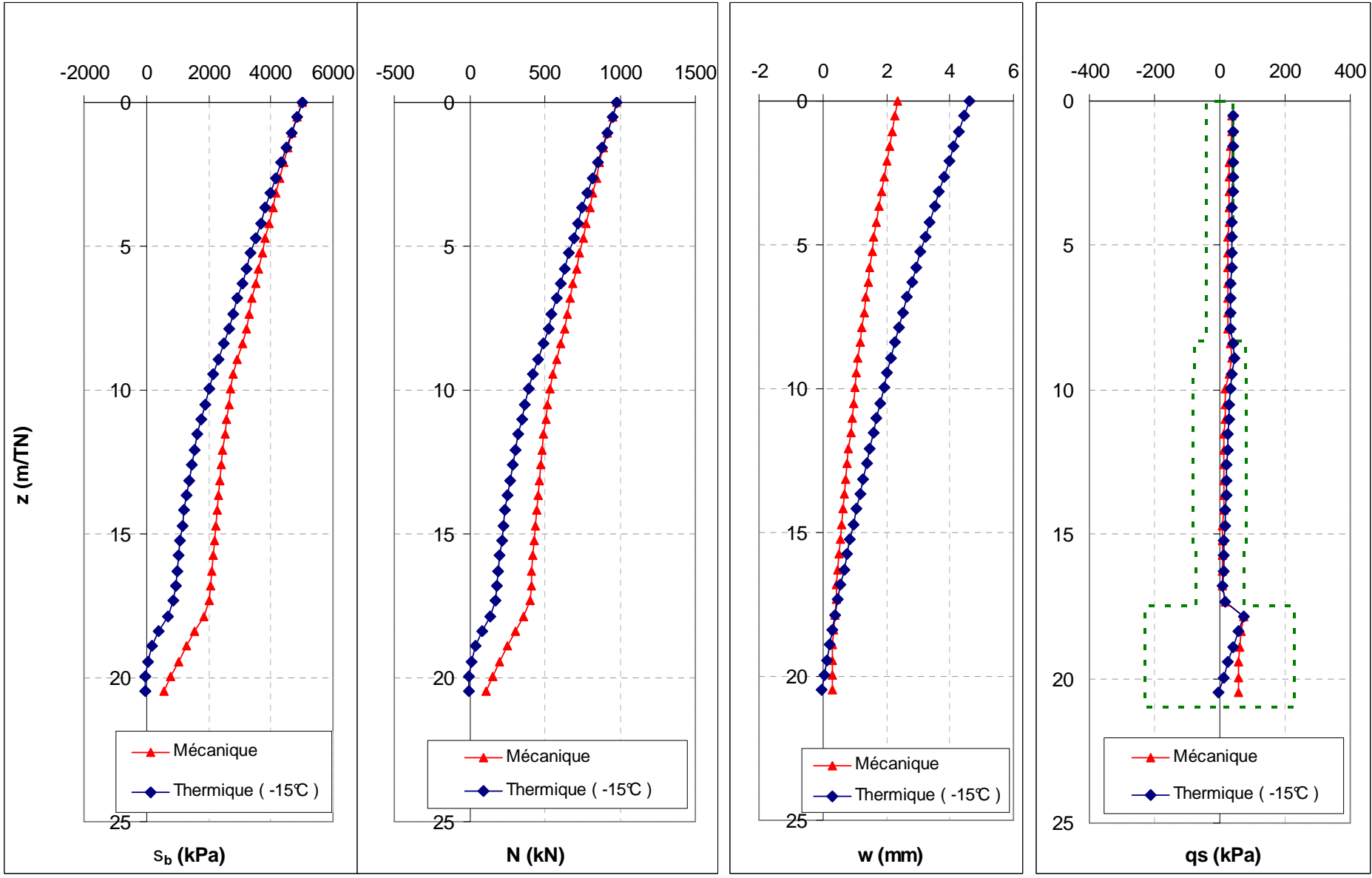
$$Q_0 = \pi B h_1 f_{s;1}(w_1) + Q_1$$



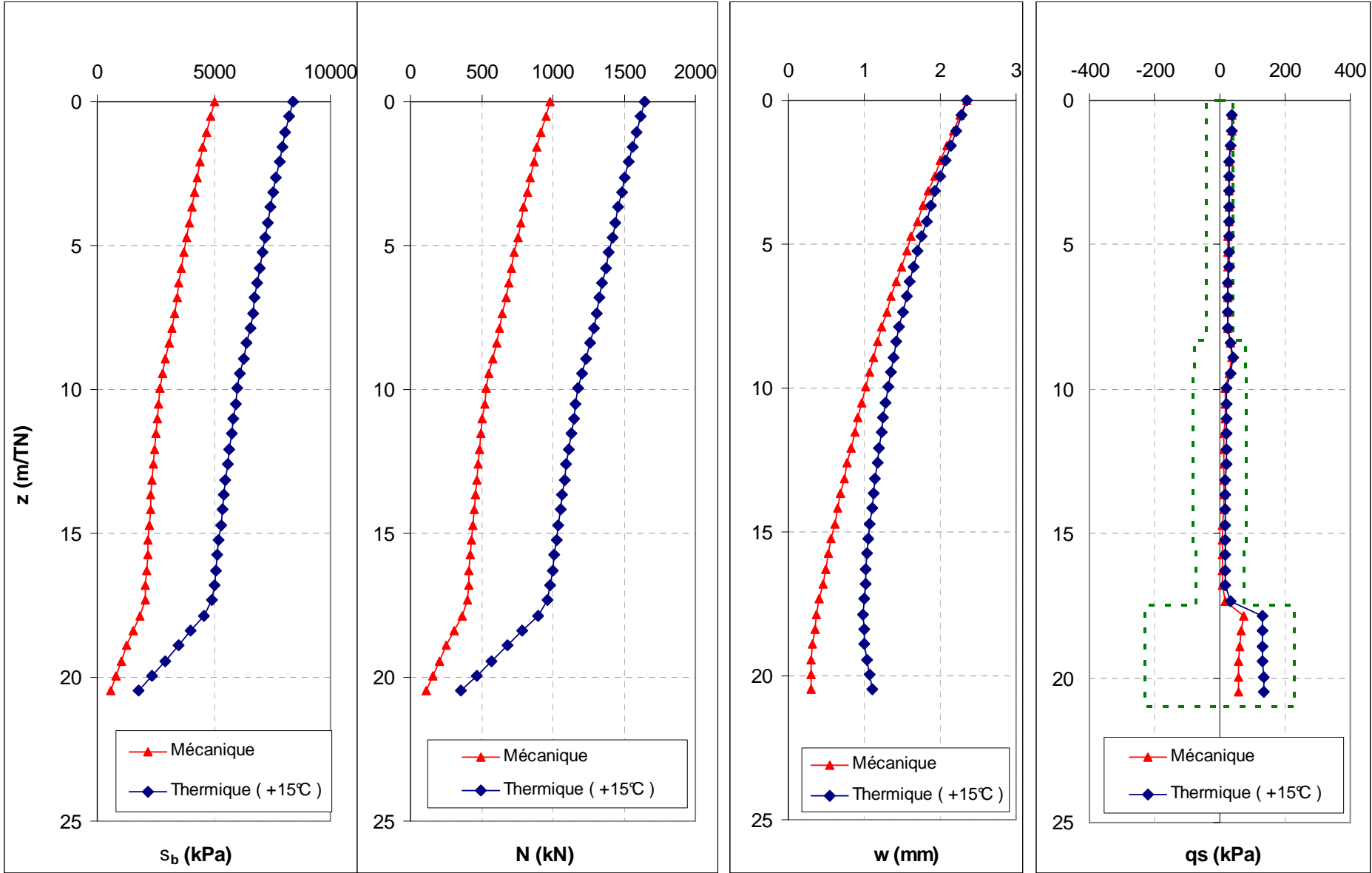
Exemple : injection d'un fluide chaud – libre en tête



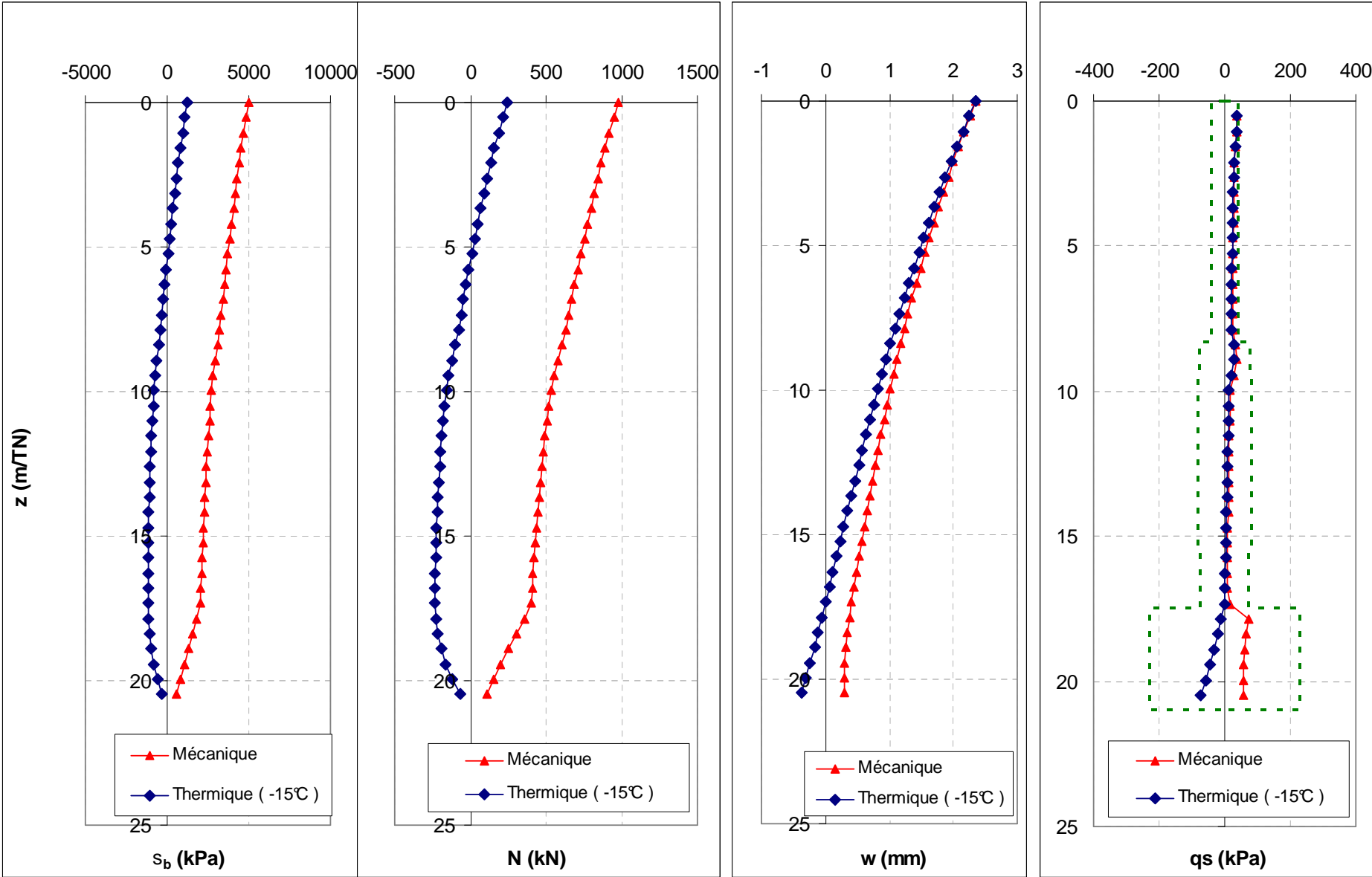
Exemple : injection d'un fluide froid – libre en tête



Exemple : injection d'un fluide chaud – bloqué en tête



Exemple : injection d'un fluide froid – bloqué en tête



Propositions de justifications d'un pieu géothermique

Comment considérer la variation de température dans le pieu vis-à-vis des justifications à réaliser (ELS QP et caractéristique, ELU) ?

ΔT pourrait être considérée comme une charge variable au même titre que le vent ou la neige.

A l'ELU, il conviendrait de considérer $1.35\Delta T$ en limitant cette valeur à ce que le système peut fournir

Sa prise en compte dans les calculs nécessitent a priori des calculs d'interaction-sol-structure. Que vérifier ?

1/ Les déplacements en tête de pieu et les intégrer à la structure s'ils sont supérieurs à 1 ou 2 cm (2.6 (2) Note 2 de l'EC2) → ELS

2/ Les contraintes dans le pieu → ELS et ELU

3/ La mobilisation du sol par le pieu ? → Faut-il simplement vérifier les déplacements du pieu ou vérifier que le sol n'est pas trop mobilisé ?

4/ Faut-il « phaser » les calculs ? → $G + \Delta T + Q$ ou $G + Q + \Delta T$

Comment intégrer les effets de « fatigue » du sol sous l'effet des variations thermiques ?

Prise en compte des effets mécaniques cycliques des variations thermiques

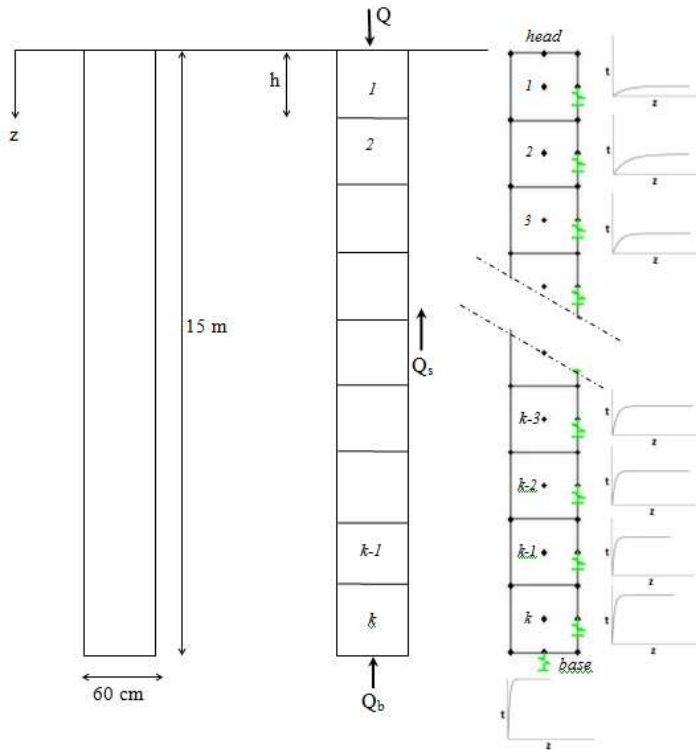
Calcul par une méthode au coefficient de réaction

→ Loi t-z cyclique

Calcul par la méthode des éléments finis ou des différences finies

→ Loi de comportement cyclique soit pour les éléments massifs
soit pour les éléments d'interface

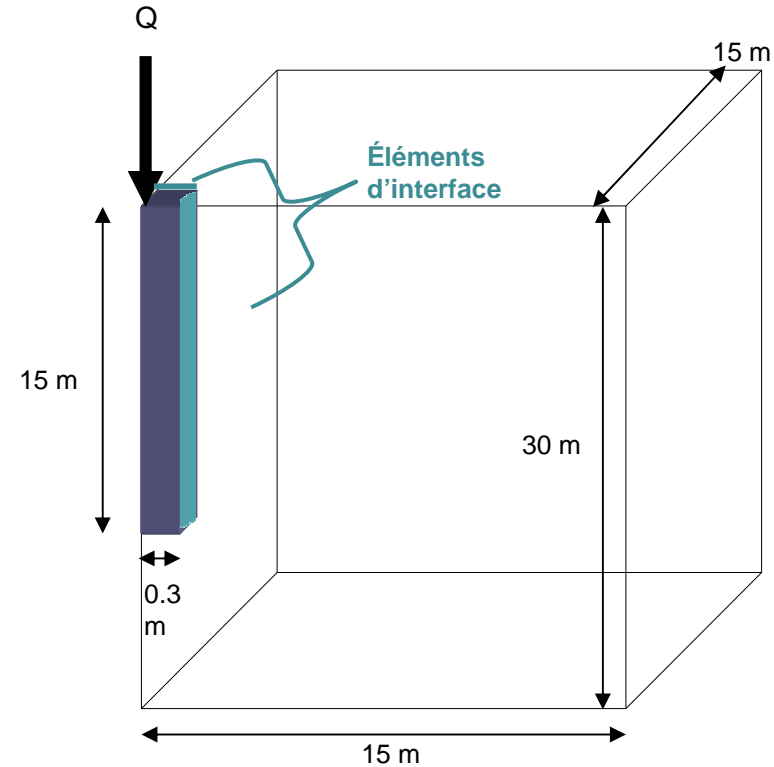
Exemple : Pieu isolé dans le sol homogène



Éléments de ressort

Méthode du coefficient de réaction (1D)

Loi t - z cyclique (SOLCYP)

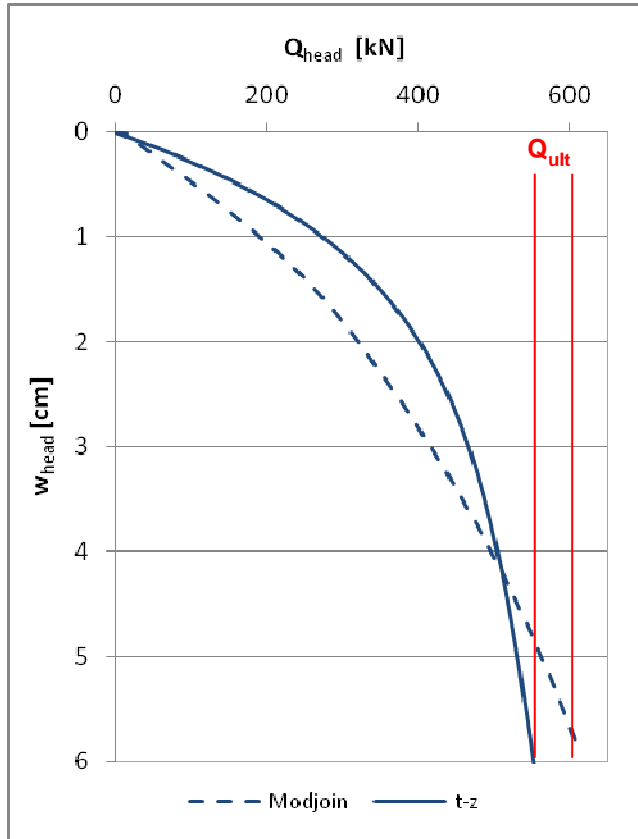


$\frac{1}{4}$ du modèle

Méthode des différences finies (3D)

Loi Modjoin (Shahrour et Rezaie, 1997)

Exemple : Description du chargement



Résistance limite correspondant à un enfoncement du pieu égal à 10% de diamètre du pieu

1/ Chargement mécanique monotone $n = 0$

$$Q_{\text{méc}} = 1/3 Q_{\text{ult}} \text{ (charge de service)}$$

2/ Chargement thermique cyclique

$$Q = Q_{\text{méc}} + Q_{\text{th}}$$

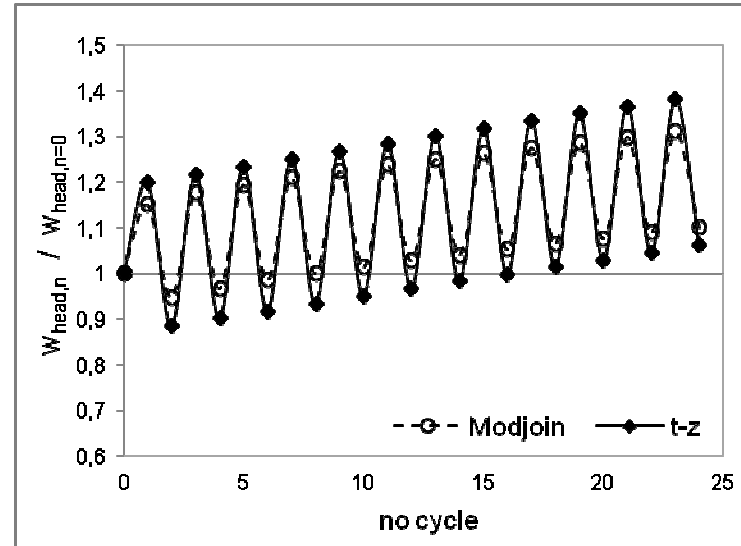
tq. et $\Delta T = \pm 10^\circ$

cycle refroidissement $n = 1, 3, 5, \dots$

cycle réchauffement $n = 2, 4, 6, \dots$

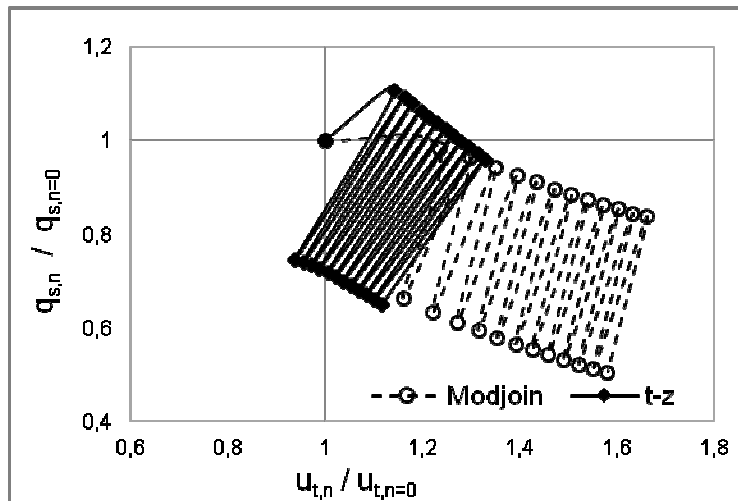
Exemple : (A) Pieu libre en tête

1/ Évolution des déplacements de la tête du pieu au cours des cycles

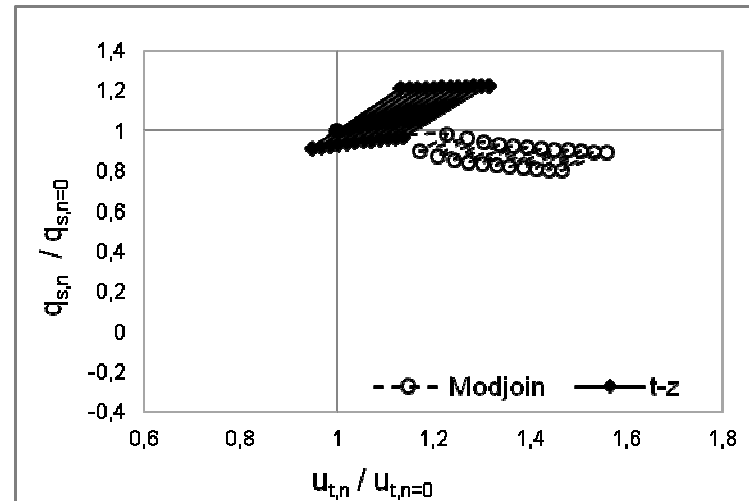


2/ Évolution des frottements latéraux au cours des cycles

$z = 0.2 H$



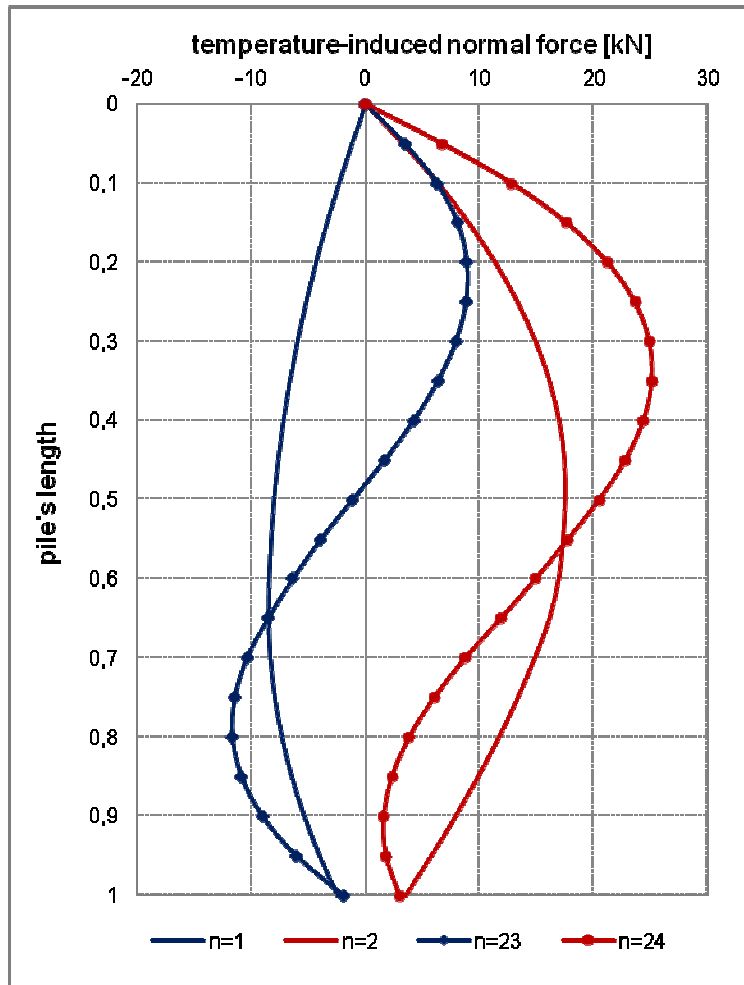
$z = 0.8 H$



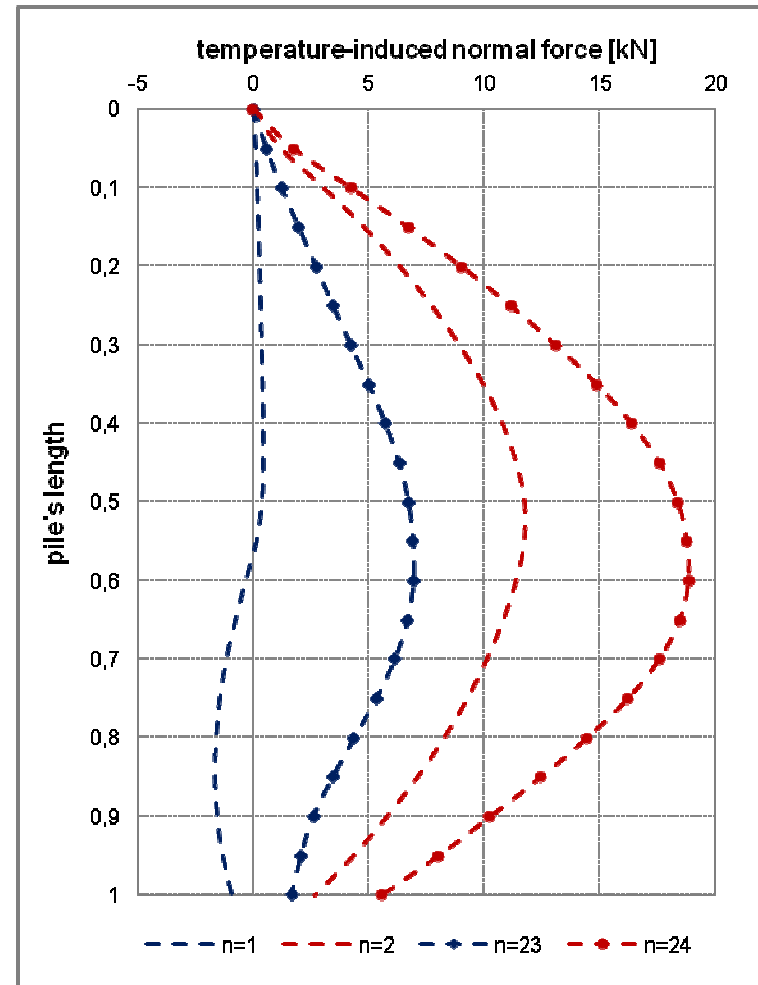
Exemple : (A) Pieu libre en tête

3/ Distribution des efforts normaux en profondeur

Loi t-z



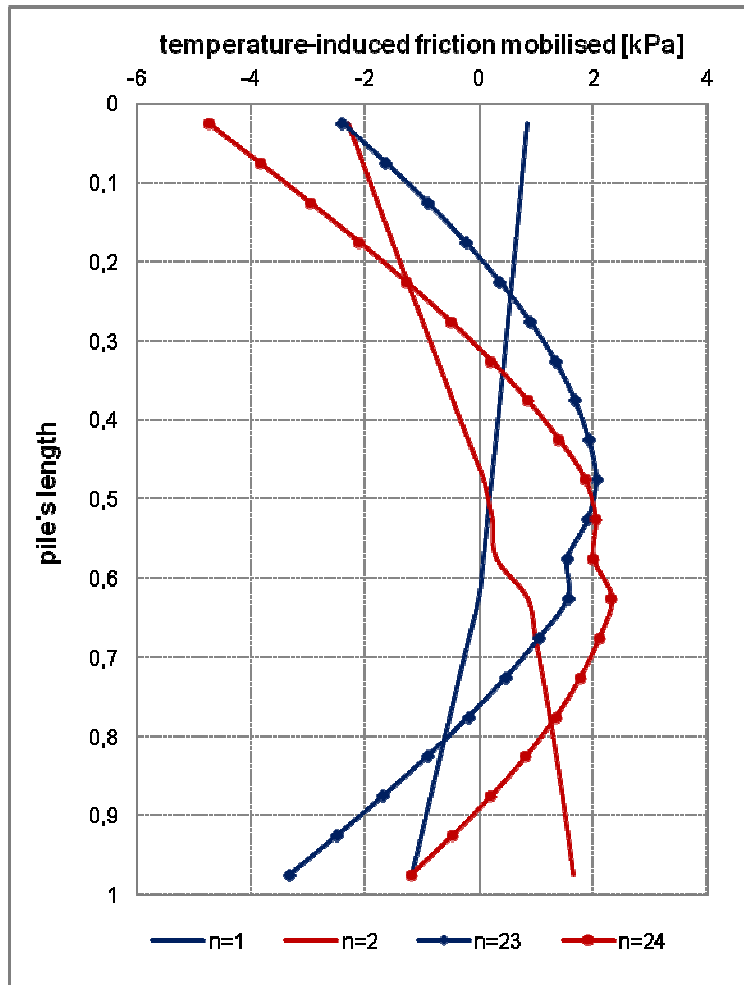
Loi Modjoin



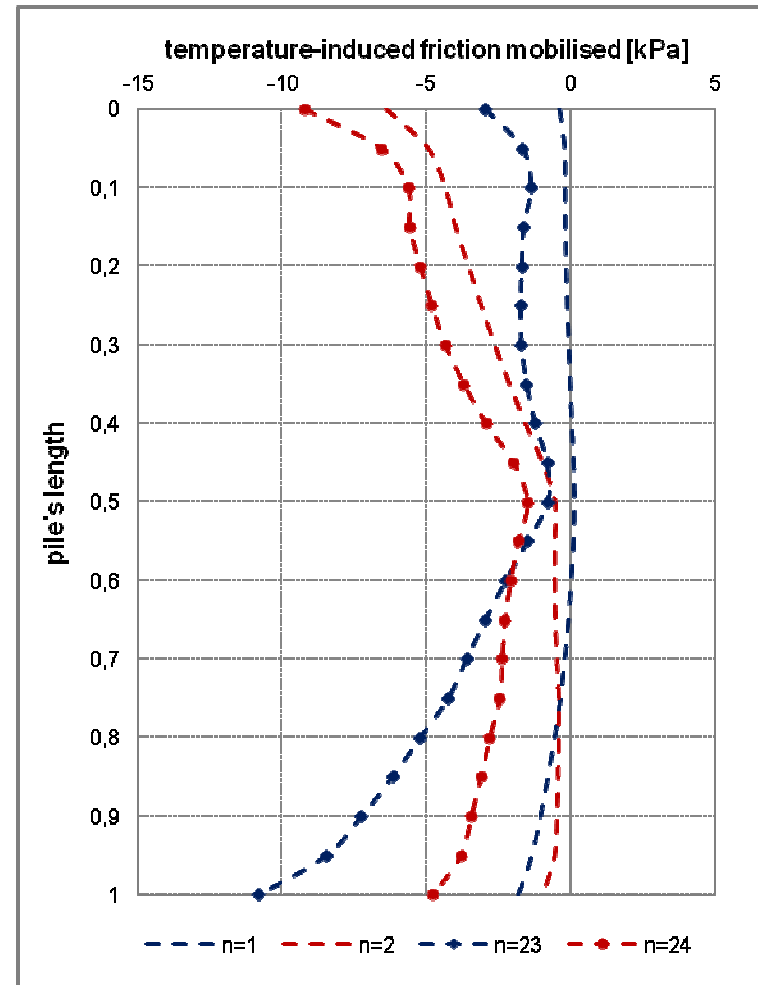
Exemple : (A) Pieu libre en tête

4/ Distribution des frottements axiaux en profondeur

Loi t-z

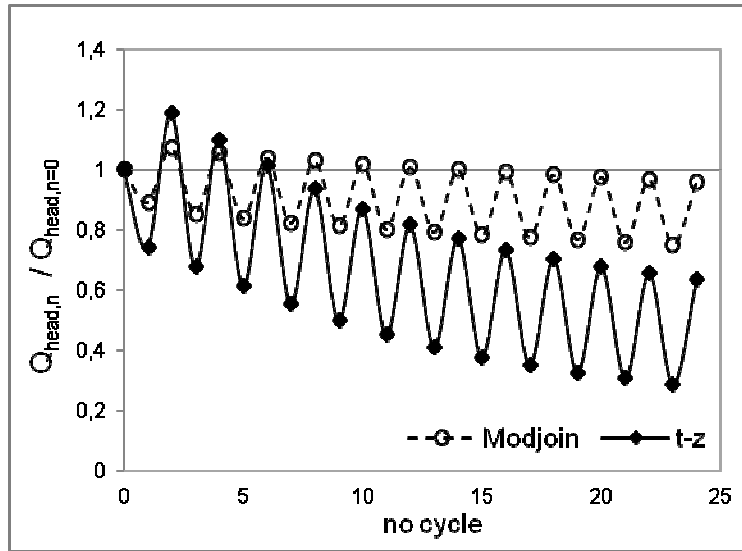


Loi Modjoïn



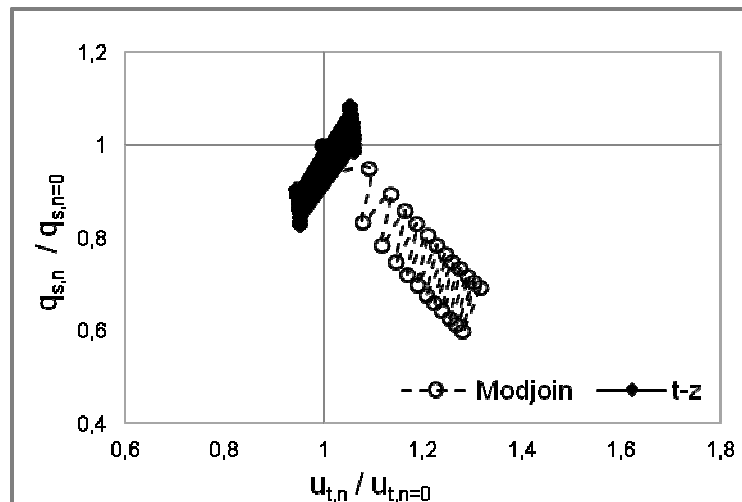
Exemple : (B) Pieu en tête bloquée

1/ Évolution des efforts normales de la tête au cours de cycle

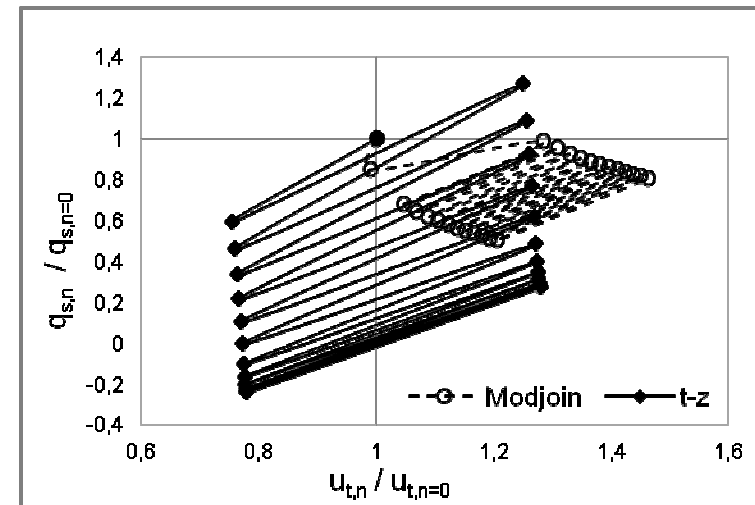


2/ Évolution des frottements latéraux au cours de cycle

$z = 0.2 H$



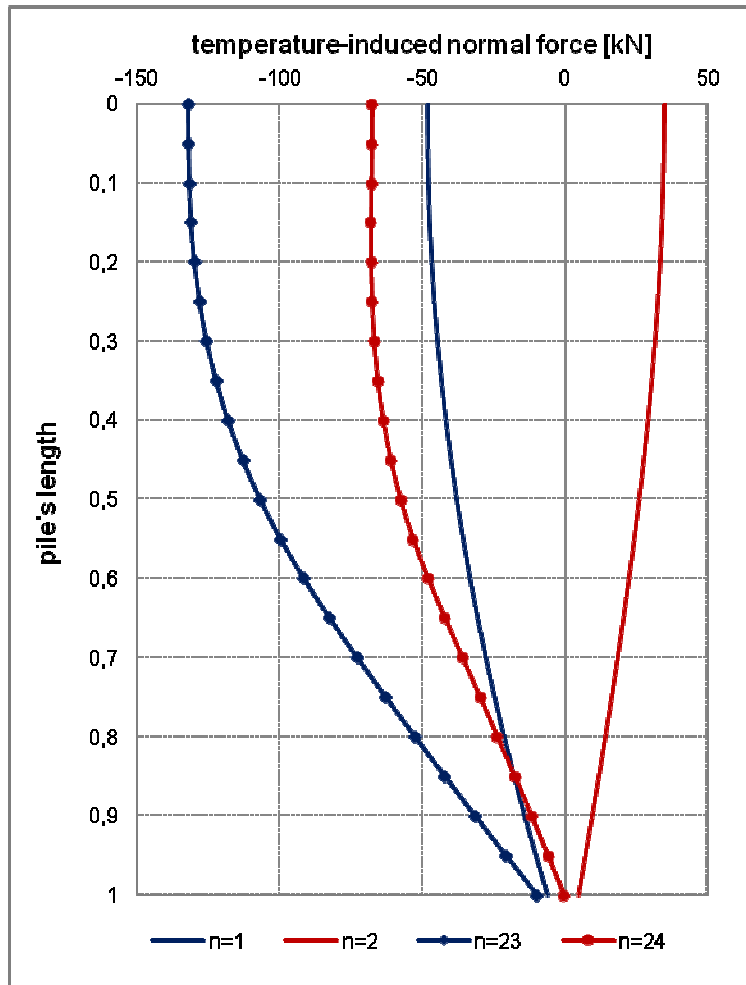
$z = 0.8 H$



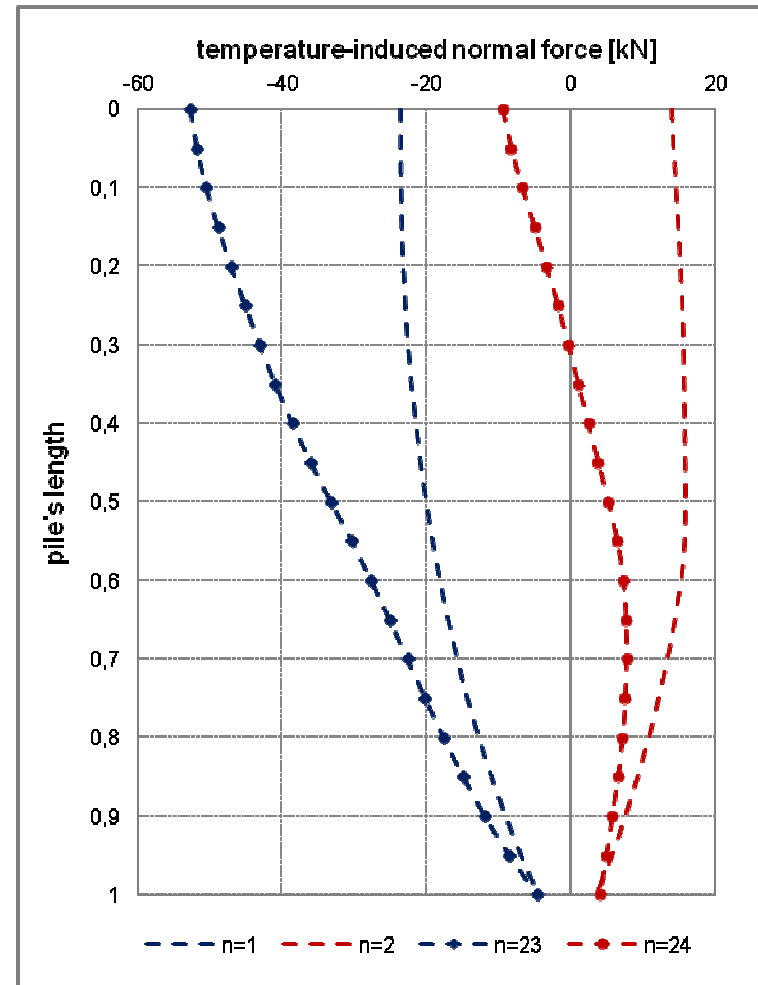
Exemple : (B) Pieu bloqué en tête

3/ Distribution des efforts normaux en profondeur

Loi t-z



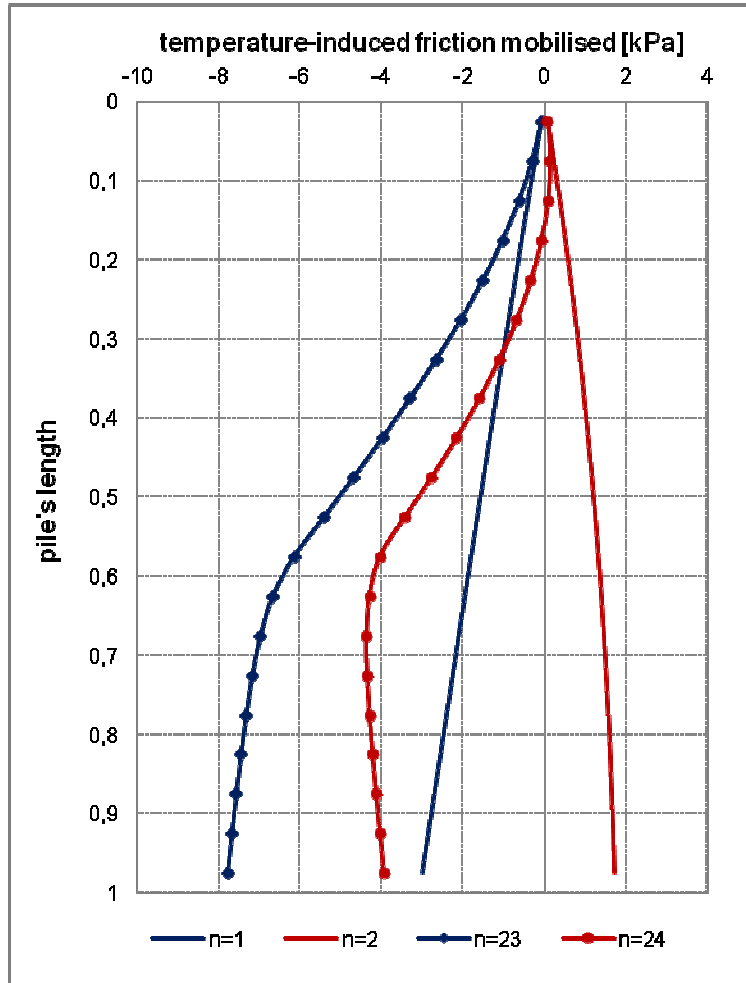
Loi Modjoin



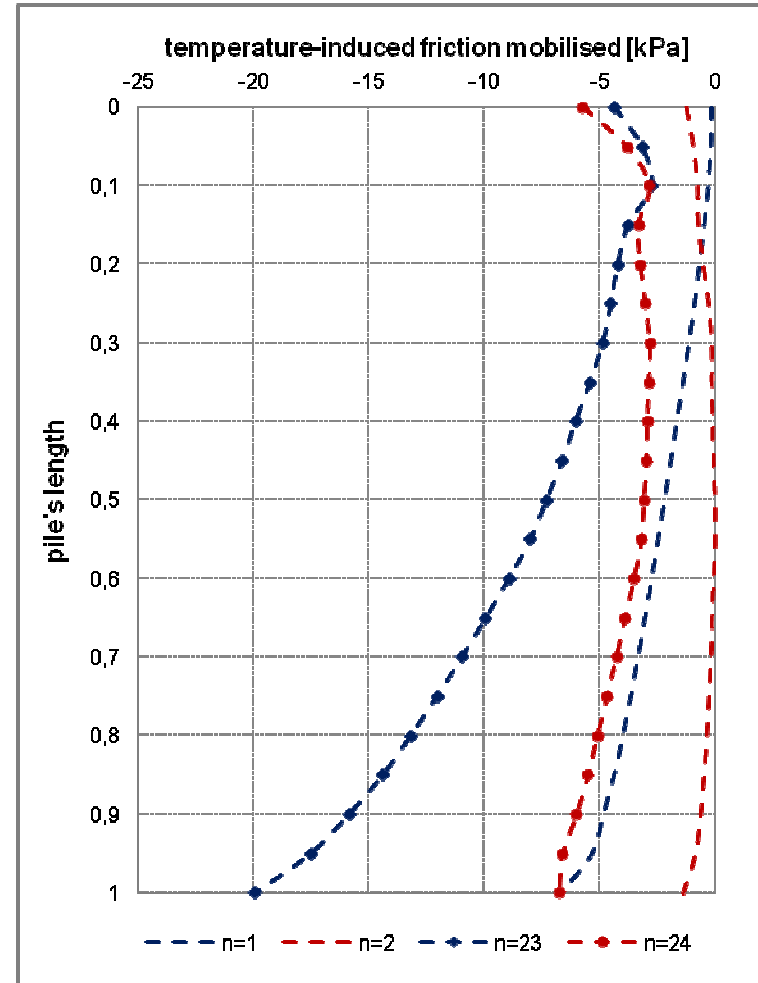
Exemple : (B) Pieu bloqué en tête

4/ Distribution des frottements axiaux en profondeur

Loi t-z



Loi Modjoin



Conclusions

L'effet des variations thermiques dans les pieux énergétiques n'est pas négligeable et doit être évalué.

Les outils de calcul disponibles permettent a priori d'évaluer ces effets mais leur validation est encore nécessaire.

Comment prendre en compte les variations thermiques dans les règles de justification (ELS et ELU) et quelles doivent être ces justifications (calcul de déplacement ou de portance) ?

MERCI DE VOTRE ATTENTION