



# cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHN



INSTITUT  
POLYTECHNIQUE  
DE PARIS

**anr**<sup>®</sup>  
agence nationale  
de la recherche  
AU SERVICE DE LA SCIENCE



## Webinaire « Doctorants en géotechnique »

# Comportement thermomécanique à long terme d'un pieu énergétique installé dans l'argile : Essais in-situ et simulations numériques

QIU, Changhao

Encadrants: Anh-Minh TANG (ENPC); Hussein Mroueh (Université de Lille);  
Fabien Szymkiewicz (UGE); Roxana Vasilescu (Pinto)



Université  
de Lille



Université  
Gustave Eiffel

Ingénieur - Constructeur  
**PINTO**  
Génie Civil - Fondations Spéciales  
*La Polyvalence à Votre Service*

14 JANVIER 2025



**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

# Introduction de Laboratoire Navier



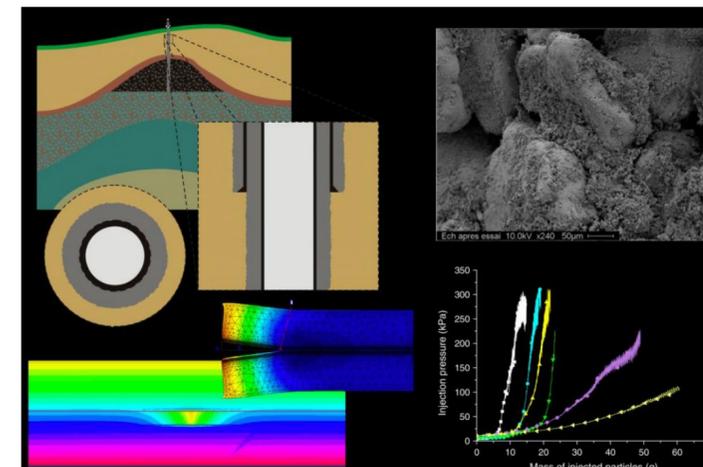
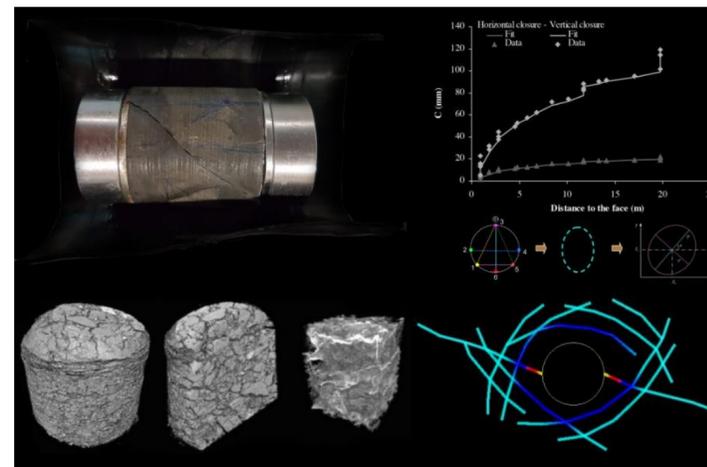
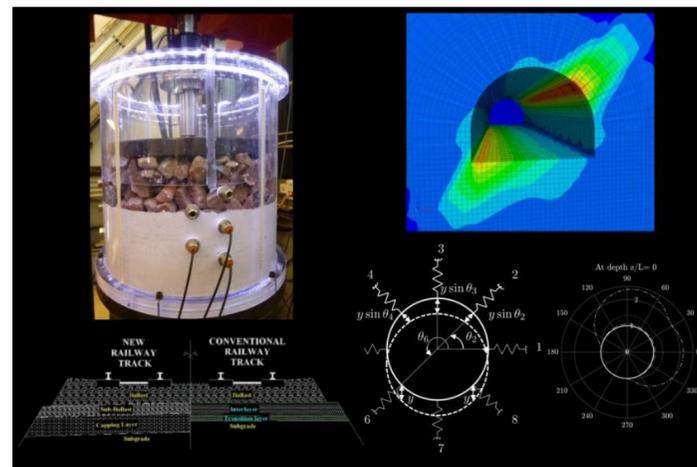
WEBINAIRE « DOCTORANTS EN GÉOTECHNIQUE »

LE 14 JANVIER 2025

# Introduction de Laboratoire

## Laboratoire NAVIER à l'ENPC

- Le Laboratoire Navier est une unité mixte de recherche de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), de l'Université Gustave Eiffel et du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)
- La recherche se focalise principalement sur la mécanique et la physique des matériaux, structures et géomatériaux et leurs applications à la géotechnique, au génie civil, aux transports, à la géophysique et à l'énergie
- L'équipe Géotechnique (CERMES) dans laboratoire NAVIER concentre ses activités de recherche et d'enseignement sur l'ingénierie géotechnique et la mécanique des sols et des roches avec des applications pour le génie civil, l'ingénierie environnementale



# Plan de présentation

**Introduction**

**Méthodologies**

**Résultats et discussions**

**Conclusions et perspectives**



**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

# Introduction



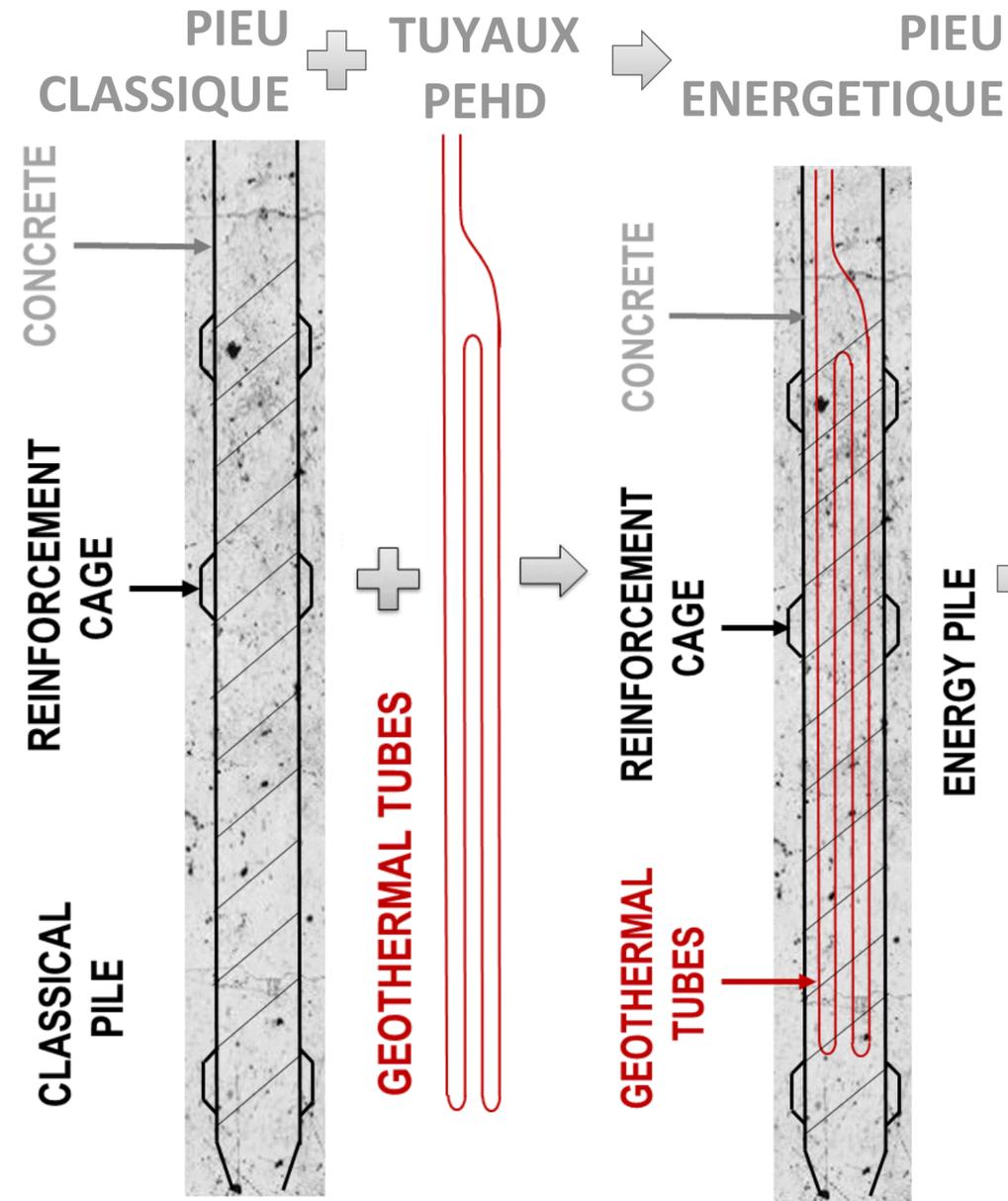
WEBINAIRE « DOCTORANTS EN GÉOTECHNIQUE »

LE 14 JANVIER 2025

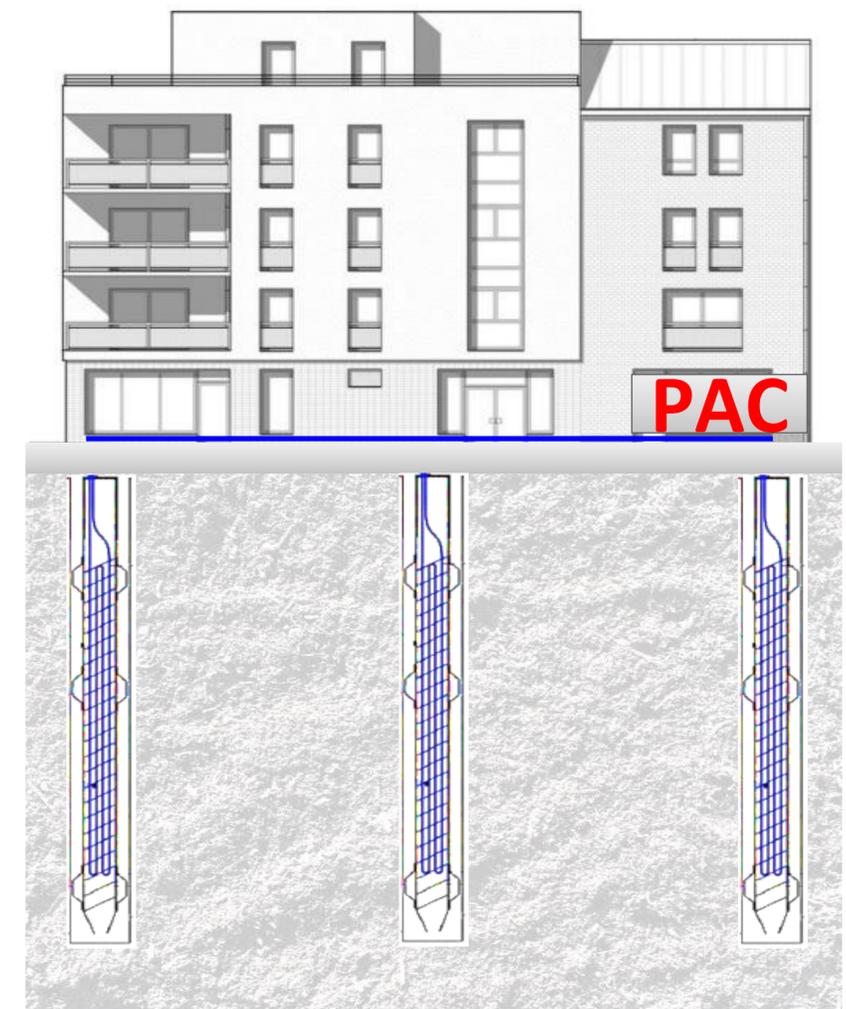
# Introduction

## Pieux énergétiques

- Les pieux énergétiques sont des pieux de fondation équipés d'un circuit fermé relié à une pompe à chaleur géothermique
- La température du sol au dessus de 5 m est 13°C
- Les pieux énergétiques peuvent à la fois soutenir le chargement du bâtiment et transformer la chaleur du terrain

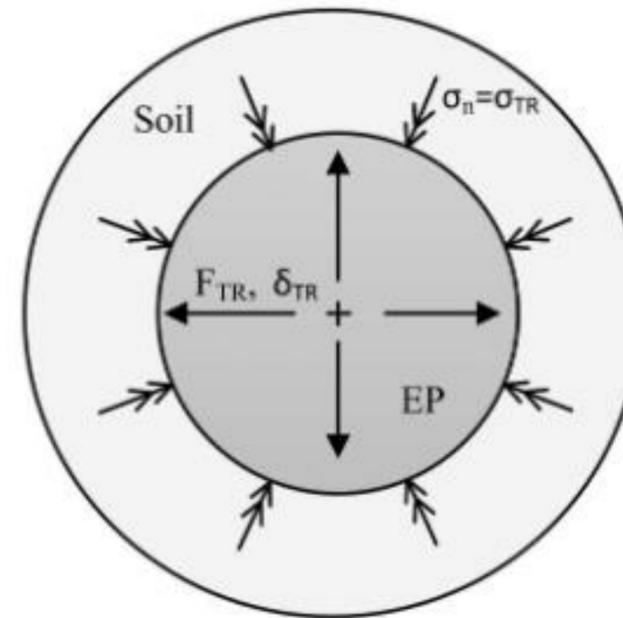
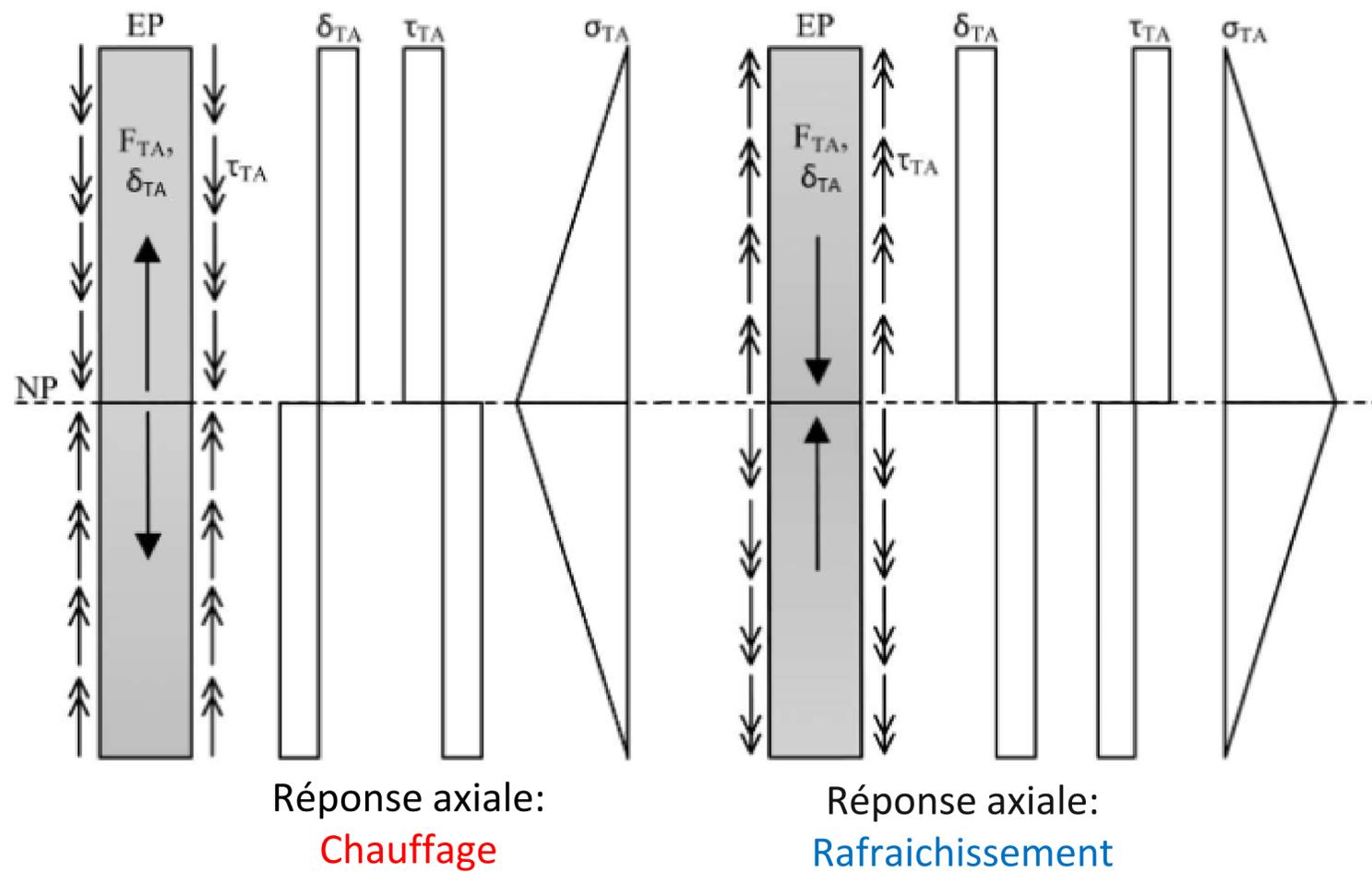


Climatisation par  
Pieux énergétiques +  
Pompe à chaleur géothermique (PAC)

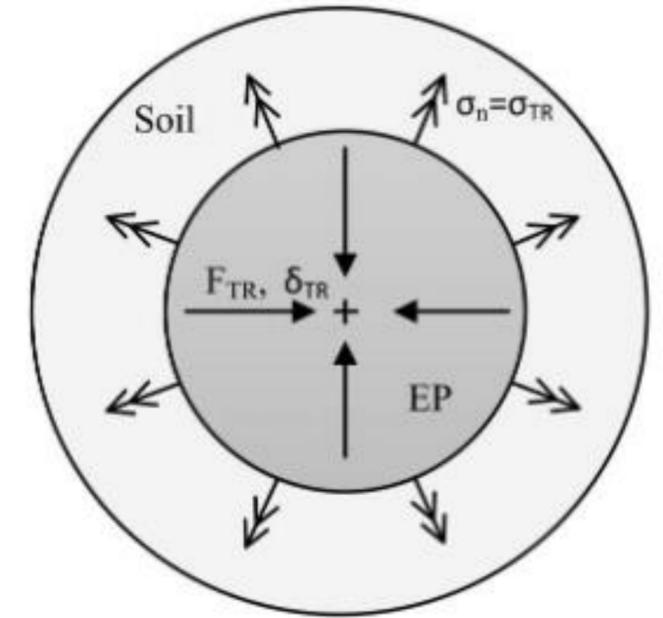


# Introduction

## Problématique



Réponse radiale:  
Chauffage



Réponse radiale:  
Rafrachissement



**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

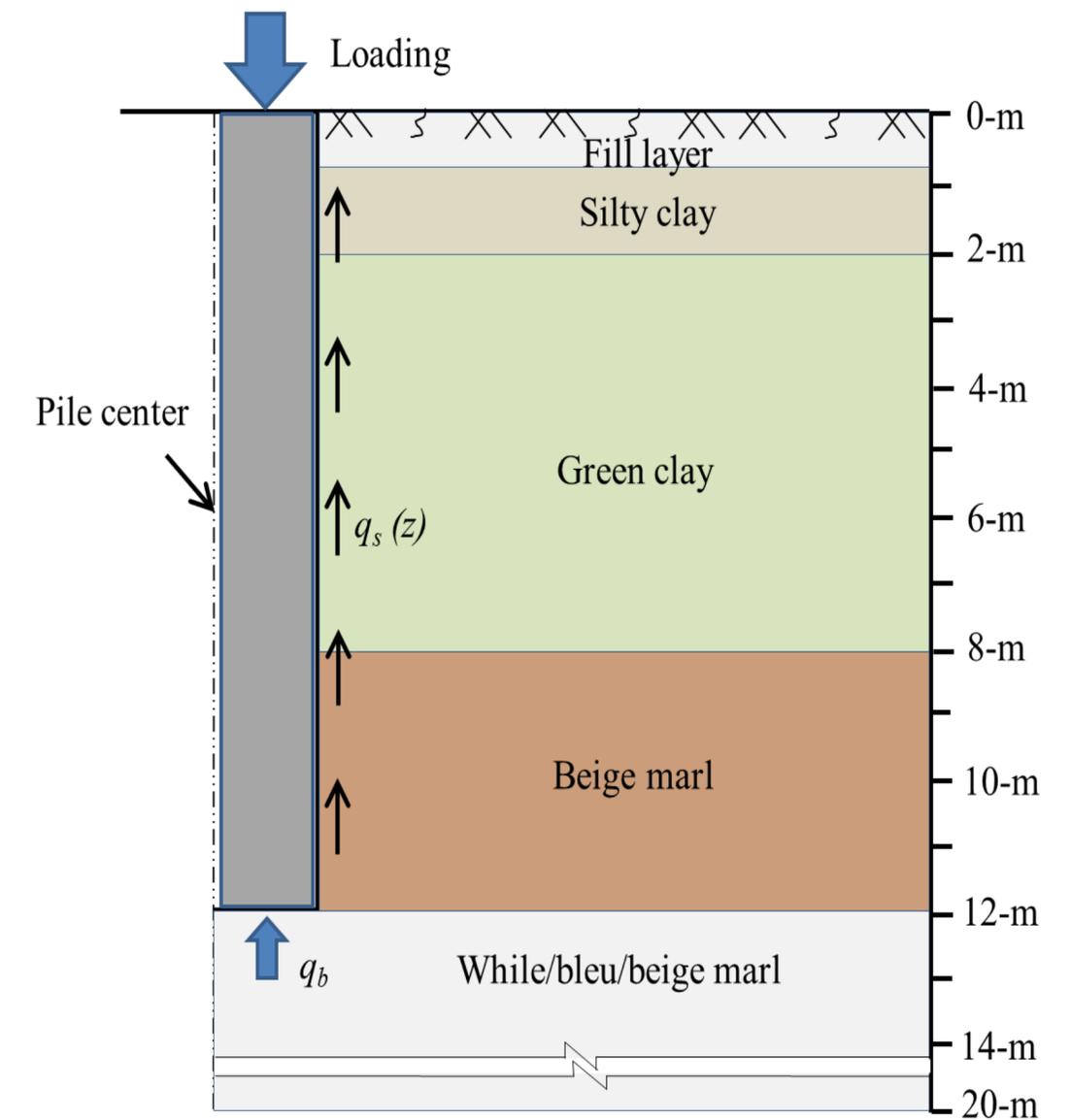
# Méthodologies: Essais in-situ

# Méthodologies: Essais in-situ

## Condition du terrain

Paramètres du sol

Profile	$\gamma$ ( $kN/m^3$ )	$P_L$ ( $MPa$ )	$E_M$ ( $MPa$ )	$c'$ ( $kPa$ )	$\varphi'$ ( $^\circ$ )	$q_d$ ( $MPa$ )	$\lambda$ ( $W/m/^\circ C$ )	$C_S$ ( $J/kg/^\circ C$ )	$k$ ( $m/s$ )
Fill	17	0.74-1.1	11.5-18.2	5	25	7-15	1.0	1200	3e-5
Silty clay	18	0.74-1.14	11.5-18.2	5	25	7-15	1.1	115	1e-7
Green clay	18	0.5-1.4	8.0-18.8	30	22	3-20	1.1	1150	4e-8
Beige marl	20	1.3-2.4	18.0-36.0	32	35	-	1.2	1000	1e-9
White/blue/beigel marl	20	1.3-2.8	12.0-68.0	32	35	-	1.2	1000	1e-9



Profil géotechnique du terrain  
du bâtiment Coriolis

# Méthodologies: Essais in-situ

## Dispositif expérimental

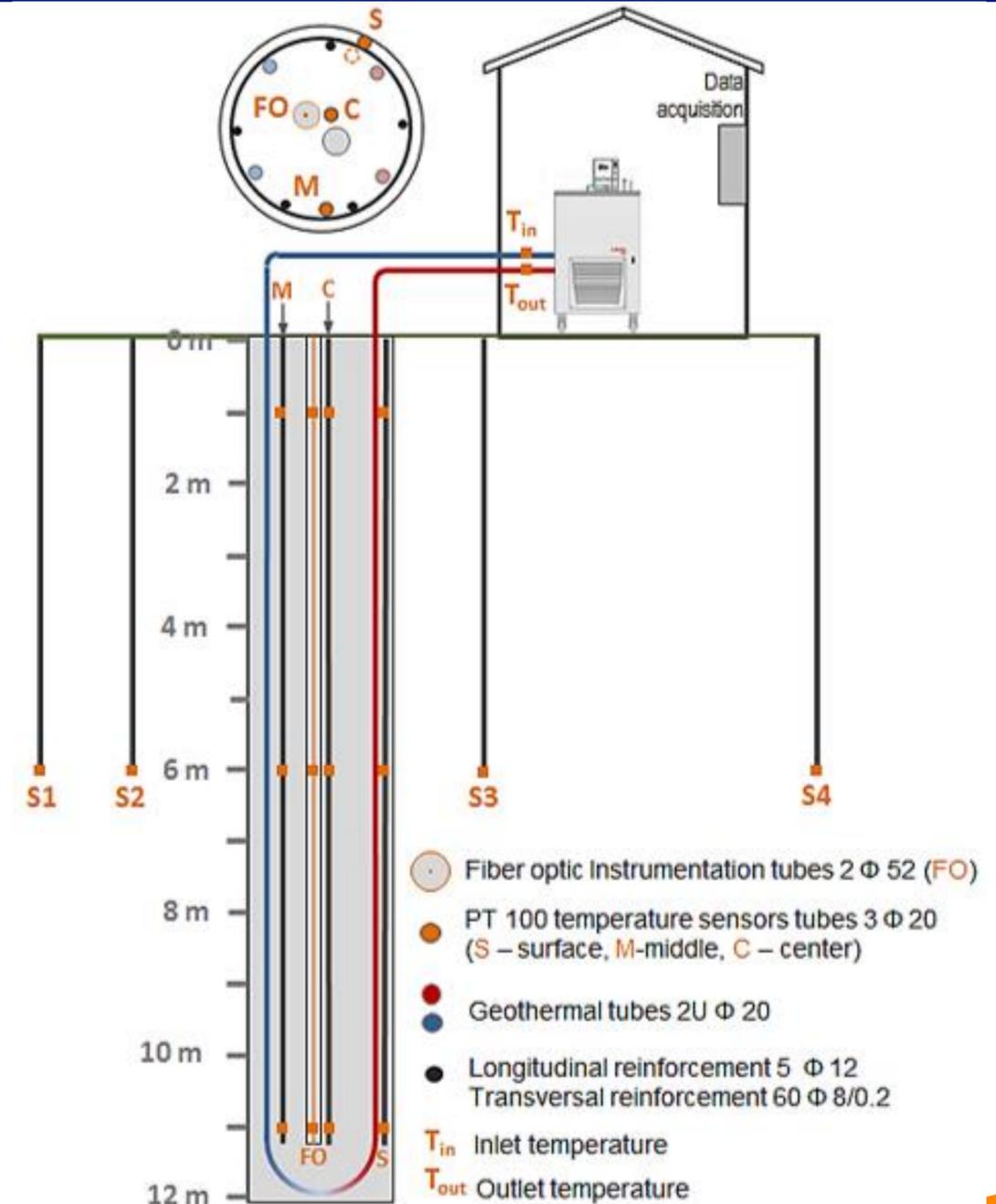
PFTC  $\Phi 420$  mm 12m



# Méthodologies: Essais in-situ

## Dispositif expérimental

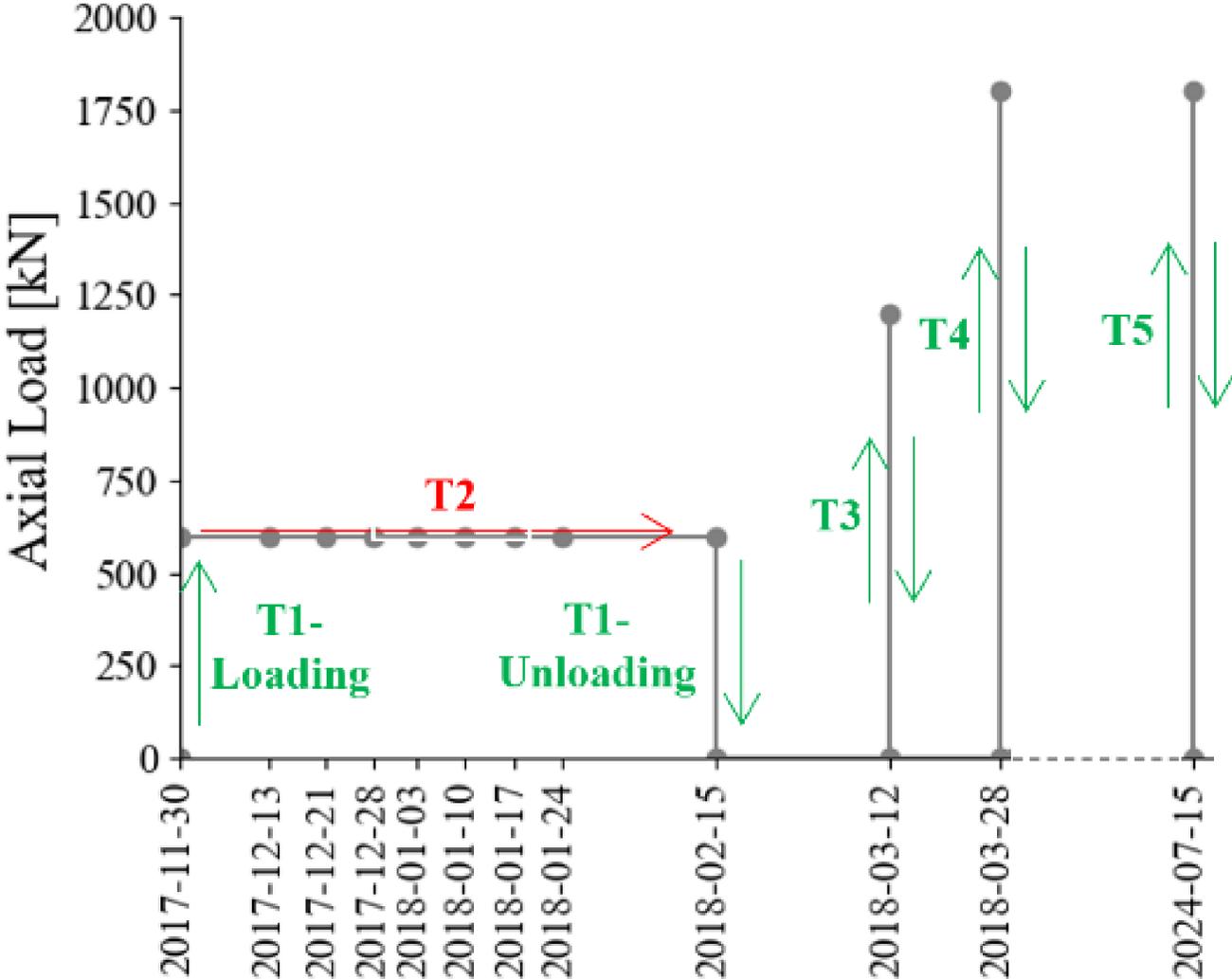
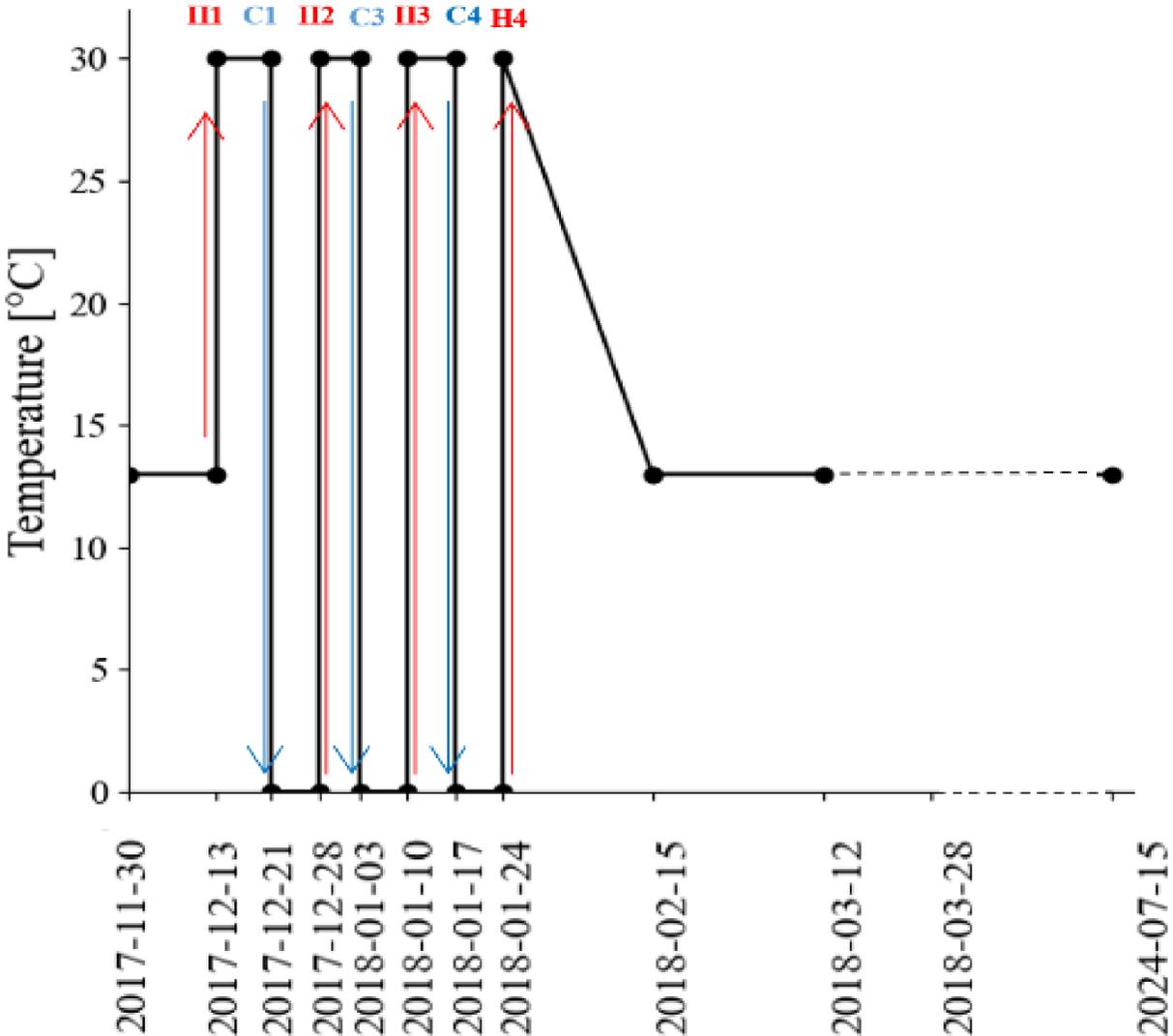
- Deux boucles de tuyaux thermiques ont été fixés aux cages d'armature pour circuler la fluide afin de transformer la chaleur
- Le système de chargement thermique utilise un circulateur réfrigéré/chauffant connecté aux tuyaux thermiques, avec un contrôle de température via un bain d'eau constant
- Des capteurs de température et un fibre optique sont installés dans chaque pieu pour mesurer la température et la déformation



# Méthodologies: Essais in-situ

## Programme des essais

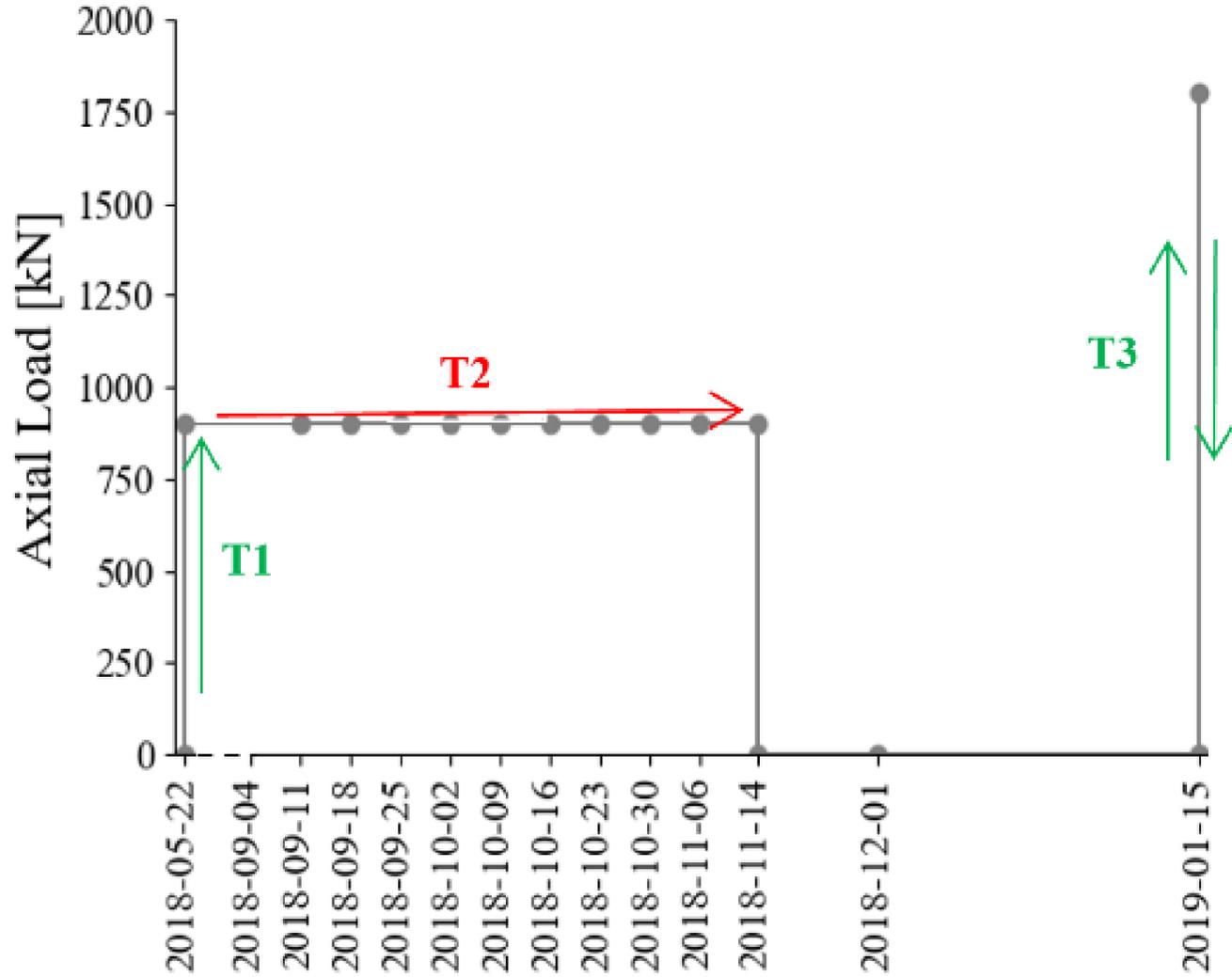
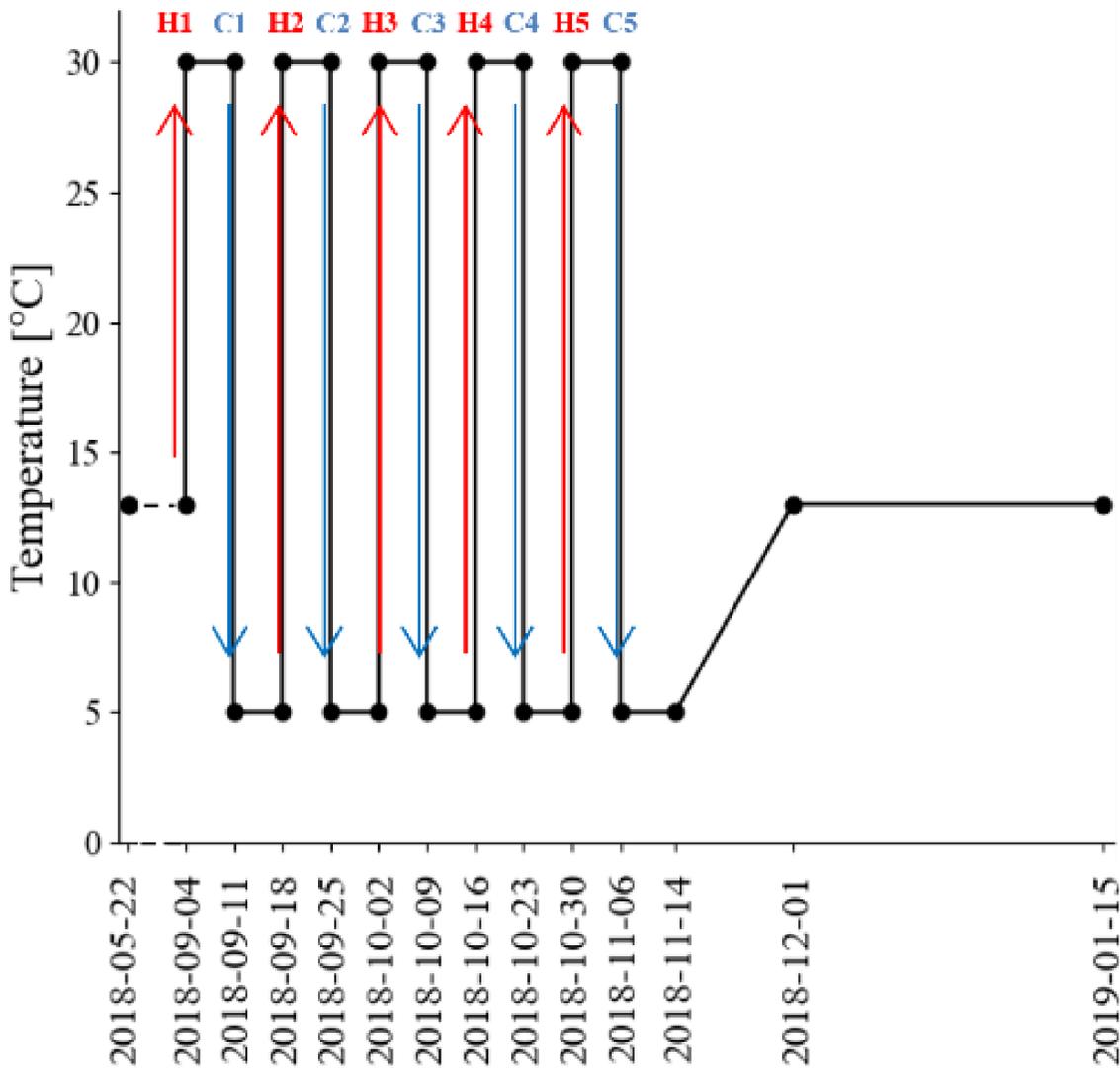
P1



# Méthodologies: Essais in-situ

## Programme des essais

P2





**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

# Méthodologies: Simulation 1D-FEM

# Méthodologies: Simulation 1D-FEM

## Description du modèle numérique

### Description globale

- Le pieu est divisée en éléments (deux nœud pour chaque élément). Chaque nœud a 1 degré de liberté dans la direction axiale
- Tous les éléments sont reliés au sol par un ressort dans la direction axiale. Les éléments de pile adjacents sont également interconnectés

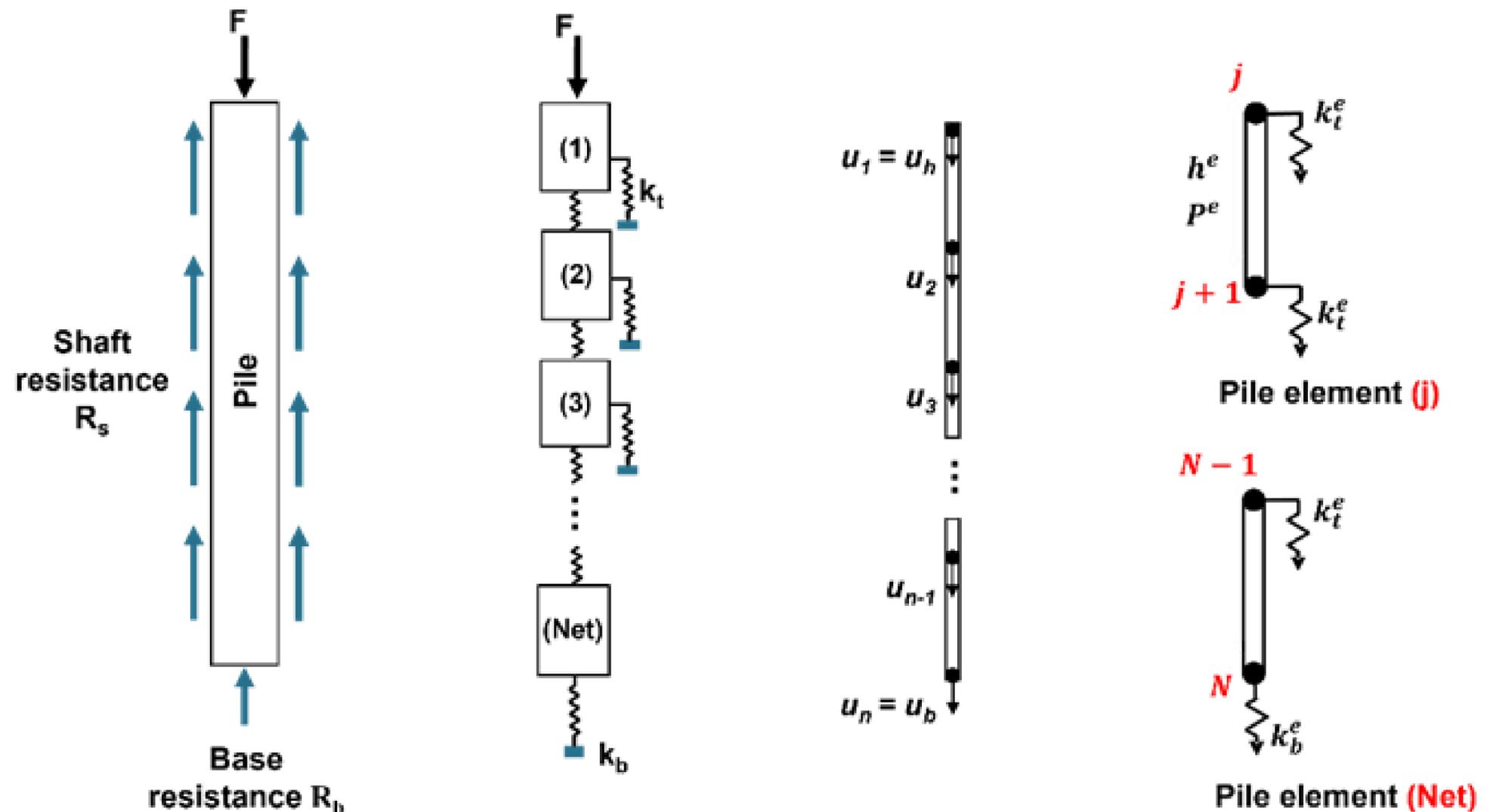


Schéma du modèle numérique

# Méthodologies: Simulation 1D-FEM

## Description du modèle numérique

Equation d'équilibre de chaque élément:

$$[K_p^e + K_{soil}^e] \{u^e\} = [K_p^e + K_{soil}^e] \begin{Bmatrix} u_j^e \\ u_{j+1}^e \end{Bmatrix} = \{F_{ext}^e\}$$

$$\{F_{ext}^e\} = \{F_{mec}^e\} + \{F_{th}^e\} = \{F_{mec}^e\} + [H^e] \begin{Bmatrix} \Delta T_j \\ \Delta T_{j+1} \end{Bmatrix}$$

$$[H^e] = \frac{\alpha_e E_{pe} S_e}{2} \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

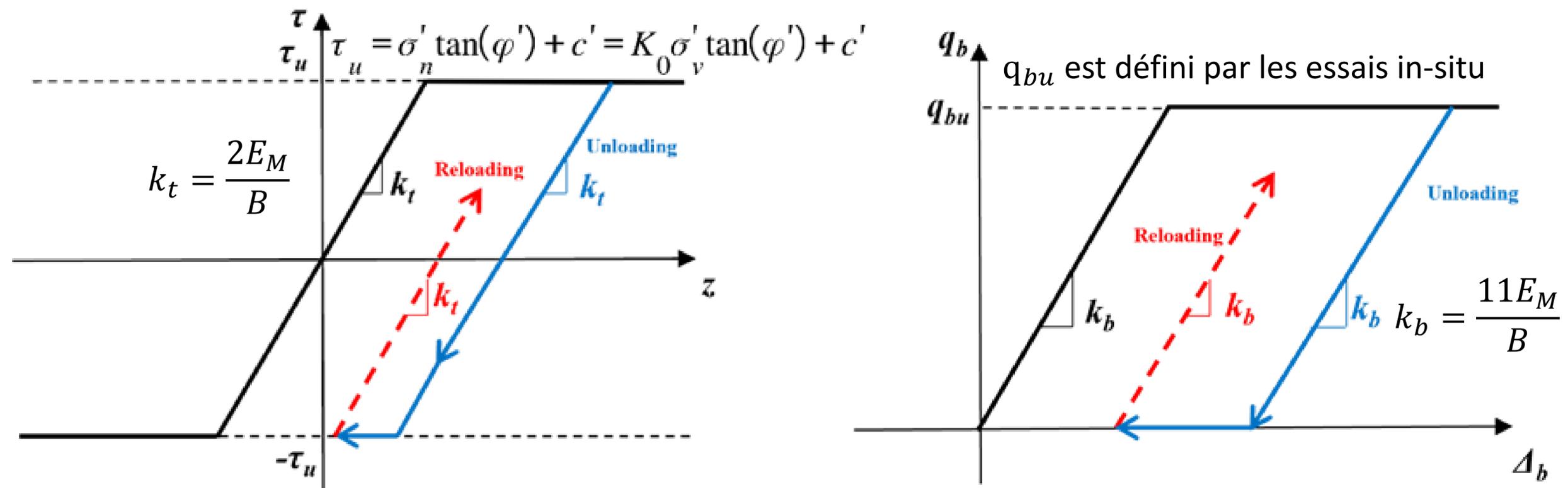
$$[K_p^e] = \frac{E_{pe} S_e}{h_e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad [K_{soil}^e] = -k_t P_e h_e \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{6} \end{bmatrix}$$

- $u^e$  est le vecteur de déplacement, ce qui est composé de  $u_j^e$  et  $u_{j+1}^e$  représentant les déplacements des nœuds supérieur et inférieur de chaque élément
- $F_{ext}^e$  est le vecteur de force externe, ce qui est composé de chargement mécanique  $F_{mec}^e$  et de chargement thermique  $F_{th}^e$
- $F_{th}^e$  est convertie en un vecteur composé de  $\Delta T_j$  pour le nœud supérieur et de  $\Delta T_{j+1}$  pour le nœud inférieur de l'élément
- $H^e$  est la matrice de couplage thermique pour transformer la variation température en un chargement mécanique
- $\alpha_e$  est le coefficient de gonflement du pieu;  $E_{pe}$  est le module élastique du pieu;  $S_e$  est la surface de la section du pieu
- $K_p^e$  est la matrice de rigidité du pieu;  $K_{soil}^e$  est la matrice de rigidité de contact sol-pieu
- $h_e$  est la longueur des éléments;  $k_t$  est la rigidité de ressort de l'interface sol-pieu;  $P_e$  est le périmètre du pieu

# Méthodologies: Simulation 1D-FEM

## Description du modèle numérique

Loi de comportement de l'interface sol-pieu:



Loi de comportement de l'interface sol-pieu

# Méthodologies: Simulation 1D-FEM

## Description du modèle numérique

### Paramètres du modèle:

- La géométrie du pieu dans le modèle est la même avec celle de l'essai in-situ
- Les paramètres ont été choisis pour correspondre au mieux aux résultats de l'expérience

Properties	$L$ (m)	$B$ (m)	$L_e$ (m)	$\gamma$ ( $kN/m^3$ )	$E$ (GPa)	$\alpha$ ( $^{\circ}C^{-1}$ )
Pile	12	0.42	0.2	18	40	$1.0 \times 10^{-5}$

### Paramètres des pieux

Profile	Depth (m)	$\gamma$ ( $kN/m^3$ )	$k_t$ ( $kPa/m$ )	$k_b$ ( $kPa/m$ )	$K_0$
Fill	0-0.7	17	54762	-	1
Silty clay	0.7-2	18	68809	-	1
Green clay	2-8	18	54048	-	1
Beige marl	8-12	20	106714	-	1
White/blue/beigel marl	-	20	-	785714	1

### Paramètres du sol



**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

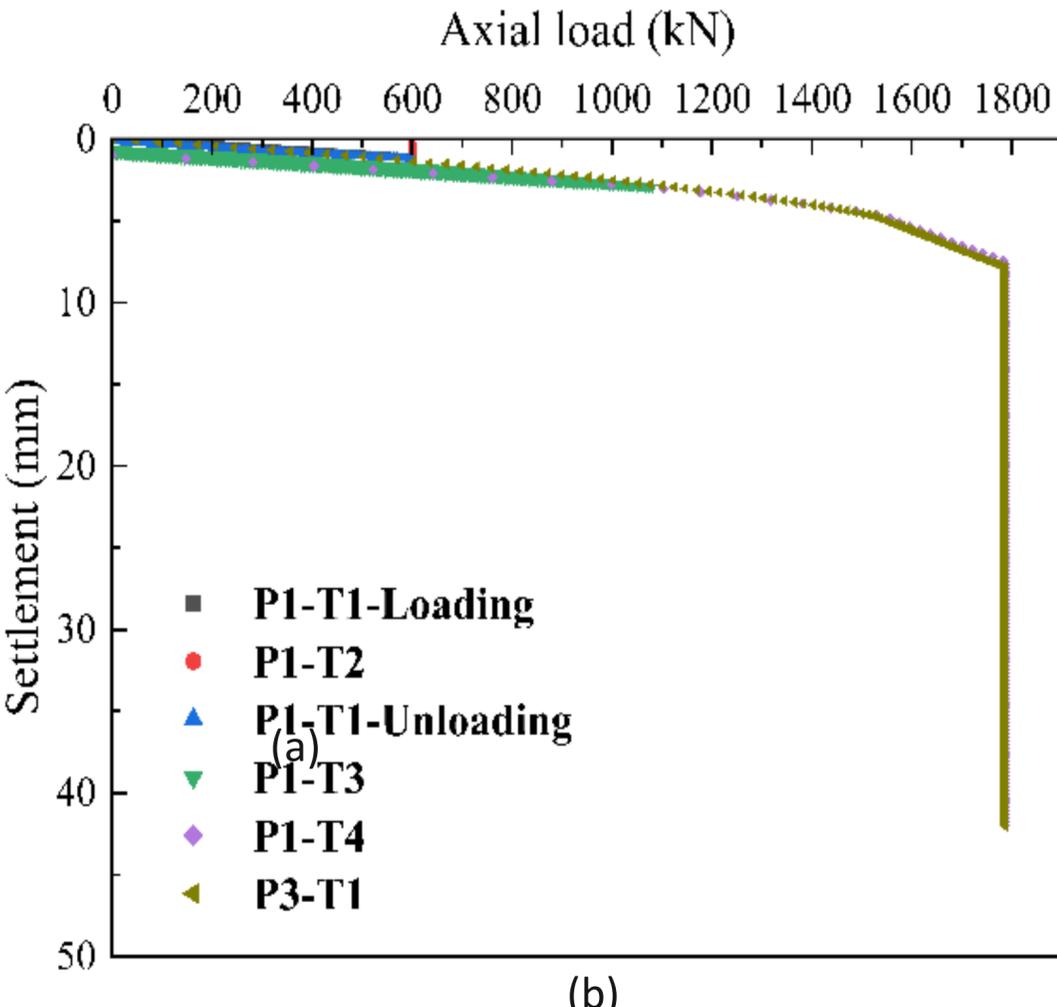
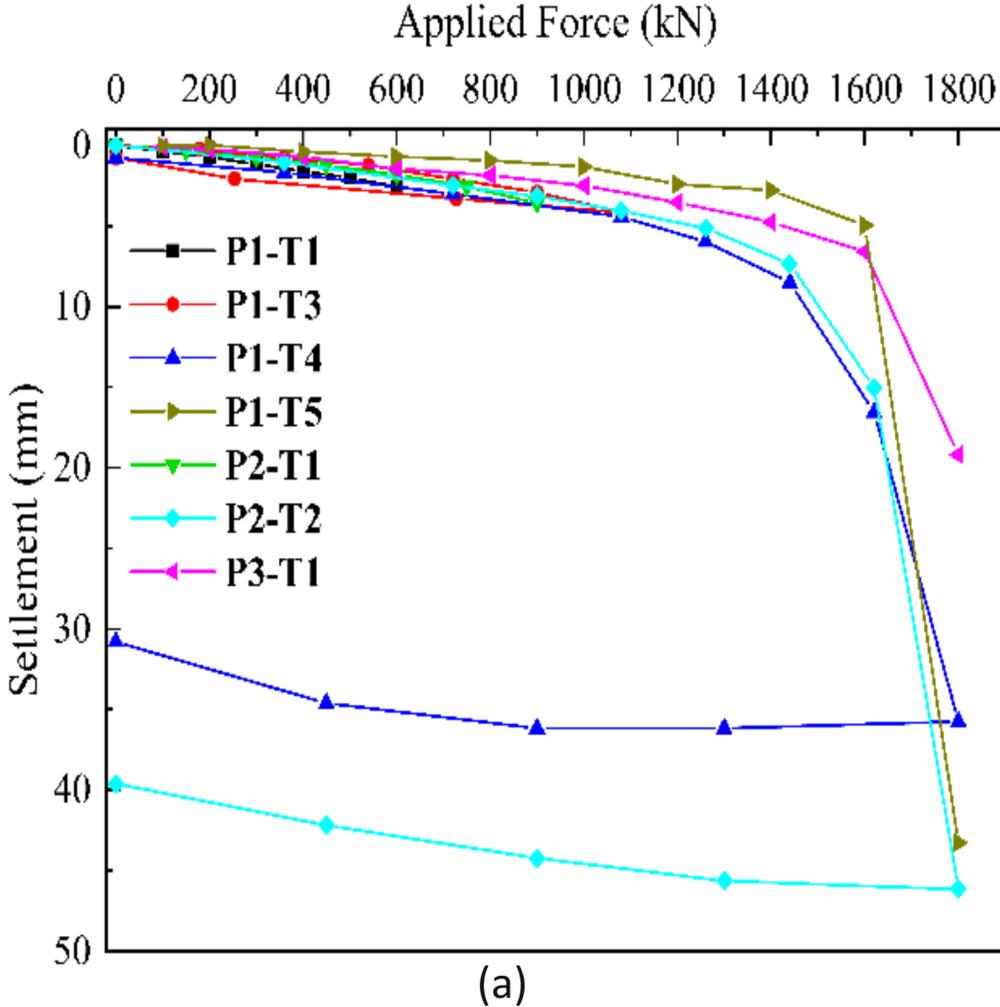
# Résultats et discussions

# Résultats et discussions

## Comportement mécanique

Courbe chargement-tassement: (a) Expériment; (b) Simulation

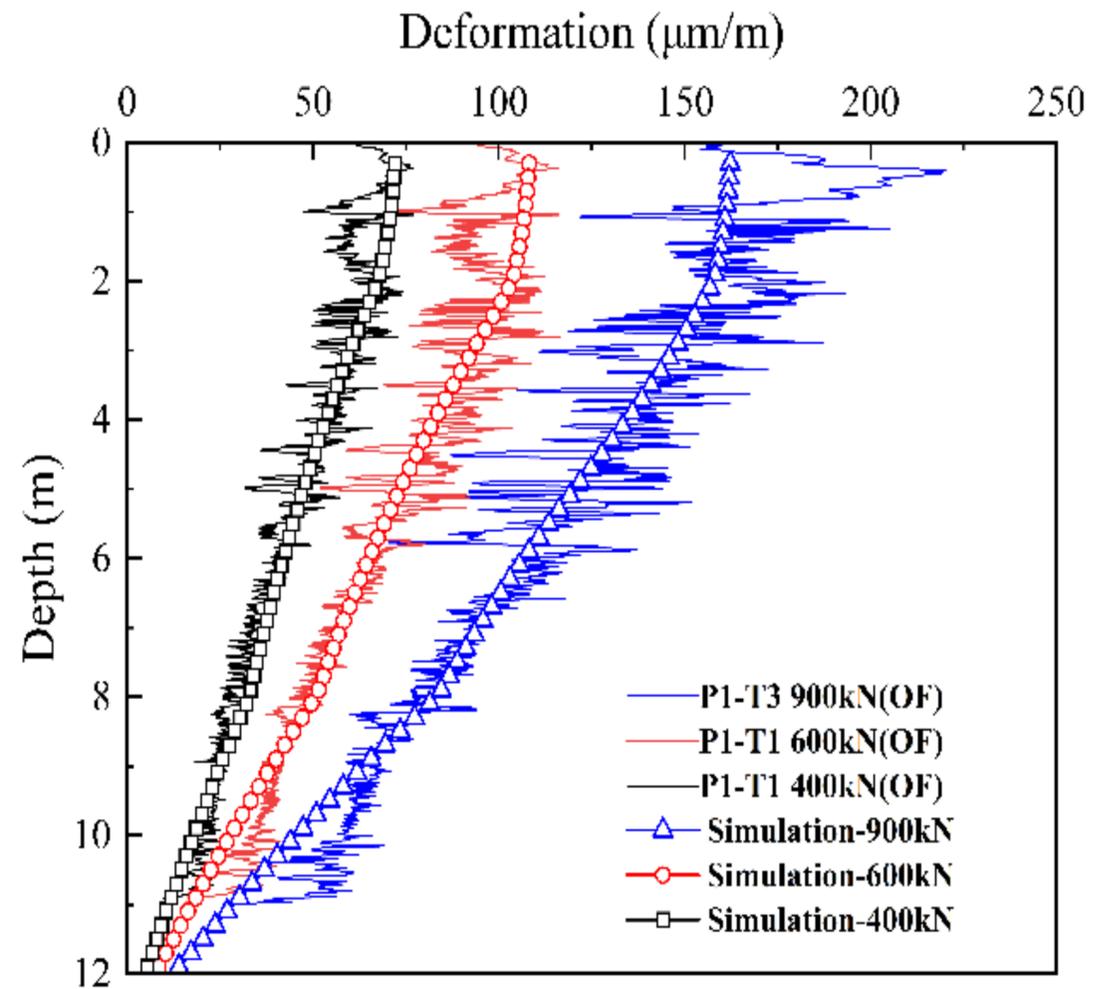
$Q_{ult}=1800\text{kN}$



# Résultats et discussions

## Comportement mécanique

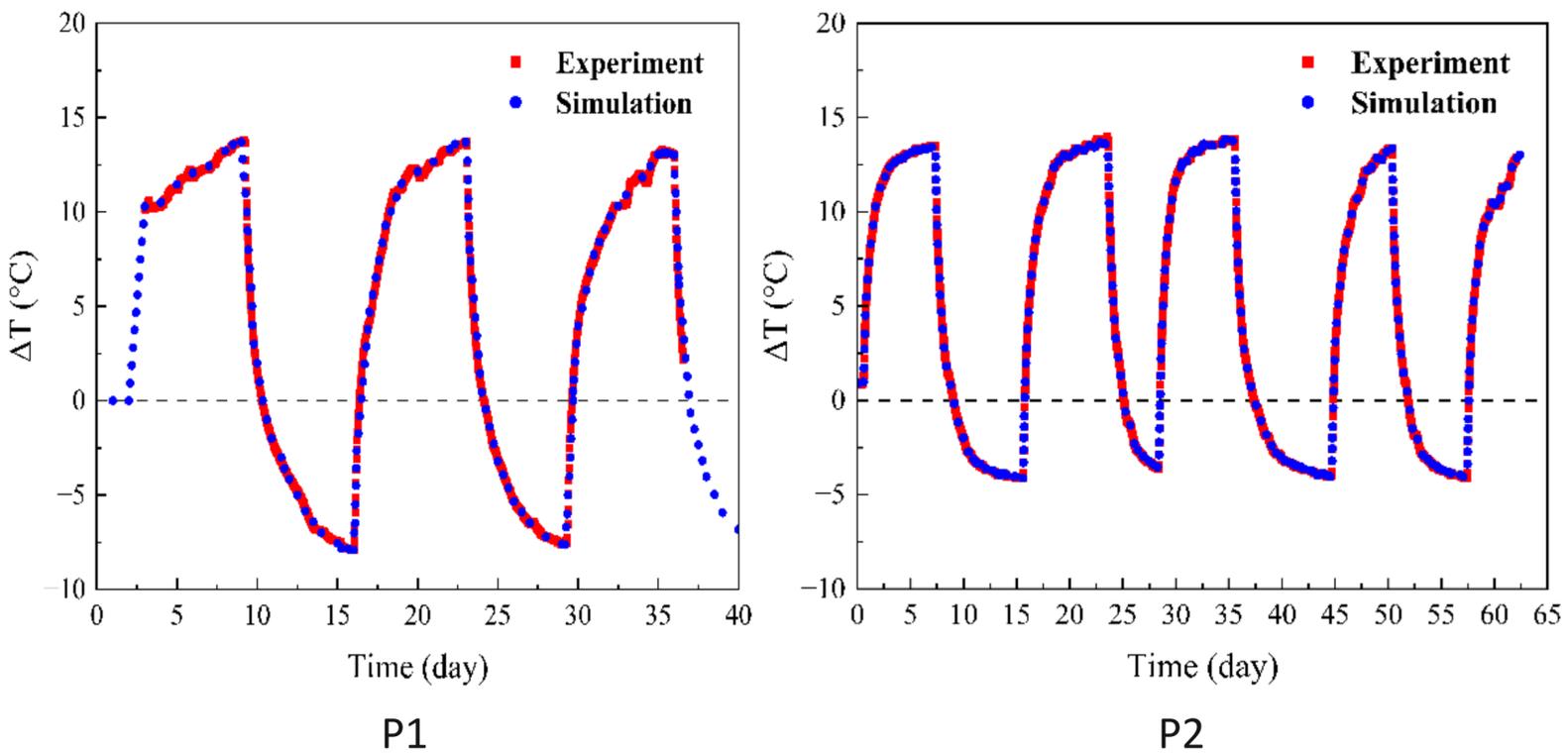
Profil de déformation axiale de P1



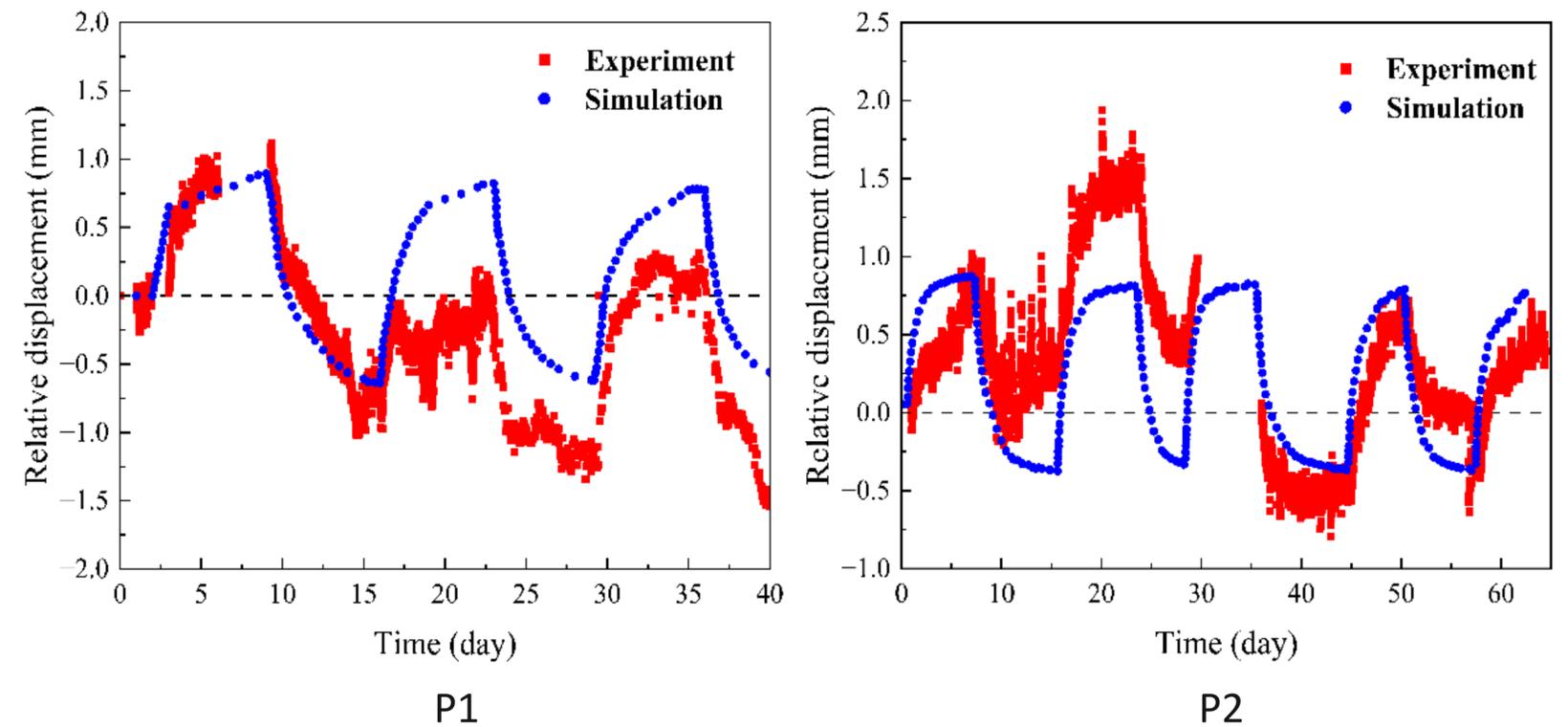
# Résultats et discussions

## Comportement thermo-mécanique

Variation de température le long du temps



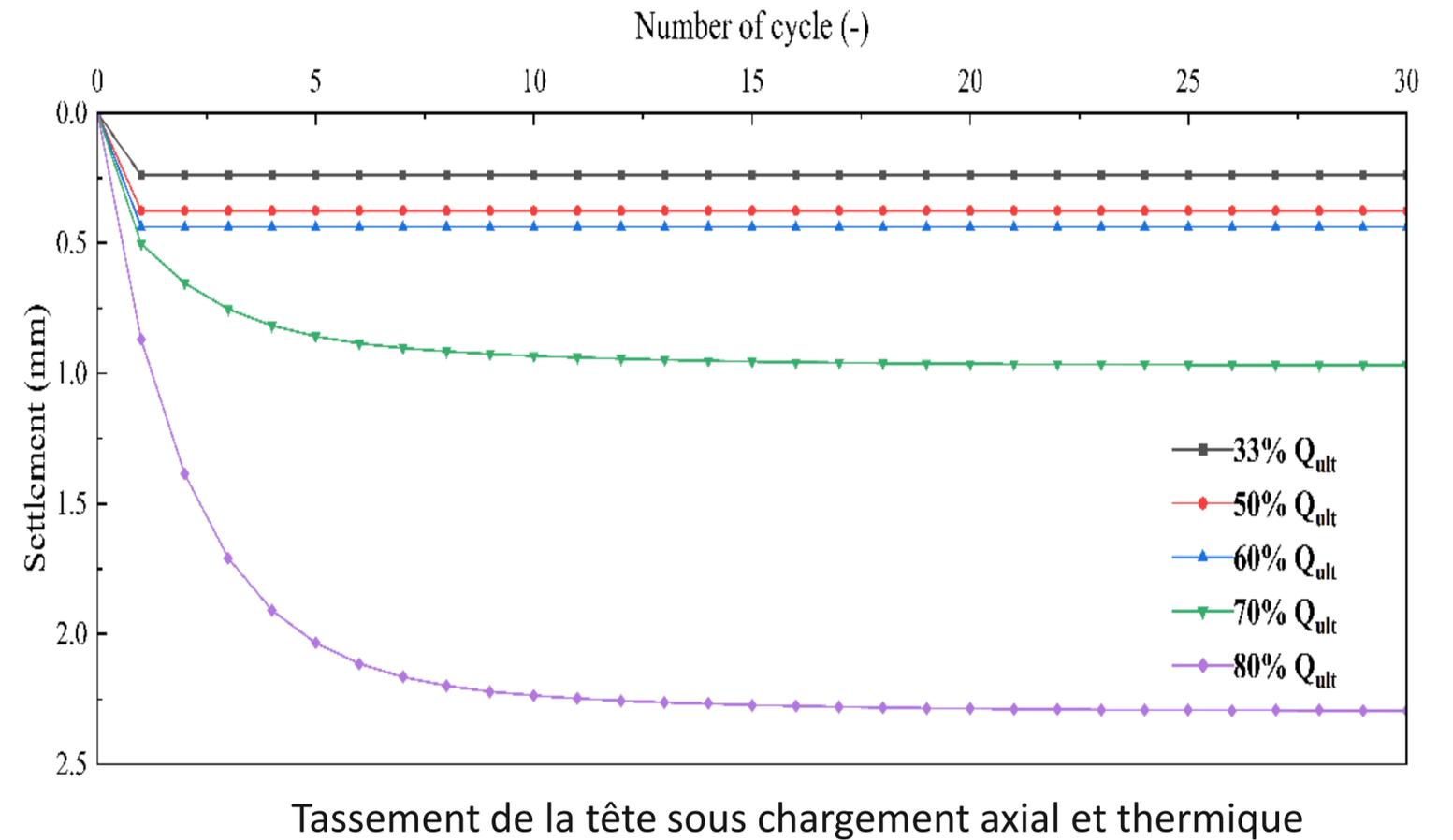
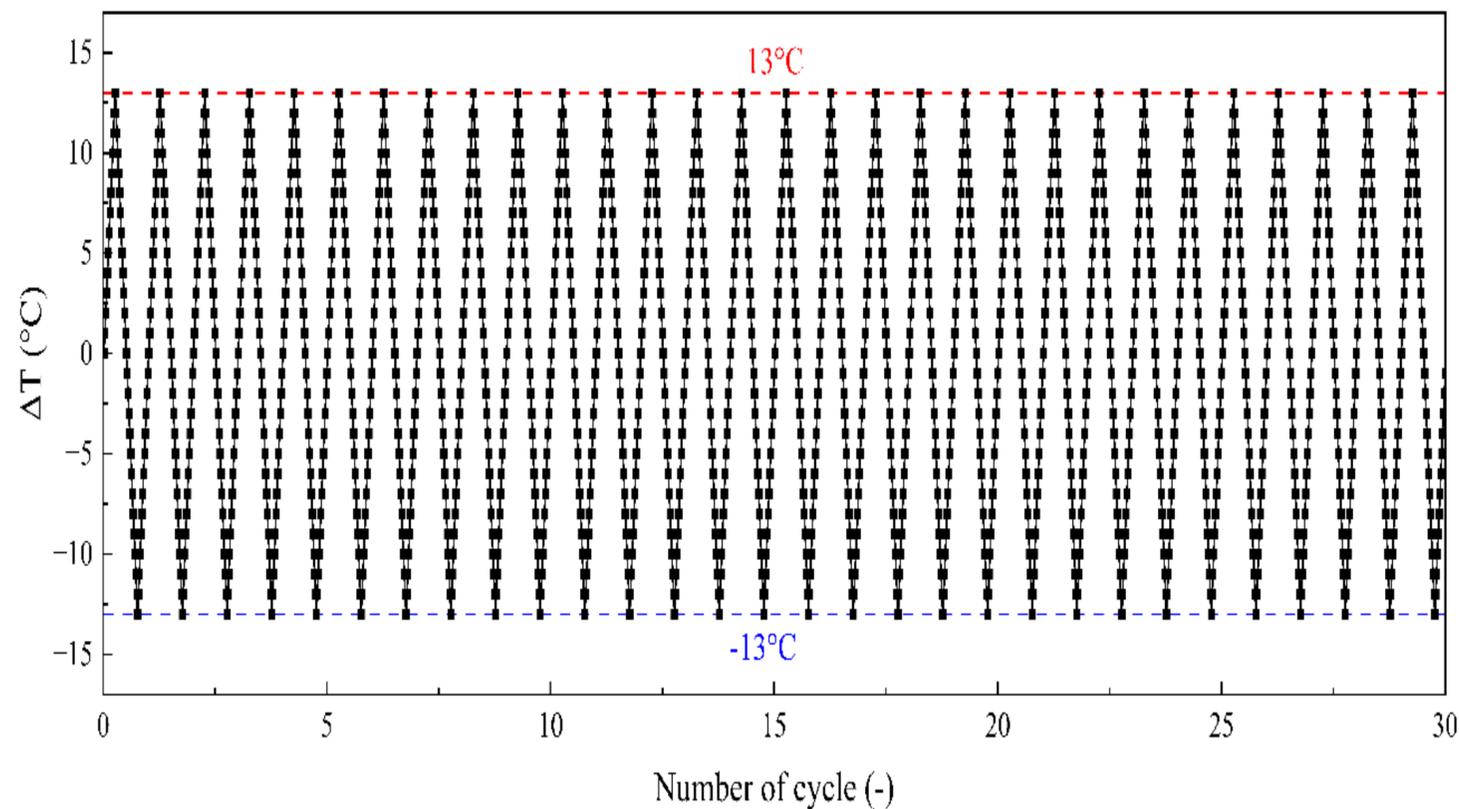
Déplacement de la tête du pieu le long du temps



# Résultats et discussions

## Comportement thermo-mécanique à long-terme

Courbe chargement-tassement sous chargement axial+thermique:





**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

# Conclusions et Perspectives

# Conclusions et Perspectives

## Conclusions:

- Le modèle numérique représente bien les résultats mécaniques et thermo-mécanique de l'expérience
- Le tassement irréversible de la tête du pieu se produit à un niveau élevé de chargement axial
- Le tassement le plus important a lieu après le premier cycle thermique
- L'augmentation du tassement diminue avec les cycles thermiques

# Conclusions et Perspectives

## Conclusions:

- Le modèle numérique représente bien les résultats mécaniques et thermo-mécanique de l'expérience
- Le tassement irréversible de la tête du pieu se produit à un niveau élevé de chargement axial
- Le tassement le plus important a lieu après le premier cycle thermique
- L'augmentation du tassement diminue avec les cycles thermiques

## Perspectives:

- Pour les essais in-situ, ajouter le chargement horizontal afin d'étudier le comportement sous chargement combiné
- Pour le modèle numérique, prendre en compte l'effet du chargement horizontal sur le comportement mécanique et thermo-mécanique du pieu



**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

# Merci pour votre attention