

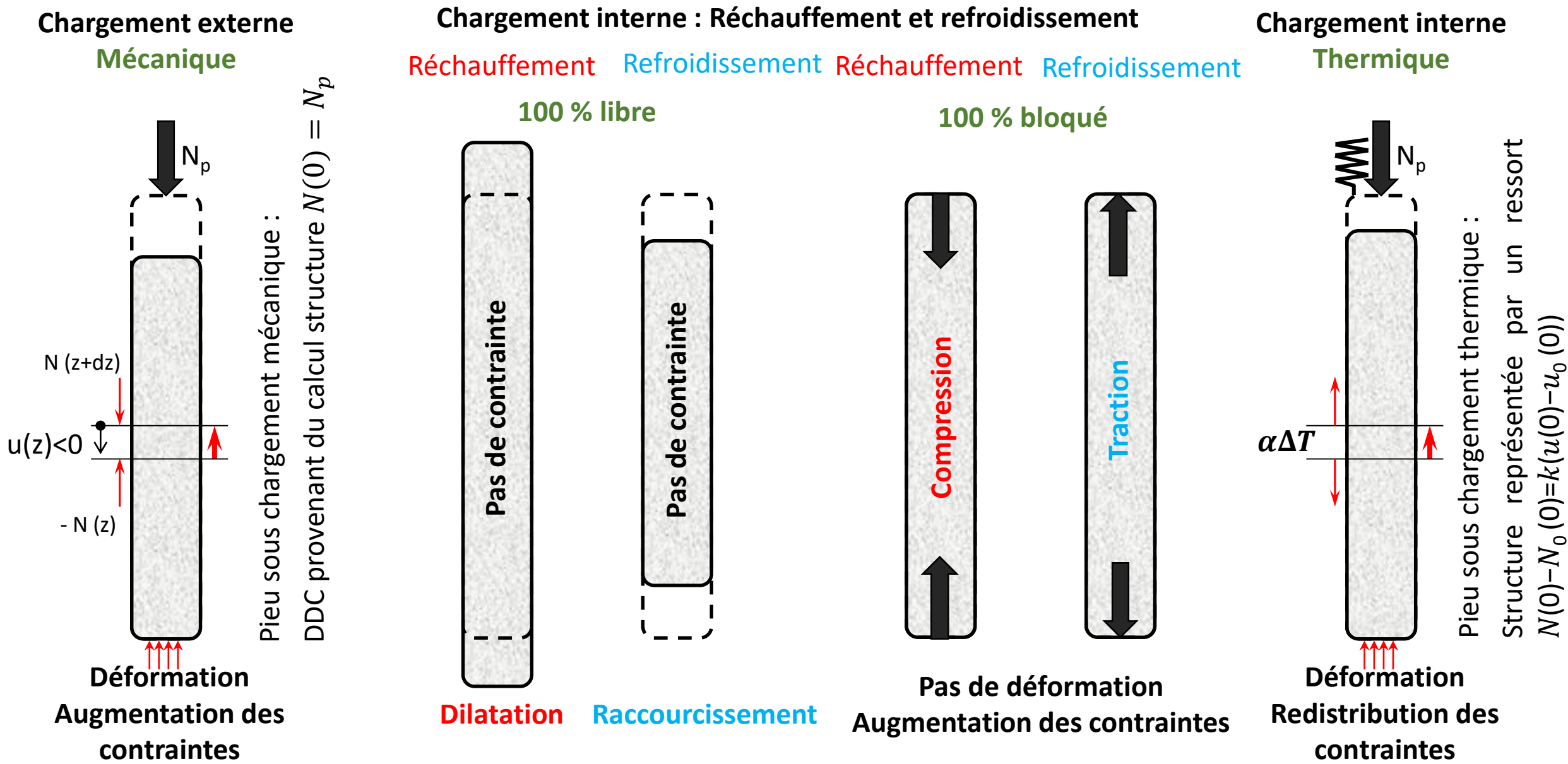


# Structures énergétiques : Interaction Pieu-Sol-Structure

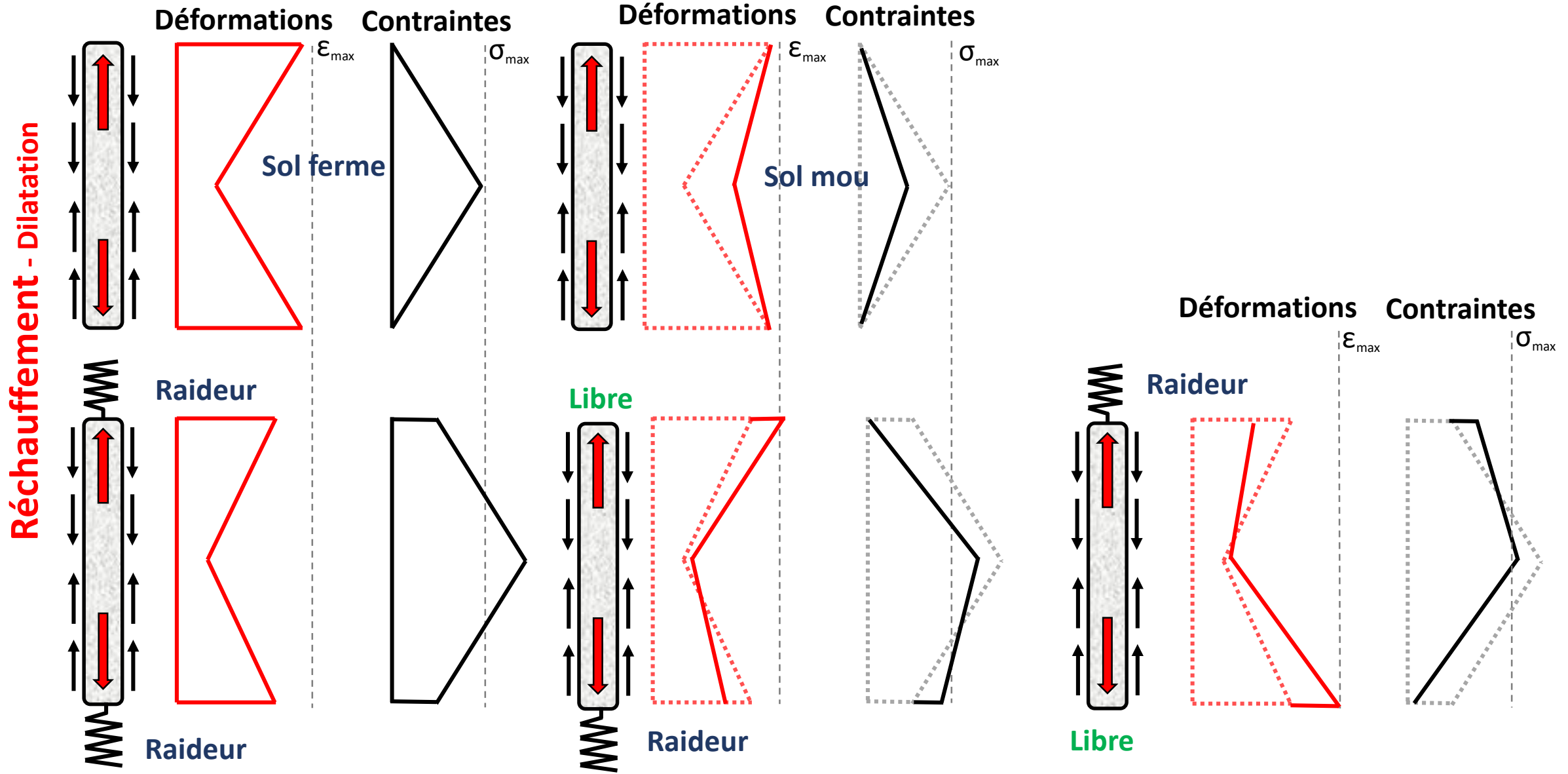
Cyril BORELY (Terrasol)

Umur Salih OKYAY (WSP France)

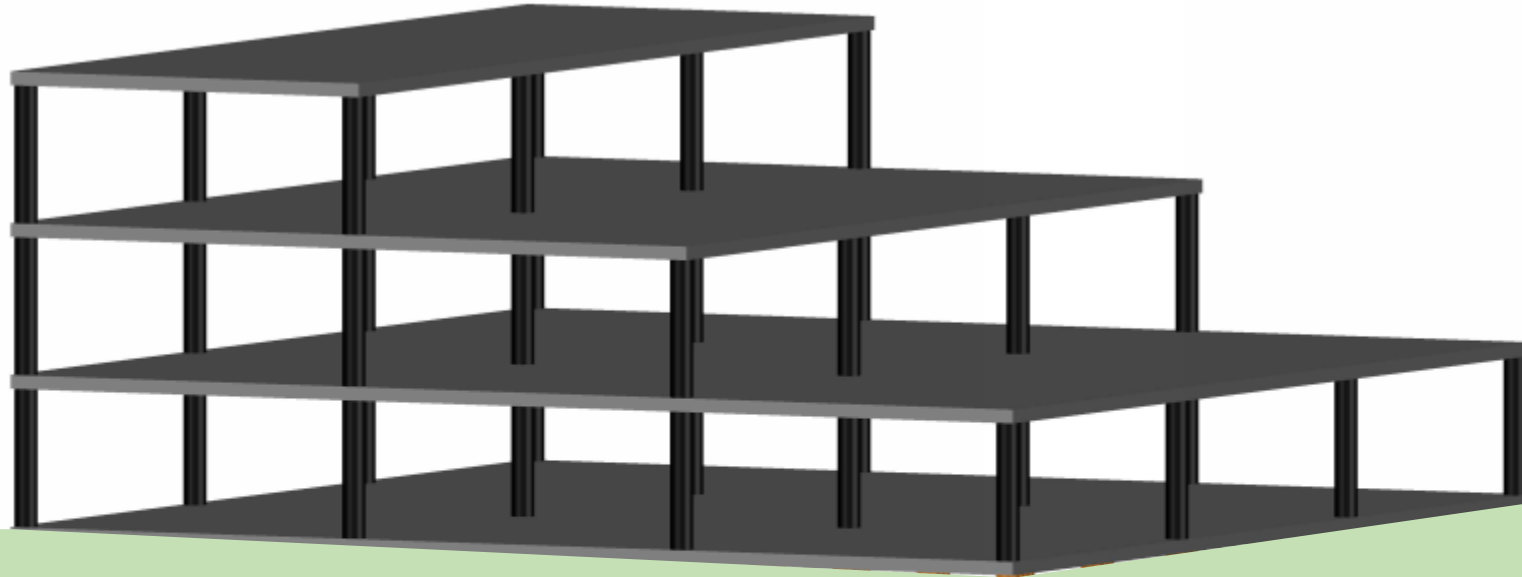
# Influence des conditions aux limites sur le comportement des pieux



# Influence des conditions aux limites sur le comportement des pieux



# Interaction entre les pieux énergétiques et la structure



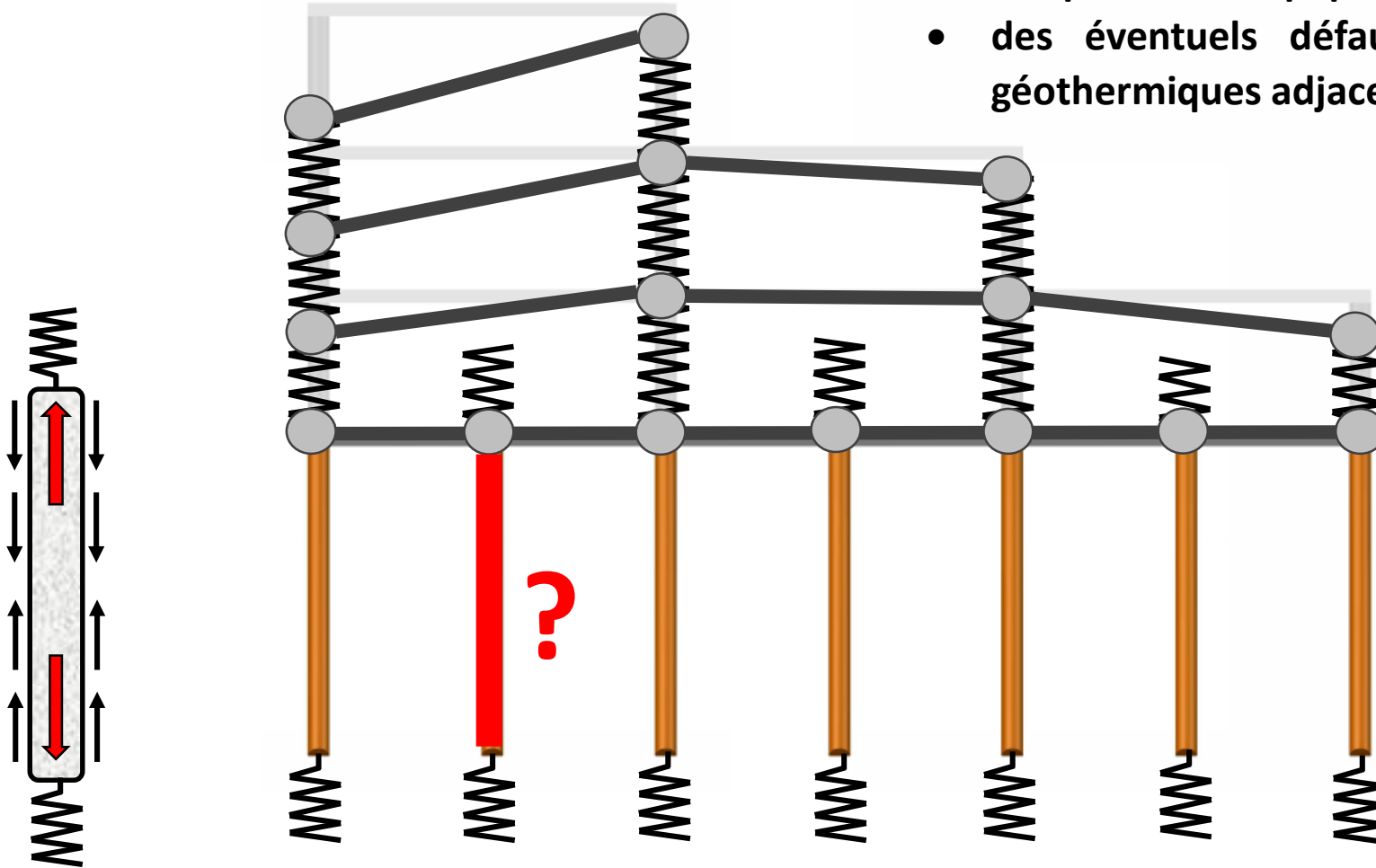
**Pour effectuer la modélisation, trois approches sont possibles :**

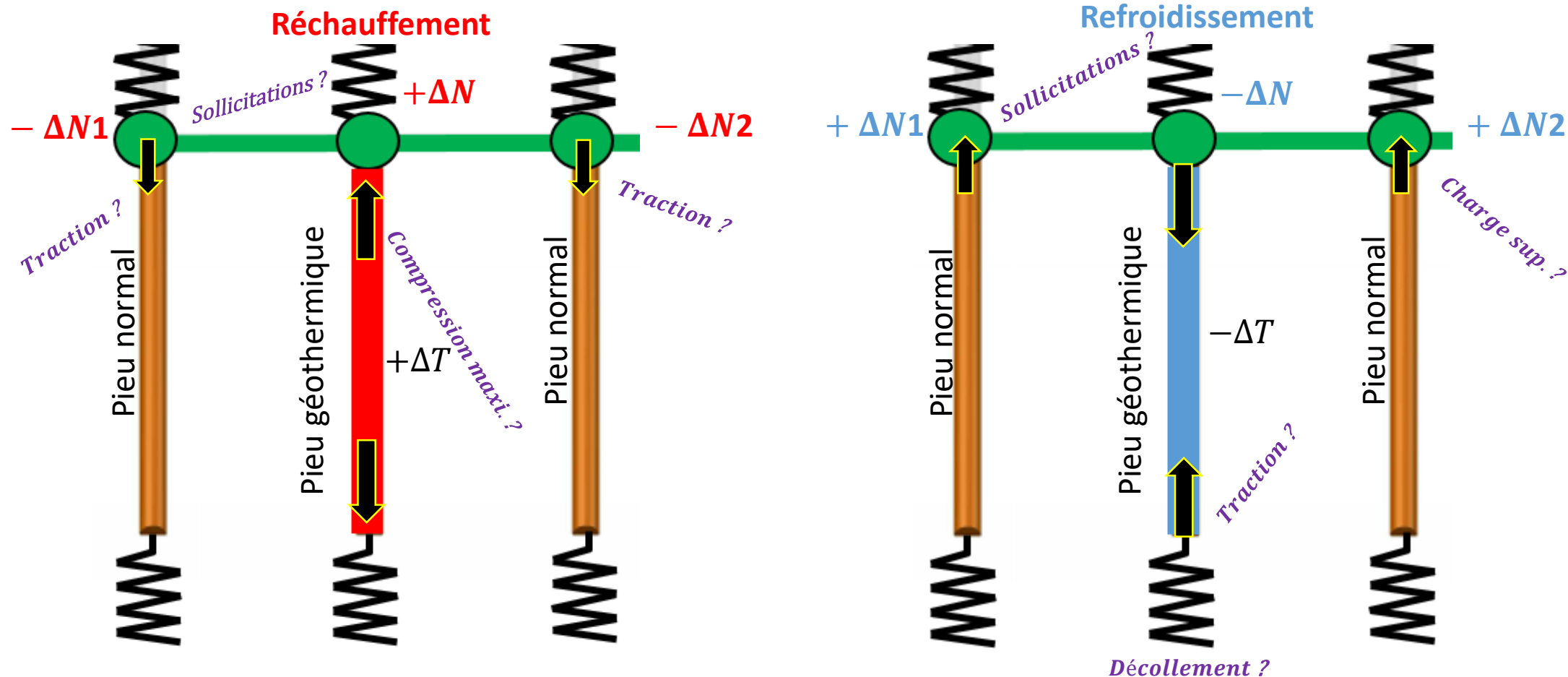
- Approche par modèle structure : à l'aide d'éléments finis, d'une matrice de rigidité.
- Approche par ressort où la structure est modélisée par une rigidité en tête de chaque pieu en phase thermique ;
- Approche en fourchette où le pieu est considéré libre en tête ou bloqué en tête lors de la phase thermique.

# Interaction entre les pieux énergétiques et la structure

La rigidité en tête doit permettre de rendre compte :

- des pieux non équipés situés à proximité ;
- des éventuels défauts de fonctionnement des pieux géothermiques adjacents





**Variation de température dans le pieu, d'où des sollicitations mécaniques supplémentaires :**

- Dans le pieu (compression supplémentaire, traction en pointe, ferrailage nécessaire)
- Dans la structure au-dessus (variation de la descente de charge, moments additionnels)

**Effort supplémentaire induit dans un appui compensé dans un autre appui**

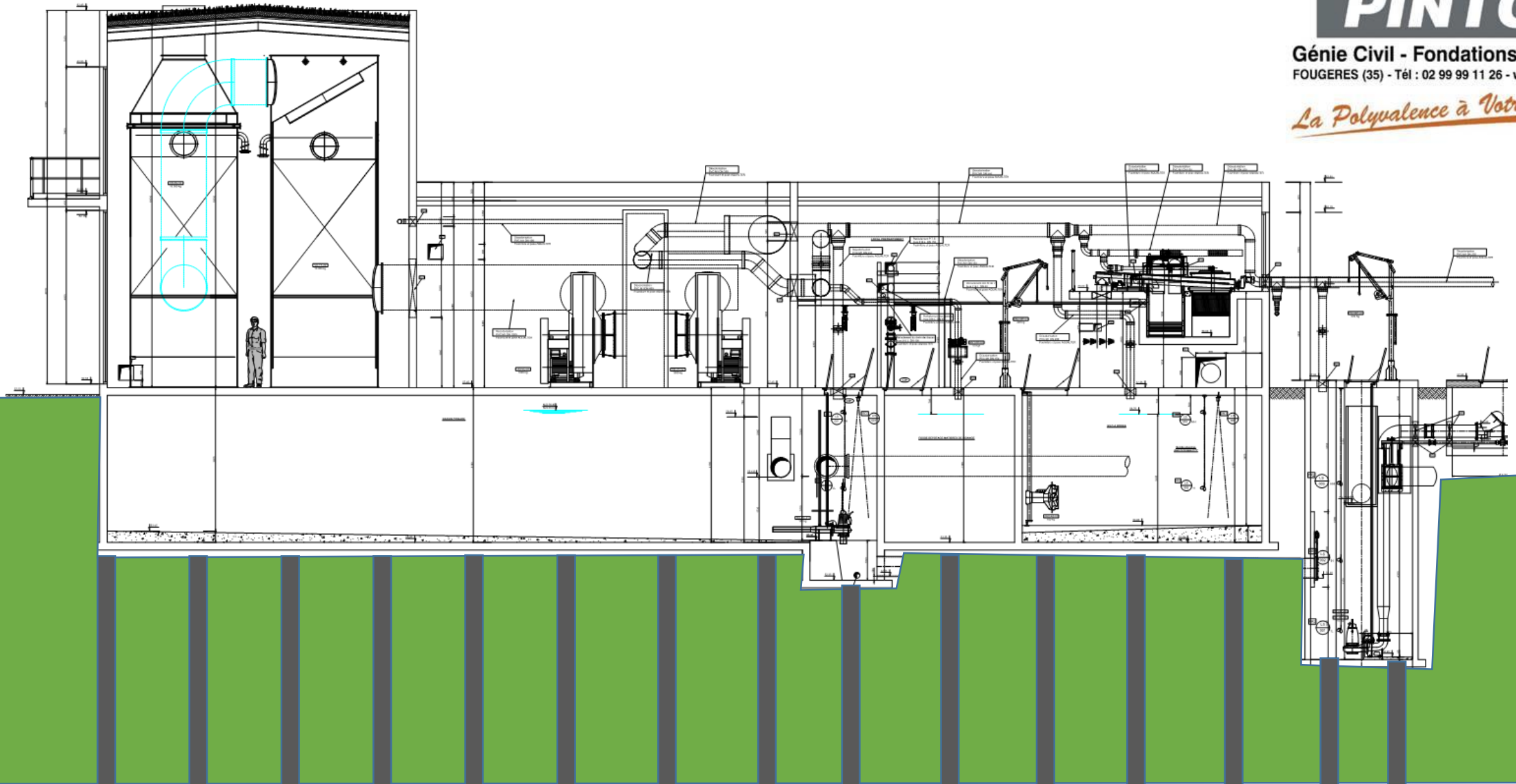
# Etude d'un cas réel – Station d'épuration Sept-Sorts

Ingénieur - Constructeur

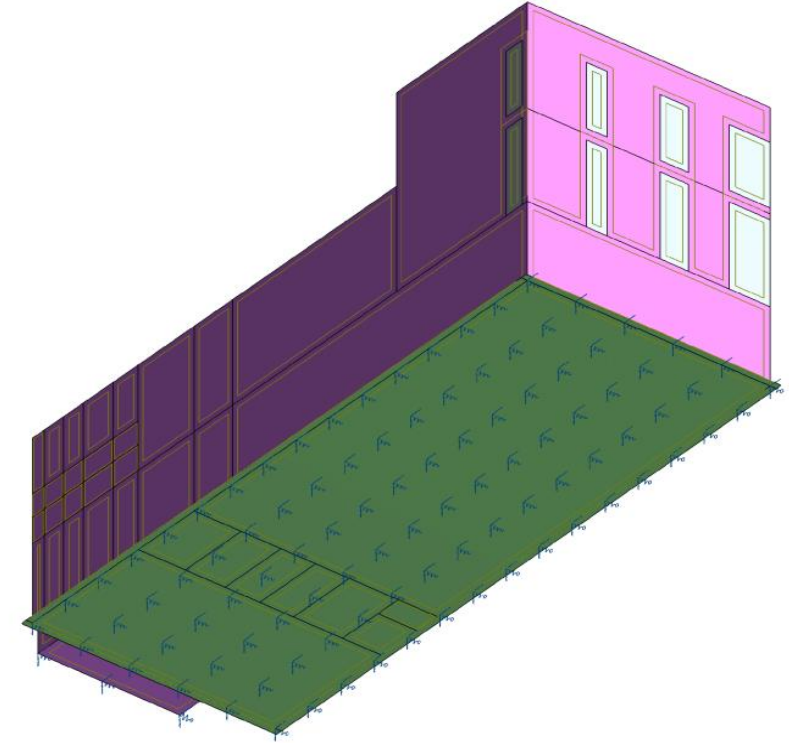
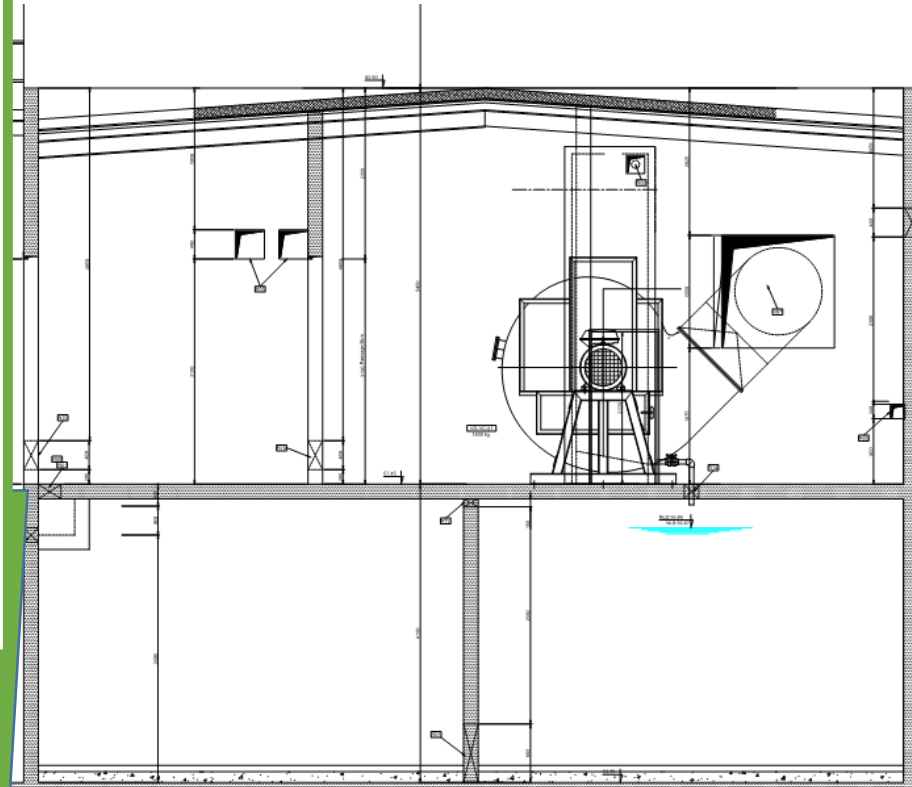
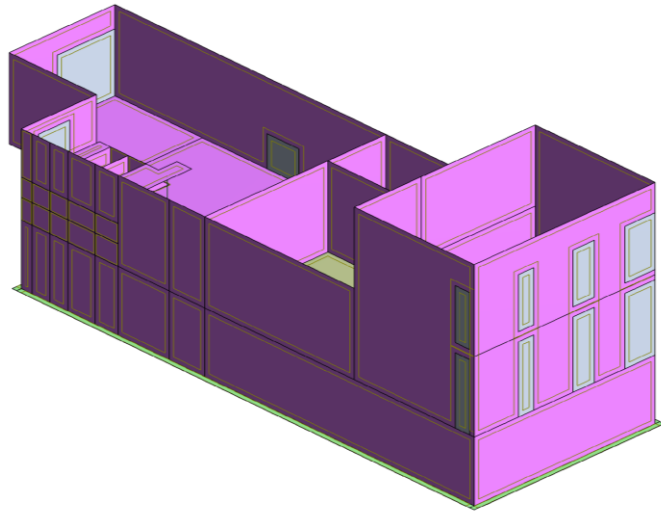
**PINTO**

Génie Civil - Fondations spéciales  
FOUGERES (35) - Tél : 02 99 99 11 26 - [www.pintogc.com](http://www.pintogc.com)

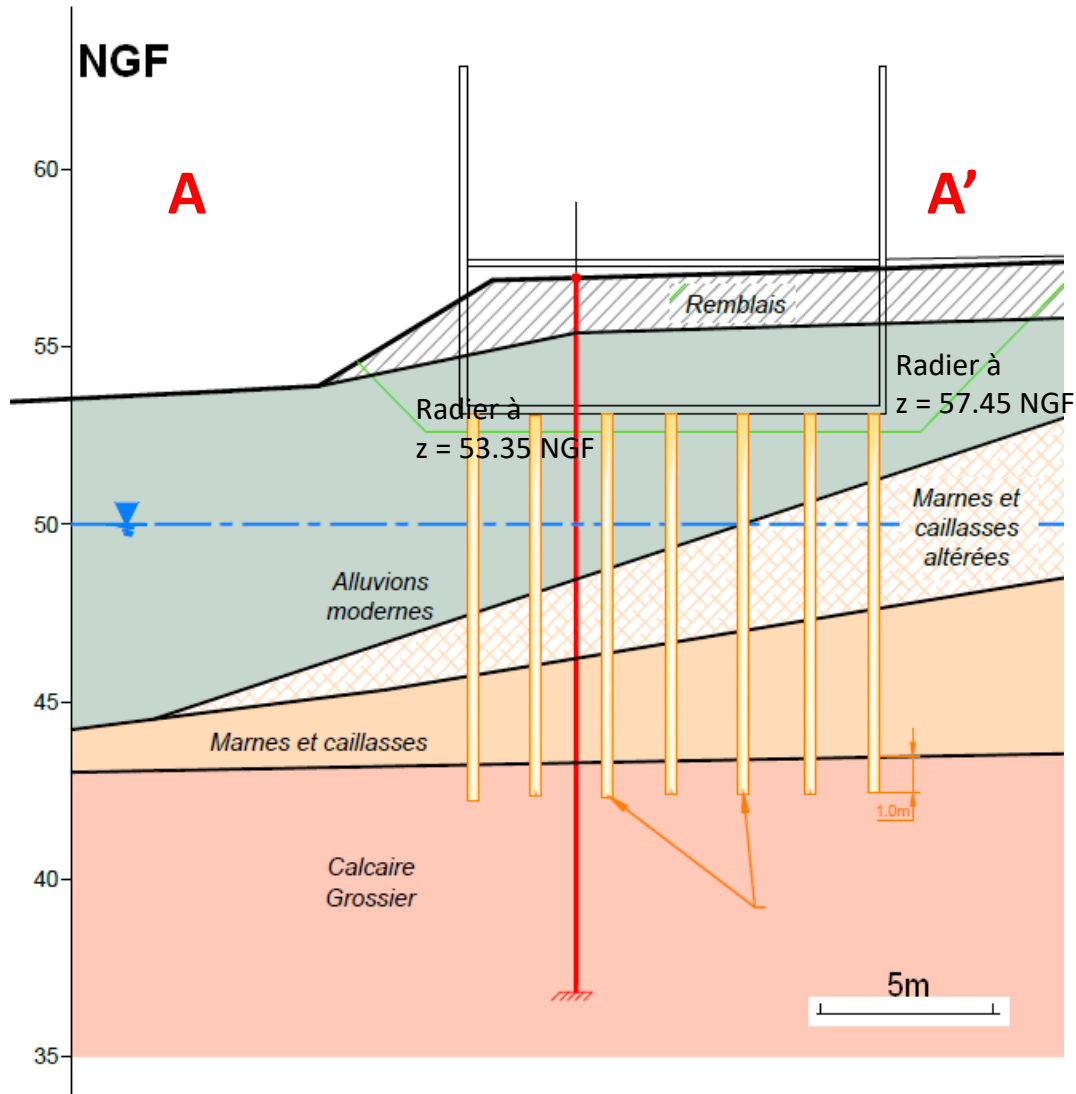
*La Polyvalence à Votre Service*



# Etude d'un cas réel – Station d'épuration Sept-Sorts



# Coupe géologique

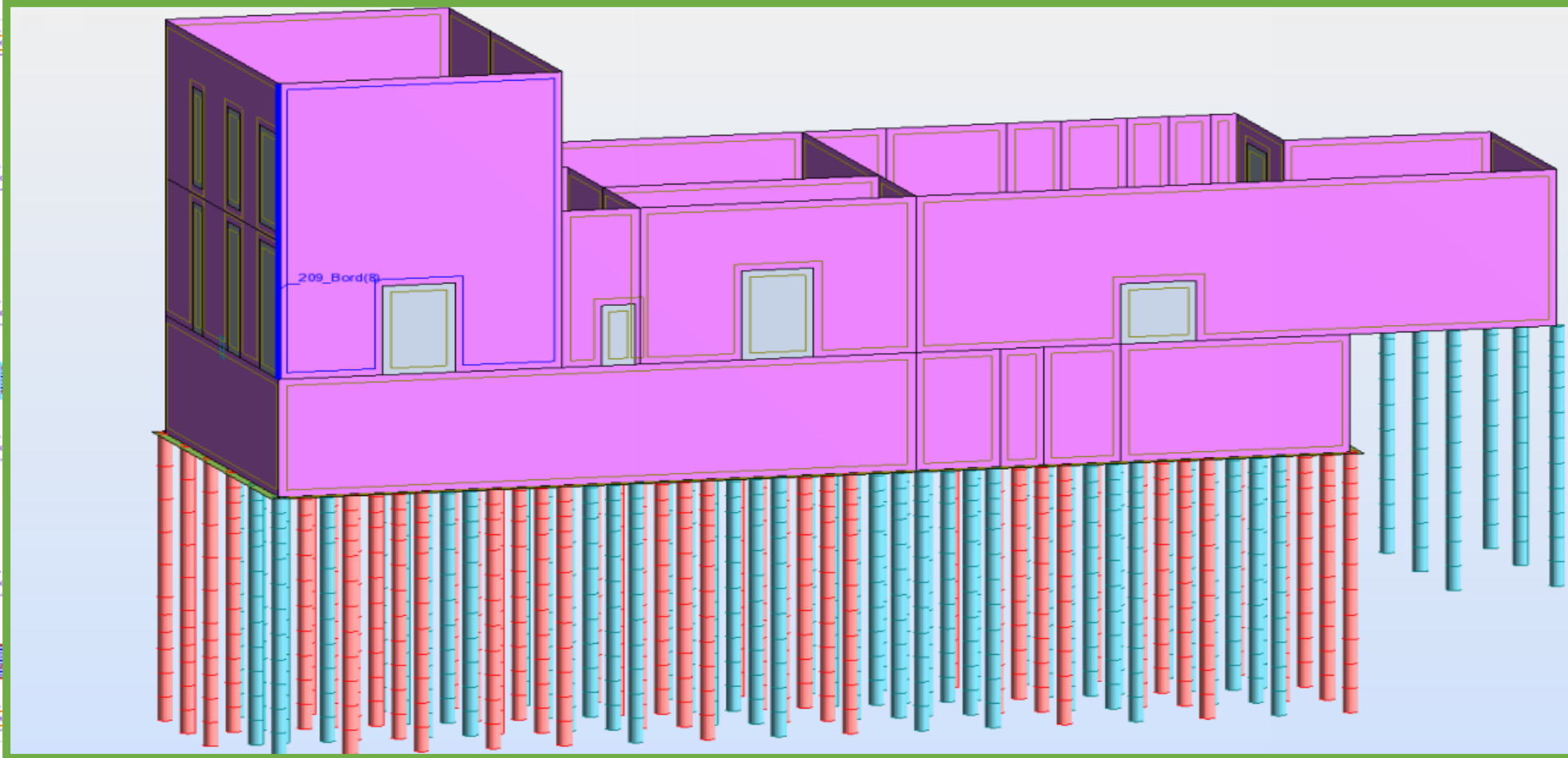
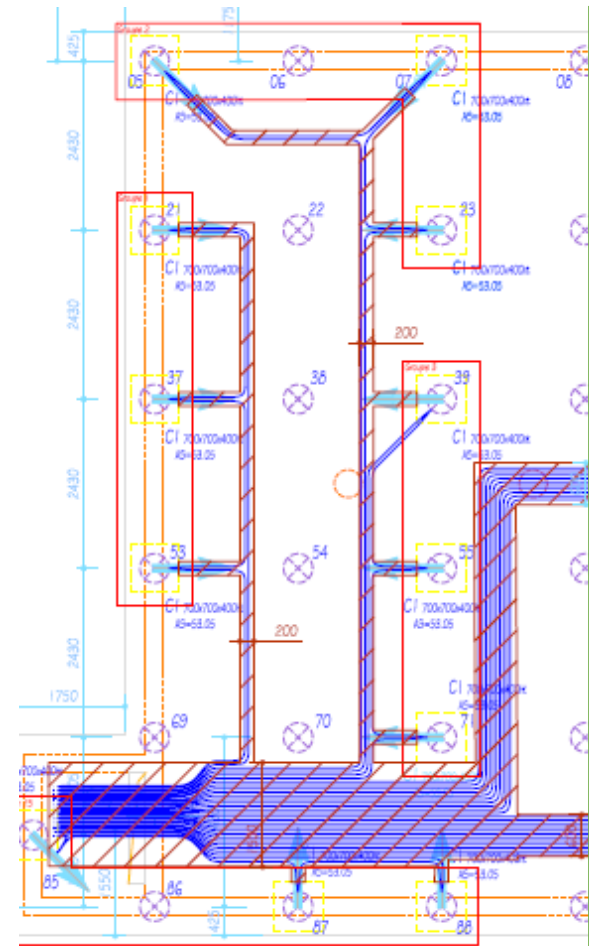


|                               | $E_M$ (MPa) | $q_{sl}$ (kPa) |
|-------------------------------|-------------|----------------|
| Remblais                      | 3.8         | 47             |
| Alluvions modernes            | 5           | 51             |
| Marnes et caillasses altérées | 11          | 134            |
| Marnes et caillasses          | 30          | 153            |
| Calcaire grossier             | 100         | 192            |

Le bâtiment de prétraitement a une emprise d'environ 15 m x 40 m. Il est fondé sur 102 pieux de diamètre 420 mm réalisés à la tarière creuse.

Les pieux sont ancrés d'au moins 50 cm dans le Calcaire Grossier, soit des pieux de 11 m de long sous le radier principal.

# Plan réseau thermique et implantation des fondations



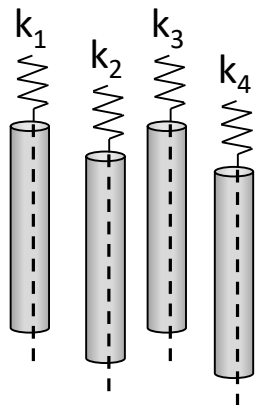
**Bâtiment fondé sur 102 pieux**

Dont la moitié équipée d'échangeurs thermiques (pieux géothermiques)

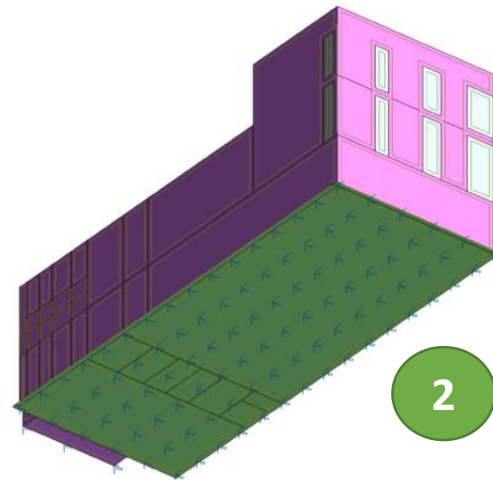
Chargement mécanique et matrice de rigidité calculés par l'Entreprise PINTO

# Benchmark : Etude des pieux géothermiques

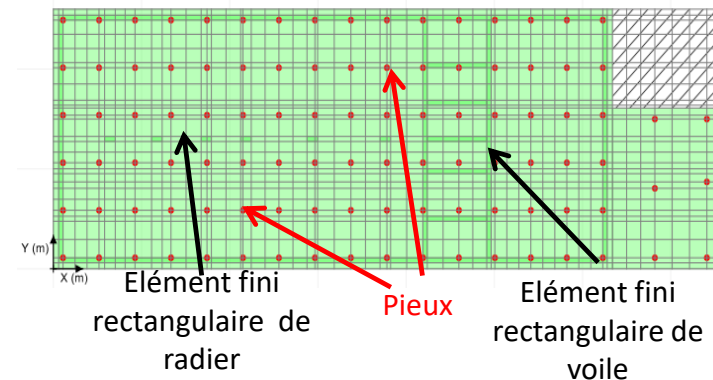
- 1 Ressorts de rigidité  $k$
- 2 Matrice de rigidité calculée par le bureau structure à partir d'un modèle aux éléments finis
- 3 Matrice de rigidité à partir d'un modèle simplifié sous forme de plaque équivalente
4. Libre en tête ( $k = 0$ )
5. Bloqué en tête ( $k = \infty$ )



1



2



3

# Groupe de pieux : modèle ressort

1

Représentation groupe de pieux :

Modèle de ressorts en tête

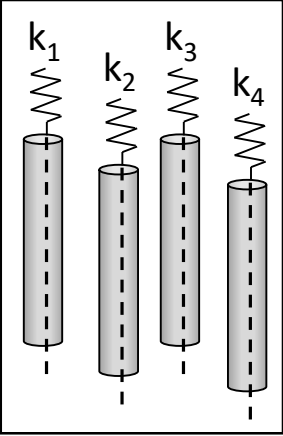
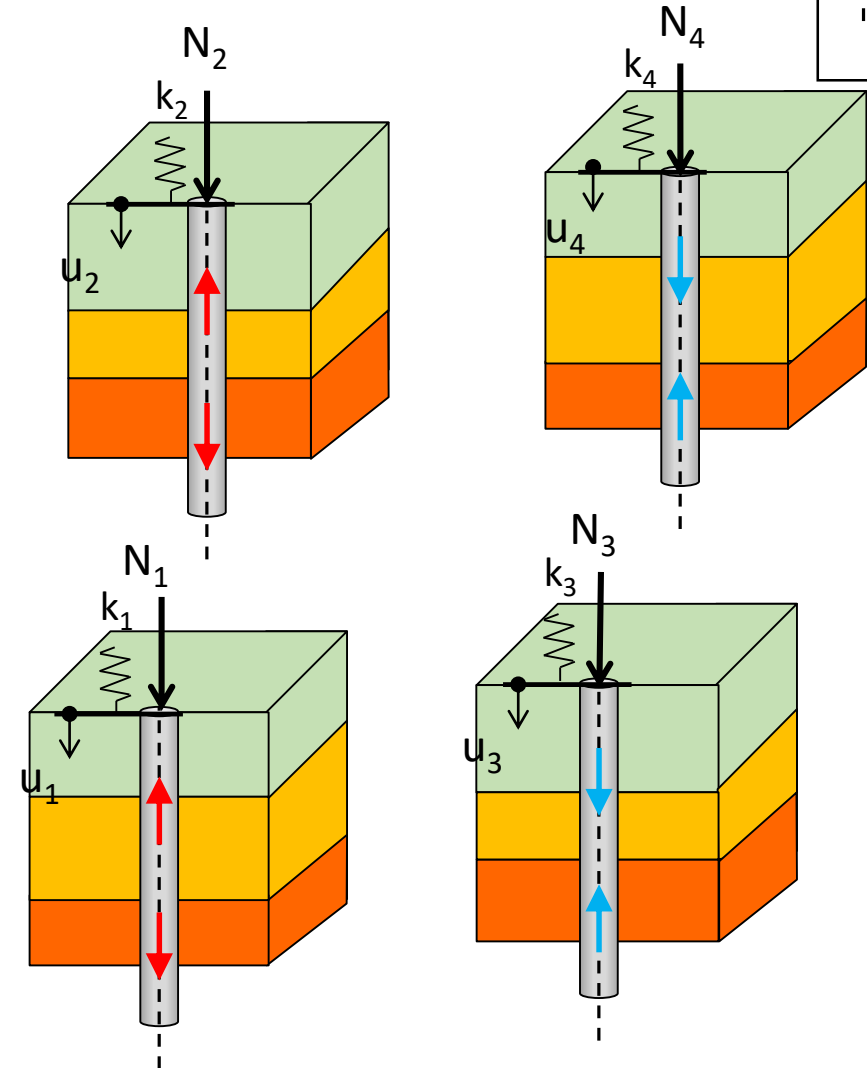
Une raideur en tête de chaque pieu



$$\begin{cases} N_1^{i+1} - N_1^i = k_1(u_1^{i+1} - u_1^i) \\ N_2^{i+1} - N_2^i = k_2(u_2^{i+1} - u_2^i) \\ N_3^{i+1} - N_3^i = k_3(u_3^{i+1} - u_3^i) \\ N_4^{i+1} - N_4^i = k_4(u_4^{i+1} - u_4^i) \end{cases}$$

Entre les phases  $i$  et  $i+1$  :

- Pieux indépendants
- Equivalent à plusieurs modèles de pieux isolés



# Groupe de pieux : modèle matrice de rigidité 2 3

Représentation groupe de pieux :

**Modèle avec matrice de rigidité en tête**

Structure dimensionnée pour rester dans le domaine élastique

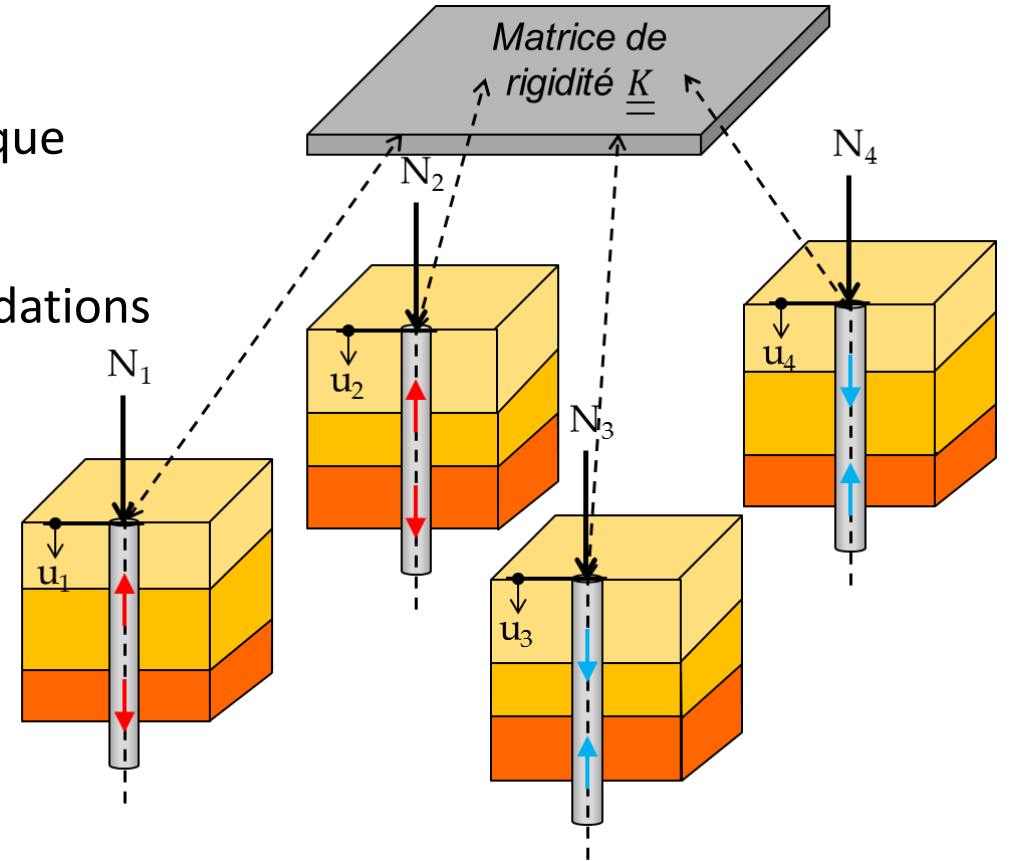


Relation linéaire entre déplacements et efforts dans les fondations



Entre les phases  $i$  et  $i+1$  :  $\underline{\underline{K}} \cdot (\underline{u}^{i+1} - \underline{u}^i) = (\underline{N}^{i+1} - \underline{N}^i)$

$$\begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1^{i+1} - u_1^i \\ u_2^{i+1} - u_2^i \\ u_3^{i+1} - u_3^i \\ u_4^{i+1} - u_4^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_1^{i+1} - N_1^i \\ N_2^{i+1} - N_2^i \\ N_3^{i+1} - N_3^i \\ N_4^{i+1} - N_4^i \end{pmatrix}$$



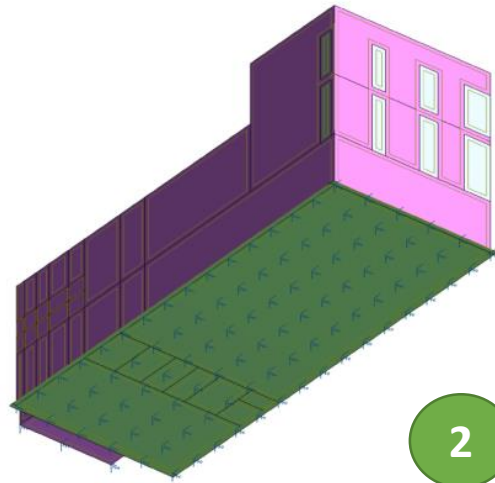
➤ Dépendance entre les différents pieux via la matrice de rigidité (structure)

# Groupe de pieux : modèle matrice de rigidité

Obtention de la matrice de rigidité :



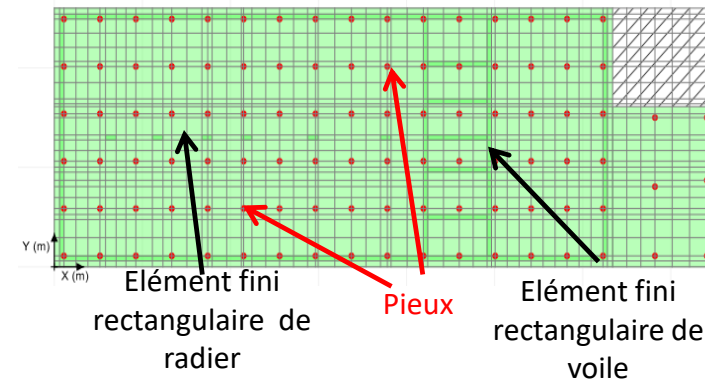
À partir d'un modèle aux éléments finis



2



À partir d'un modèle de plaques équivalentes

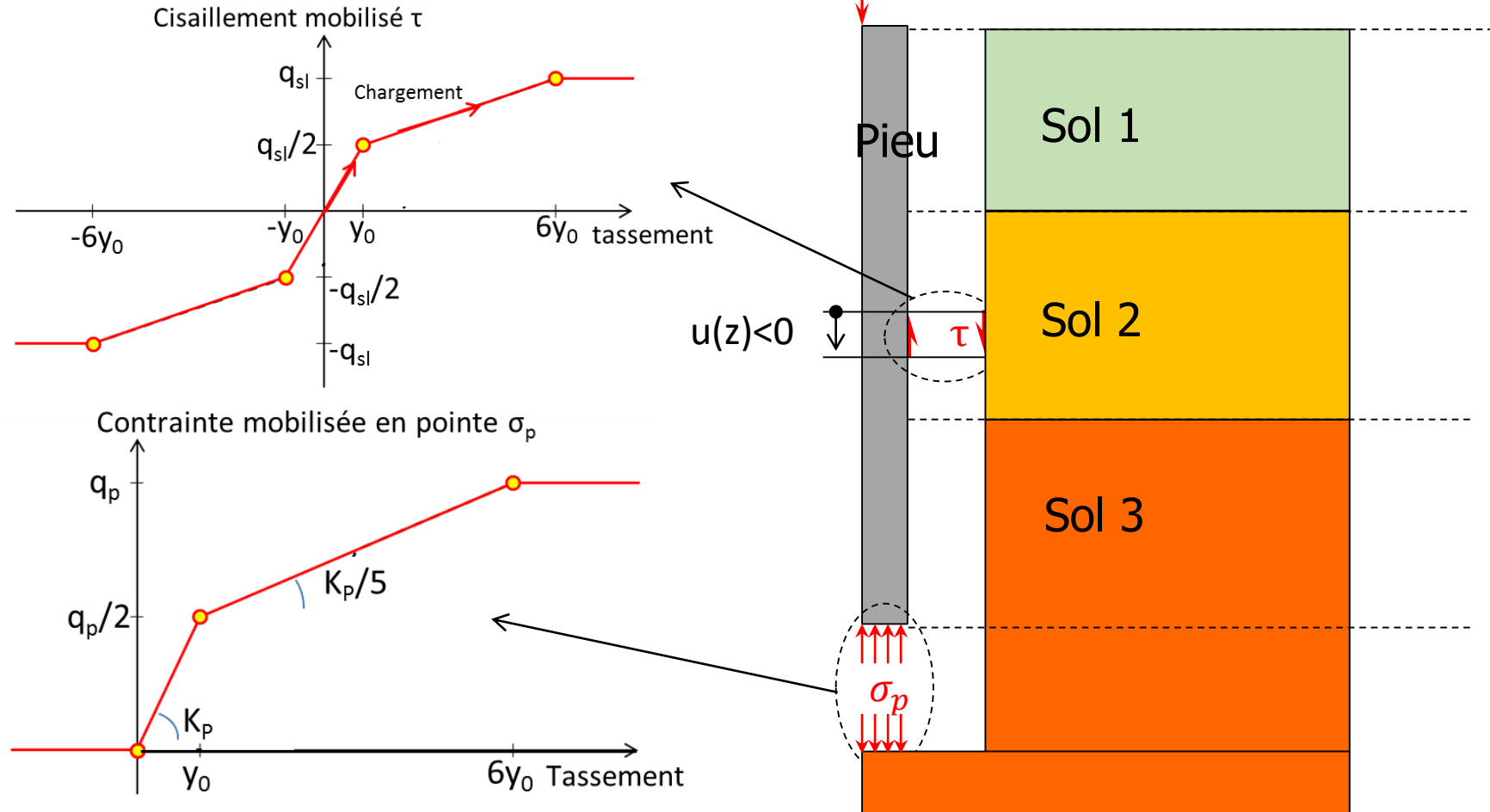


3

# Interaction sol-pieu

⇒ Loi d'interactions sol/pieu

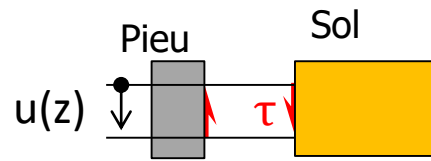
⇒ Loi de type "t-z"



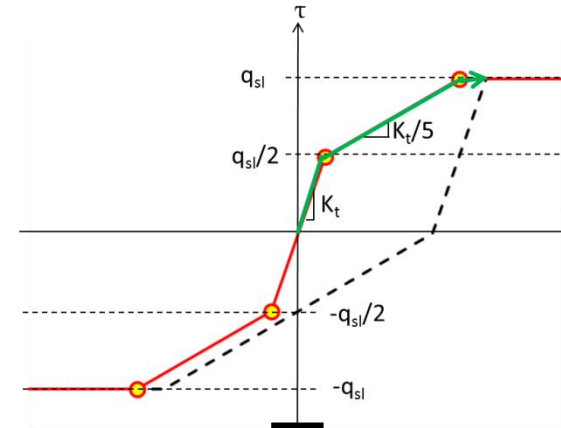
# Interaction sol-pieu avec chargement/rechargement

⇒ Chargement/déchargement

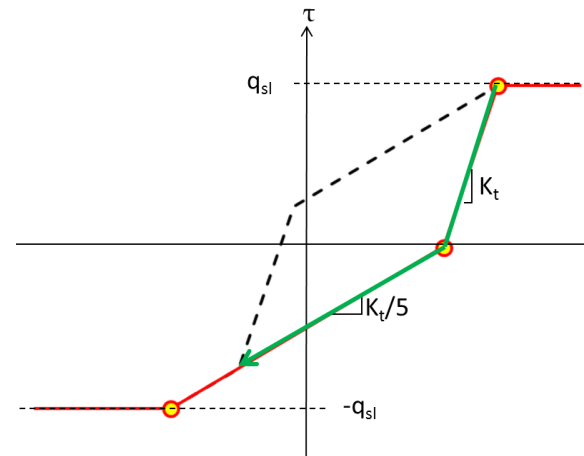
⇒ Focus loi de cisaillement



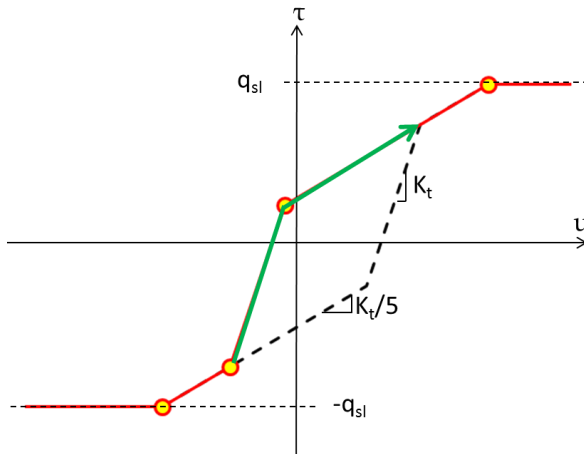
Chargement



Déchargement



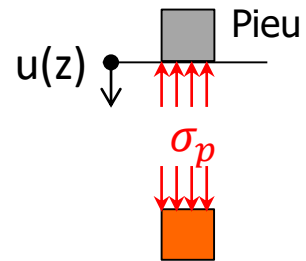
Rechargement



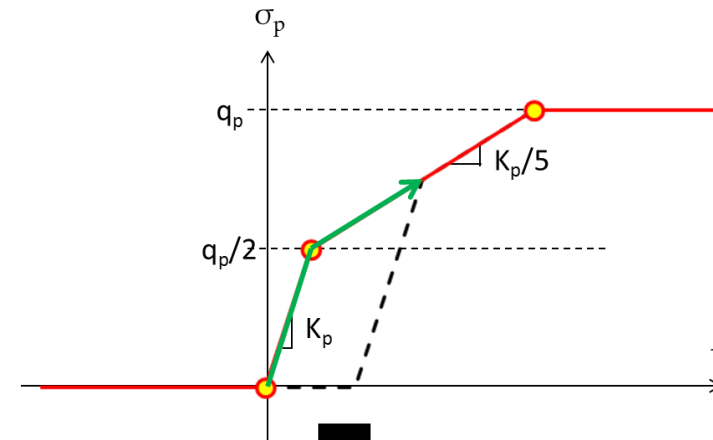
# Interaction sol-pieu avec chargement/rechargement

⇒ Chargement/déchargement

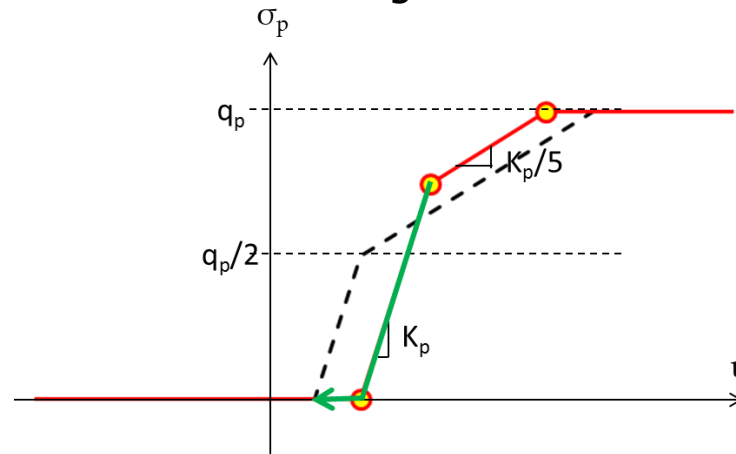
⇒ Focus contrainte en pointe



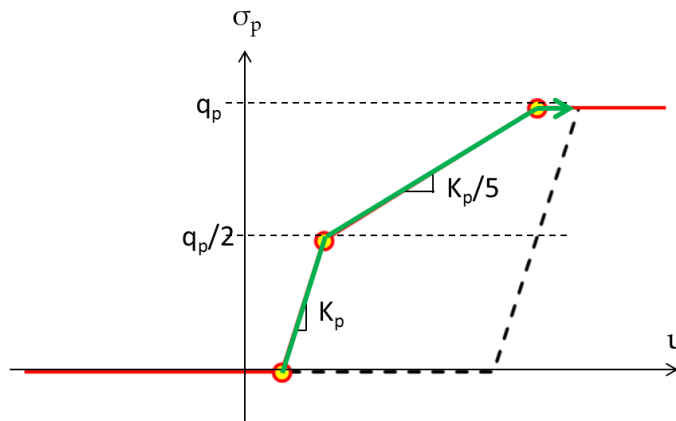
Chargement



Déchargement

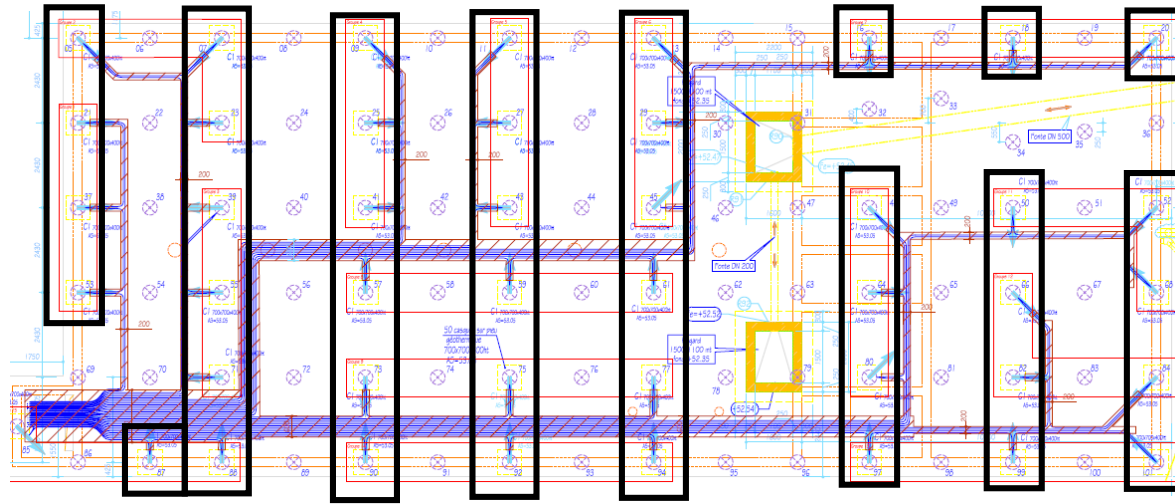


Rechargement



# Emplacement des pieux géothermiques

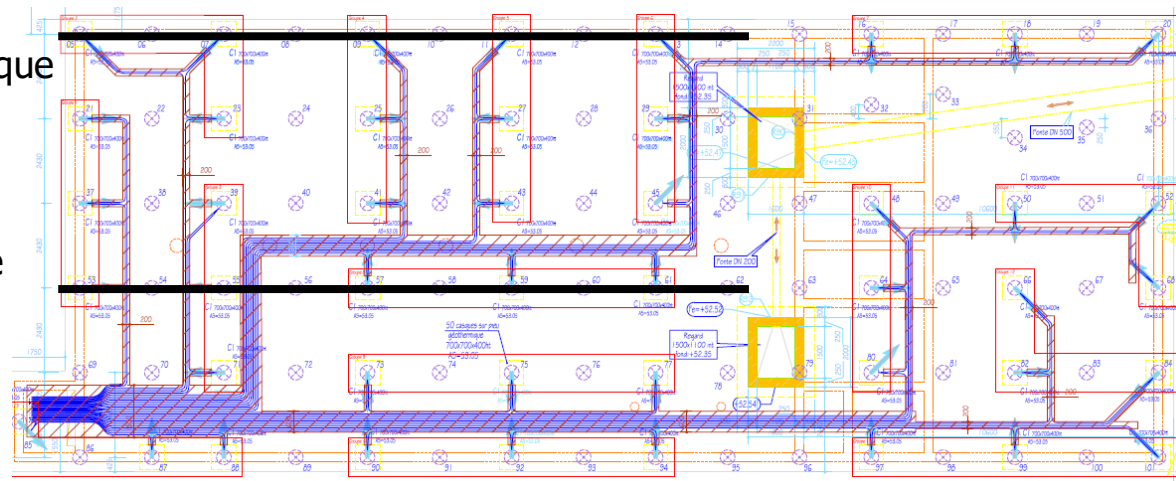
⇒ Emplacement des pieux géothermiques



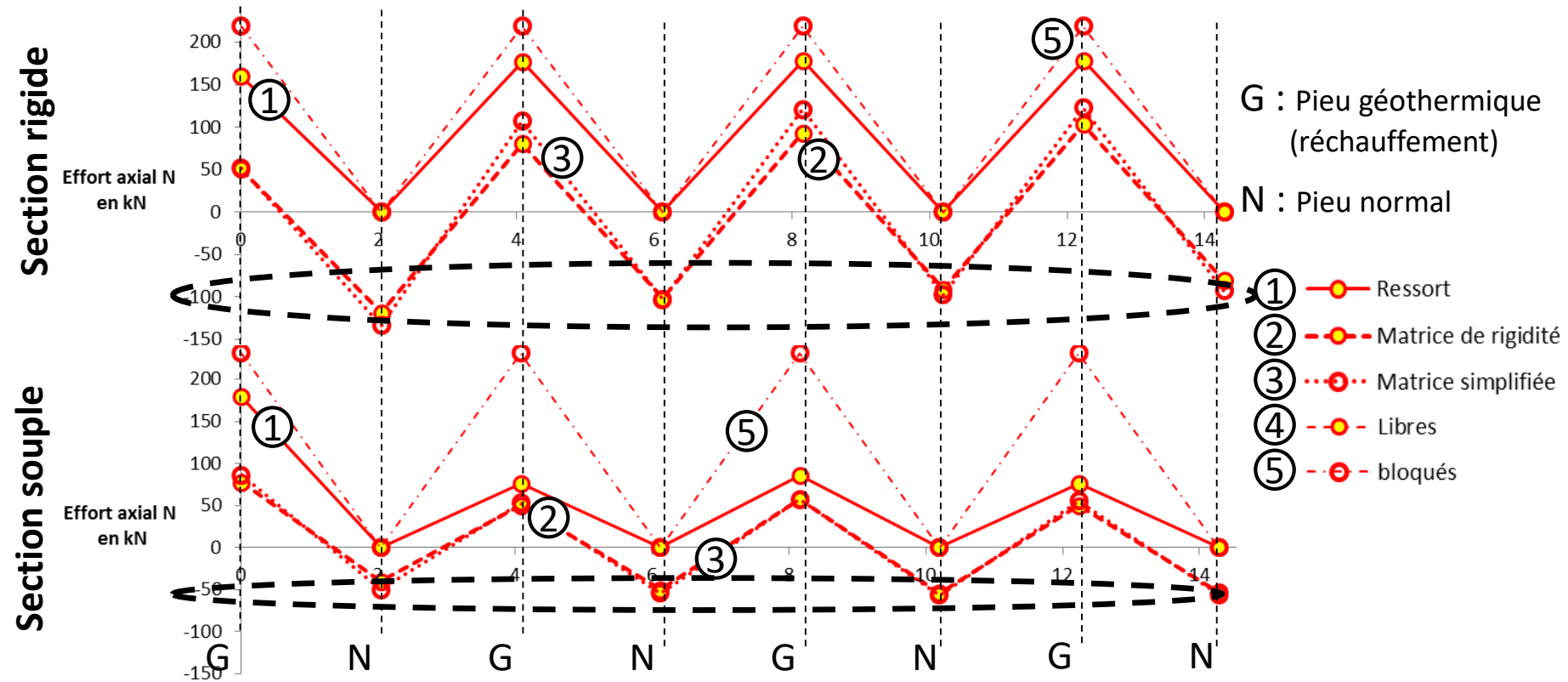
⇒ Section étudiées

Section rigide  
sous voile périphérique

Section souple  
sous dalles

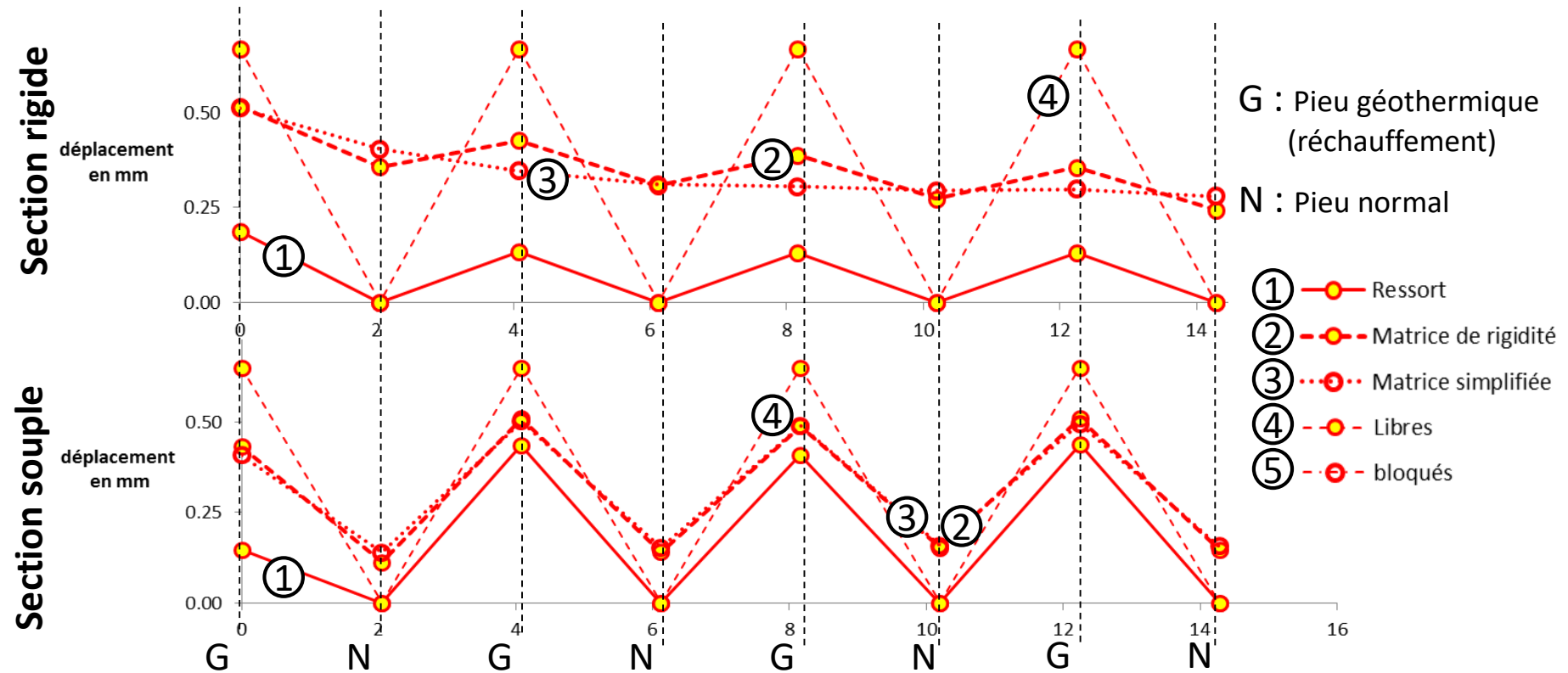


# Résultats des calculs : Efforts axiaux supplémentaires en tête



- Moins d'efforts sous la section souple
- Modèle 2 et 3 (matrice de rigidité) : peu de différence
- Matrice de rigidité (2 et 3) : traction dans les pieux « normaux » par entrainement
- Ressorts (1 et 5) : pieux « normaux » non sollicités, surestimation des efforts

# Résultats des calculs : Déplacements supplémentaires en tête

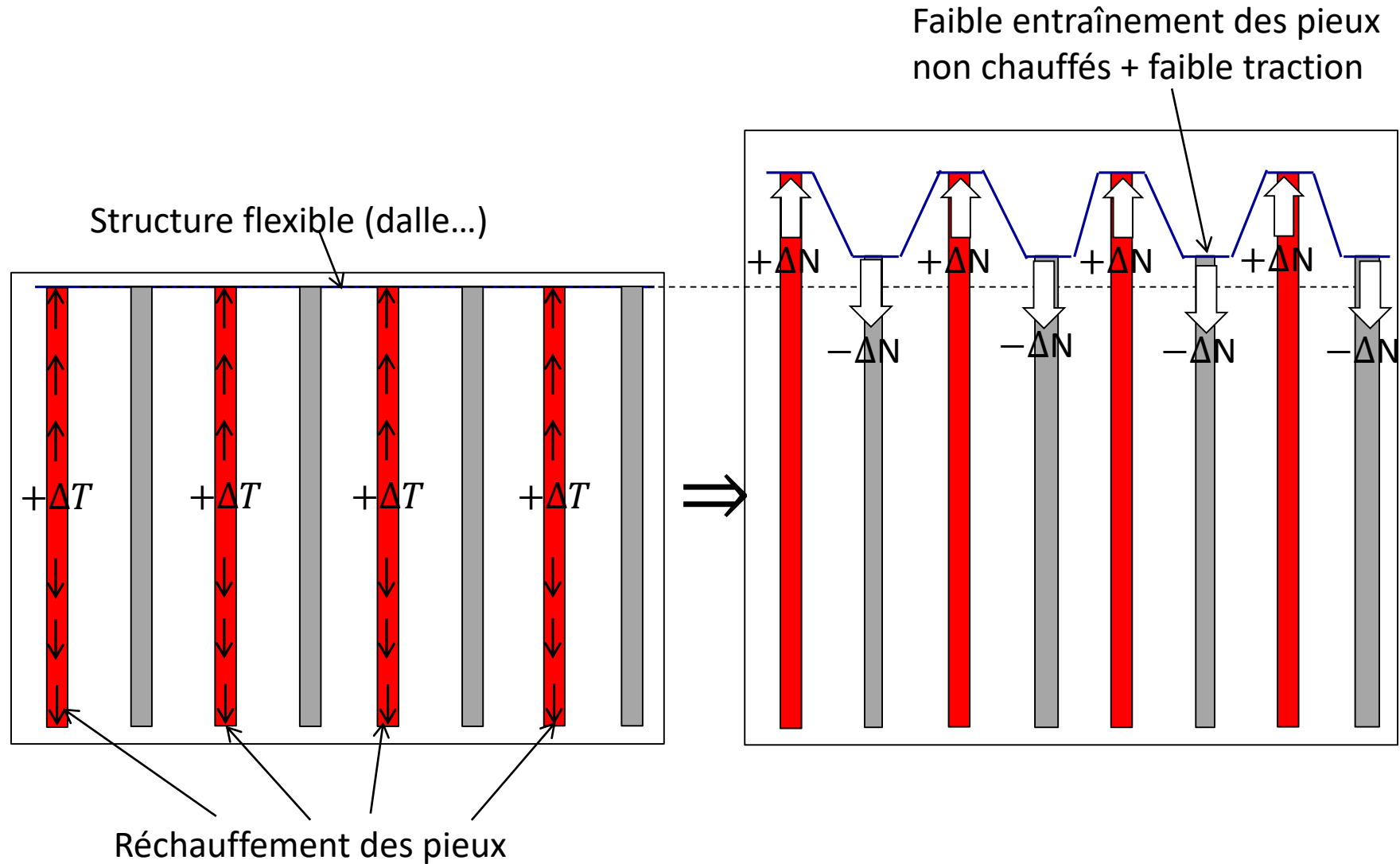


Ressorts (1 et 4) : pieux « normaux » immobiles

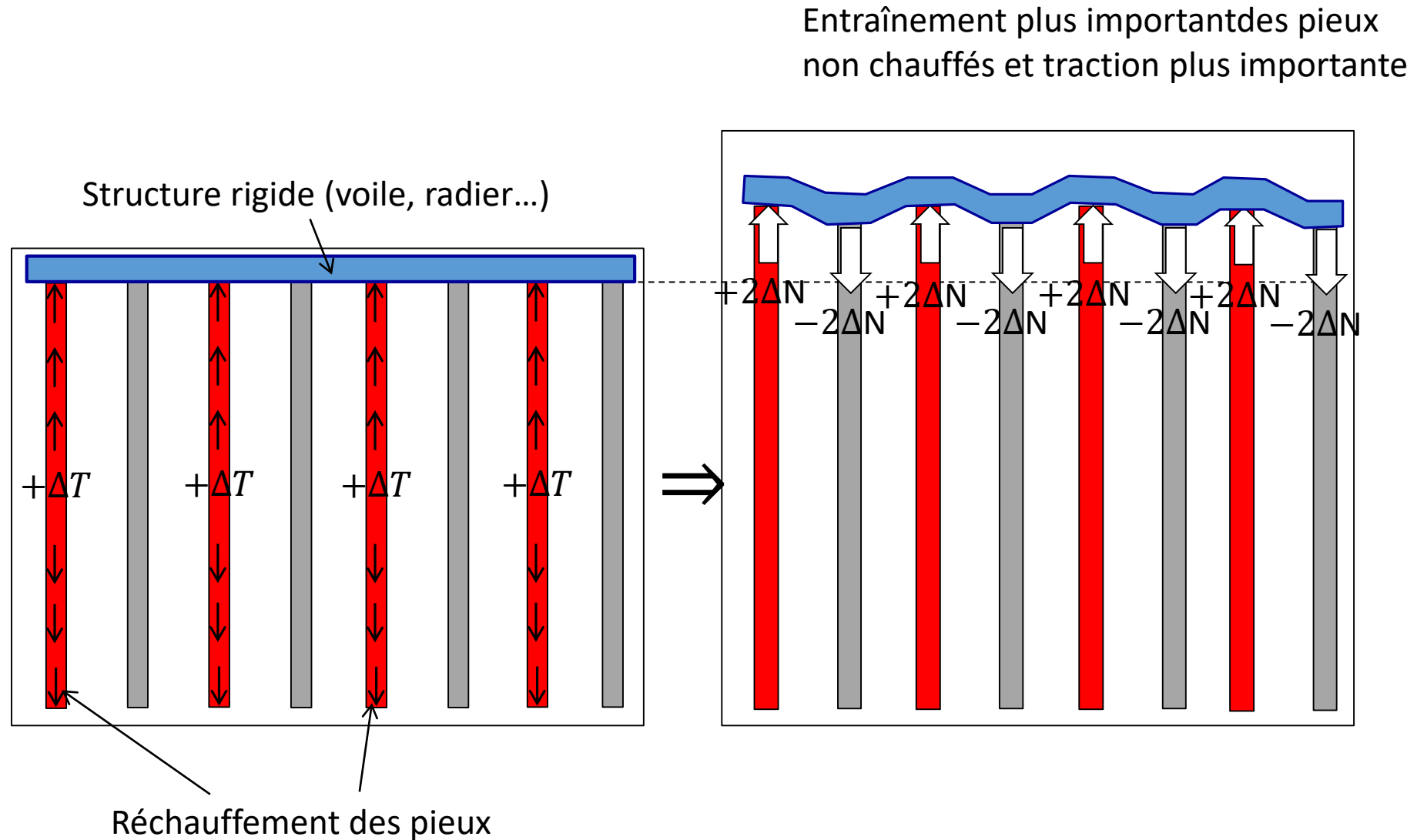
**Matrice de rigidité (2 et 3)** : soulèvement des pieux « normaux » par entrainement (surtout sous la section rigide)

Modèle 3 (matrice de rigidité simplifiée) surestime la rigidité de la structure par rapport au modèle 1

# Résultats des calculs : Section flexible sous réchauffement



# Résultats des calculs : Section rigide sous réchauffement



# Conclusions

Approche analytique, un modèle d'interaction sol/pieu/structure tenant compte :

- Des **cycles de chargements** thermiques
- De **l'interaction sol/pieux** (type « t-z »)
- L'interaction pieux/structure/pieux via une **matrice de rigidité**

Reproduit les effets dus à la rigidité de la structure

- Sollicitations dans les pieux non géothermiques **par entraînement**

Possibilité d'obtenir la matrice de rigidité de la structure par un modèle de **plaque équivalente** :

- Surestimation de l'effet de rigidité au niveau des voiles

# Conclusions

- Il n'est pas très courant de faire un modèle de structure 3D pour des bâtiments « simples ».
- Il est difficile d'extraire la **matrice de rigidité de la structure**. Il peut s'agir d'un long processus. Certains logiciels permettent cependant de le faire.
- Interaction complexe lorsqu'il existe une forte **contraste de rigidité** (voile/radier, poteau/dalle, noyau/radier etc.)
- Pour des **raisons économiques**, les structures géothermiques ne doivent pas impacter ou contraindre le dimensionnement de l'ouvrage que de façon marginale.
- Avant de faire les analyses, il faut avoir du **bon sens** et faire attention à ne pas placer des pieux géothermiques sous les appuis de différente nature.

# Conclusions

- Il est possible de calculer les pieux indépendamment et lorsque le **critère de tassement différentiel** est dépassé, de faire appel à une analyse interaction sol/structure.
- **Dalle portée** : Pour un radier de type dalle portée sur longrine, les moments sont supposés vérifiés si  $Dz < L/1000$ , avec L portée entre longrines.
- **Plancher champignon** : Si le radier est de type plancher champignon, trois solutions se présentent pour déterminer les moments complémentaires :
  - modèle aux éléments finis complet,
  - théorie des poutres,
  - méthode des raideurs avec une plaque.
- **Parois énergétiques** : Peu de REX. Il convient, en conséquence, d'apporter une attention particulière à la justification de ces ouvrages.



# Merci pour votre attention.

**Cyril BORELY (Terrasol)**

**Umur Salih OKYAY (WSP France)**