



**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

# Restitution GT gonflement des terrains argileux

## Fondations profondes

**Alexandre Beaussier**  
Setec Terrasol

JOURNÉE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU 25 AVRIL 2024

# Restitution du GT gonflement des terrains argileux

## Fondations profondes

### Sommaire de l'intervention

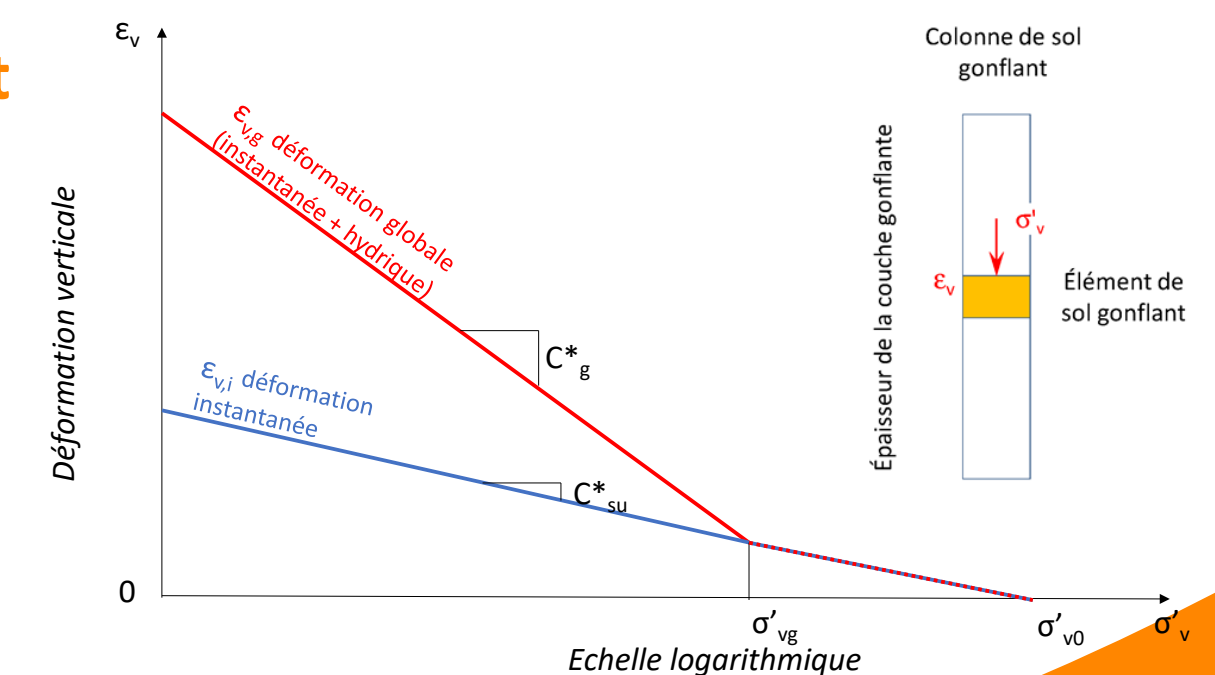
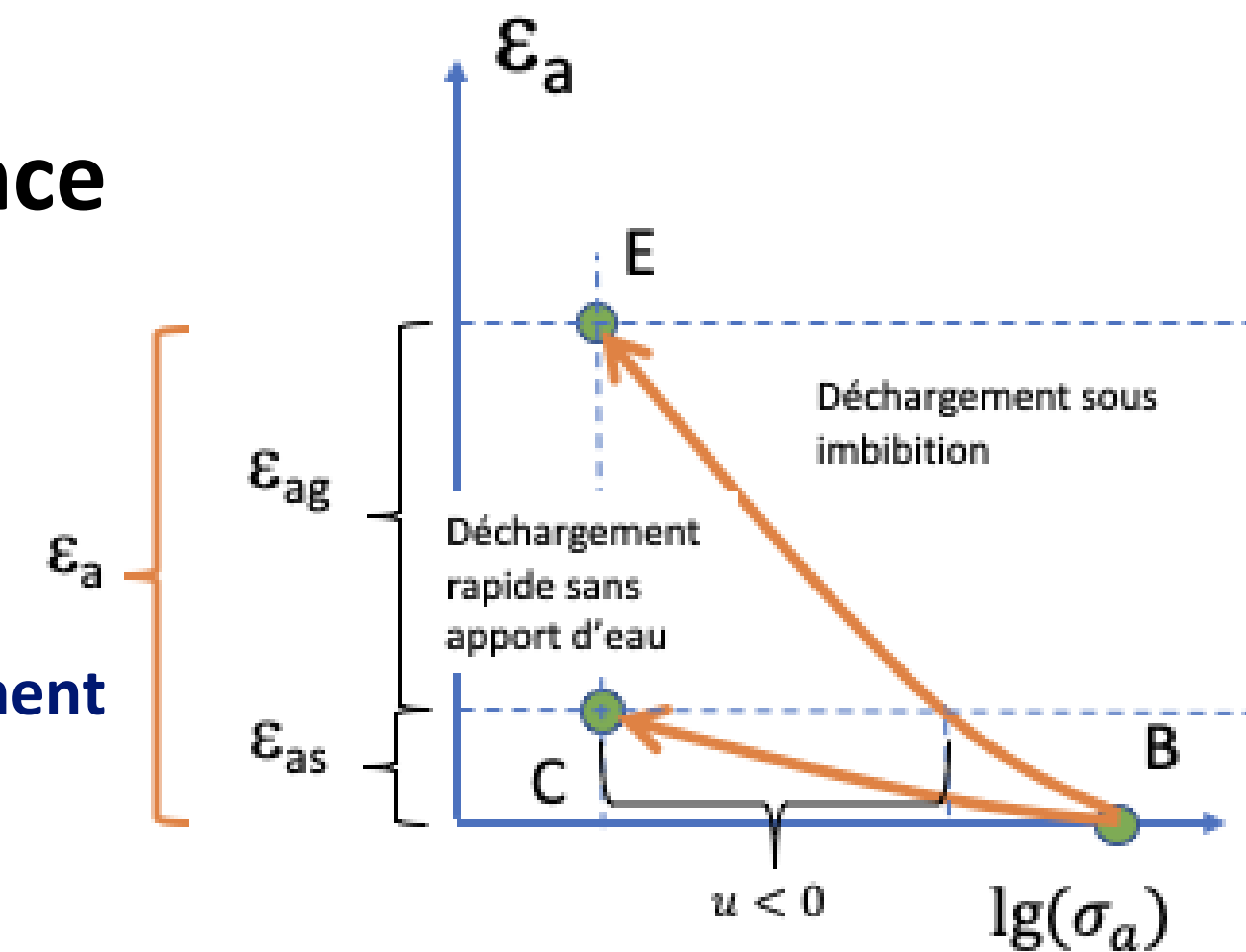
- **Comportement des pieux soumis à du gonflement & retours d'expérience**
- **Détermination des sollicitations induites dans les pieux**
- Influence de la conception du niveau inférieur d'infrastructure
- Modèles basés sur la déformation en champ libre
  - Approche forfaitaire*
  - Approche en déplacements (lois de mobilisation du frottement  $t-z$ )*
- Modèles d'interaction sol structure
  - Par maille élémentaire*
  - Modèles complets*
- **Justifications à produire**

# Restitution du GT gonflement des terrains argileux

## Fondations profondes

### Comportement des pieux soumis à du gonflement & retours d'expérience

- **Excavation des terres pour atteinte du fond de fouille produit un soulèvement**
  - Observé dans tous types de terrains
  - **Terrains gonflants**: forte **amplitude**, et une importante proportion **différée**
  
- **Génération d'efforts de traction dans les éléments de fondation (alors existants) qui forment des points durs dans le sol**
  - **Éléments préfondés**: soumis à la somme des déformations **instantanées** et **différées**
    - **Sols gonflants**: déformation caractérisée par  $C^*_g$  et  $\sigma'_{vg}$
    - Sols non gonflants: le plus souvent négligé
  - **Fondations réalisées au fond de fouille**: soumises aux déformations **différées uniquement**
    - **Sols gonflants**: déformation « différée » caractérisée par  $K^*_g$  et  $\sigma'_{vg}$
    - Sols non gonflants: pas d'effet a priori (sauf phénomènes de consolidation)
  
- **Retour d'expérience:**
  - Privilégier les fondations **ancrées au-delà de la zone gonflante**
  - Sous réserve prise en compte des efforts parasites, assez **peu de pathologies**

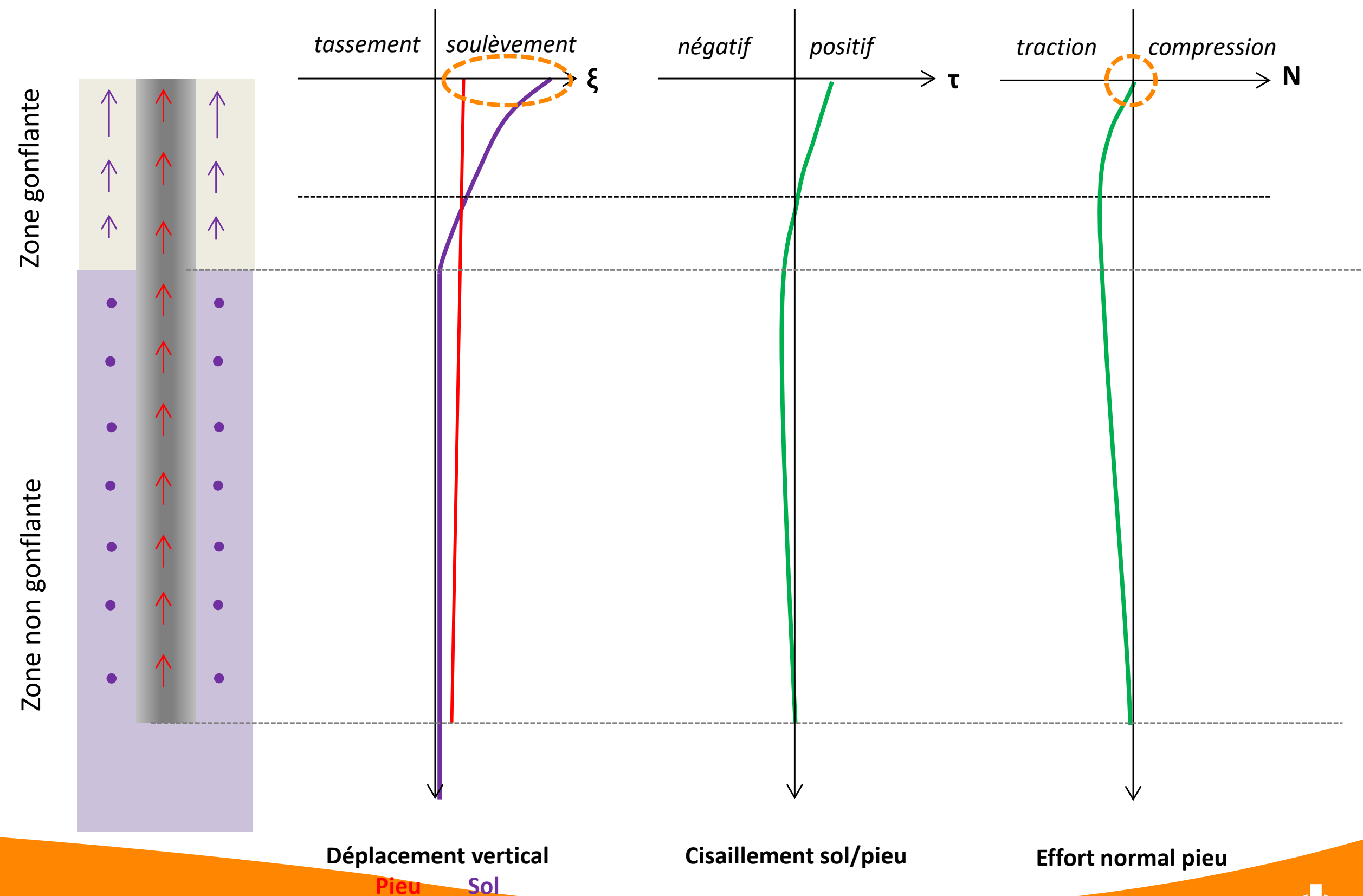
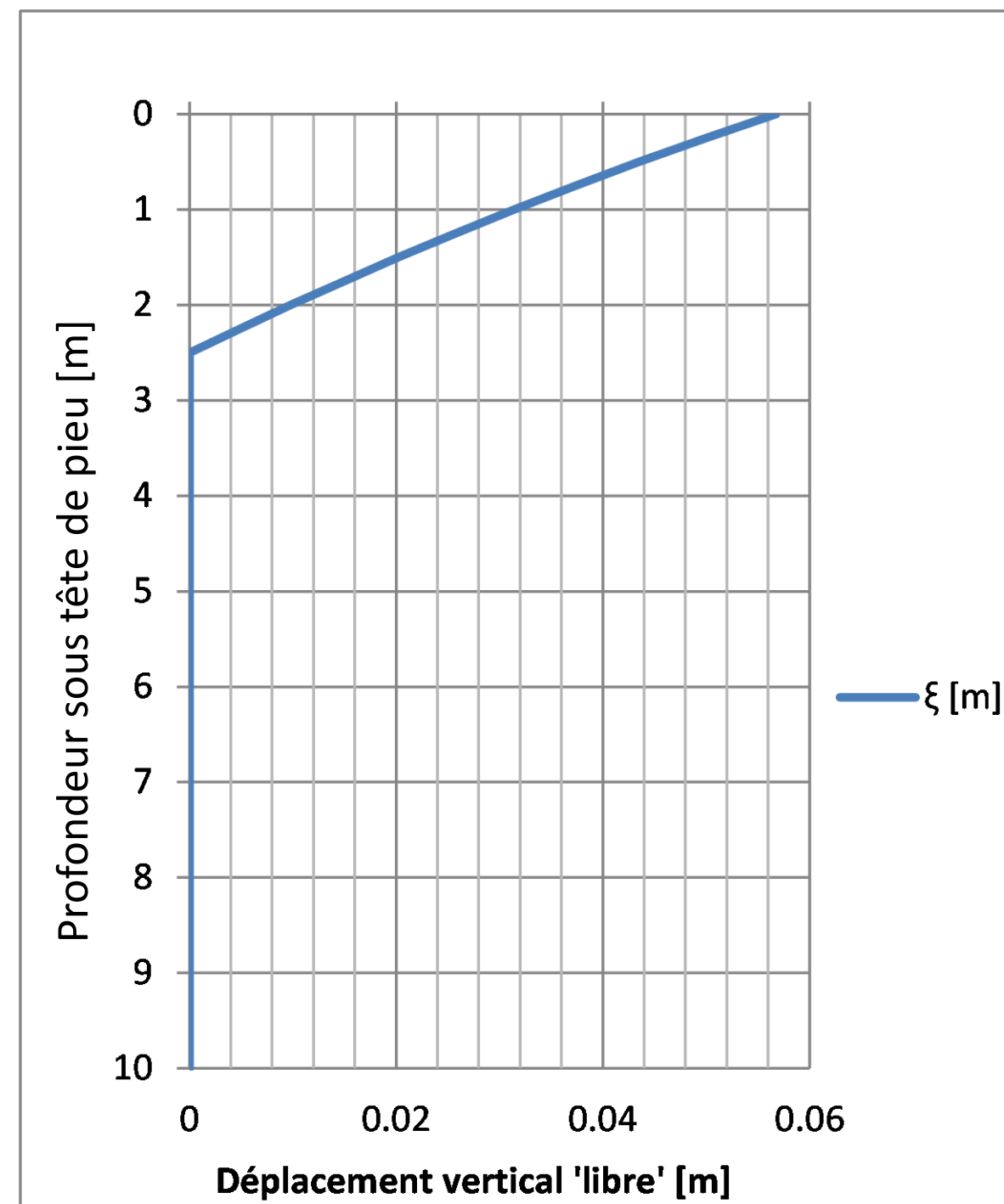
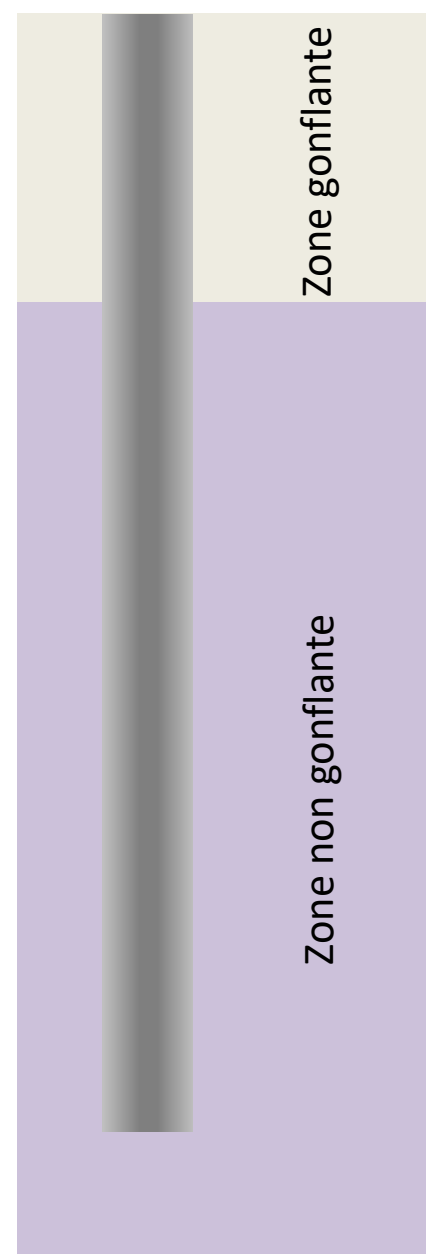


# Restitution du GT gonflement des terrains argileux

## Fondations profondes

### Effet du gonflement des terrains sur les efforts axiaux dans les pieux

**Cas 1:** structure n'imposant pas de condition sur les déplacements en tête de sol et de pieu (vide sanitaire, matériaux compressibles...) – Sol « libre » en base d'infrastructure



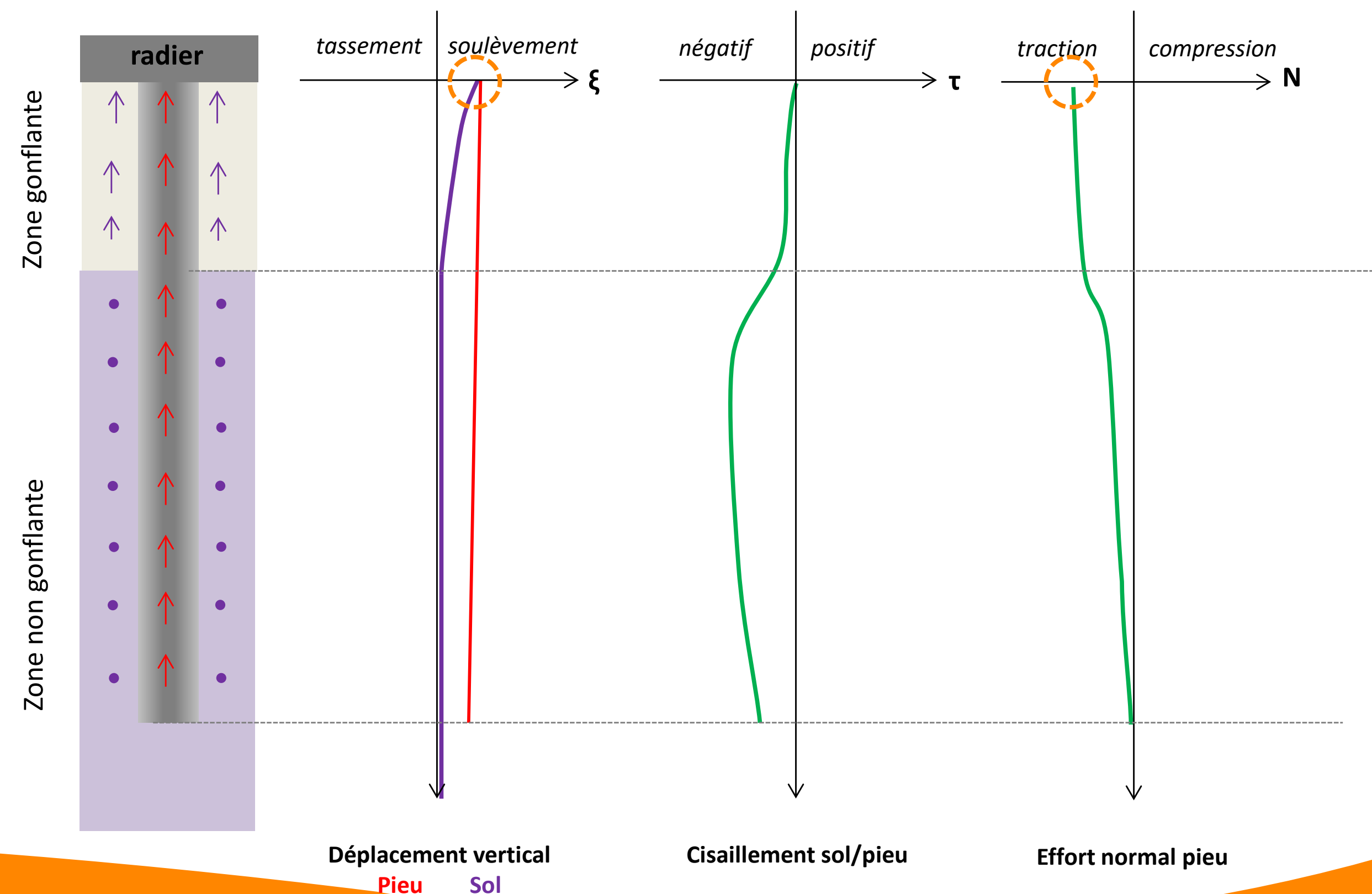
# Restitution du GT gonflement des terrains argileux

## Fondations profondes

### Effet du gonflement des terrains sur les efforts axiaux dans les pieux

**Cas 2:** structure imposant une condition forte (~égalité) sur les déplacements en tête de sol et de pieu (radier sur sol)

- Égalité des déplacements entre sol et pieu en arase inférieure du radier
- Traction en tête de pieu
- Réduction du déplacement du sol par rapport au gonflement libre
- **Nécessité de mener un calcul d'ISS pour appréhender le comportement du pieu**



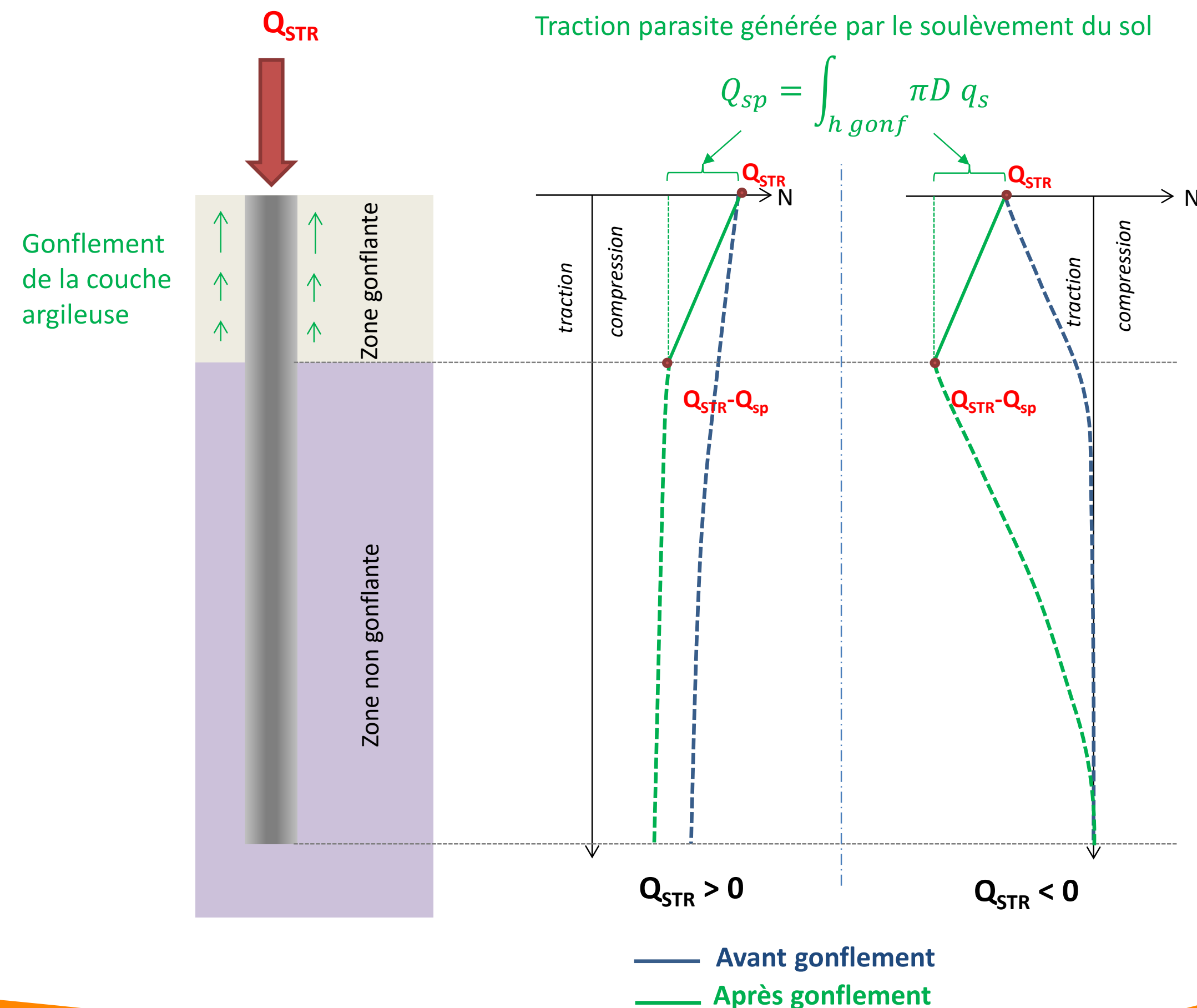


# Restitution du GT gonflement des terrains argileux

## Fondations profondes

### Détermination des sollicitations: Gonflement en champ libre – méthode forfaitaire

- Adaptée au sol « libre » en base d'infrastructure
- Non adaptée aux configurations de radier s.s.
- Déplacements différentiels sol/ pieu considérés suffisants pour **mobiliser le frottement axial limite  $q_s$  sur hauteur gonflante**
- **Données d'entrée**
  - Géométrie zone gonflante
  - Charge  $Q_{STR}$  en tête de pieu
  - Frottement axial  $q_s$  dans la couche gonflante
- **Enveloppe des sollicitations**
  - Charge  $Q_{STR}$  en tête de pieu
  - Charge  $Q_{STR} - Q_{sp}$  en base de zone gonflante



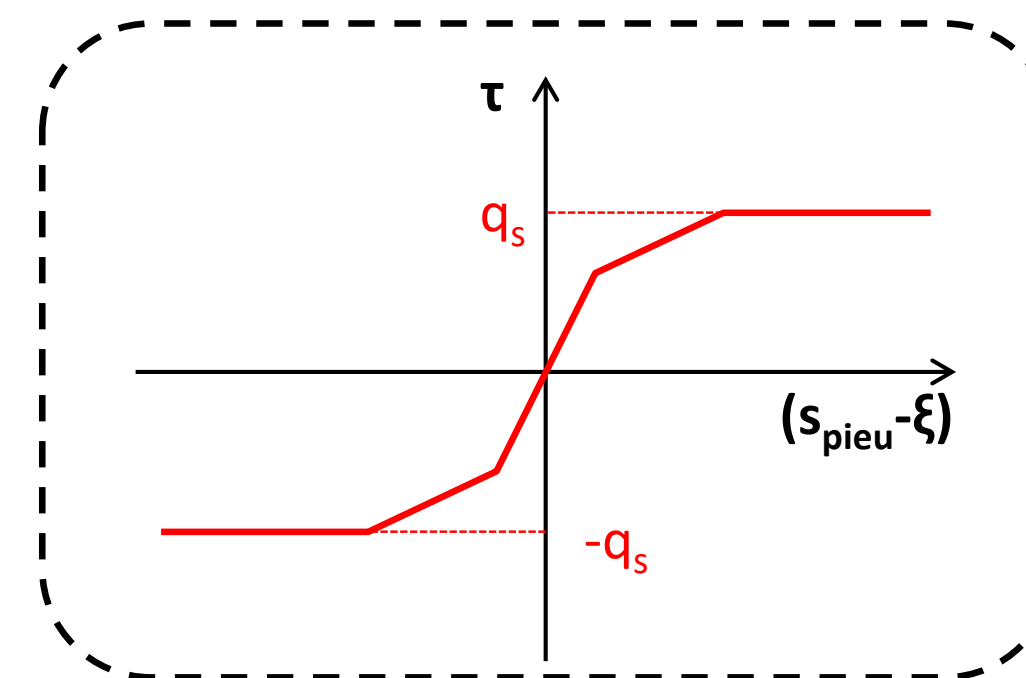
# Restitution du GT gonflement des terrains argileux

## Fondations profondes

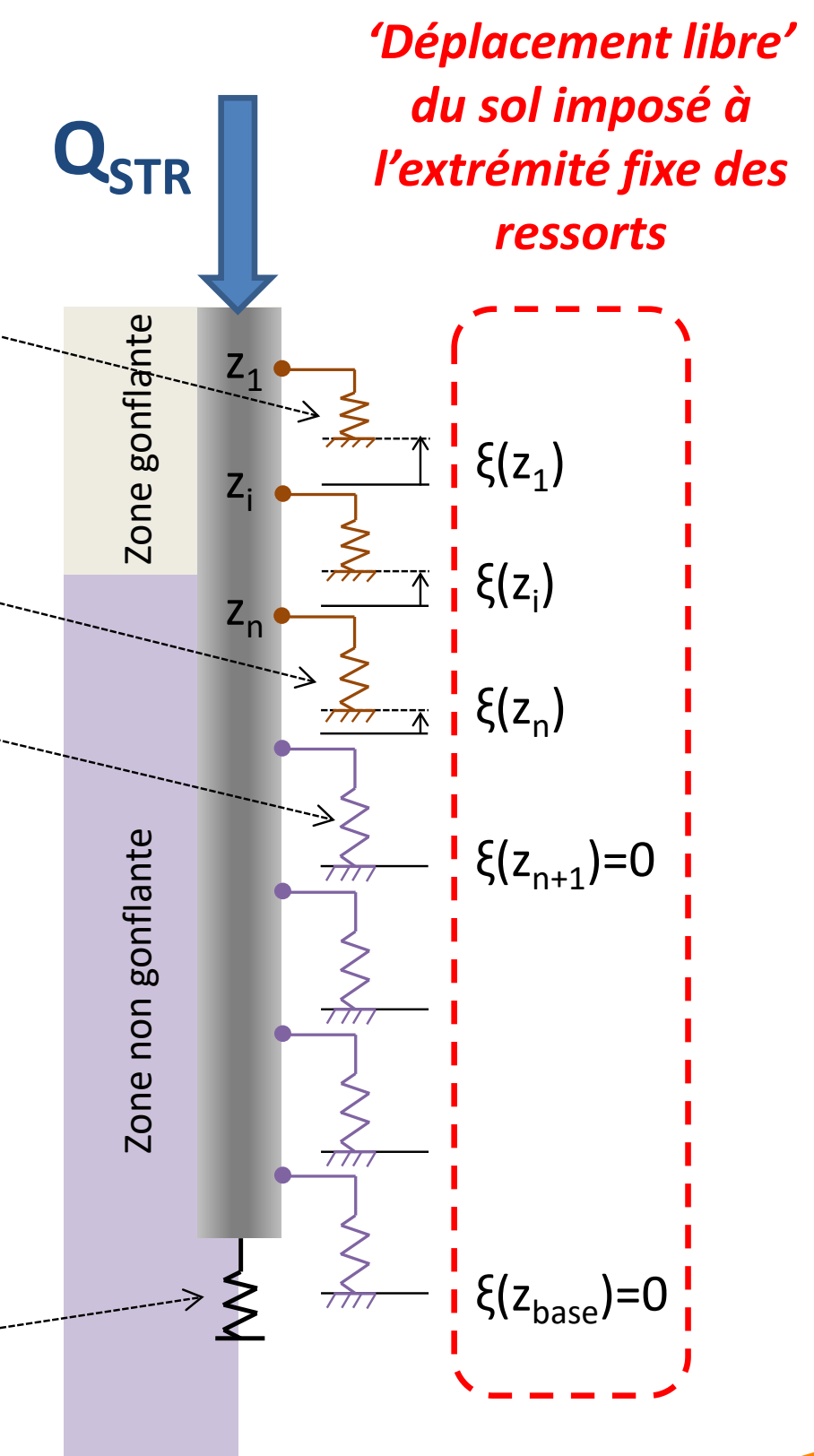
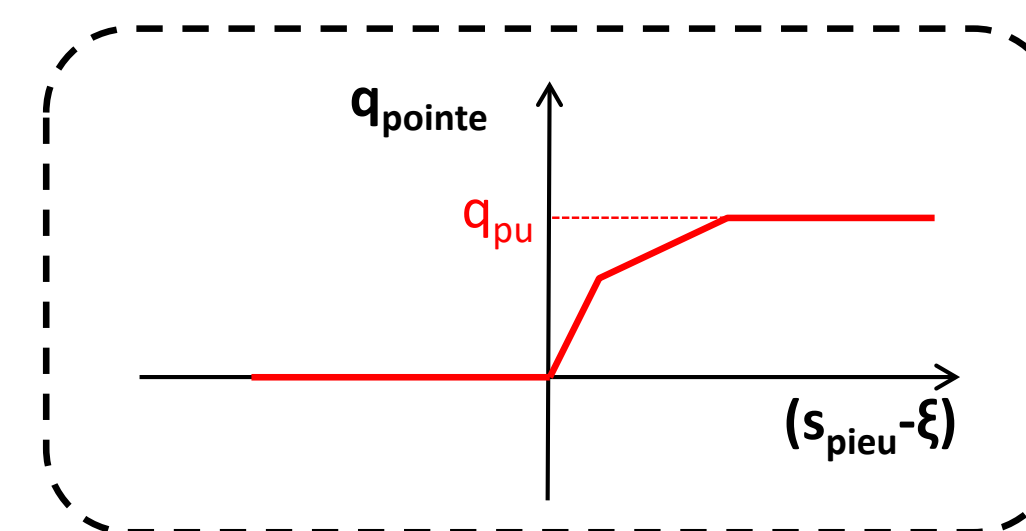
### Détermination des sollicitations: Gonflement en champ libre – méthode en déplacement (lois t-z)

- Adaptée au sol « libre » en base d'infrastructure
- Non adaptée aux configurations de radier s.s.
- Calcul en déplacement piloté par:
  - La charge en tête de pieu
  - Le profil de gonflement libre
  - Les lois de mobilisation du frottement en fonction du déplacement sol/pieu
- Calcul par modèles à barre

Loi d'interaction sol/pieu en frottement axial



Loi d'interaction sol/pieu en pointe

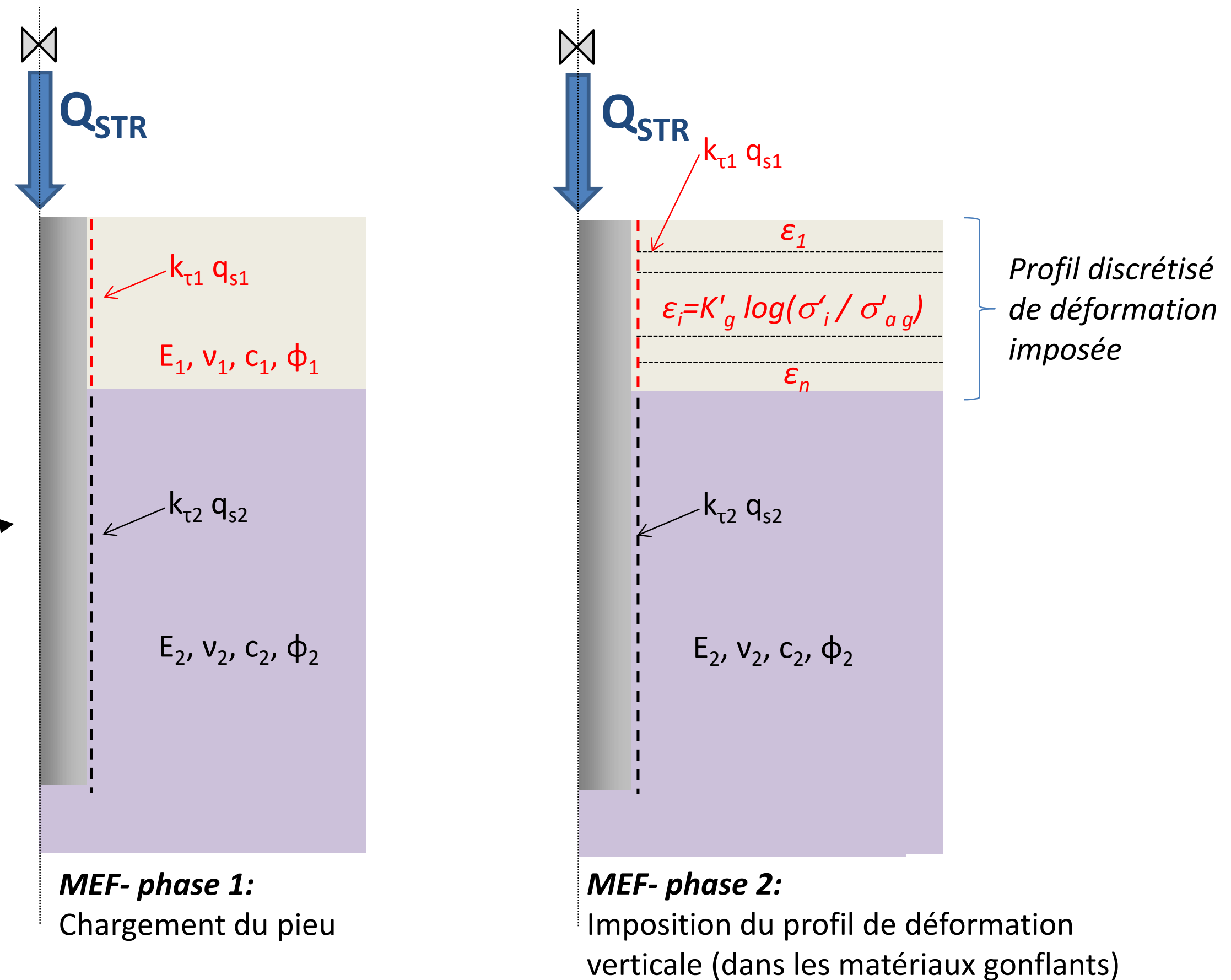


# Restitution du GT gonflement des terrains argileux

## Fondations profondes

### Détermination des sollicitations: Gonflement en champ libre – méthode en déplacement (lois t-z)

- Adaptée au sol « libre » en base d'infrastructure
- Non adaptée aux configurations de radier s.s.
- **Calcul en déplacement** piloté par:
  - La charge en tête de pieu
  - Le profil de gonflement libre
  - Les lois de mobilisation du frottement en fonction du déplacement sol/pieu
- Calcul par modèles à barre
- **Calcul par modèles éléments finis**



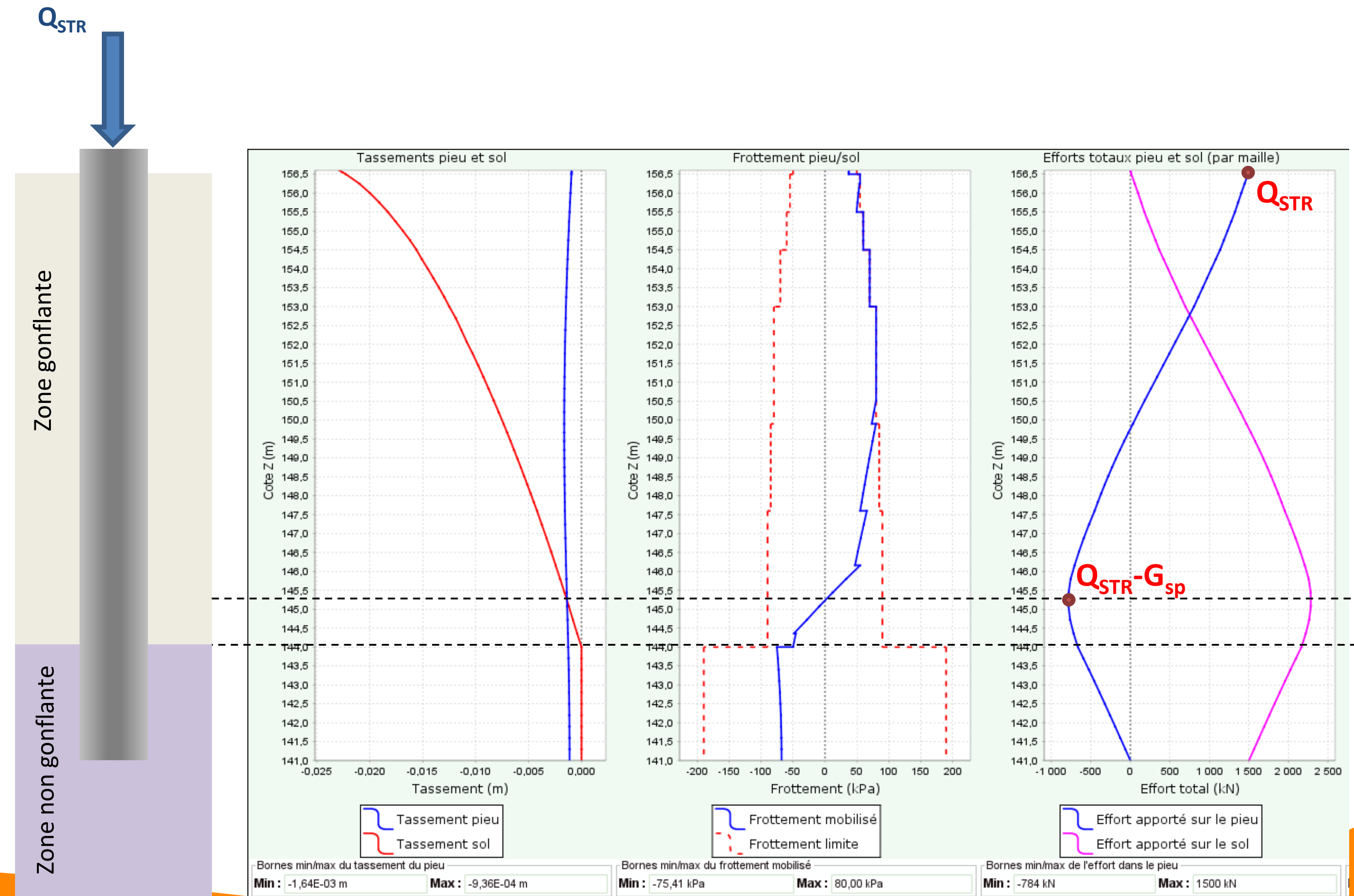


# Restitution du GT gonflement des terrains argileux

## Fondations profondes

### Détermination des sollicitations: Gonflement en champ libre – méthode en déplacement (lois t-z)

- Adaptée au sol « libre » en base d'infrastructure
- Non adaptée aux configurations de radier s.s.
- Calcul en déplacement piloté par:
  - La charge en tête de pieu
  - Le profil de gonflement libre
  - Les lois de mobilisation du frottement en fonction du déplacement sol/pieu
- Calcul par modèles à barre
- Calcul par modèles éléments finis
- Détermination du profil de sollicitations dans les pieux
  - « Compression » maximale en tête de pieu
  - Déchargement du pieu sur le sol en **partie haute** par **frottement positif**

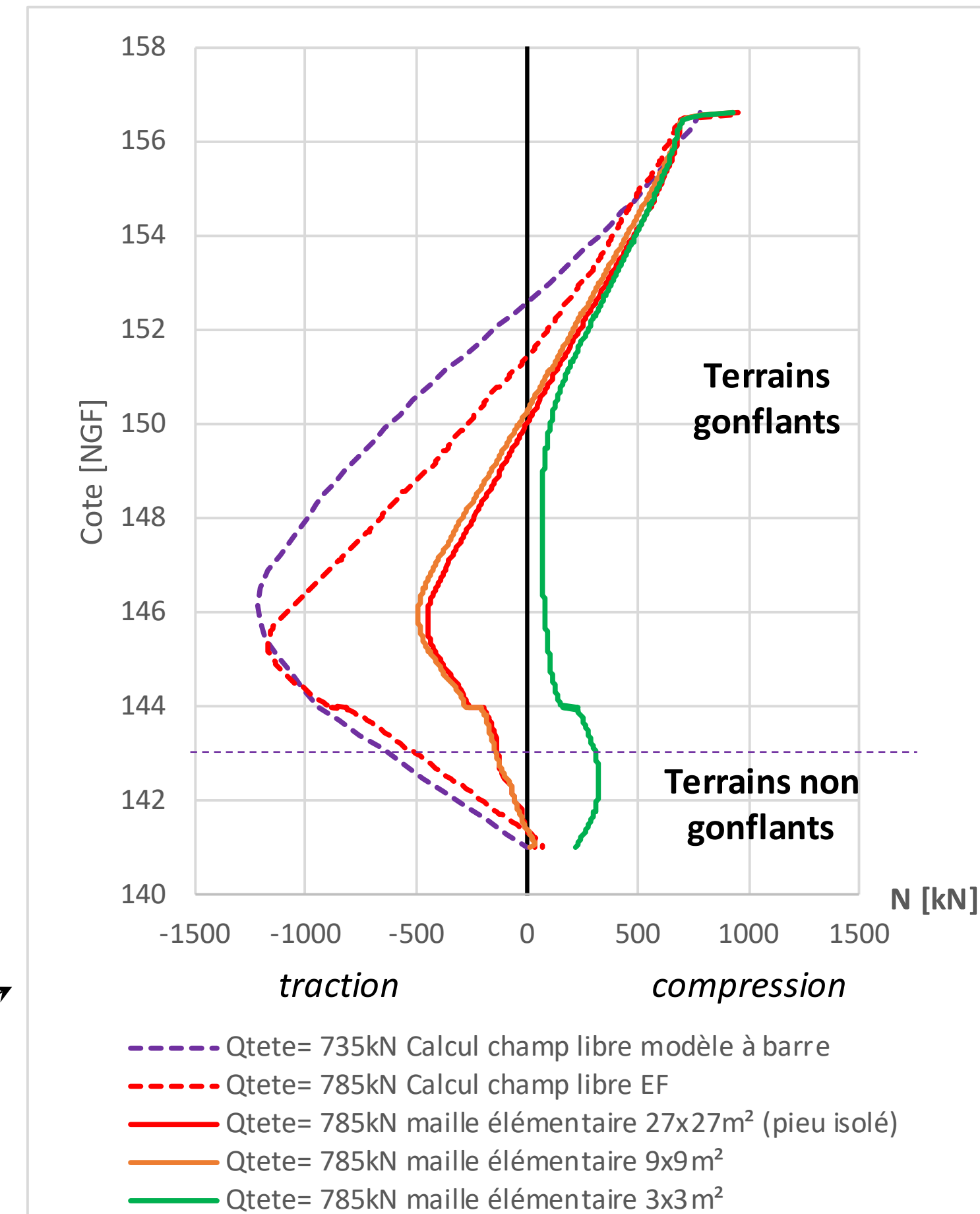


# Restitution du GT gonflement des terrains argileux

## Fondations profondes

### Détermination des sollicitations: Gonflement en champ libre – méthode en déplacement (lois t-z)

- **Adaptée au sol « libre » en base d'infrastructure**
- **Non adaptée aux configurations de radier s.s.**
- **Calcul en déplacement** piloté par:
  - La charge en tête de pieu
  - Le profil de gonflement libre
  - Les lois de mobilisation du frottement en fonction du déplacement sol/pieu
- Calcul par modèles à barre
- Calcul par modèles éléments finis
- Détermination du profil de sollicitations dans les pieux
- **Pas de prise en compte de la modification des contraintes dans le sol induites par:**
  - La charge STR en tête de pieu,
  - Le frottement positif rechargeant le sol en partie haute du pieu
  - **Approche conservative**



# Restitution du GT gonflement des terrains argileux

## Fondations profondes

### Détermination des sollicitations: Méthode d'Interaction Sol Structure

#### ➤ Approche axisymétrique de maille élémentaire (sol + pieu)

- Adapté aux configurations de « sol libre » et de « radier »
- **Nécessité de fondations homogènes**
- Etude d'une maille isolée
  - Pas de cisaillement en bordure de maille
  - Conservation de la charge avec la profondeur

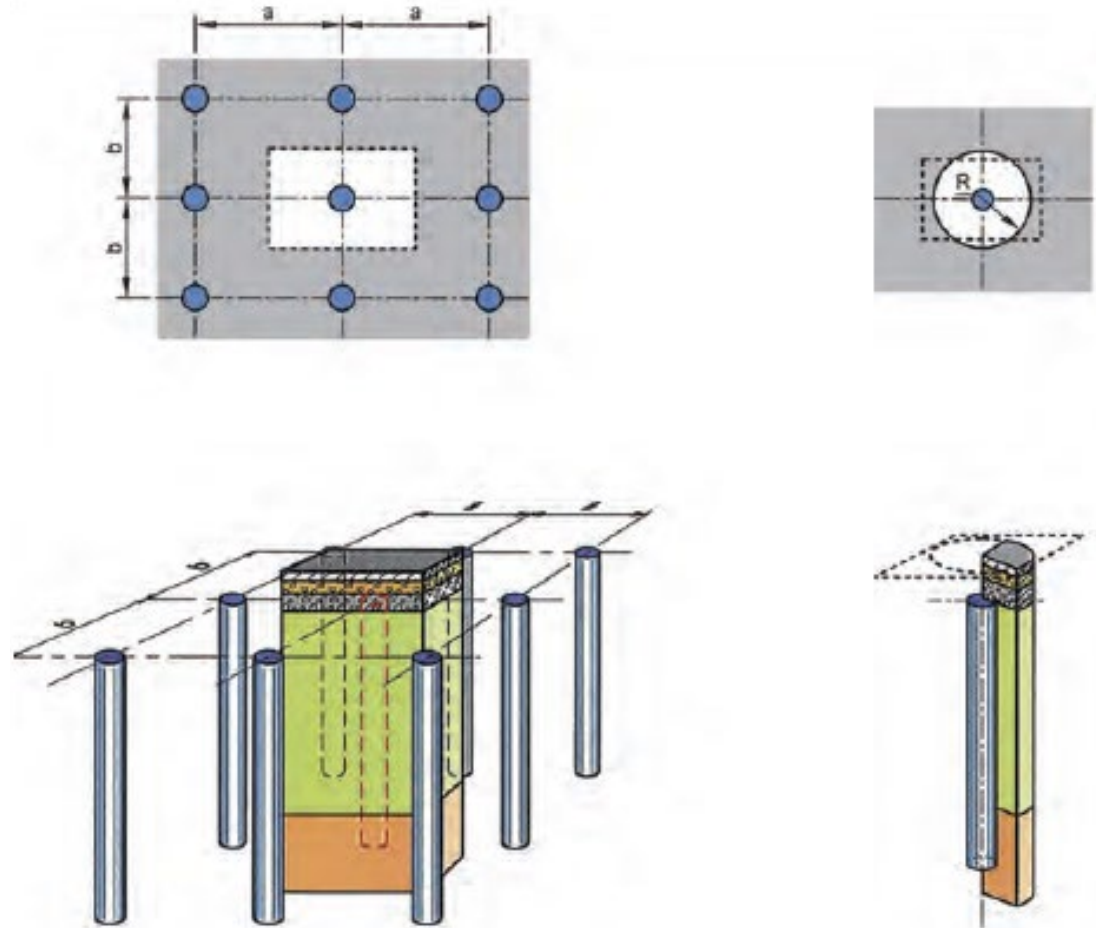
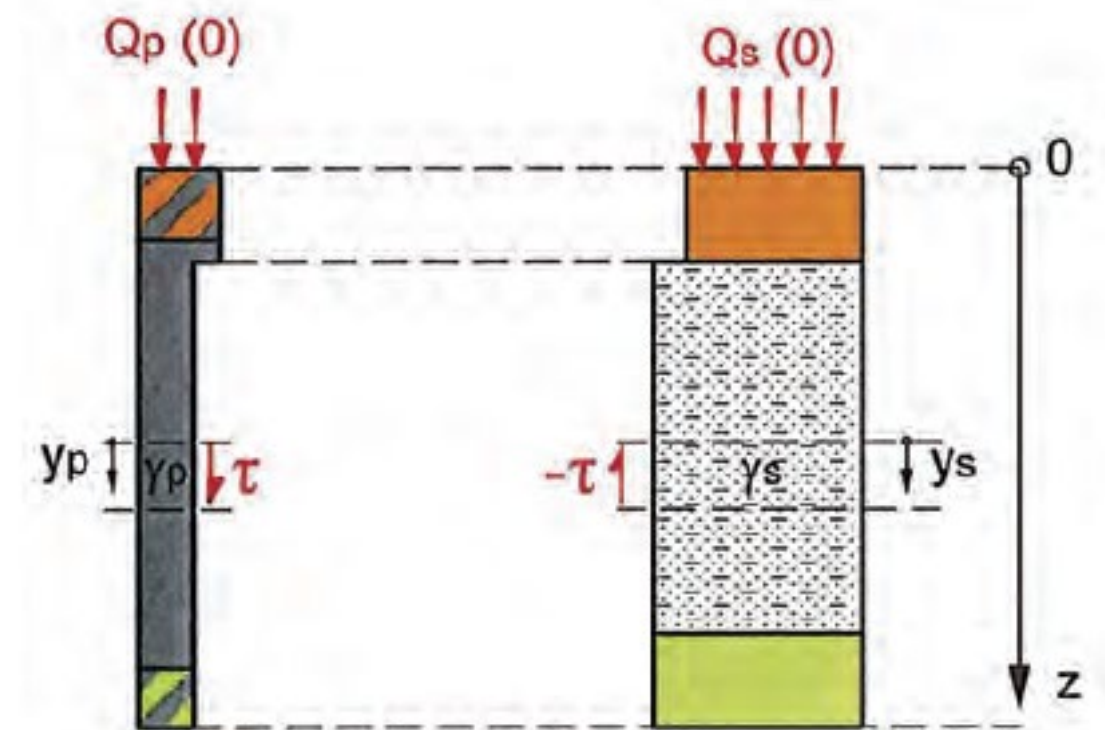
#### ➤ Etude par **modèles semi analytiques** composés de:

- **Sous modèle sol** avec **lois de comportement adaptées** (zone gonflante:  $\sigma'_{vg}$ ,  $K^*_g$  ou  $C^*_g$ , sols non gonflants: E)
- **Sous modèle pieu** caractérisé par le module du pieu et la raideur de pointe
- **Fonction de transfert t-z** reliant les déplacements sol/pieu au frottement axial

#### ➤ Etude par **modèles numériques** en utilisant (cf. présentation radiers)

- Méthode de **calcul par déconsolidation**
- Calcul par déformation imposée (avec **taux différencié** sur la zone gonflante),
- Lois de **comportement avancées** intégrant une déformation de gonflement (Bultel, Shädlich...)

#### ➤ Approche par modèle numérique complet





# Restitution du GT gonflement des terrains argileux

## Fondations profondes

### Détermination des sollicitations: Rappel des principales méthodes de calcul

<i>Méthode</i>	<b>Conception structurelle ne contraignant pas le gonflement des sols (vide sanitaire/ matériau fusible)</b>	<b>Conception structurelle contraignant le gonflement des sols (pieux reliés au radier sur sol)</b>
<i>Gonflement en champ libre §7.3.2</i> <i>Méthode forfaitaire §7.3.2.2</i>	Adaptée en première approche méthode très conservatrice	Non adaptée
<i>Utilisation de lois t-z (modèles à barres ou numériques) §7.3.2.3</i>	Adaptée Méthode généralement conservatrice	Non adaptée
<i>Maille élémentaire axisymétrique §7.3.3</i>	Adaptée aux réseaux de fondations identiques disposées suivant une maille globalement régulière. Non adaptée aux réseaux constitués de plusieurs types de fondations profondes différentes (pieux + micropieux, par exemple).	
<i>Calcul semi-analytique §7.3.3.1</i>	Adaptée pour les réseaux de fondations disposées suivant une maille de faible dimension (moins pertinent pour les mailles lâches)	Adaptée
<i>Calcul numérique</i>	Adaptée	Adaptée
<i>Modèle numérique « complet »</i>	Adaptée aux conditions de fondations hétérogènes (pieux + micropieux, par exemple).	

# Restitution du GT gonflement des terrains argileux

## Fondations profondes

### Justifications des fondations

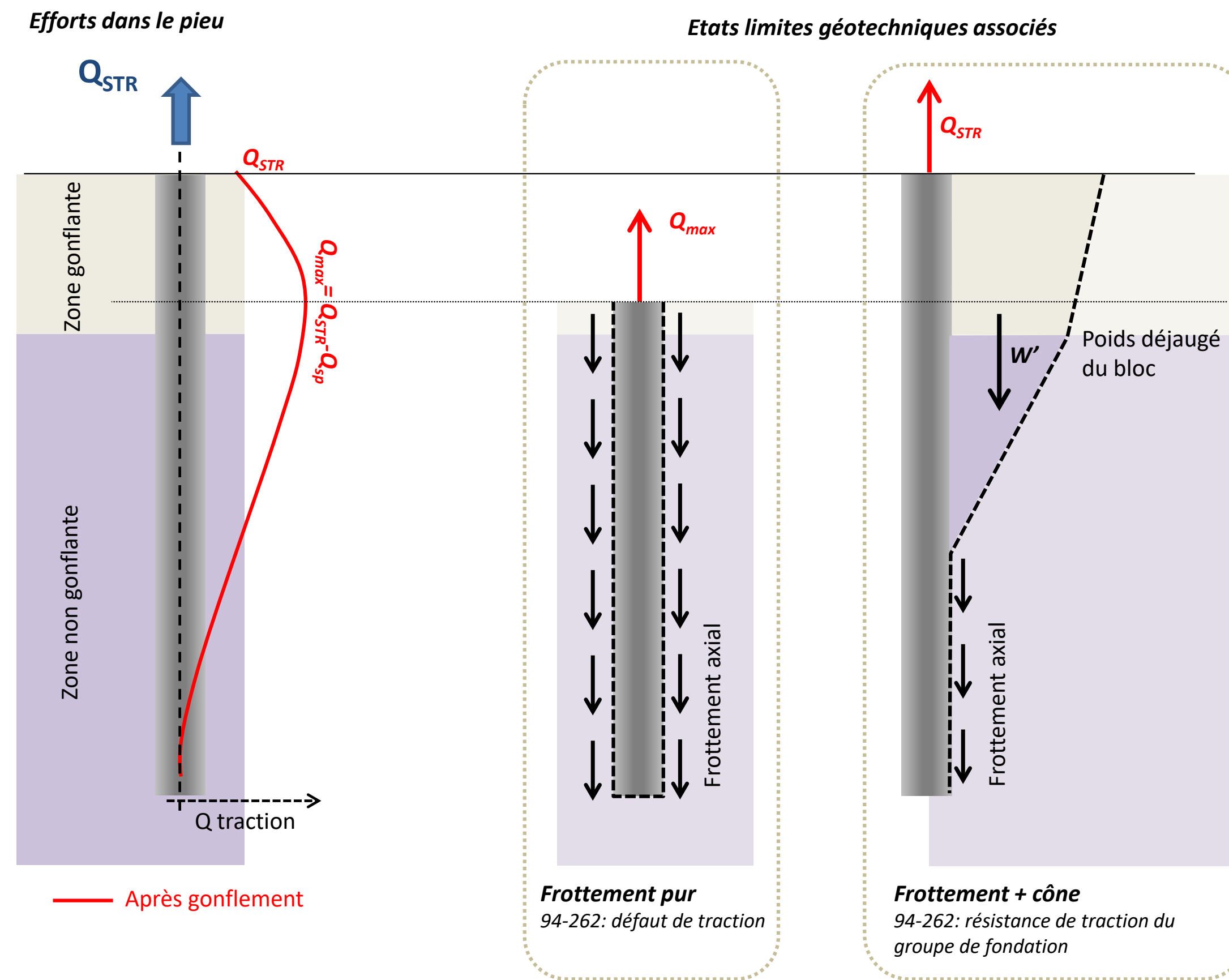
- Effet du gonflement considérés comme **action permanente (G)**
- **Norme de référence NF P 94-162**
  - Etat limites géotechniques (**GEO**) structurels (**STR**) et non mise en flottaison (**UPL**)
  - Etats limites ultimes (**ELU/ELA**) et états limites de service (**ELS**)
- **Incertitude sur la cinétique de développement du gonflement, justification sur deux cas extrêmes**
  - Avant développement du gonflement (Cf. NF P 94-262)
  - **Après développement total du gonflement**
- **L'expression du gonflement a tendance à générer en mise tension du pieu**
  - Les états limites de **compression** dans les pieux sont plus **critiques avant expression du gonflement**
  - Pour des pieux comprimés après gonflement pas de justification complémentaire après expression du gonflement
  - L'expression du **gonflement** est en mesure de **tendre une section initialement comprimée**
- **Justification Structurelle: pieu tendu (après expression du gonflement)**
  - La traction maximale ne se développe pas forcément en tête des pieux
  - En cas de d'optimisation du ferrailage des sécurités sont à prendre sur le niveau de base de la couche gonflante



# Restitution du GT gonflement des terrains argileux

## Fondations profondes

### Justifications des fondations: états limites GEO – pieux en traction après gonflement

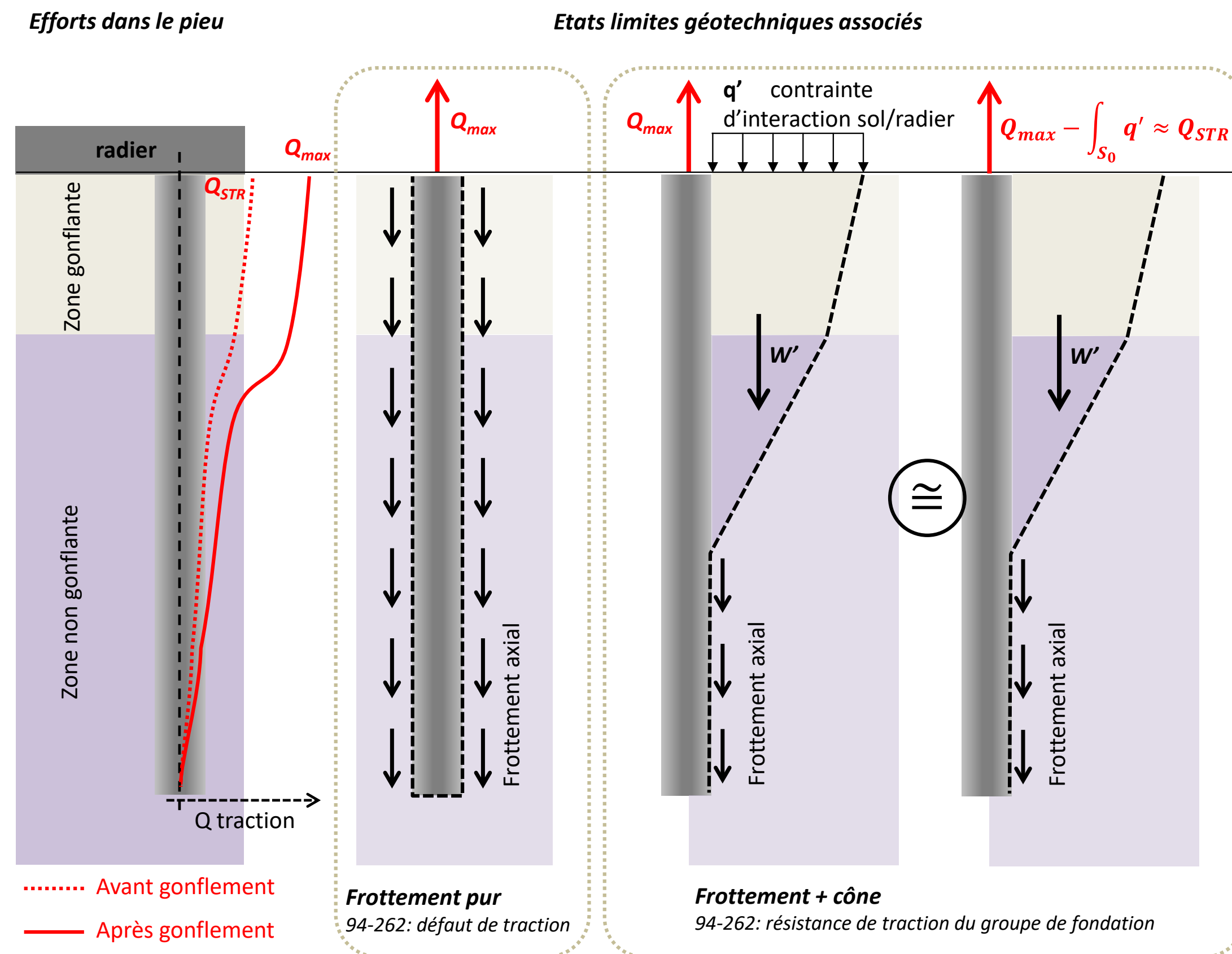


- **Sol « libre » en base d'infrastructure**
  - Vérification du **défait de portance en traction** au niveau du plan d'effort maximal situé en profondeur sous la tête de pieu **à produire**
  - Effort en tête de pieu non modifié: condition de rupture suivant mécanisme **résistance du groupe de fondation** (frottement + cône) non impactée par l'expression du gonflement (**couverte par les justifications avant gonflement**)

# Restitution du GT gonflement des terrains argileux

## Fondations profondes

### Justifications des fondations: états limites GEO



#### Condition de radier

- Vérification du **défait de portance en traction** au niveau du plan d'effort maximal situé en tête de pieu **à produire**
- Effort en tête de pieu non modifié: condition de rupture suivant mécanisme **résistance du groupe de fondation** (frottement + cône) non impactée par l'expression du gonflement (**couverte par les justifications avant gonflement**)

#### In fine:

Effort axial dans les pieux	Justifications
Pieux en compression après développement du gonflement	Aucune (couvert par les justifications prévues dans la NF P 94-262 préalablement au développement du gonflement)
Pieux en traction après développement du gonflement	GEO : états limites de portance sous le plan d'effort de traction maximal (défaut de frottement) STR : Etats limites structurels des éléments constitutifs