

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

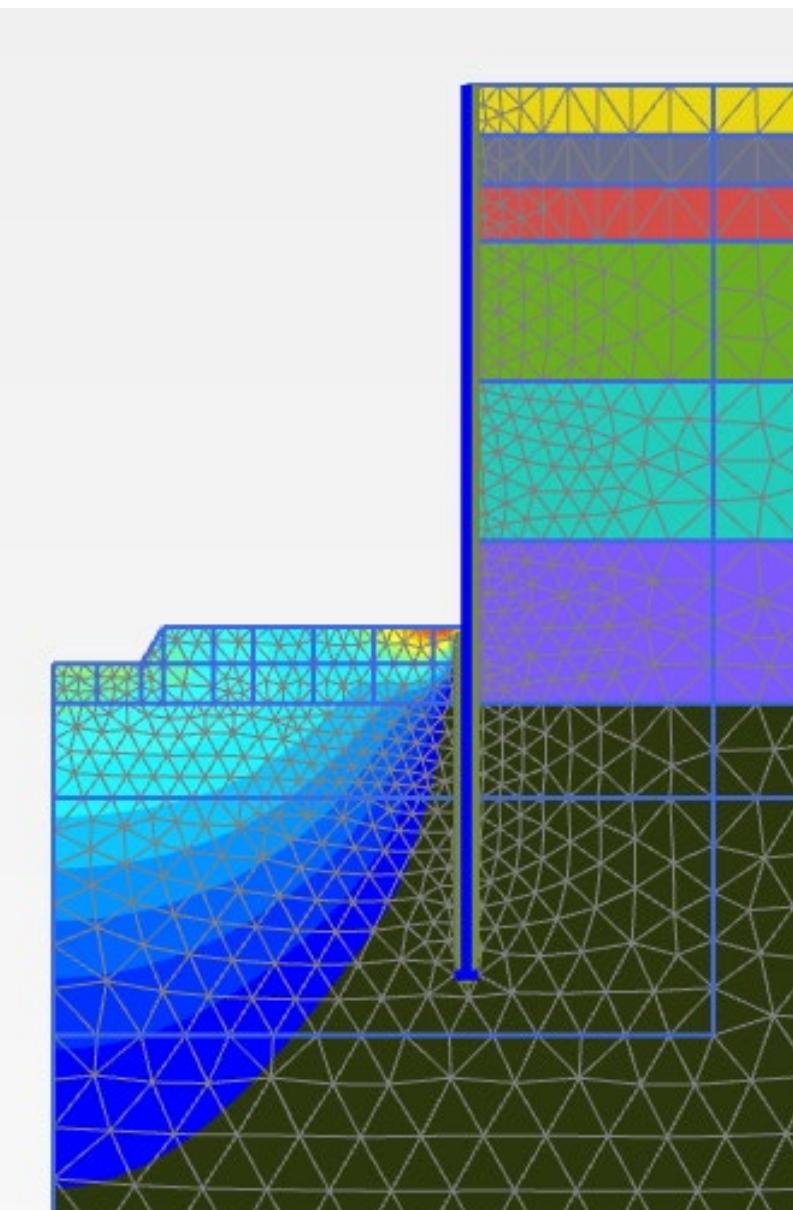
Sommaire de l'intervention

- ▶ 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

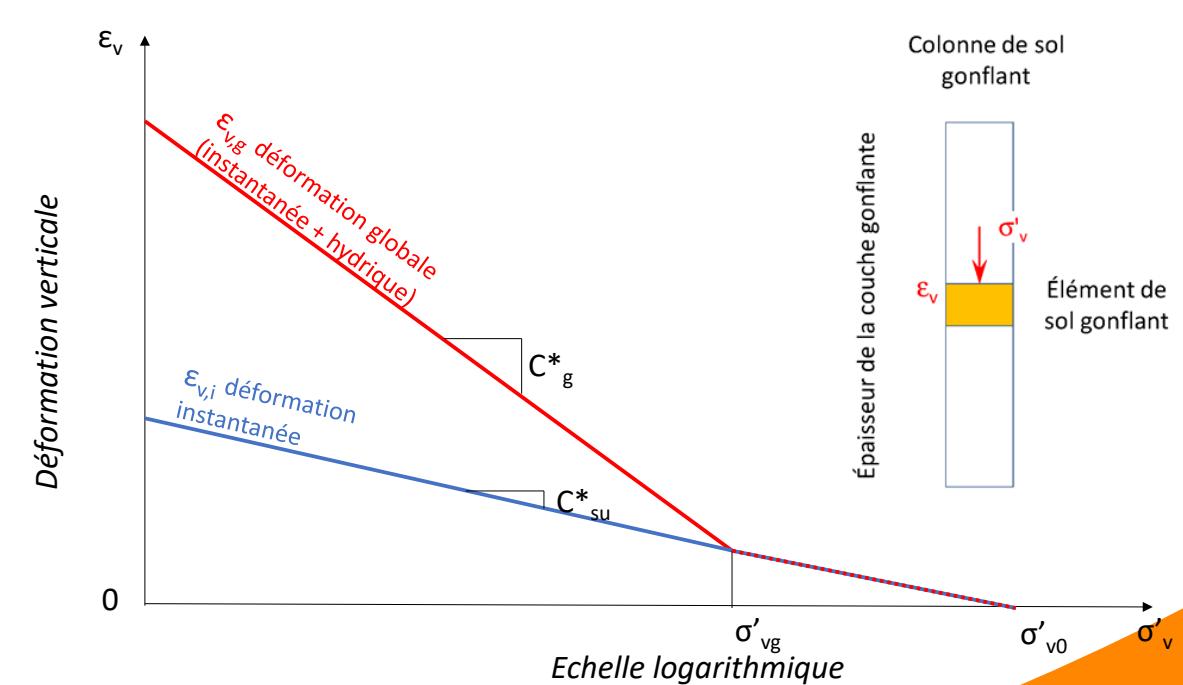
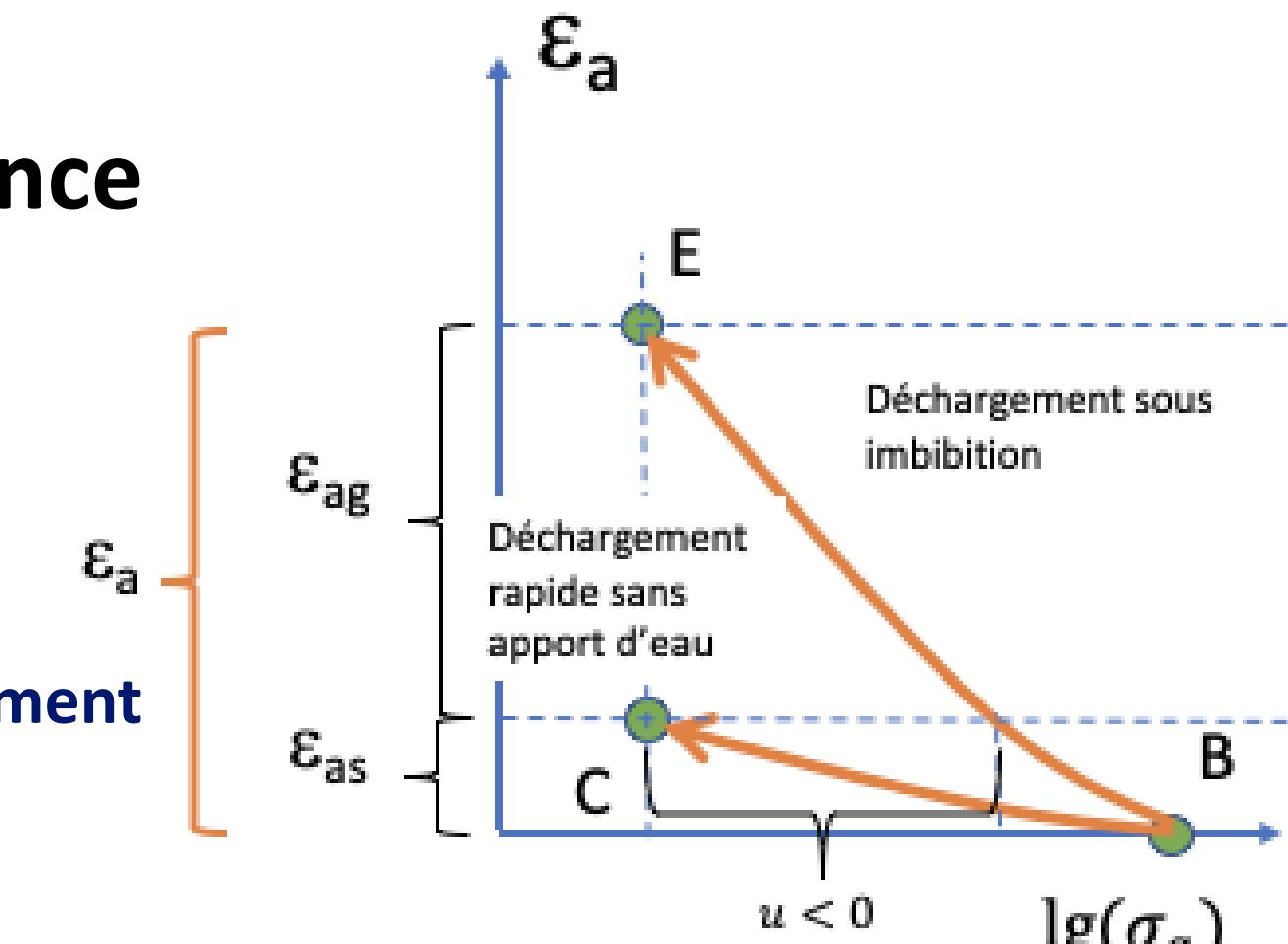
Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Fondations profondes

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



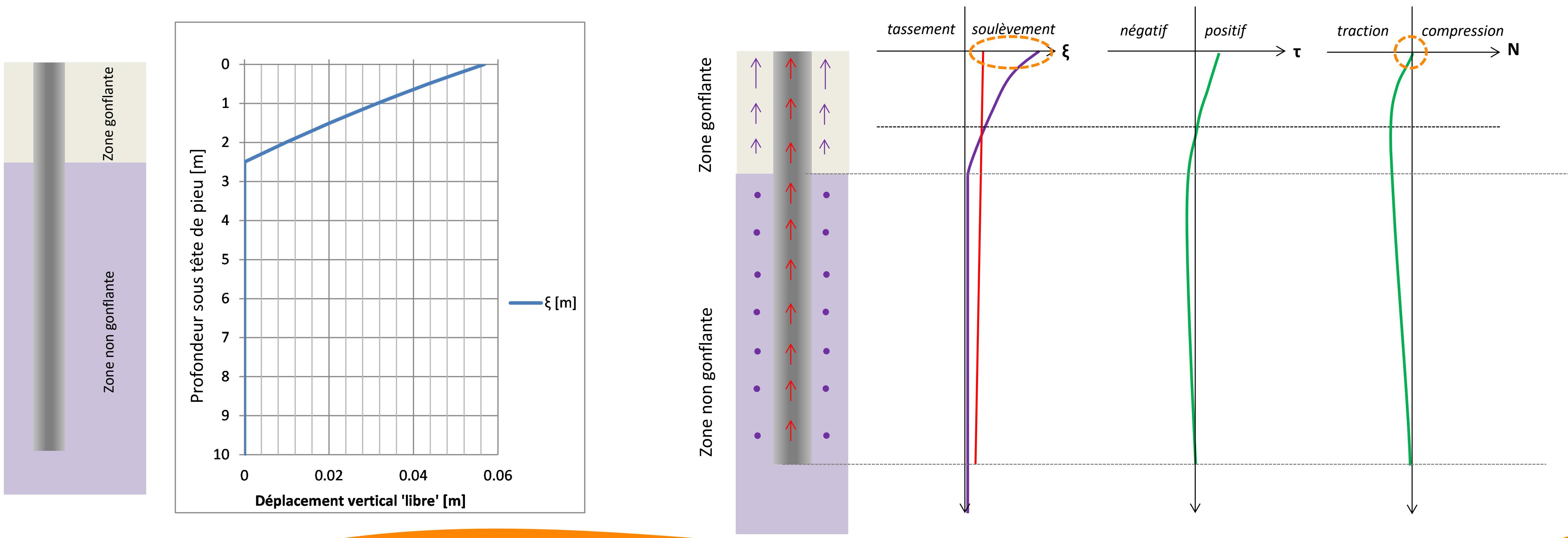
- ▶ Excavation des terres pour atteinte du fond de fouille produit un soulèvement
 - Observé dans tous types de terrains
 - Terrains gonflants: forte **amplitude**, et une importante proportion **différée**
- ▶ Génération d'efforts de traction dans les éléments de fondation (alors existants) qui forment des points durs dans le sol
 - Eléments préfondés: soumis à la somme des déformations **instantanées** et **différées**
 - **Sols gonflants:** déformation caractérisée par C^*_g et σ'_{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 σ'_{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



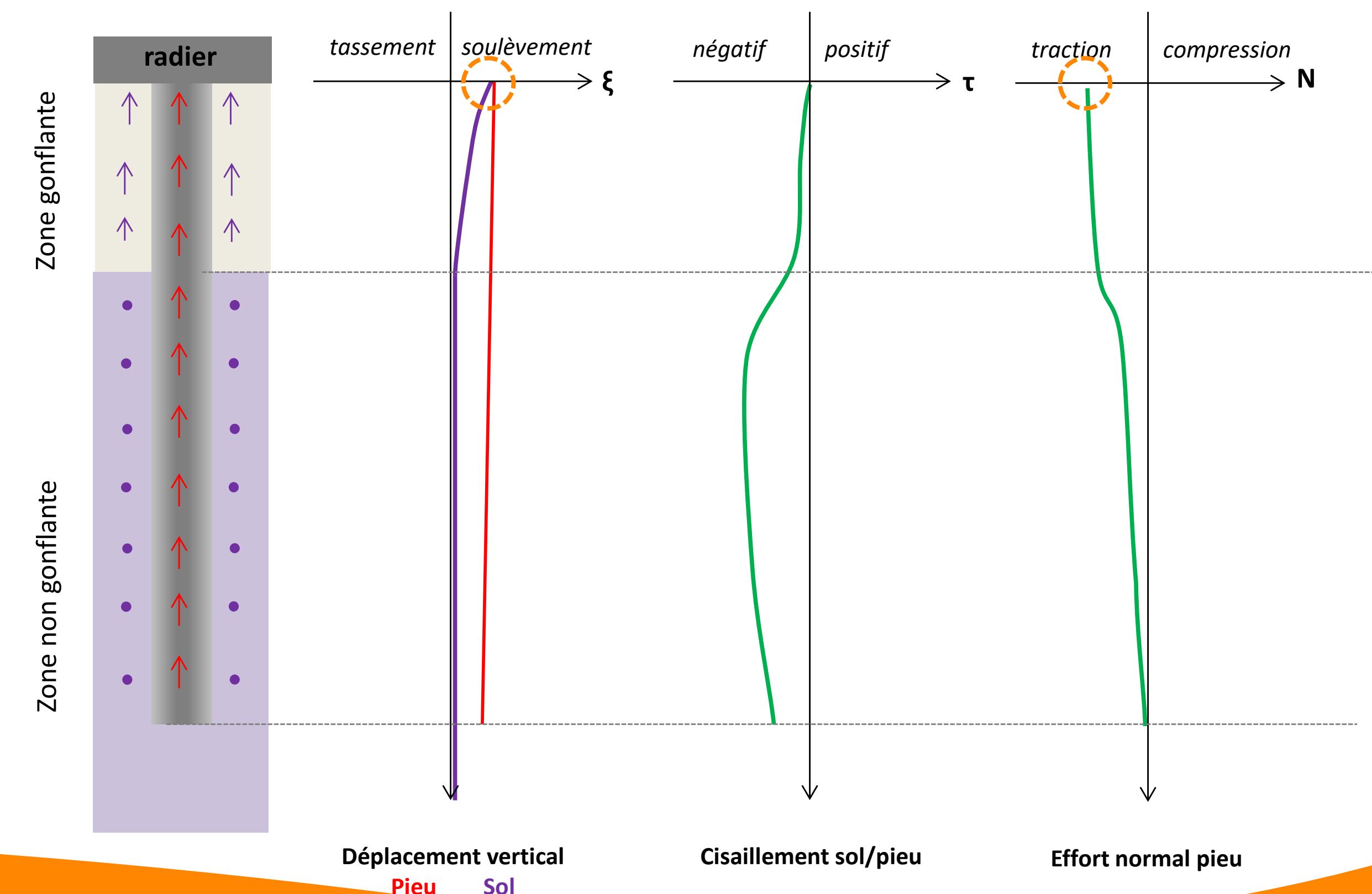
Restitution du GT gonflement des terrains argileux

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)

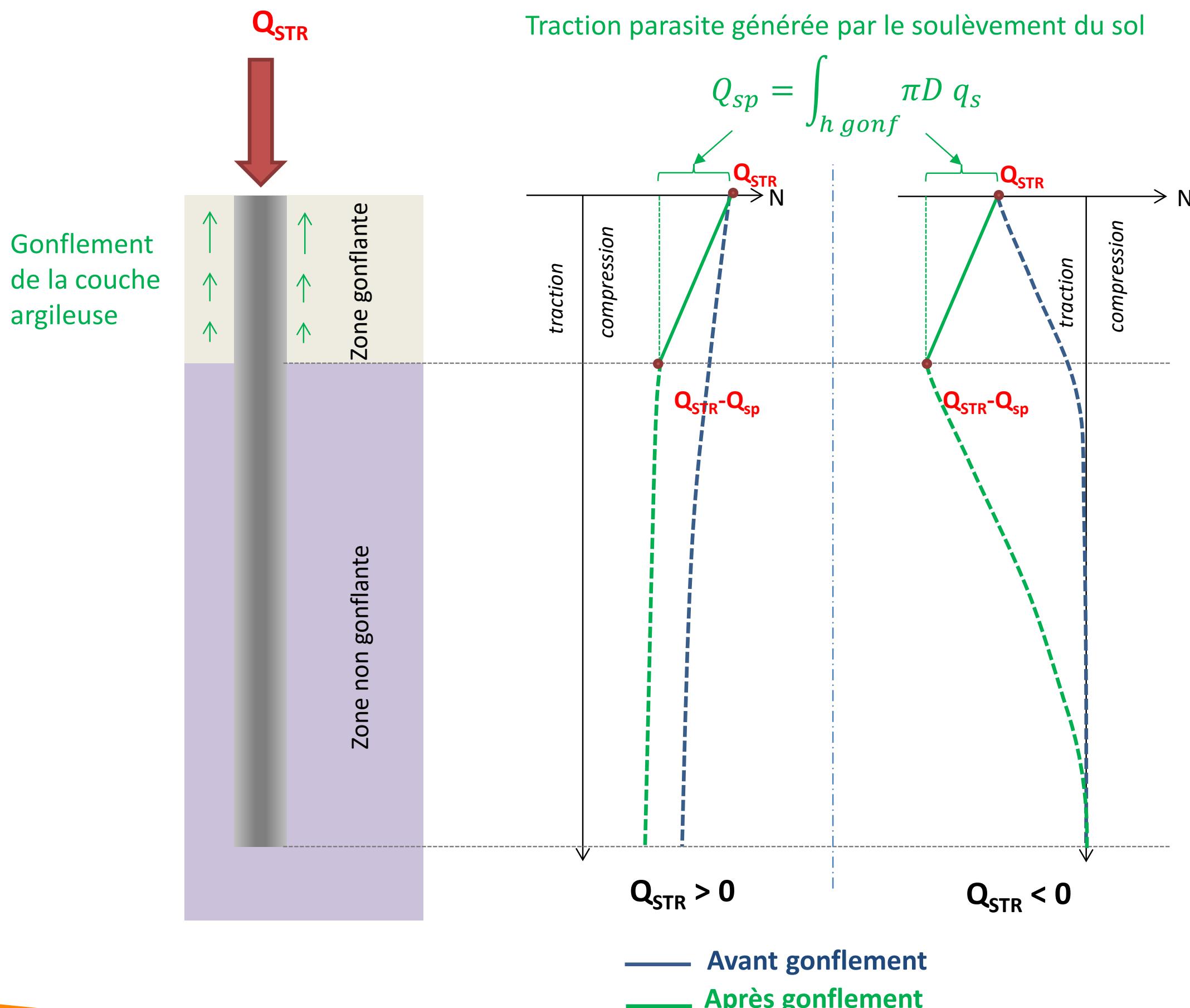
- ▶ Egalité des déplacements entre sol et pieu en arase inférieure du radier
- ▶ Traction en tête de pieu
- ▶ Réduction du déplacement du sol par rapport au gonflement libre
- ▶ **Nécessité de mener un calcul d'ISS pour appréhender le comportement du pieu**



Restitution du GT gonflement des terrains argileux Fondations profondes

Détermination des sollicitations: Gonflement en champ libre – méthode forfaitaire

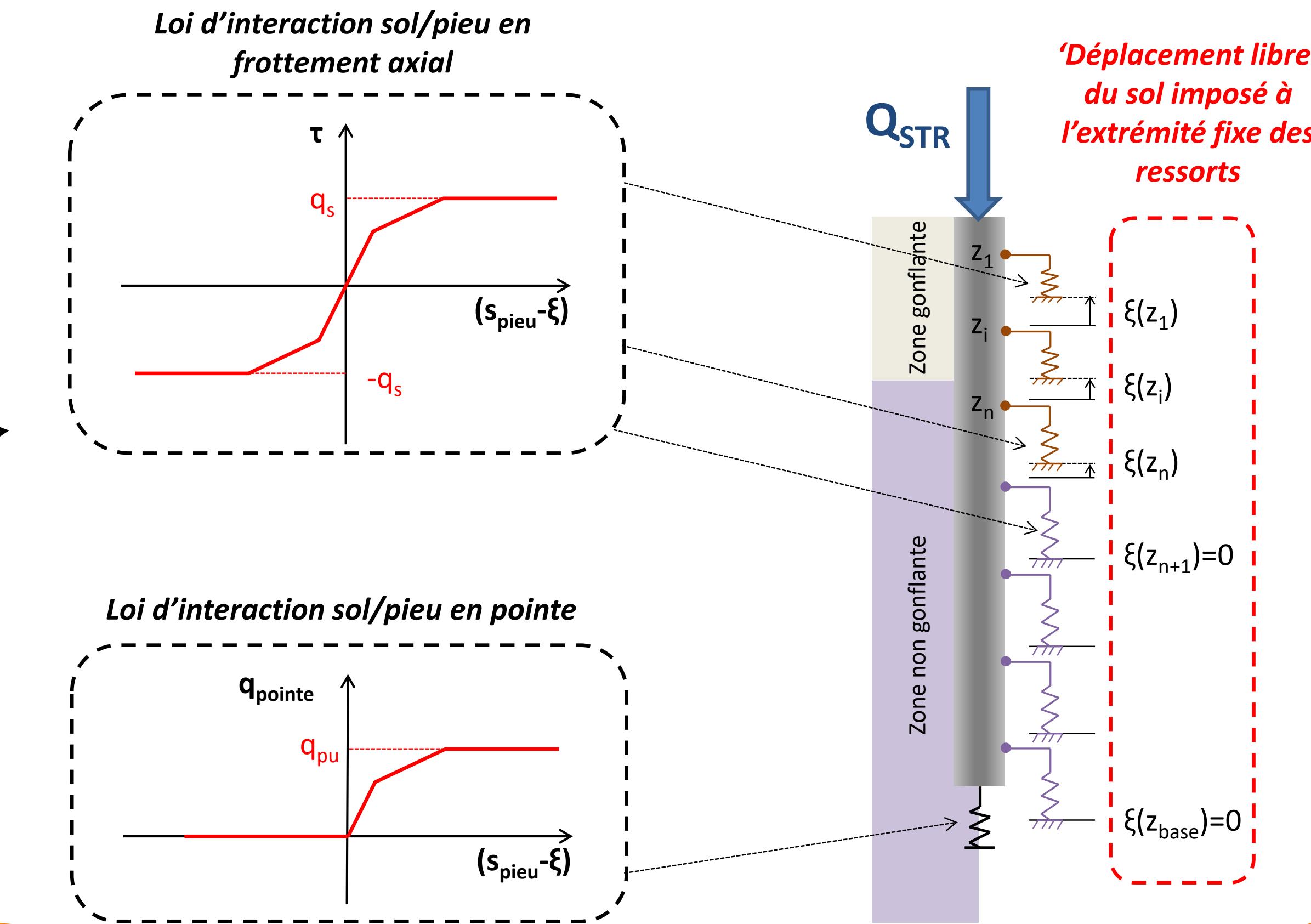
- Adaptée au sol « libre » en base d'infrastructure
- Non adaptée aux configurations de radier s.s.
- Déplacements différentiels sol/ pieu considérés suffisants pour **mobiliser le frottement axial limite q_s sur hauteur gonflante**
- **Données d'entrée**
 - Géométrie zone gonflante
 - Charge Q_{STR}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

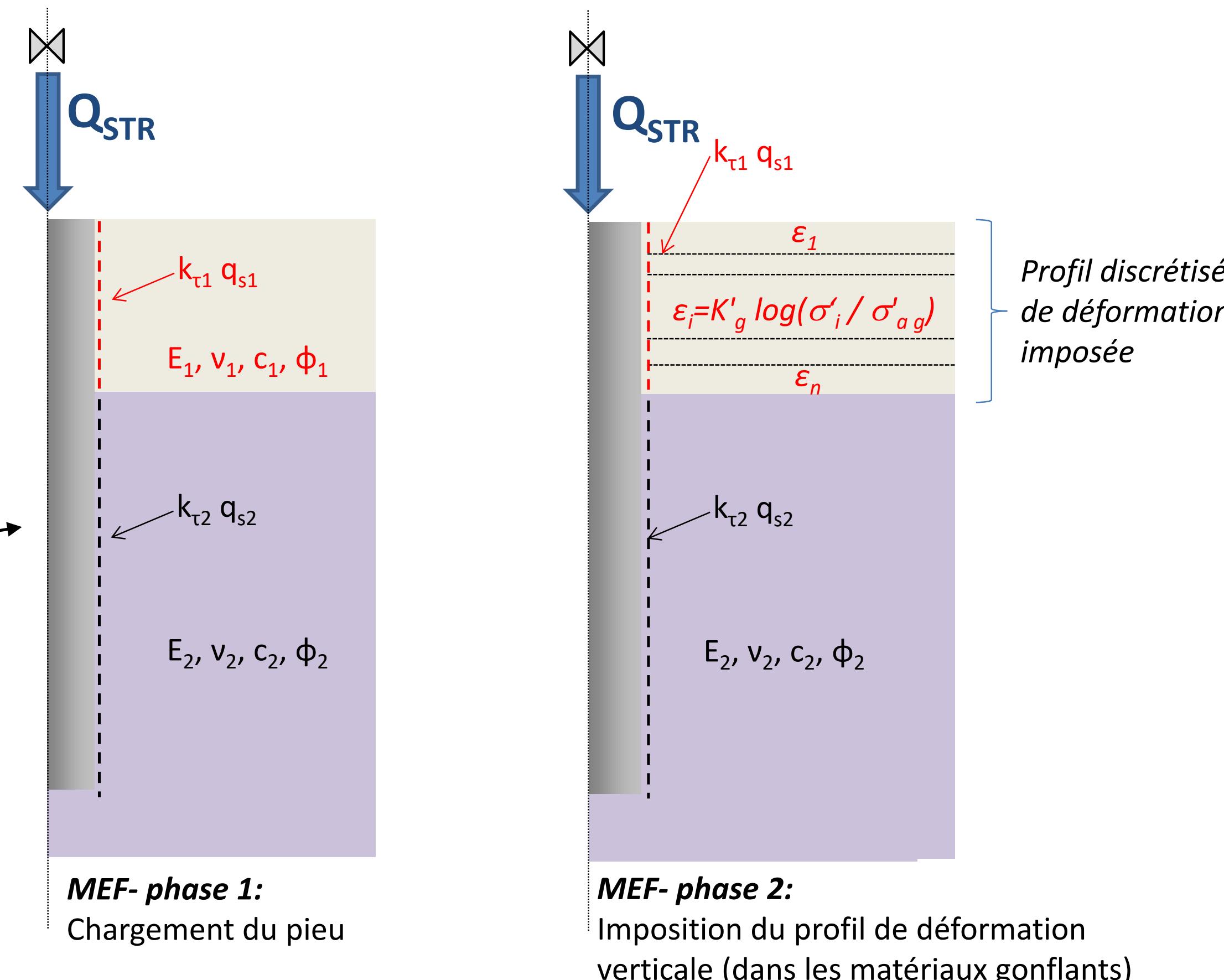
- ▶ Adaptée au sol « libre » en base d'infrastructure
- ▶ Non adaptée aux configurations de radier s.s.
- ▶ Calcul en déplacement piloté par:
 - La charge en tête de pieu
 - Le profil de gonflement libre
 - Les lois de mobilisation du frottement en fonction du déplacement sol/pieu
- ▶ Calcul par modèles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



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

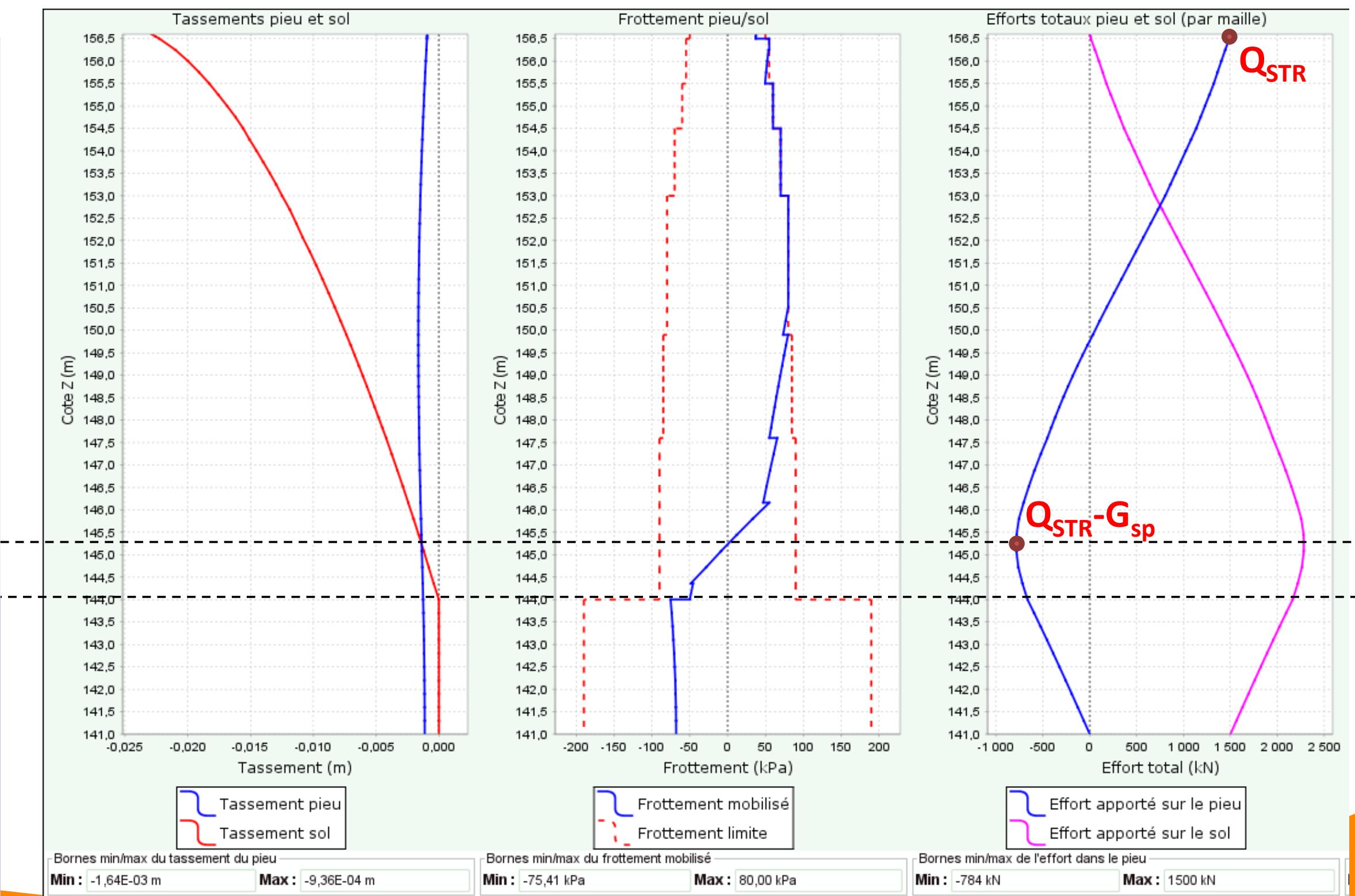
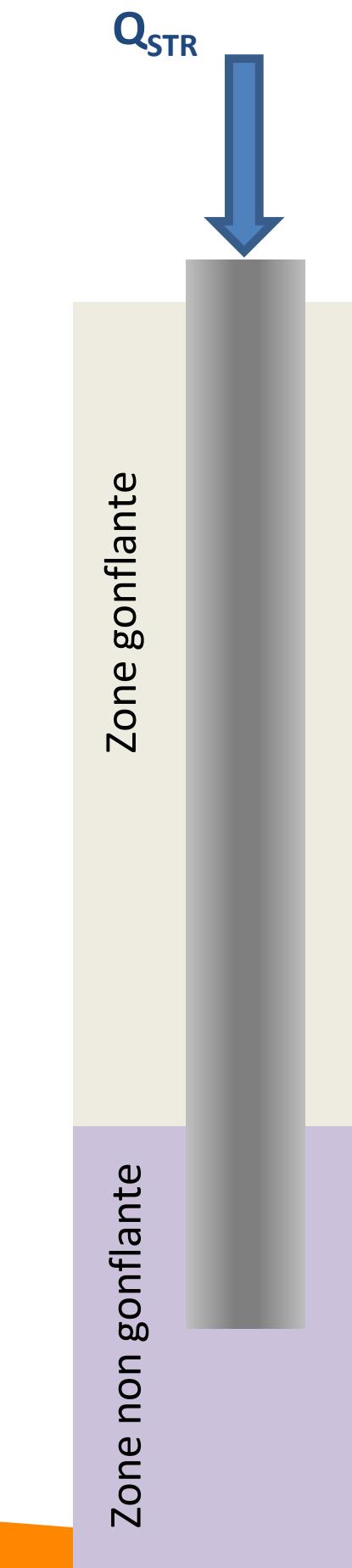
Détermination des sollicitations: Gonflement en champ libre – méthode en déplacement (lois t-z)

- 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

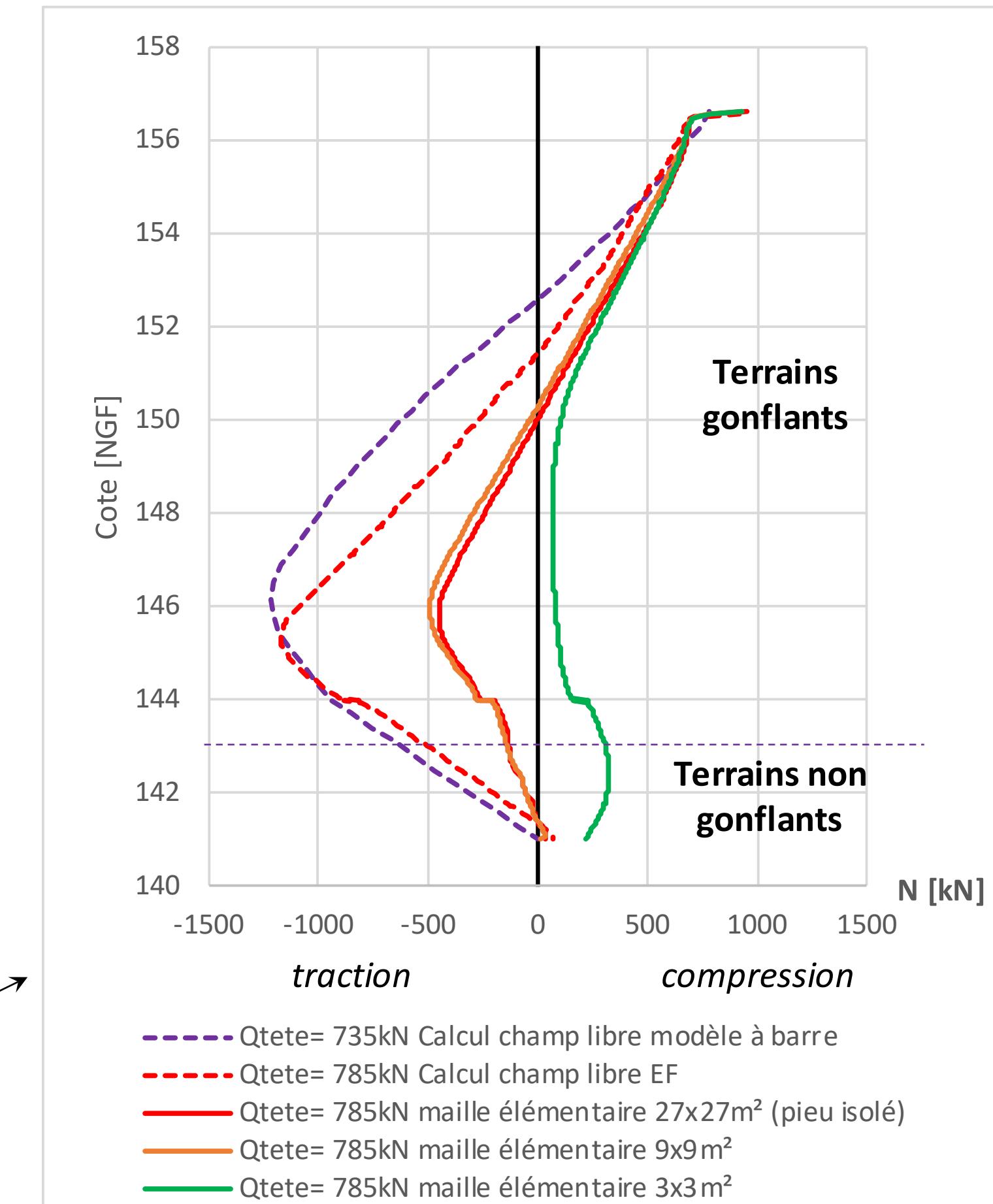
- Détermination du profil de sollicitations dans les pieux
 - « Compression » maximale en tête de pieu
 - Déchargement du pieu sur le sol en **partie haute** par **frottement positif**



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

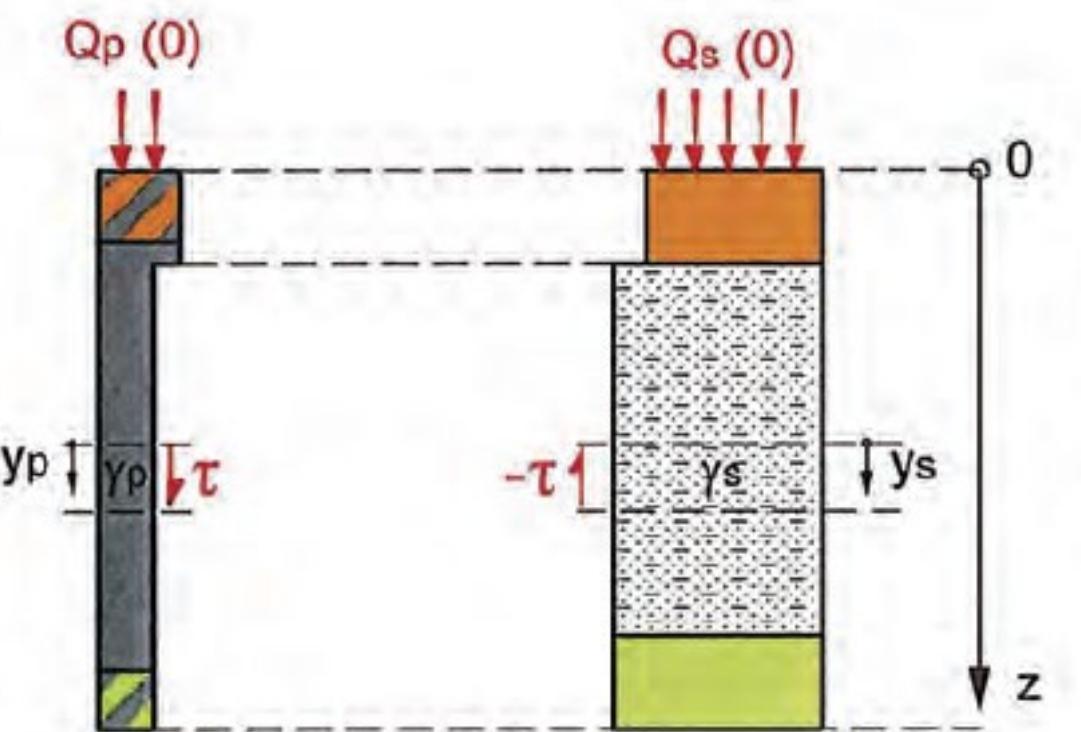
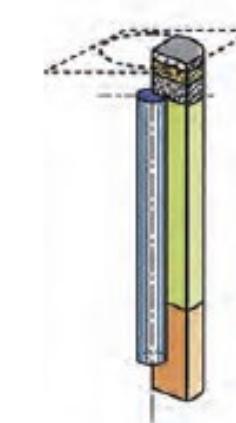
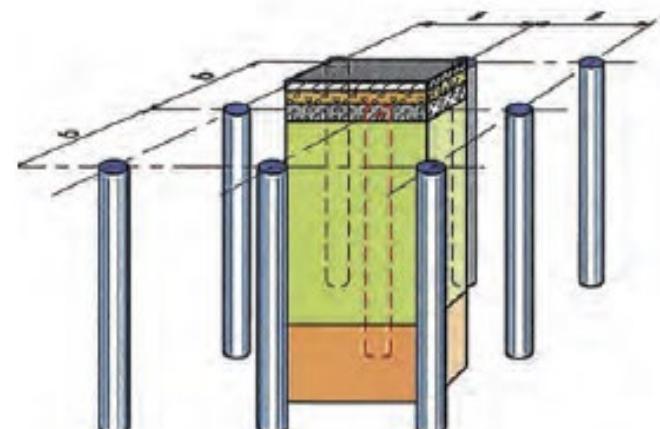
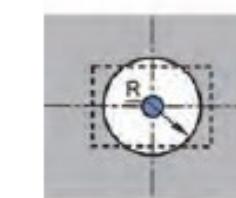
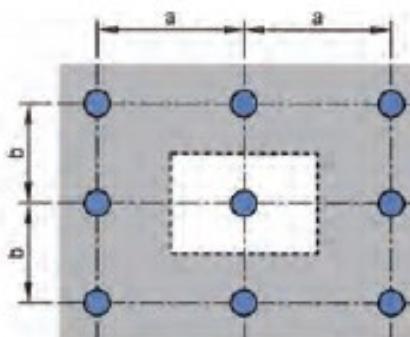
➤ Etude par modèles semi analytiques composés de:

- Sous modèle sol avec lois de comportement adaptées (zone gonflante: σ'_{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

Méthode	Conception structurelle ne contraignant pas le gonflement des sols (vide sanitaire/ matériau fusible)	Conception structurelle contraignant le gonflement des sols (pieux reliés au radier sur sol)
<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 conservative	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).	

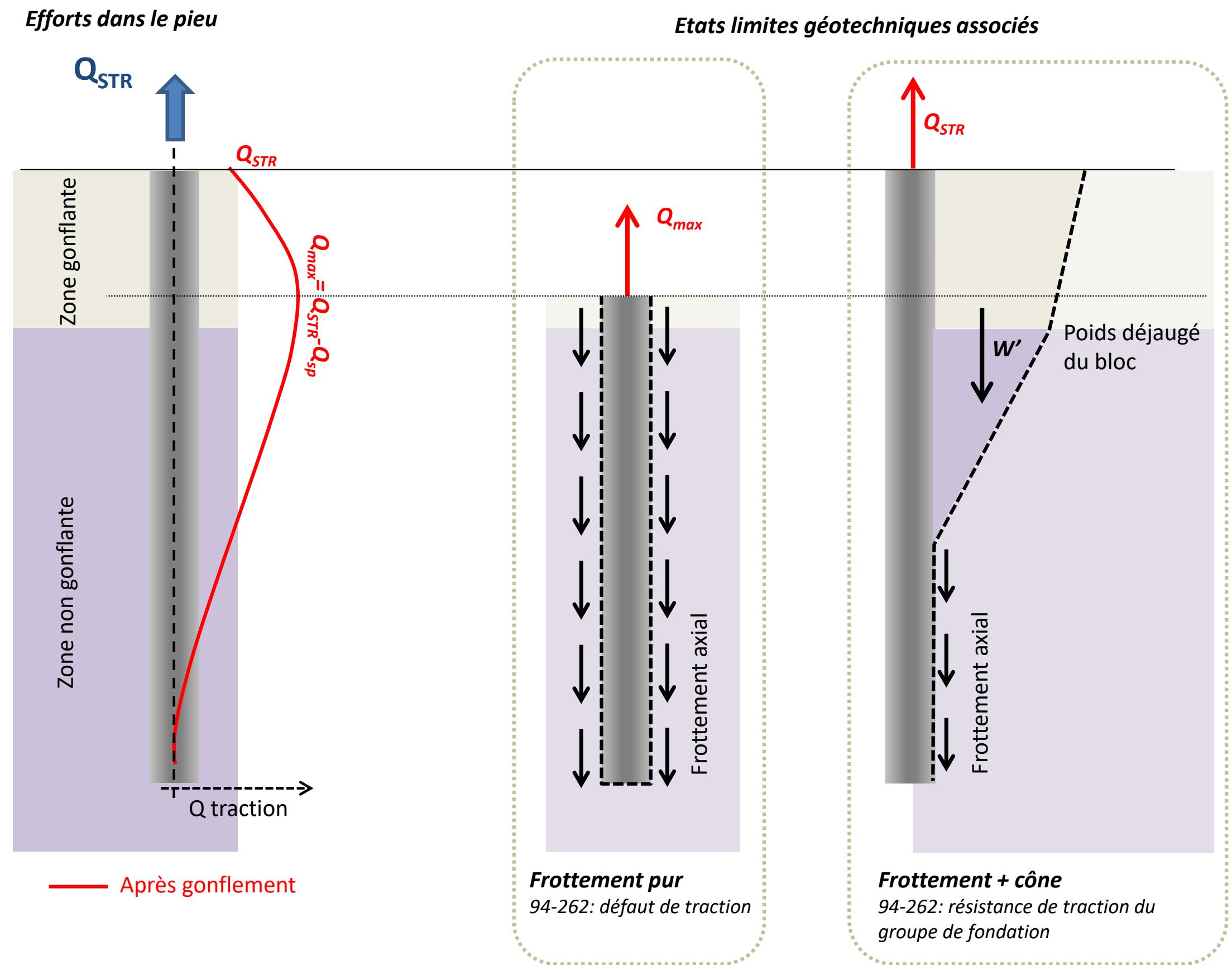
Restitution du GT gonflement des terrains argileux Fondations profondes

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 ferraillage 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



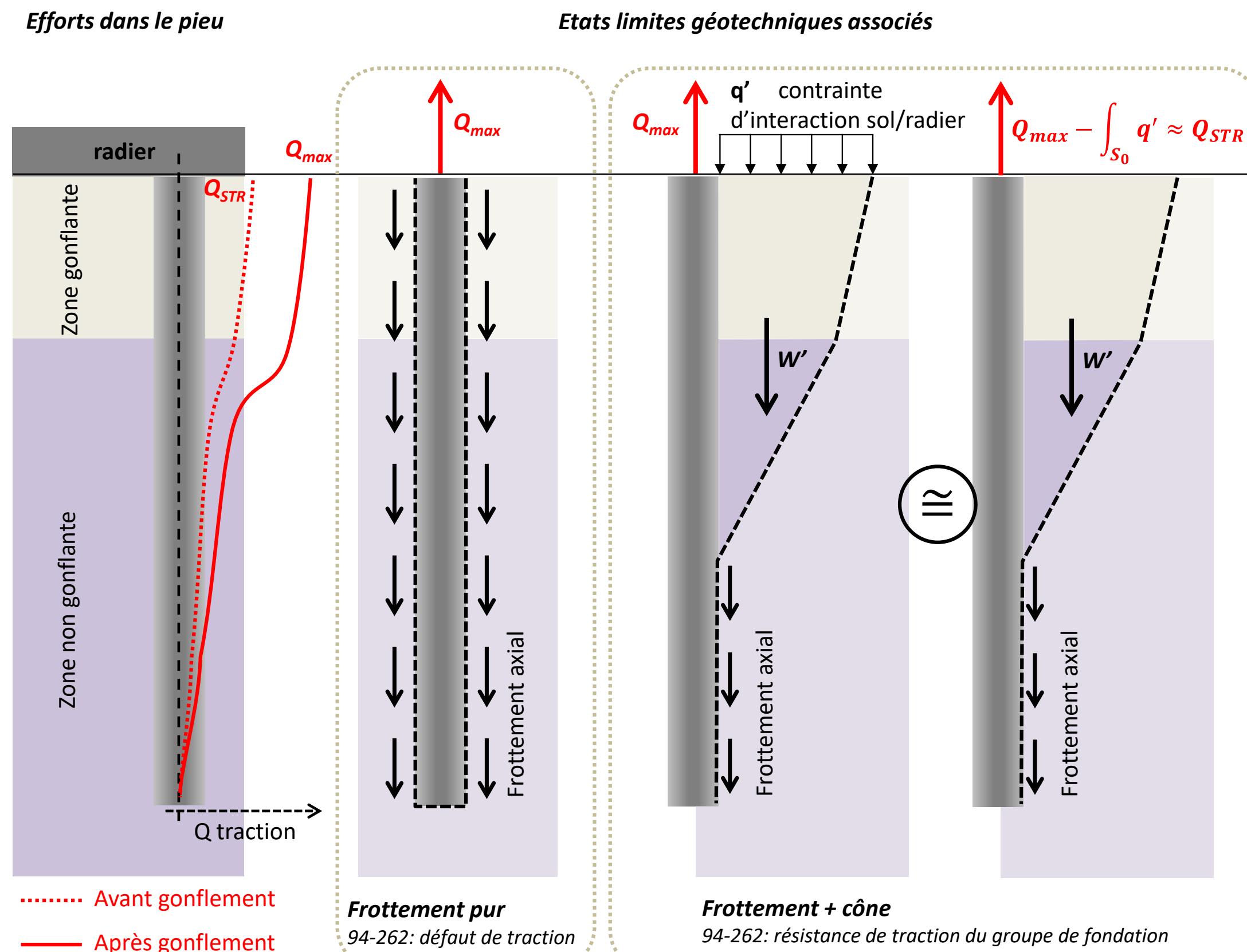
► Sol « libre » en base d'infrastructure

- Vérification du **défaut 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 **défaut 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