cfms
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Restitution GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

JOURNÉE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU 25 AVRIL 2024

Grégory MEYER
Egis Géotechnique

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

Radiers : Méthodologie REX

Choix de conception

Méthodes de calculs

Tunnels

Sommaire de l'intervention

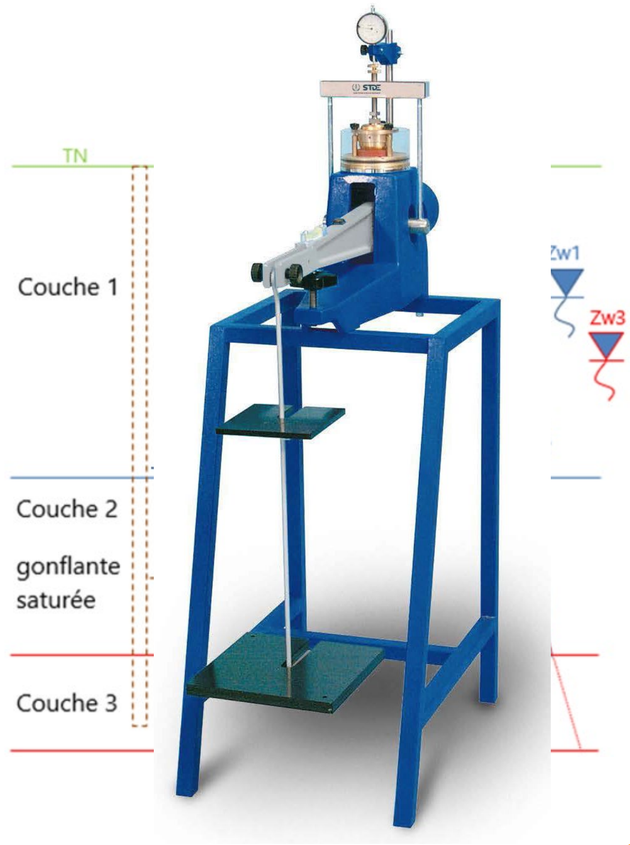
- Radiers : méthodologie et REX
- Radiers : choix de conception
- Radiers : Méthodes de calculs
- Tunnels

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

Considérations générales

- Deux grandes familles de radiers : portés (gonflement libre) ou coulés sur un matériau (ISS)
- Si le sol est saturé, le gonflement est dicté par la variation de contraintes effectives entre l'état initial et l'état final
- Comportement assimilable à celui d'un essai oedométrique (uniaxial)
- La pression de gonflement est une contrainte effective
- Pression de contact sous le radier = % pression de gonflement + pression interstitielle
- $\sigma'_g \leq \sigma'_{v0}$



Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

Radiers : Méthodologie REX

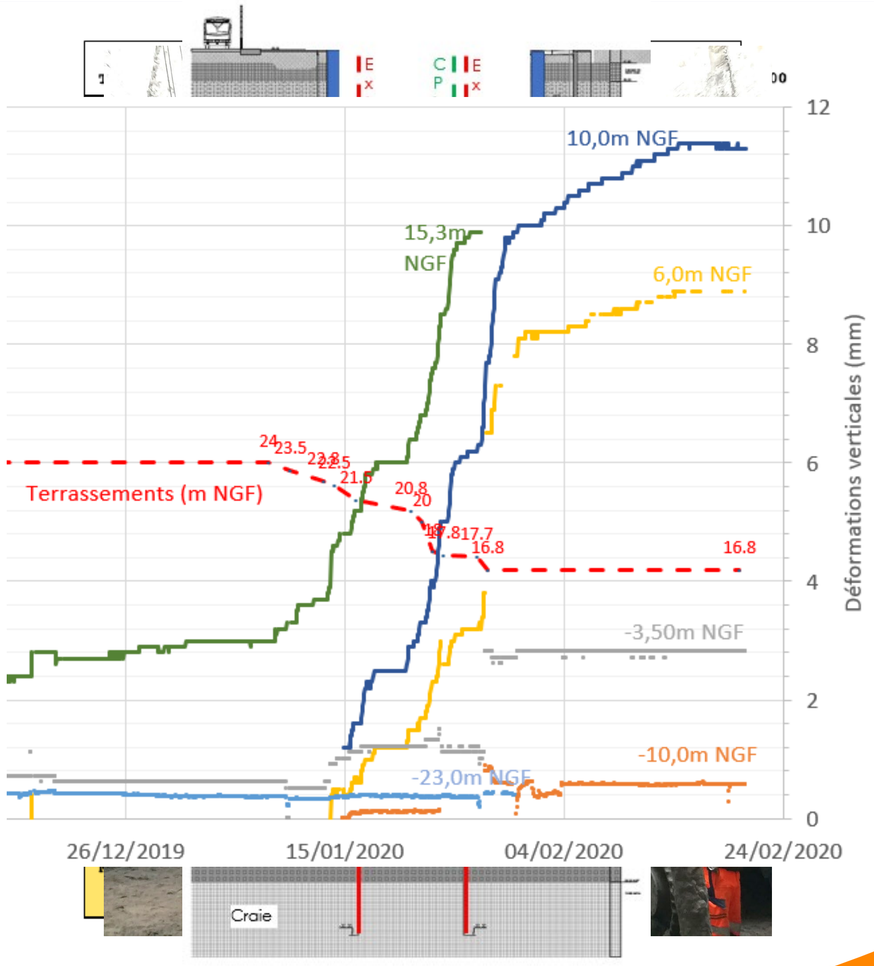
Choix de conception

Méthodes de calculs

Tunnels

REX 1 : fouille GPE – déformations instantannées

- Suivi d'un chantier du GPE (2020)
- Mesure du soulèvement par jauges extensométriques
- Déchargement « mécanique » centimétrique (absorbé au fur et à mesure des terrassements)
  C_{su}



Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

Radiers : Méthodologie REX

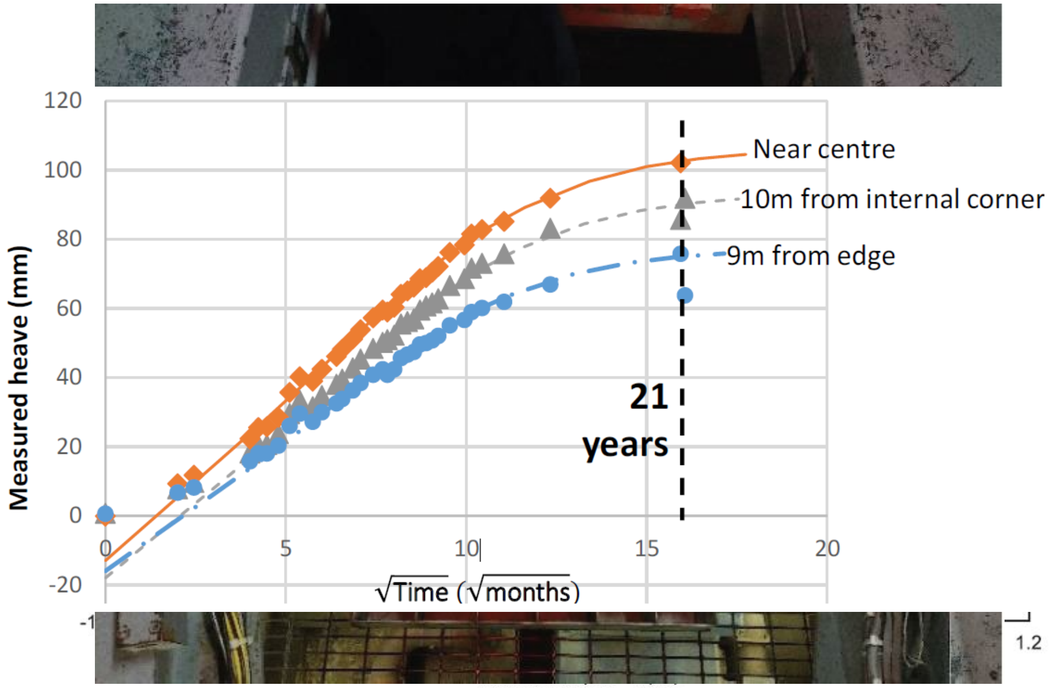
Choix de conception

Méthodes de calculs

Tunnels

REX 2 : Fouille à Horseferry Road (Londres) – déformations différées

- Fouille de 11m abandonnée, suivie 21 ans (1968 – 1989)
- Argile de Londres
- Expérimentation centrifugeuse à 100g (Chan, Hsu - 2019)
- Normalisé par rapport au facteur temps $T_v = \frac{t\,C_V}{H^2}$
- Soulèvement de 10,5 cm à U = 95 %
- Déchargement avec apport d'eau, dit « hydrique » C_g
- Utilisation du facteur de gonflement $K_g = C_g - C_{su}$
- Normalisé à $K_g^* = \frac{K_g}{1+e_0}$



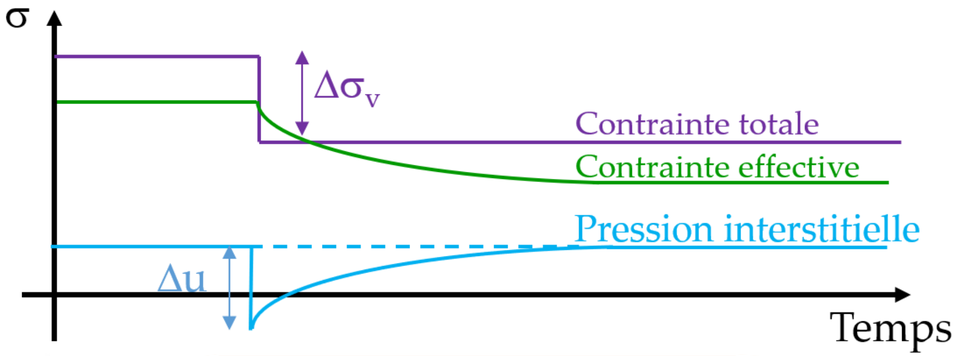
Technical paper: Twenty-one years of heave monitoring in London Clay at Horseferry Road basement | Ground Engineering (geplus.co.uk)

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

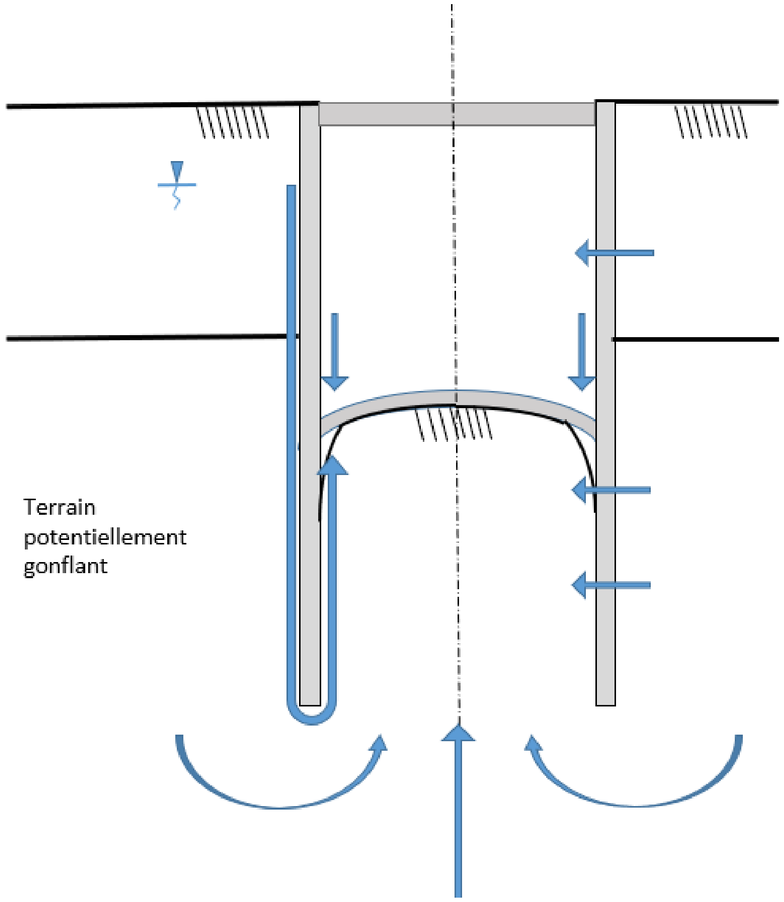
Applications aux radiers et tunnels

Principes

- Consolidation inversée = « déconsolidation »
- Coefficient de déconsolidation verticale $c_{vg} = \frac{k_V \, E_{oedo}}{\gamma_w}$
- Cinématique compliquée à utiliser car :
  - Augmentation de la fissuration lors du déchargement
  - Ouvrage non étanche (joints, apport d'eau, fuite)
  - Effet d'échelle (perméabilité, niveau de déformation)
- Amplitude finale dimensionnante



σ = σ' + u

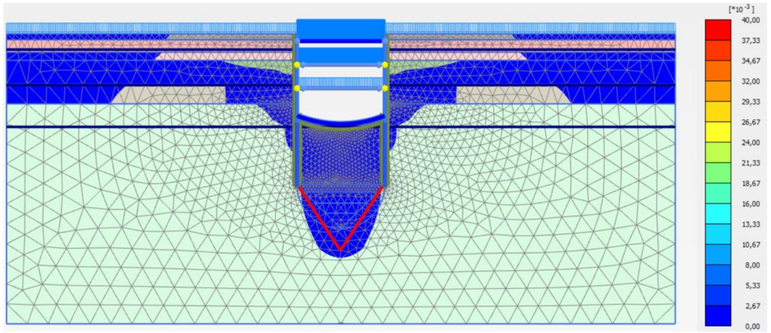


Restitution du GT gonflement des terrains argileux

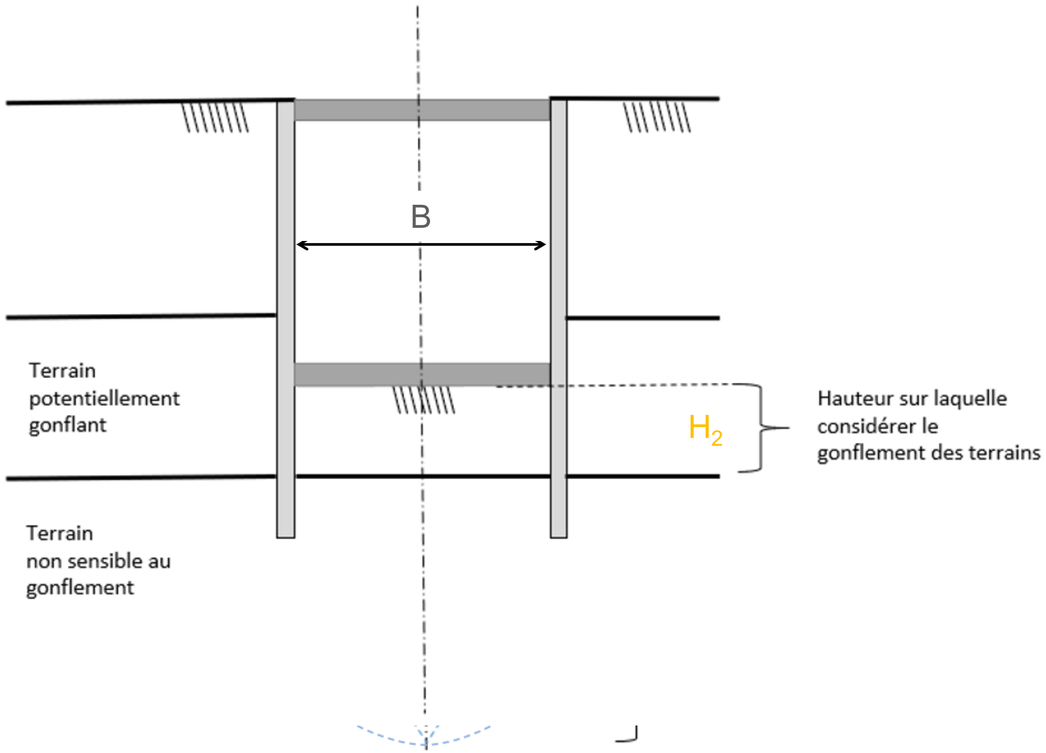
Applications aux radiers et tunnels

Géométrie zone gonflante

- Amplitude du gonflement liée à l'épaisseur de sol gonflant :
  - H_1 < 1 m : effet négligeable (ou purge de H_1)
  - H_2 < fiche : zone gonflante = B x H_2
  - H_3 > fiche : zone gonflante limitée à 3 V / 2 H_3 en forme elliptique ou par simplification conique
- Calculs numériques (déformations volumiques positives)



- Extension limitée si :
  - Le cône intercepte une couche non gonflante
  - On ancre le fond de fouille (frettage)



Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

Radiers : Méthodologie REX

Choix de conception

Méthodes de calculs

Tunnels

Radier dimensionné structurellement pour reprendre les charges

- Si la pression de gonflement est modéré (jusqu'à $s'_{vg} < 100$ kPa)
- Possibilité de contre-voûter la forme du radier

Pression de contact totale

=

Pression de gonflement s'_{vg}

+

Pression interstitielle u_w

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

Radiers : Méthodologie REX

Choix de conception

Méthodes de calculs

Tunnels

Radier « flottant »

- Radier dissocié de l'enceinte de fondation (Terminal méthanier de Dunkerque, bassin Calais Vadez)
- Clavage tardif après une période de stabilisation (bassin Ganay)

Pression de contact totale

=

Pression de gonflement partielle % (s'_{vg})

+

Pression interstitielle u_w

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

Radiers : Méthodologie REX

Choix de conception

Méthodes de calculs

Tunnels

Radier sur vide sanitaire

Mise en place d'un vide pour que le radier porte sur les parois :

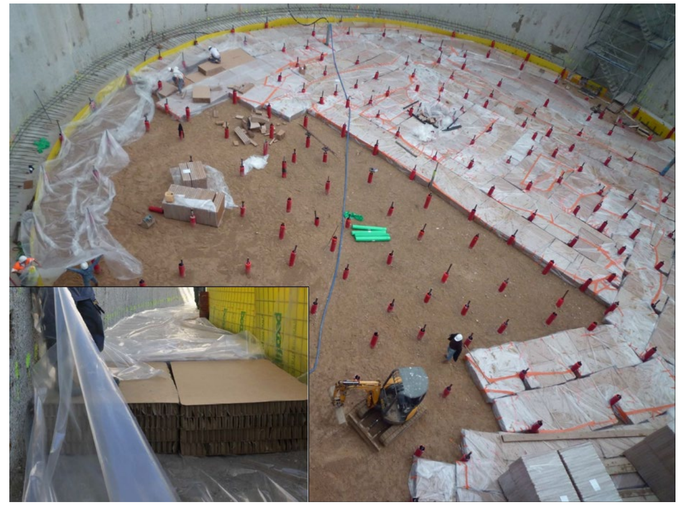
- Coffrage perdu dégradable (Biocofra® ou équivalent)
- Coffrage perdu non dégradable
  - Tabourets plastiques (Maison-Blanche - L14S)
  - Cellules creuses en polystyrène (OA Jean Prouvé - L14S)
- Lit de sable (Arcueil-Cachan - L15S) retiré après prise du radier

Pression de contact totale

=

u_W

Amplitude du soulèvement à déterminer



Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

Radiers : Méthodologie REX

Choix de conception

Méthodes de calculs

Tunnels

Radier sur matériau compressible (métro du Caire, L15S T2)

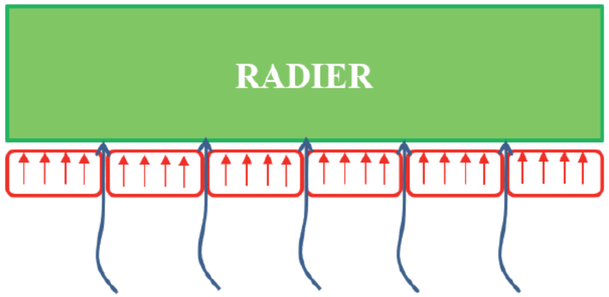
- Écrasement d'un matériau fusible (polystyrène quasi-imperméable)
- Les détails sont fournis en annexe 4 des recommandations
- Limiter la déformation du polystyrène à 10-25% de déformation (fluage gazeux sinon)
- Classe de polystyrène (NF EN 13163) en fonction de u_w et de G + Q (poids du radier + surcharges + 20 kPa forfaitairement)

Pression de contact totale

=

max (palier plastique polyst. ; u_w)

Amplitude du soulèvement à déterminer



Radiers : Méthodologie REX

Choix de conception

Méthodes de calculs

Tunnels

Autres solutions

- Radier ancré : renforcé par des ancrages
- Radier drainant (permet de diminuer la pression de contact sous le radier)

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

Radiers : Méthodologie REX

Choix de conception

Méthodes de calculs

Tunnels

Méthodes de calculs

Tableaux - guides

			Résistant aux sous-pressions	Drainant ou évents	Méthode de calcul
Radier avec ou sans ancrages	sur sol	flottant	-	-	1 ou 4
		résistant	pression de gonflement f(δ) + pression d'eau	pression de gonflement f(δ)	1, 3 ou 4
	sur vide sanitaire	avec coffrage dégradable	pression d'eau	-	1 (voire 4)
		avec coffrage non dégradable			
		avec lit de sable ou similaire			
	sur matériau fusible (polystyrène ou couche naturelle compressible)		max (limite élastique polystyrène ; pression d'eau)	limite élastique polystyrène	2 ou 4

Commentaires :

(1) f(δ) signifie que la pression de contact effective tient compte du déplacement δ du radier (prise en compte de l'interaction sol/ structure) ;

(2) une pression de gonflement est une contrainte effective. Dans le cas d'un vide sanitaire, cette pression de gonflement n'est pas à appliquer sur le radier, mais la pression de l'eau s'applique sauf en présence d'évents ;

(3) les dispositifs doivent être correctement dimensionnés (épaisseur suffisante du vide sanitaire, etc.) ;

(4) le radier doit aussi être dimensionné vis-à-vis des charges verticales descendantes : poids propre, etc.

Méthode		Type	Appellations
1		Analytique et numérique	Soulèvement libre (cf. §5.9.2 et 5.9.3)
2		Analytique et numérique	(cf. §5.9.4)
3	3A	Semi-analytique	Application itérative de la loi de comportement œdométrique (cf. §5.9.5.2.1)
	3B		Calcul avec des ressorts indépendants (cf. §5.9.5.2.2)
	3C		Modèles des ressorts interdépendants (cf. §5.9.5.2.3)
4	4A	Numérique	Calculs en déconsolidation - succion (cf. §5.9.5.3.1)
	4B		Calculs en déformation volumique imposée (cf. §5.9.5.3.2)

« COMPLEXITÉ CROISSANTE »

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

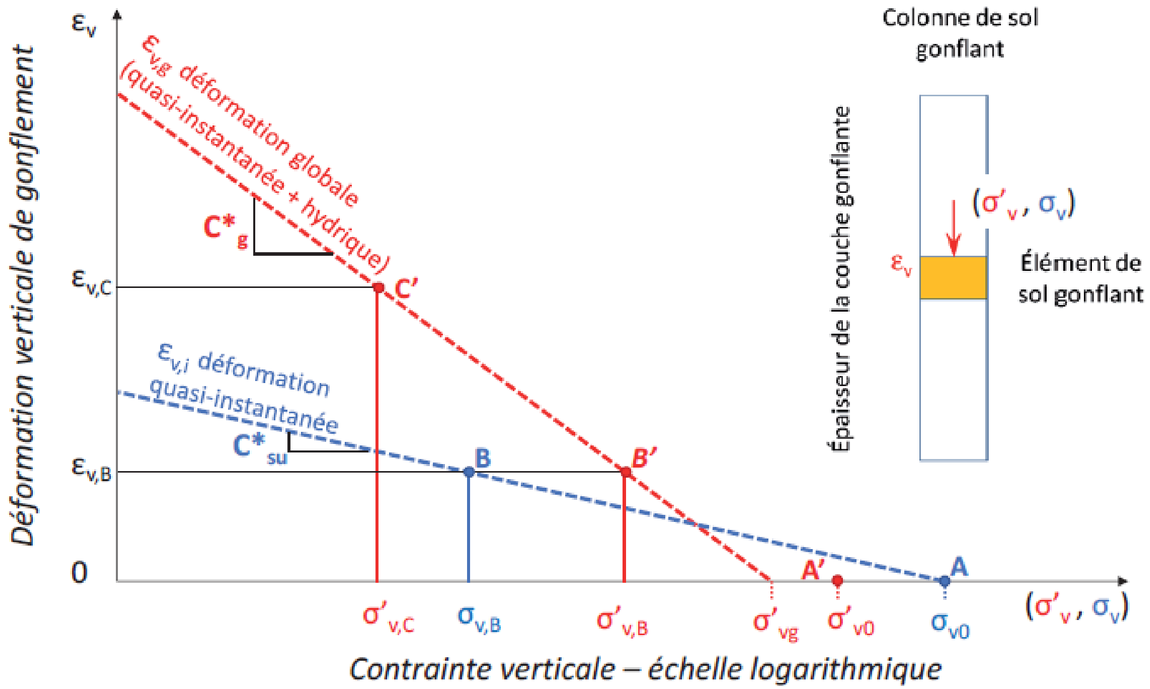
Radiers : Méthodologie REX

Choix de conception

Méthodes de calculs

Tunnels

Principes de base



$$\varepsilon_{v,g} - \varepsilon_{v,i} = - C^*_g \, lg \, \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vg}} + C^*_{su} \, lg \, \frac{\sigma_v}{\sigma_{v0}}$$

$$\varepsilon_{v,g} - \varepsilon_{v,i} \approx - K^*_g \, lg \, \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vg}}$$

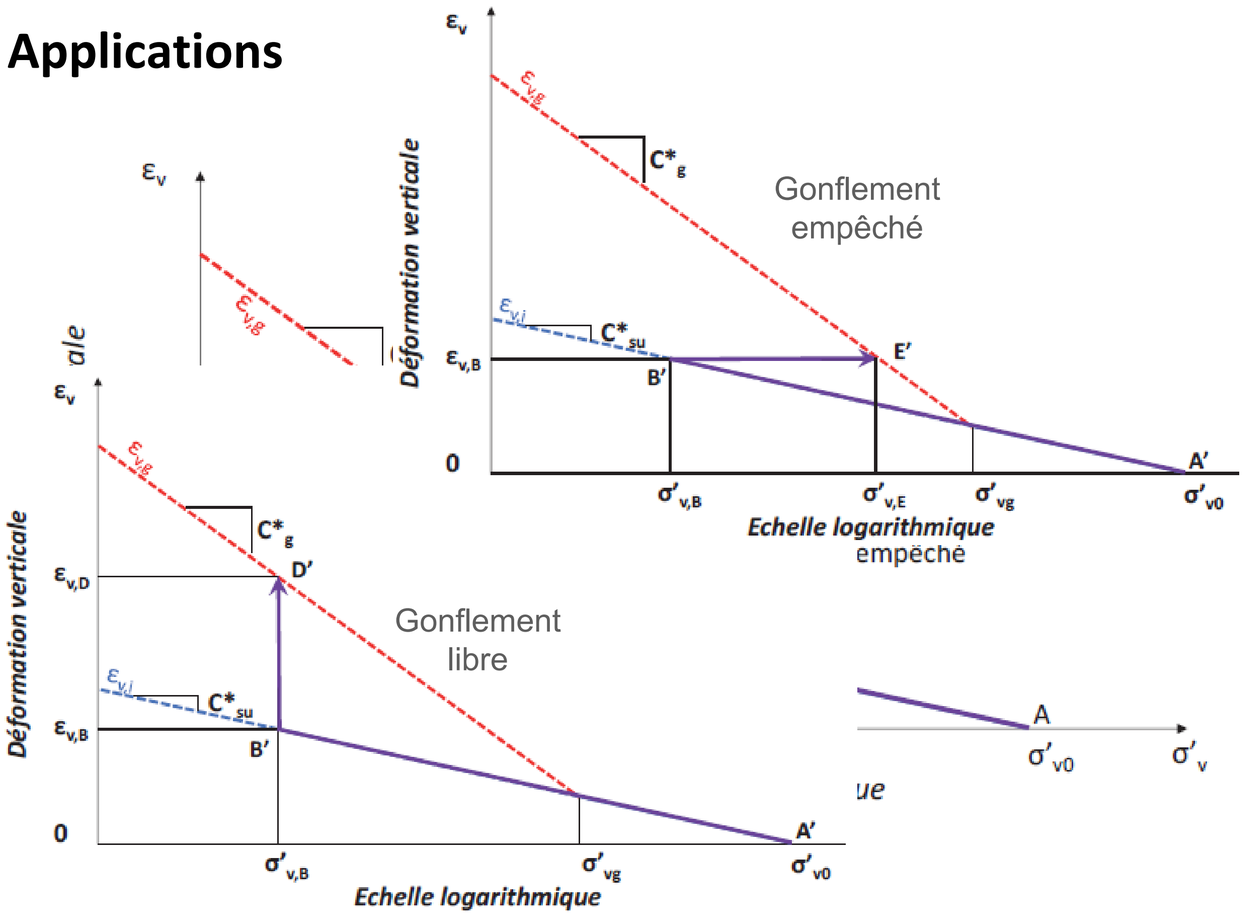
- Ne considérer que la part « hydrique » du gonflement
- $\sigma < \sigma'$ en cas de succion
- Prépondérance C^*_g par rapport à C^*_{su}

Simplification en contraintes effectives → σ'

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

Applications



$$\varepsilon_{v,g} - \varepsilon_{v,i} = - C^*_g \, lg \, \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vg}} + C^*_{su} \, lg \, \frac{\sigma_v}{\sigma_{v0}}$$

$$\varepsilon_{v,g} - \varepsilon_{v,i} \approx - K^*_g \, lg \, \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vg}}$$

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

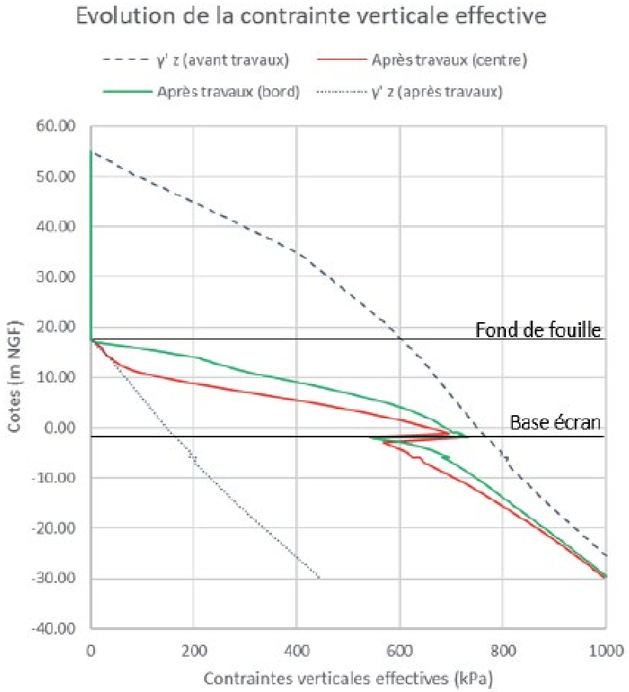
Applications aux radiers et tunnels

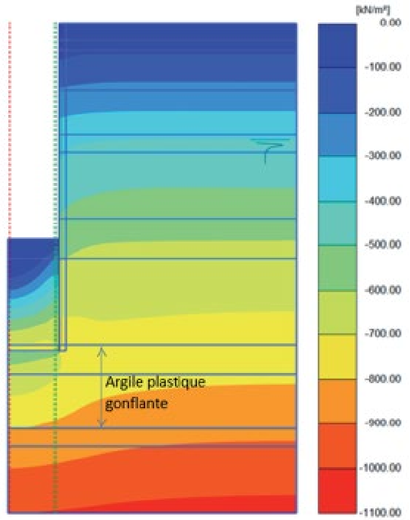
Méthode 1A – Soulèvement libre (analytique)

- Diffusion des contraintes
- Effet d'accrochage des parois moulées

$$\varepsilon_{v,g} - \varepsilon_{v,i} = - C^*_g \, lg \, \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vg}} + C^*_{su} \, lg \, \frac{\sigma_v}{\sigma_{v0}}$$

$$\varepsilon_{v,g} - \varepsilon_{v,i} \approx - K^*_g \, lg \, \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vg}}$$





Restitution du GT gonflement des terrains argileux

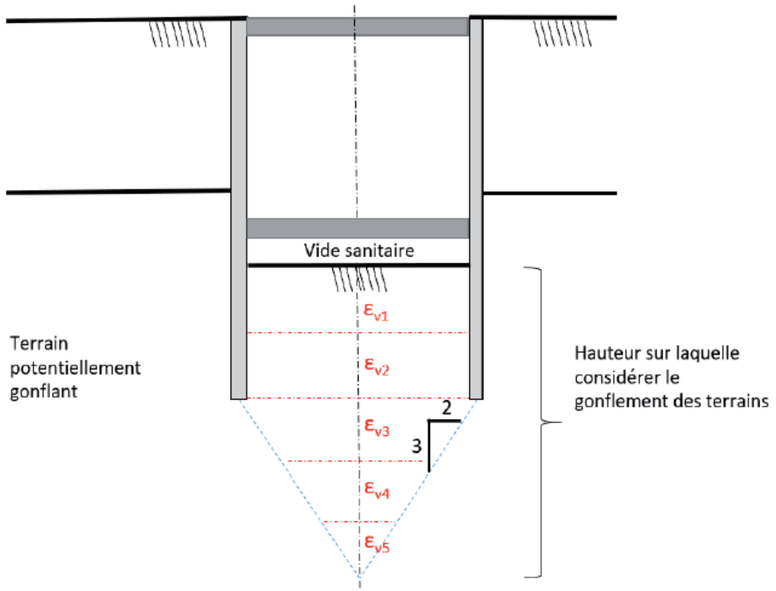
Applications aux radiers et tunnels

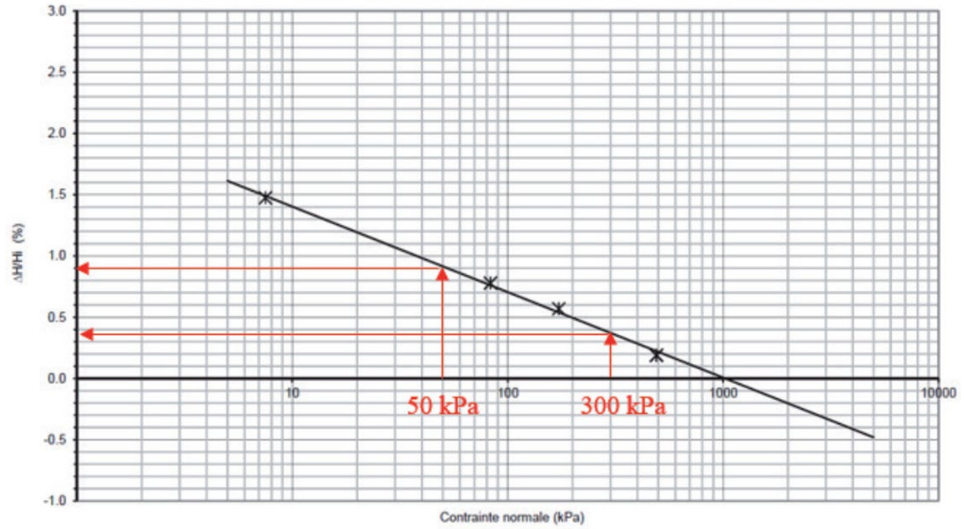
Méthode 1B – Soulèment libre (numérique)

- ε_V à imposer
- 5 subdivisions proposées (épaisseur H/5)
- Déformation volumique à lire sur les courbes œdométriques (essais en //)

$$\varepsilon_{v,g} - \varepsilon_{v,i} = - C^*_g \, lg \, \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vg}} + C^*_{su} \, lg \, \frac{\sigma_v}{\sigma_{v0}}$$

$$\varepsilon_{v,g} - \varepsilon_{v,i} \approx - K^*_g \, lg \, \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vg}}$$





Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

Méthode 2 – matériau fusible (cf. annexe 4)

- Norme NF EN 13163 (Mars 2015 + mendement A2)

Type	Contrainte en compression à 10% de déformation (kPa)	Résistance à la flexion minimale (kPa)
EPS S	-	50
EPS 30	30	50
EPS 50	50	75
EPS 60	60	100
EPS 70	70	115
EPS 80	80	123
EPS 90	90	135
EPS 100	100	150
EPS 120	120	170
EPS 150	150	200
EPS 200	200	250
EPS 250	250	350
EPS 300	300	450
EPS 350	350	525
EPS 400	400	600
EPS 500	500	750

$$\varepsilon_{v,g} - \varepsilon_{v,i} = - C^*_g \, lg \, \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vg}} + C^*_{su} \, lg \, \frac{\sigma_v}{\sigma_{v0}}$$

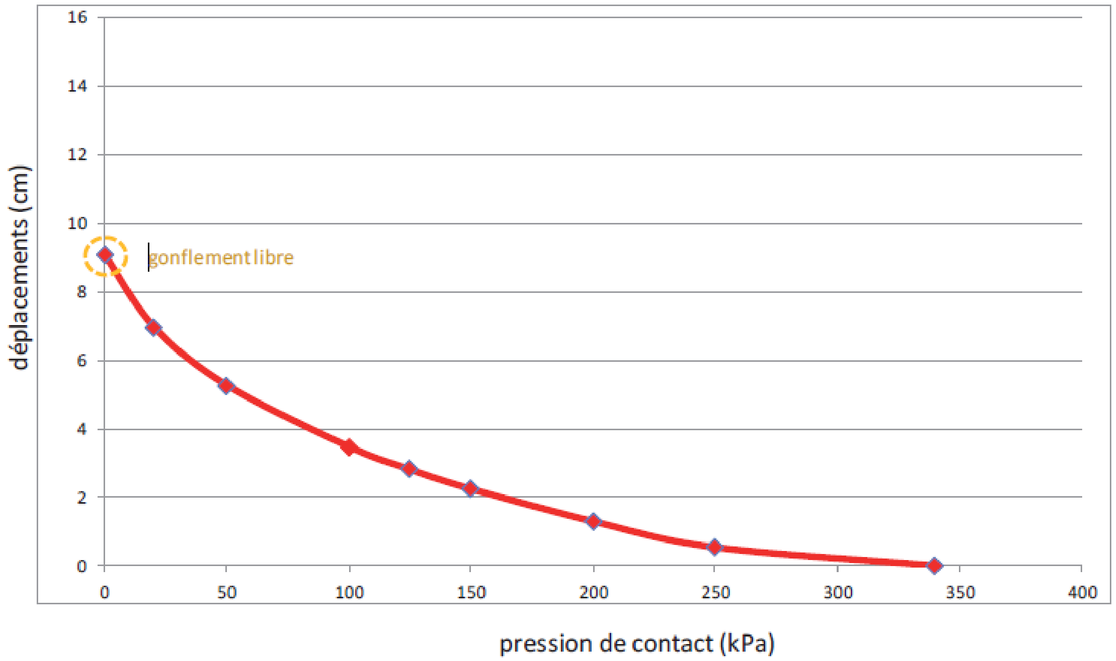
$$\varepsilon_{v,g} - \varepsilon_{v,i} \approx - K^*_g \, lg \, \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vg}}$$

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

Méthode 3 – Méthodes ISS semi-analytiques

- Méthode 3A – itération sur la loi œdométrique



$$\varepsilon_{v,g} - \varepsilon_{v,i} = - C^*_g \, lg \, \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vg}} + C^*_{su} \, lg \, \frac{\sigma_v}{\sigma_{v0}}$$

$$\varepsilon_{v,g} - \varepsilon_{v,i} \approx - K^*_g \, lg \, \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vg}}$$

- Si pas de soulèvement, pression contact = 340 kPa
- Si soulèvement de 2 cm, pression contact = 170 kPa
- Si soulèvement libre, pression contact = 0 kPa
- Itération avec le modèle structure

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

Radiers : Méthodologie REX

Choix de conception

Méthodes de calculs

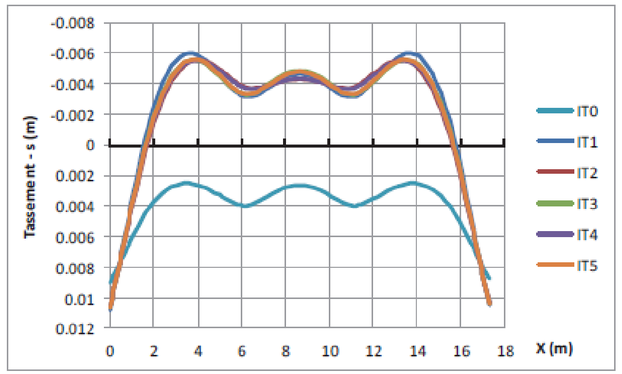
Tunnels

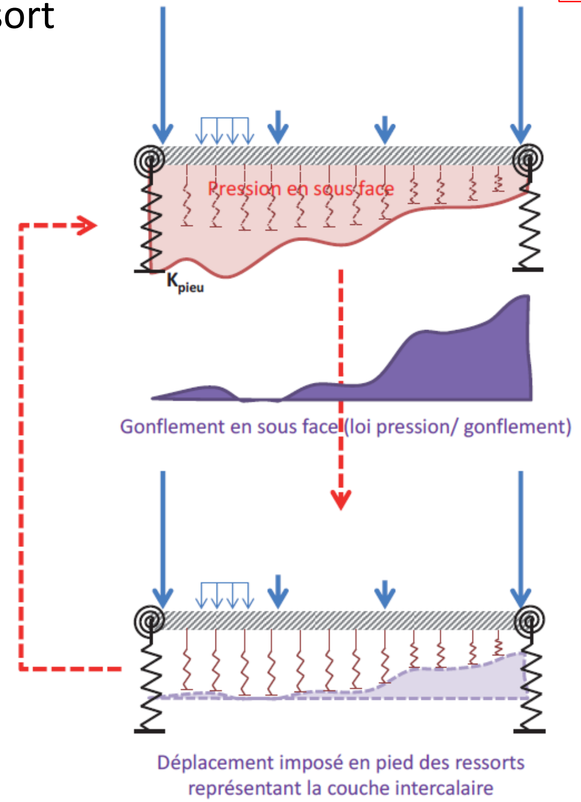
Méthode 3 - Méthodes ISS semi-analytiques

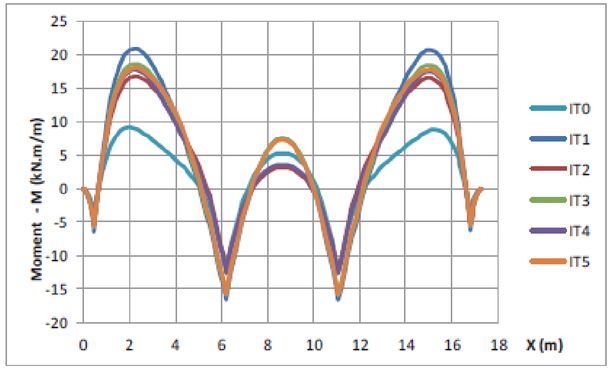
- Méthode 3B et 3C – modèles sur ressort
- Méthode en déplacement (itératif)

$$\varepsilon_{v,g} - \varepsilon_{v,i} = - C^*_g \, lg \, \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vg}} + C^*_{su} \, lg \, \frac{\sigma_v}{\sigma_{v0}}$$

$$\varepsilon_{v,g} - \varepsilon_{v,i} \approx - K^*_g \, lg \, \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vg}}$$







Restitution du GT gonflement des terrains argileux

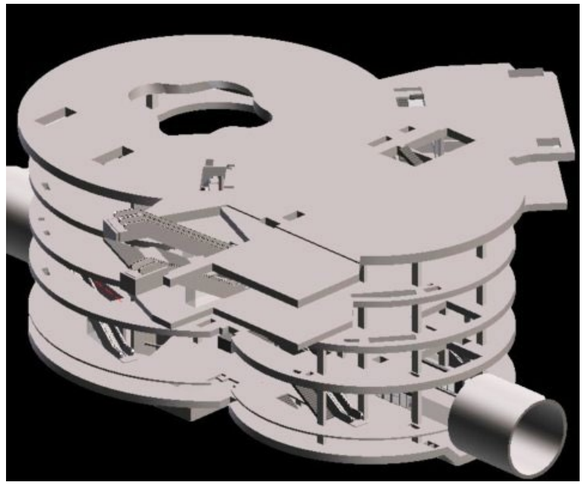
Applications aux radiers et tunnels

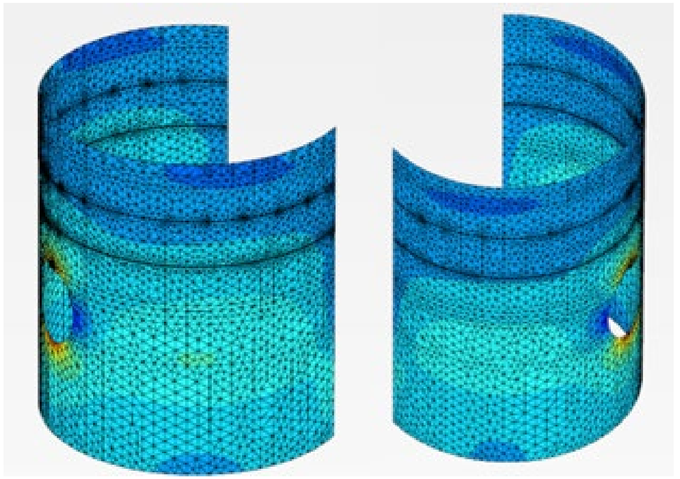
Méthode 4 - Méthodes ISS numériques

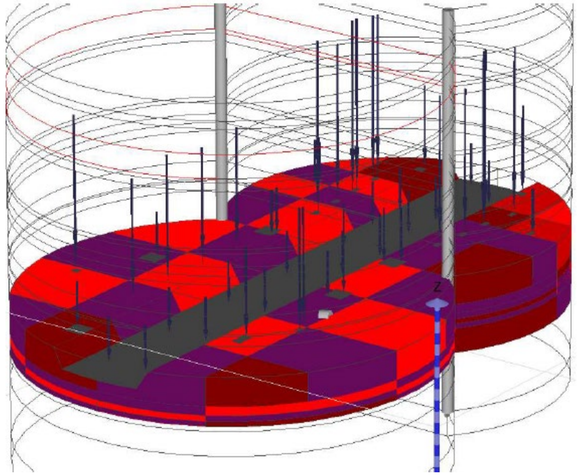
$$\varepsilon_{v,g} - \varepsilon_{v,i} = - C^*_g \, lg \, \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vg}} + C^*_{su} \, lg \, \frac{\sigma_v}{\sigma_{v0}}$$

$$\varepsilon_{v,g} - \varepsilon_{v,i} \approx - K^*_g \, lg \, \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vg}}$$

- Méthode 4A (succion) et 4B (déformations aux points de Gauss)
- *Dimensionnement d'un radier profond sur sol gonflant – cas pratique sur la gare de Clichy-Montfermeil à Paris* (Palisse et al., AFTES 2023)
- *Algorithme pour la simulation des mécanismes de gonflement des argiles en éléments finis* (Cahn et al., JNGG 2022)
- Thèse de Missom Ouedraogo (2024)







Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

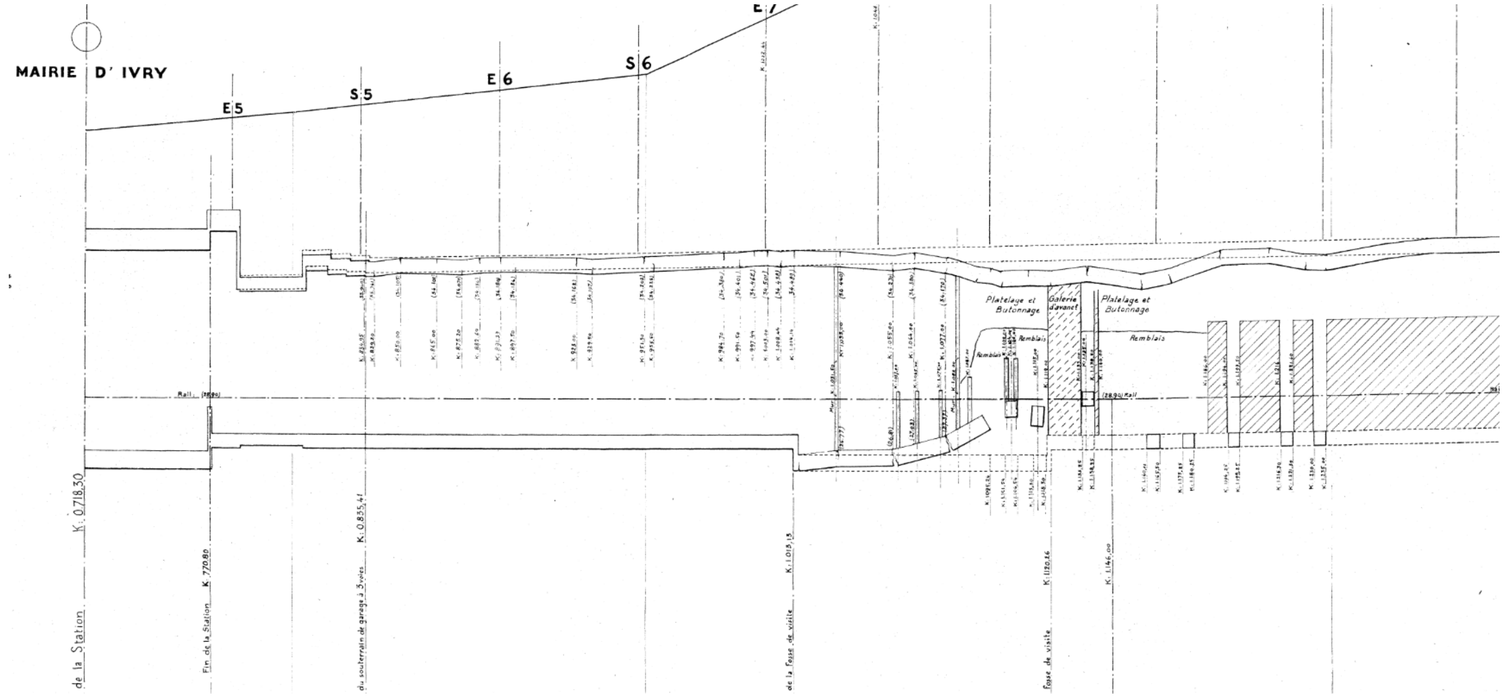
Radiers : Méthodologie REX

Choix de conception

Méthodes de calculs

Tunnels

Tunnels - REX



Voie de garage tunnel ligne 7 (Mairie d'Ivry, RATP, France, 1937-1939) dans les Argiles plastiques : rupture du radier

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

Radiers : Méthodologie REX

Choix de conception

Méthodes de calculs

Tunnels

Méthodes de calculs

- Gonflement localisé au niveau des radiers
- Vitesse variable qui dépend de la perméabilité des terrains mais aussi de la taille du tunnel et de la méthode d'excavation
- Les creusements au tunnelier sont moins problématiques que les creusements par méthode conventionnelle
- Guide AFTES GT7 (1976) « Réflexions sur les méthodes de calcul du revêtement des souterrains » indique que « *les mesures de contraintes dans les ouvrages anciens montrent que les charges s'accroissent lentement avec le temps jusqu'à atteindre sensiblement les charges géostatiques initiales* »
- 3 méthodes :
  - Application directe de la pression de gonflement (méthode simplifiée sans ISS)
  - Méthode basée sur la convergence-confinement
  - Méthode éléments finis (déformation volumique ou loi de comportement spécifique)

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

Méthode de convergence-confinement

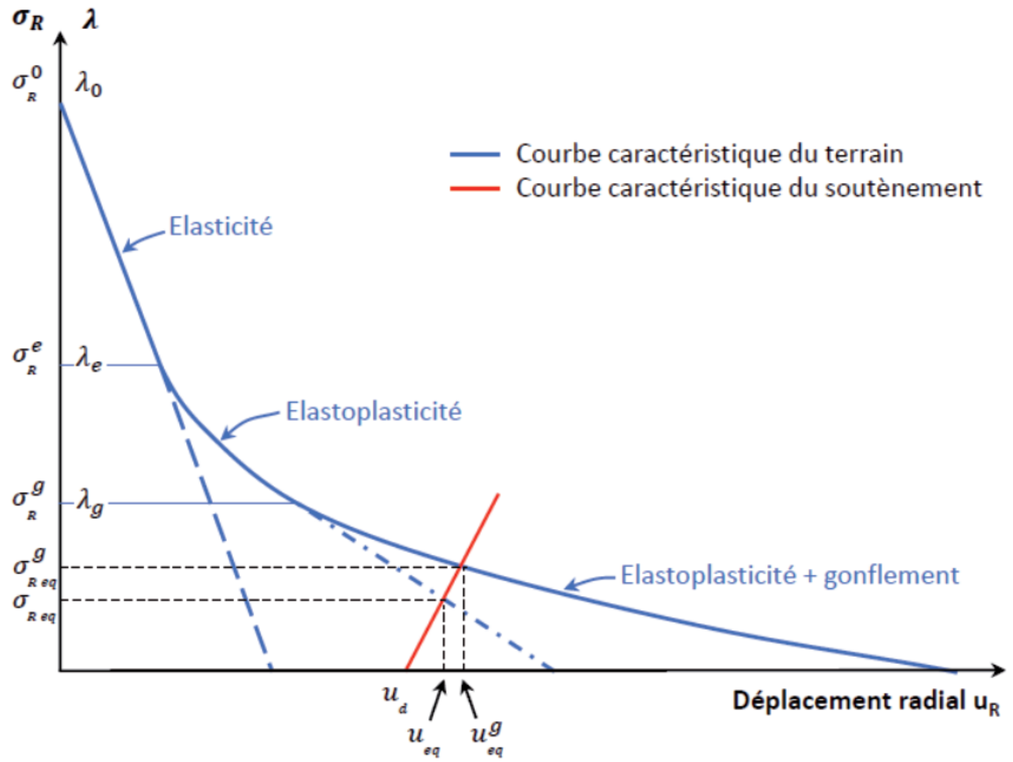


Figure 43 : Courbe convergence-confinement avec prise en compte du gonflement (Bultel, 2001)

Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

Radiers : Méthodologie REX

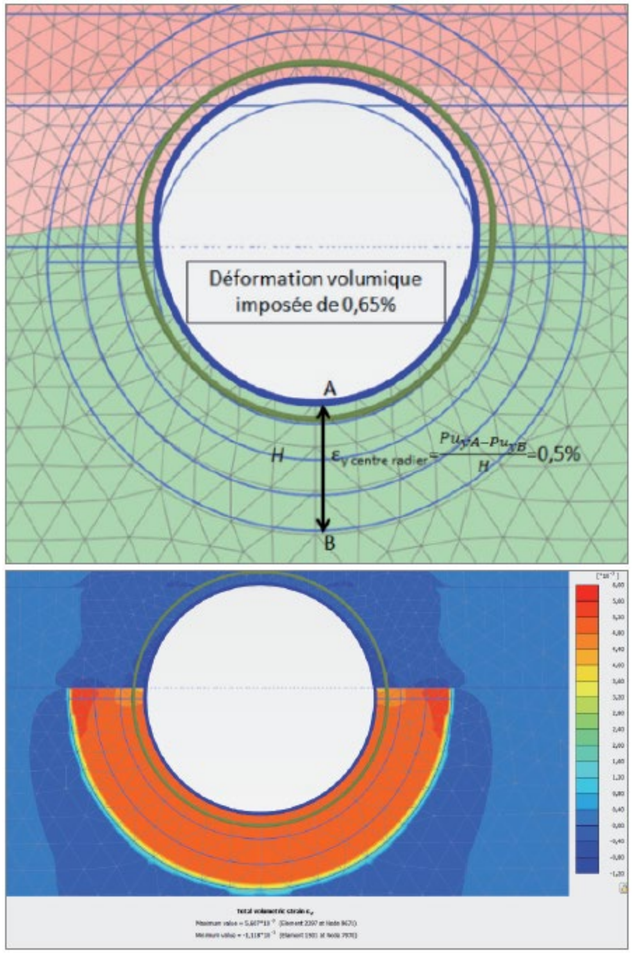
Choix de conception

Méthodes de calculs

Tunnels

Méthodes numériques

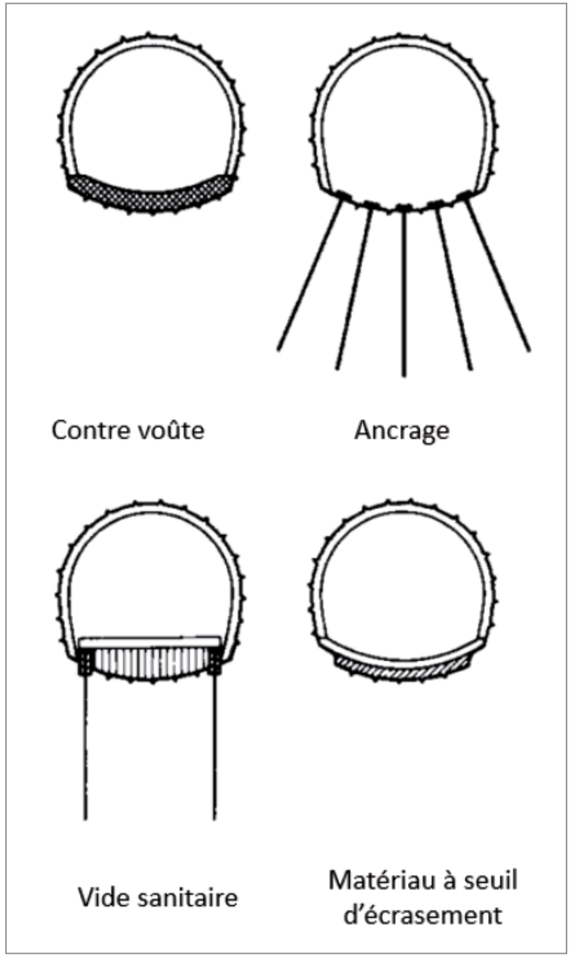
- Similitudes avec les méthodes de calculs des radiers
- Application sur le tunnel ferroviaire de Lambesc (LGV Méditerranée)
- Zone de gonflement à choisir entre :
  - Rayon plastique
  - Déformation volumique positive
  - Contrainte < σ'_g
  - Discrétisation à envisager
- Lois intégrées dans les logiciels (exemple « Swelling Rock Model »)



Restitution du GT gonflement des terrains argileux

Applications aux radiers et tunnels

Dispositions constructives



cfms
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

CONCLUSIONS : RECOMMANDATIONS A LIRE !

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

gregory.meyer@egis-group.com