



Prise en compte du gonflement des  
terrains argileux pour le  
dimensionnement des ouvrages  
d'infrastructure



**Journée technique et scientifique CFMR - CFMS  
« Microstructures des géomatériaux argileux –  
conséquences pour l'ingénieur »**

## Mise en place en 2016 d'un groupe de travail au sein du CFMS

Réflexion de la Commission Technique début 2016 : dans le cadre des études liées au projet du Grand Paris Express, mise en évidence de divergences d'interprétation parmi les maîtrises d'œuvre quant à la prise en compte des pressions de gonflement de certaines formations (Argile Plastique notamment) pour le dimensionnement des ouvrages en interface avec ces terrains

### Problématiques concernant :

- Les soutènements verticaux
- Les radiers des gares, stations et ouvrages annexes
- Les tunnels
- Les pieux

Historique du groupe de travail

## Objectifs du groupe de travail :

- Elaboration de recommandations pour le dimensionnement des ouvrages de génie civil en interaction avec des sols gonflants
- Le champ d'action du groupe de travail concerne les ouvrages enterrés de taille significative. Il exclut la problématique retrait/gonflement sous maisons individuelles

Sont écartés de la recommandation :

- Les argiles à grande profondeur comme la couche argileuse du Callovo-Oxfordien (Cigeo), ou encore l'argile de Boom.
- Les terrains potentiellement gonflants de type gypse, anhydrites, schistes cartons, remblais/scories avec chaux



## Structure de la recommandation :

- Définition du problème, terrains concernés (qu'est ce qu'un terrain gonflant ?)
  
- Caractérisation des propriétés des terrains gonflants (domaine d'application des essais, prélèvement et conservation des échantillons) : Quels liens entre le phénomène et les essais d'identification classiques ?
  
- Pour chaque type d'ouvrage :
  - REX, pathologies observées
  - Les différentes méthodes de calcul pouvant être utilisées pour la prise en compte de l'effet d'un potentiel gonflement
  - Dispositions constructives



## Qu'est ce que le gonflement des terrains argileux ?

Terme générique qui regroupe les différents phénomènes suivants :

- **mécanique** : résulte d'un déchargement ou de la détente élastique après une excavation, sans apport d'eau, phénomène court terme
- **hydrique** : imbibition ou humidification, par apport différé d'eau, phénomène long terme,
- **chimique** : formation d'Ettringite par exemple

Le gonflement (mécanique ou hydrique) se traduit par une augmentation du volume du sol ou un accroissement des pressions régnant dans le milieu selon que le massif peut se déformer ou non



Les terrains concernés  
(liste non exhaustive...) :

En région Parisienne :

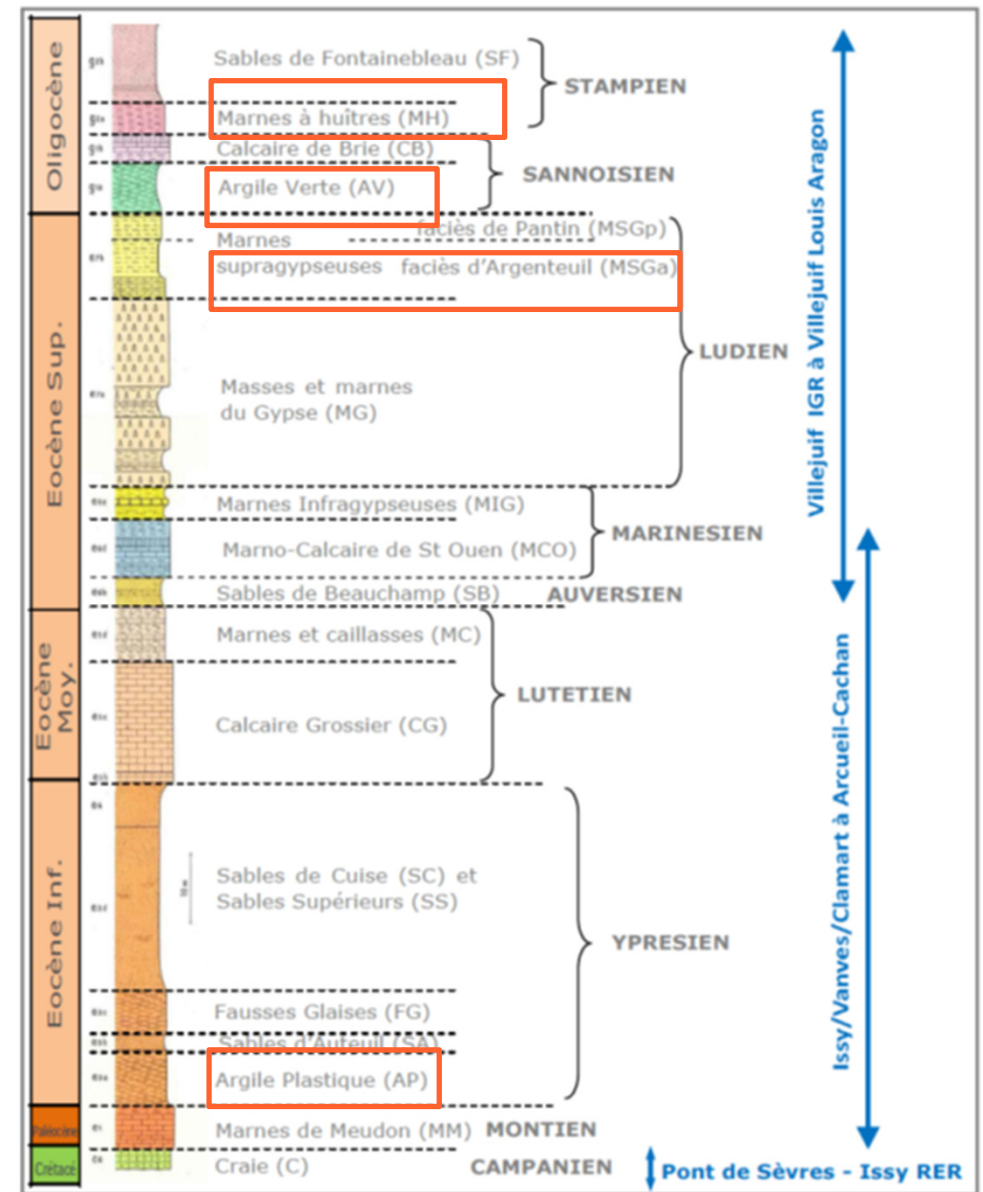
- Marnes à Huitres
- Marnes d'Argenteuil
- Argile Verte
- Argile Plastique

Dans le Nord :

- Argile de Flandres, etc..

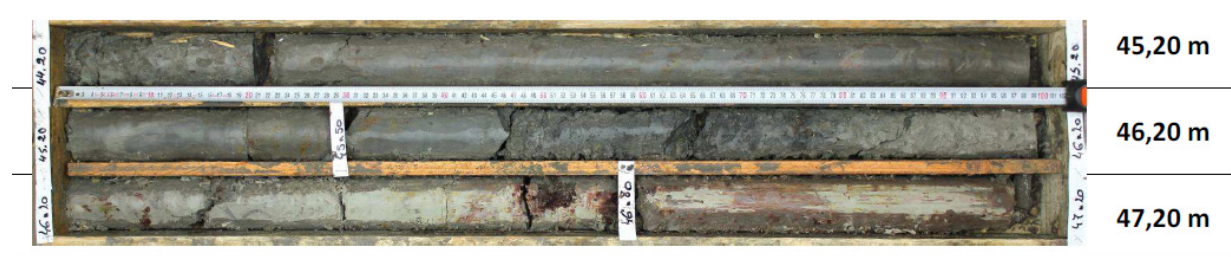
Sud : Stampien Marseillais

Terrains concernés



## Caractérisation des propriétés des terrains gonflants :

- Caractérisation des terrains gonflants : essentiellement au moyen d'essais de laboratoire réalisés à partir de prélèvement représentatifs.
- Beaucoup de données utiles à la caractérisation des terrains gonflants s'obtiennent au moyen d'essais conventionnels (identification en particulier)
- Sur le plan mécanique, seules quelques méthodes d'essais sont en usage courant, qui se fondent essentiellement sur l'emploi d'un œdomètre
- Par contre, les procédures, leurs variantes ou les modalités particulières d'application de ces méthodes sont nombreuses



Carotte d'Argile Plastique

Caractérisation et essais

## Données générales communes :

- Description visuelle : appartenance à une formation géologique
- La connaissance des propriétés physiques est indispensable : argilosité du sol ou son activité (lien étroit avec l'amplitude des gonflement)
- analyses chimiques et physico-chimiques : teneurs en smectites ou teneurs en carbonate constituent des révélateurs ou des modérateurs du gonflement
- mesures des caractéristiques d'état : teneurs en eau, densités, degrés de saturation (définissent l'état du sol )





## Prélèvement et conservation

- La qualité des mesures dépend énormément de la qualité :
  - du prélèvement du terrain
  - du conditionnement de l'échantillon,
  - de son transport et de sa conservation
  - de l'ouverture en laboratoire et de l'extraction des éprouvettes pour les placer dans les cellules d'essais.
  
- Les terrains gonflants sont argileux et structurés à des degrés divers et souvent fissurés. Ils sont sensibles aux apports d'eau, au dessèchement et surtout au déconfinement



## Prélèvement et conservation

### Recommandations :

- Prélever les échantillons au carottier double ou triple, dans un diamètre de l'ordre de 100 mm
- Diamètre des blocs compris entre 20 et 30 cm
- Conditionnement enveloppant le sol dans un film en plastique souple, puis dans une toile inextensible et un enrobage complet de paraffine
- Délai le plus court possible à satisfaire entre le prélèvement et le conditionnement sur site, le transport au labo et la réalisation des essais



## Les essais courants à l'oedomètre

### Par paliers successifs (adaptation du mode opératoire de Huder et Amberg)

- 1) une éprouvette est découpée dans un échantillon,
- 2) un cycle de chargement-déchargement-rechargement est appliqué par paliers successifs dans l'état naturel du terrain jusqu'à une contrainte axiale  $\sigma'_{amax}$  donnée ; les paliers sont définis en progression géométrique, en relation avec les contraintes en place,
- 3) l'éprouvette est mise en imbibition sous cette charge axiale, pour un suivi du gonflement pendant ce premier palier sous imbibition,
- 4) le suivi continue pendant les paliers de déchargement suivants sous imbibition,
- 5) la pente de gonflement se mesure par la différence des déformations entre les paliers de déchargement sous imbibition et les paliers de chargement ou de déchargement dans l'état naturel.



# Les essais courants à l'oedomètre

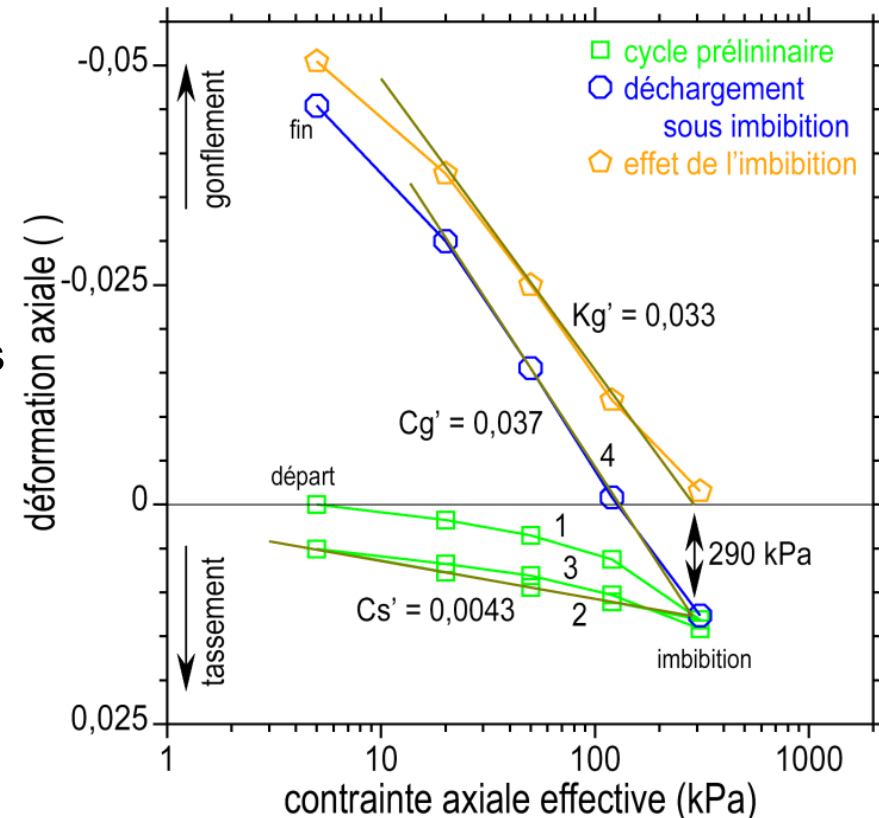
## Par paliers successifs (adaptation du mode opératoire de Huder et Amberg)

### Avantages :

- fournit une pente ( $K'_g$ ) et une pression de gonflement ( $\sigma'_{ag} = 290 \text{ kPa}$ ),
- met en œuvre une éprouvette, ce qui est un avantage dans les terrains hétérogènes

### Inconvénients :

- la durée des paliers est limitée,
- il y a interférence entre les paliers.



Exemple d'essai oedométrique de gonflement par paliers successifs et d'identification des paramètres  $C'_s$ ,  $C'_g$ ,  $K'_g$  et  $\sigma'_{ag}$ .

Essais par paliers succesifs

# Les essais courants à l'oedomètre

## En parallèle (Norme XP 94-091)

- 1) plusieurs éprouvettes sont découpées dans un échantillon homogène,
- 2) elles sont chargées (directement ou en un cycle préalable) dans leur état naturel sous des contraintes axiales définies en progression géométrique jusqu'à une contrainte axiale  $\sigma'_{amax}$  donnée, en relation avec les contraintes en place,
- 3) elles sont mises en imbibition sous ces différentes charges, pour un suivi du gonflement pendant ces paliers en parallèle sous imbibition,
- 4) la pente de gonflement se mesure directement à partir des déformations enregistrées sous imbibition



# Les essais courants à l'oedomètre

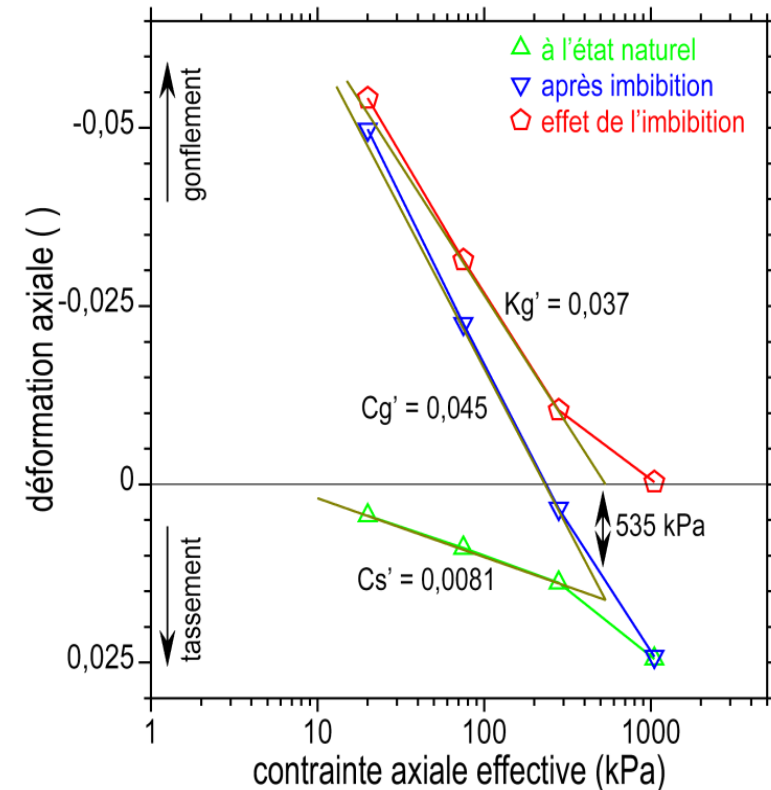
## En parallèle (Norme XP 94-091)

### Avantages :

- fournit une pente et une pression de gonflement,
- les gonflements sont mesurés sous des charges indépendantes (pas d'interférence entre les paliers),
- une durée plus grande peut être consacrée aux paliers de gonflement.

### Inconvénients :

- plusieurs éprouvettes,
- dispersion des gonflements dans les terrains hétérogènes.



Exemple d'essais oedométriques de gonflement en parallèle et d'identification des paramètres  $C'_s$ ,  $C'_g$ ,  $K'_g$  et  $\sigma'_{ag}$ .

## Les essais courants à l'oedomètre

### A volume constant (ASTM, BS, IRSM)

- 1) une éprouvette est découpée dans un échantillon,
- 2) elle est mise en imbibition,
- 3) la contrainte axiale est augmentée pour maintenir la déformation axiale à zéro (volume constant),
- 4) la "pression de gonflement"  $\sigma'_{ag}$  étant atteinte, l'essai se poursuit par des paliers de chargement et/ou déchargement sous imbibition.



## Les essais courants à l'oedomètre

### A volume constant (ASTM, BS, IRSM)

#### Avantages :

- fournit une pression de gonflement ,
- met en œuvre une éprouvette, ce qui est un avantage dans les terrains hétérogènes.

#### Inconvénients :

- pas de mesure de la pente de gonflement,
- imbibition sous charge nulle,
- forte rigidité requise du dispositif de chargement.





## Les essais courants à l'oedomètre

### Procédure de gonflement Libre

- 1) une éprouvette est découpée dans un échantillon,
- 2) elle est mise en imbibition,
- 3) la déformation axiale est enregistrée en fonction du temps,
- 4) l'essai se poursuit par des paliers de chargement sous imbibition (notamment pour ramener la déformation axiale à zéro)

### Procédure s'inscrivant dans la problématique sècheresse



## Les essais courants à l'oedomètre

# Procédure de gonflement Libre

### Avantages :

- met en œuvre une éprouvette, ce qui est un avantage dans les terrains hétérogènes.

### Inconvénients :

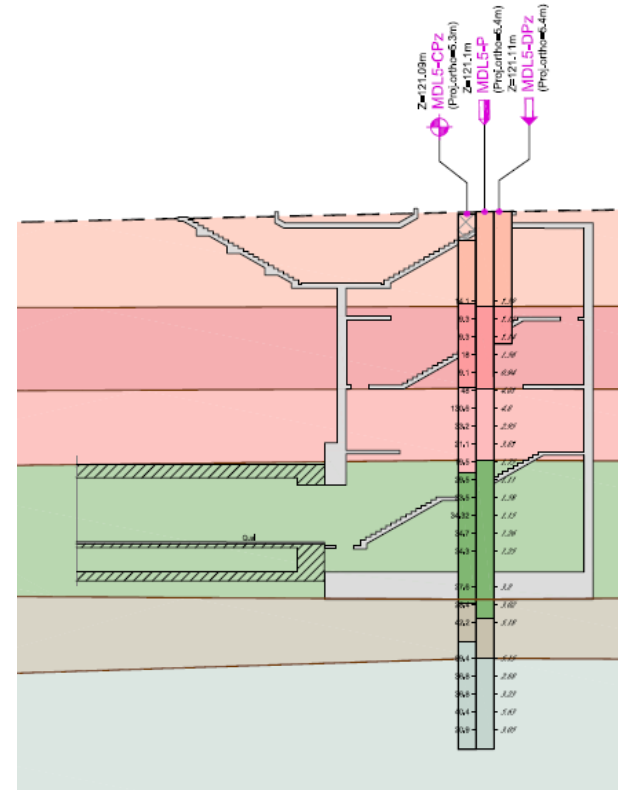
- ne fournit pas une pente ni une pression de gonflement,
- imbibition sous charge nulle.



# Les ouvrages de soutènement (parois moulée, etc.)



Puits d'essai à Arcueil dans les Argiles Plastiques (L15 sud)



Extension Station Mairie des Lilas (L11) dans les argiles vertes

Ouvrages de soutènement

## CAS DES SOUTÈNEMENTS

Norme Ecrans de soutènement NF P 94 282 1 :

« En règle générale, des actions particulières dues au gonflement du terrain ne sont à considérer que lorsque plusieurs conditions sont réunies :

- la présence d'une couche épaisse de sol pouvant « gonfler » fortement
- la présence d'eau »

Avis du GT : ce nota de la norme est discutable : est il vraiment nécessaire de prendre en compte une pression sur les écrans verticaux même en présence d'eau et d'argile ?...



Ouvrages de soutènement

## CAS DES SOUTÈNEMENTS

Constat :

- Le déchargement du terrain se produit (majoritairement) dans une direction horizontale et l'action sur l'ouvrage s'effectue également dans cette direction
- Analogie avec l'essai œdométrique non valable : le recours aux essais de gonflement œdométriques par paliers successifs ou parallèle ne suffit pas pour obtenir les paramètres nécessaires permettent pas de caractériser le phénomène de déchargement
- Pas (ou peu) de REX de pathologie sur écrans de soutènement liés au terrain gonflant



Ouvrages de soutènement

# CAS DES SOUTÈNEMENTS

## Sols saturés

- Pas d'hydratation des terrains
- L'incidence des éventuelles poussées de gonflement semble négligeable (absence de pathologie)
- **Avis GT** : il n'y a pas lieu d'appliquer des pressions horizontales de gonflement sur la paroi moulée. Cela vient bien sûr du fait que ces terrains sont saturés, mais aussi du fait que les phases de construction génèrent un déchargement horizontal de faible ampleur : le faible déconfinement change très peu l'état hydrique du sol
- Une approche « sécuritaire » pourrait être de prendre en compte une poussée à  $K_0$  à long terme (calcul ELS caractéristique ou ELU).

Ouvrages de soutènement

# CAS DES FONDATIONS PROFONDES DANS LES ARGILES GONFLANTES

- Peu de retour de pathologie
- Généralement non pris en compte pour le dimensionnement des pieux dans les projets français. Le ferrailage mini est toujours mis en place
  
- Peut être éventuellement pris en compte avec la procédure suivante :
  - calcul de la déformation libre du sol
  - Calcul de la sollicitation dans le pieu soumis à l'expansion de la couche



# Cas des radiers sur argiles gonflantes



Gares de la L15 sud du GPE : fond de fouille dans les Argiles Plastiques de l'Yprésien (Chatillon, Arcueil, Champigny, etc...)

Dunkerque Galerie  
Hydraulique puits de  
départ du tunnelier dans  
les Argiles de Flandres



Les radiers



# Cas des radiers sur argiles gonflantes

- Nombre important de pathologies relevées sur des radiers sur sols gonflants. (parking à Marseille dans les marnes du Stampien, Parking à Dunkerque dans les argiles de Flandres, etc...)
- Pathologies pouvant être amplifiées par différents phénomènes (difficulté / méthode de réalisation, apport d'eau)



# Cas des radiers sur argiles gonflantes :

## Les essais préconisés :

- caractérisation mécanique à l'aide d'essais œdométriques : analogie avec le gonflement des terrains sous les radiers de fouilles (la composante principale du déchargement mécanique et l'apport d'eau s'opèrent dans la direction verticale)
- déformations horizontales contenues, comme par exemple le cas des fiches de paroi moulée
- **Les essais de gonflement par paliers successifs ou en parallèle** fournissent les paramètres d'une loi empirique logarithmique donnant la déformation volumique du sol en fonction de la contrainte axiale

Les radiers

# Cas des radiers sur argiles gonflantes

## Méthodes de calcul :

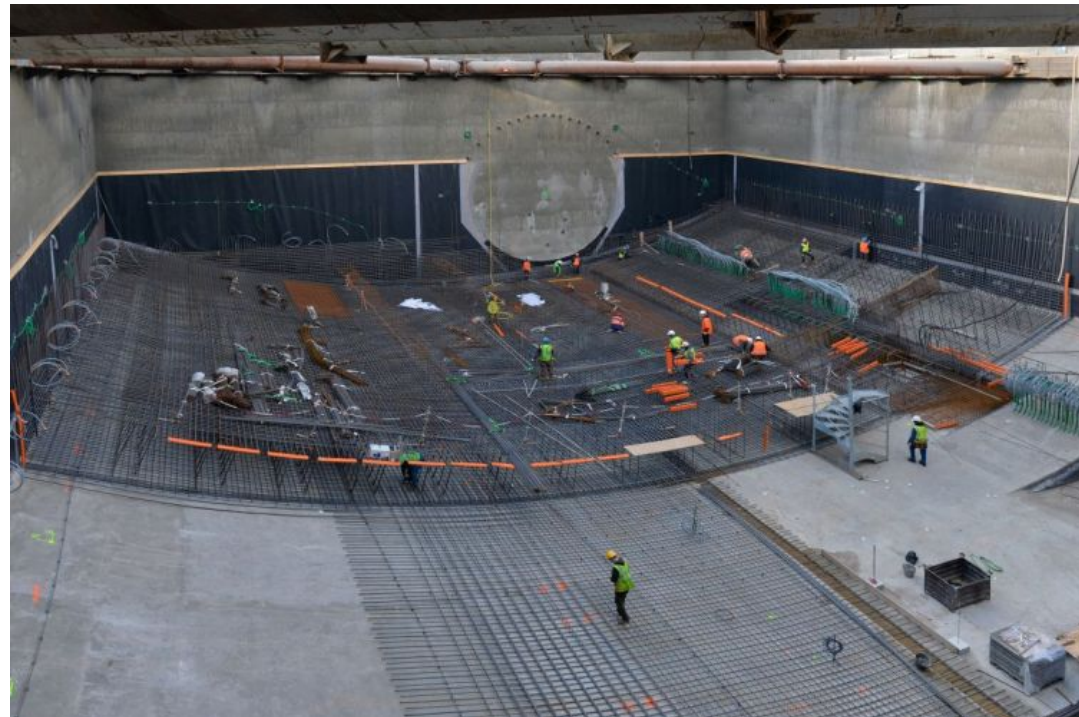
- Les problèmes de radier sur argiles gonflantes concernent en général les argiles surconsolidées, où la contrainte effective verticale  $\sigma'_v$  est proche de l'horizontale  $\sigma'_h$ . Les travaux d'excavation provoquent une libération des contraintes ( $\sigma'_v$ ) et un soulèvement du fond de fouille.
- En cas d'apport d'eau, le déchargement des argiles saturées provoque un phénomène de déconsolidation, à l'inverse de la consolidation lors d'un remblaiement. La déconsolidation suit la pente œdométrique  $C_s$  et se produit sur un intervalle de temps fonction du coefficient de déconsolidation vertical  $C'_v$ .



# Cas des radiers sur argiles gonflantes

## Dispositions constructives

1. Dimensionner le radier pour **reprandre les contraintes** liées au gonflement attendu : ferrailage adéquat, forme (contre voûte)

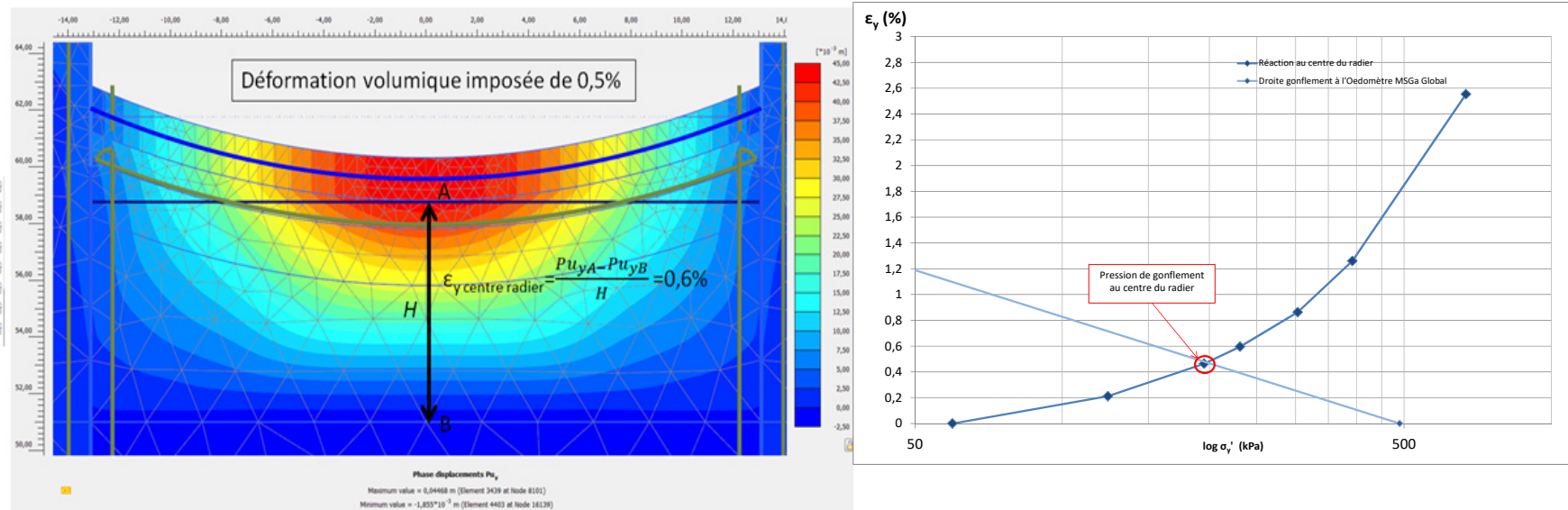


Les radiers

# Cas des radiers sur argiles gonflantes

Principe de dimensionnement proposé pour reprendre la pression de gonflement :

- Déterminer la pression due au gonflement sur la sous face du radier en tenant compte de la variation du volume du terrain consécutive à son soulèvement.
- La pression appliquée sur le radier est déterminée en comparant les résultats de modélisations éléments finis aux essais de laboratoires disponibles : pression d'équilibre en contrainte / déformation



Les radiers

## Cas des radiers sur argiles gonflantes : dispositions constructives

### 2. Mettre en place un vide sanitaire sous le radier

Il est possible de laisser un vide sous le radier à l'aide d'un coffrage dégradable de type Biocofra<sup>®</sup> ou équivalent (sable)

L'espace ainsi libéré est propice à la libre déformation du sol. Le radier doit alors être dimensionné pour travailler en console



Les radiers

Cas des radiers sur argiles gonflantes : dispositions constructives

### 3. Ajouter une couche fusible de polystyrène sous le radier

Une partie des déformation est encaissée du fait de la forte déformabilité du matériaux



Métro du Caire



Les radiers

## Cas des radiers sur argiles gonflantes : dispositions constructives

### 4. Ancrer le radier

- De manière analogue à un ancrage du radier pour résister aux sous-pressions, l'ouvrage peut être ancré pour résister au gonflement des sols (les deux solutions peuvent donc être couplées).
- calcul classique de résistance en traction des ancrages



- LGV SEA (Ambarès)



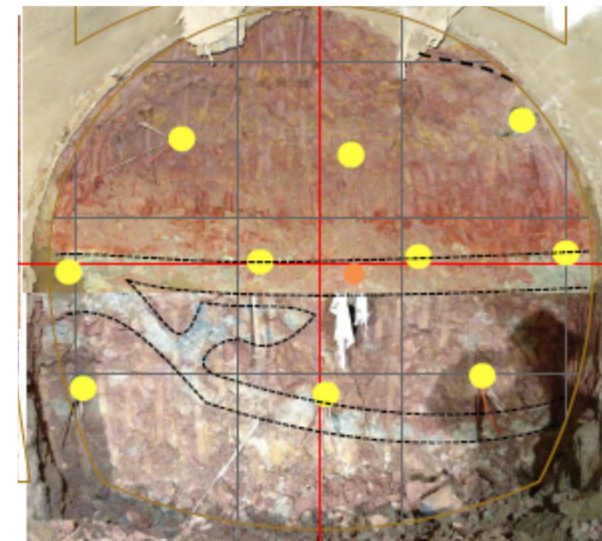
Les radiers



# Cas des travaux souterrains



Station Mairie des Lilas dans les argiles verte (Ligne 11 : prolongement de la ligne vers Rosny et extension des stations existantes)



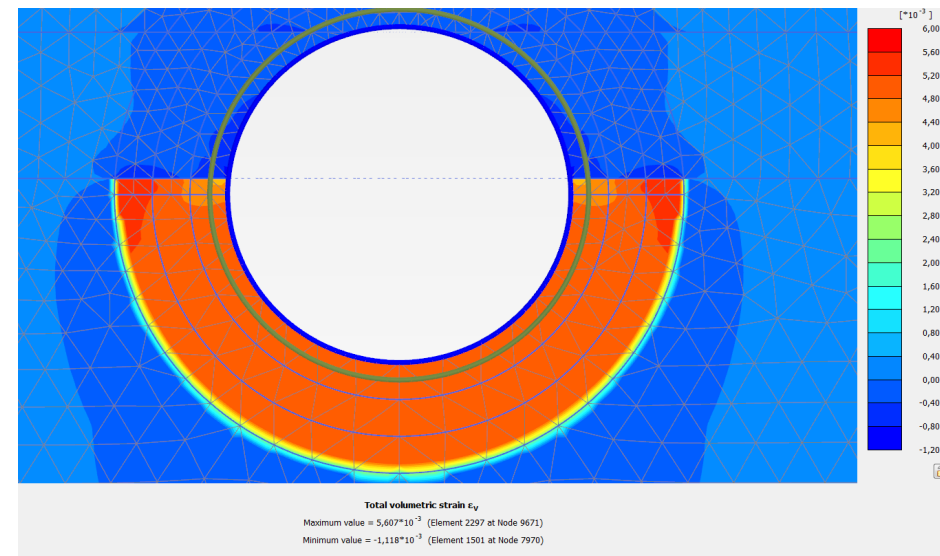
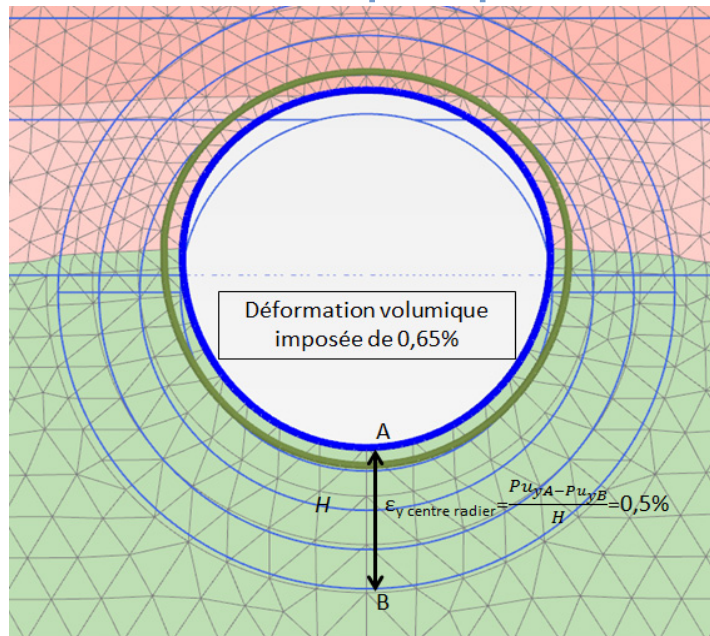
Puits d'essai de Saint Maur : Argile plastique bariolée (Gare SMC L15 sud)



Les tunnels

# Cas des travaux souterrains

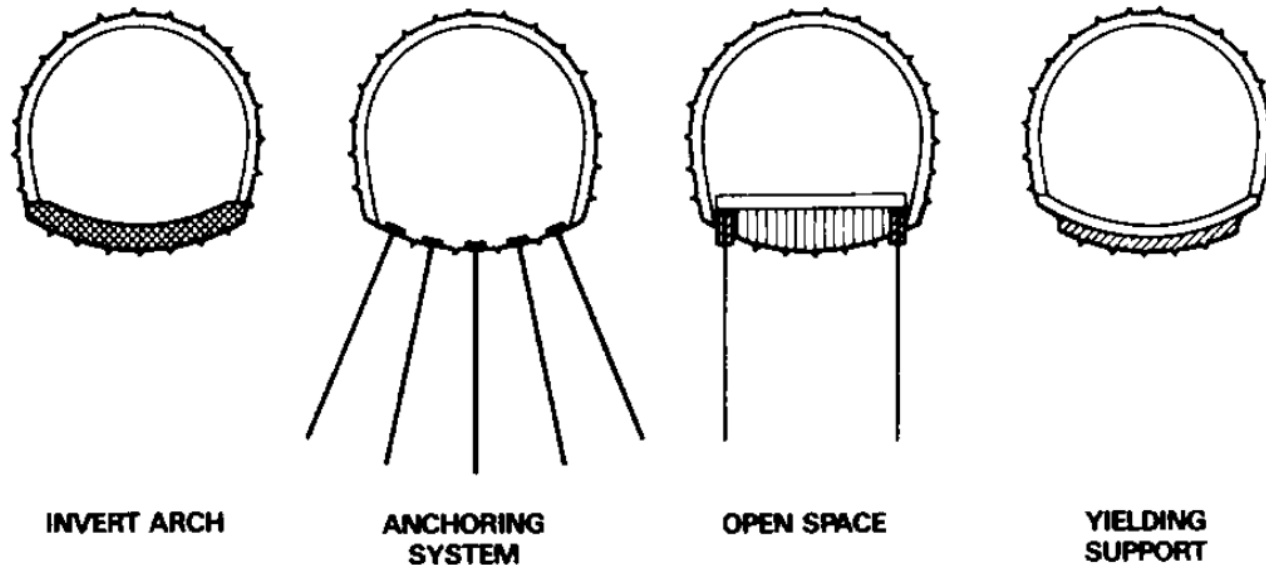
- A l'instar des radiers, les retours d'expérience de pathologies de tunnels dues au gonflement des terrains sont nombreux
- Approche de calcul similaire au radier d'ouvrage de soutènement (pression d'équilibre) à partir d'essais à l'oedomètre par paliers successifs



Les tunnels

# Cas des travaux souterrains

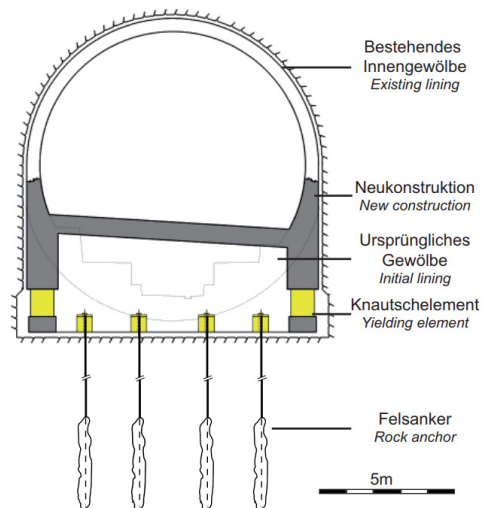
## Dispositions constructives



# Cas des travaux souterrains

## Dispositions constructives

**Système compressible modulaire combinant les principes de vide sanitaire, d'ancrage du terrain et de systèmes compressibles**



tunnel du Chienberg en Suisse



Les tunnels

## Conclusion

- La prise en compte du gonflement des terrains argileux peut avoir un fort impact sur le dimensionnement des ouvrages d'infrastructure (paroi, radier, tunnels)
- Pas de méthodologie clairement définie dans les différentes normes ou recommandations
- Nécessité de bien clarifier les procédures d'essais, adaptées à chaque ouvrage et en relation avec le choix constructif
- Proposer des approches de calcul pragmatiques, robustes (du fait des incertitudes) sans être « excessives »



### Conclusion