



**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

# **Restitution GT gonflement des terrains argileux**

## **Retour d'expérience de la gare de CMF**

**Dino Mahmutovic - EGIS**  
**Martin Cahn - Terrasol**

JOURNÉE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU 25 AVRIL 2024

# Restitution du GT gonflement des terrains argileux

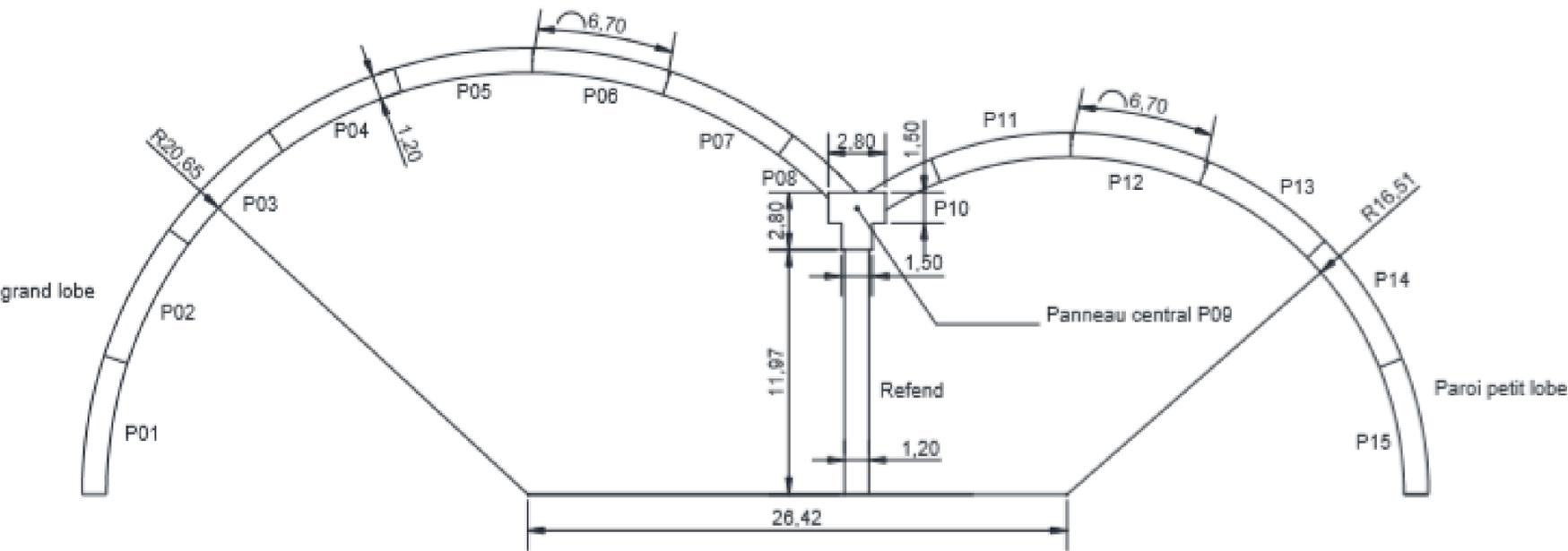
## Retour d'expérience de la gare de CMF

### Sommaire

- A – PRESENTATION DE LA GARE DE CMF
- B – CONTEXTE GEOTECHNIQUE
- C – APPROCHES CALCULATOIRES MISES EN OEUVRE
- D – DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES COMPLEMENTAIRES
- E – INSTRUMENTATION ET RESULTATS
- F - CONCLUSION

# Retour d'expérience de la gare de CMF

## A – PRESENTATION DE LA GARE DE CLICHY-MONTFERMEIL (CMF)



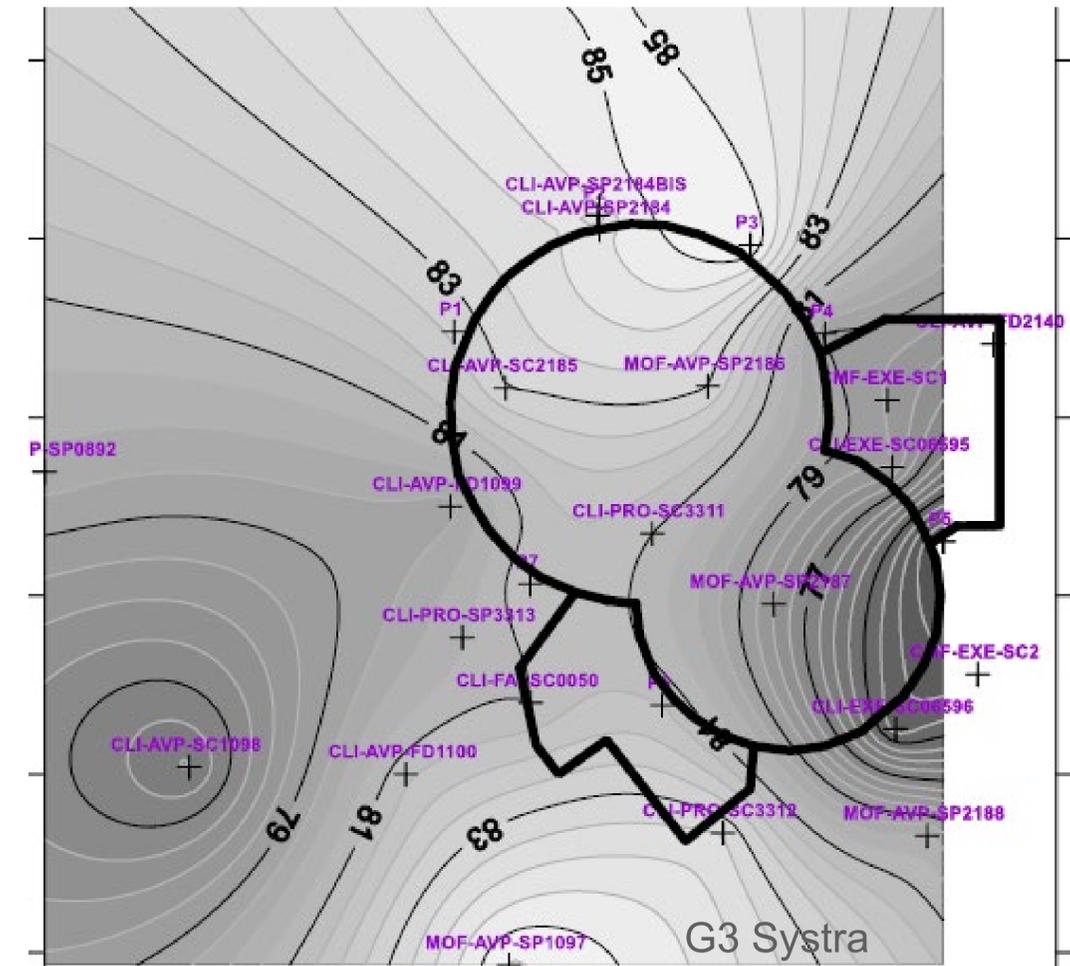
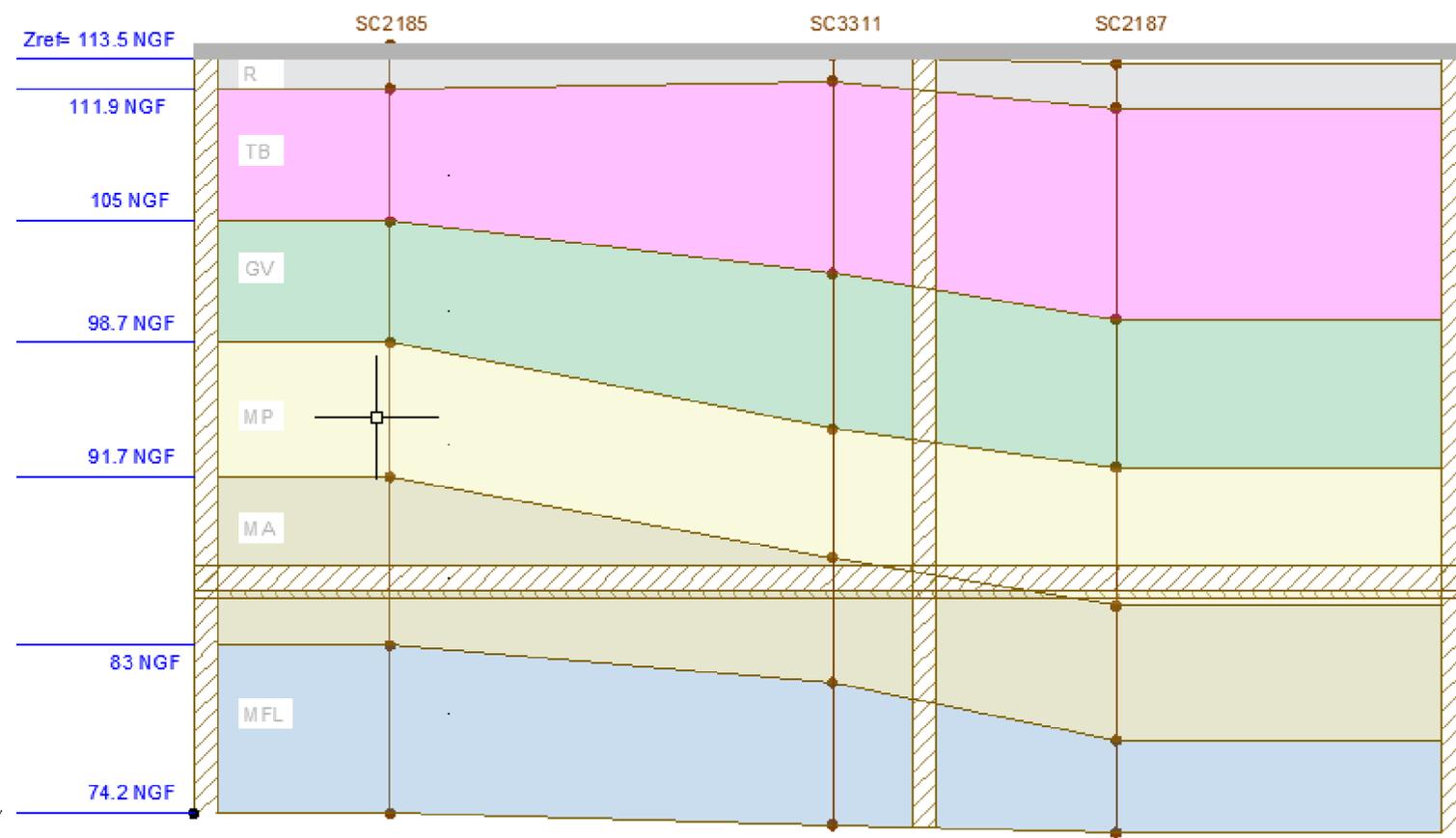
Crédit photo: SGP

- Gare du lot 2 de la ligne 16 du Grand Paris Express
- Bilobe de rayons 16 m et 20 m pour 30 m de profondeur
- ENT : SALINI IMPREGILO & NGE – BE EXE SYSTRA
- MOA : SGP
- MOE : EGIS
- AMO Géotechnique : TERRASOL

# Retour d'expérience de la gare de CMF

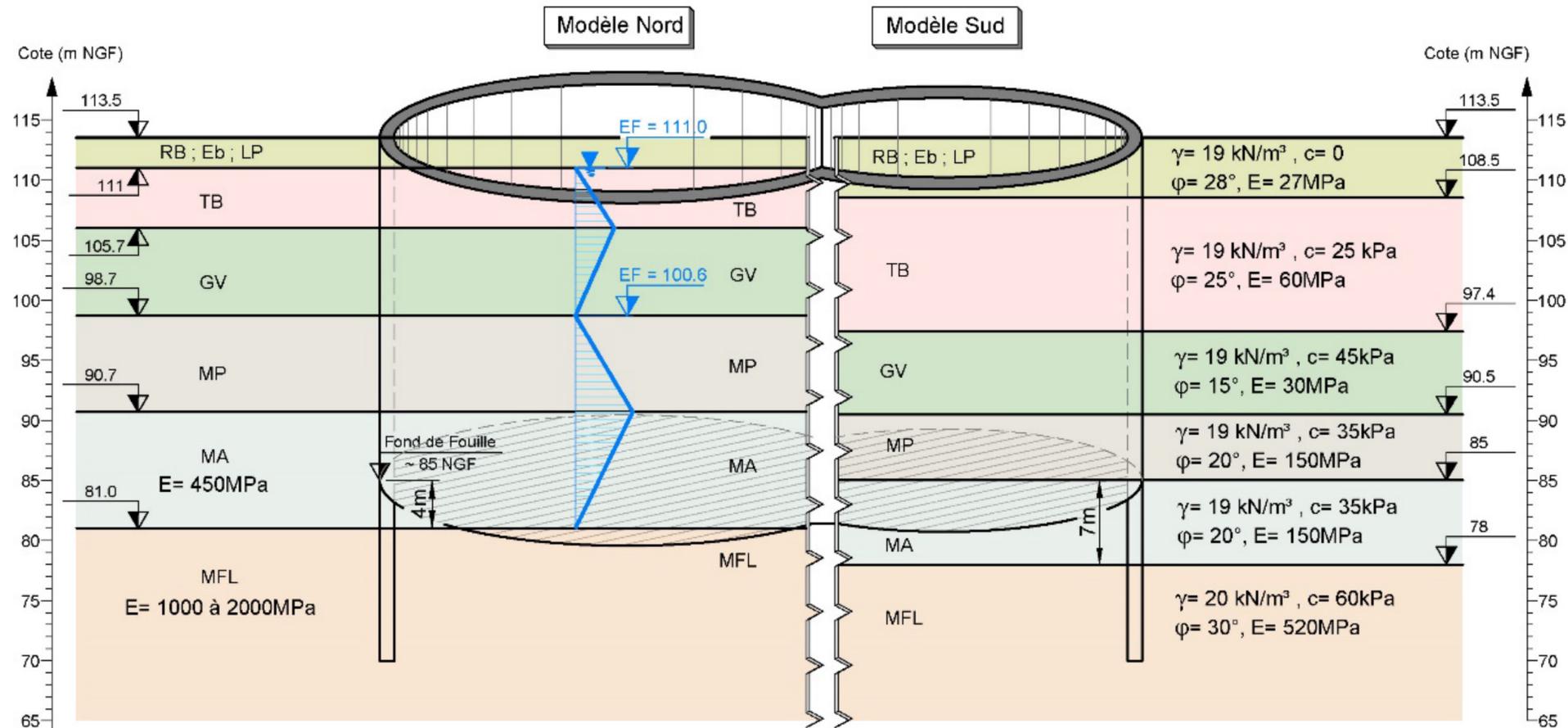
## B – CONTEXTE GEOTECHNIQUE

- Les Marnes d'Argenteuil sont potentiellement gonflantes et directement sous le radier
- Épaisseur de marnes variable d'un lobe à l'autre
- Déchargement mécanique d'une trentaine de mètres
- Impact potentiel du gonflement au niveau de la structure du radier (contrainte de gonflement) et au niveau des futures portes palières (10 mm de déplacement acceptables)



# Retour d'expérience de la gare de CMF

## B – CONTEXTE GEOTECHNIQUE



Facies	Granulométrie (%)		W <sub>L</sub> (%)	I <sub>p</sub>	VBS	W <sub>Nat</sub> (%)	e <sub>0</sub>	γ <sub>d</sub> (kN/m³)	γ <sub>h</sub> (kN/m³)	CaCO <sub>3</sub> (%)
	<80 μm	<2 μm								
Marnes d'Argenteuil	99	64	88	57	4.1	33	0.65	19	14.3	45



- Pression de gonflement :  $\sigma'_g = 250 \text{ kPa}$
- Coefficient de gonflement :  $C_g^* = 0,036$

# Retour d'expérience de la gare de CMF

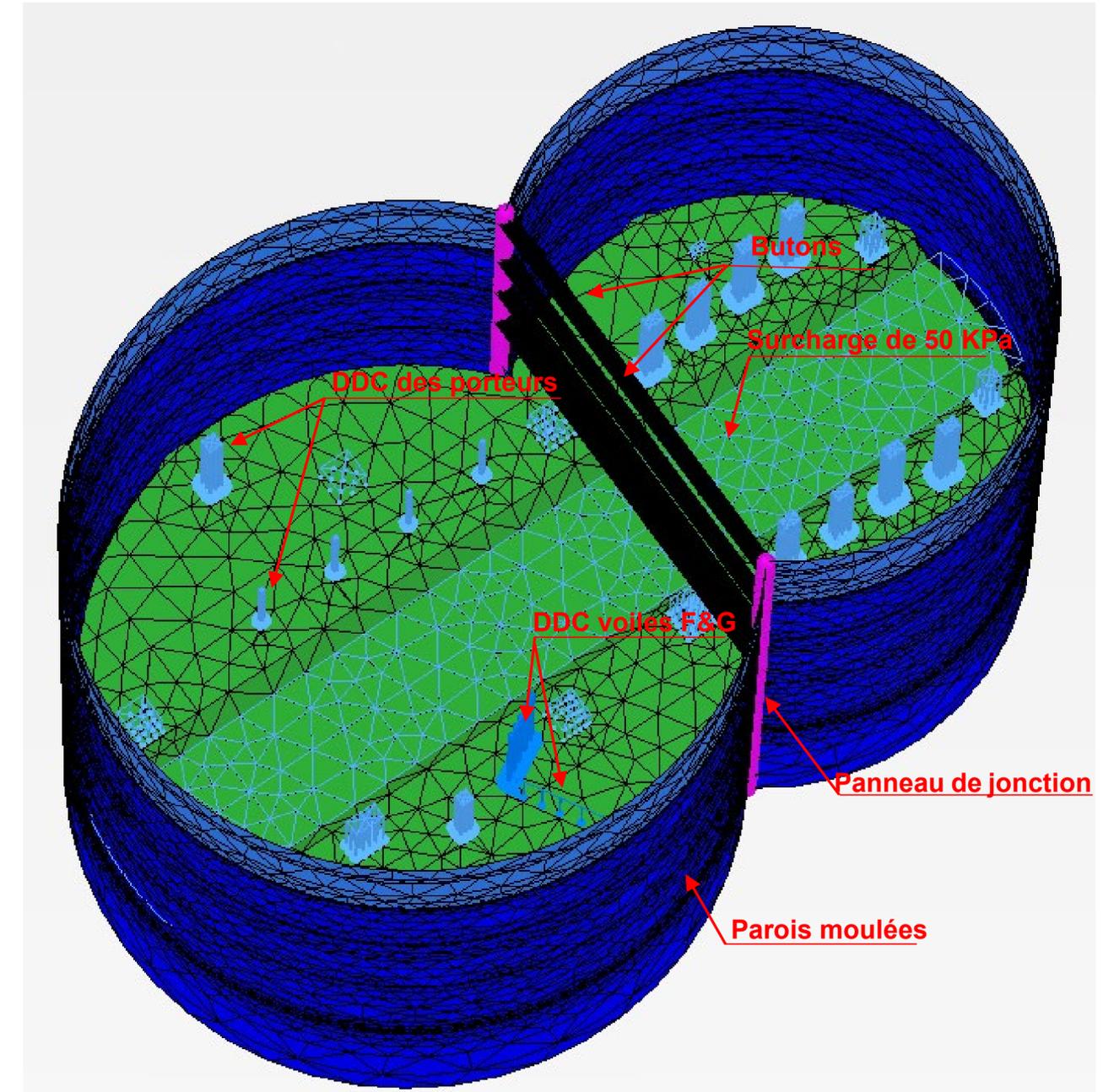
## C – APPROCHES CALCULATOIRES MISES EN OEUVRE

### ➤ Radier résistant

- Epaisseur 1,3 m en forme de berceau résistant à la pression de gonflement et à la pression d'eau

### ➤ Approches calculatoires diverses

- Méthode semi-analytique en phase de conception (3a)
- Méthode semi-analytique dans un modèle structure avec ressorts indépendants en phase d'EXE (3b)
- Méthode numérique en déformation volumique imposée (4b)
- Méthode numérique en déconsolidation (4a)



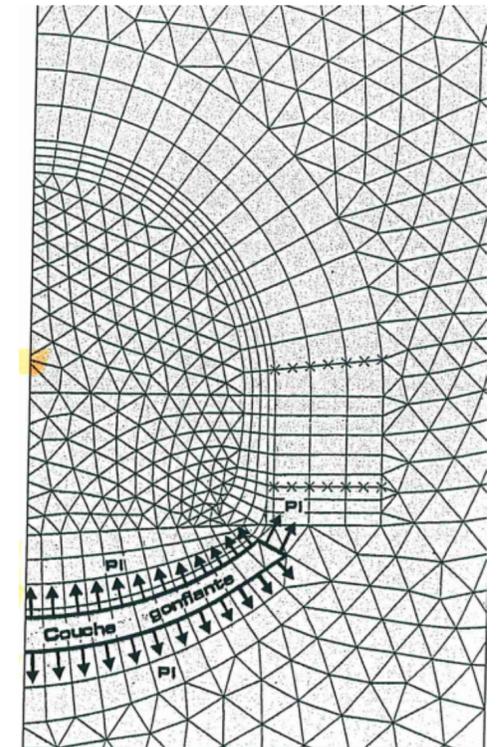
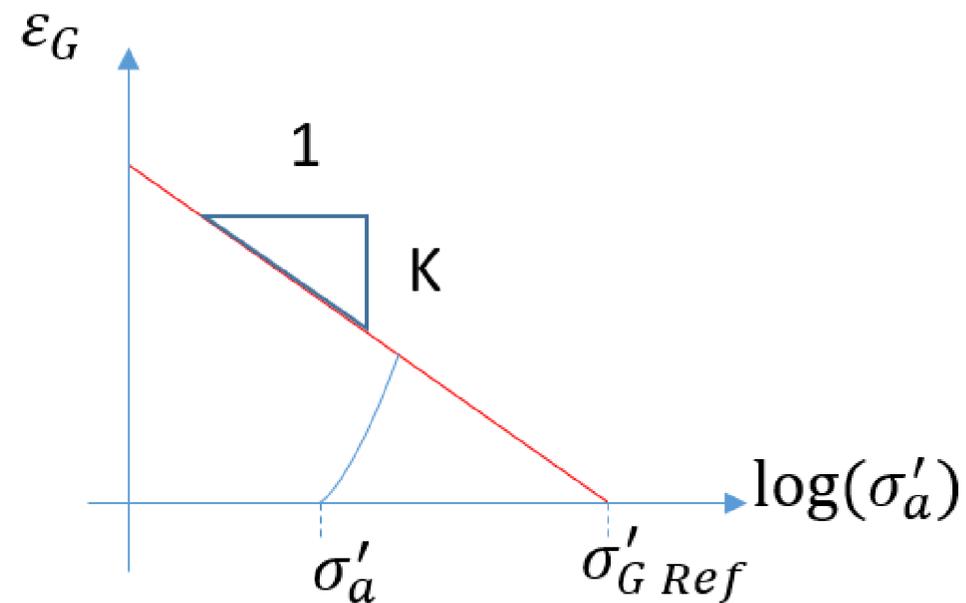
# Retour d'expérience de la gare de CMF

## C – APPROCHE CALCULATOIRE : Méthode numérique en déformation volumique imposée (4b)

- **Principe de la modélisation:** application d'une déformation supplémentaire  $\varepsilon_G$  dans la zone susceptible de gonfler venant s'ajouter aux déformations élastiques  $\varepsilon_e$  et plastiques  $\varepsilon_p$  issus du calcul phasé
- **Loi de gonflement:** la déformation de gonflement supplémentaire est calculée à partir de l'état de contrainte dans la zone gonflante et suivant la pente K

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_G$$

$$\varepsilon_G = -K \cdot \log\left(\frac{\sigma'_a}{\sigma'_{G Ref}}\right)$$



### ➤ Difficultés :

1. L'état de contrainte  $\sigma'_a$  sous l'ouvrage n'est pas homogène: une déformation unique ne peut pas satisfaire en tout point la condition d'équilibre
2. Introduire des déformations spécifiques à chaque élément n'est pas possible dans la plupart des codes de calculs

# Retour d'expérience de la gare de CMF

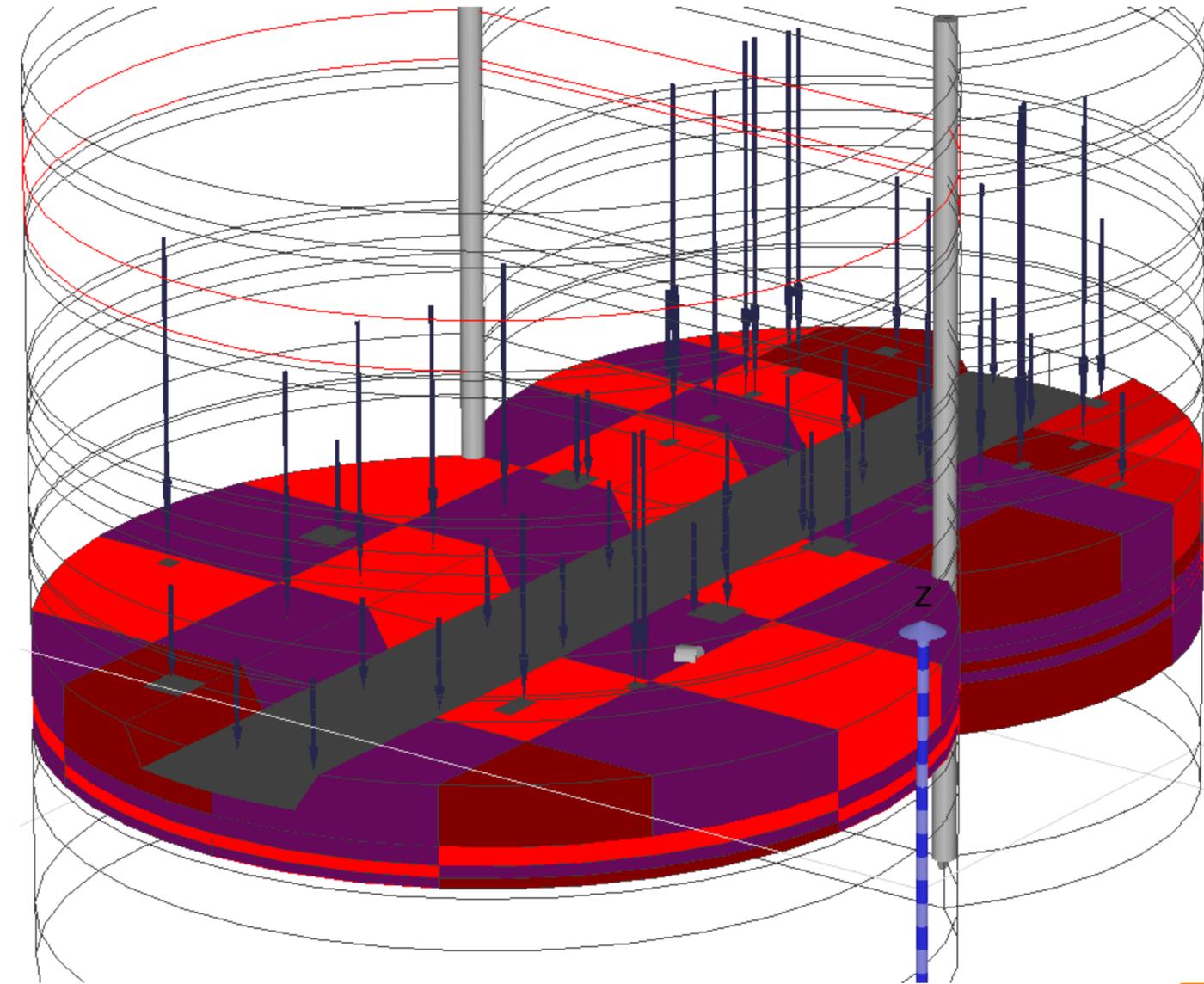
## C – APPROCHE CALCULATOIRE : Méthode numérique en déformation volumique imposée (4b)

### ➤ Mise en œuvre dans un modèle PLAXIS 3D

- Découpage de « blocs » en fond de fouille pour lesquels une déformation spécifique est imposée
- Prise en compte de l'état de contrainte en fond de fouille suite à l'excavation et à l'application des charges pour chaque bloc
- Application incrémentale de la déformation et contrôle de l'état de contrainte → processus itératif automatisé

### ➤ Objectif du calcul

- Ramener l'ensemble des blocs dans un état contrainte déformation additionnel compatible avec la loi de gonflement retenue



# Retour d'expérience de la gare de CMF

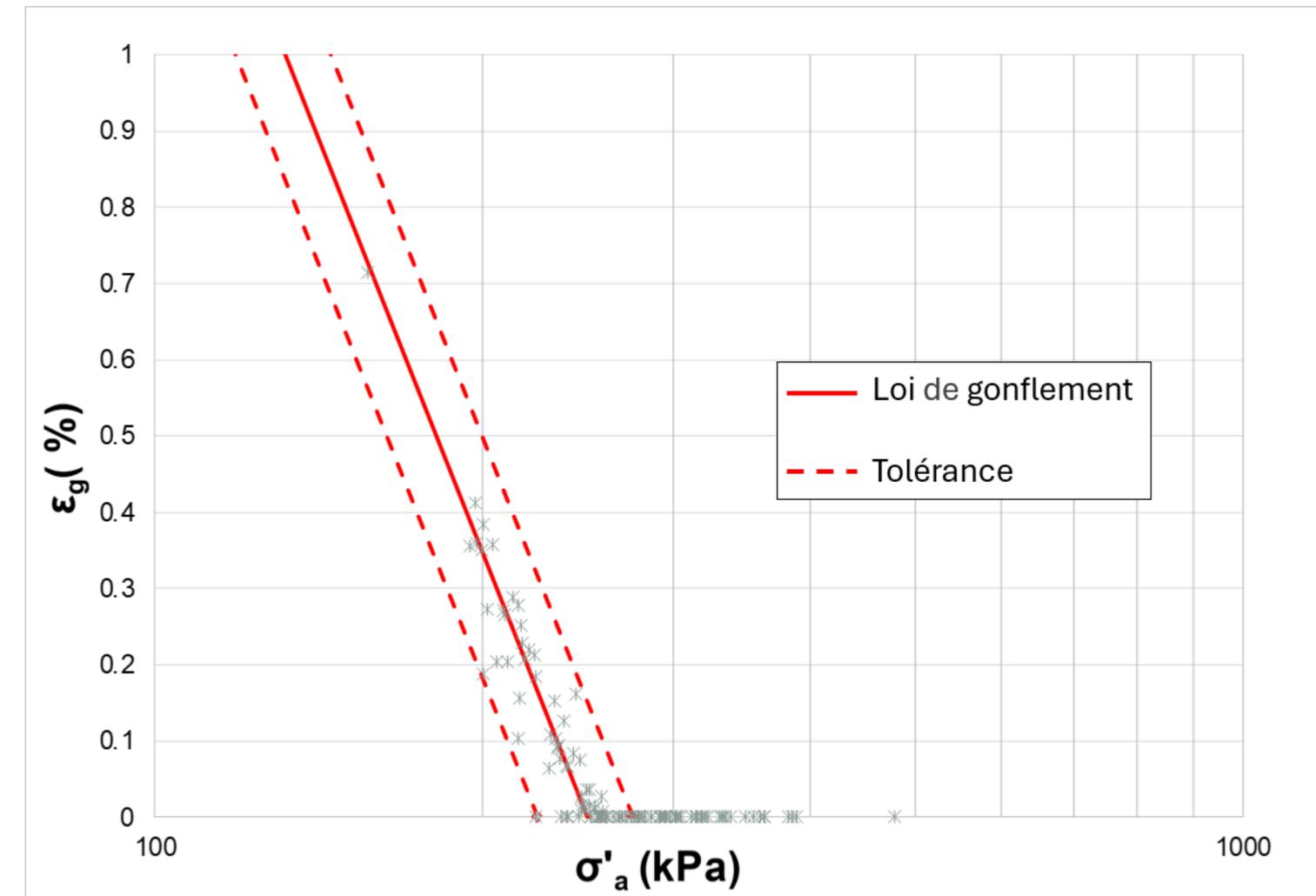
## C – APPROCHE CALCULATOIRE : Méthode numérique en déformation volumique imposée (4b)

### ➤ Mise en œuvre dans un modèle PLAXIS 3D

- Découpage de « blocs » en fond de fouille pour lesquels une déformation spécifique est imposée
- Prise en compte de l'état de contrainte en fond de fouille suite à l'excavation et à l'application des charges pour chaque bloc
- Application incrémentale de la déformation et contrôle de l'état de contrainte → processus itératif automatisé

### ➤ Objectif du calcul

- Ramener l'ensemble des blocs dans un état contrainte déformation additionnel compatible avec la loi de gonflement retenue



# Retour d'expérience de la gare de CMF

## C – APPROCHE CALCULATOIRE : Méthode numérique en déformation volumique imposée (4b)

### Base de l'algorithme

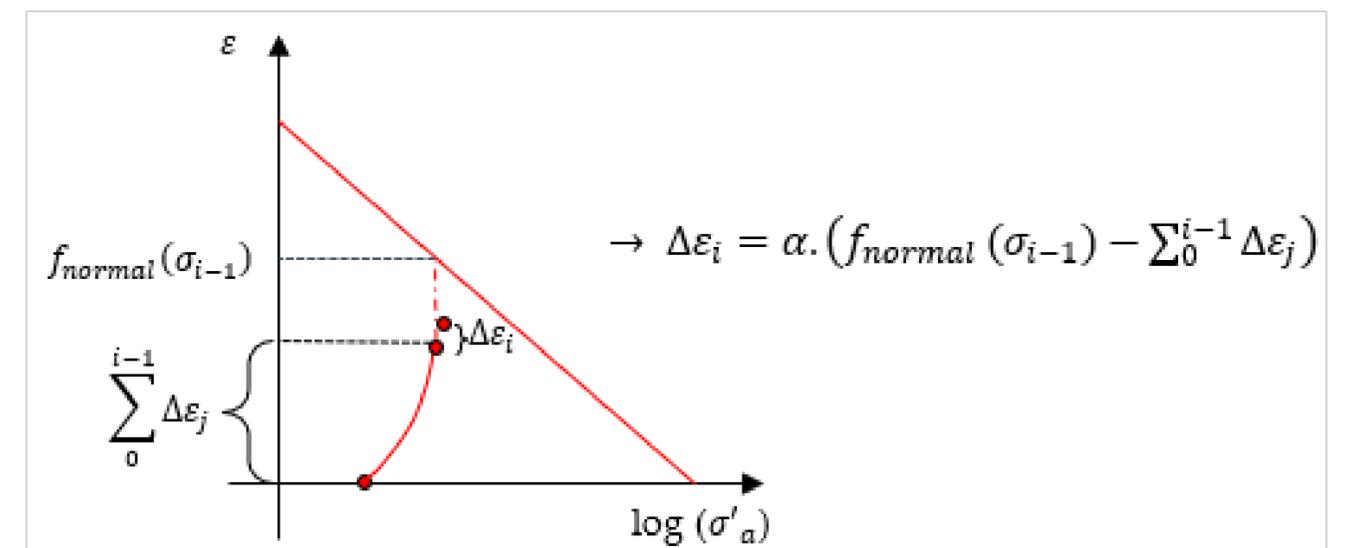
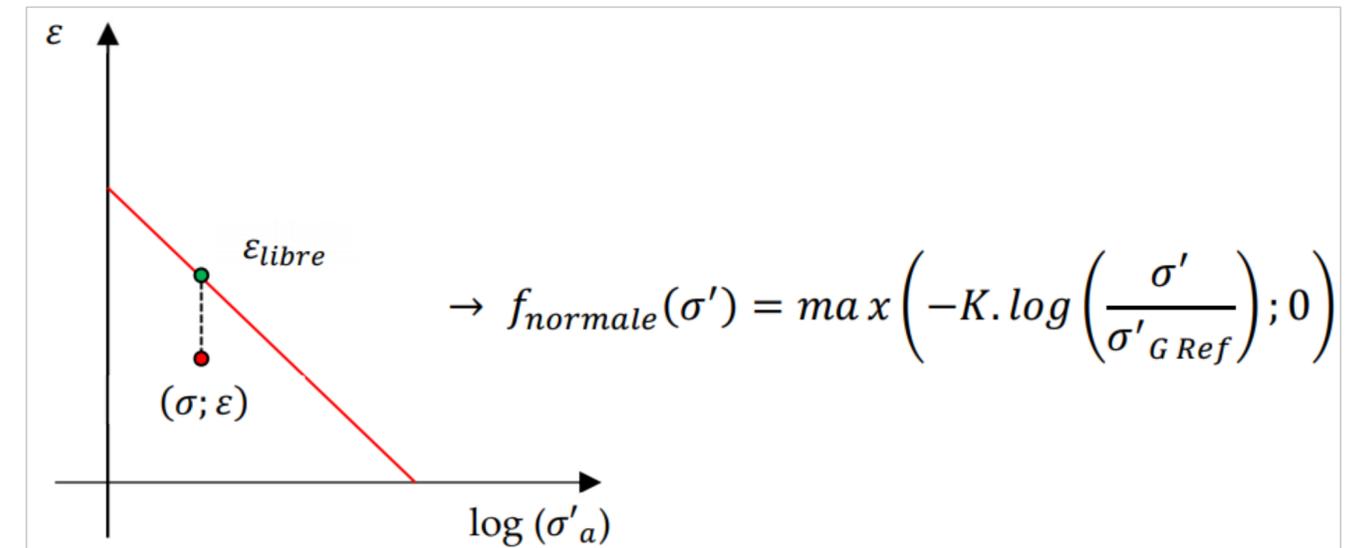
- La déformation  $\varepsilon_{libre}$  donnée par la fonction  $f_{normale}(\sigma')$  : déformation d'un échantillon de terrain libre de toute contrainte

### Ajustement de la déformation imposée

- Les blocs sont interdépendants : une déformation imposée sur une zone influe sur la zone adjacente en contrainte et en déformation
- Du fait du contraste de raideur dans le modèle, la déformation calculée ne correspond pas à la déformation imposée

### Processus itératif

- Application de la déformation itérativement d'un pas réduit  $\alpha$  jusqu'à atteindre la convergence sur la droite de gonflement
- Convergence du calcul comparé à chaque étape à un critère de convergence pour l'ensemble des blocs



# Retour d'expérience de la gare de CMF

## C – APPROCHE CALCULATOIRE : Méthode numérique en déformation volumique imposée (4b)

### Principe de modélisation

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_G$$

$$\varepsilon_G = -K \cdot \log \left( \frac{\sigma'_a}{\sigma'_{G Ref}} \right)$$

$\varepsilon_e$  : déformations élastiques issus du calcul phasé

$\varepsilon_p$  : déformations plastiques issus du calcul phasé

$\varepsilon_G$  : déformations supplémentaires issus du gonflement

### Choix des paramètres de la loi de gonflement

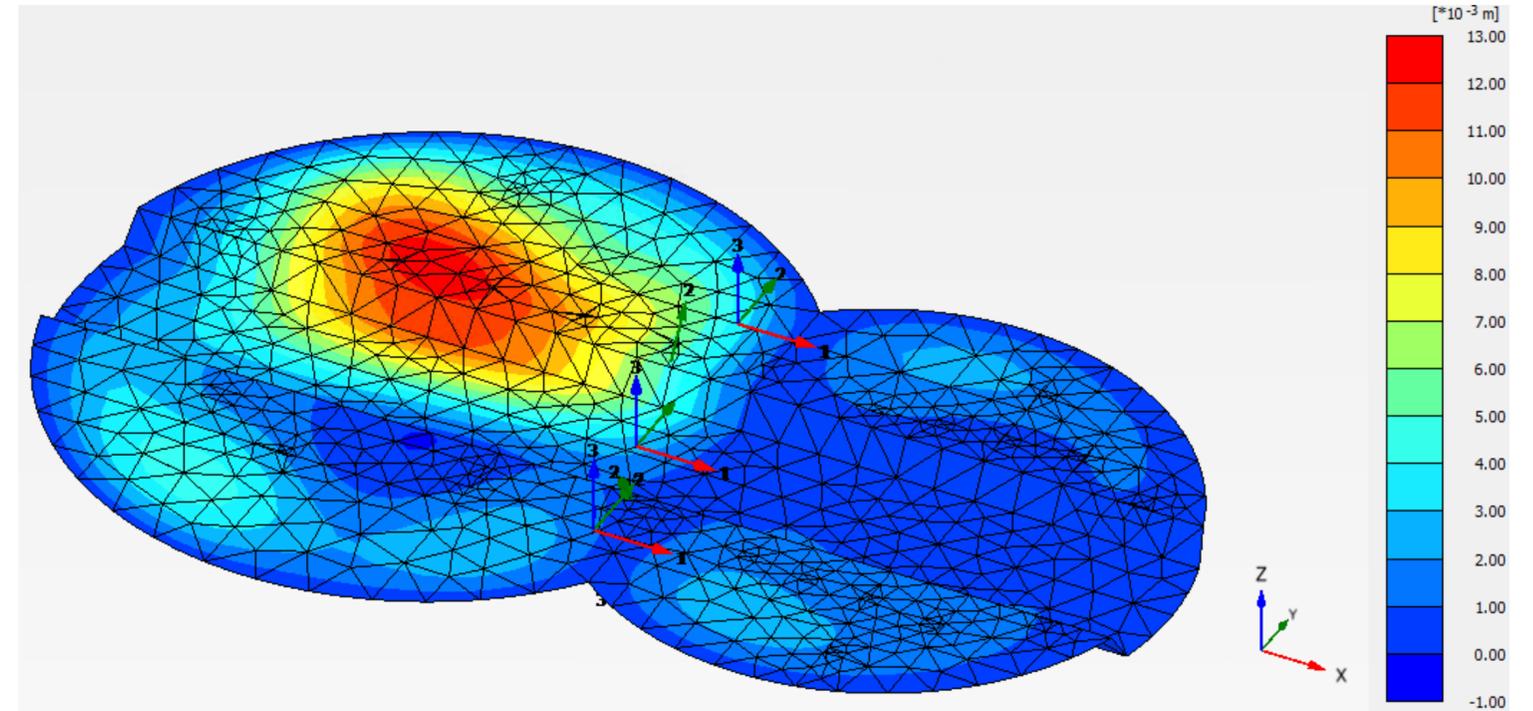
Déformation de gonflement	Contrainte de gonflement et Contrainte référence de gonflement	Pente de la droite de gonflement
$\varepsilon_G$ <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\varepsilon_{verticale}</math></li> <li><math>\varepsilon_{volumique}</math></li> </ul>	$\sigma'_a$ <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\sigma'_{verticale}</math></li> <li><math>p'</math></li> </ul> $\sigma'_{G Ref}$ <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\sigma'_g</math> : Pression de gonflement retenue</li> <li><math>\sigma'_{v0}</math> : Contrainte effective verticale initiale</li> </ul>	$K$ <ul style="list-style-type: none"> <li><math>C_g^*</math></li> <li><math>K_g^* = C_g^* - C_{su}^*</math></li> </ul> $C_g^*$ : Coefficient de gonflement $C_{su}^*$ : Pente de déchargement-rechargement à teneur en eau constante

# Retour d'expérience de la gare de CMF

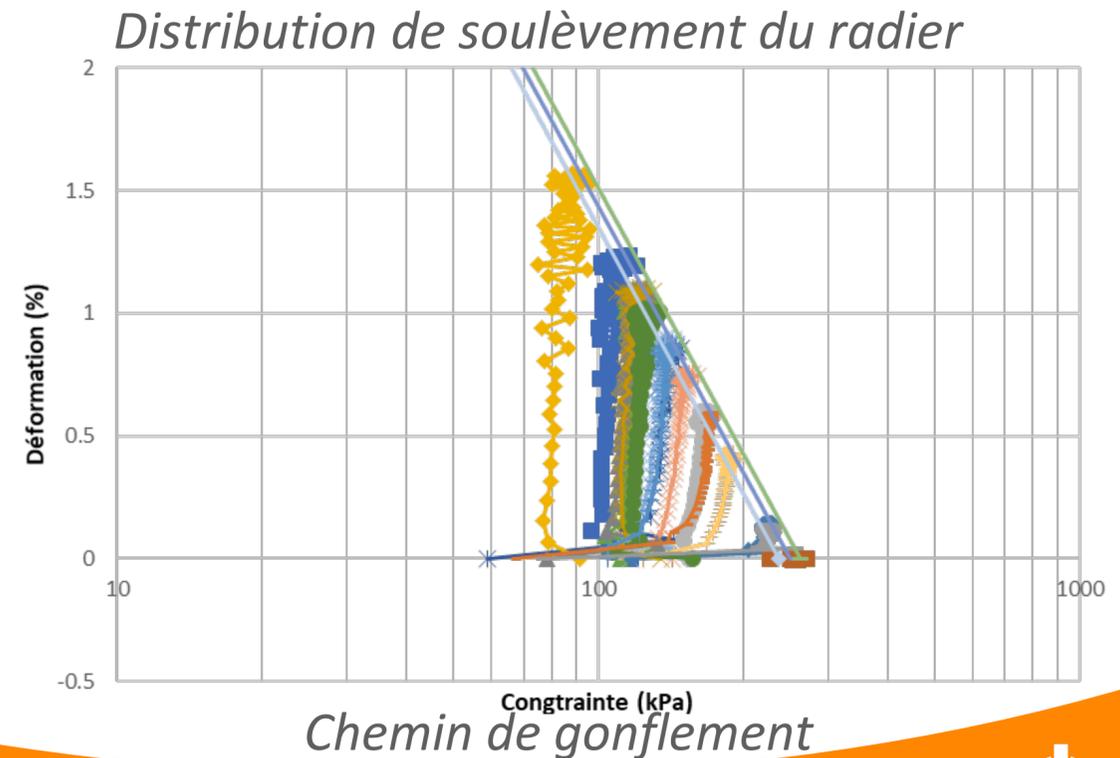
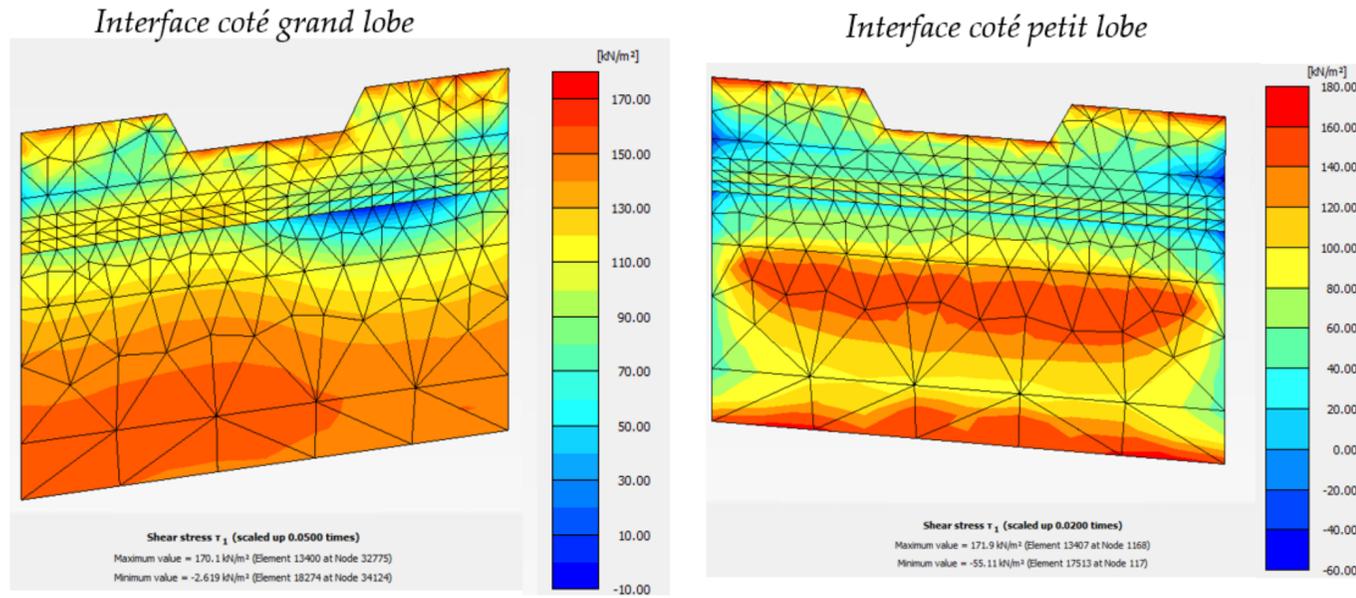
## C – APPROCHE CALCULATOIRE : Méthode numérique en déformation volumique imposée (4b)

### Influence des paramètres sur le soulèvement du radier

Paramètres de la loi de gonflement				Déplacement maximal vertical du radier (cm)
$\varepsilon_g$	$\sigma'_a$	$\sigma'_g$	$K$	
$\varepsilon_{vol}$	$\sigma'_{vert}$	$\sigma'_g = 250 \text{ kPa}$	$C_g^* = 3,6\%$	1,3
			$K_g^* = 1,6\%$	0,8
	$p'$		$C_g^* = 3,6\%$	0,5



### Vérification du cisaillement au niveau du refend



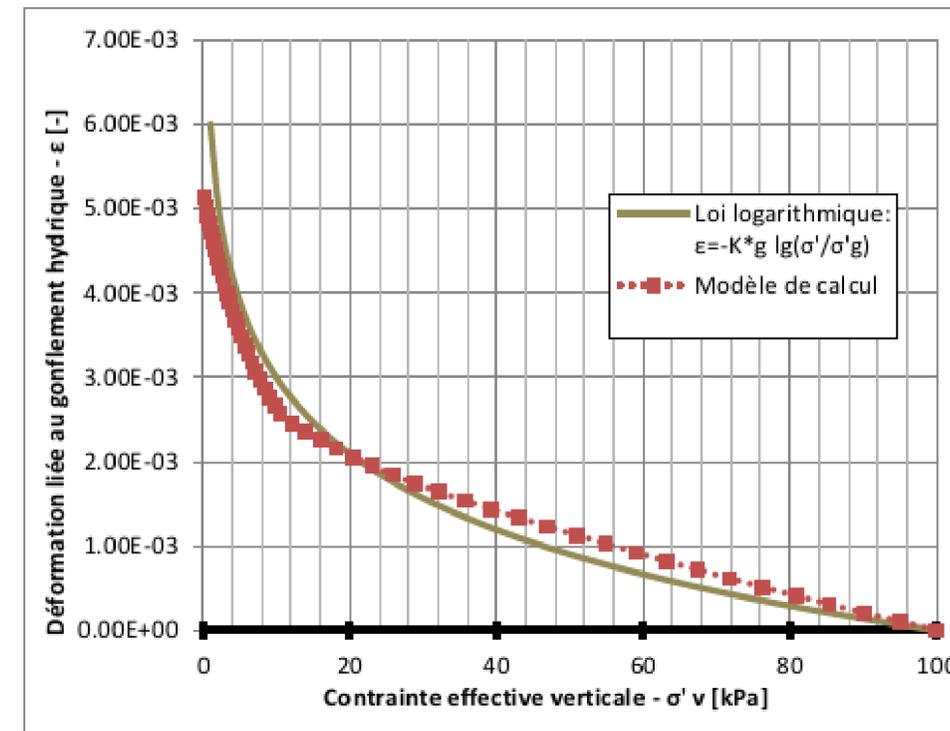
# Retour d'expérience de la gare de CMF

## C – APPROCHE CALCULATOIRE : Méthode numérique en déconsolidation (4a)

### Principe de la modélisation:

- ❖ application d'une succion initiale égale à la contrainte de gonflement dans la zone susceptible de gonfler
- ❖ puis calcul de consolidation avec condition limite de pression interstitielle nulle au niveau du fond de fouille

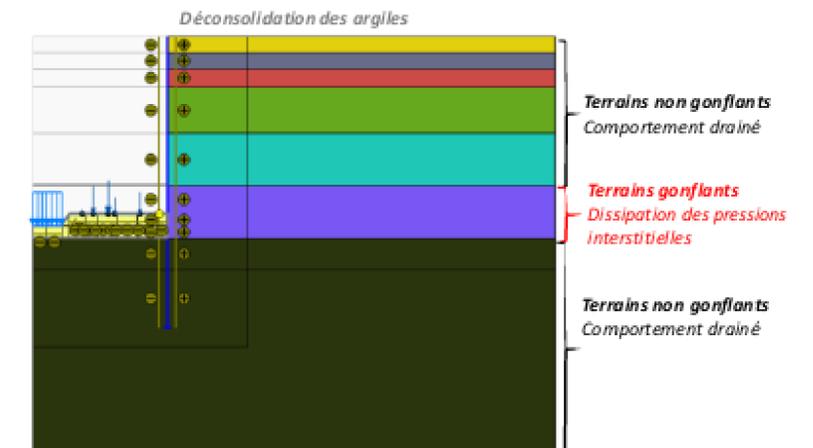
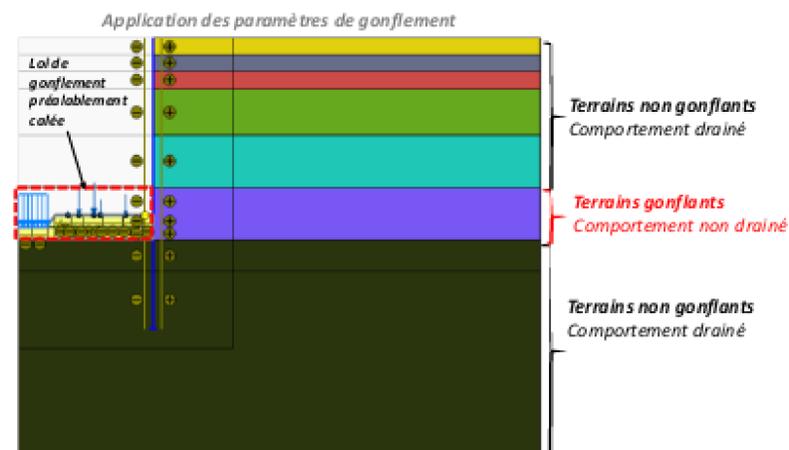
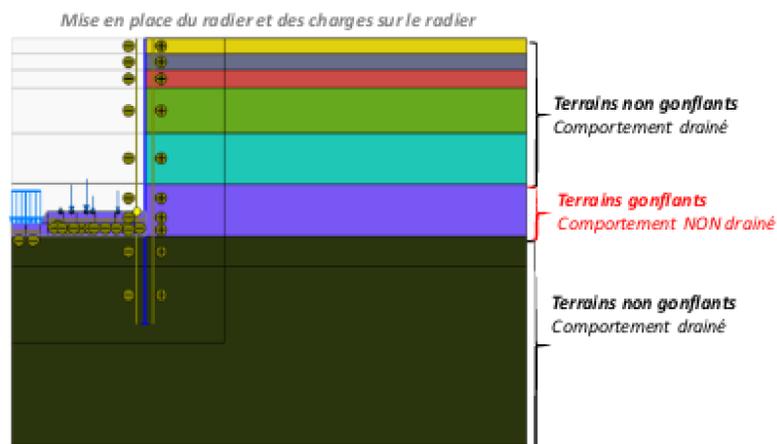
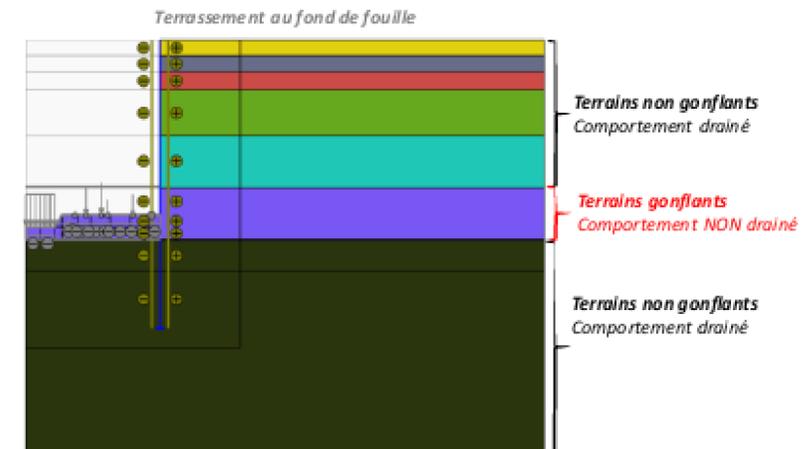
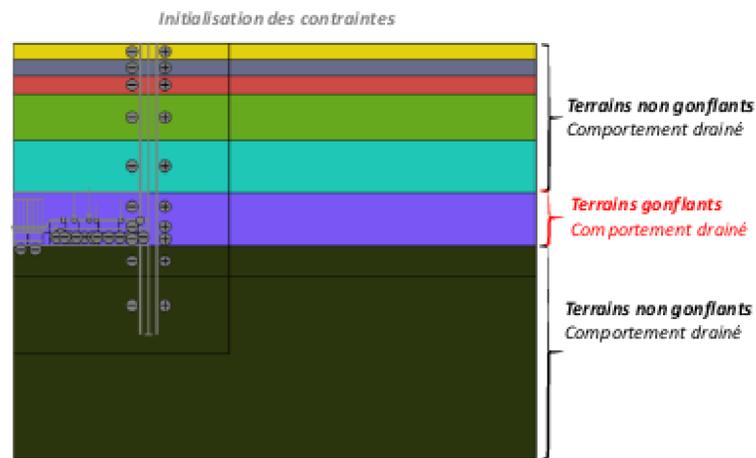
**Loi de gonflement:** la variation de la contrainte effective implique une déformation du sol. Plusieurs lois de comportement peuvent être utilisées en jouant sur les paramètres. Le modèle est préalablement calé sur un essai oedométrique.



# Retour d'expérience de la gare de CMF

## C – APPROCHE CALCULATOIRE : Méthode numérique en déconsolidation (4a)

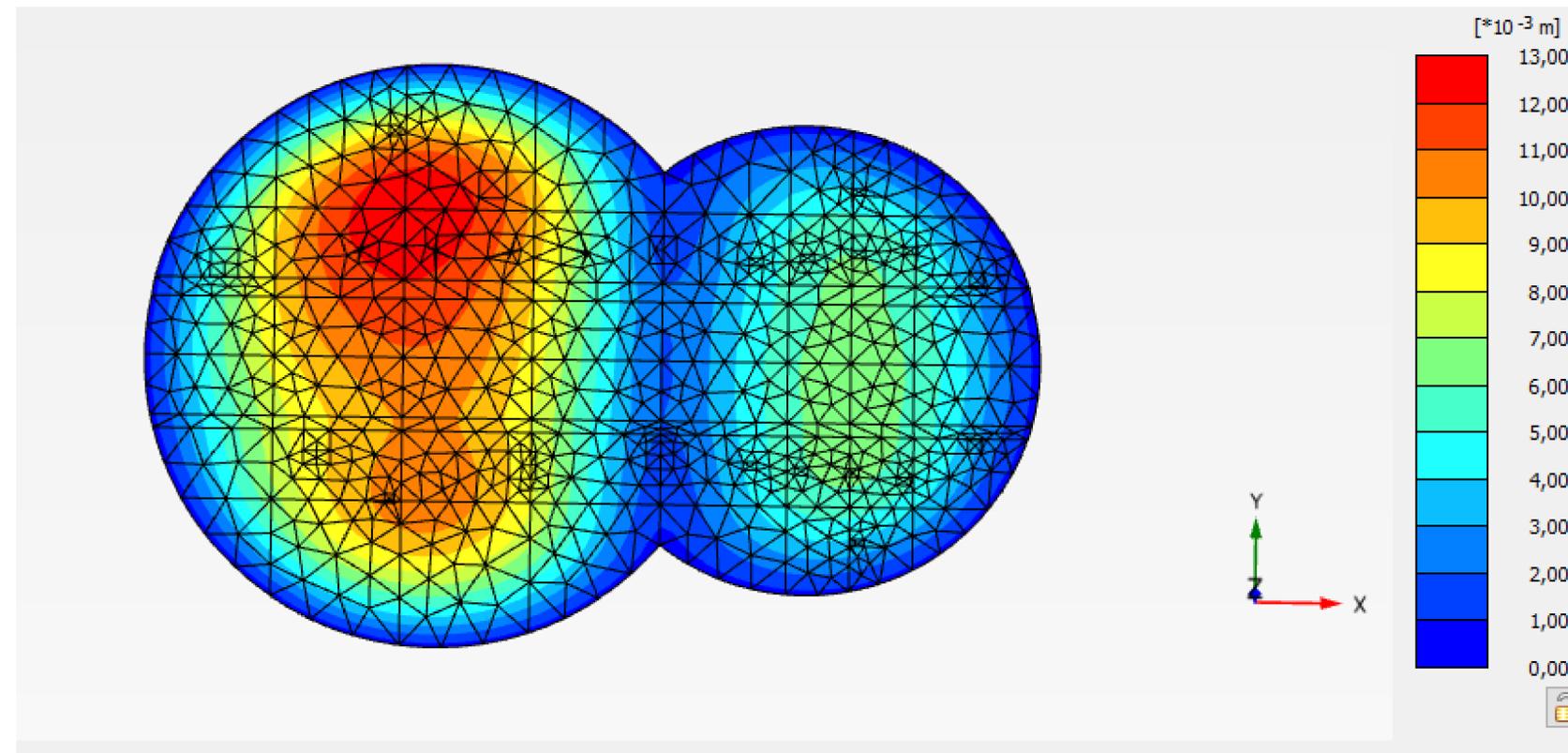
Il est également possible de simuler le déchargement et la génération de la succion dans la couche gonflante par variation de contrainte effective, auquel cas il sera nécessaire de jouer sur les conditions initiales et notamment la pression interstitielle



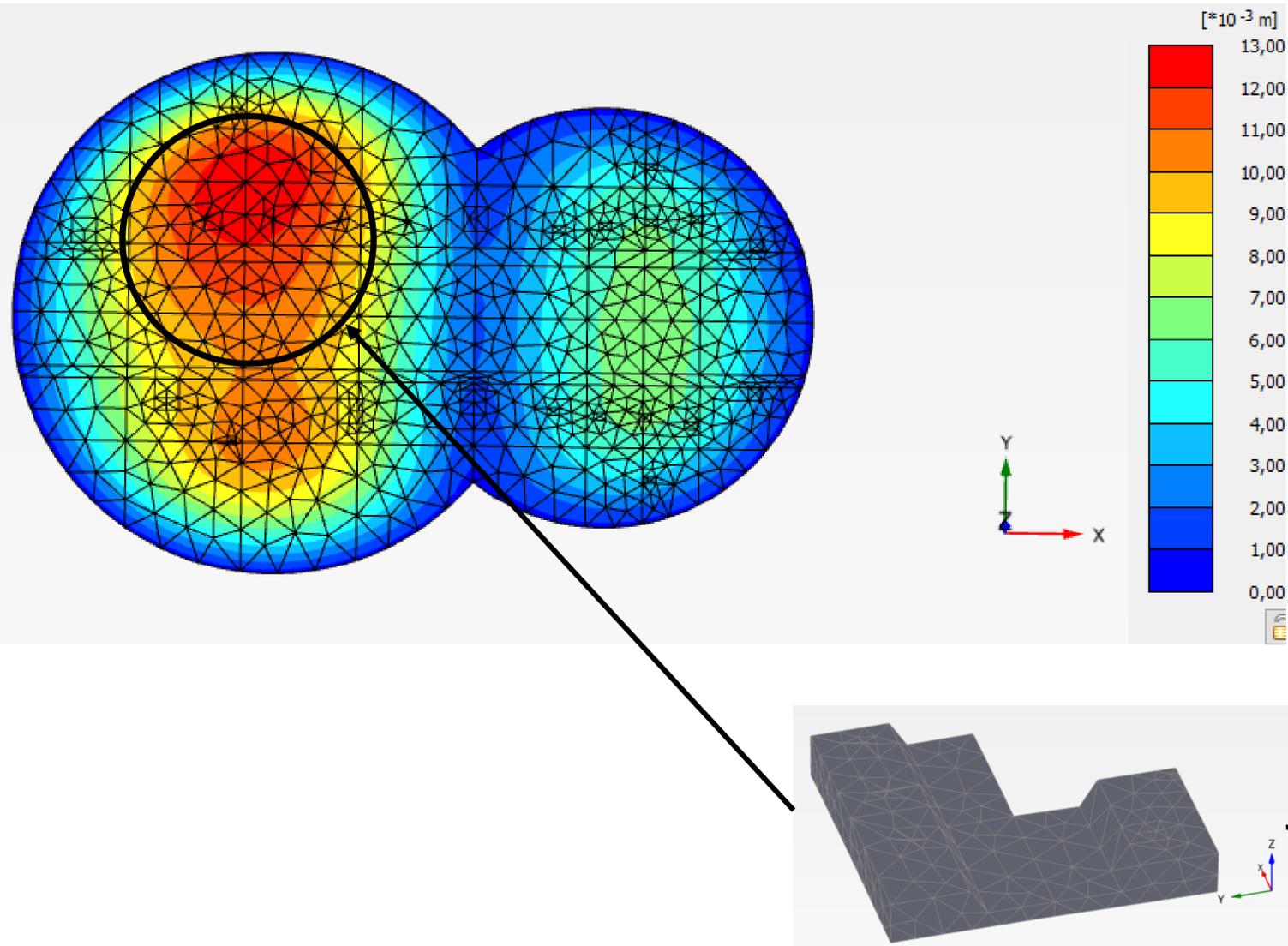
## C – APPROCHE CALCULATOIRE : Méthode numérique en déconsolidation (4a)

### ➤ Avantages et inconvénients de la méthode :

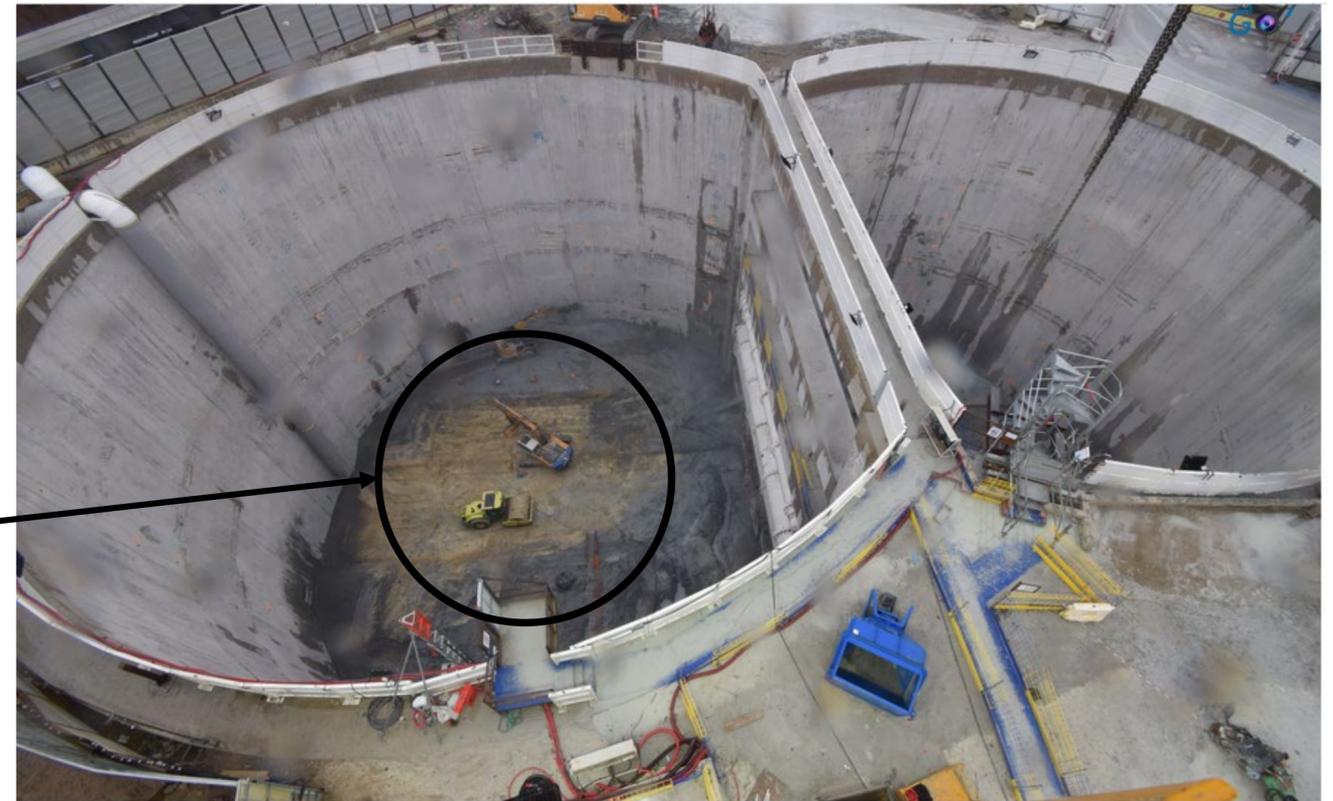
1. Le sol gonflant n'a pas besoin d'être discrétisé en blocs de déformations spécifiques
2. Les descentes de charge s'opposant au gonflement sont gérées automatiquement via les contraintes effectives
3. Aucune itération à gérer mais uniquement un calcul de (dé)consolidation
4. Nécessité de décomposer les phases de chargement et de gonflement



## D – DISPOSTIONS CONSTRUCTIVES COMPLEMENTAIRES



- Mise en évidence d'une zone gonflante pouvant ne pas respecter le critère des 10 mm
- Mise en œuvre d'une substitution par une grave traitée ayant un module proche des marnes en place

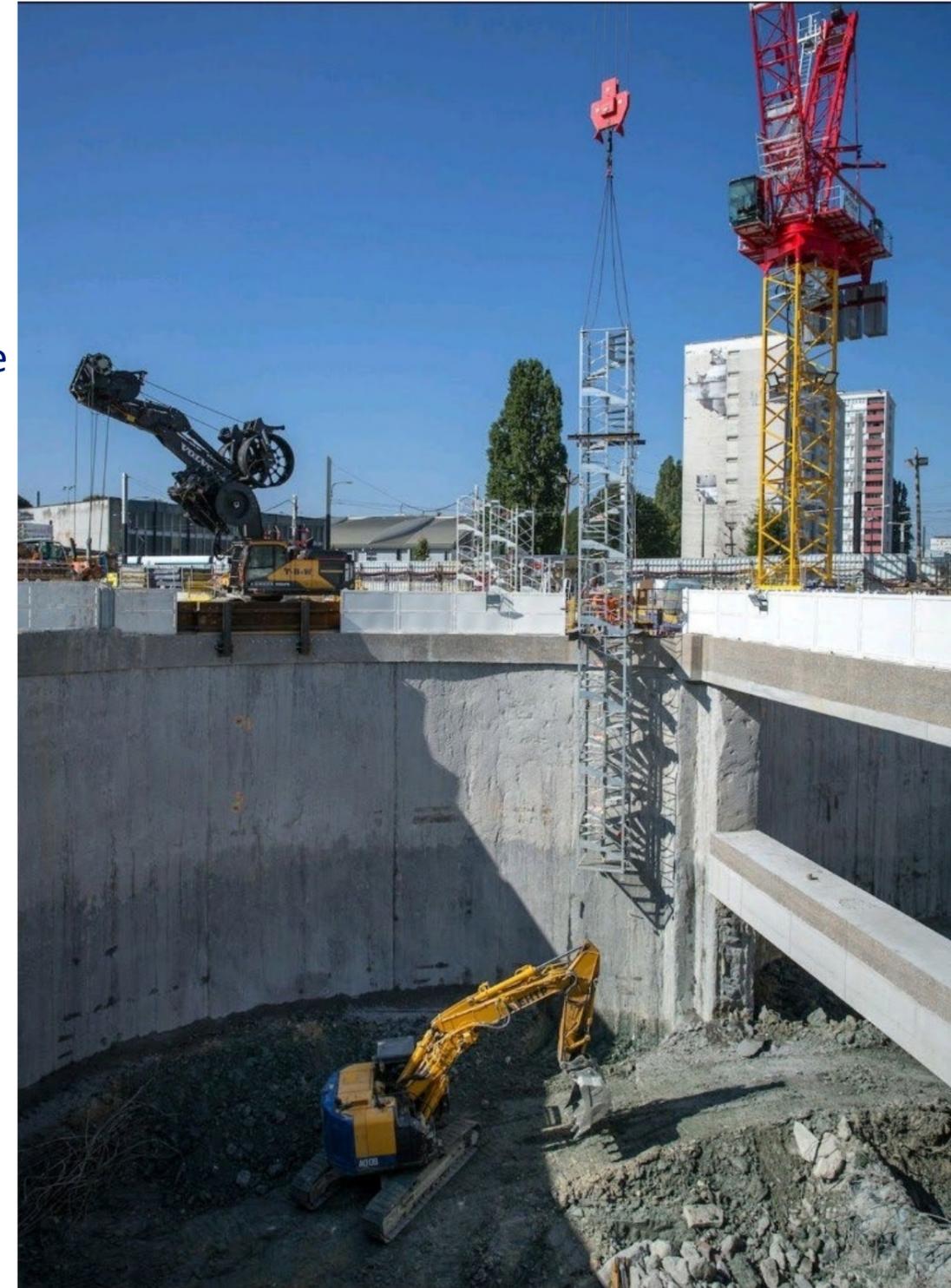


# Retour d'expérience de la gare de CMF

## E – INSTRUMENTATION MISE EN PLACE ET RESULTATS

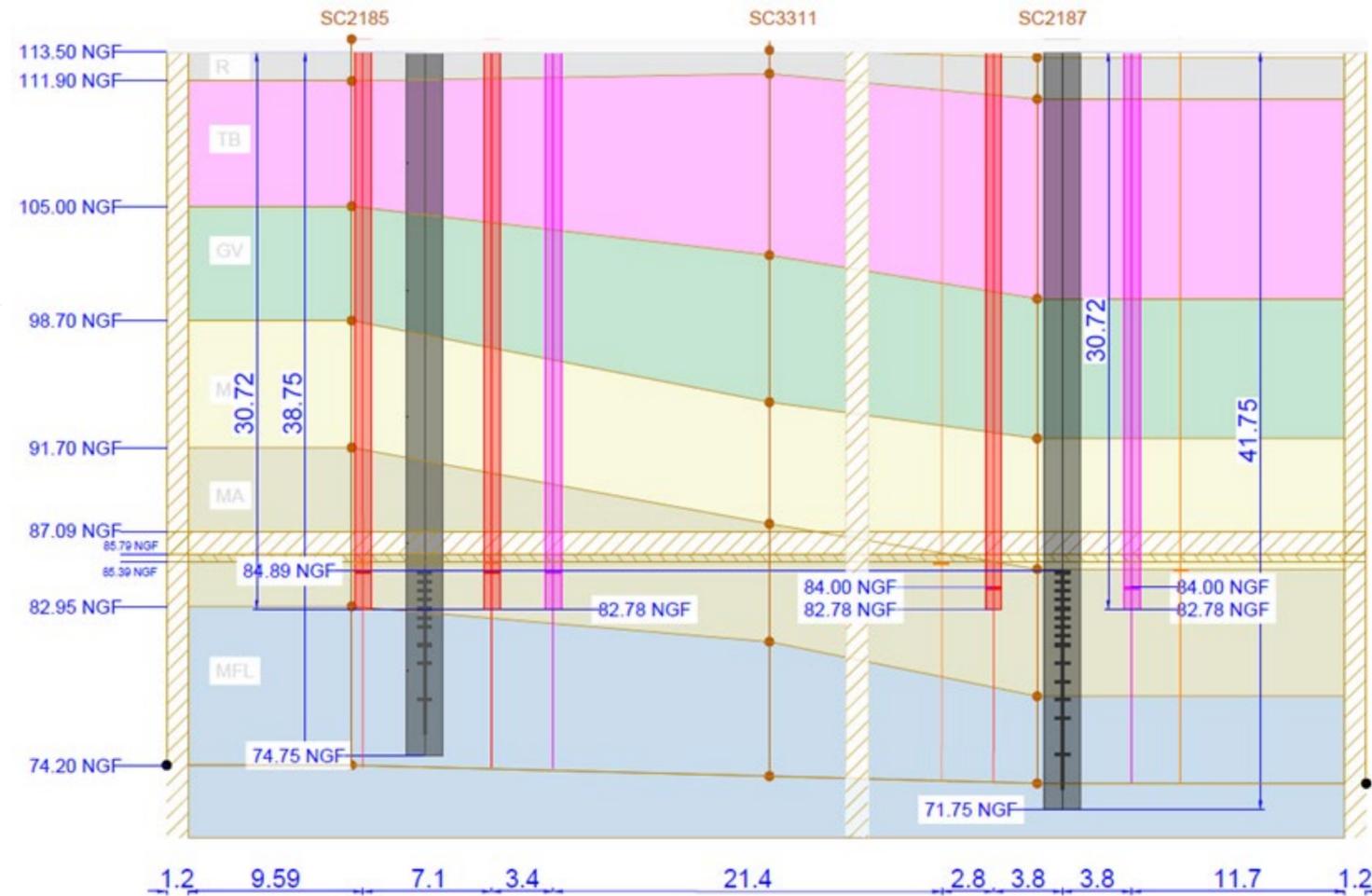
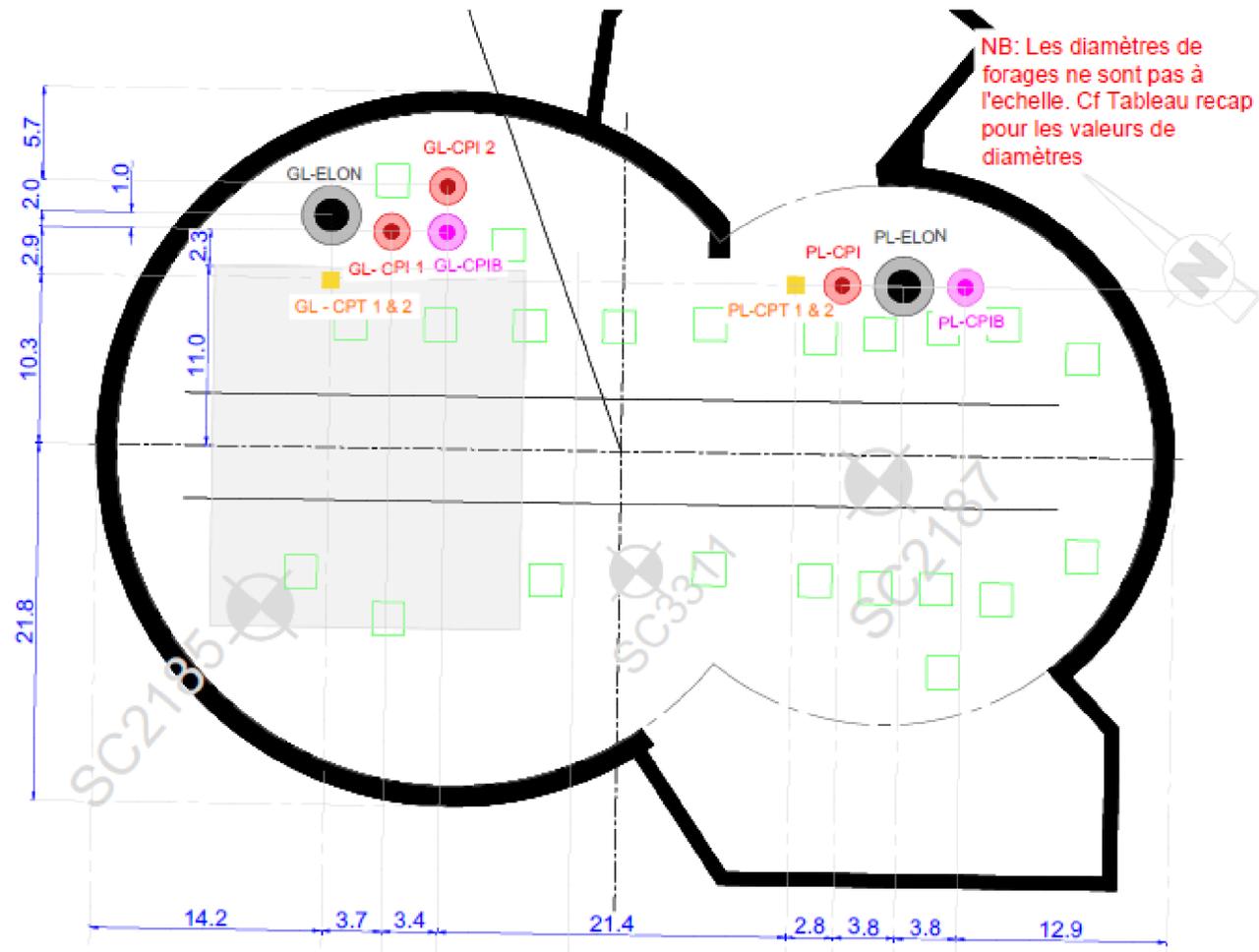
### Objectifs de l'instrumentation :

- Suivi in situ de l'évolution des pressions interstitielles et du gonflement sous le radier au cours du temps et quantification du phénomène
- Distinguer le gonflement instantané du gonflement différé
- Confronter les études analytiques et les modèles numériques réalisés dans le cadre de l'étude du gonflement à des observations réelles
- Enrichir le retour d'expérience sur les sujets de gonflement sur les projets du Grand Paris Express.



# Retour d'expérience de la gare de CMF

## E – INSTRUMENTATION MISE EN PLACE ET RESULTATS



### Instrumentation:

- 5 CPI
- 4 CPT
- 2 chaînes d'élongamètres

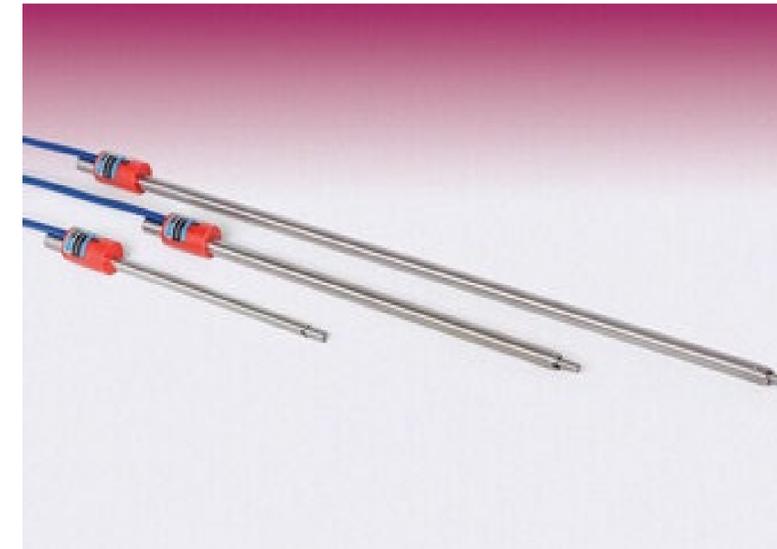
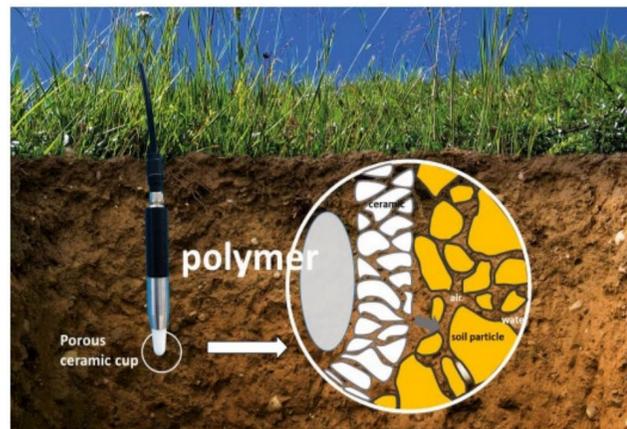
# Retour d'expérience de la gare de CMF

## E – INSTRUMENTATION MISE EN PLACE ET RESULTATS



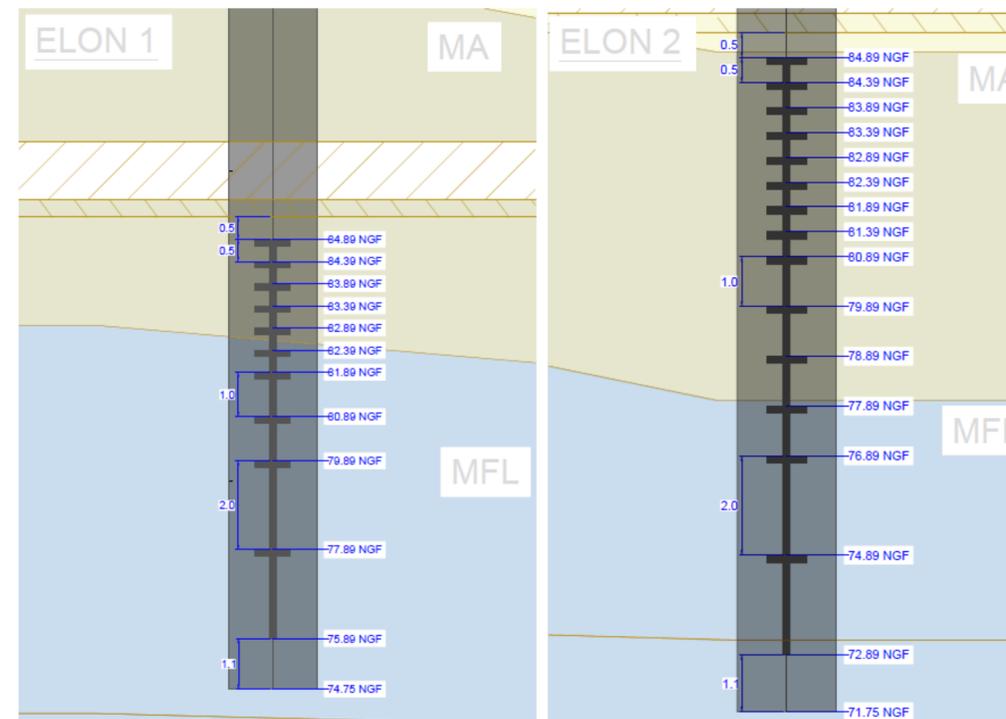
Deux types de CPI

- CPI classiques ( $u_w > 0$  kPa)
- CPI avec mesure de succion ( $u_w < 0$  kPa)



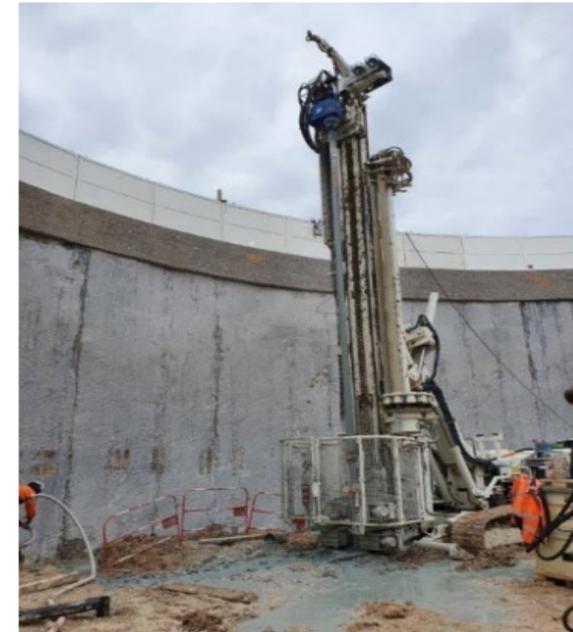
Elongamètres

- Mesure de déformation en fonction de la profondeur
- Ancrage dans les couches non gonflantes



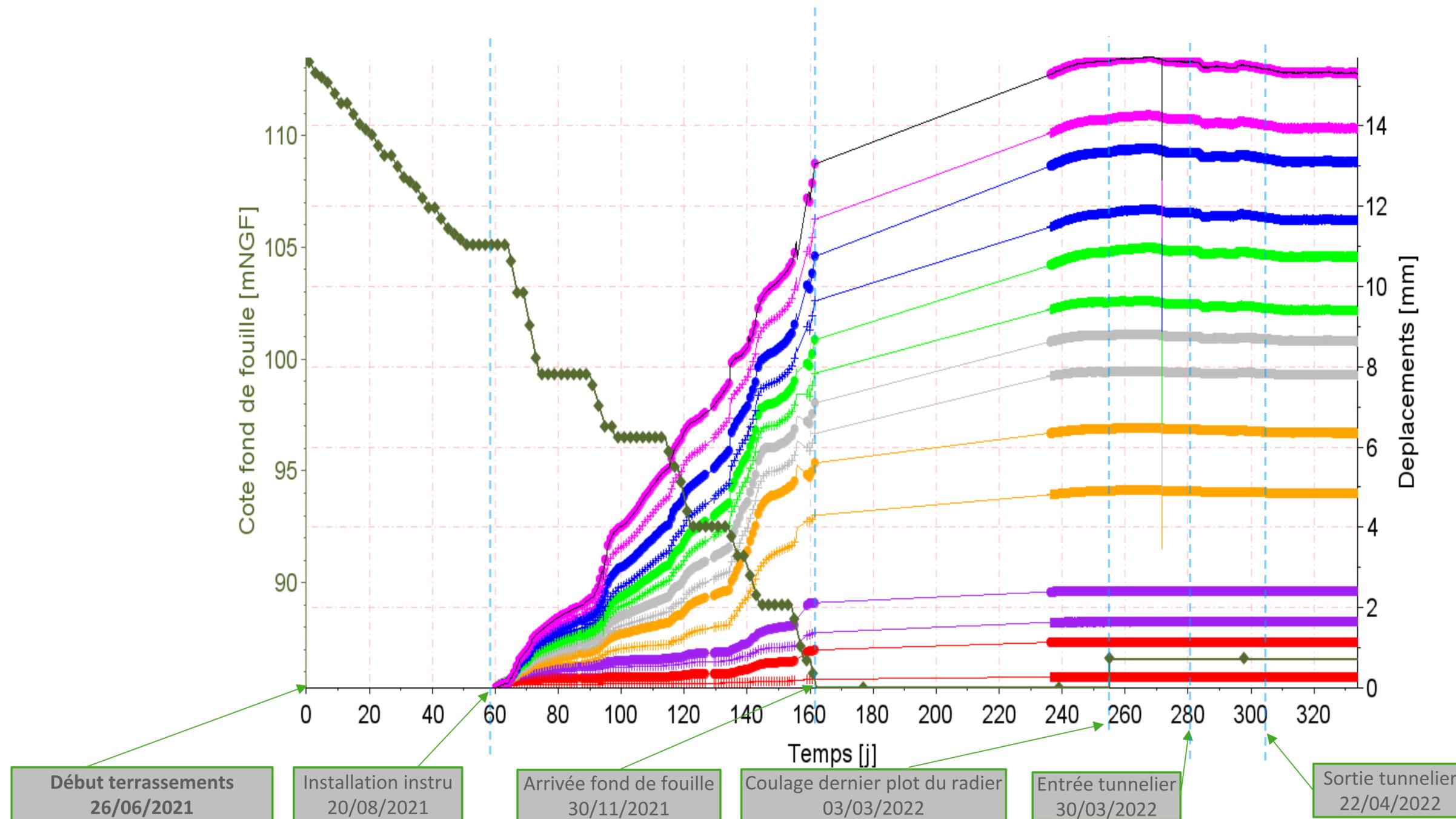
# Retour d'expérience de la gare de CMF

## E – INSTRUMENTATION MISE EN PLACE ET RESULTATS



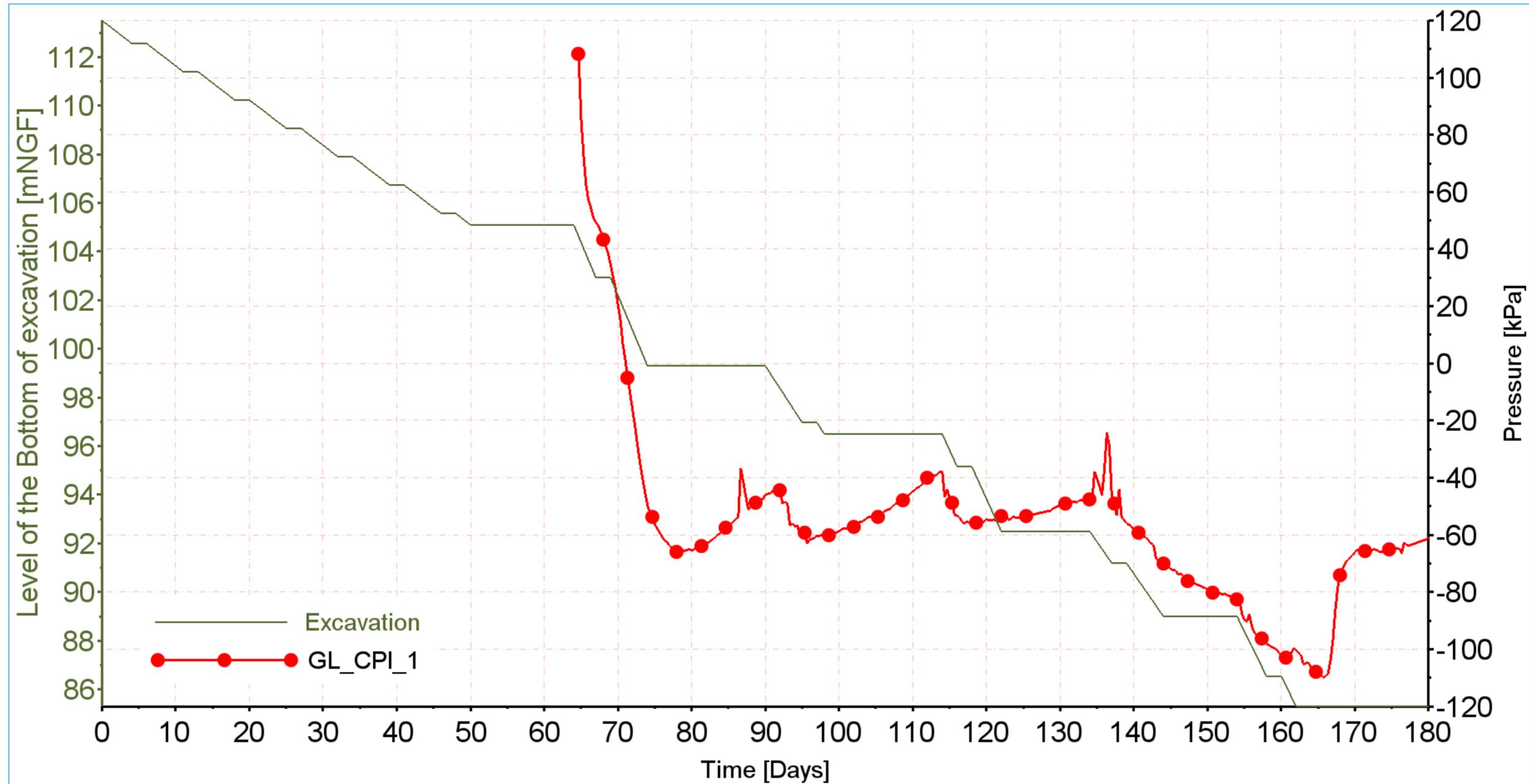
# Retour d'expérience de la gare de CMF

## E – INSTRUMENTATION MISE EN PLACE ET RESULTATS



# Retour d'expérience de la gare de CMF

## E – INSTRUMENTATION MISE EN PLACE ET RESULTATS



## E – INSTRUMENTATION MISE EN PLACE ET RESULTATS

### 3 phases de gonflement observées

#### ➤ Phases de terrassement

- Diminution de la pression interstitielle après chaque phase de terrassement
- Amorce de dissipation après chaque phase

#### ➤ Phase avant mise en place du radier

- Remontée de la pression interstitielle jusqu'à environ 0 kPa

#### ➤ Phase après mise en place du radier

- Augmentation instantanée de la pression interstitielle du fait de la mise en place du radier (chargement non drainé)
- Diminution du déplacement de gonflement du fait de la présence du radier

## F – CONCLUSION

### ➤ Travail fourni

- Prise en compte du gonflement au niveau du fond de fouille d'une gare enterrée
- Mise en œuvre de plusieurs techniques de prise en compte du gonflement notamment des ISS et convergence des résultats
- Mise à profit des réflexions sur CMF dans le cadre du GT: méthodes de calculs 4a et 4b et annexes dédiées
- Auscultation du phénomène de gonflement avant l'excavation afin de mesurer au cours du temps :
  - la variation de pression interstitielle
  - la déformation du sol sur une épaisseur importante sous le fond de fouille
  - la contrainte totale en sous face du radier

### ➤ Travail en cours

- Exploitation des données dans le cadre d'une thèse en cours de finalisation (Missom OUEDRAOGO)

### ➤ Perspective

- REX important pour la prise en compte du gonflement pour les ouvrages du grand Paris et d'ailleurs
- Publications futures sur les mesures et la prise en compte du gonflement