



**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

# Construire dans l'argile : Regard croisé Franco-Belge

## GUIDE CFMS et REX GPE

Grégory MEYER (EGIS)  
Erwan MOAL (SYSTRA)

**SYSTRA**

 **egis**

JOURNÉE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU 17/03/2026



# cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

# Guide sur la construction d'ouvrages profonds dans les argiles gonflantes

## REX Grand Paris Express

# Présentation des recommandations



[Recommandations sur la prise en compte du gonflement des terrains argileux pour la conception des infrastructures profondes \(2024\) | CFMS](#)

## GRUPE DE TRAVAIL

Animateurs		
LE BISSONNAIS	Hervé	Terrasol
SERRATRICE	Jean-François	Cerema
Membres du groupe de travail		
BEAUSSIER	Alexandre	Terrasol
BERNARDET	Alain	Arcadis
CAHN	Martin	Geos puis Terrasol
CARPINTEIRO	Luis	Ginger CEBTP
CUISINIER	Olivier	ENSG, Université de Lorraine
DELAGE	Pierre	Ecole des Ponts ParisTech, Navier - CERMES
DRONIUC	Nicolai	Fugro puis Socotec puis Colas
GERARDIN	Cécile	RATP
GOURIN	Gaël	Socotec
HALFON	Isabelle	Systra puis BRGM
LE BISSONNAIS	Hervé	Terrasol
MAGNAN	Jean-Pierre	Université Gustave Eiffel
MAHMUTOVIC	Dino	Egis Géotechnique
MAZARE	Bruno	Egis Géotechnique
MEYER	Grégory	Systra puis Egis Géotechnique
SERRATRICE	Jean-François	Cerema
TANG	Anh-Minh	Ecole des Ponts ParisTech, Navier - CERMES
VIDIL	Paul	Soletanche Bachy
Relecteurs externes		
BOUTONNIER	Luc	Egis Géotechnique
BURLON	Sébastien	Terrasol
PERSET	Vincent	Ginger CEBTP
Relecteurs Commission Scientifique et Technique du CFMS		
AGUADO	Pascal	Geotec
BRETELLE	Sylvie	Antea
PAVEL	Laetitia	Arcadis

➤ 18 membres (entreprises, universitaires, MOE, MOA, BE sol, bureau de contrôle)

➤ 2016 – 2024 (8 ans)

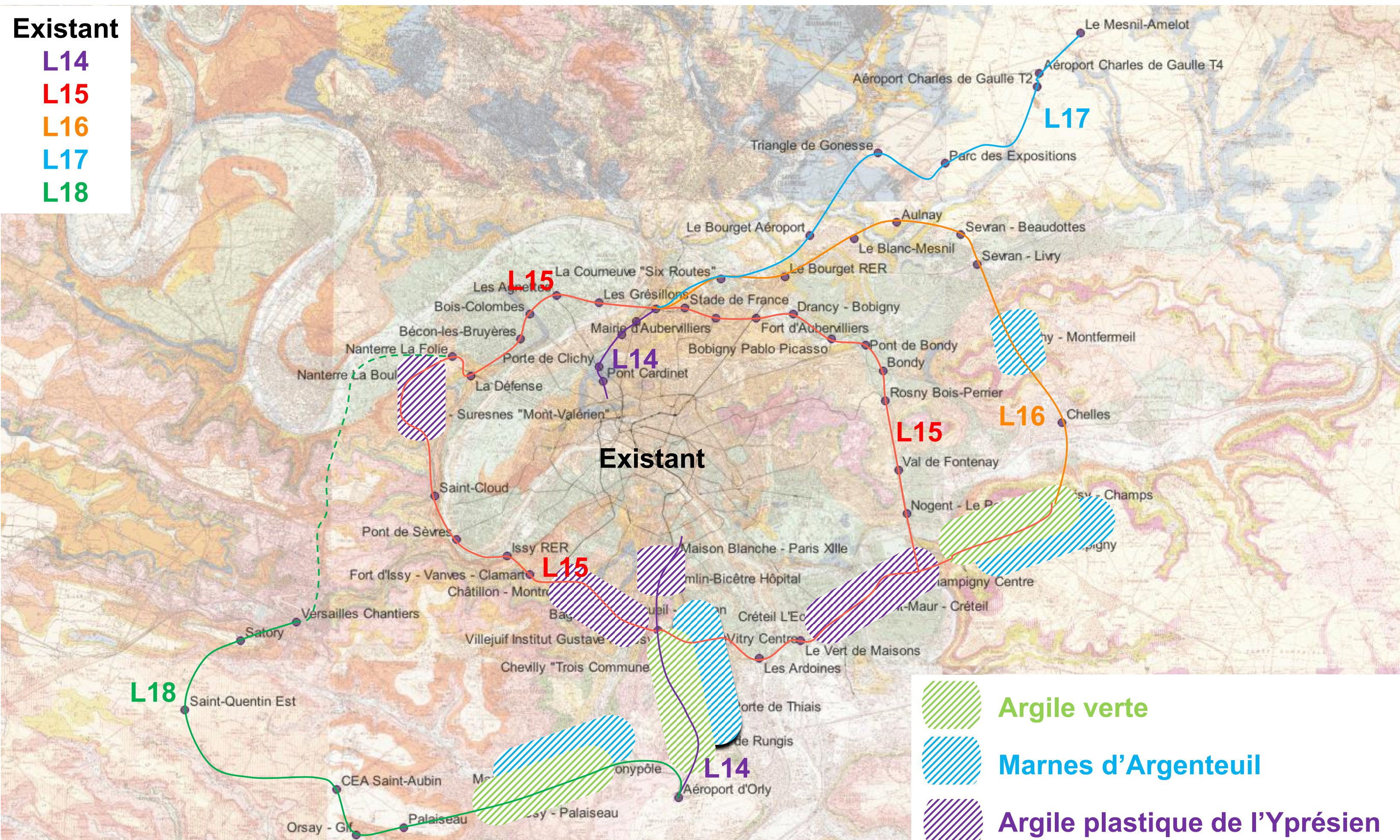
➤ 45 réunions plénières + 2 Sous-Groupes

➤ Sommaire :  
 Qu'est-ce qu'un terrain gonflant ?  
 Propriétés mécaniques des terrains gonflants  
 Cas des soutènements verticaux  
 Cas des radiers sur argiles gonflantes  
 Cas des tunnels  
 Cas des fondations profondes

# Domaine et limites d'application

- La recommandation concerne la conception et la réalisation des ouvrages en **interaction avec des terrains potentiellement gonflants**.
- ouvrages enterrés **de taille significative**.
- Il exclut la problématique de retrait/gonflement de surface sous les constructions superficielles.
- Etudes des fondations profondes, des écrans de soutènements, des tunnels et des radiers d'ouvrages enterrés à une profondeur suffisante pour que les terrains soient saturés et échappent aux phénomènes d'assèchement et de réhumidification liés aux variations climatiques.
- Le domaine de validité de ces recommandations ne concerne donc que les terrains **totalelement saturés**
- Sont également écartés des présentes recommandations :
  - les ouvrages construits à très grande profondeur (CIGEO...) : on se limite aux projets d'infrastructures jusqu'à une centaine de mètres de profondeur.
  - les terrains de type gypses, anhydrites, schistes cartons, ou encore les remblais et scories contenant de la chaux, (spécificités minéralogiques et donc comportementales variées nécessitant d'être traitées au cas par cas)
- Recommandations été établies principalement sur la base de l'expérience acquise en France. Leur utilisation dans d'autres pays est possible sous réserve de s'assurer de leur compatibilité avec les contextes géotechniques et normatifs locaux.

# Qu'est-ce qu'un sol gonflant ?



Grand Paris Express :  
200 km de lignes nouvelles  
4 nouvelles lignes (n°15 à 18)  
Mise en service 2026 – 2031

Sols concernés :  
Argile verte de Romainville  
Marnes d'Argenteuil  
Argile plastique de l'Yprésien

Diagramme de plasticité de sols Parisiens (selon la classification de la norme EN ISO14688-2)

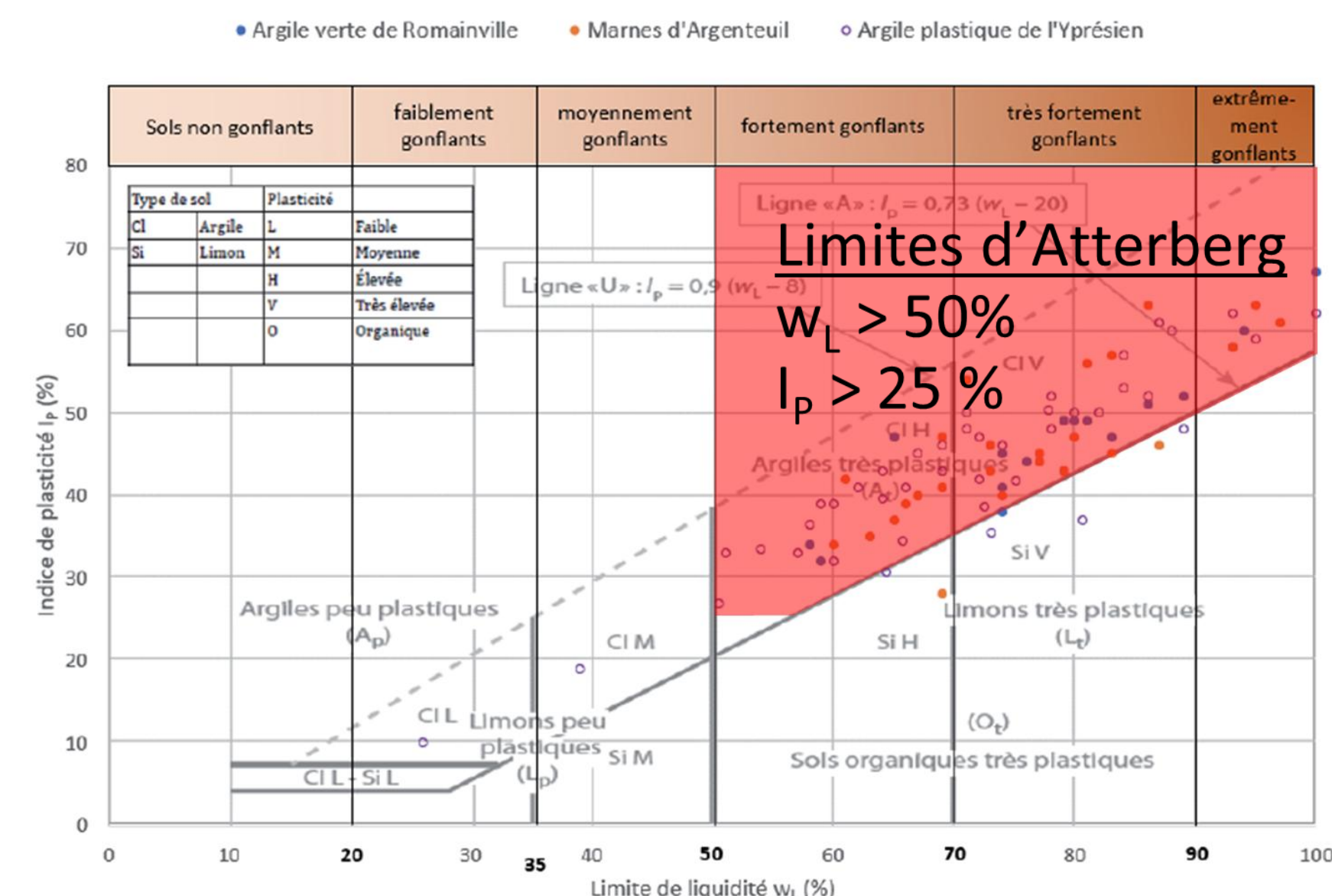


Figure 3 : Diagramme de plasticité de Casagrande pour certains sols parisiens – susceptibilité au gonflement

Modifié à partir de : E. Antoinet, ANTEA, Retour d'expérience sur l'évaluation du potentiel de gonflement des horizons argileux du Bassin Parisien, séance du 07/02/2019

# Caractérisation des sols gonflants

Tableau 4 : Proposition du nombre d'essais minimum d'identification et de gonflement

Ouvrages	Géométrie	Épaisseur de la couche susceptible de gonfler	Essais d'identification*	Essais œdométriques de gonflement
Soutènements	Pas d'essai de gonflement (voir la justification au chapitre 4)			
Radiers	Surface < 500 m <sup>2</sup>	< 5 m	3	2
		> 5 m	5	4
	Surface > 500 m <sup>2</sup>	< 5 m	5	4
		> 5 m	7	6
Pieux	Nombre < 50	< 5 m	3	2
		> 5 m	5	4
	Nombre > 50	< 5 m	5	4
		> 5 m	7	6
Tunnel**	Longueur en formation gonflante < 500 m	< 5 m	3	1 par 100 m, minimum de 2
		> 5 m	5	2 par 100 m
	Longueur en formation gonflante > 500 m	< 5 m	5	2 par 500 m
		> 5 m	7	4 par 500 m

\* Limites de consistance, granulométrie, sédimentométrie, caractéristiques d'état (teneur en eau et masse volumique)

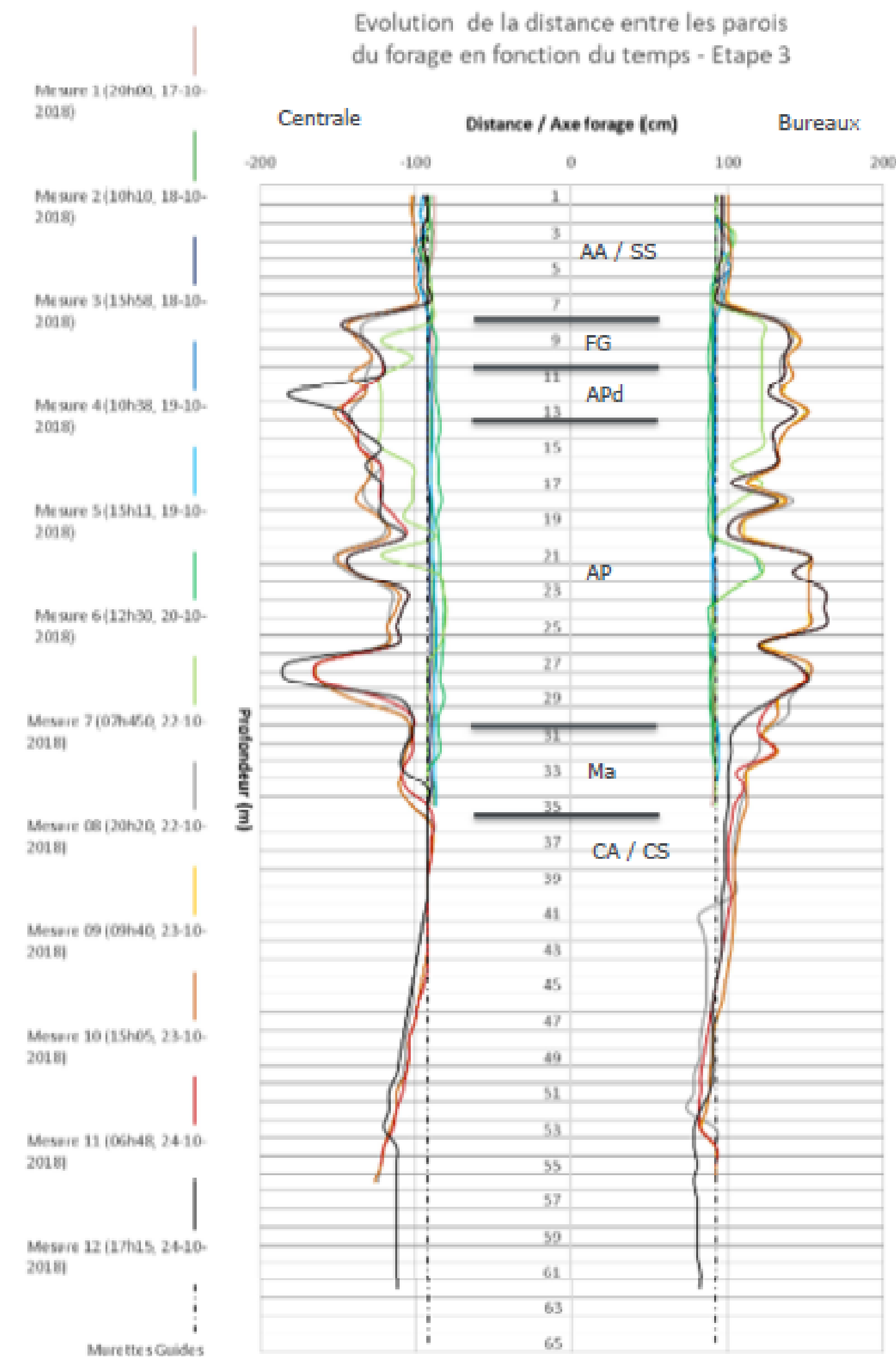
\*\* Le cas des fronts mixtes peut être traité comme celui d'un sol gonflant d'épaisseur limitée

- Essais œdométriques Huder-Amberg (attention à ne pas retenir la pression de gonflement des essais, systématiquement supérieure à  $\sigma'_{v0}$ )
- Essais œdométriques en parallèle avec procédure spécifique dans le guide (cycle de rechargement / déchargement)
- Attention aux conditions de prélèvement et à la désaturation des éprouvettes
- Postulats :  
La pression de gonflement est une contrainte effective

$$\sigma'_g \leq \sigma'_{v0}$$

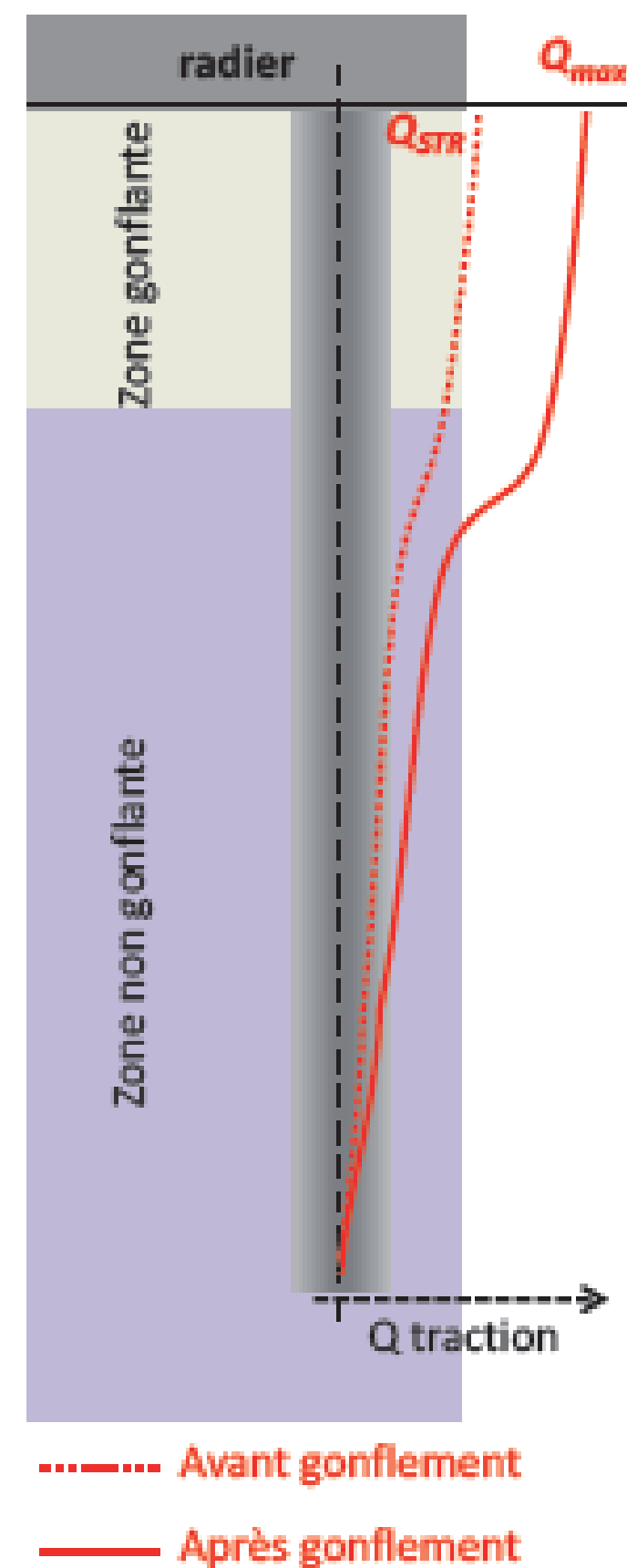
# Cas des parois moulées

- Absence de pathologies avérées sur des soutènements de grande hauteur instrumentés dans de nombreux terrains gonflants saturés (Argiles plastiques, Stampien marseillais, Argiles des Flandres, etc.)
- Lié à :
  - Terrains saturés
  - L'absence d'hydratation des terrains lors du forage des PM (cake)
  - Variation des contraintes sphériques modérées
- Retour à  $K_0$  non imposé vis-à-vis du gonflement
- L'incidence d'éventuelles poussées de gonflement additionnelles est donc négligeable (Réflexions suite à la L11)
- Par contre, attention aux temps d'ouverture des panneaux (REX GPE) et à l'enrobage des cages



# Cas des fondations profondes

Efforts dans le pieu

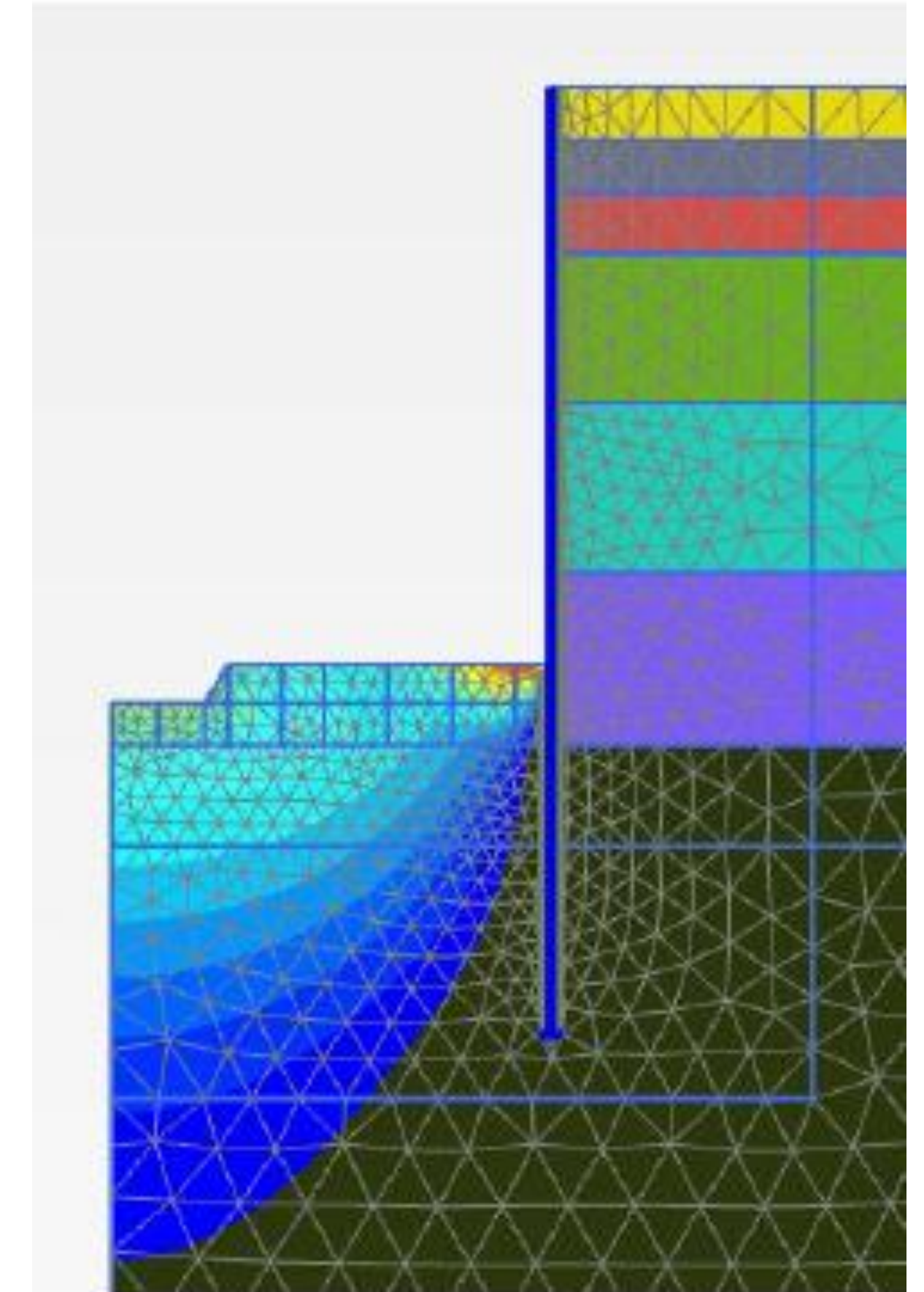


➤ Retours d'expériences :  
Privilégier les fondations **ancrées au-delà de la zone gonflante**

Sous réserve de prise en compte des efforts parasites, assez **peu de pathologies**

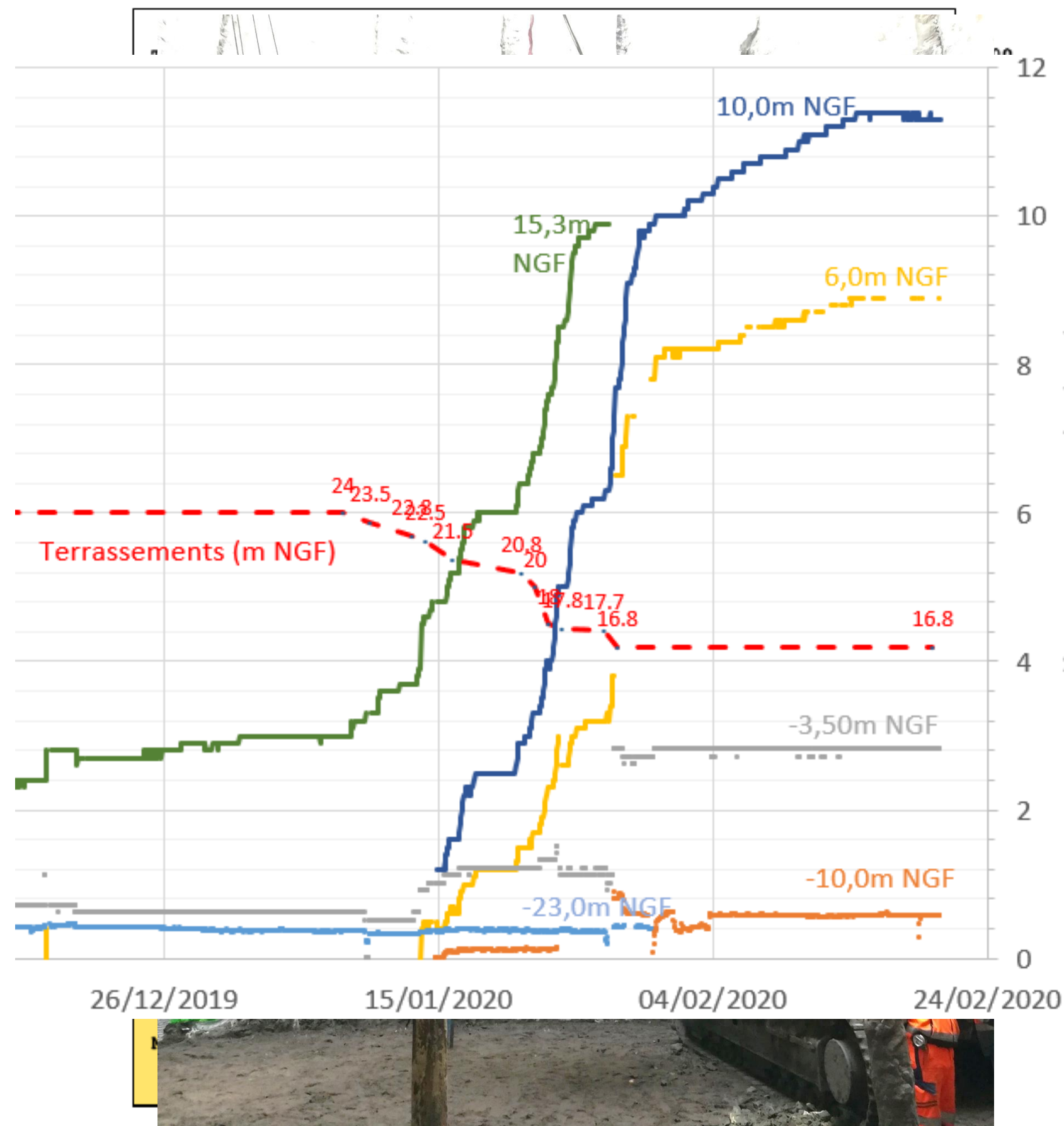
➤ **Calculs en déplacements** pilotés par :  
La charge en tête de pieu  
Le profil de gonflement libre  
Les lois de mobilisation du frottement en fonction du déplacement sol/pieu

➤ Calculs aux éléments finis



# Cas des radiers

## REX 1 : fouille GPE – déformations instantanées



➤ Déchargement « mécanique » centimétrique (absorbé au fur et à mesure des terrassements)

$C_{su}$

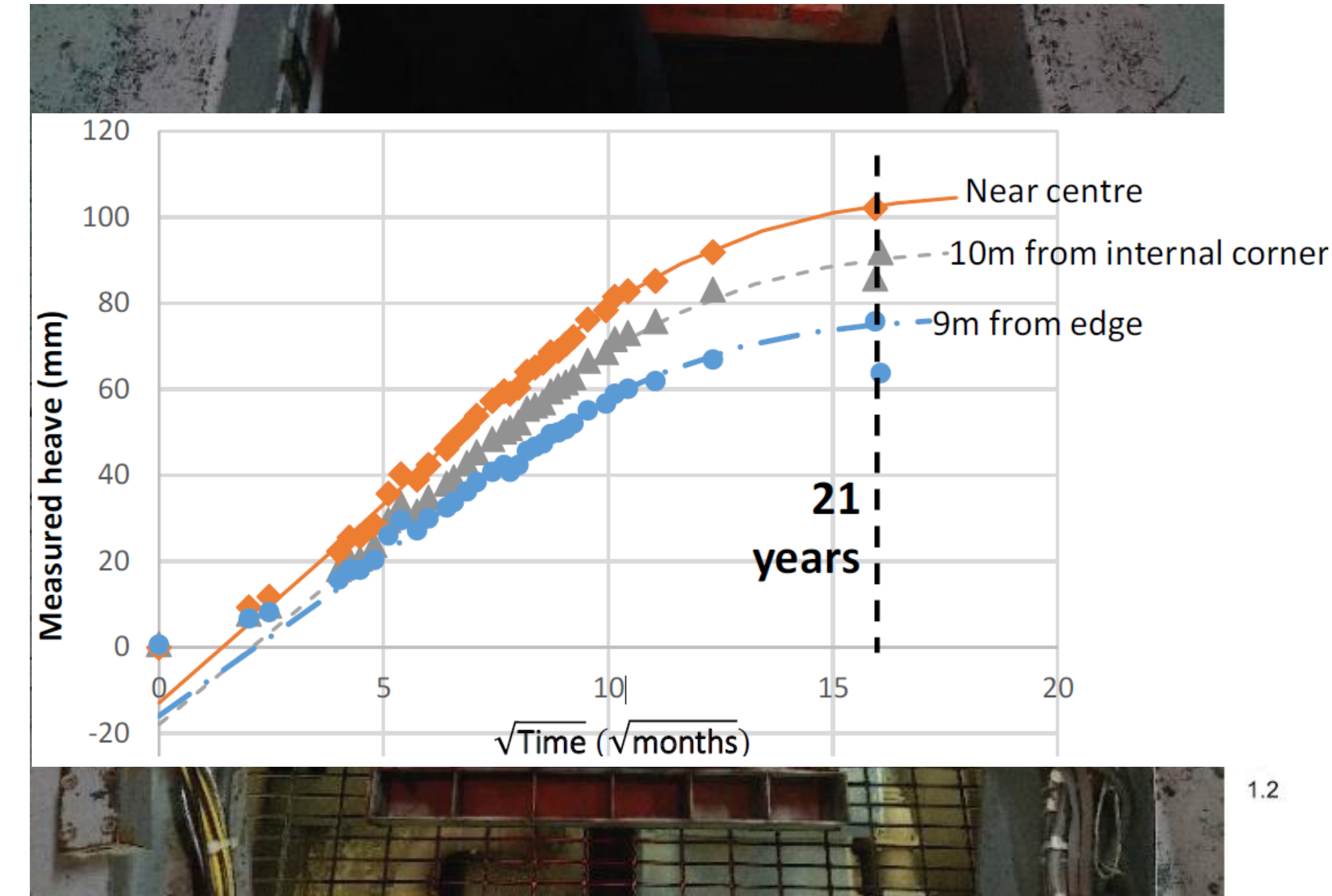
➤ Fouille de 11m abandonnée, suivie 21 ans (1968 – 1989)

➤ Soulèvement de 10,5 cm à  $U = 95\%$

➤ Déchargement avec apport d'eau, dit « hydrique »  $C_g$

➤ Utilisation du facteur de gonflement  $K_g = C_g - C_{su}$

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

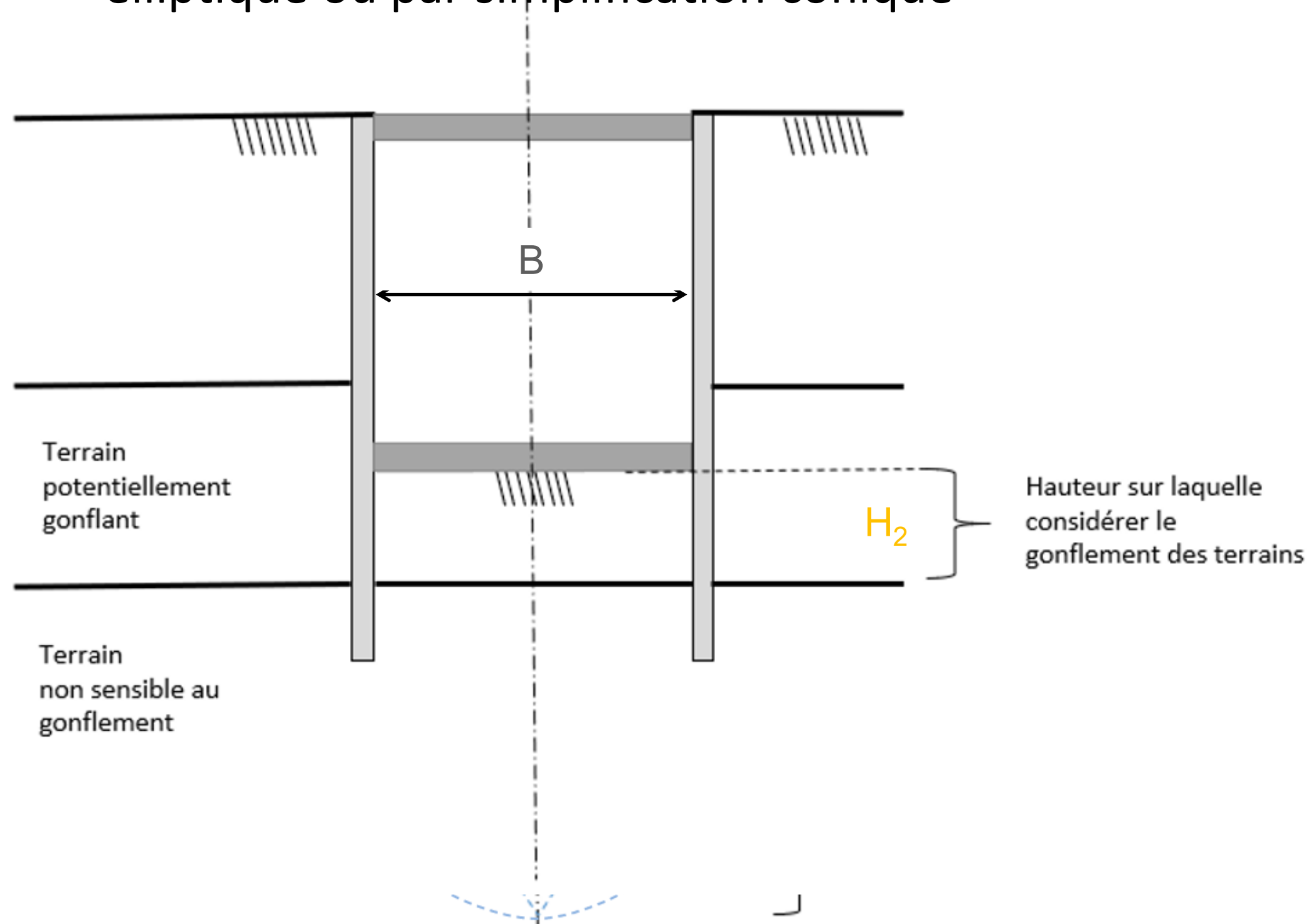


[Technical paper: Twenty-one years of heave monitoring in London Clay at Horseferry Road basement | Ground Engineering \(geplus.co.uk\)](#)

# Cas des radiers

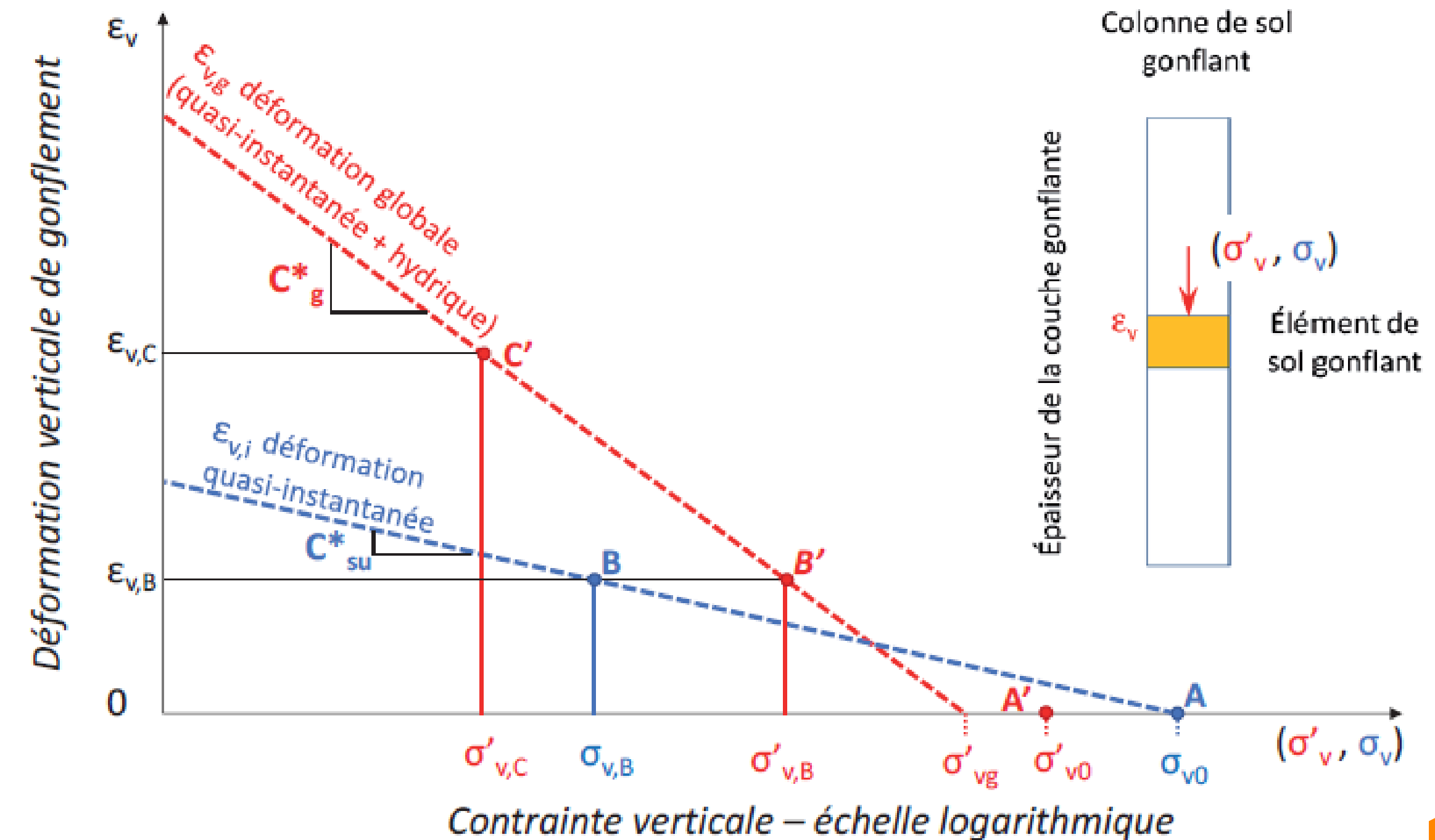
## Géométrie zone gonflante

- Amplitude du gonflement liée à l'épaisseur de sol gonflant :
  - $H_1 < 1$  m : effet négligeable (ou purge de  $H_1$ )
  - $H_2 < \text{fiche}$  : zone gonflante =  $B \times H_2$
  - $H_3 > \text{fiche}$  : zone gonflante limitée à  $3V / 2 H_3$  en forme elliptique ou par simplification conique



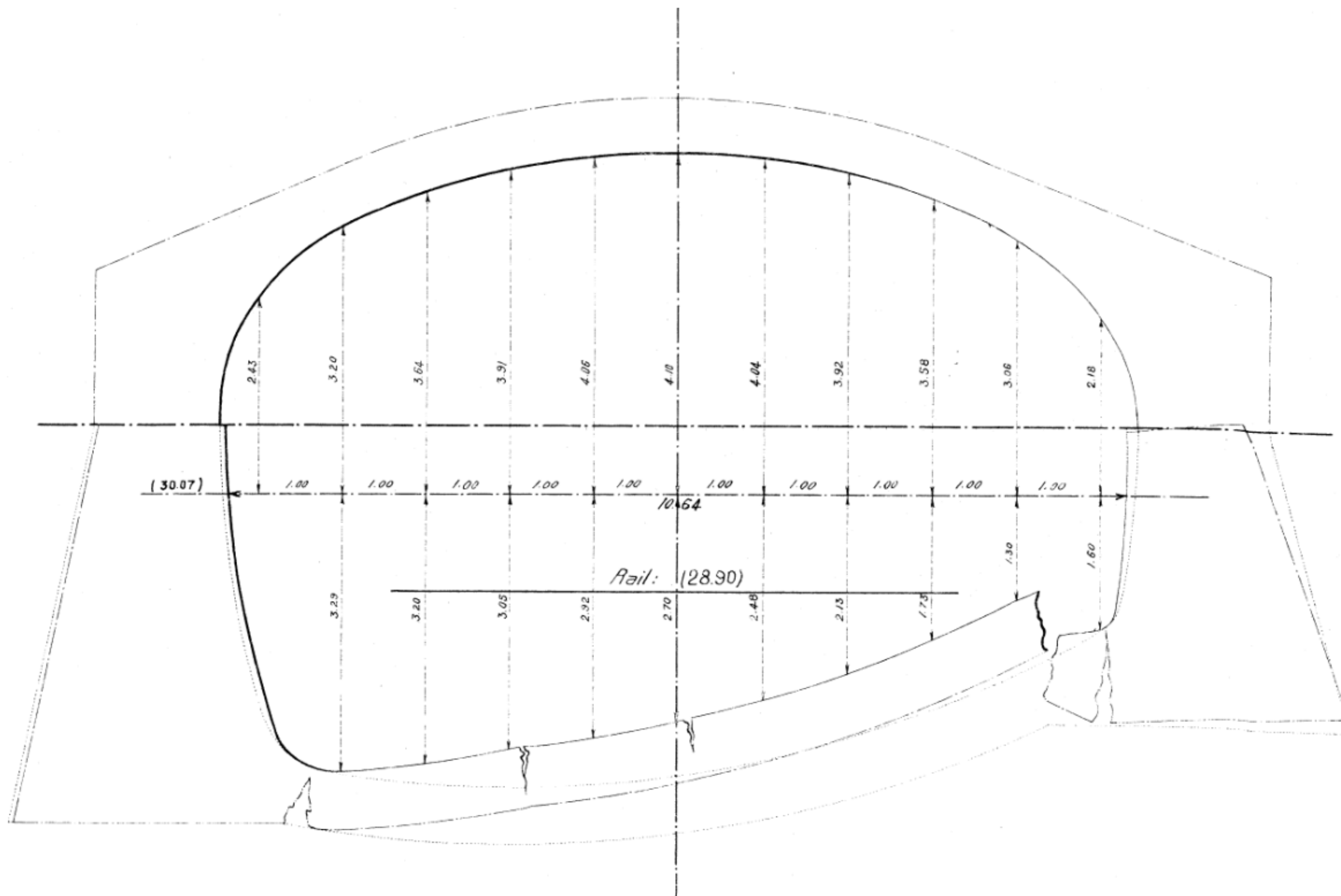
## Équation œdométrique

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



# Cas des tunnels et ouvrages souterrains

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



- Gonflement localisé au niveau des radiers (cf. slides sur les radiers)
- Les creusements au tunnelier sont moins problématiques que les creusements en méthode conventionnelle
- Zone de gonflement à choisir entre :
  - Rayon plastique
  - Déformation volumique positive
  - Contrainte  $< \sigma'_g$
  - Discrétisation à envisager
- 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)

# Cas des tunnels et ouvrages souterrains

## Méthode de convergence-confinement

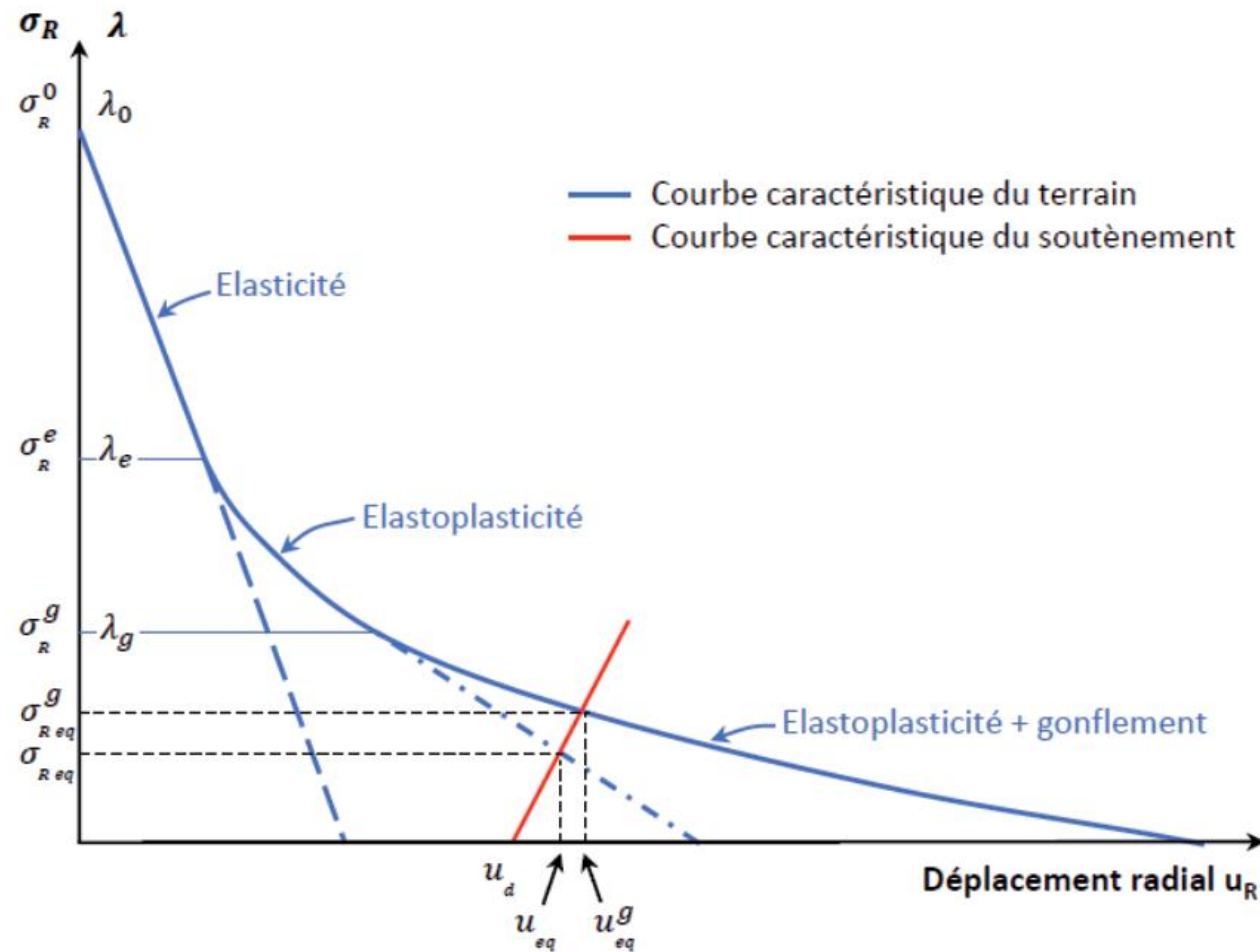
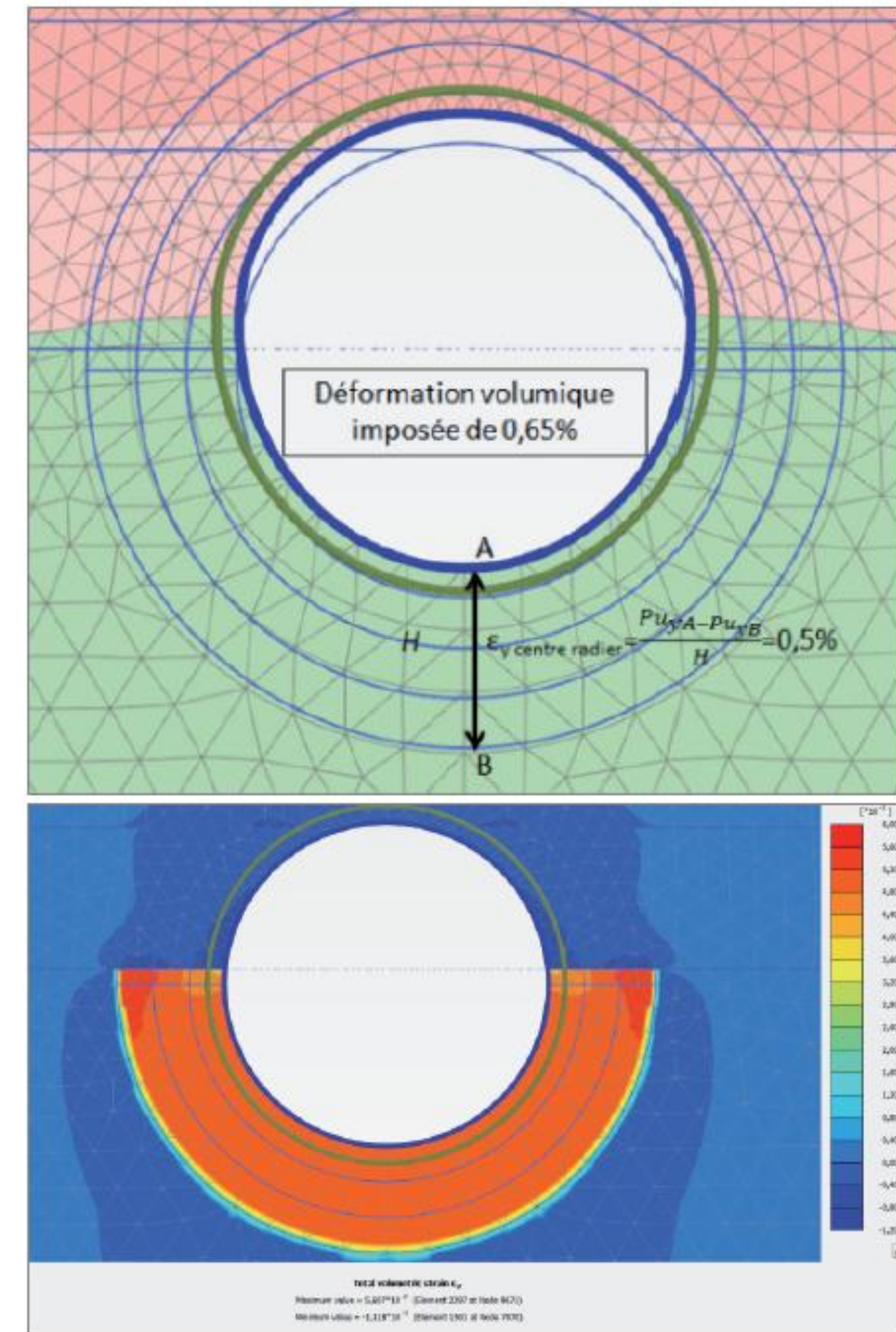


Figure 43 : Courbe convergence-confinement avec prise en compte du gonflement (Bultel, 2001)

## Méthodes numériques





# cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

## Guide sur la construction d'ouvrages profonds dans les argiles gonflantes

### REX Grand Paris Express

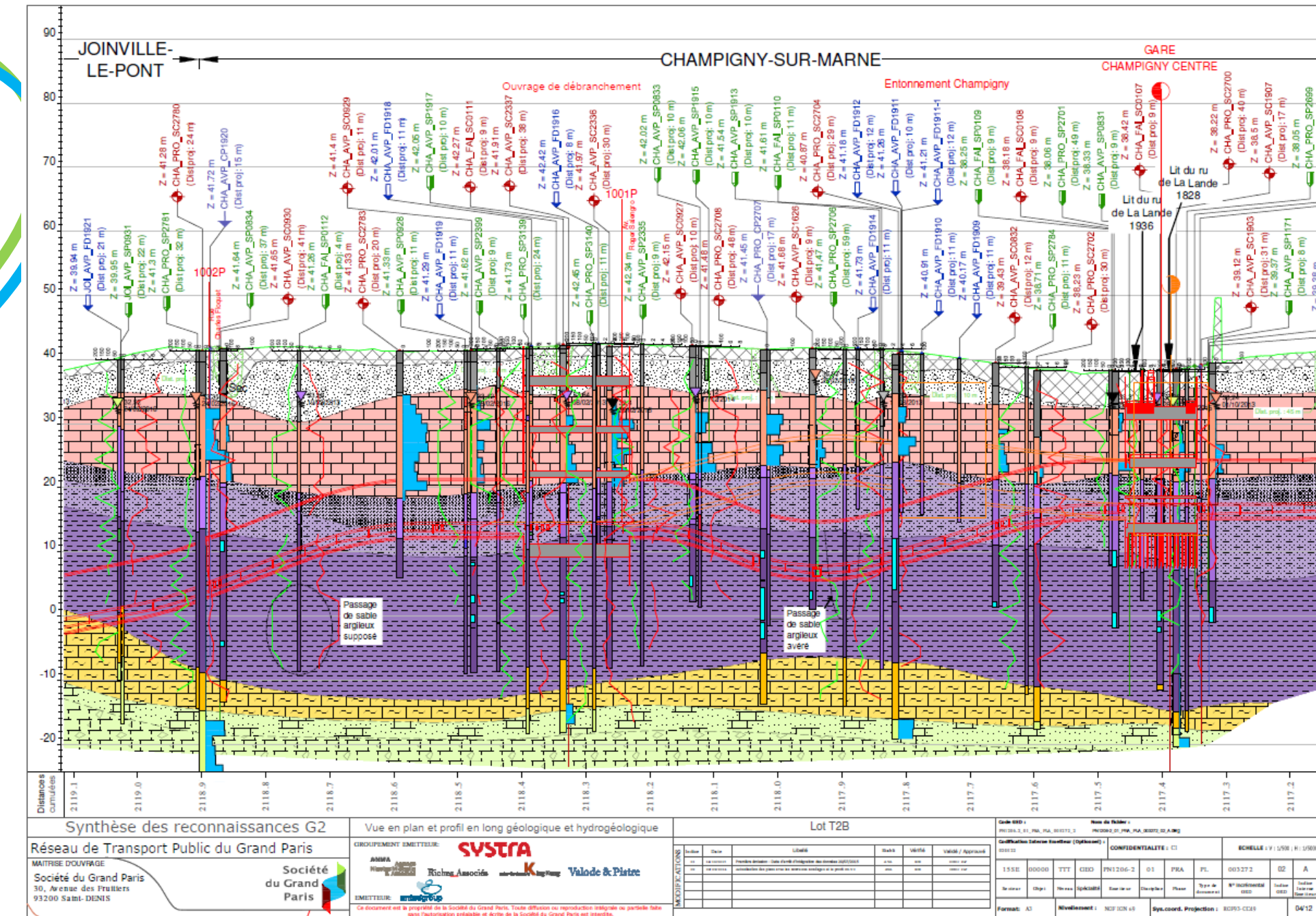
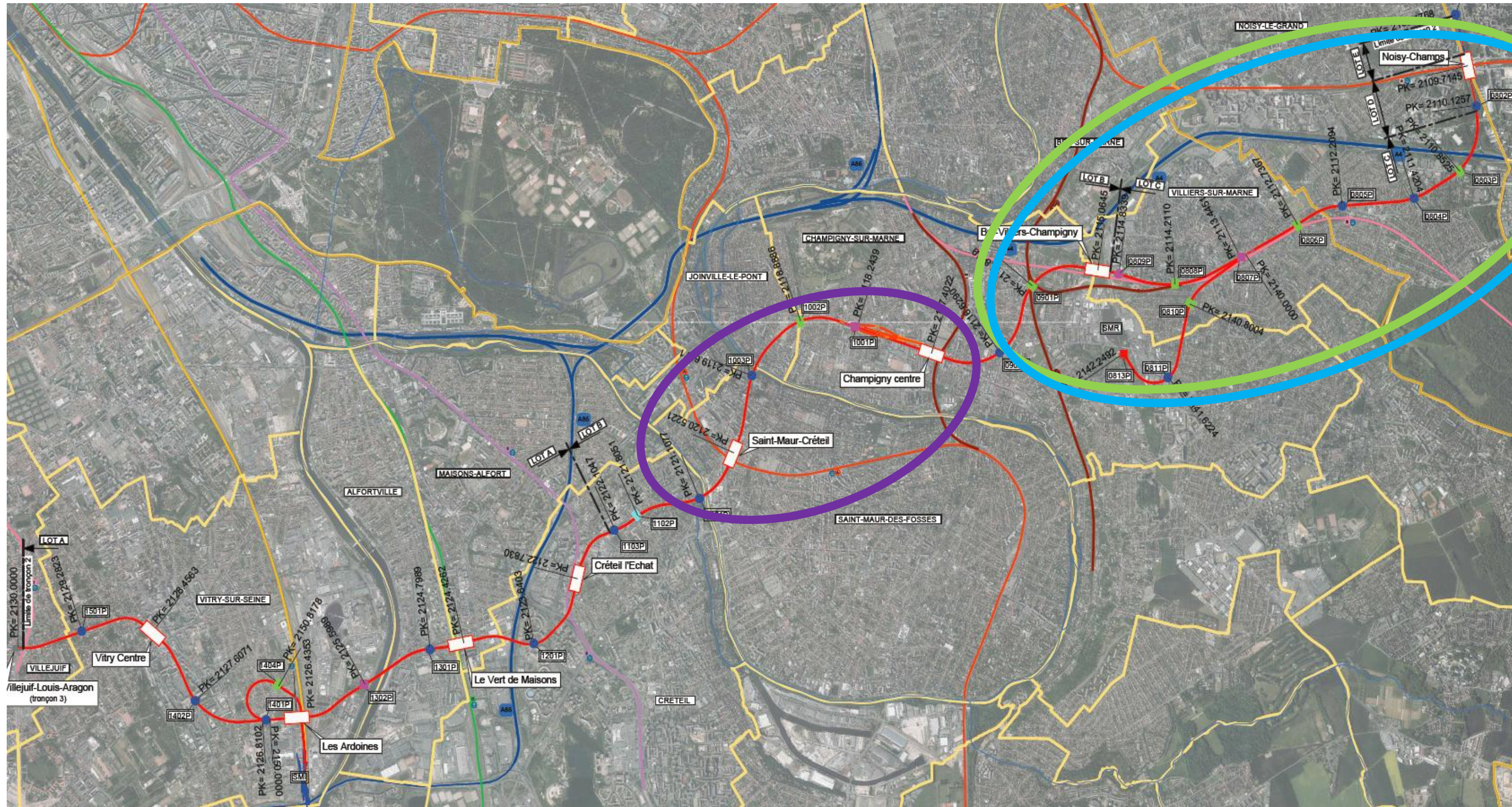
# REX Grand Paris Express – Tronçon T2 Ligne 15



- 21 km de Villejuif-Louis Aragon (station exclue) à Noisy-Champs (station incluse)
- 8 stations
- 27 ouvrages annexes
- 24 km de tunnels – 7 tunneliers

# REX Grand Paris Express – Tronçon T2 Ligne 15

Terrains argileux identifiés comme potentiellement gonflants sur le tronçon T2 de la L15 du GPE



Argile verte

Marnes d'Argenteuil

Argile plastique de l'Yprésien

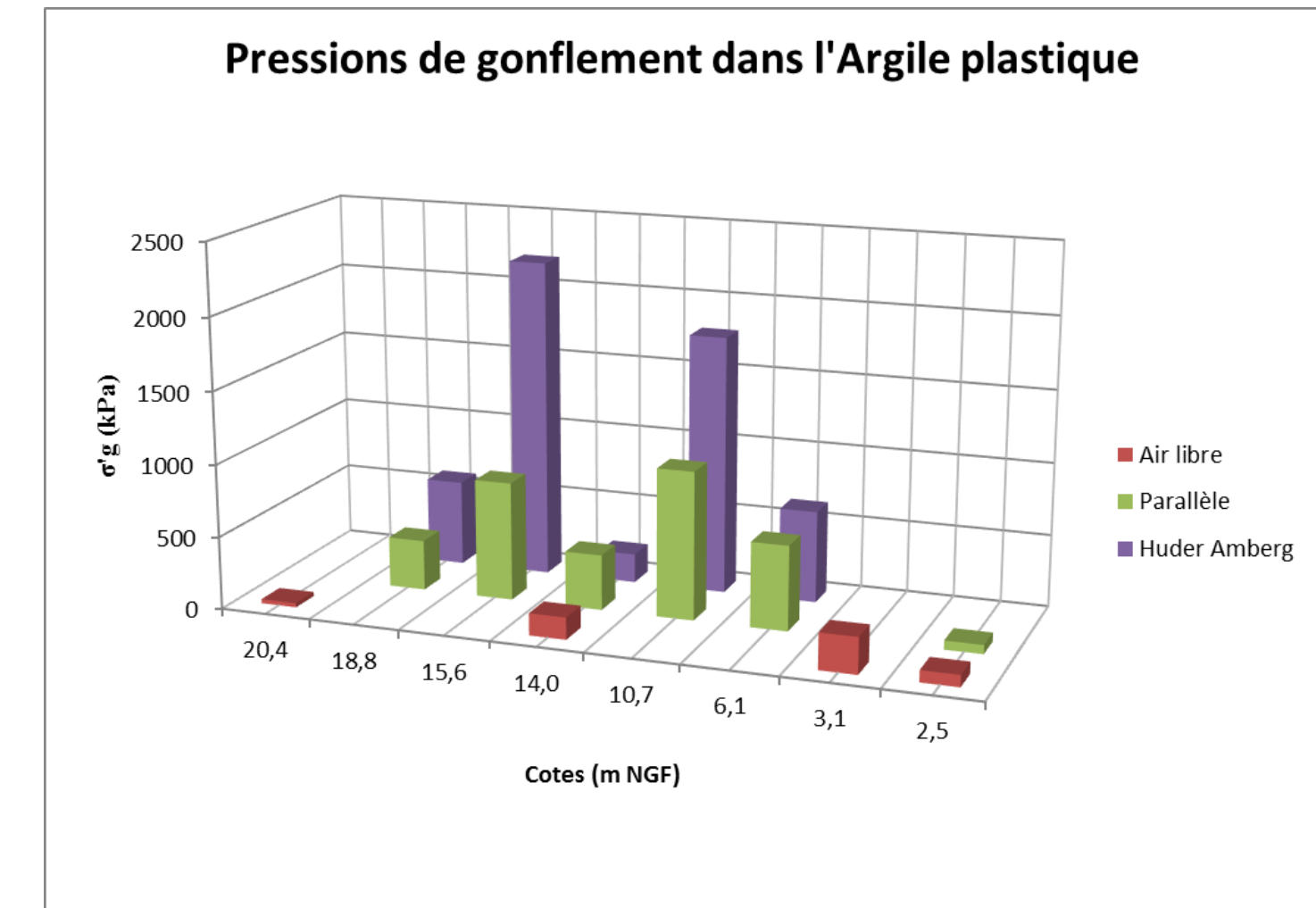
- 2 km de tunnel au tunnelier concernés par les Argiles plastiques, 4 Ouvrages annexes, un ouvrage d'entonnement (1001P) et la gare de Champigny Centre (CHC)
- Gare de Noisy-Champs (NCH) et débranchement L16 : radiers dans les Marnes d'Argenteuil et Argile Verte

# REX Grand Paris Express – Tronçon T2 Ligne 15

## Cahier B – essais de gonflement

- Essai à l'air libre (norme essai œdométrique classique XP P94-090-1)
- Essai de gonflement en parallèle (norme XP P94-091)
- Essai Huder Amberg (pressions de gonflement jugées non exploitables) :
  - Premier cycle de chargement déchargement jusqu'à  $\sigma'_{v0}$
  - Hydratation à pression constante
  - Déchargement par paliers sur une même éprouvette
- **Pression de gonflement à prendre en compte pour les calculs des radiers donnée au cahier B**

Terrain	Pression de gonflement retenue $\sigma'_g$
Argile Verte	150 kPa
Marnes d'Argenteuil	300 kPa
Argiles Plastiques	300 kPa



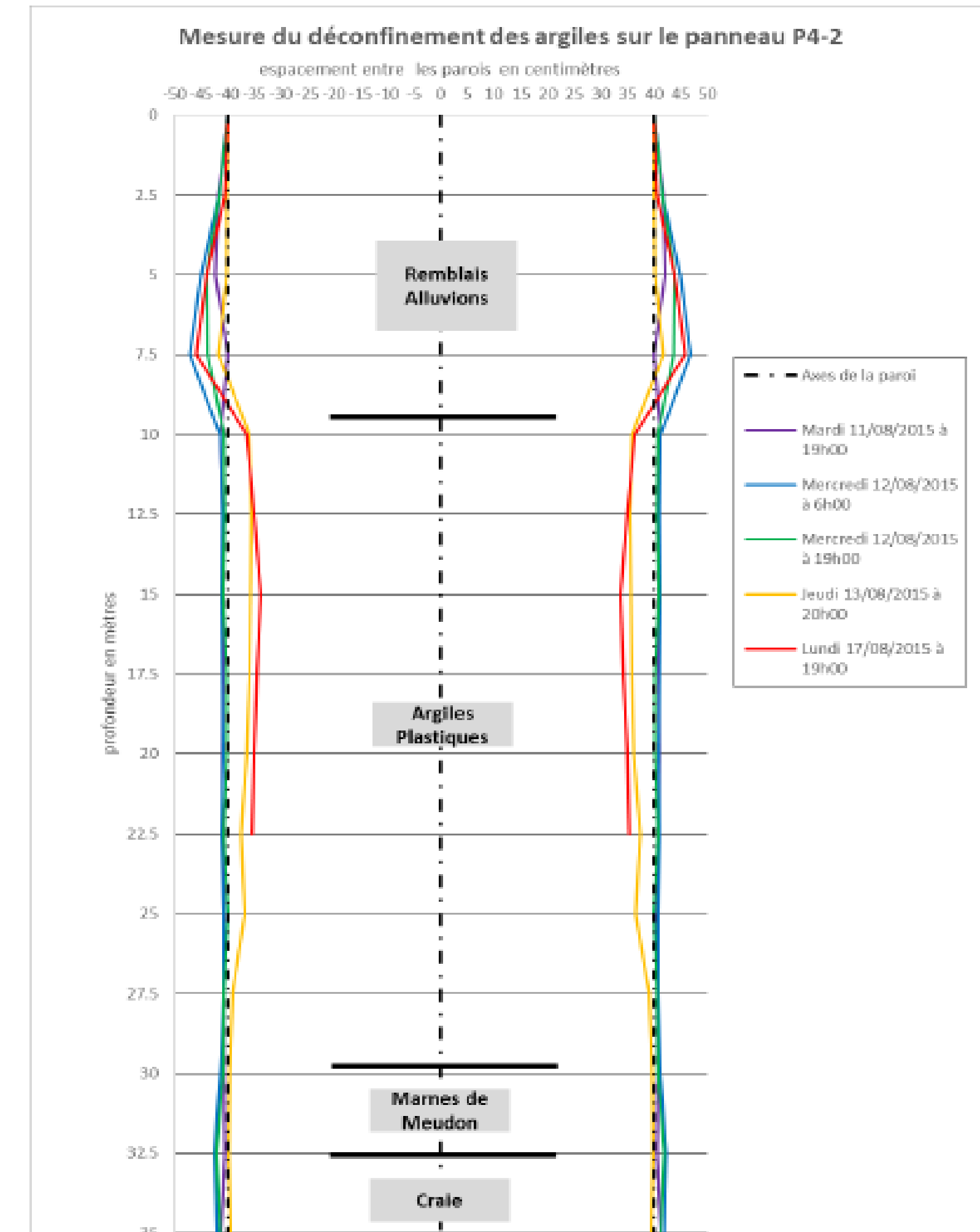
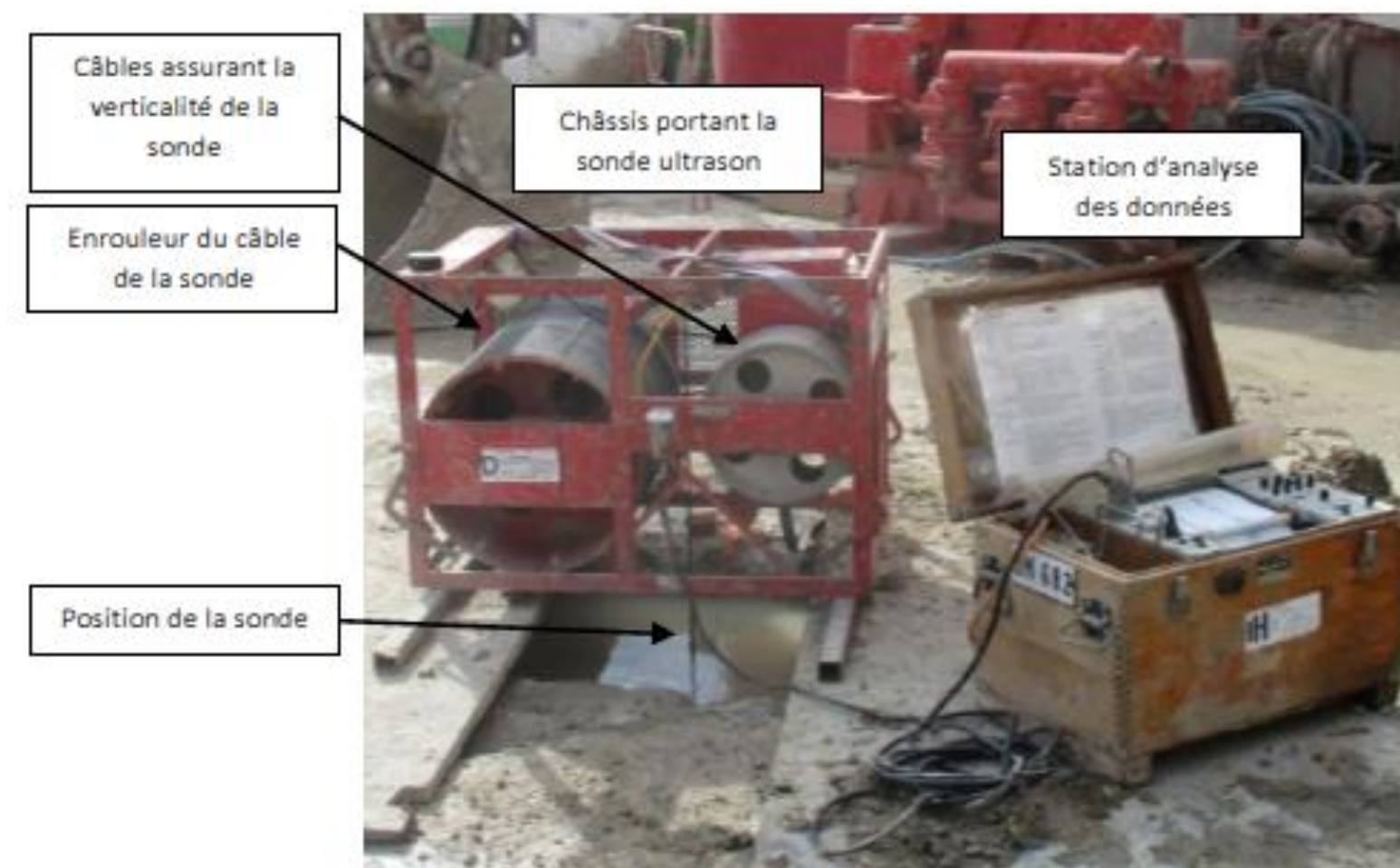
# REX Grand Paris Express – Parois moulées

## Evaluation du risque de resserrement des Argiles Plastiques lors du forage des parois moulées sous bentonite: blocage de l'outil, défaut d'enrobage

- Essai KODEN (mesures par ultrasons type sonar) : relation entre temps d'arrivée de l'onde et les dimensions du panneau.
- 2 campagnes d'essais : puits d'essai Saint Maur (2015), Barrette d'essai gare SMC

En conception : Puits d'essai Saint Maur

- Panneau test 2,7m x 0,8m mesuré à plusieurs intervalles de temps
- Resserrement des AP nul < 24h, puis de 10 cm entre 24/48h et de 12cm en 120h (5j de mesures)



# REX Grand Paris Express – Parois moulées

En exécution : Gare de Saint Maur Créteil

- Barrette d'essai de 2,8m x 1,84m : dimensions mesurées à plusieurs intervalles de temps sur 7j
- Mesures Kodex + 2 inclinomètres de part et d'autre de la barrette

- Trois phases : 0–56 h **resserrement faible des AP** ; 56–132/146 h déplacements accélérés et éboulements ; 146–177 h stabilisation.
- Éboulements au sein des argiles liés à l'excavation et à l'accélération du resserrement des AP.
- Les inclinomètres captent mieux le resserrement que le Kodex, biaisé par les éboulements.

Horizons	Prof (m)	13:30	28:00	32:00	50:30	56:00	76:30	120:00	132:30	146:00	152:00	167:00
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
AA	2	0	-3	-8	-8	-8	-4	-5	-18	-22	-22	-9
	4	0	-2	-12	-12	-14	-17	-17	-19	-21	-21	-11
	6	-3	-4	-13	-13	-17	-2	-4	-12	-21	-21	-6
SS	7	-1	-2	-3	-3	-9	2	-1	-11	-20	-20	-6
FG	10	-1	-2	-3	-3	-2	4	-47	-89	-95	-95	-89
AP	12	-1	-1	-3	-3	-1	5	-64	-87	-95	-95	-81
	14	-1	0	-4	-4	0	8	-64	-106	-112	-112	-99
	16	-1	0	-4	-4	-1	7	-44	-79	-84	-84	-79
APd	18	-1	0	-3	-3	-1	8	-37	-79	-80	-80	-59
	20	0	1	-3	-3	0	7	-9	-52	-50	-50	-33
	22	0	1	-2	-2	2	-24	-44	-119	-116	-116	-107
	24	0	1	-3	-3	1	4	3	-88	-84	-84	-89
	26	0	2	-1	-1	3	10	5	-76	-74	-74	-73
	28	-1	2	-3	-3	1	8		-133	-133	-133	-128
	30	-1	2	-3	-3	0	8		-84	-77	-77	-59
Ma	32	-1	0	-3	-3	-2	5	Eboulis	-47	-51	-51	-47
	35	-1	0	-2	-2	0		Eboulis	-37	-39	-39	-29
CA	37								-14	-16	-16	-10
	39								-15	-15	-15	-11
	41								-6	-16	-16	-13
Cr	43								-2	-15	-15	-9
	45								-7	-14	-14	-6
	47								-8	-13	-13	-8
	49								-8	-14	-14	-9
	51								-8	-17	-17	-9
	53								-17	-18	-18	-15
	55								-33	-33	-33	-33
	57								-36	-38	-38	Eboulis
	59								Arrêt de la sonde			
	61											
62												

Nuances de bleu/valeurs positives : resserrement  
Nuances de rouge/valeurs négatives : éboulements

## Dispositions mise en œuvre sur la L15 T2 :

- Augmentation de l'enrobage des cages d'armatures (8 cm → 12 cm)
- Planning de bétonnage des panneaux strict : limiter temps d'ouverture d'un panneau, réalésage soigné
- Risque de surconsommation de béton
- Pas de retour à  $K_0$  ni de pression additionnelle sur les PM

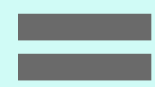
# REX Grand Paris Express – Radiers

## Radier sur vide sanitaire

- Mise en place d'un vide → gonflement libre
- Epaisseur du vide à calculer en fonction des essais œdométriques
- Plusieurs techniques possibles :
  - Coffrage perdu dégradable (Biocofra® ou équivalent)
  - Coffrage perdu non dégradable (Iglu® ou équivalent)
  - Lit de sable retiré après prise du radier (Gare Arcueil-Cachan - L15S)



Pression de contact totale



$u_w$

Amplitude du soulèvement à déterminer



- Radier locaux technique Gare NCH dans les Argiles Vertes.
  - Écrasement d'un matériau fusible type Cellcore® – coffrage perdu alvéolaire en polystyrène
  - En cas de soulèvement, le matériau casse et laisse un vide libre pour le gonflement

# REX Grand Paris Express – Radiers

## Radier sur matériau compressible

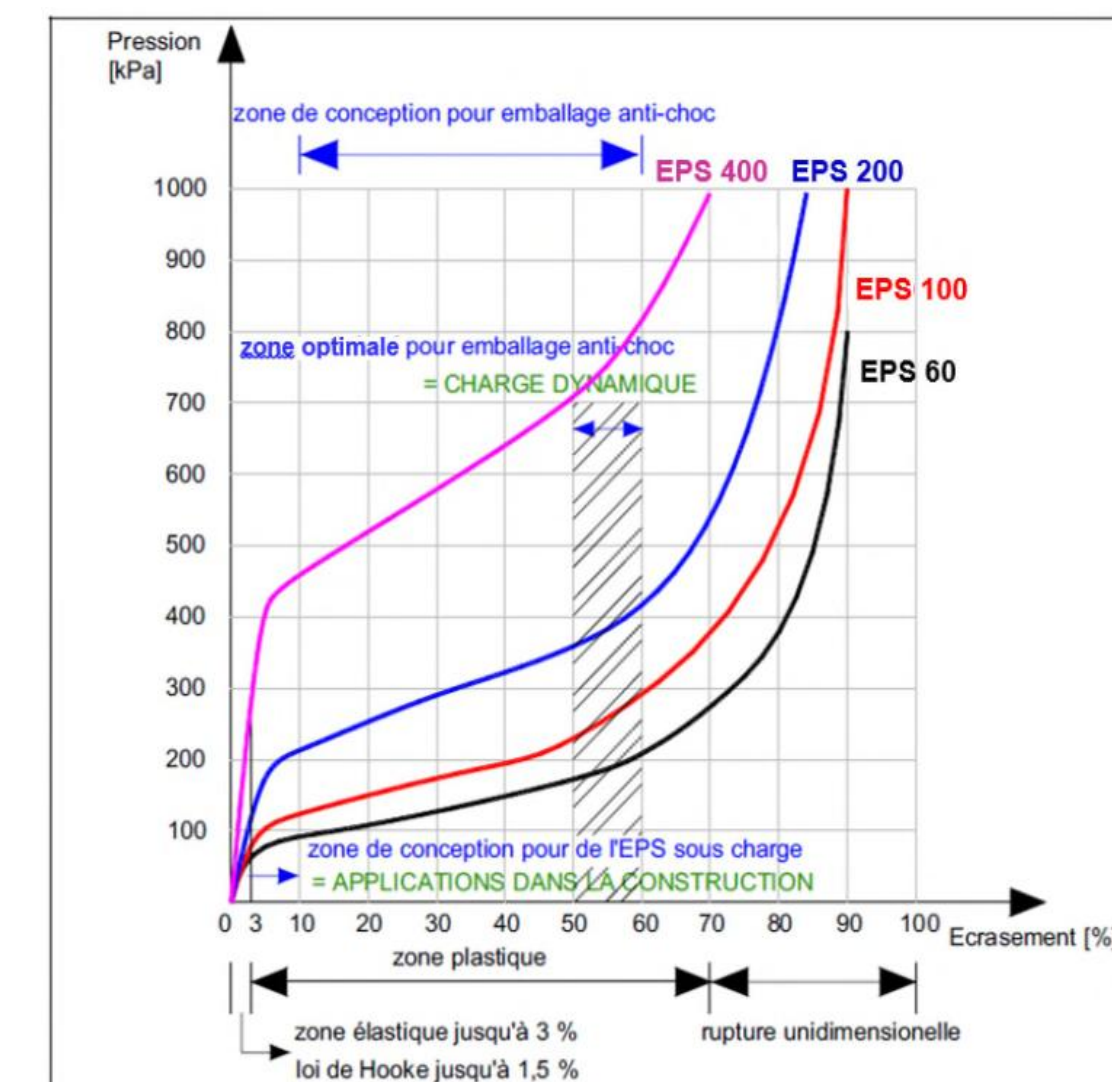
- Radier Gare NCH
  - Écrasement d'un matériau fusible (polystyrène)
  - Classe de polystyrène (NF EN 13163) en fonction de  $u_w$  et de  $G + Q$
  - Dimensionnement pour reprendre : max (pf du matériau ;  $u_w$ )

Pression de contact totale

=

Max : [pf(polystyrène) ;  $u_w$ ]

Amplitude du soulèvement à déterminer

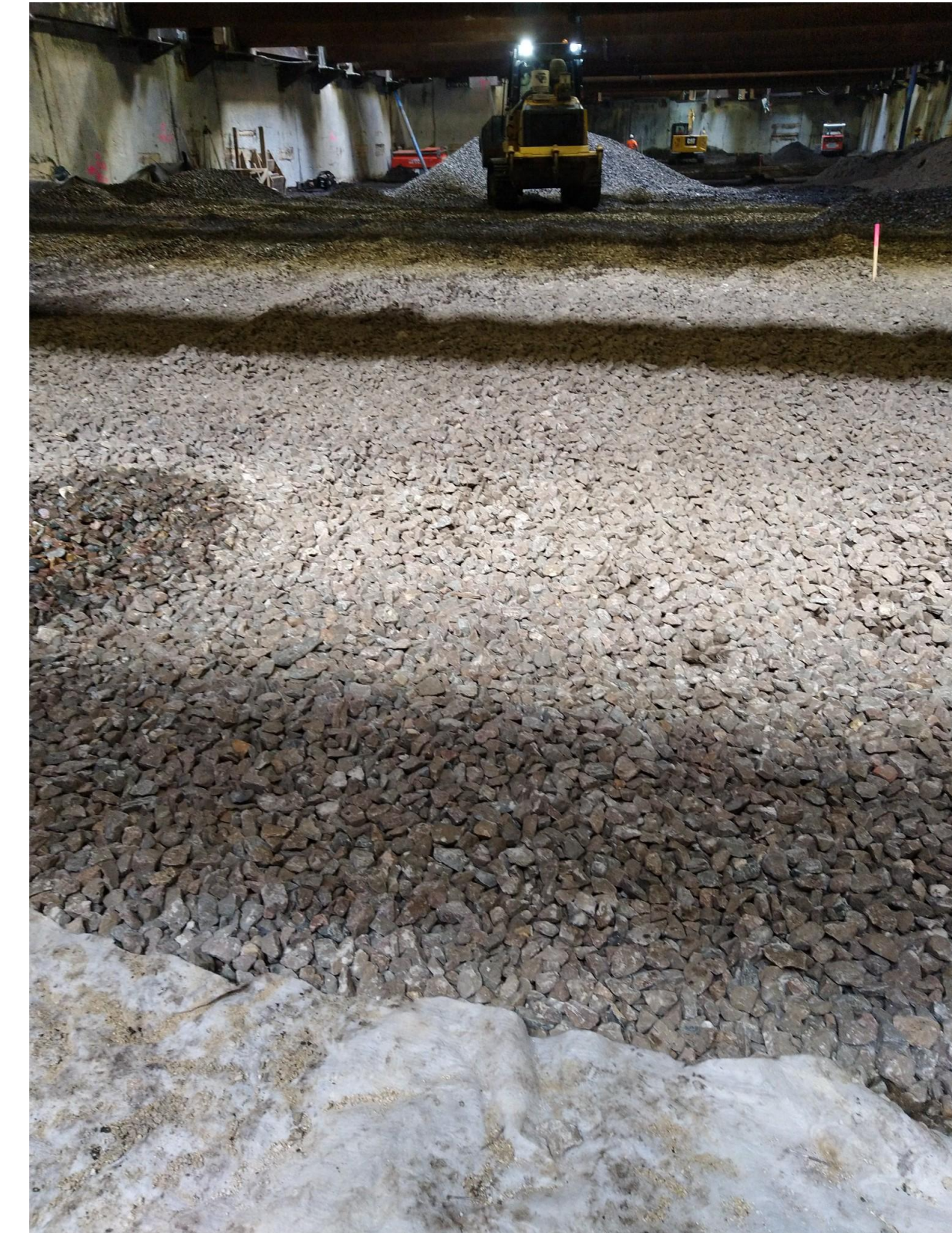
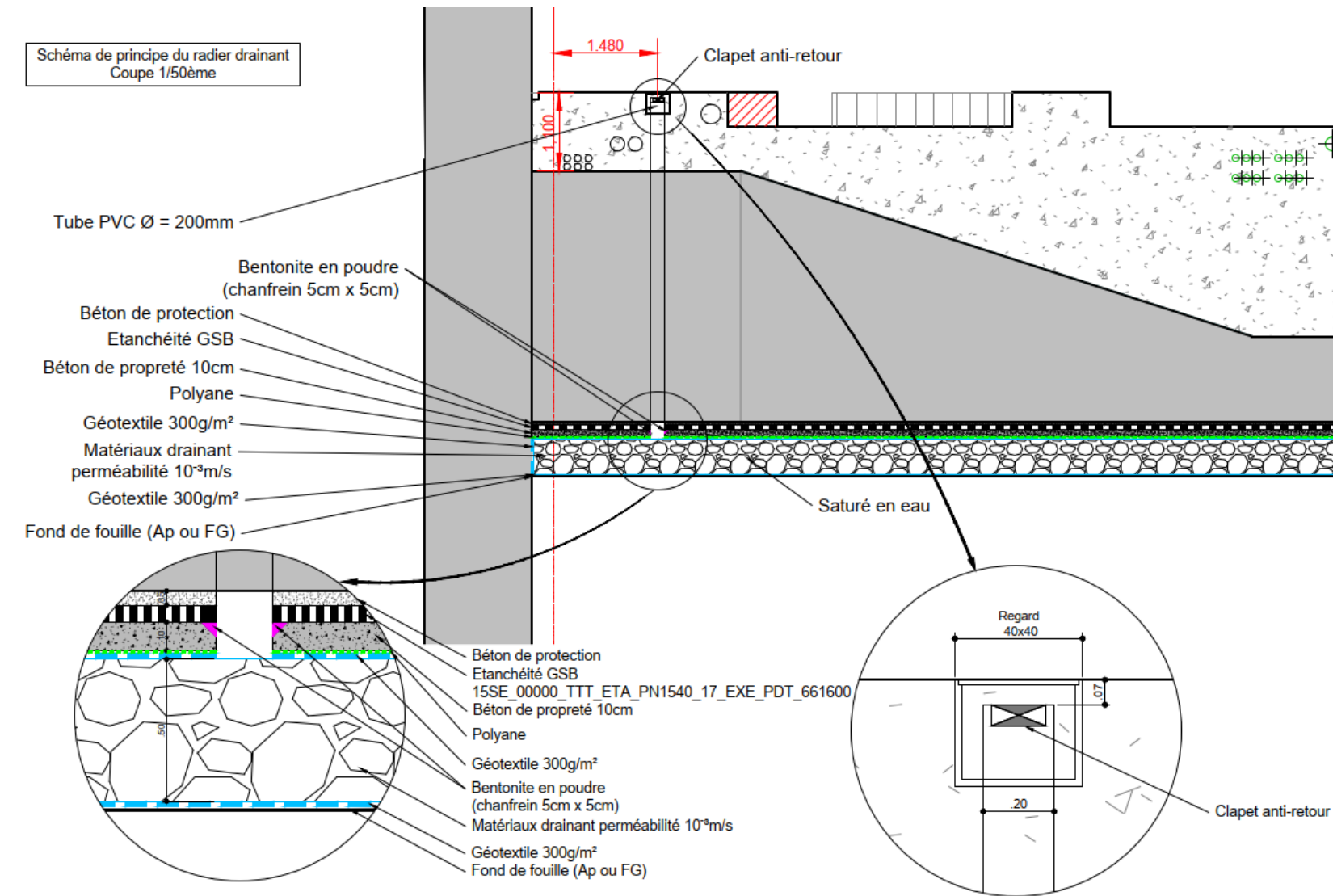


# REX Grand Paris Express – Radiers

## Diminution de la pression interstitielle

### Radier drainant

- Gare CHC, ouvrage annexe 1001P
- Prise en compte de la pression de gonflement + une fraction de  $u_w$  (correspondant à la hauteur d'eau dans le complexe drainant + fosses)
- Contrôle du niveau de l'eau dans le complexe drainant durant la vie de l'ouvrage nécessaire



Pression de contact totale

=

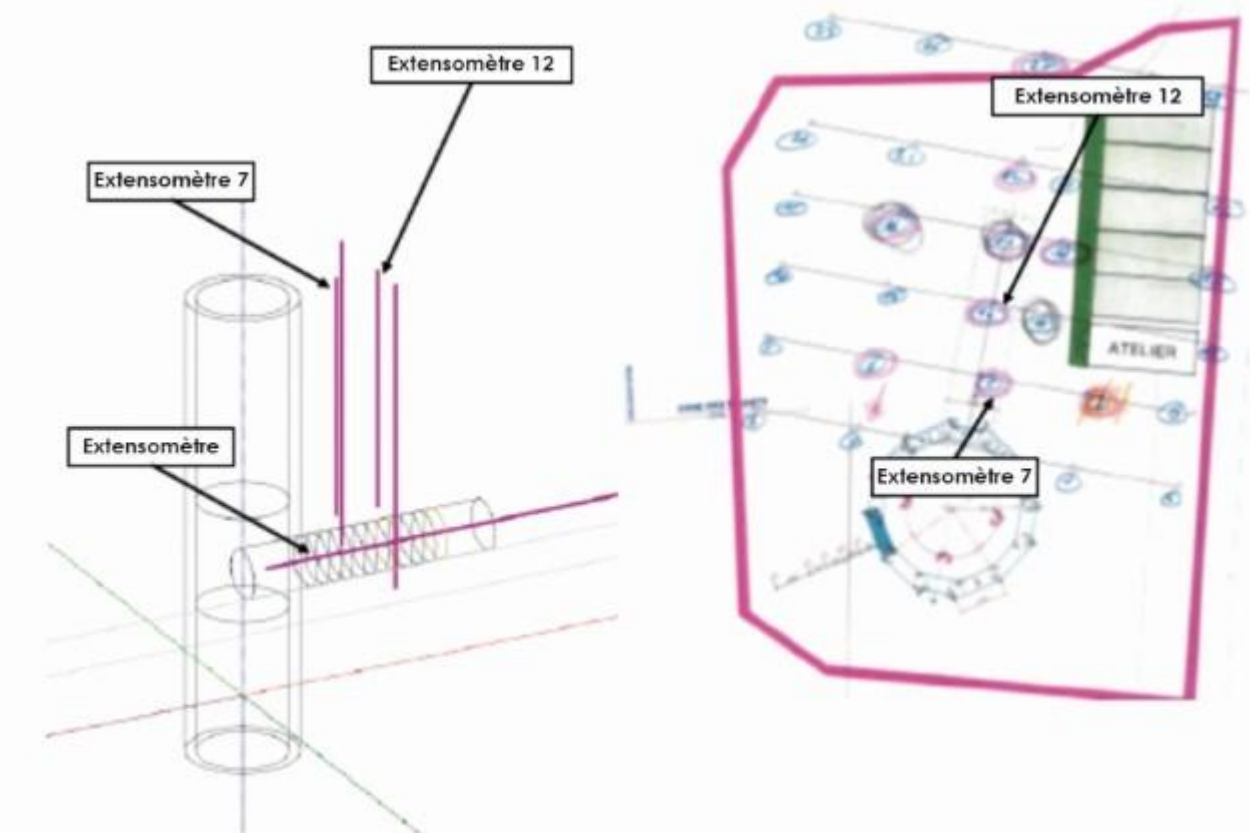
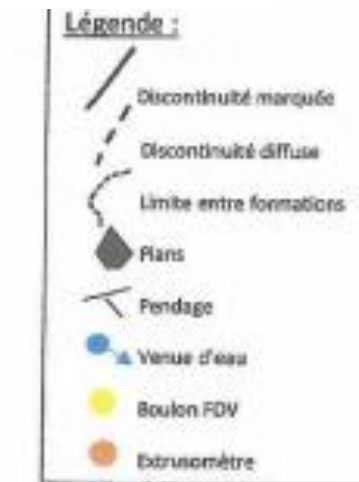
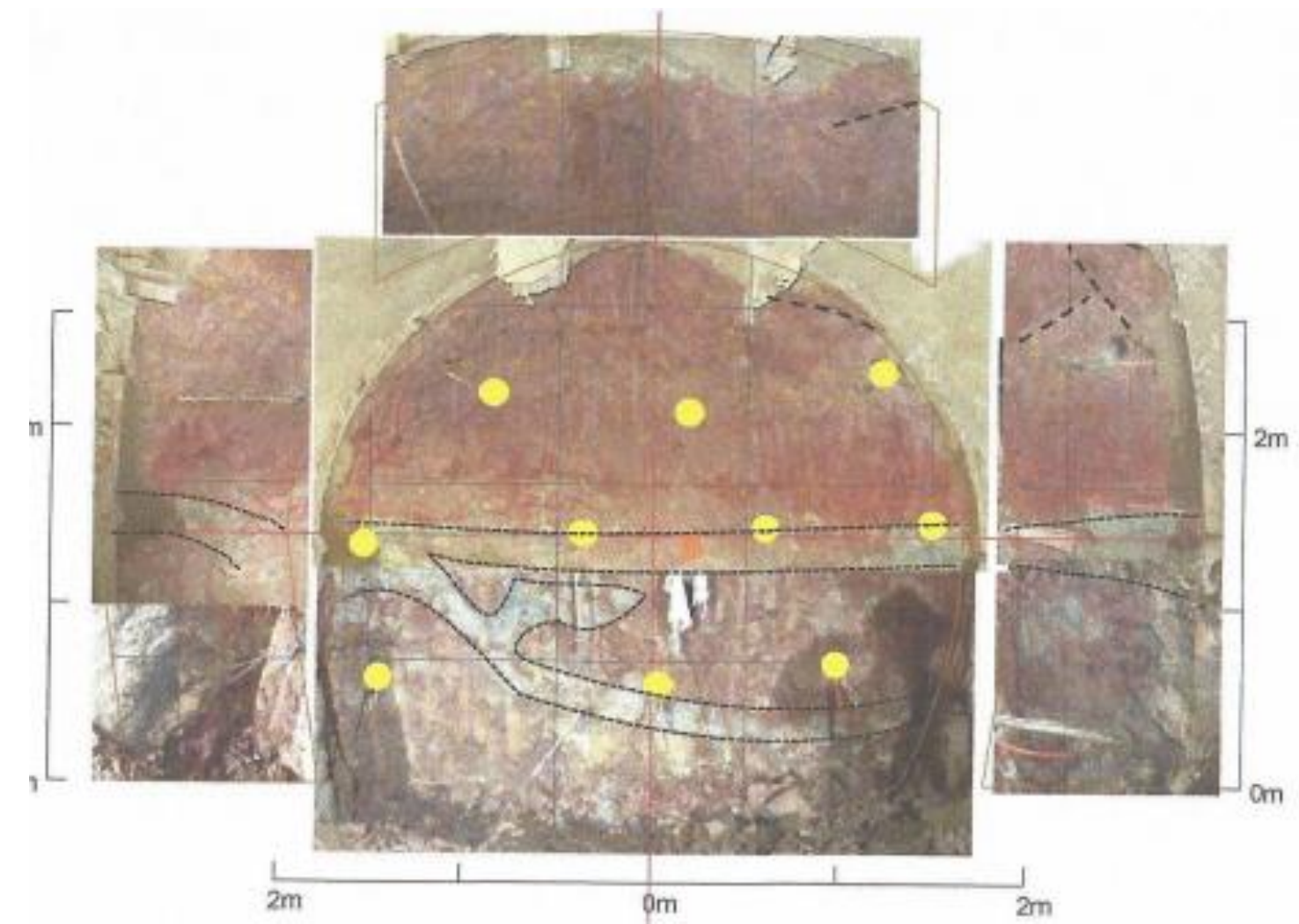
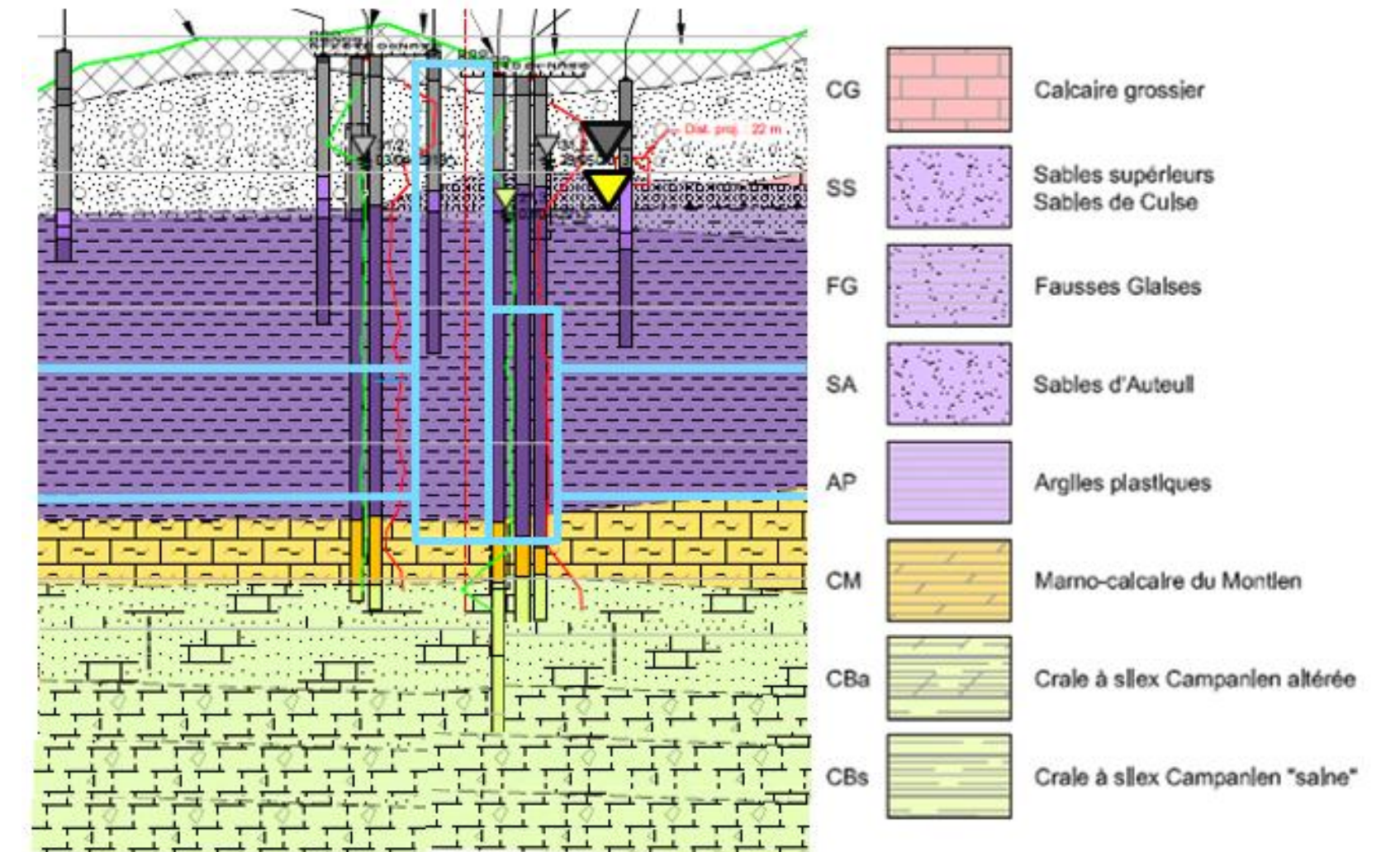
$$\sigma'_{vg} + \% (u_w)$$

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



# REX Grand Paris Express – Tunnels

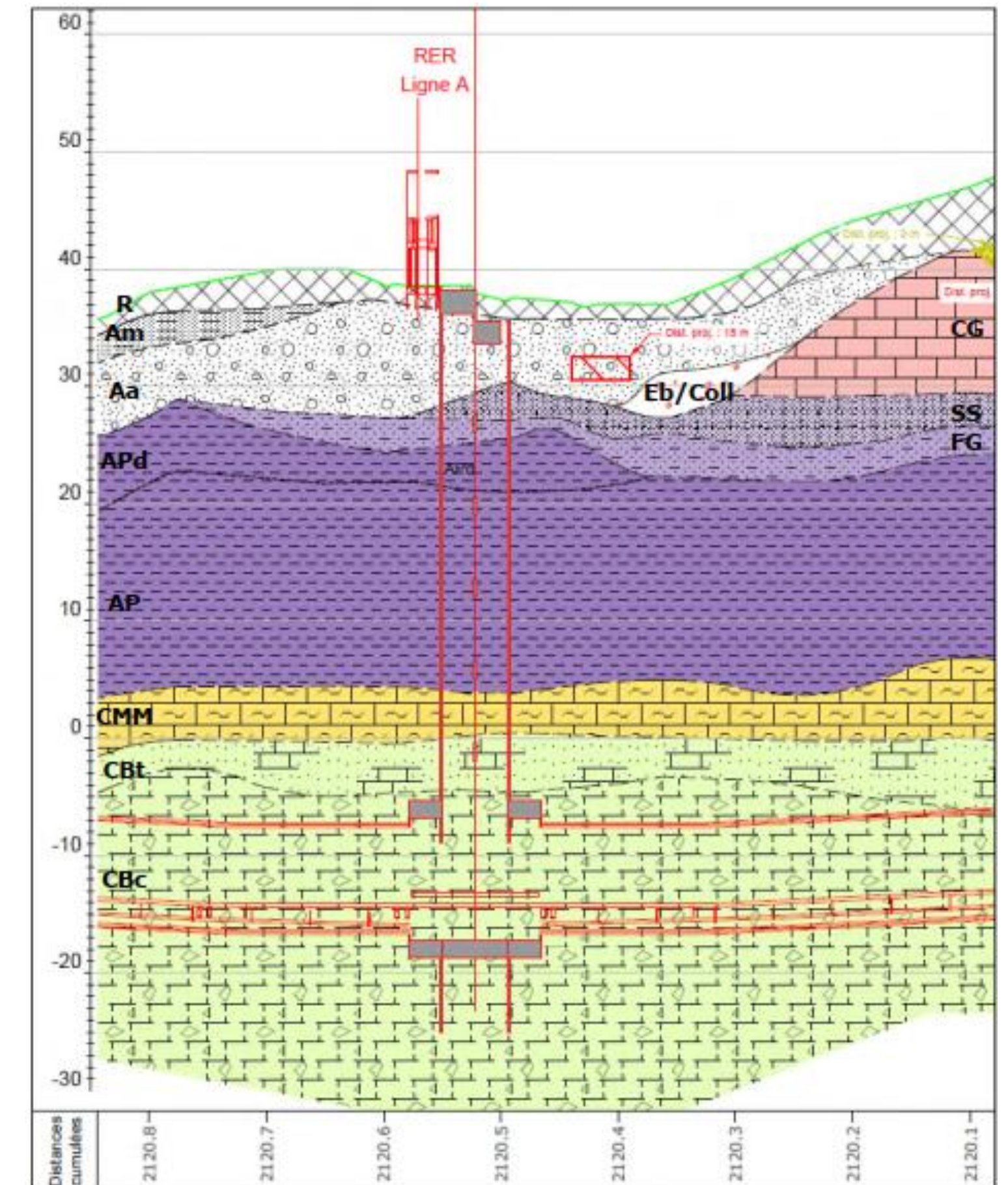
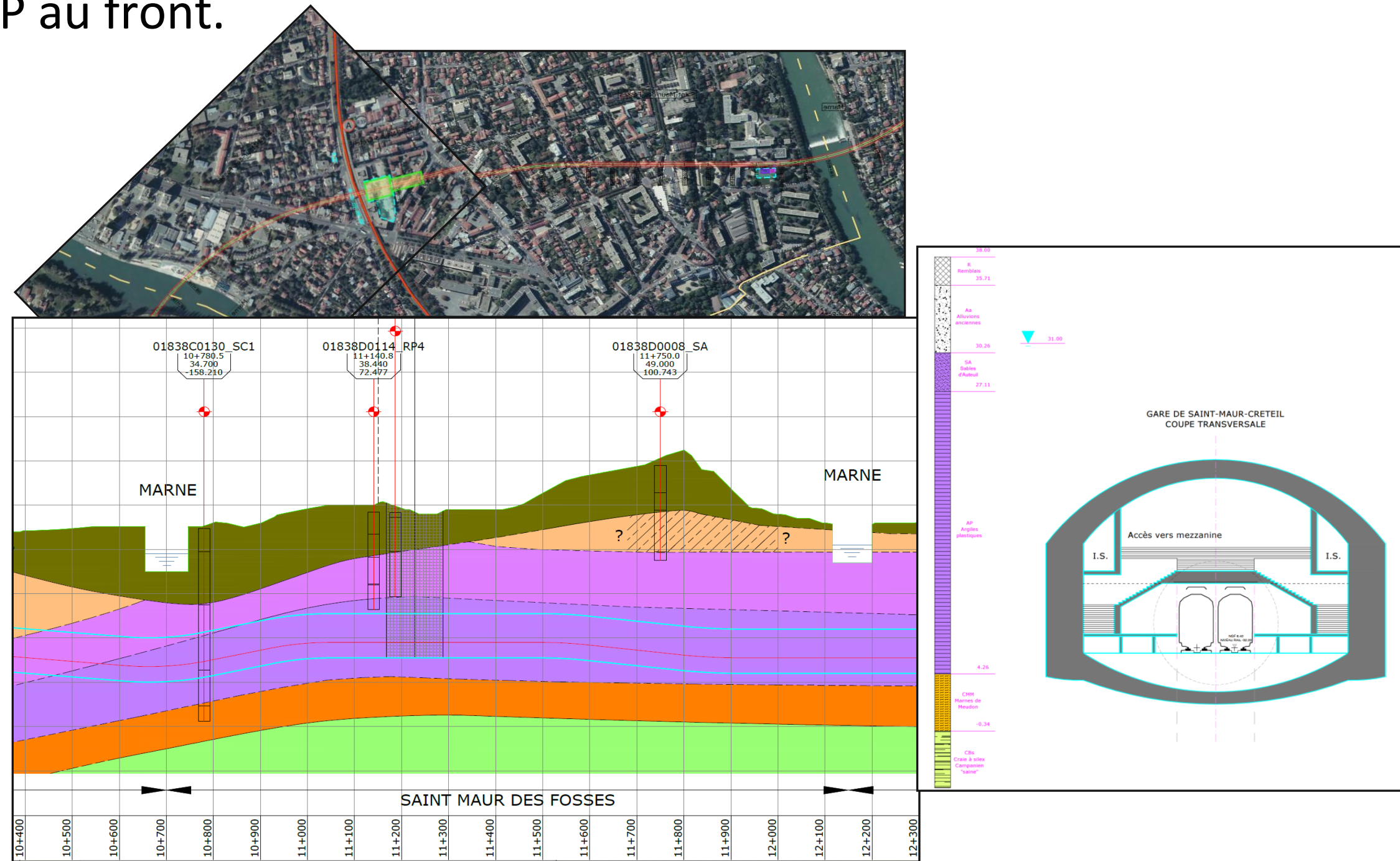
- Galerie d'essai du puits Saint Maur dans les Argiles Plastiques
  - Cintres HEB140 / 1m
  - Boulons de front FDV maille 1mx1m
  - Instrumentation renforcée : topographie en surface, extrusion du front, extensomètres en forages.
  
- Interruption du creusement à la 4<sup>e</sup> passe en raison d'instabilités en voûte pendant le BP de confinement



# REX Grand Paris Express – Tunnels

Sur la Ligne 15 T2 :

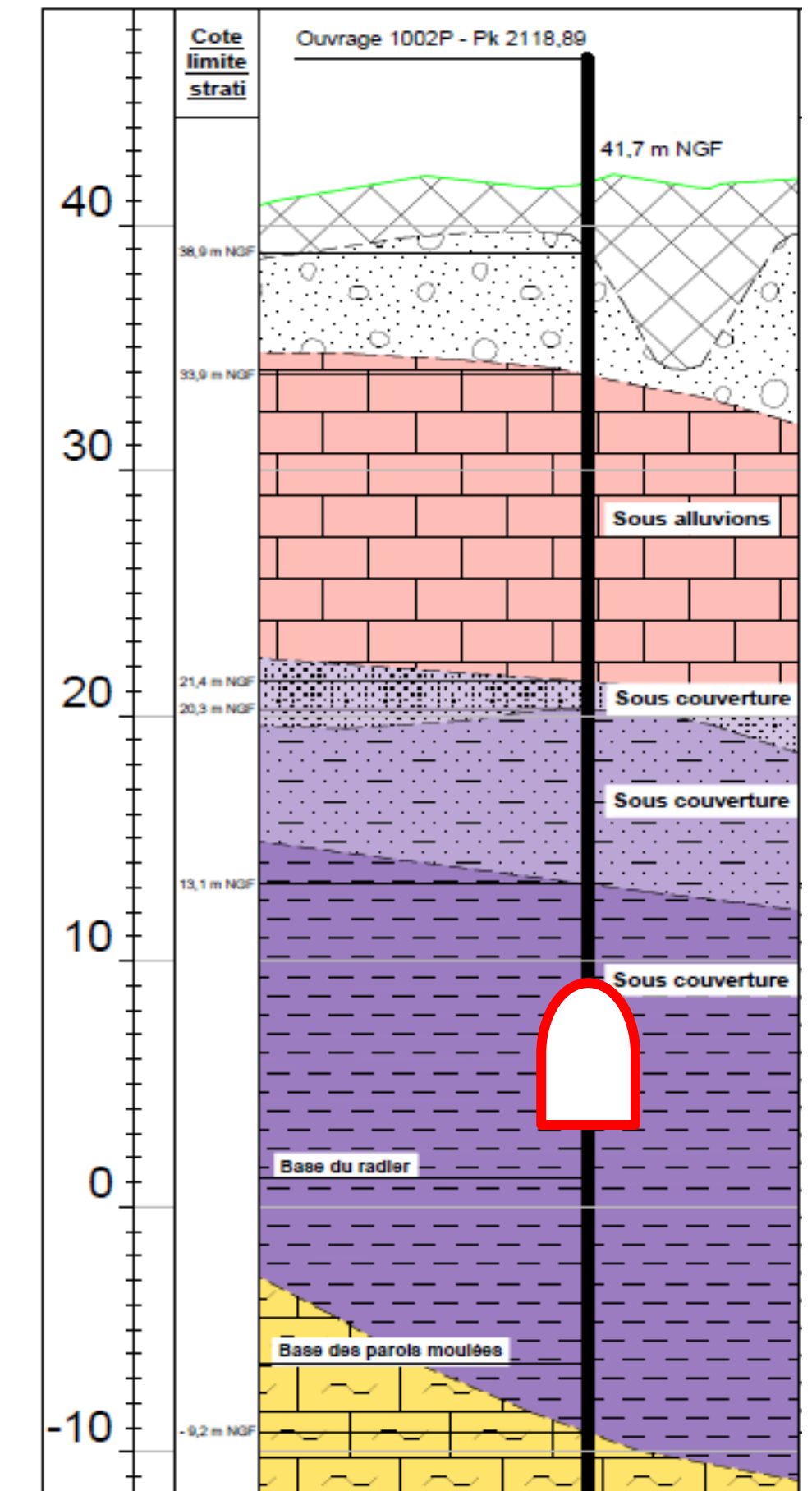
- Pas de pression de gonflement prise en compte sur le tunnel au TBM ( $\sigma'_g < \sigma'_0$ )
- Choix de positionnement de la gare de Saint-Maur Créteil
  - Contrainte d'emprise en surface → nécessité de réaliser une partie des quais en travaux souterrains, sur une large section dans les AP.
  - Avoisinants sensibles aux déformations en surface (bâtis sensible, gare RER A, etc.)
  - Choix d'approfondir la gare pour éviter les travaux en méthode conventionnel avec les AP au front.



# REX Grand Paris Express – Tunnels

## Rameau OA 1002P – Argiles plastiques

- Section totale environ 21 m<sup>2</sup>, réalisé en section divisée (demi-sup / demi-inf)
- Pré soutènement type voûte parapluie
- Non prise en compte de la pression de gonflement sur soutènement (court terme)
- Prise en compte du gonflement sur revêtement définitif, cumulé à la pression hydrostatique





# MERCI POUR VOTRE ATTENTION

[Recommandations sur la prise en compte du gonflement des terrains argileux pour la conception des infrastructures profondes \(2024\) | CFMS](#)

[gregory.meyer@egis-group.com](mailto:gregory.meyer@egis-group.com)  
[emoal@systra.com](mailto:emoal@systra.com)