



Journée scientifique et technique du CFMS du 21 mars 2019

« *Grands projets d'infrastructures en Région Parisienne* »

**Ligne 18 : Apport des reconnaissances pour la
conception des écrans de soutènement dans
les horizons de l'Argile Verte et des Marnes
d'Argenteuil**

Présentateurs : L. SAUSSAC – M. CAHN (Geos Ingénieurs Conseils)

Sommaire



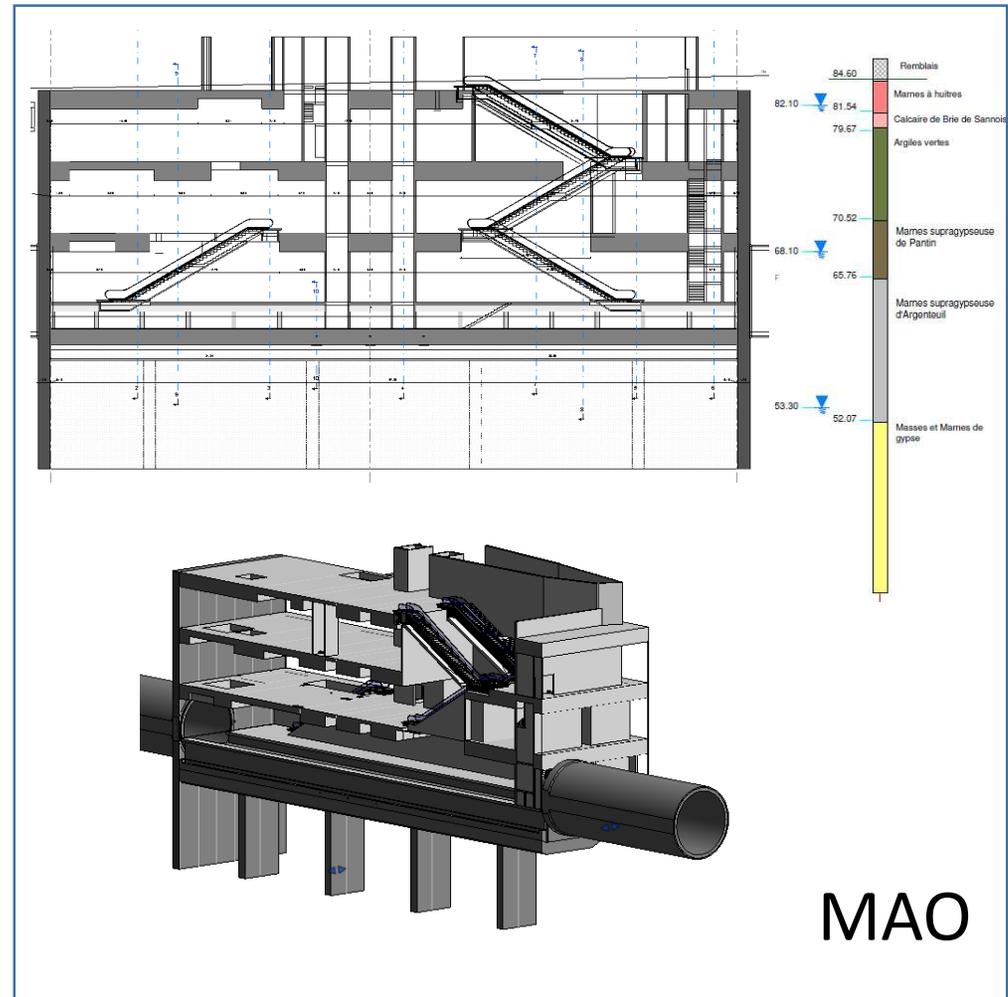
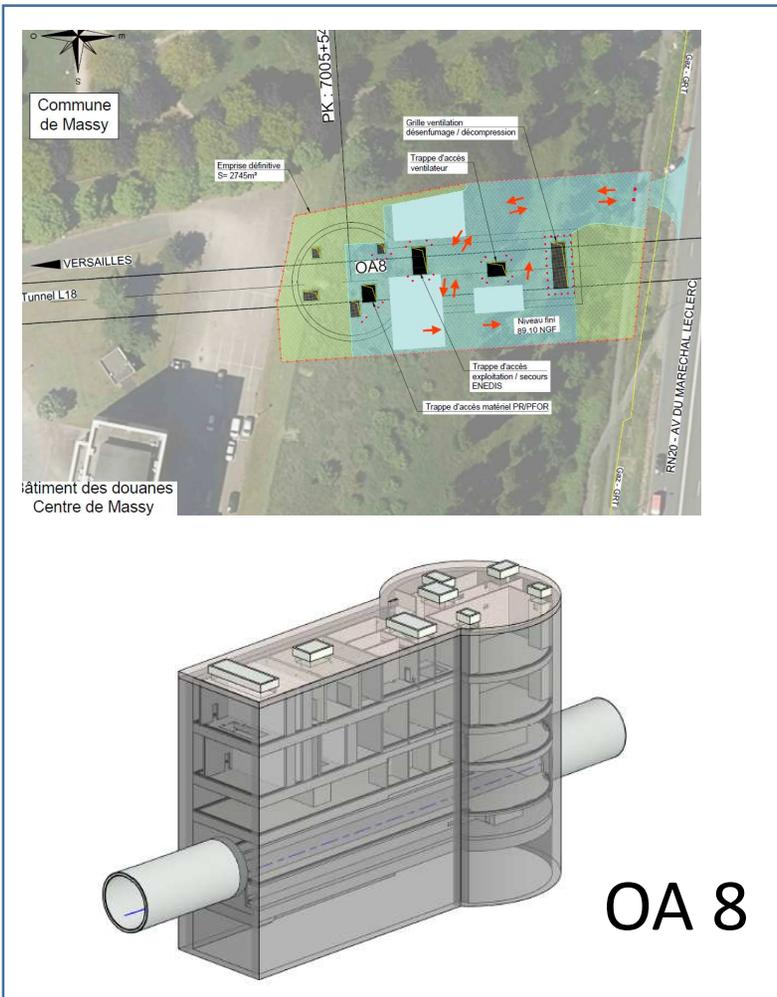
1. Présentation du projet L18 – Lot 1
2. Reconnaissances géotechniques générales
3. Problématiques, 1^{er} approches et reconnaissances spécifiques
4. Retours d'expérience d'écrans dans les horizons peu perméables
5. Modélisations et calculs des écrans de soutènement
6. Conclusion

1. Ligne 18 Lot 1 - généralités



INGEROP (Mandataire) GEOS
ARCADIS
Artelia

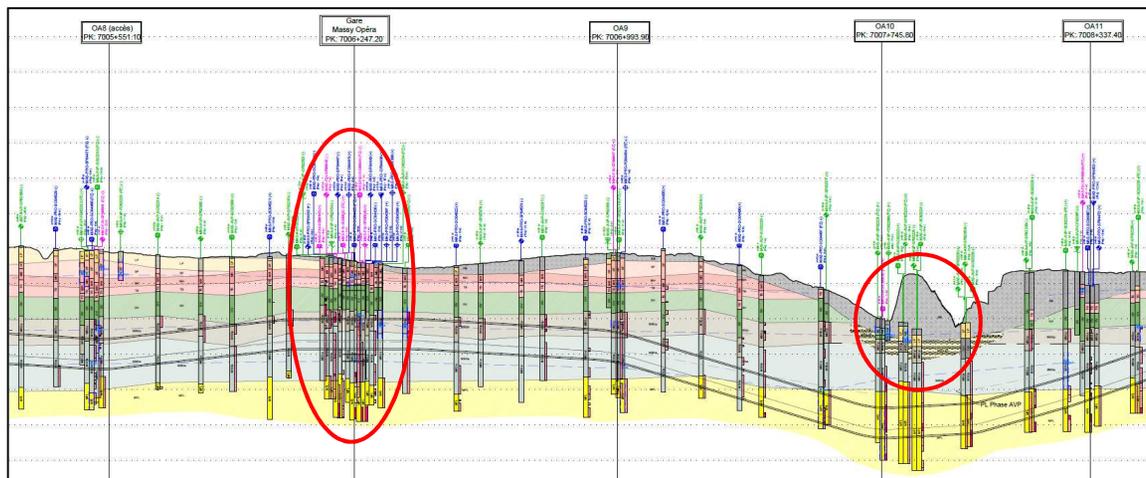
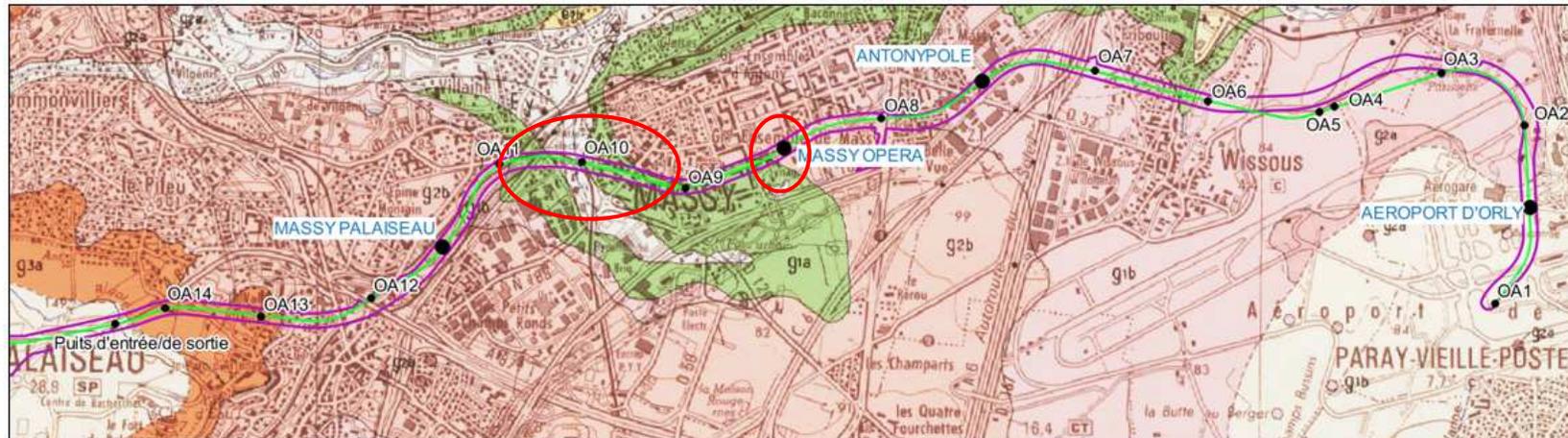
1. Ligne 18 Lot 1- les ouvrages de soutènement



2. Reconnaissances géotechniques



2.1 Contexte géologique



• Lot 1 - au stade actuel

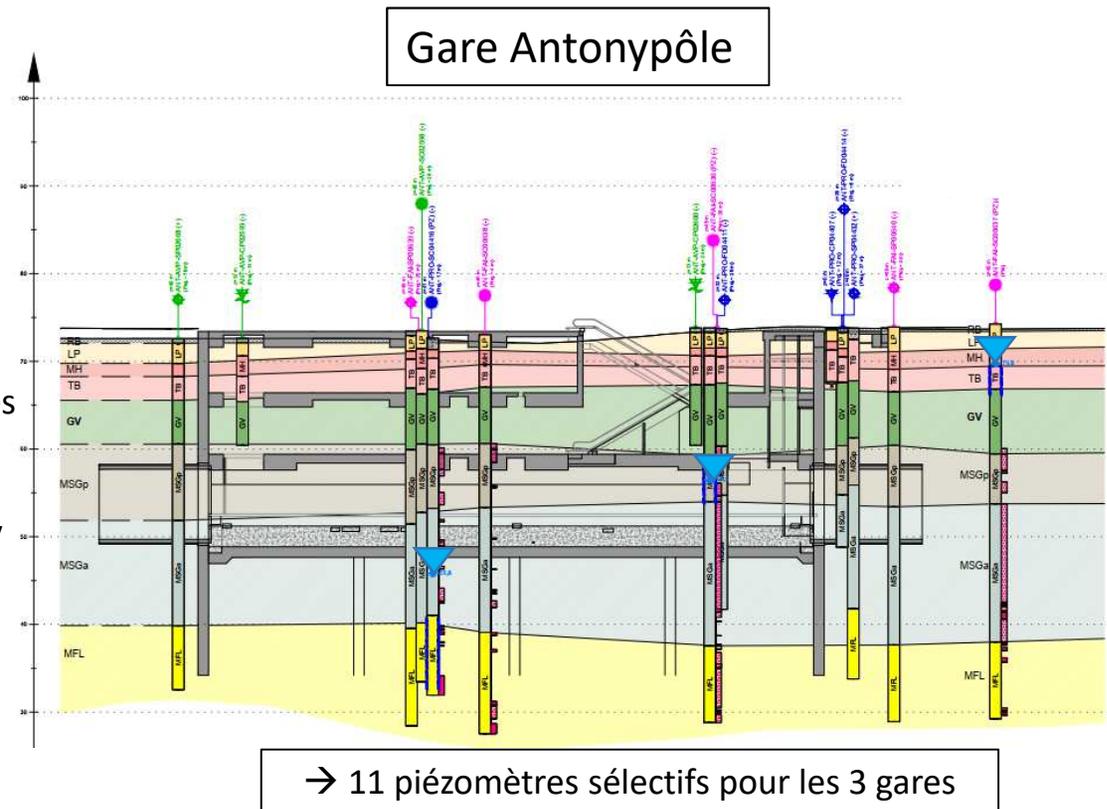
- Campagne G11 => 44 sondages
- Campagne G12 => 148 sondages
- Campagne G2 => 127 sondages

- TOTAL = 319 sondages / 12,65 km**
→ 1 sondage tous les 40 m

2.2 Contexte hydrogéologique



- **Nappe du Travertin de Brie retenue par l'Argile Verte**
 - Alimentation par les précipitations ou percolation à travers les Marnes à Huîtres,
 - Drainage par le réseau hydrographique selon la topographie du toit des Argiles Vertes
- **Nappe des Marnes de Pantin retenue par les Marnes d'Argenteuil**
 - Alimentation par percolation à travers les Argiles Vertes
 - Formation partiellement saturée.
 - Drainage par le réseau hydrographique / anciennes lignes de sources
- **Nappe des Masses et Marnes du Gypse**
 - Alimentation mal connue
 - Drainage supposé par le réseau hydrographique (Yvette/Orge)



3. Problématique - paramètres retenus



3.1 Problématique écran

Facteurs influençant les calculs de manière prépondérante:

- Pression des terres au repos
- Pression d'eau

3.2 Paramètres

	γ_h (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	E_m (MPa)	p_l^* (MPa)	α (-)	E' (MPa)	E'_{ur} (MPa)	c_u (kPa)	ϕ_u (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	OCR (-)	K0 (-)	k (m/s)
AV	19.3	14.8	17.7	1.27	2/3	40	79	110	0	20	15	2	1.05	10-8
MSGa	18.8	14.3	40	2.5	2/3	89	178	125	0	30	20	1.5	0.81	10-7

→ Enchaînement particulier sur le projet : premières phases de conception (AVPb et PRO) initiées avant les résultats des essais spécifiques fournissant les données d'entrée:

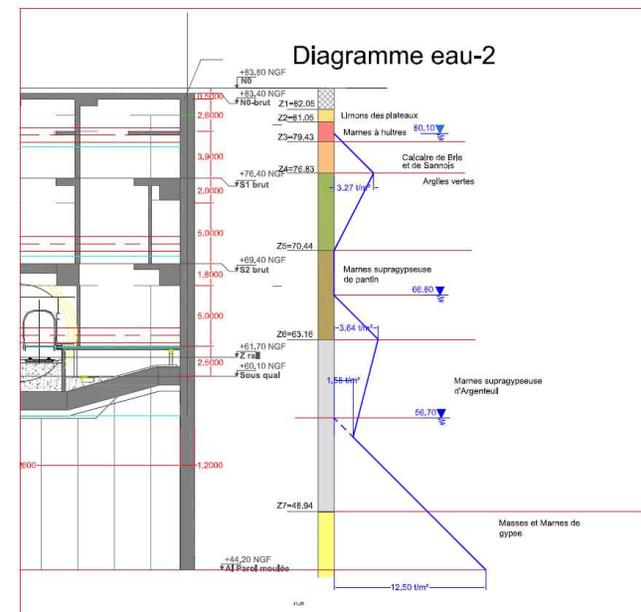
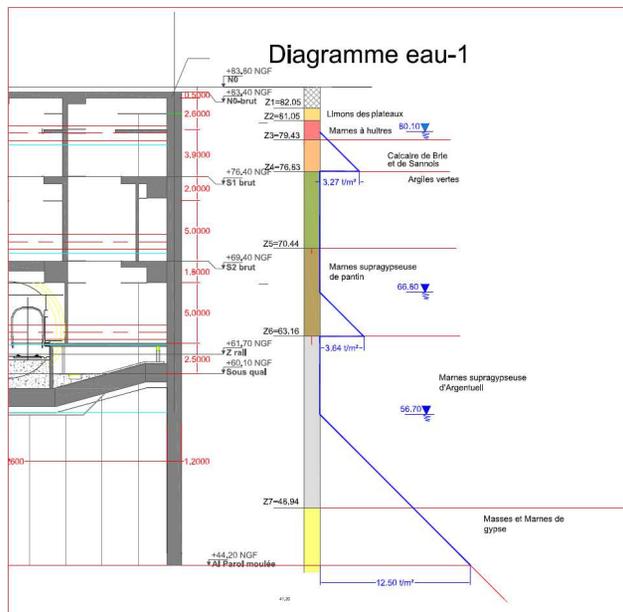
- Nécessité pour l'ingénieur de vérification sur modèle simple de l'influence de ces paramètres pour mesurer l'impact et les conséquences d'une modification des données (déplacements, épaisseur des parois...)
- Nécessité d'une validation a posteriori ... ou d'une reprise de conception

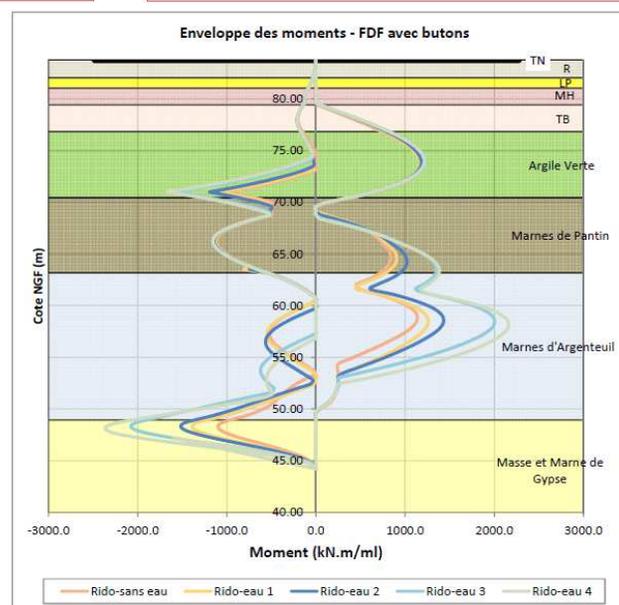
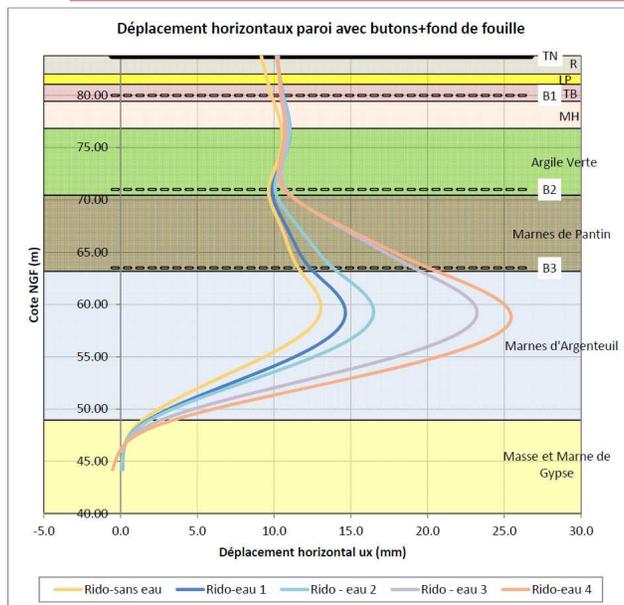
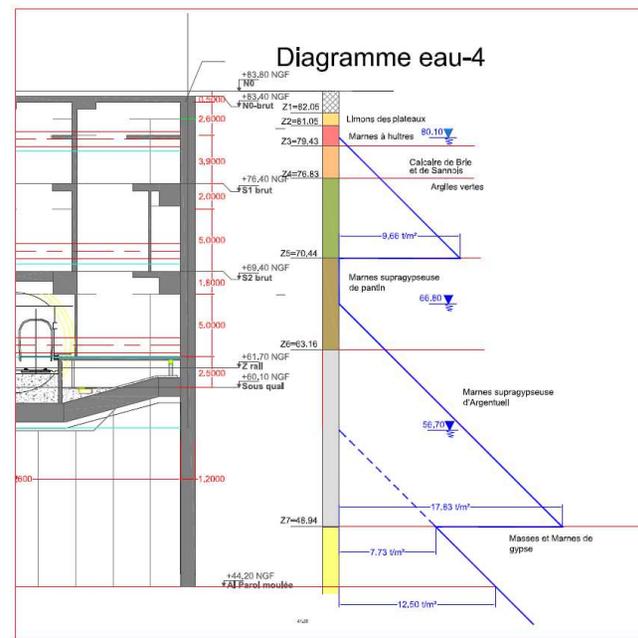
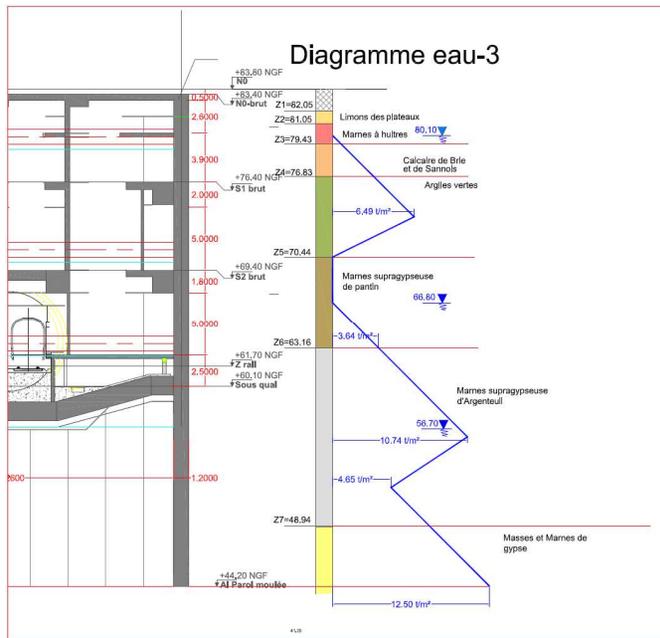
3.3 Exemple du digramme d'eau



La manière dont s'établit la pression hydrostatique dans un horizon peu perméable dépend de nombreux facteurs et notamment :

- De l'homogénéité de la couche et de sa perméabilité aux différentes échelles ;
- De son épaisseur ;
- De la présence d'un réseau de fracturation ;
- Des conditions aux limites de drainage (alimentation et sous-drainage) ;
- La présence d'infrastructures adjacentes ;





Paroi	Déplacements de l'écran	
	$ u_x _{\text{max,tête}}$ (mm)	$ u_x _{\text{max,ventre}}$ (mm)
Rido-sans eau	9	13
Rido-eau 1	10	15
Rido-eau 2	10	16
Rido-eau 3	10	23
Rido-eau 4	10	25

→ impact limité entre les diagrammes 3 et 4

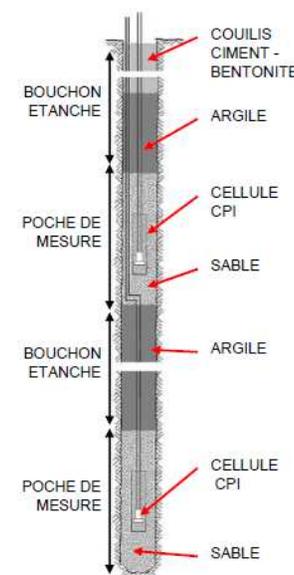
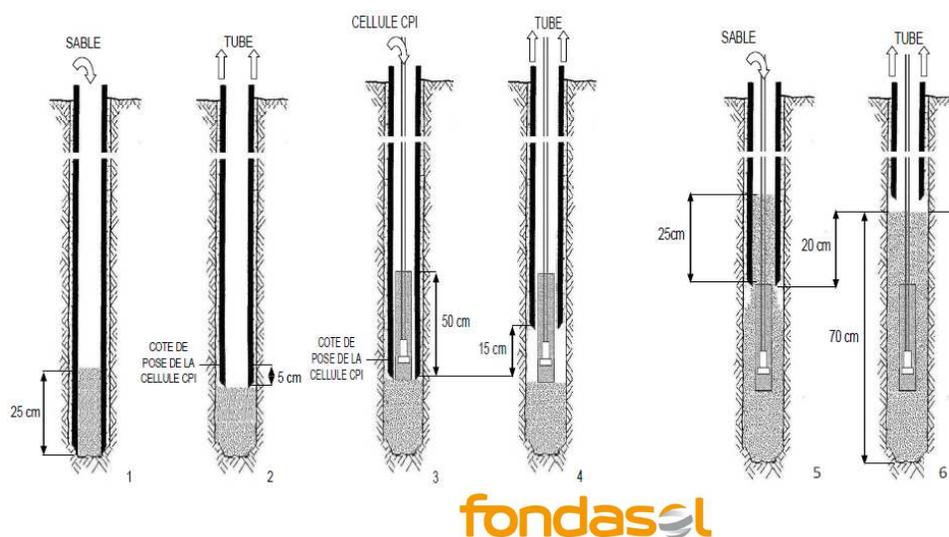
→ diagramme 4 retenu (NF P 94 282 - § 5.1.3.1)

3.4 Mesure des pressions d'eau



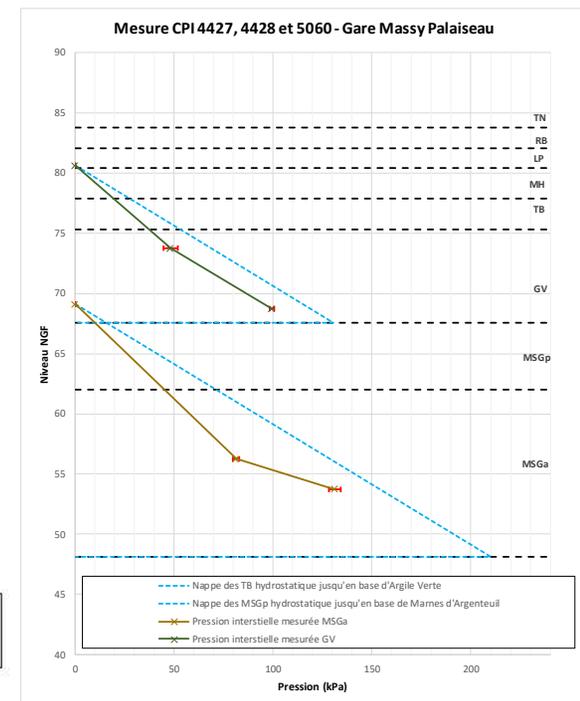
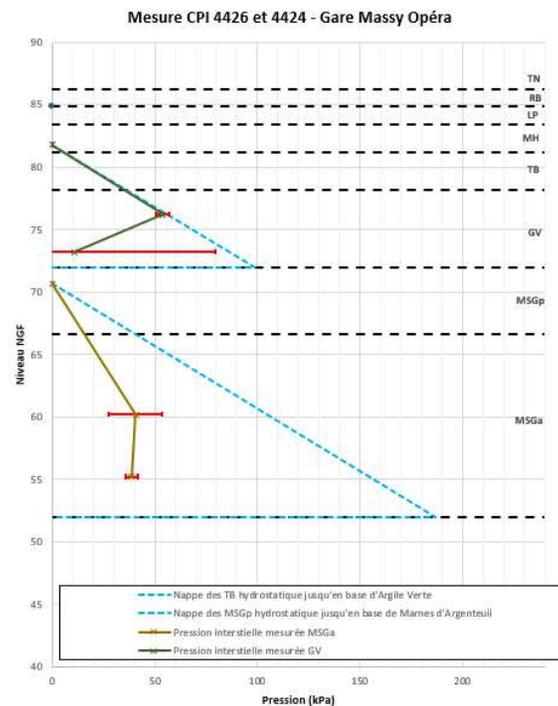
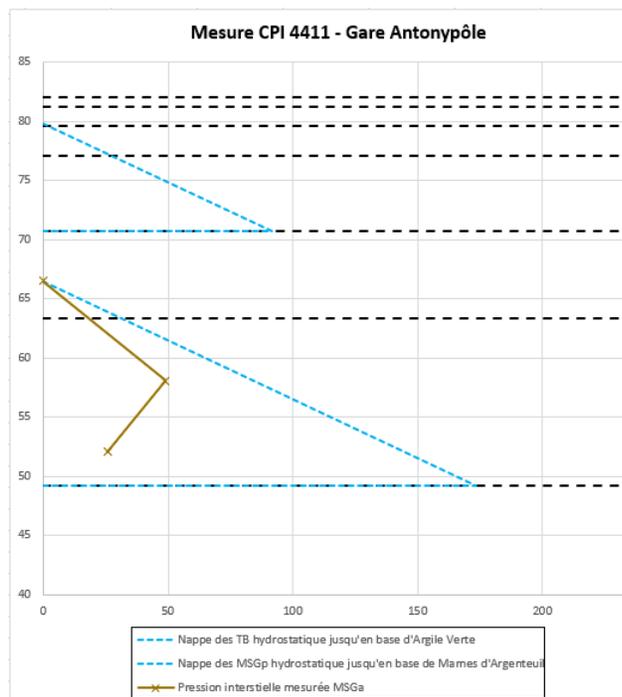
Diagramme de pression retenu pour le dimensionnement dans un contexte de nappe perchée doit être basé sur la mesure.

→ Pose d'une série de 2 cellules de pression interstitielle à différentes profondeurs dans la GV et dans les MSGa pour les gares d'ANT, MAO et MAS

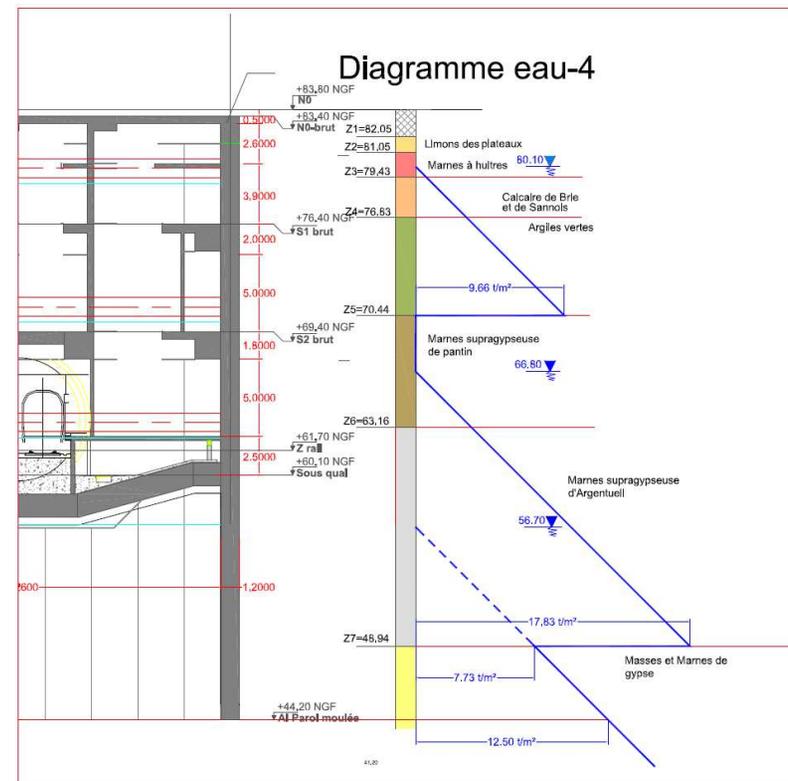
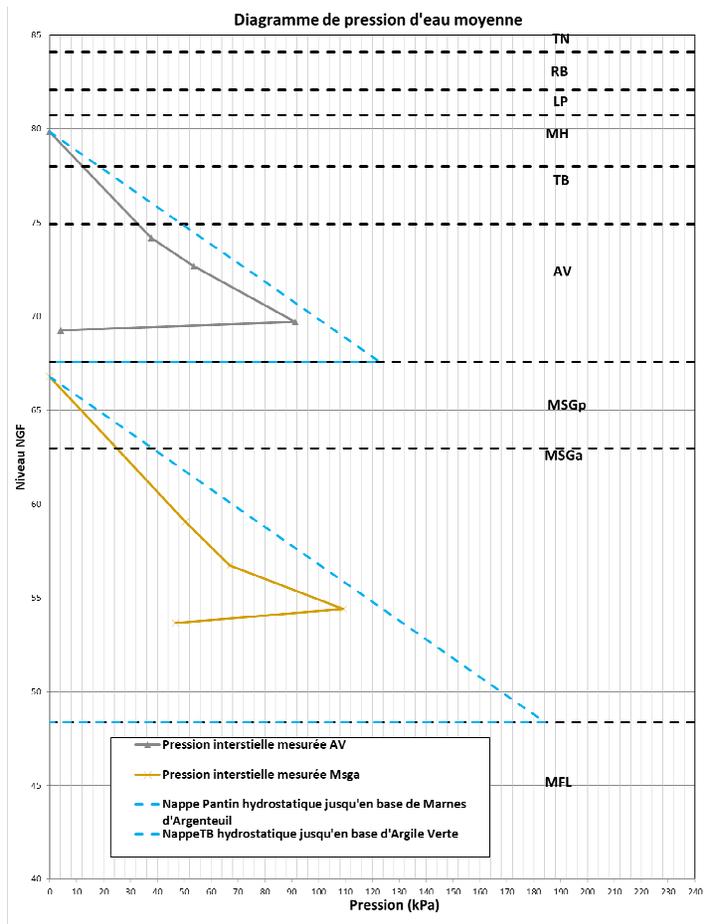


→ CPTu exploités mais temps de dissipation trop long pour pouvoir interpréter les résultats

- Problème de mesure sur ANT dans l'AV → pas d'information
- Diagrammes globalement cohérent pour les 3 gares
- Peu d'évolution dans le temps



■ Diagramme de synthèse tous sites confondus

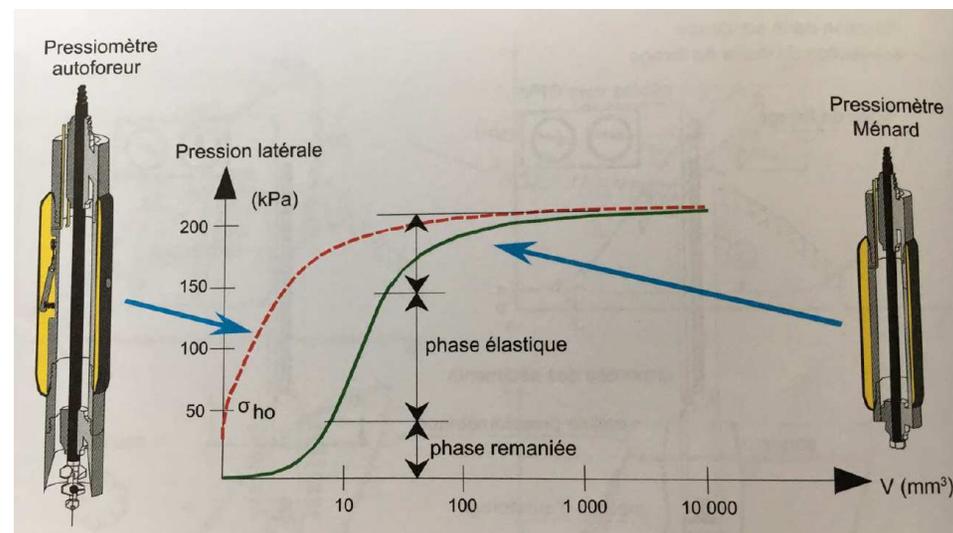
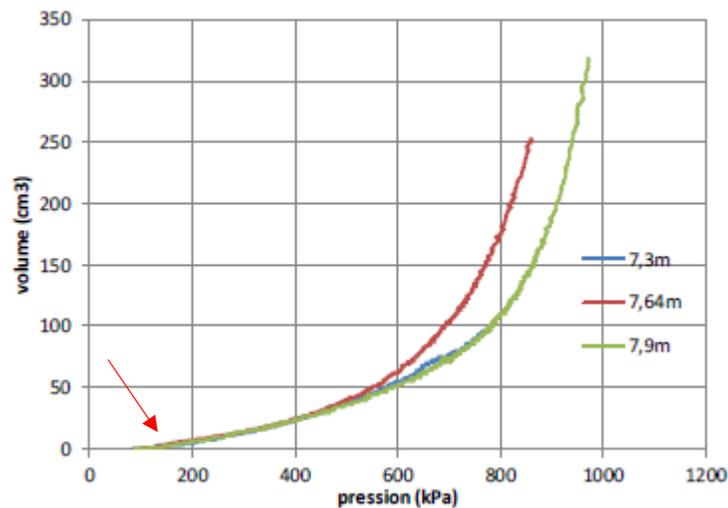


3.4 Mesures de K_0

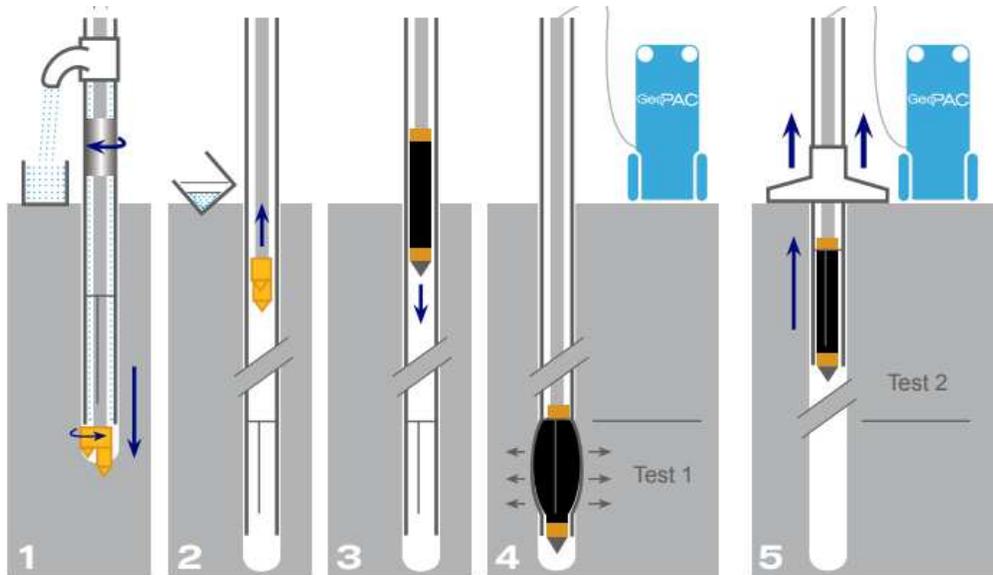


- Détermination du coefficient de poussée des terres au repos (IFSTTAR)

	PAF	STAF
MAO	3 u dans AV	4 u dans AV 3 u dans MSGa
ANT	-	3 u dans AV 3 u dans MSGa
OA11	3 u dans AV	2 u dans AV 1 u dans MSGa



PAF : Pressiomètre AutoForeur



STAF (Système de Tube Fendu Auto-Foré)



- Forage mise en place du tube à l'avancement
- Remontée de l'outil de forage
- Mise en place de la sonde
- Essai pressiométrique
- Extraction du tubage lanterné



PAF : colmatage du tricône et adaptation de l'outil sur ANT

STAF : outil à boutons remplacé par un bilame à ANT



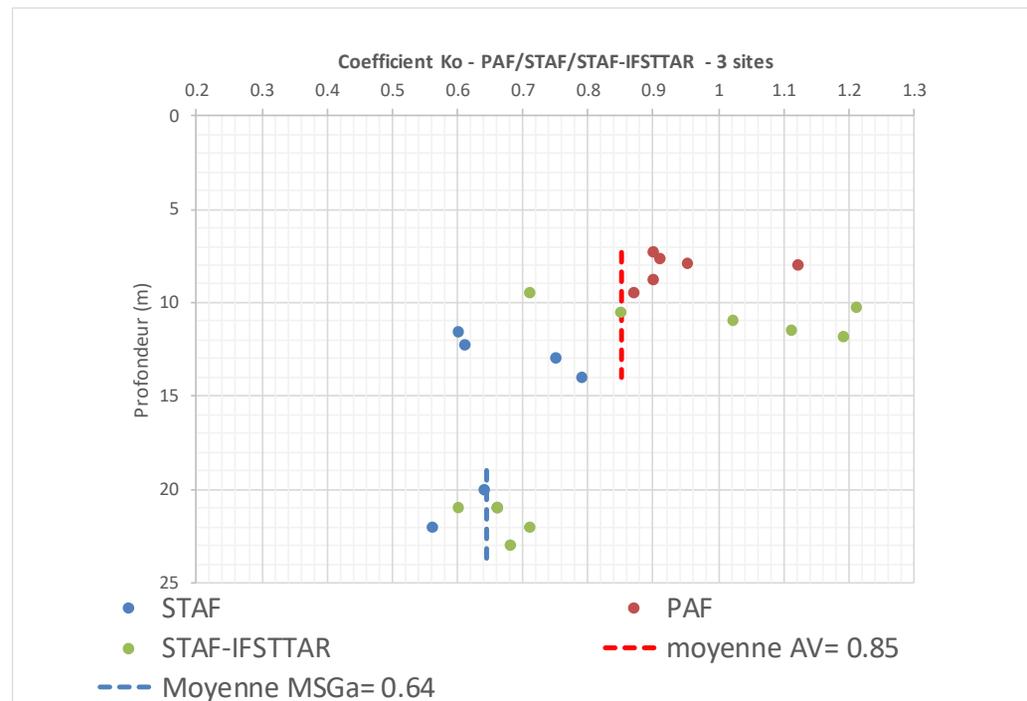
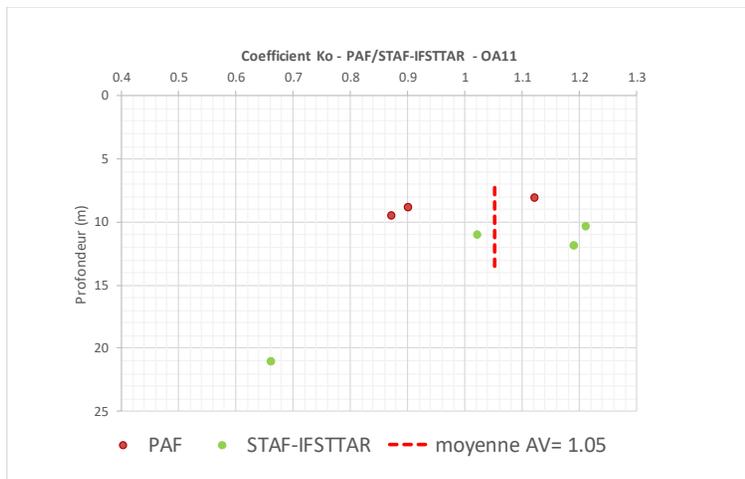
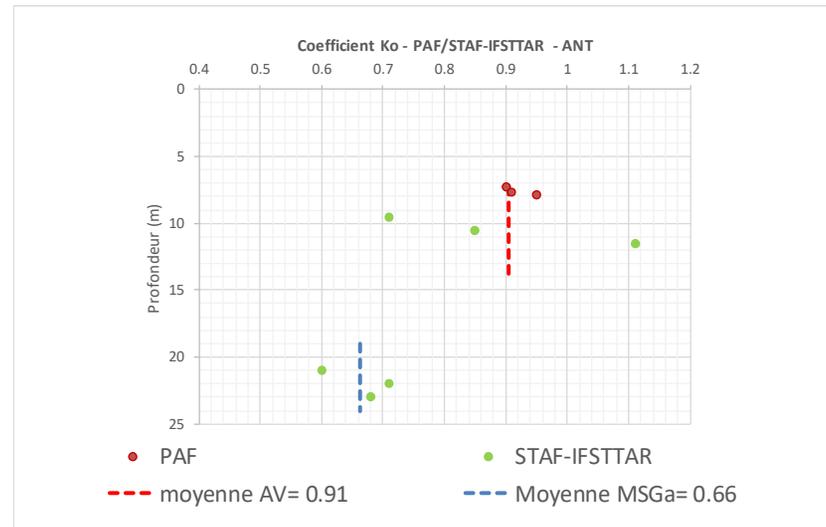
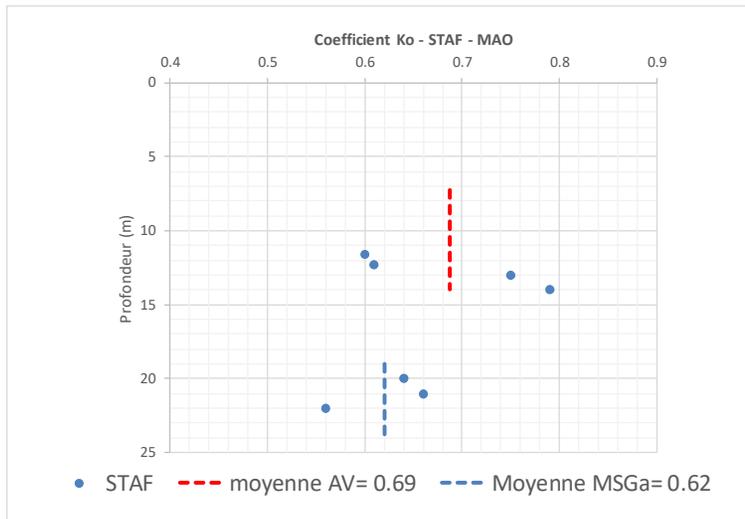
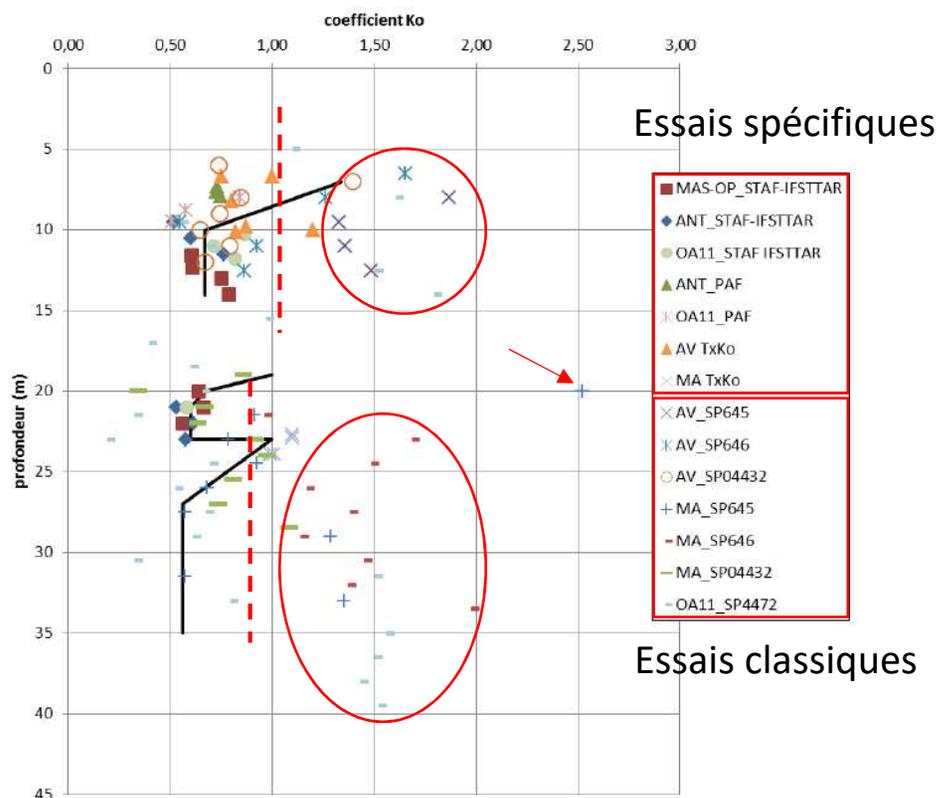


Diagramme de synthèse

- ✓ ajout des essais triaxiaux avec mesure de K_0
- ✓ ajout des essais au pressiomètre Ménard « classique » interprété



Valeurs retenues pour L18:

$$K_0 = (1 - \sin(\varphi')) \times \sqrt{OCR}$$

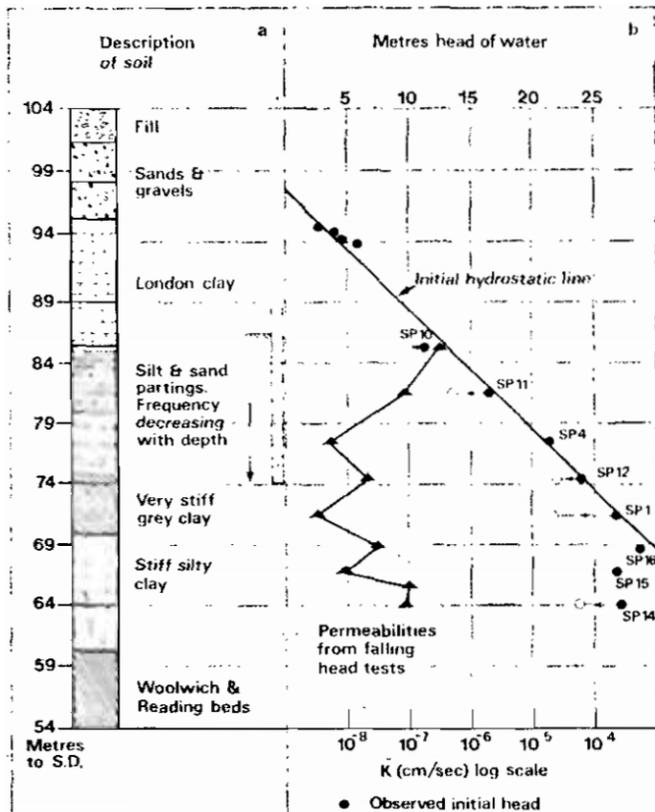
- $K_0 = 1,05$ dans AV
($\varphi' = 15^\circ$ et $OCR = 2$)
- $K_0 = 0,81$ dans MSGa
($\varphi' = 20^\circ$ $OCR = 1,5$)

4. Retour d'expérience d'écrans dans les horizons peu perméables

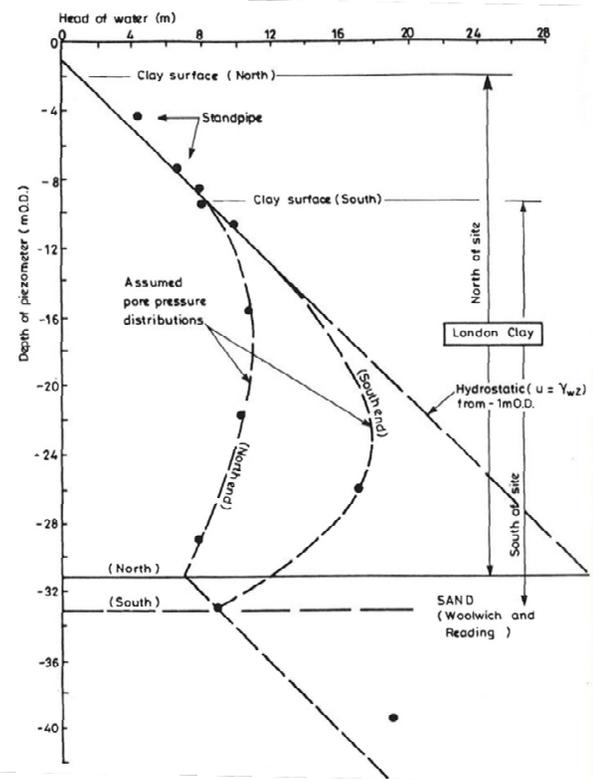


4.1 Diagrammes de pression d'eau

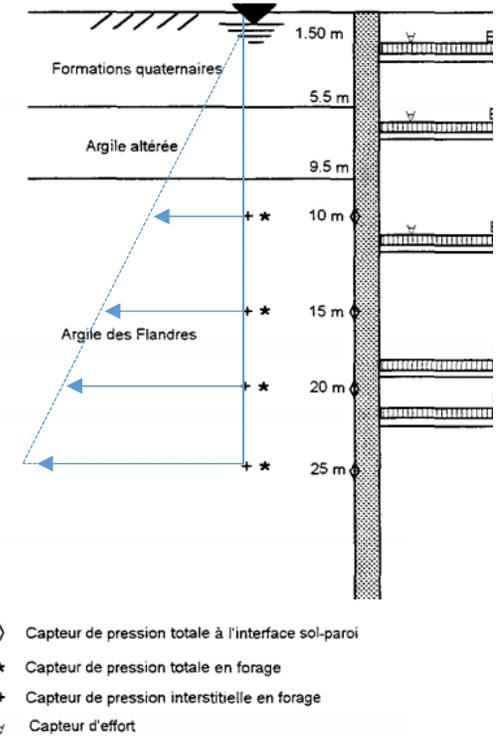
Les mesures de pressions interstitielles réalisées dans les argiles Yprésiennes de Londres ou les argiles des Flandres montrent, suivant les sites, des diagrammes variables



J.B Burland and R.J.R Hancock, The structural Engineer 1977



H.D St John, D.M Potts, R.J. Jardine, K.G Higgins, Predictive Soil Mechanics 1992



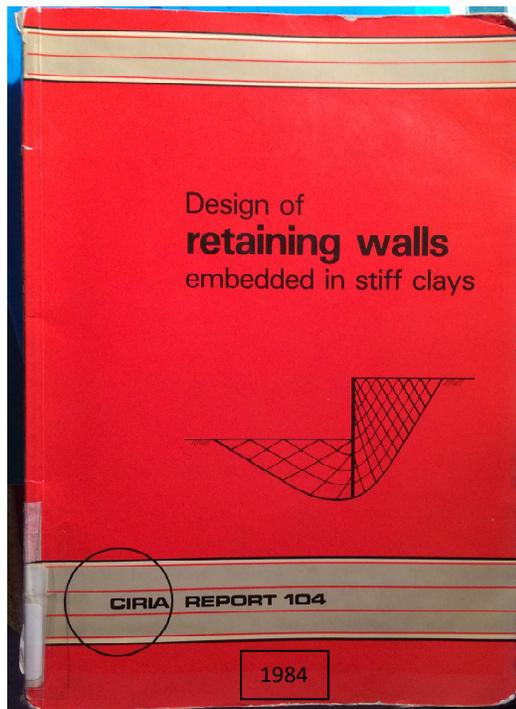
Jean-Bernard KAZMIERCZAK Thèse 1996

4. Retour d'expérience d'écrans dans les horizons peu perméables



4.2 Paramètres de résistance

CIRIA 104 → Dimensionnement des écrans doit être mené en contraintes effectives à l'aide des paramètres de résistances intrinsèques pour les phases de service comme pour les phases travaux



- Argiles surconsolidées : fissuration en masse liée à l'histoire géologique et au déchargement subit
- Les argiles surconsolidées connaissent un « radoucissement » (« déconsolidation ») lors de l'excavation à l'arrière du soutènement et sous le fond de fouille
- Dans la zone active, des fissures de traction sont susceptibles de voir le jour à court terme. L'eau s'y infiltrant accélère le processus de radoucissement
- Cisaillées, les argiles surconsolidées présentent un comportement dilatant avec génération de pressions interstitielles négatives.
- La déconsolidation est d'autant plus rapide que l'argile est fissurée et non homogène

→ NFP 94-282 - § 5.1.3.1 « les valeurs de pression des terres qui agissent sur un écran doivent être déterminées en tenant compte du plus défavorable des comportements drainés et non drainés des terrains »

5. Modèles de calcul

5.1 Calculs exploratoires PLAXIS en consolidation

- Loi de comportement HSM, m=0 et Undrained A

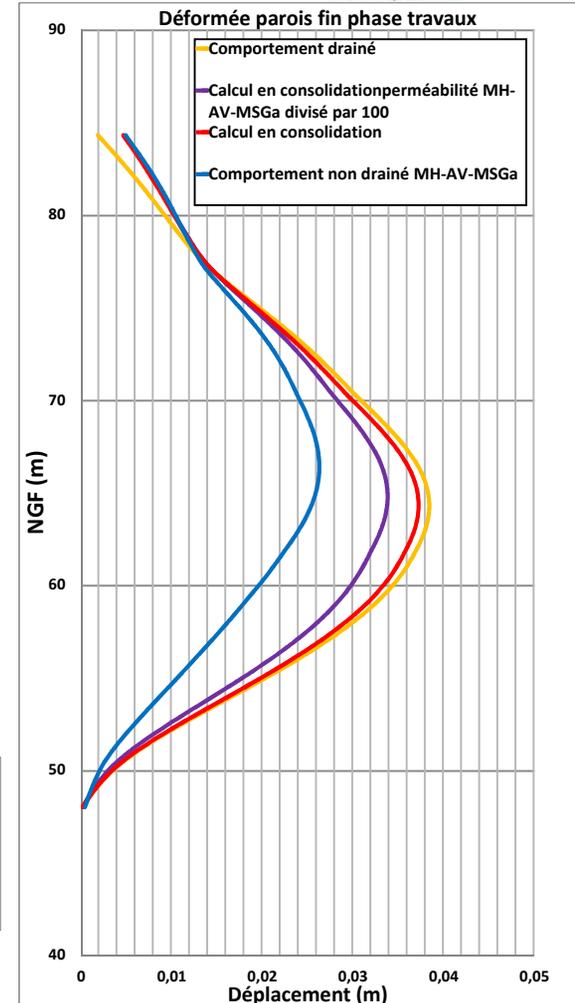
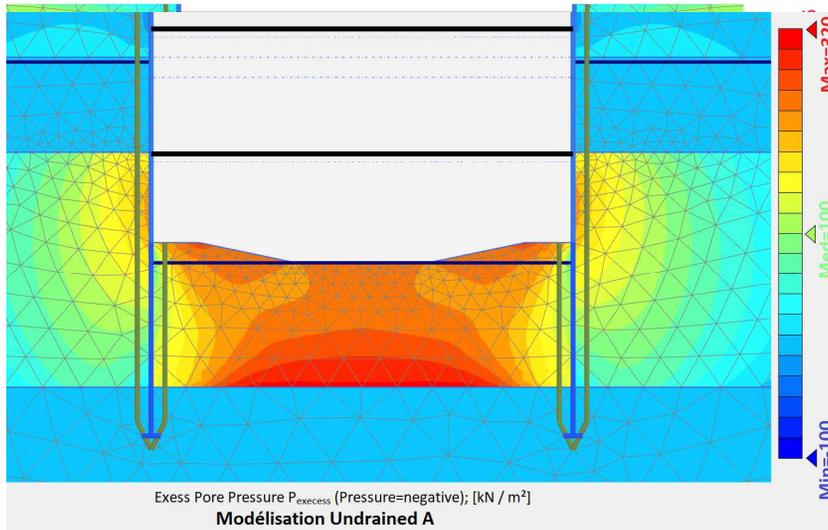
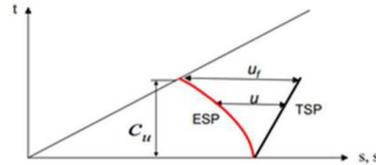


$$K_{total} = K' + \frac{K_w}{n} I$$

$$p = p_{steady} + p_{exc}$$

$$\Delta p_{exc} = \frac{K_w}{n} \Delta \varepsilon_v$$

$$\sigma = \sigma' + pI$$



Après dissipation partielle des pressions interstielles, les résultats du calcul en consolidation sont très proches de ceux en considérant des paramètres de résistance et de déformation intrinsèques.

$$T = \frac{k E_{oed}}{\gamma_w D^2} t$$

Vermeer & Meier (1998)

k = perméabilité

E_{oed} = module œdométrique t = durée de construction

γ_w = poids volumique de l'eau T = facteur de temps sans dimension

D = distance de drainage U = degré de consolidation

T < 10% (U < 10%) → Non drainé

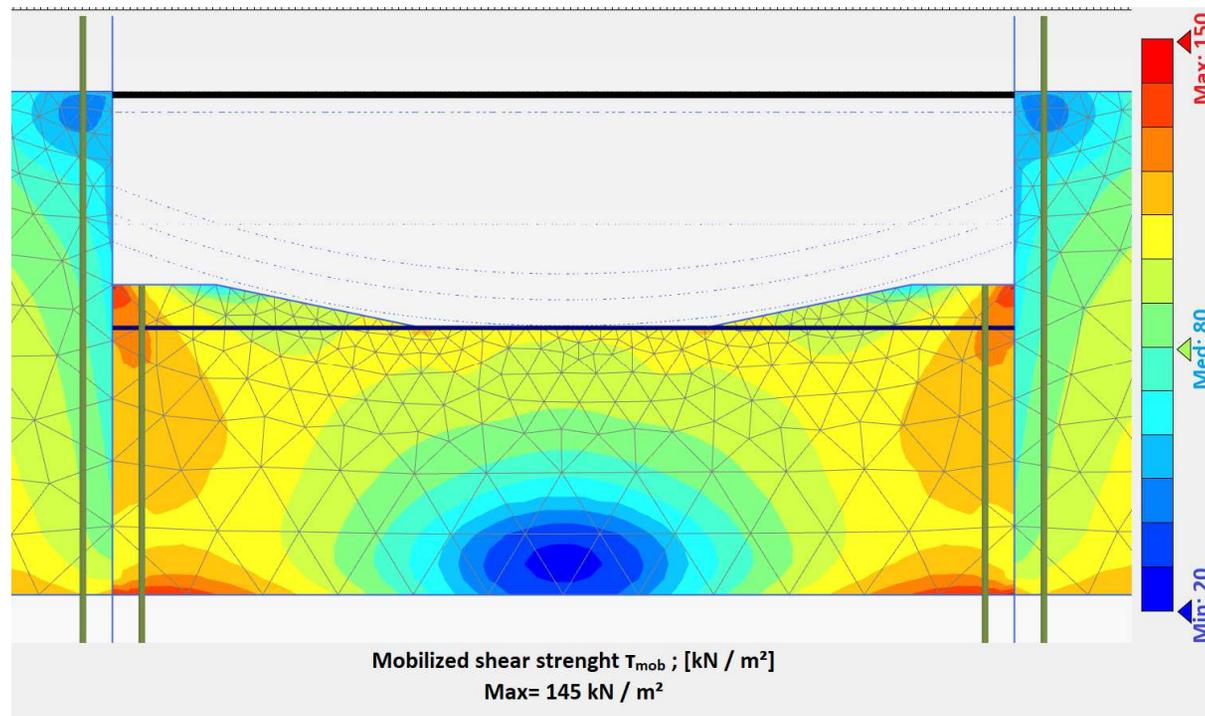
T > 40% (U > 70%) → Drainé

5. Modèles de calcul

5.2 Limites de la loi de comportement HSM Undrained A

« Undrained A »: la résistance mobilisée est une conséquence du modèle

→ Vérification à posteriori du cisaillement mobilisé à l'étape la plus sollicitante

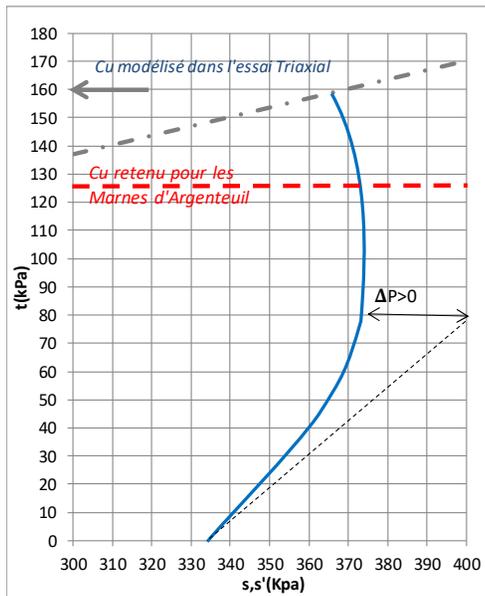


Cisaillement de 145 kPa dans les Marnes d'Argenteuil dépassant la valeur C_u retenue 125 kPa

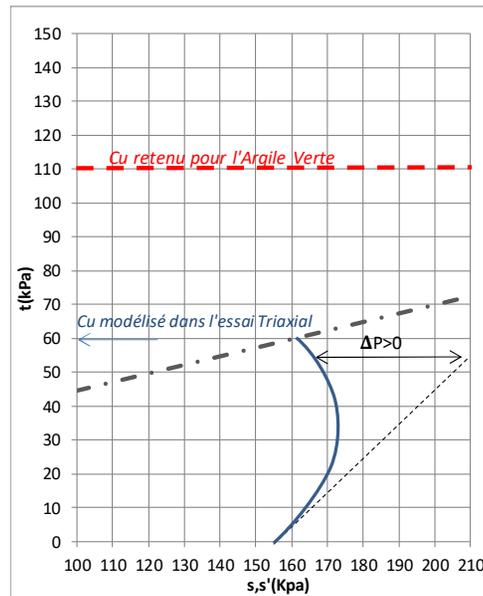
5. Modèles de calcul

5.2 Limites de la loi de comportement HSM Undrained A

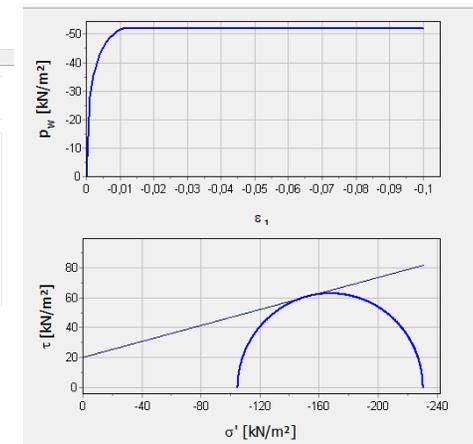
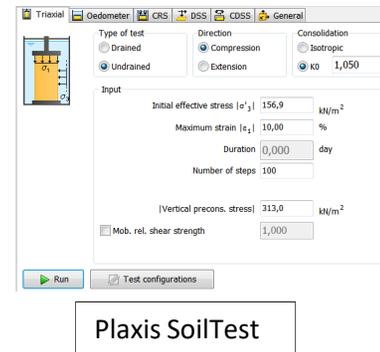
Essais de recalage des paramètres sur essais triaxiaux Cu+u avec σ'_3 à mi épaisseur de couche pris comme confinement latéral.



$c'=30$ kPa, $\varphi'=20^\circ$
 $\sigma'_3 = 334$ kPa (OCR 1,5)
 $T_{max} = 160$ kPa > $Cu = 125$ kPa



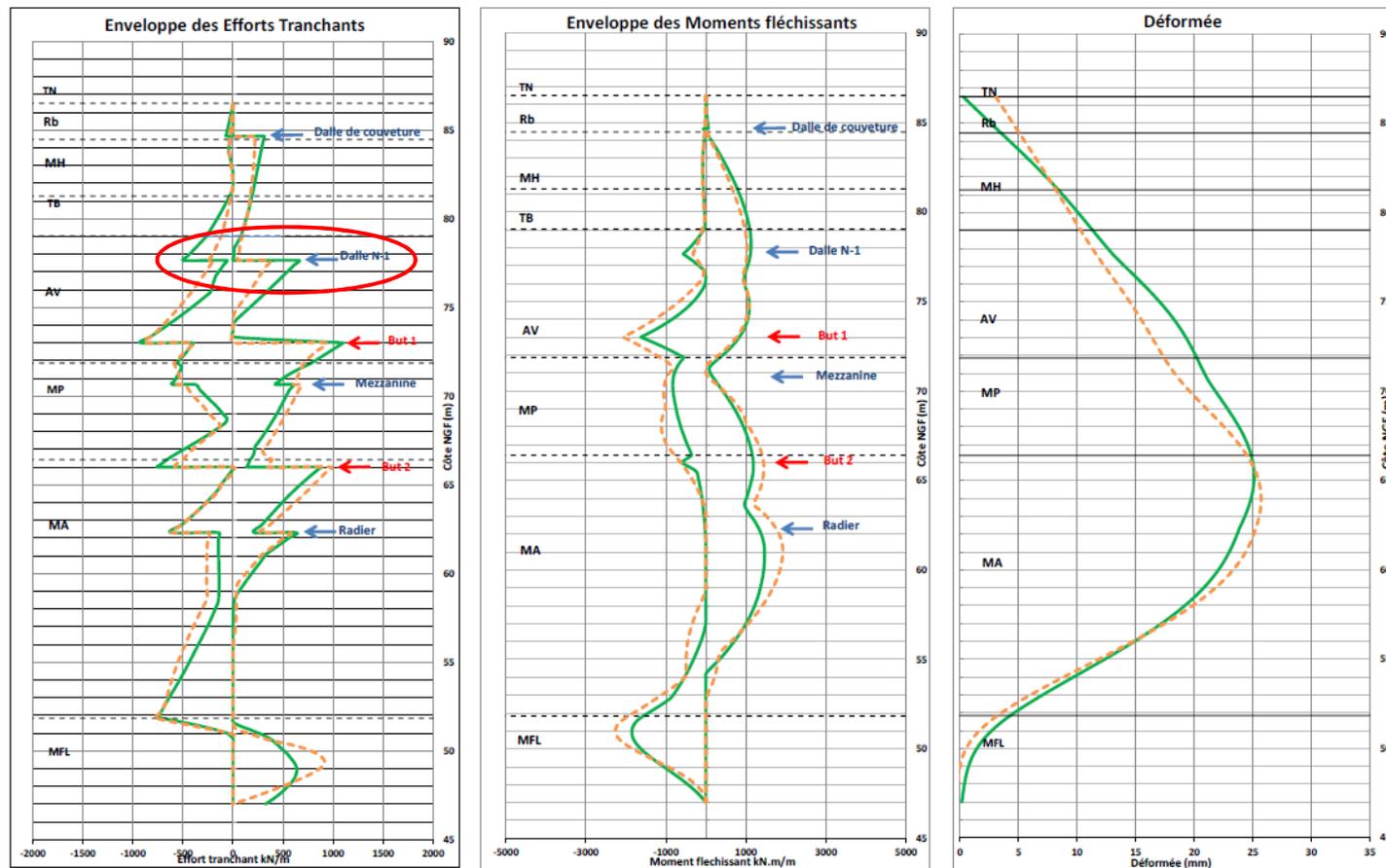
$c'=20$ kPa, $\varphi'=15^\circ$
 $\sigma'_3 = 156$ kPa (OCR 2)
 $T_{max} = 60$ kPa << $Cu = 110$ kPa



- Surpressions interstitielles négatives, caractéristiques du cisaillement non drainé dans le domaine surconsolidé ne peuvent être retrouvées sans introduire de dilatance;
- Prise en compte d'une dilatance: calage adéquat des pressions interstitielles mais augmentation continue du déviateur avec la déformation.
- Recalage univoque ne semble pas possible et en aucun cas compatible avec les paramètres de résistances effectifs retenus;

5. Modèles de calcul

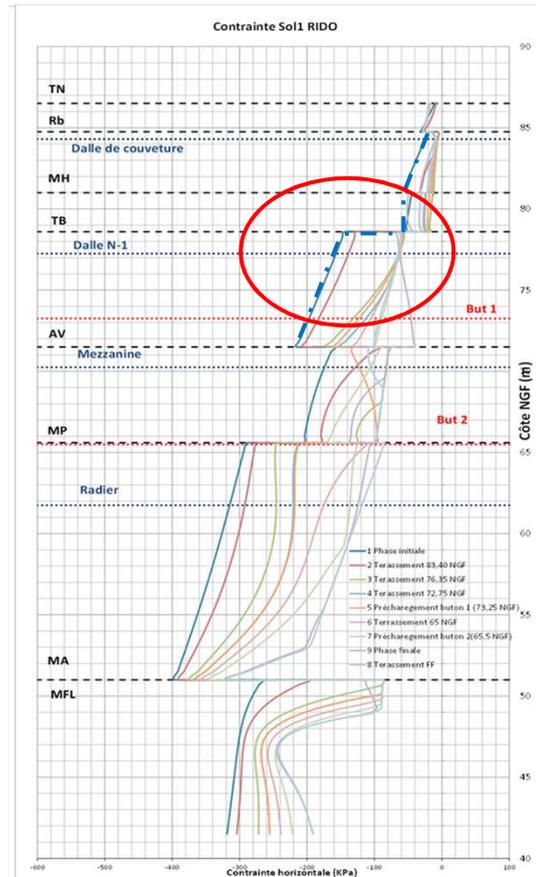
5.3 Comparaison des modèles Plaxis-Rido



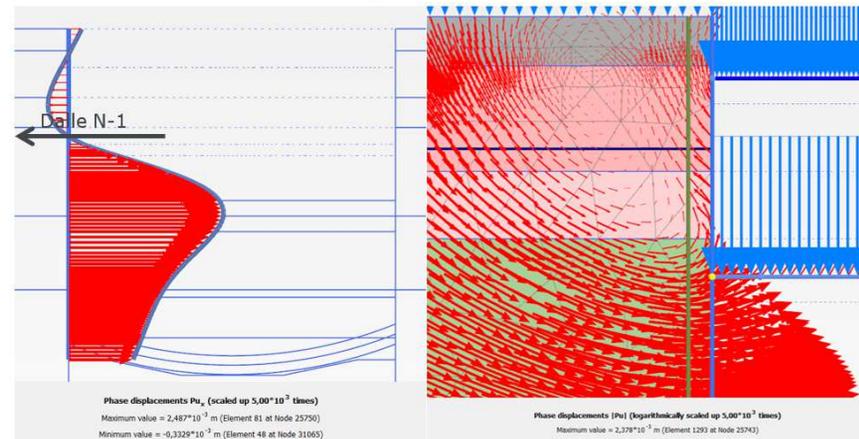
→ bonne concordance des efforts/déformations dans les écrans
 Dalle N-1 reprend plus d'effort normal dans Plaxis

5. Modèles de calcul

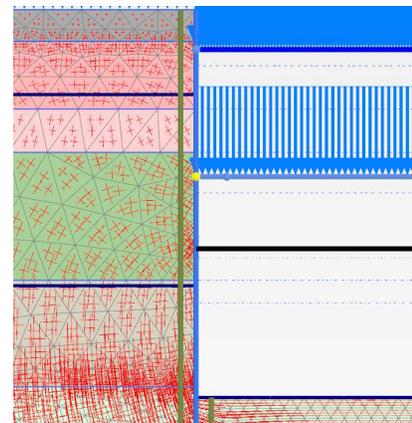
5.3 Comparaison des modèles Plaxis-Rido



- Effet « levier » autour du premier niveau d'appui d'autant plus important que le module de rechargement est élevé.



- Présence de butons modifie la distribution des contraintes dans le terrain avec des rotations des contraintes principales autour des appuis



→ Effet de voûte

Plaxis: contre butée dans les MH, TB et l'AV

6. Conclusion



- Campagne G2 « classique » conséquente complétée par des reconnaissances spécifiques ciblées pour le dimensionnement des écrans de soutènement
- Exploitation du retour d'expérience passé des soutènements profonds dans les argiles raides (notamment anglais)
- Modélisations aux coefficients de réaction et éléments finis exploratoires pour confirmer le type de modélisation à retenir pour le dimensionnement
- Auscultation importante prévue pour les structure et le terrain sera indispensable pour confronter les hypothèses de conceptions aux résultats de mesures