

L'optimisation
de la conception
des procédés
et des performances



nouvelles **A**pproches de **R**econnaissance
des **S**ols et de **C**onception des **O**uvrages
géotechniques avec le **P**ressiomètre



Journée de restitution

Développements sur l'interprétation de l'essai pressiométrique en condition Non Saturée et Non Drainée

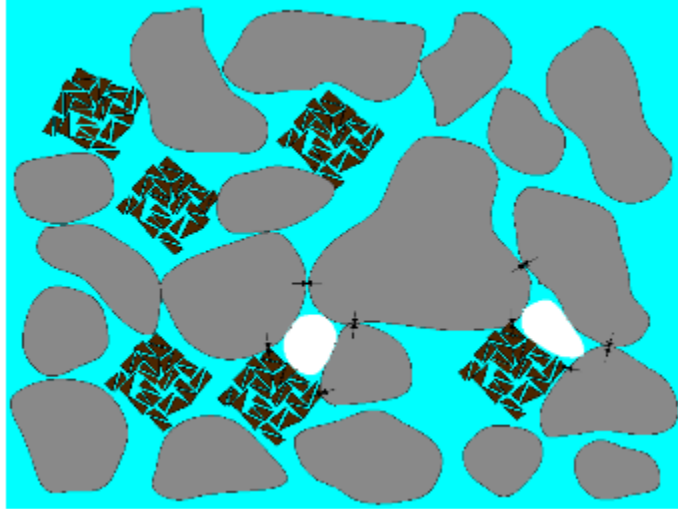
Jacques Monnet (Gaiatech), Luc Boutonnier (Egis)



1. Interprétation de l'essai dans l'argile
 - a) Analyse
 - b) Validation sur essai dans l'argile de Londres
 - c) Conséquence : Détermination des modules de cisaillement effectifs
2. Conclusions et perspectives

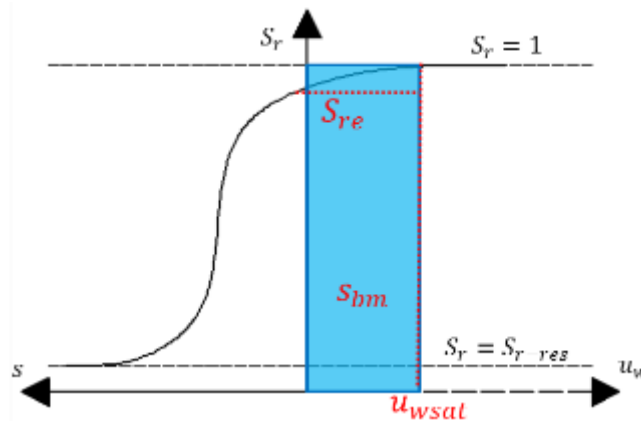
L'interprétation de l'essai pressiométrique dans l'argile peut être réalisée:

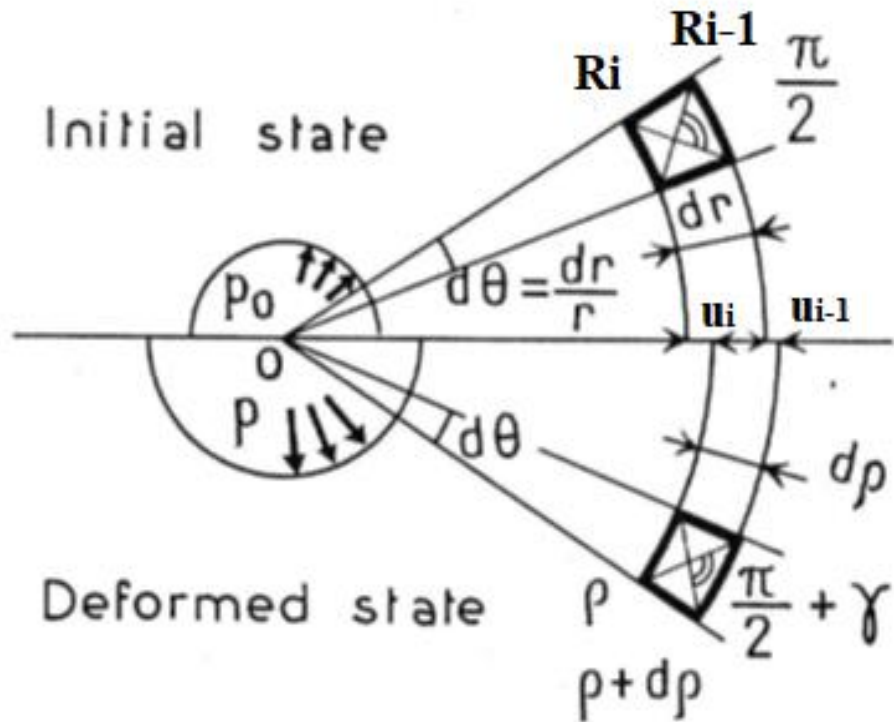
- ▶ Avec une hypothèse de Contrainte Totale, en supposant le sol saturé comme un matériau homogène et une élasticité linéaire ou non-linéaire (Gibson and Anderson 1961), (Wroth and Windle 1977), (Monnet and Chemaâ 1994), (Arulrajah et al. 2011), (Habert and Burlon 2020); (Hughes and Whittle 2023) cet axe de recherche suppose la symétrie des contraintes totales radiales et ortho-radiale par rapport à l'état au repos p_0 , ce qui n'est pas avéré.
- ▶ Avec une hypothèse de type Cam-Clay (Carter et al. 1979), (Silvestri and Abou-Samra 2012) dans laquelle la pression interstitielle ne varie qu'en fonction de la pression isotrope, alors que l'expérience montre qu'elle varie aussi au cisaillement
- ▶ Avec une hypothèse de sol Quasi-Saturé et Non-Drainé (Monnet et al. 2021), mais en supposant une élasticité Non Linéaire, c'est le développement que nous suivrons.



L'interprétation de l'essai pressiométrique dans l'argile, suppose :

- ▶ Un sol imperméable, sans drainage
- ▶ Pas de phénomènes dépendants du temps
- ▶ Le sol est dans un état avec de l'air occlus dans le domaine D3 de (Boutonnier , 2007)





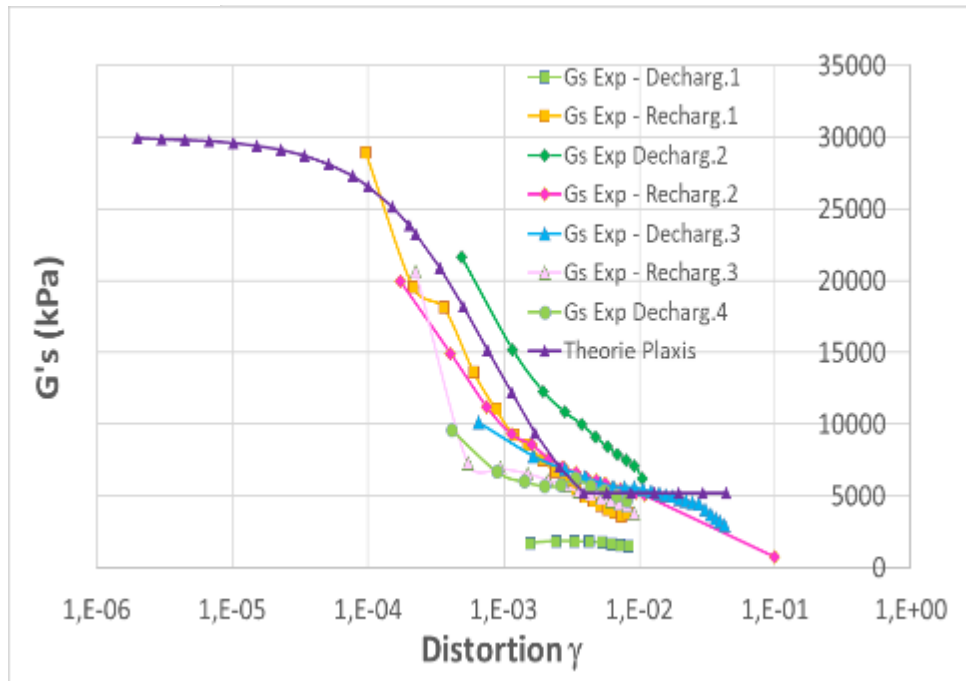
- L'équilibre du prisme élémentaire peut s'écrire par (1) ce qui permet d'avoir:
- l'évolution élastique de la contrainte radiale totale (2),
- de la contrainte radiale effective (3) et de la contrainte ortho-radiale effective (4)

$$r \cdot \frac{d\sigma'_r}{dr} + r \cdot \frac{du_w}{dr} + \sigma'_r - \sigma'_\theta = 0 \quad (1)$$

$$\sigma_r = a^2/r^2 \cdot (p - p_0) + p_0 \quad (2)$$

$$\sigma'_r = a^2/r^2 \cdot (p' - p'_0) + p'_0 \quad (3)$$

$$\sigma'_\theta = a^2/r^2 \cdot (p'_0 - p') + p'_0 \quad (4)$$



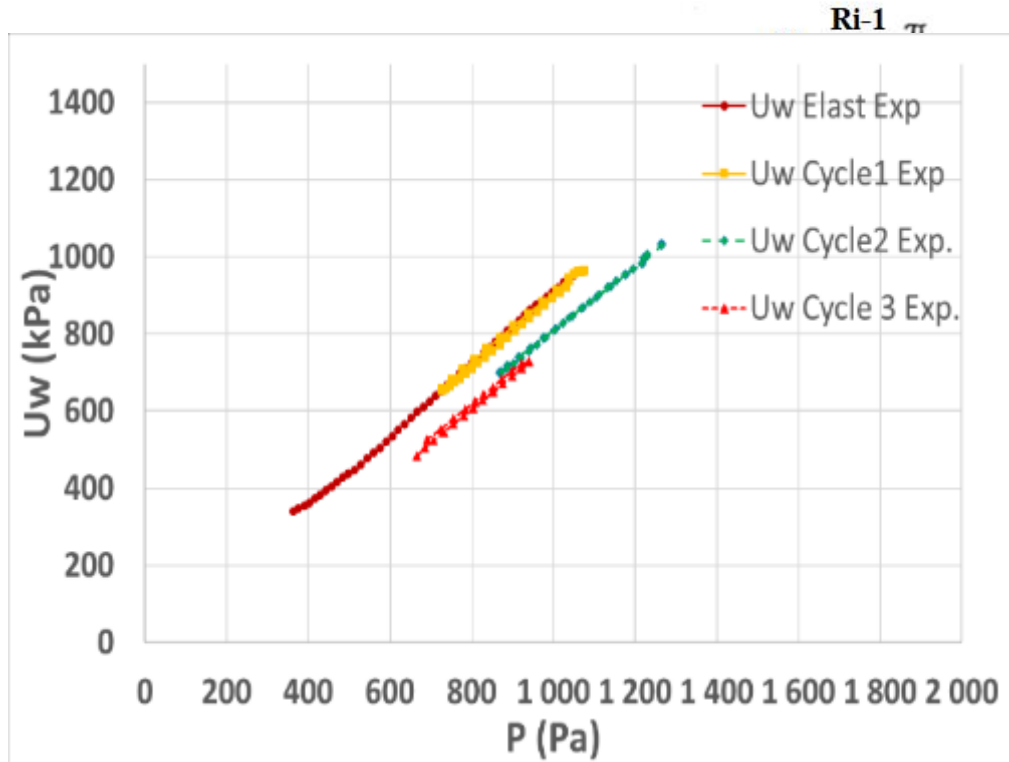
L'hypothèse d'élasticité Non-Linéaire correspond à deux comportements différents :

- Au chargement vierge, un comportement hyperbolique (Duncan et Chang, 1970) selon (5) avec Q le cisaillement

$$G'_s = G'_i \cdot \left(1 - \frac{Q}{Q_\alpha}\right) \quad (5)$$

- Au Déchargement-Rechargement un comportement de modèle (Santos et Correia, 2001) selon (6)

$$\frac{1}{G'_s(\varepsilon_\theta)} = \frac{1}{G'_{i0}} \cdot \left(1 + 0.385 \cdot \frac{\varepsilon_\theta}{\varepsilon_{\theta 0.7}}\right) \quad (6)$$

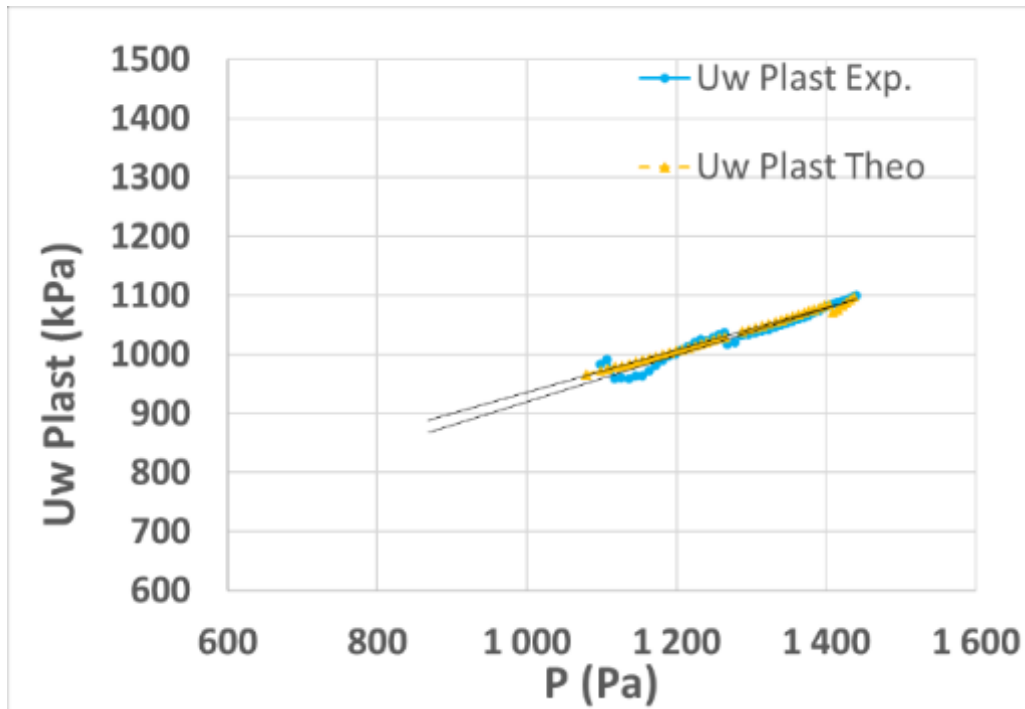


Le comportement élastique Non Linéaire a pour effet :

- D'avoir un déplacement radial au rayon R_i plus grand que celui qui serait obtenu par l'élasticité linéaire,
- Cet effet produit une diminution de volume du sol entre R_i et R_{i-1} , ce qui se traduit par une augmentation de Pression interstitielle
- Cette augmentation de P.I. peut être représentée par un coefficient Constant B_{pres} (5), trouvé expérimentalement, ce qui donne la relation entre contrainte Totale et Effective (6)

$$\delta u_{wi} / \delta \sigma_r = 1 / (1 + c_f \cdot n \cdot G'_s) = B_{pres} \quad (5)$$

$$\delta \sigma'_r = \delta \sigma_r (1 - B_{pres}) \quad (6)$$



Le comportement plastique correspond à un modèle de Mohr-Coulomb, qui a pour effet :

- De définir le seuil plastique à partir de c' et Φ'

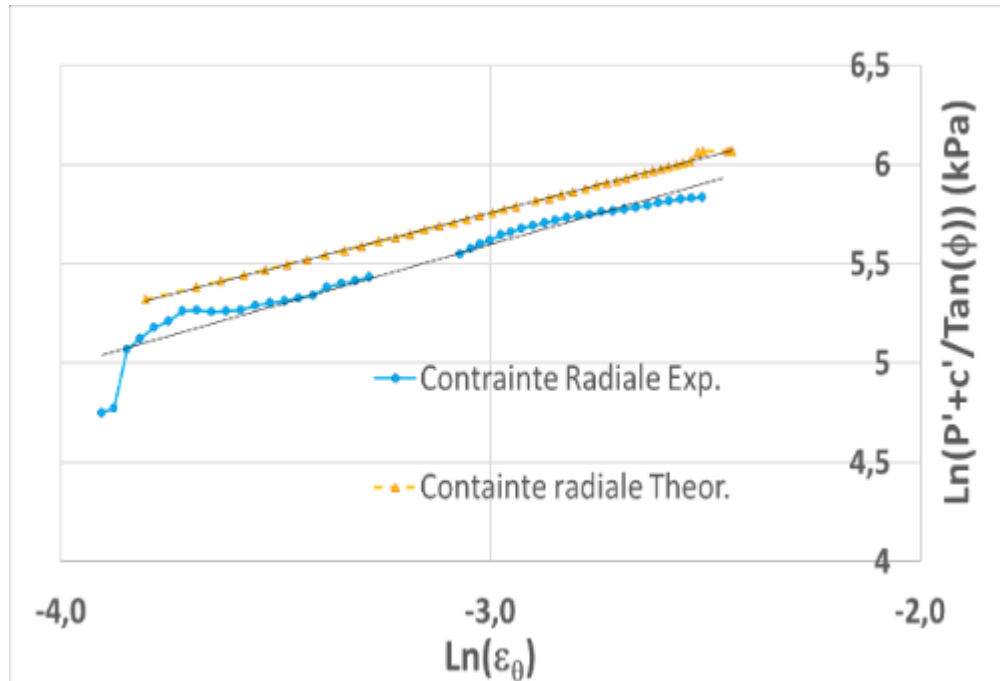
$$\sigma'_r - \sigma'_\theta - \sin\Phi' \cdot (\sigma'_r + \sigma'_\theta) - 2 \cdot c' \cdot \cos\Phi' = 0 \quad (7)$$

- De déterminer la contractance Ψ par la pente de la relation $u_w - \varepsilon_\theta$ (8)

$$\delta u_w = -2 \cdot \sin\psi / [(1 + \sin\psi) \cdot c_f \cdot n] \cdot \delta \varepsilon_\theta^p \quad (8)$$

- De retrouver le comportement en augmentation de la P.I. pendant la plasticité (9):

$$\delta u_w = B_{pres}^p \cdot \delta \sigma_r = B_{pres}^p / (1 - B_{pres}^p) \cdot \delta \sigma'_r \quad (9)$$



L'équilibre du prisme élémentaire dans le domaine plastique permet :

- De définir la contrainte effective au seuil plastique (10):

$$\sigma'_{rb} = p'_0 \cdot (1 + \sin\Phi') + c' \cdot \cos\Phi' \quad (10)$$

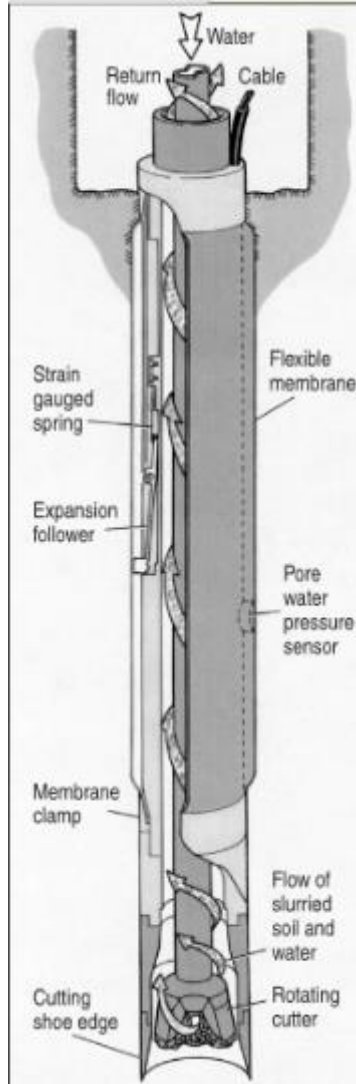
- De définir la Pression Interstitielle au seuil plastique (11) :

$$u_{wb} = B_{pres} \cdot (\sigma_{rb} - p_0) + u_{w0} \quad (11)$$

- De définir l'expression de la courbe pressiométrique corrigée du coefficient C_γ (12)

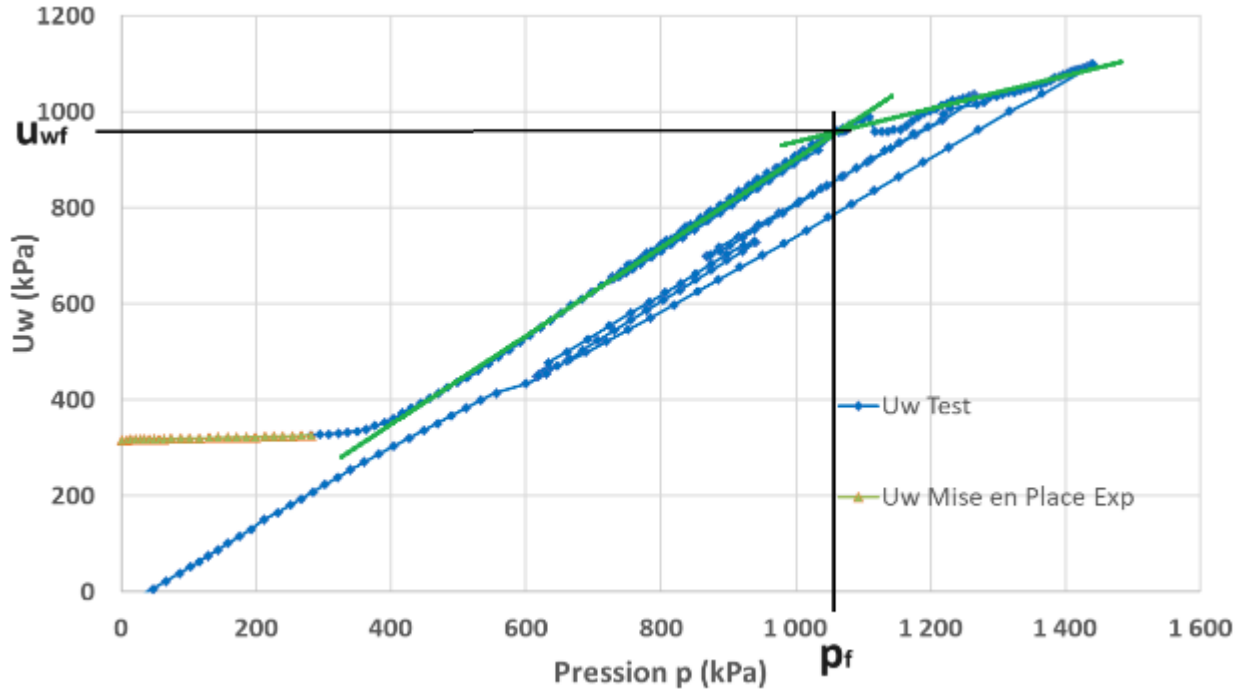
$$\text{Ln} \left(\frac{p' + c' / \text{tg}(\Phi')}{\sigma'_{rb} + c' / \text{tg}(\Phi')} \right) = C_\gamma (1 - B_{pres}^p) \cdot (1 - N_f) / (1 + n_e) \cdot \text{Ln}(\varepsilon_{\theta a} / \varepsilon_{\theta b}) \quad (12)$$

- Cette linéarité théorique est retrouvée expérimentalement



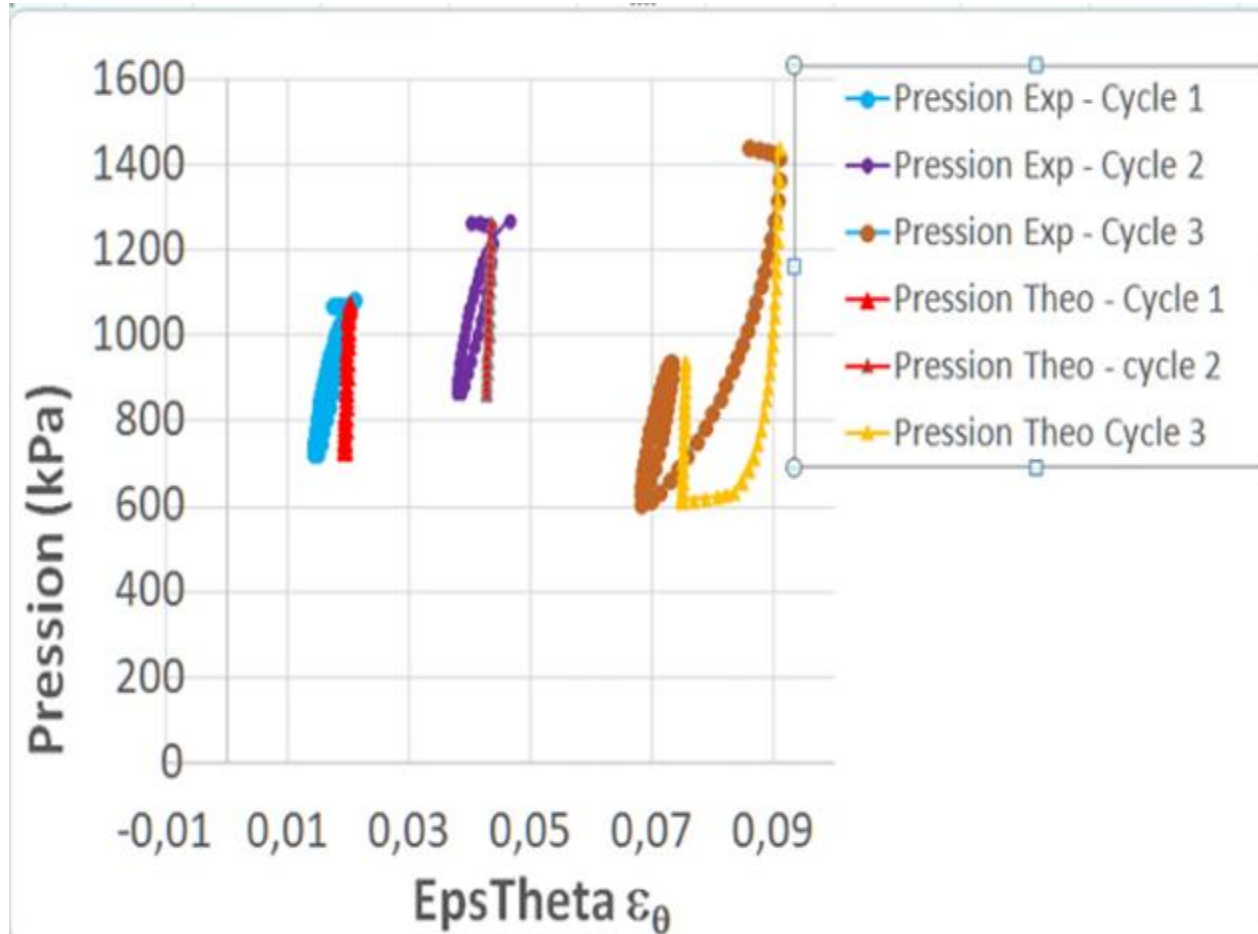
L'essai pressiométrique a été réalisé :

- ▶ Avec la sonde autoforeuse de diamètre 88,1 mm
- ▶ A la profondeur de 20,6m, la nappe phréatique est à 3m
- ▶ Les mesures sont faites toutes les 5sec. de la pression (kPa) et du déplacement sur 6 doigts palpeurs
- ▶ La Pression Interstitielle est mesurée sur 2 capteurs diamétralement opposé au centre de la sonde
- ▶ Le sol testé est l'argile de Londres
- ▶ L'essai a été gracieusement fourni par Robert Whittle (Cambridge InSitu)



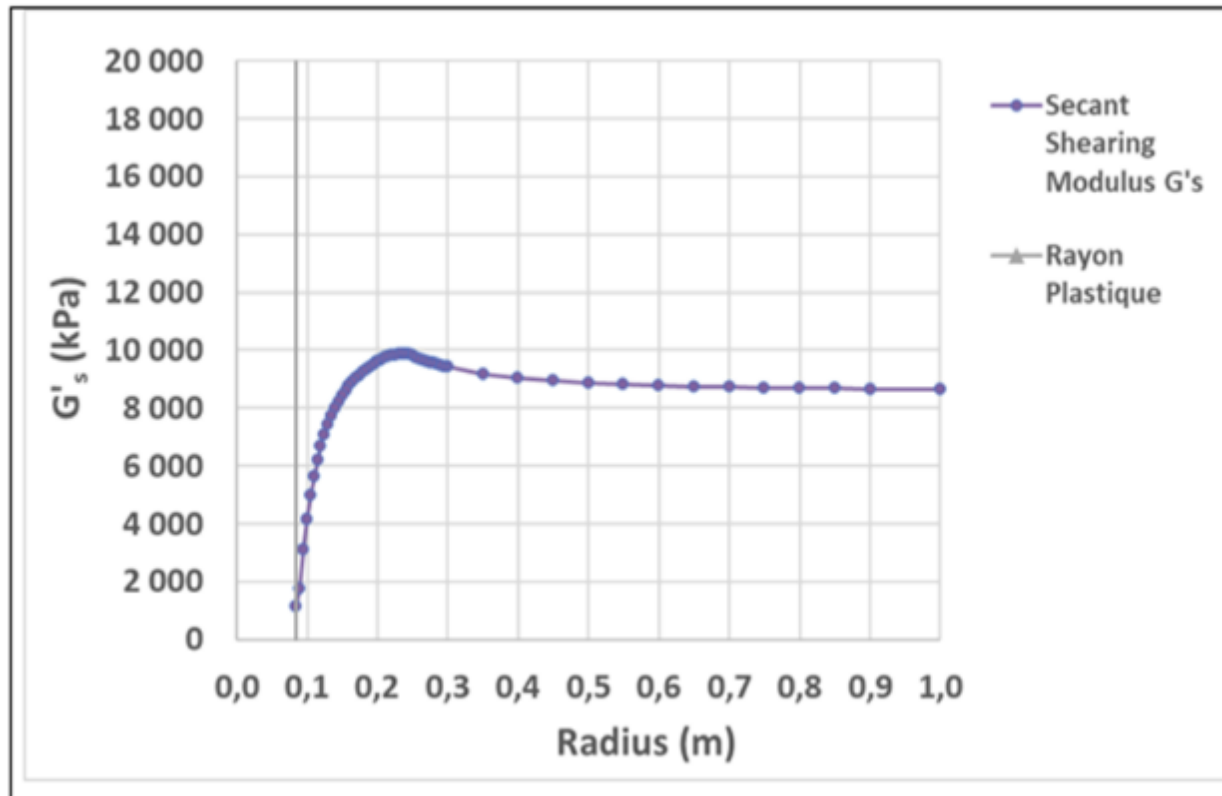
L'interprétation de l'essai permet de mesurer:

- L'état des terres au repos p_0 comme l'intersection de la Pression Interstitielle initiale et du comportement linéaire élastique au chargement vierge, (u_{w0}, p_0)
- Le seuil plastique, comme l'intersection du comportement linéaire élastique et du comportement linéaire plastique, (u_{wf}, p_f)



La validation se fait par comparaison avec l'expérience :

- Les paramètres utilisés sont indiqués :
- On contrôle la bonne correspondance dans l'évolution de la Contrainte totale, et de la pression interstitielle au chargement vierge
- Il subsiste quelques différences au niveau des cycles, qui sont dues à la variation constatée du coefficient B_{press} selon les cycles considérés



L'analyse permet aussi de (re)trouver :

- L'évolution de la Pression Interstitielle
 - L'évolution des contraintes effectives et la symétrie par rapport à p'_0 en élasticité
 - La valeur du rayon plastique
 - L'évolution des contraintes effectives en plasticité
 - L'évolution des contraintes Totales en élasticité et en plasticité, ainsi que l'évolution de la Pression Interstitielle
- L'évolution des déformations en élasticité et plasticité
 - L'évolution du module de cisaillement le long du rayon

La pression interstitielle calculée est très proche de l'expérience. Avec une interprétation de l'essai en pression totale, le module de cisaillement est élevé sur chargement vierge (**col.2**) et sur cycles (**col.3**). Avec une interprétation de l'essai en pression effective, le module de cisaillement est 20 fois plus faible sur chargement vierge (**col.4**) et 7 fois plus faible sur cycles (**col.5**).

Variable	G_s Virgin	G_s Cyclic	G'_s Virgin	G'_s Cyclic	G'_{s50}	G'_{s50}	G'_{sFin}	G_s/G'_s	G_s Cycl/ G_s Virgin
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa		
Virgin-Load	14023		706		10904	7162	706	19.9	1.9
Cycle 1		25629		3001	20000		3001	8.5	4.3
Cycle 2		23350		3504	20000		3504	6.7	5.0
Cycle 3		29976		3998	20000		3998	7.5	5.7

Les contributions de Gaiatech et EGIS ont porté sur :

- Interprétation en contrainte effective de l'essai pressiométrique dans l'argile

Les bénéfices pour le projet ARSCOP qui peuvent être listés :

- Détermination du module de cisaillement effectif du sol dans les argiles
- Détermination du couple cohésion – frottement dans les argiles

Perspectives :

- Amélioration de la détermination du coefficient B_{pres}
- Prise en compte des phénomènes liés au temps (consolidation, fluage,...)

Merci de votre attention