

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



Mesure des modules à faibles déformations

Présenté par Alexandre LOPES

alexandre.lopes@setec.com

- Introduction des présentations de la séance
- Démonstration de la méthode proposée
 - argiles surconsolidées (Merville)
 - sables denses (Dunkerque)
- Éléments de validation expérimentale en conditions contrôlées
- Présentation des méthodes d'interprétation
 - Méthodes semi-empiriques
 - Méthodes analytiques
- Besoins spécifiques pour la mise en œuvre
 - Protocoles d'essais
 - Matériel d'essais
- Conclusion

Synthèse du chapitre 3

Procédures améliorées pour les essais et le calcul des paramètres

► Quatre axes principaux de travail

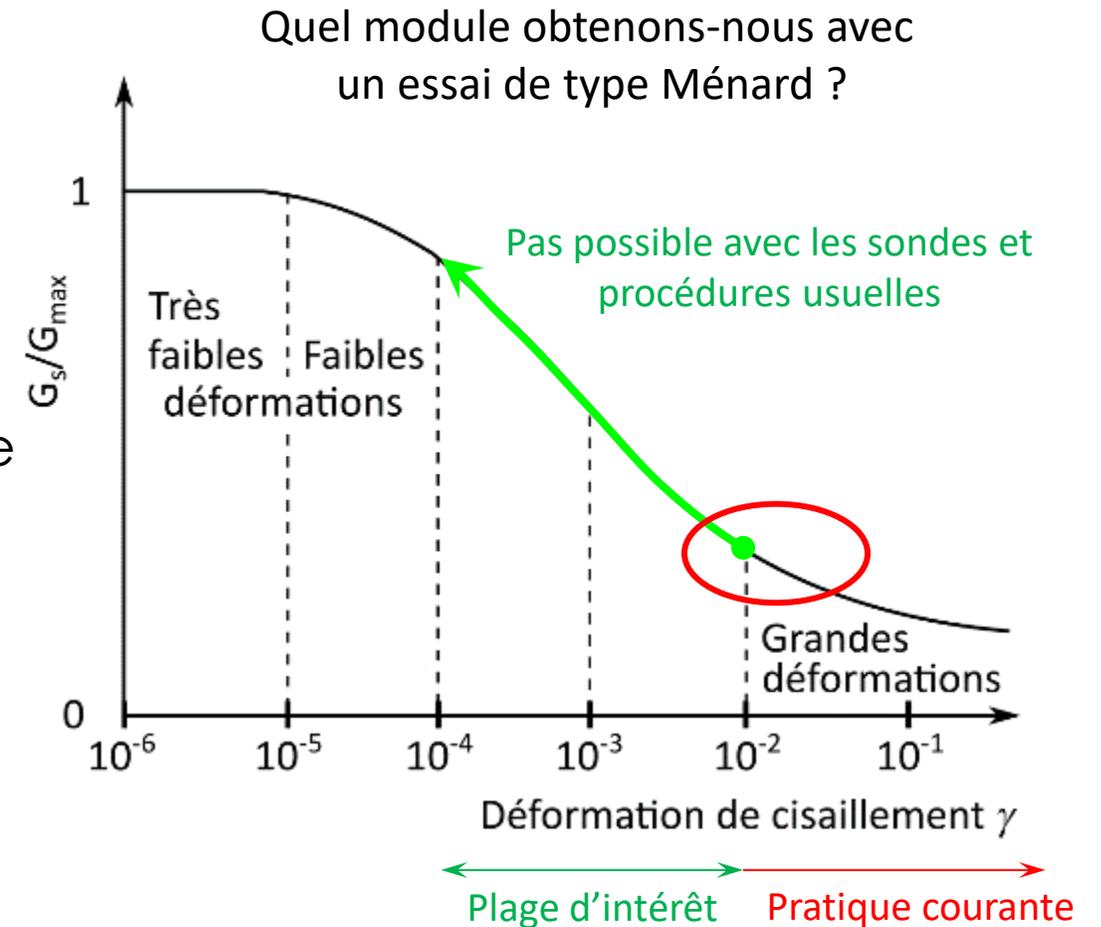
- Détermination des modules de cisaillement à faibles déformations
- Développements sur l'automatisation de l'essai
- Développements sur la mesure de la pression interstitielle
- Développements des procédures d'essai et d'interprétation

► Objectif :

- Accroître la fiabilité de l'essai et déterminer des propriétés du terrain qui ne peuvent pas être déterminées avec le matériel et les procédures actuelles
- Travail sur : Matériel d'essais, protocoles d'essais, méthodes d'interprétation

► Mesure des modules à faibles déformations

- **Objectif** : accéder aux modules **G à faibles niveaux de déformation**, couvrant la plage entre **10^{-4} à 10^{-2}** , qui concerne un grand nombre d'ouvrages et n'est aujourd'hui accessible que par corrélations empiriques ou autres types d'essais
- **Moyens** : mise en œuvre d'une sonde pressiométrique innovante et application de **procédures d'essais adaptées** pour s'affranchir des limitations identifiées
- **Méthode** : **validation** en conditions contrôlées et puis sur sites de référence
- **Résultats** : Confirmation de la faisabilité et **recommandations sur des besoins spécifiques**



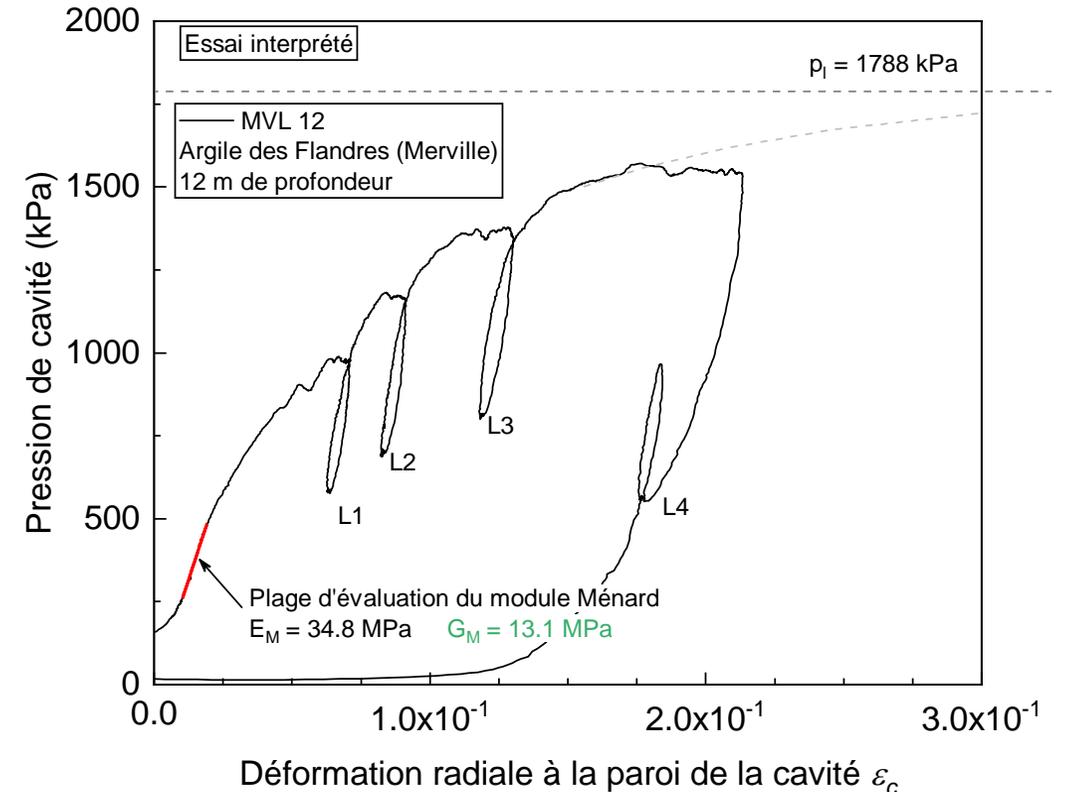
► Procédure avec trois boucles

- Chargement de la cavité par **incréments constants de volume**, mais aussi possible par paliers de pression
- **Boucles réalisées après la pression de fluage** pressiométrique définie usuellement
- Un **palier de fluage long** avant chaque décharge
- **Amplitude des boucles** de l'ordre de 40% de la pression avant décharge
- Interprétation des modules à partir des boucles
- Estimation possible de E_M et de p_{IM}



Argiles des Flandres, 12m de profondeur :

- $IP = 40$ à 60
- $c_u \sim 200$ kPa
- Géophysique: $G_{0,h} = 50$ à 70 MPa
- Autres essais in situ disponibles

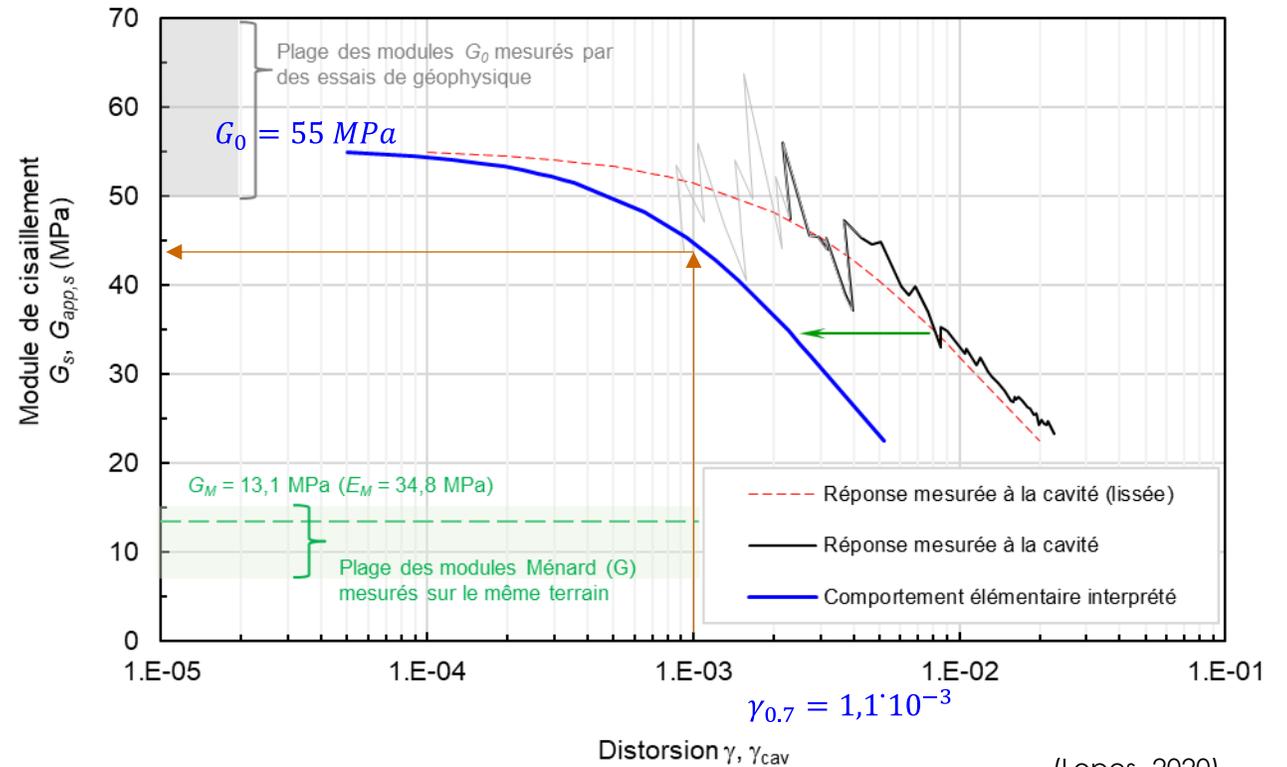
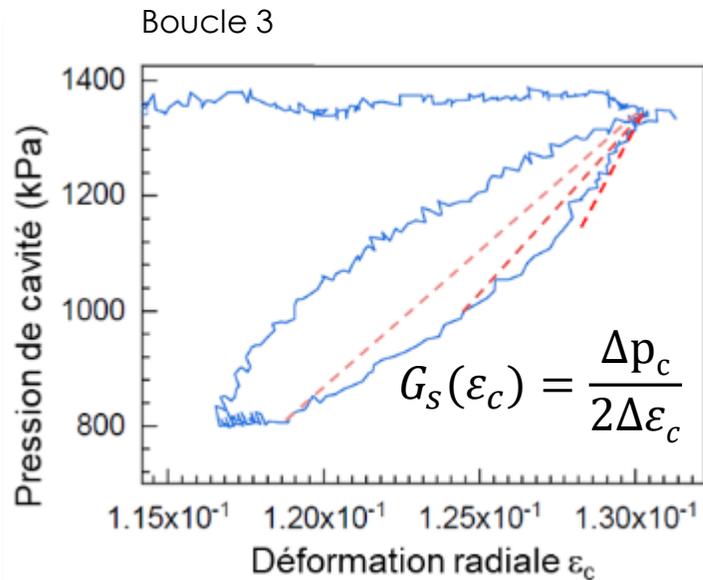


- Calcul des **modules apparents sécants**
- Interprétation : empirique ou analytique
- Cas des argiles (comportement considéré non drainé) : les trois boucles sont similaires



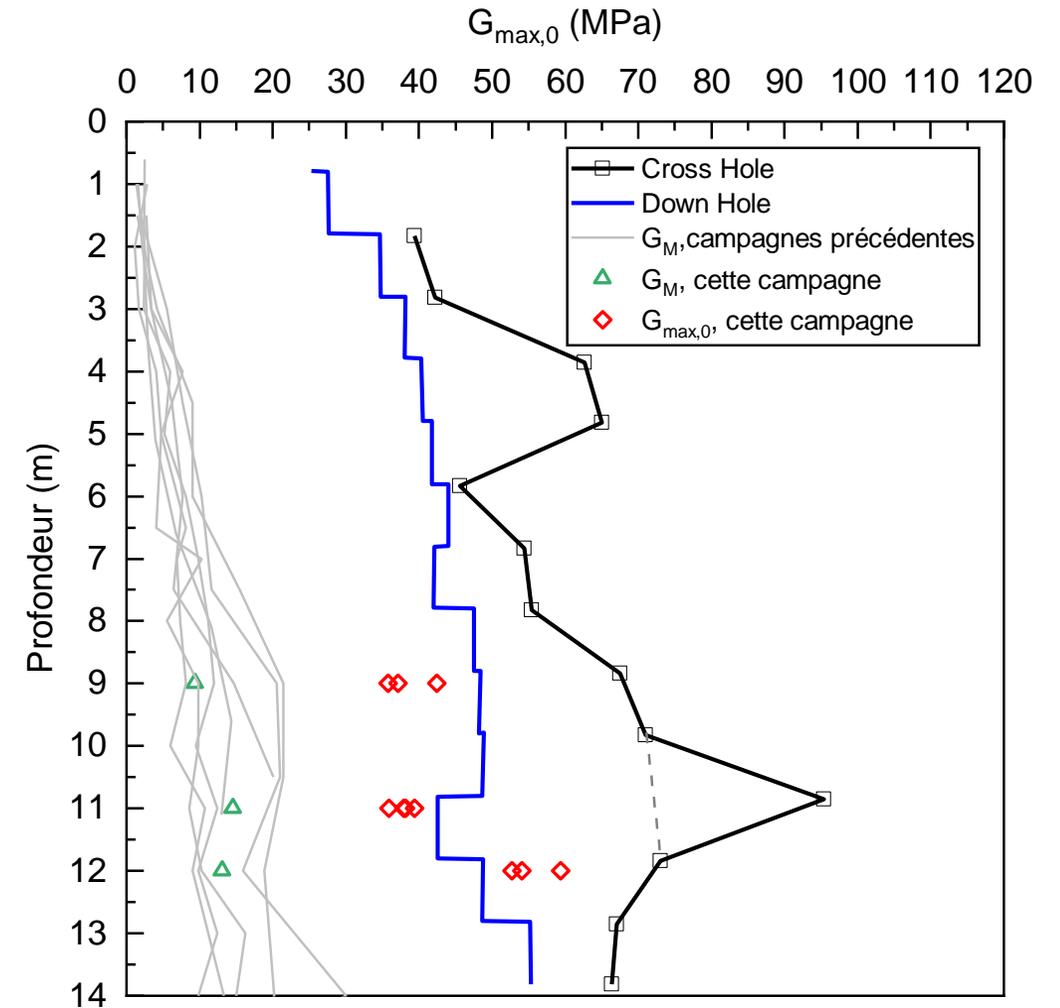
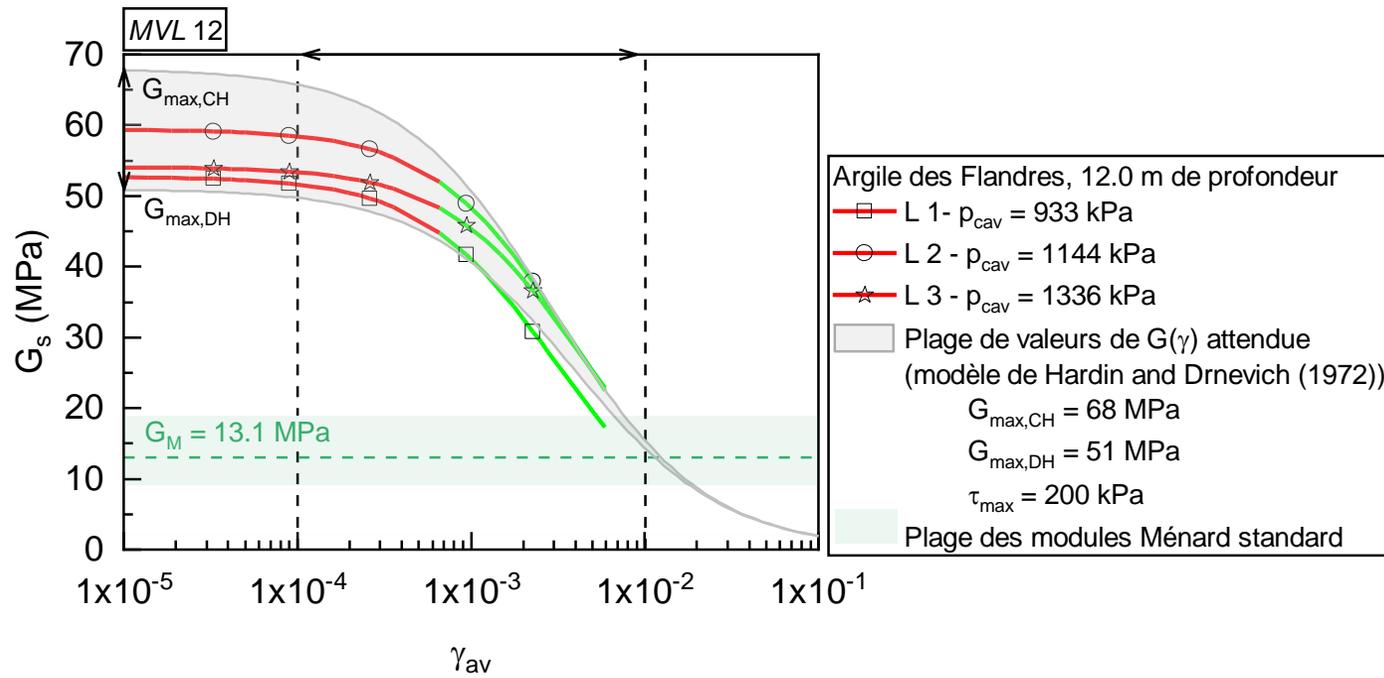
Argiles des Flandres, 12m de profondeur :

- $IP = 40$ à 60
- $c_u \sim 200$ kPa
- Géophysique: $G_{0,h} = 50$ à 70 MPa
- Autres essais in situ disponibles



(Lopes, 2020)

- Cohérent avec les propriétés de l'argile des Flandres déterminées par ailleurs
- Valeurs de $G_{0,h}$ satisfaisantes
- Taux de décroissance du module cohérent avec les courbes de référence de la littérature



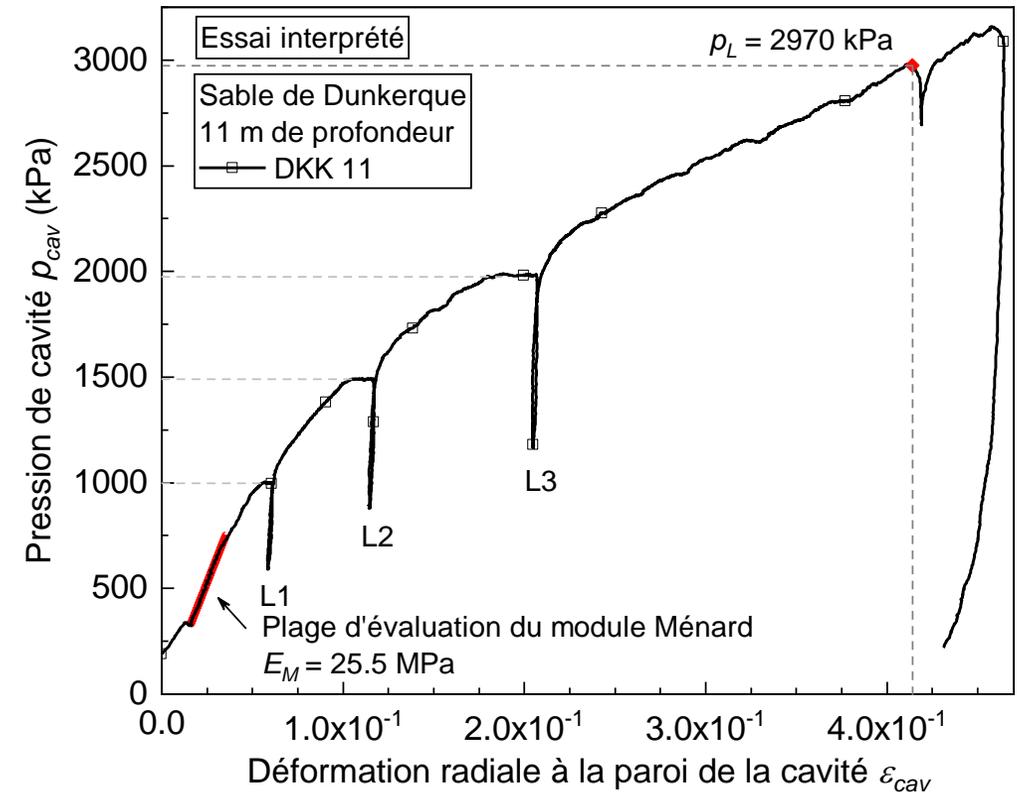
(Lopes, 2020)

► Même procédure avec trois boucles

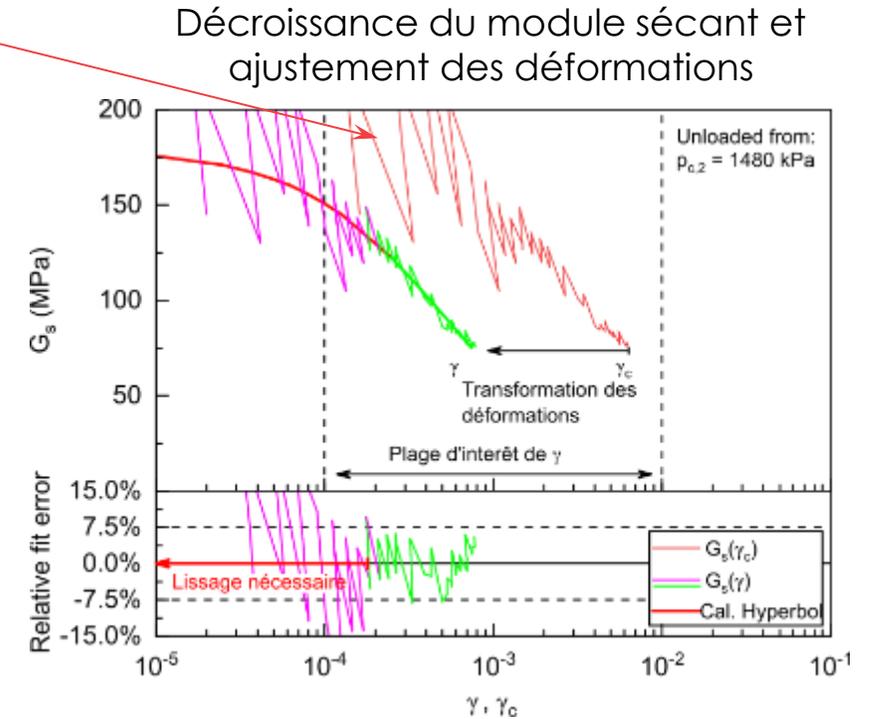
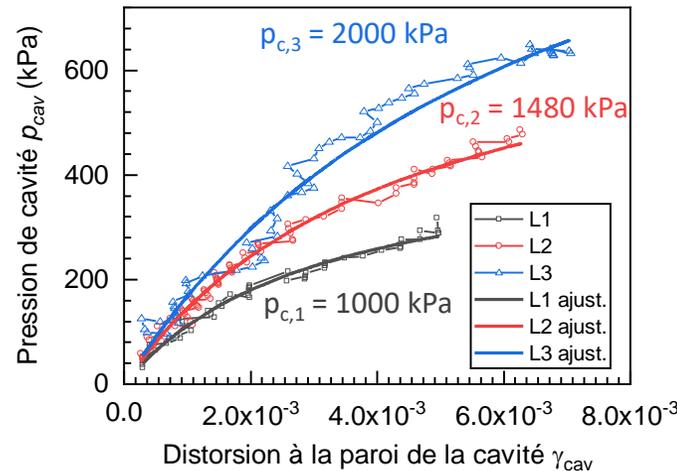
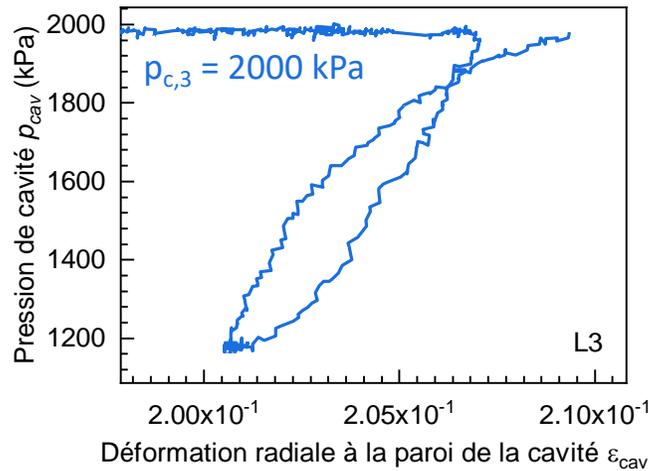
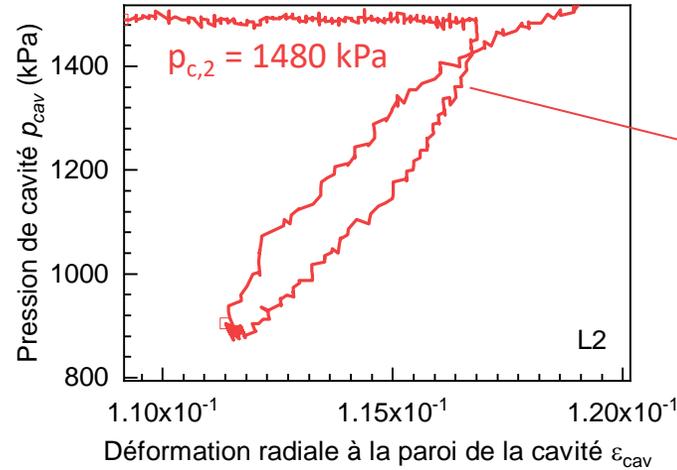
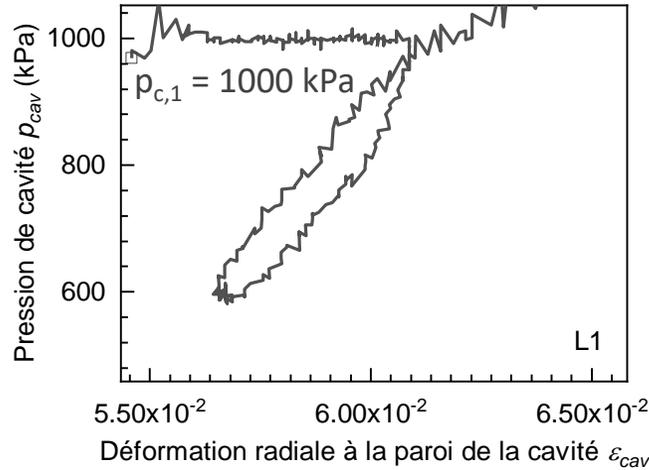
- Dans le cas des sables (comportement drainé) l'essai permet de cerner l'influence de la pression sur le module
- Méthodes d'interprétation essentiellement empiriques
 - Ajustement des déformations et des contraintes
- Avec (au moins) trois boucles il est possible d'estimer le module de cisaillement associé à l'état initial des contraintes dans le terrain (hypothèse nécessaire sur $\sigma'_{h,0}$)



- Sables denses, 11 m de profondeur :
- $ID = 0.75$.
 - CPT : $q_t = 20$ à 30 MPa
 - Géophysique: $G_{0,h} = 90$ à 140 MPa

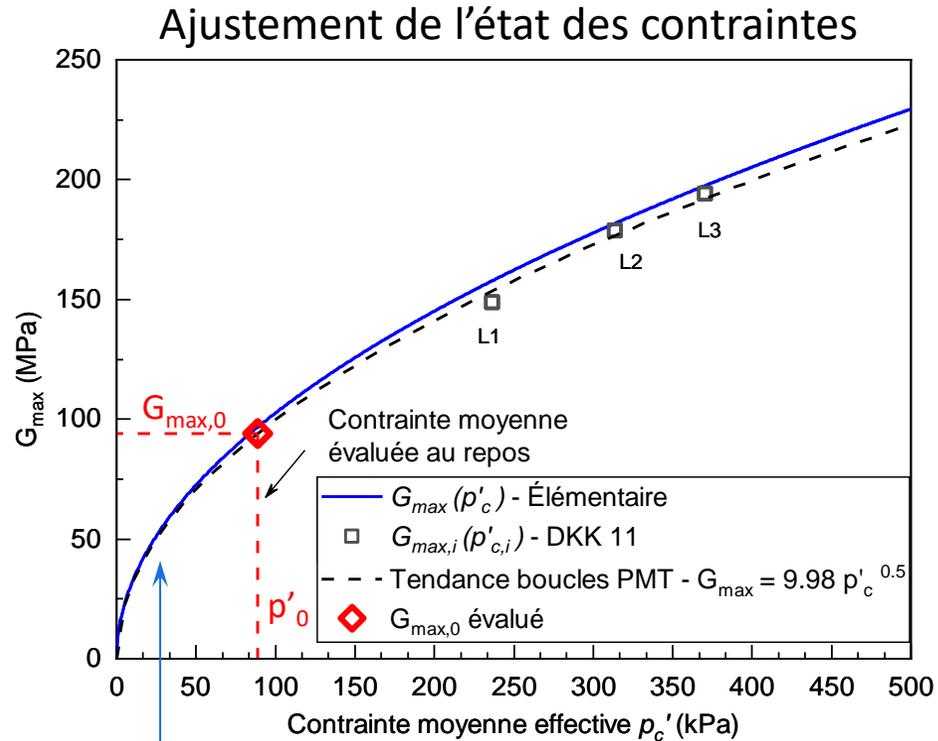


- Détail des boucles et influence de la pression sur la raideur



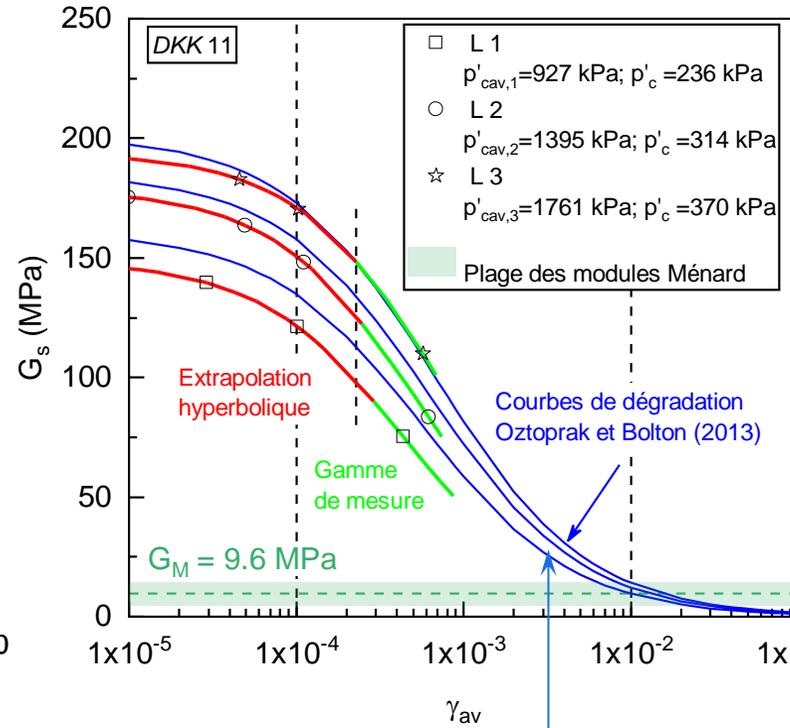
(Lopes, 2020)

- Comparaison avec des courbes de référence de la littérature et mesures sismiques sur le terrain



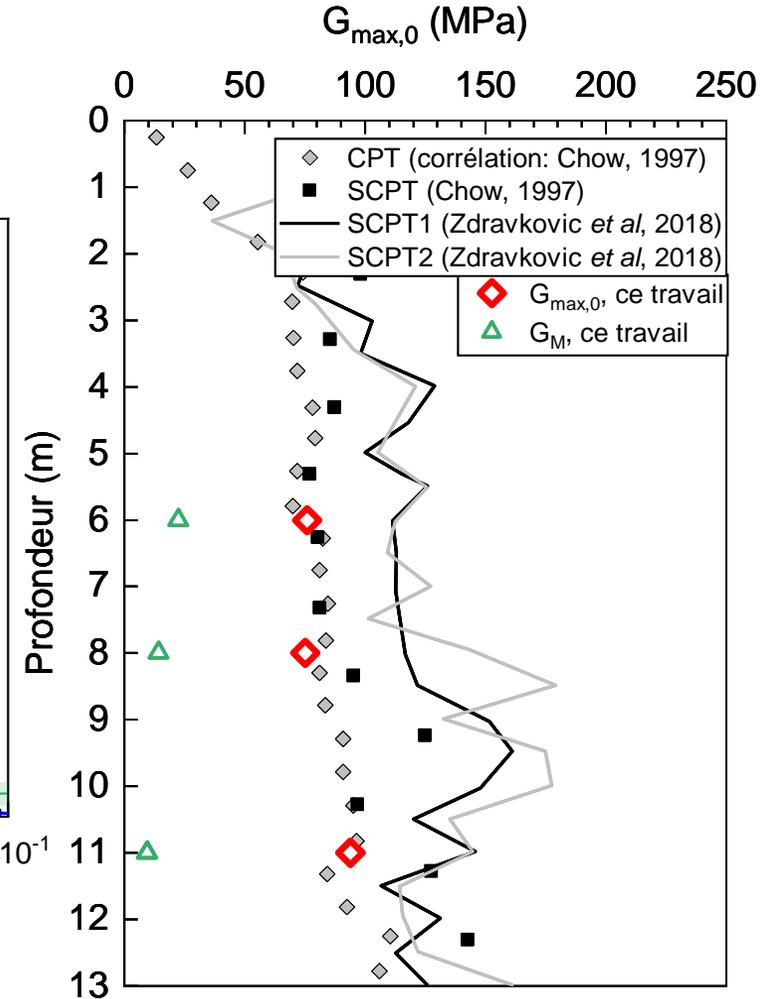
$$G_{max} = 310 \cdot p'_{ref} \cdot \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \left(\frac{p'_c}{p'_{ref}} \right)^{0.5}$$

(Zdravković et al., 2018) – $e = 0.64$



$$\frac{G_s}{G_{max}} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\gamma - \gamma_e}{\gamma_r} \right)^a \right]}$$

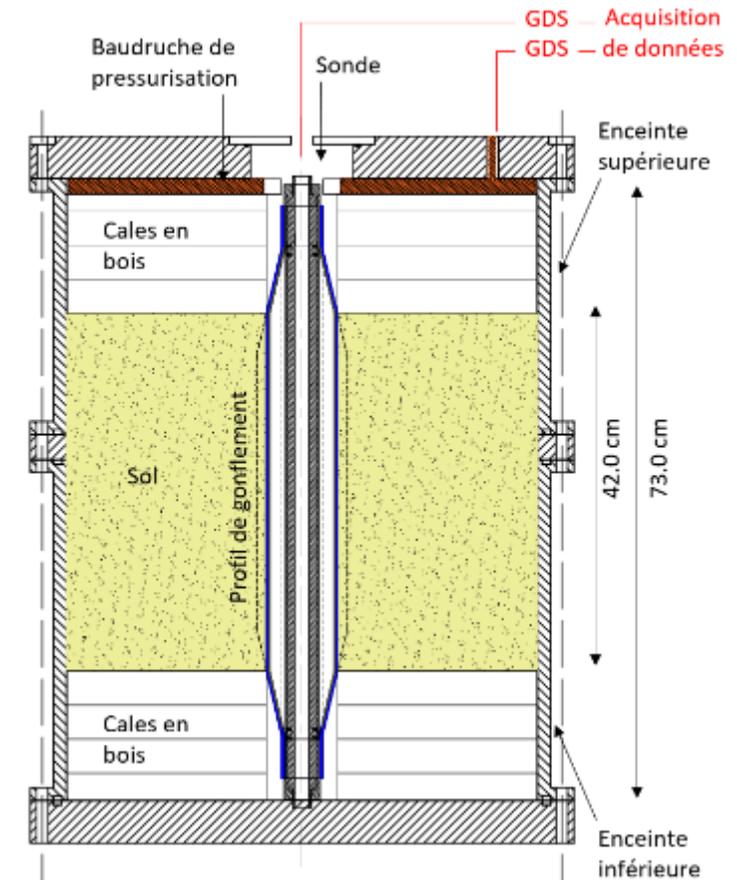
(Oztoprak et Bolton, 2013)



(Lopes, 2020)

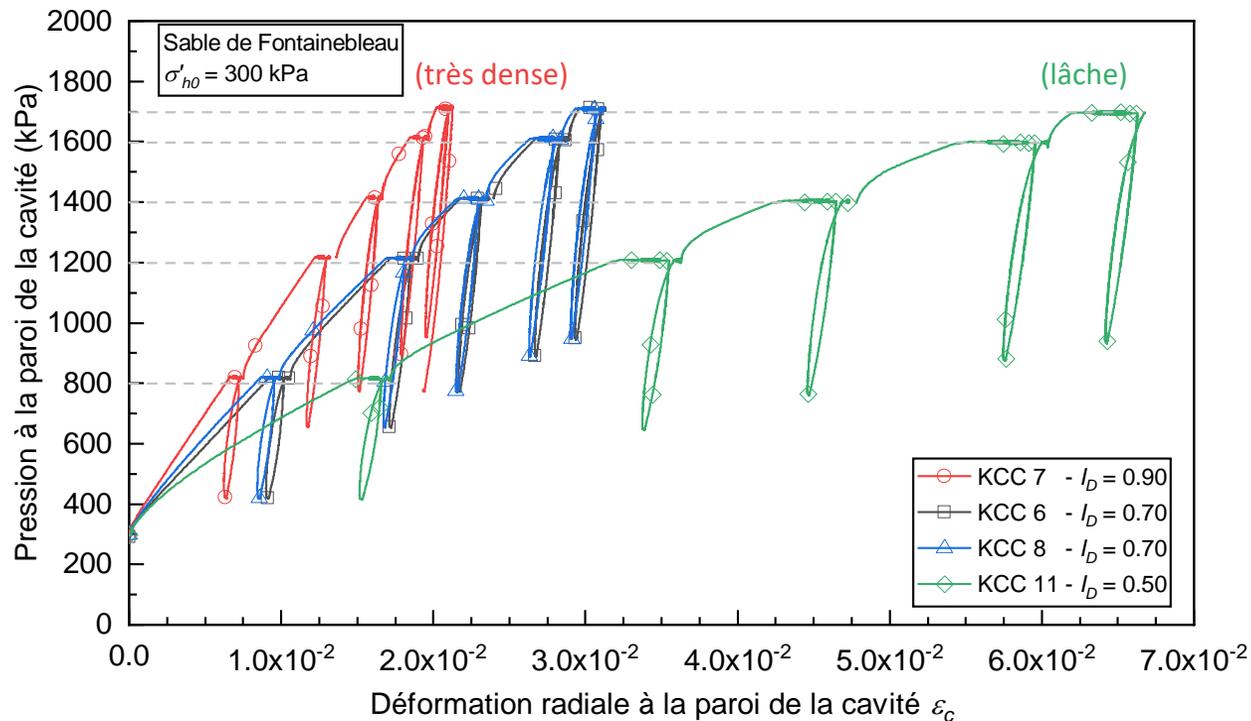
► Essais en chambre d'étalonnage

- Influence négligeable des conditions limites sur G (vérifié par calculs aux éléments finis)
- Deux types de chambres testés et comparés
- Essais de répétabilité possibles
- Conditions œdométriques de cellule
 - $\sigma'_{v,0}$ imposé
 - $\varepsilon_r = 0$ sur la paroi
- Simulation de la géométrie d'un forage
- Sable de Fontainebleau NE34, dont les courbes de référence sont connues



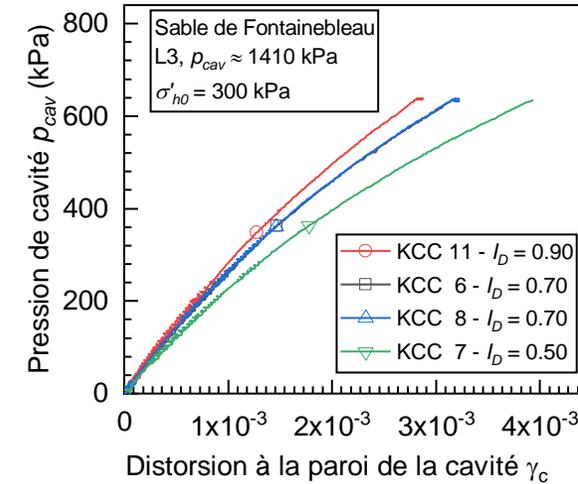
► Etude paramétrique

- Influence de la densité relative
- Influence de la pression de cavité avant décharge

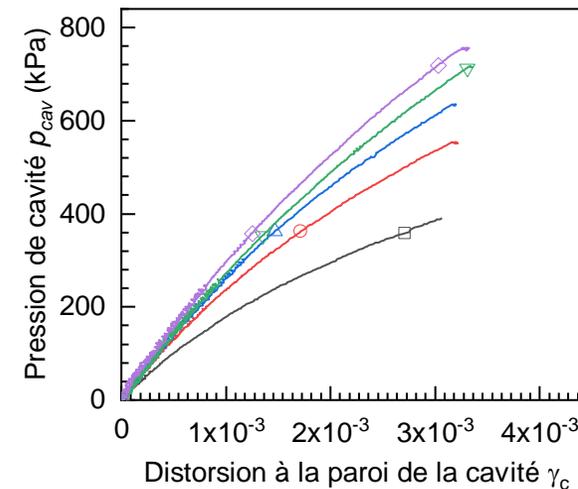


(Lopes et al, 2021, *Canadian Geotechnical Journal*)

Boucles de décharge



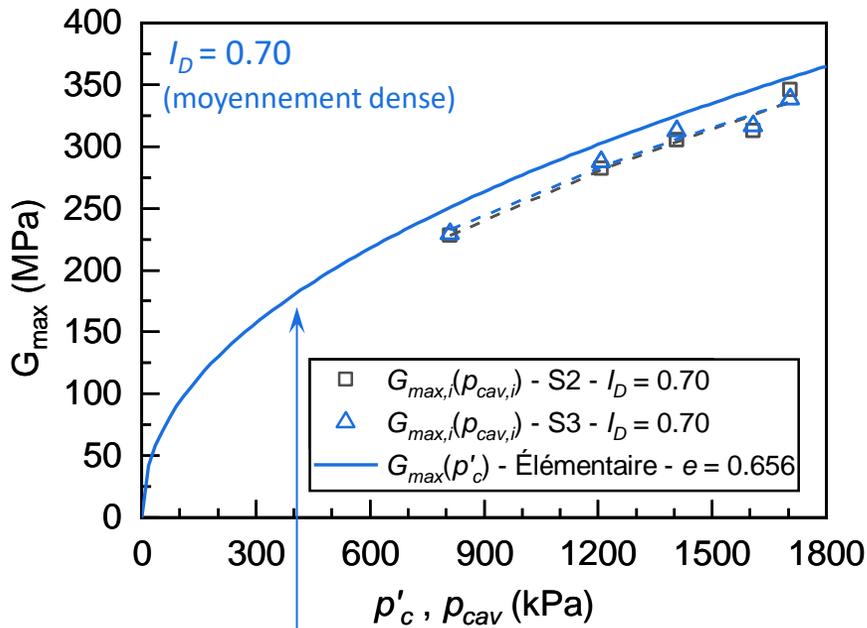
$p_{cav,i}$ constant
 I_D variable



I_D constant
 $p_{cav,i}$ variable

► Validation par comparaison aux courbes de référence

- Module maximum et courbe de décroissance



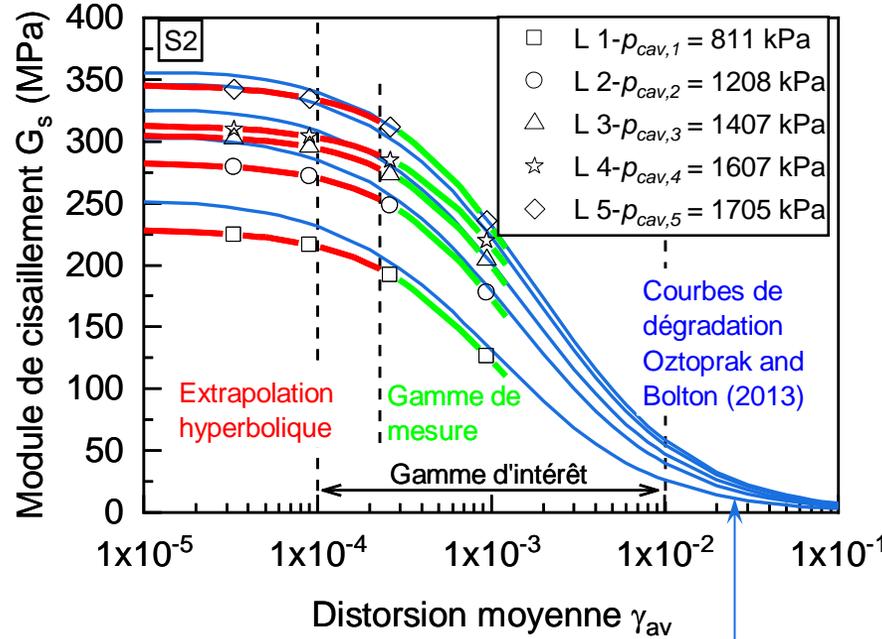
Comportement
Élémentaire de
référence

$$G_{max} = 200 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} p'_c{}^{0.47}$$

Dans ce cas :

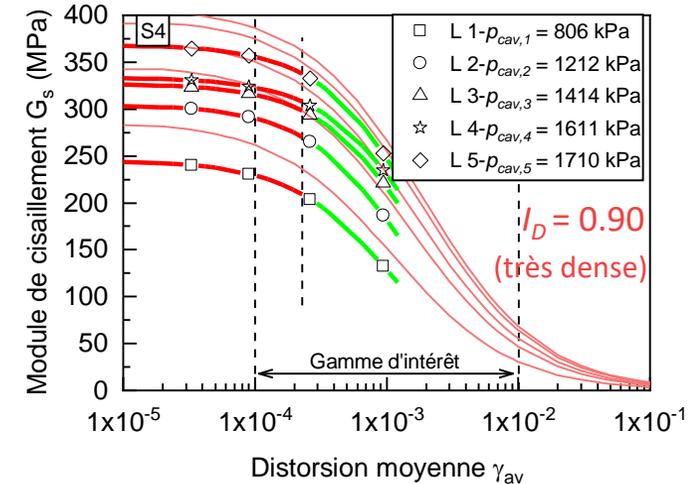
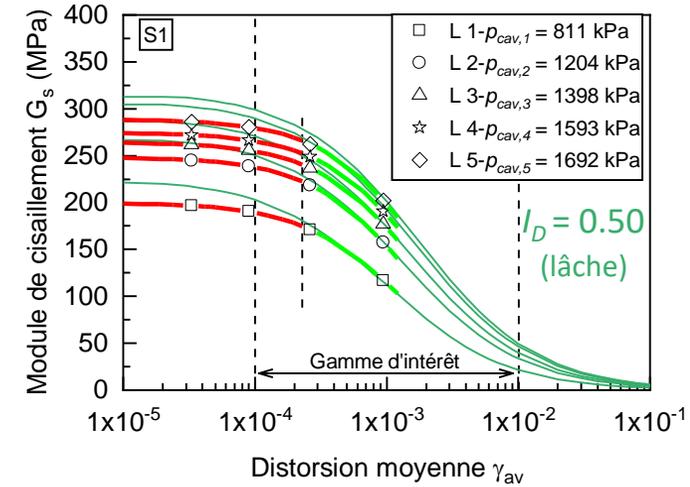
$$p'_{c,i} \approx p_{cav,i}$$

(Delfosse-Ribay et al., 2004)



$$\frac{G_s}{G_{max}} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\gamma - \gamma_e}{\gamma_r}\right)^a\right]}$$

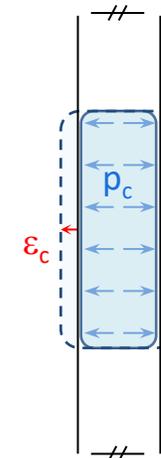
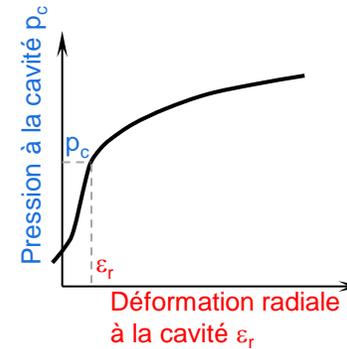
(Oztoprak et Bolton, 2013)



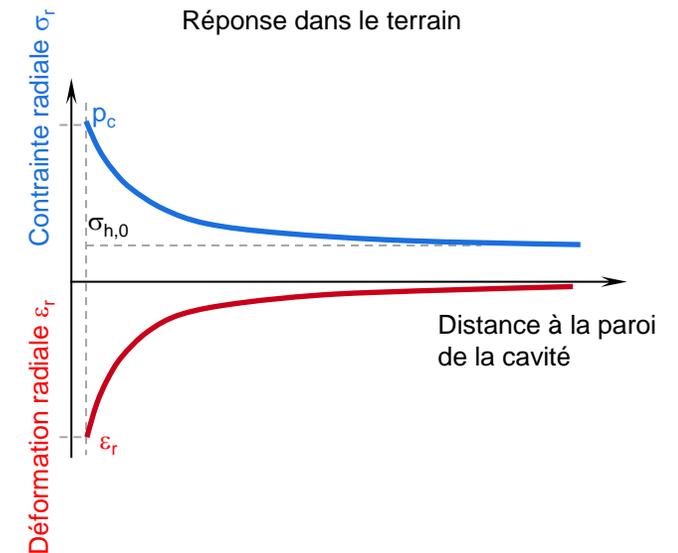
► Éléments théoriques

- Le terrain autour de la cavité est associé à un niveau de déformation et de contrainte variable en fonction de la distance
- Les mesures de p - V (ou p - r) ne concernent que la **réponse du massif vues à la paroi**
- Elles sont une **intégration du comportement global du massif : raideur apparente**
- L'interprétation doit en tenir compte dans le cadre de **dépendance $G(p', \gamma)$**
 - Méthodes empiriques
 - Méthodes analytiques
- Cette distinction n'a pas lieu dans le cas hypothétique historique de l'élasticité linéaire

Réponse à la paroi de la cavité

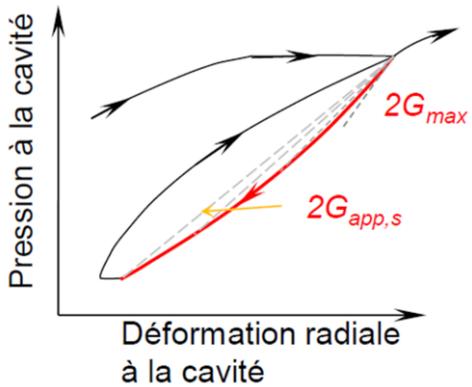


Réponse dans le terrain

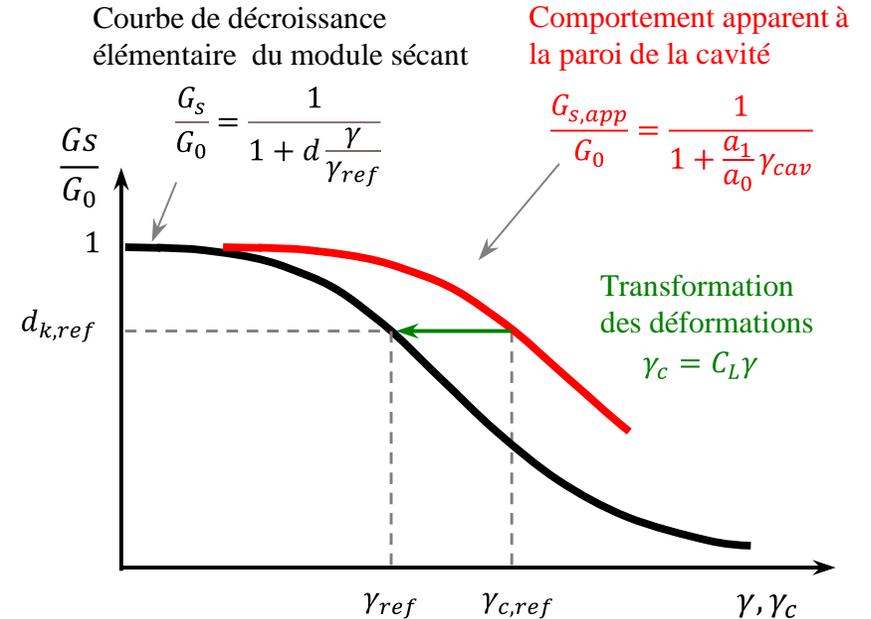
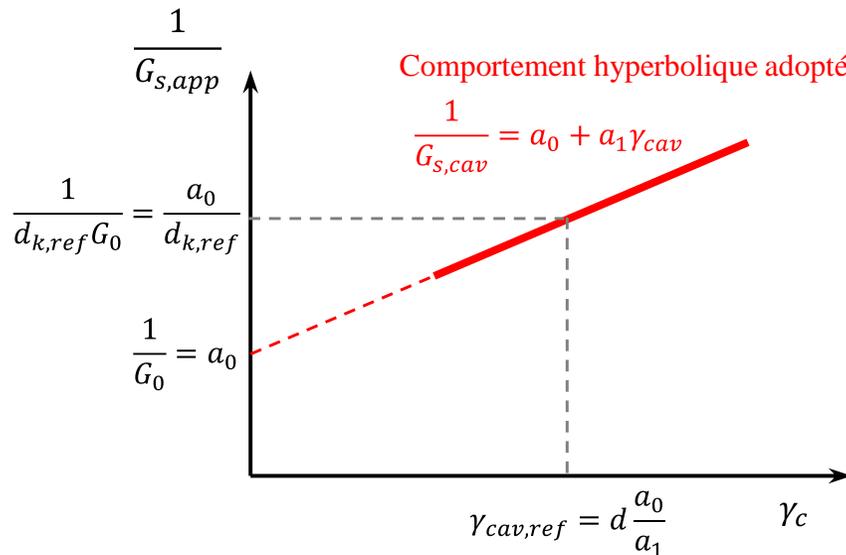


► Méthodes semi-empiriques : transformation des déformations et contraintes

- Appliquer un coefficient pour transformer la raideur apparente en raideur intrinsèque
 - Calcul de la raideur apparente sur une boucle
 - Détermination du **module initial** G_0 de la boucle
 - Transformation de la courbe de décroissance
 - Détermination de la **déformation de référence** γ_{ref}



$$G_{s,app}(\epsilon_c) = \frac{\Delta p_c}{2\Delta \epsilon_c}$$



Méthodes de transformation des déformations :

$$\frac{\gamma_c}{\gamma} = 1.2 + 0.8 * \log_{10} \left(\frac{\gamma_c}{10^{-5}} \right)$$

Jardine (1992)

Calibré sur essais de laboratoire

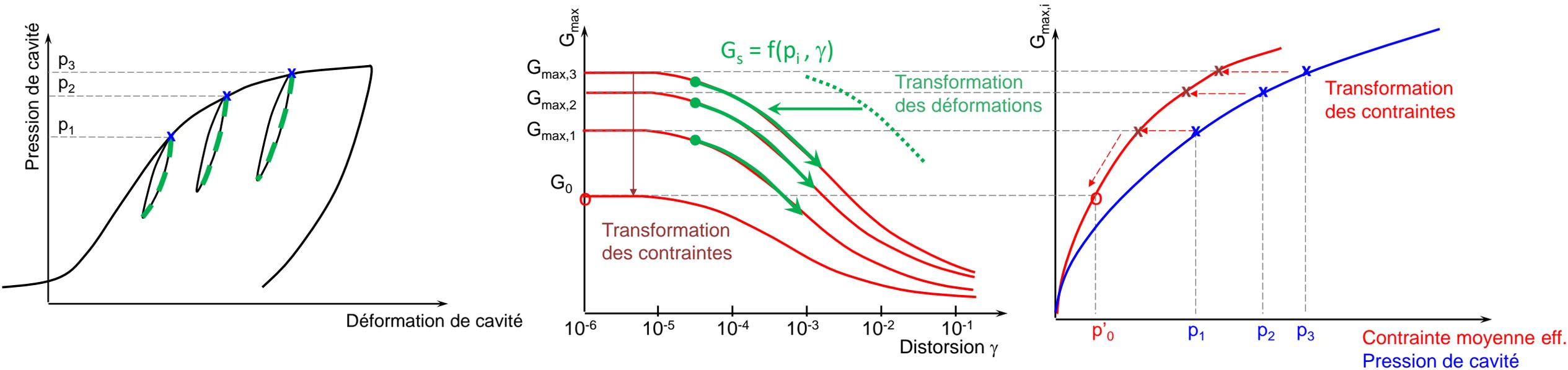
$$\frac{\gamma_c}{\gamma} = 4.77 + 0.004 * \left(\frac{a_1}{a_0} \right)$$

Lopes et al. (2022)

Calibré via calculs EF

► Méthodes semi-empiriques : transformation des déformations et contraintes

- Appliquer un coefficient pour transformer l'état des contraintes autour de la sonde au début de la boucle $p_{c,i}$ en contrainte moyenne effective p'_i (comportement drainé)
 - Obtenir une loi d'évolution du module maximal G_{max} en fonction de p' → $G_{max} = f(p')$
 - Estimer le module maximal initial sur le terrain $G_0 = G_{max}(\sigma'_{h0})$
 - Estimer l'évolution de la déformation de référence γ_{ref} en fonction de p' → $G = f(p', \gamma)$

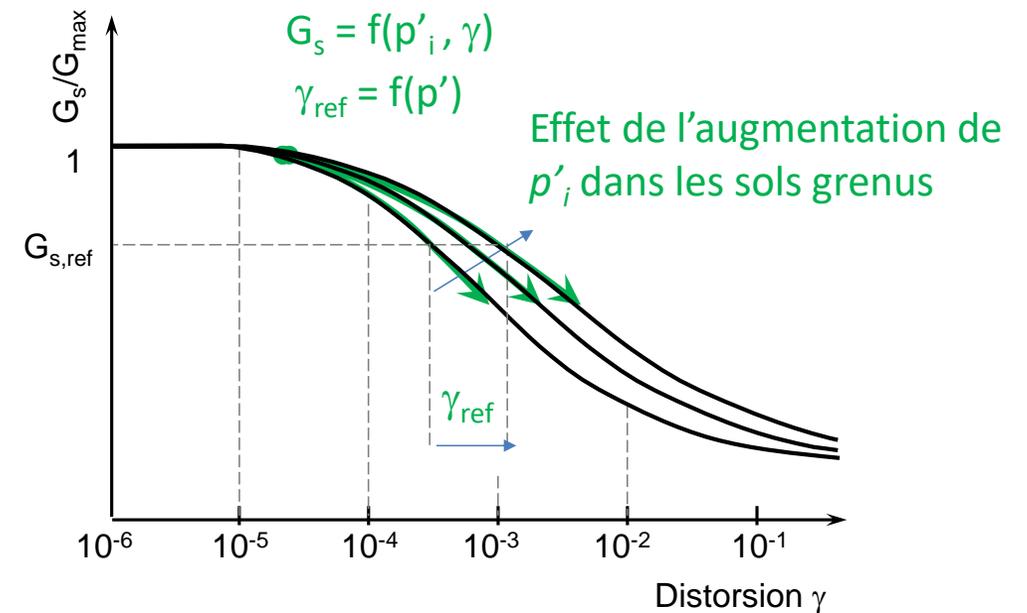


► Méthodes semi-empiriques : transformation des déformations et contraintes

- Appliquer un coefficient pour transformer l'état des contraintes autour de la sonde au début de la boucle $p_{c,i}$ en contrainte moyenne effective p'_i (comportement drainé)

Méthodes de transformation des contraintes :

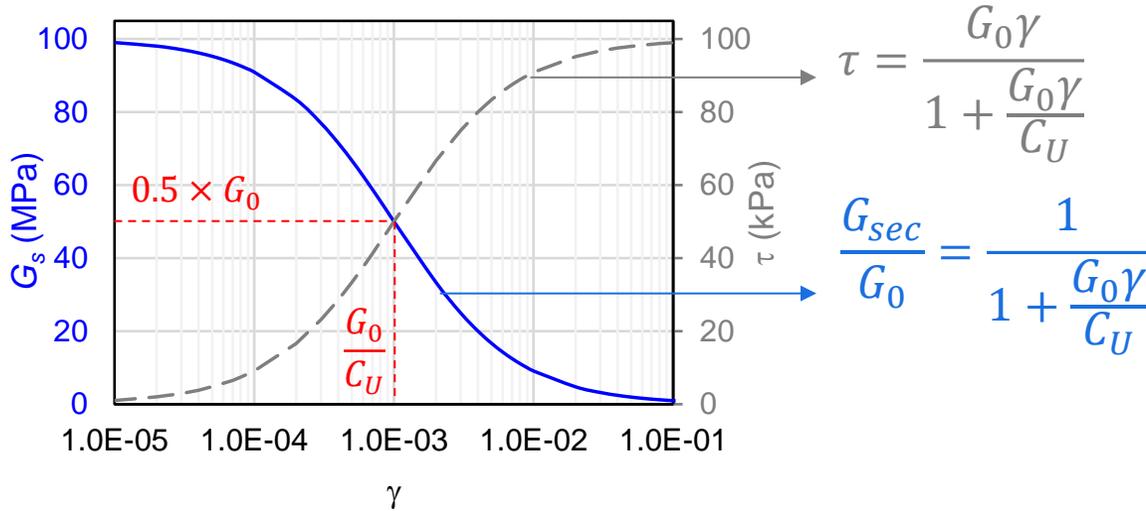
- | | | |
|-----|--|------------------------|
| (1) | $p'_i = \frac{\left(\frac{1}{2 \sin \varphi'} - \frac{p'_0}{p'_{c,i}} \frac{1 + \sin \varphi'}{2 \sin \varphi'} \right) p'_{c,i}}{\ln \left\{ \left[\frac{p'_{c,i}}{p'_0 (1 + \sin \varphi')} \right]^{1 + \sin \varphi' / 2 \sin \varphi'} \right\}}$ | Bellotti et al (1989) |
| (2) | $p'_i = \frac{p'_{c,i}}{3} \left[1 + \frac{1 - \sin \varphi'}{1 + \sin \varphi'} + \left(\frac{1 - \sin \varphi'}{1 + \sin \varphi'} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$ | Schnaid (1990) |
| (3) | $p'_i = \frac{1}{3} (0.8 p'_{c,i} + \sigma'_v)$ | Briaud (1992) |
| (4) | $p'_i = \frac{p'_{c,i}}{1 + \sin \varphi'}$ | Whittle and Liu (2013) |



Manque de consensus dans la littérature. Dans le cadre d'ARSCOP, la méthode (1) s'est montrée efficace, mais une validation plus large reste souhaitable. Une estimation de p'_0 et de φ' est nécessaire

► Méthodes analytiques : principe (comportement non-drainé)

- Hypothèse de comportement hyperbolique du terrain



- Sous réserve d'hypothèse des petites déformations et d'un comportement non-drainé, traduit par la conservation du volume, l'expansion de cavité est déterminée par

Courbe pressiométrique

$$p = p_0 + c_U \ln \left(1 + \gamma \frac{G_0}{c_U} \right)$$

Boucle pressiométrique

$$p = p = p_{0i} + (\tau_{0i} + c_U) \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{G_0}{\tau_{0i} + c_U} (\gamma - \gamma_{0i})} \right)$$

► Méthodes analytiques : Procédure sur **essais monotones non drainés : calage**

Ajustement par régression linéaire de la partie finale (plastique) de la courbe d'expansion pour déterminer c_u et p_l

$$p_c = p_l + c_u \ln(\gamma)$$

c_u est la pente
 p_l est l'ordonnée à l'origine

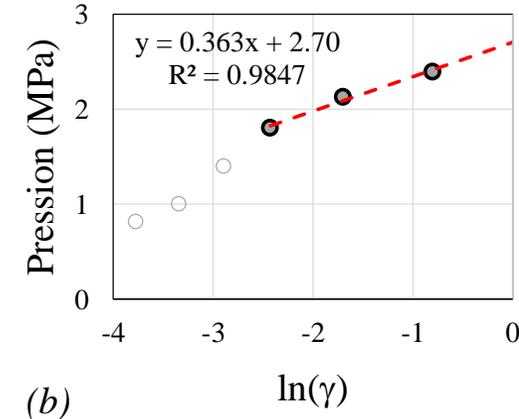
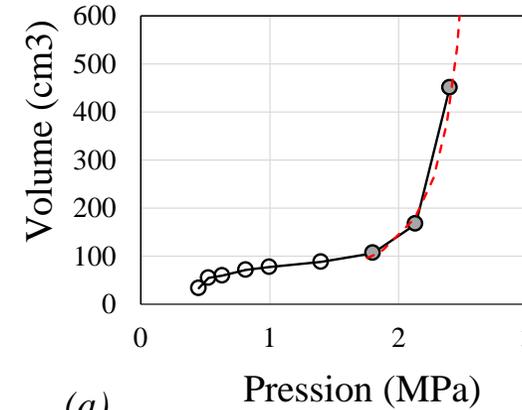
$$p_c = p_0 + c_u \ln \left(1 + \gamma_c \frac{G_0}{c_u} \right) \quad \text{permet de retracer la courbe}$$

Estimation de p_0

Calcul de G_0 à partir de l'équation constitutive avec c_u et p_{IM}

Détermination de $\gamma_{0.5} = c_u/G_0$, ou $\gamma_{0.72} = 0.385 * \gamma_{0.5}$

Courbe $G(\gamma)$ donnée par le modèle constitutif

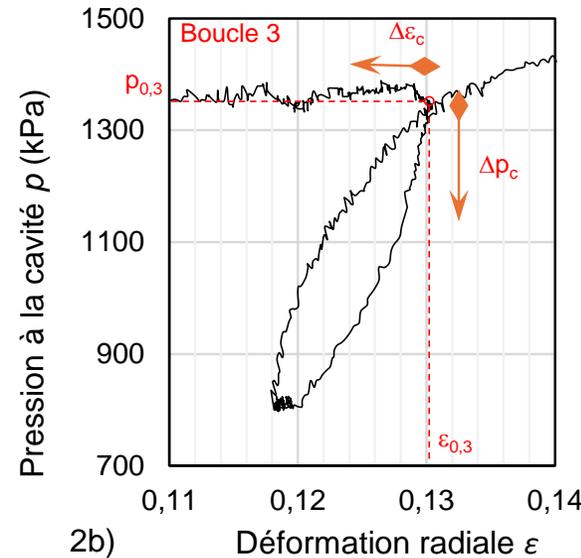
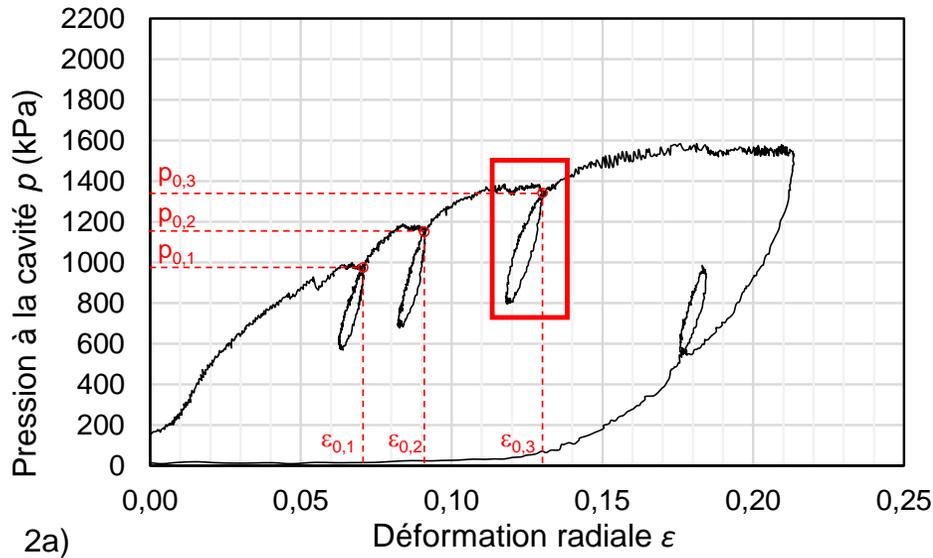


Calcul manuel ou à partir de la courbe PMT

$$G_0 = c_u \left(\exp \left(\frac{(p_l - p_0)}{c_u} \right) - 1 \right)$$

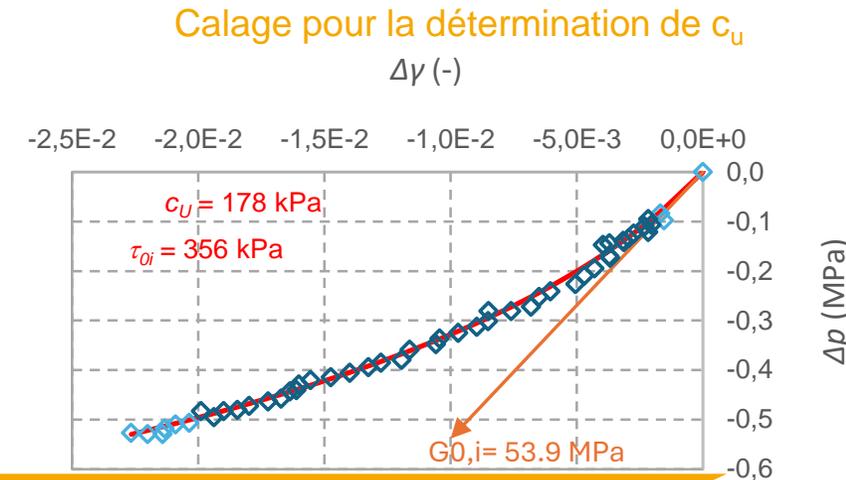
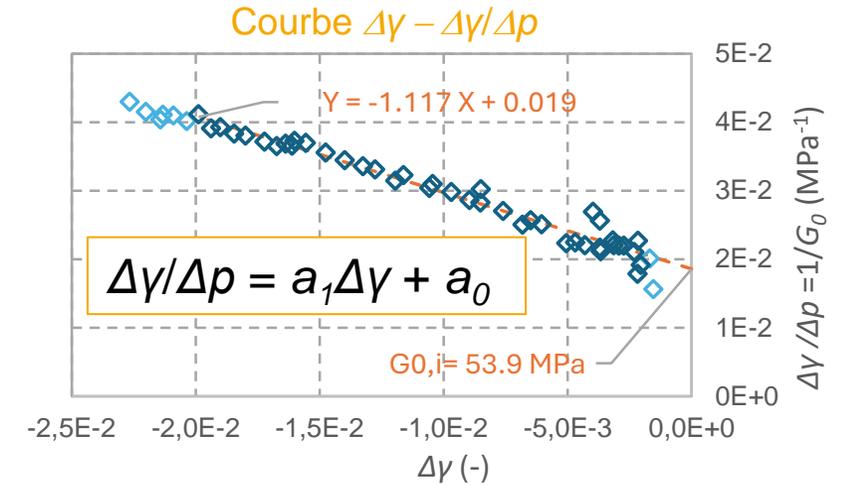
$$\frac{G_{sec}}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{G_0 \gamma}{c_u}}$$

► Méthodes analytiques : Procédure avec boucles non drainés : calage

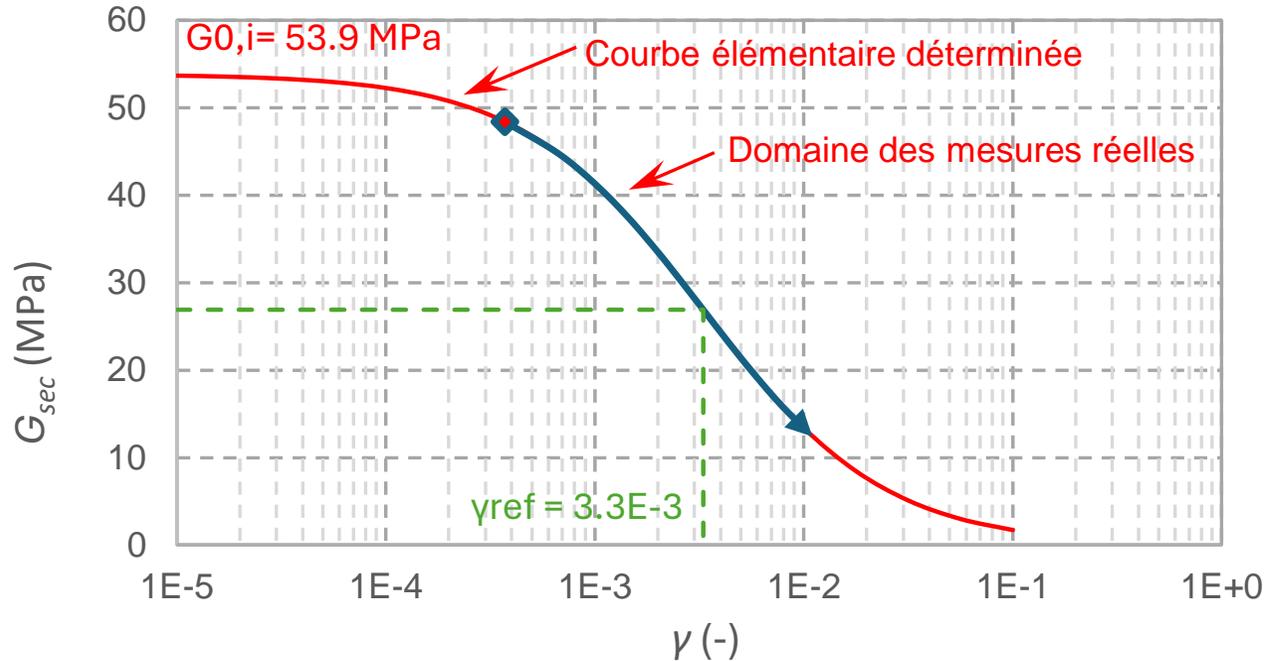


$$p = p = p_{oi} + (\tau_{oi} + c_U) \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{G_0}{\tau_{oi} + c_U} (\gamma - \gamma_{oi})} \right)$$

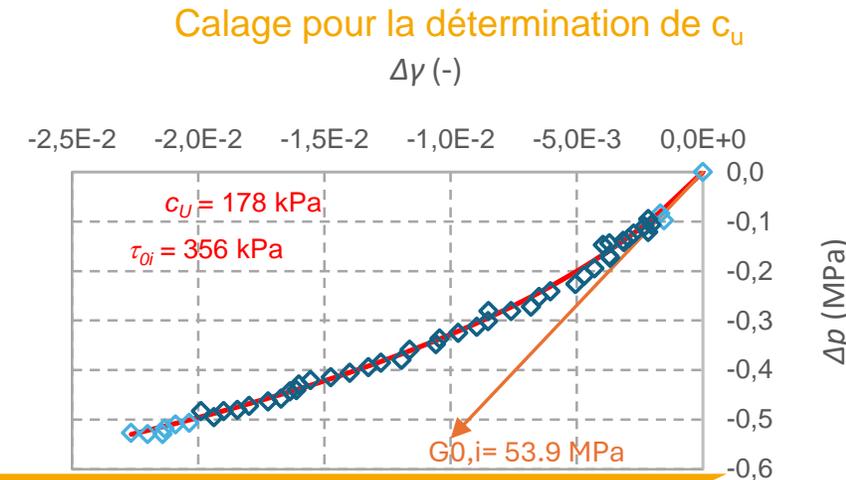
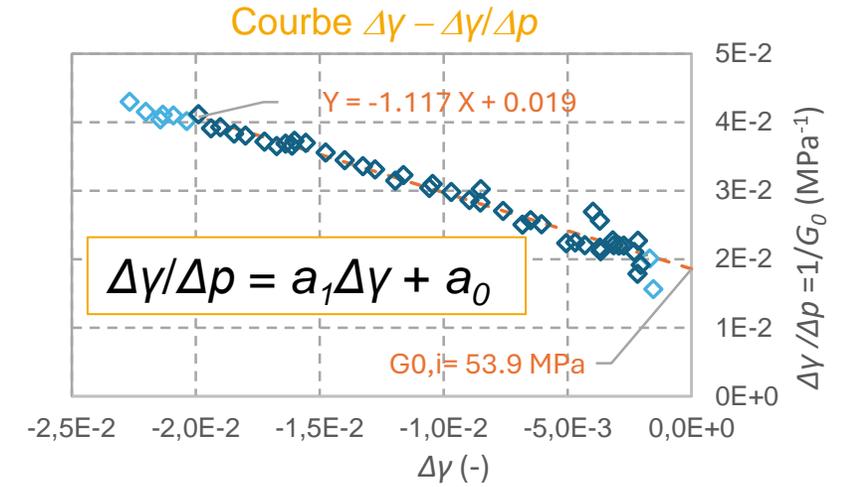
On détermine G_0 sur le début de la courbe de décharge
On ajuste la valeur de c_U pour caler la courbe



► Méthodes analytiques : Procédure avec boucles non drainés : calage

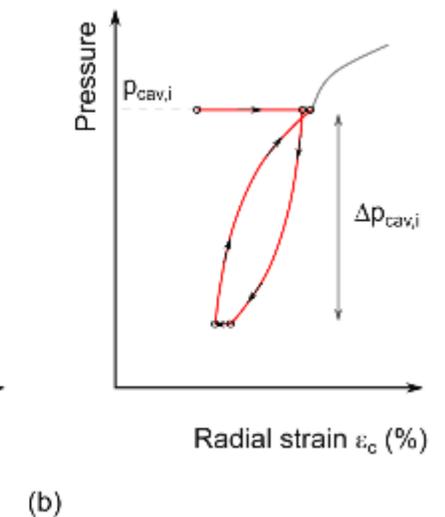
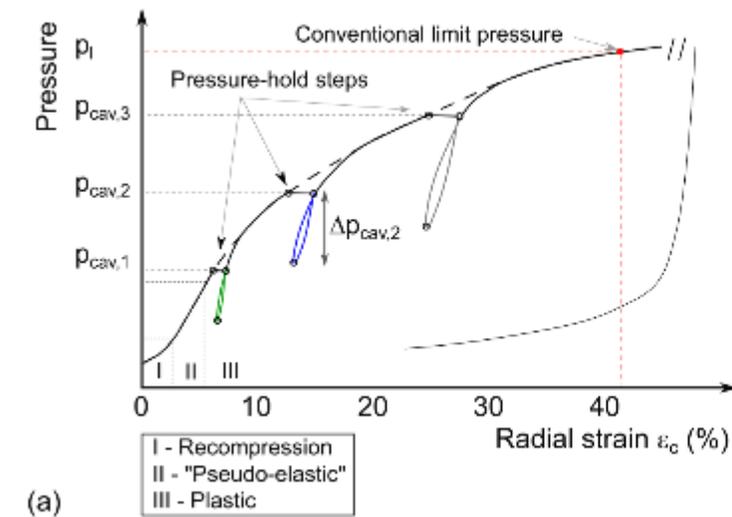
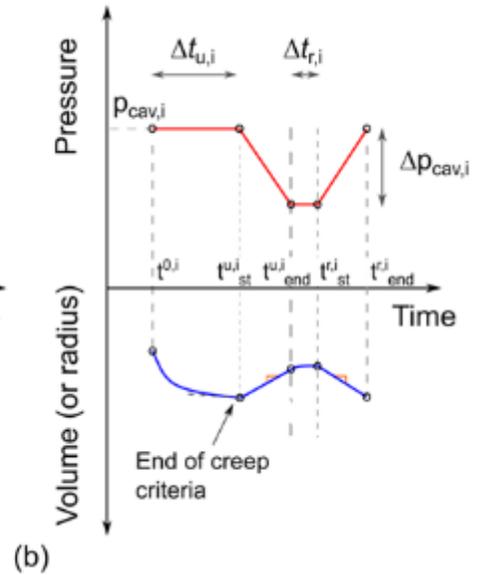
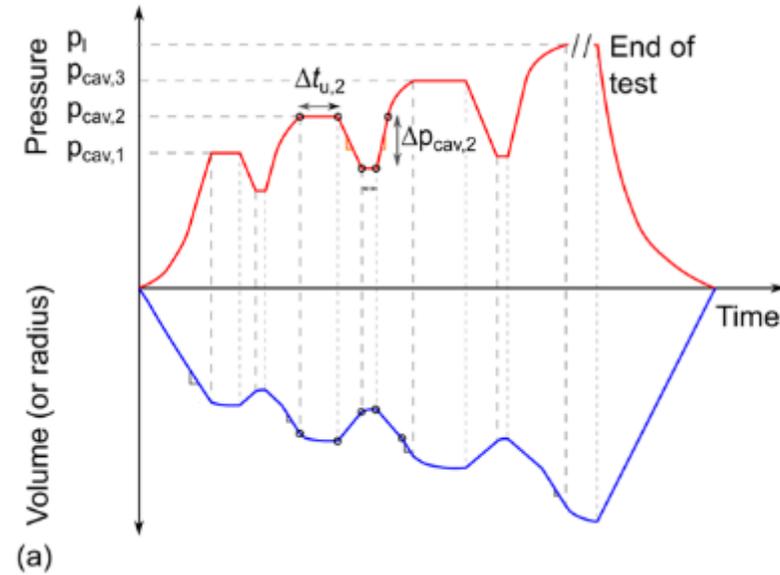
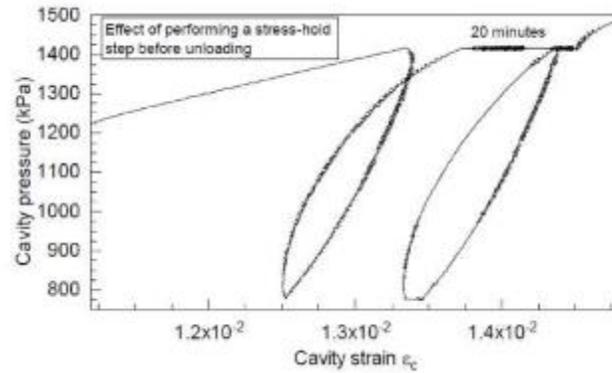


Courbe $G(\gamma)$ déterminée sur des points de mesures, avec extrapolation sur les très faibles déformations



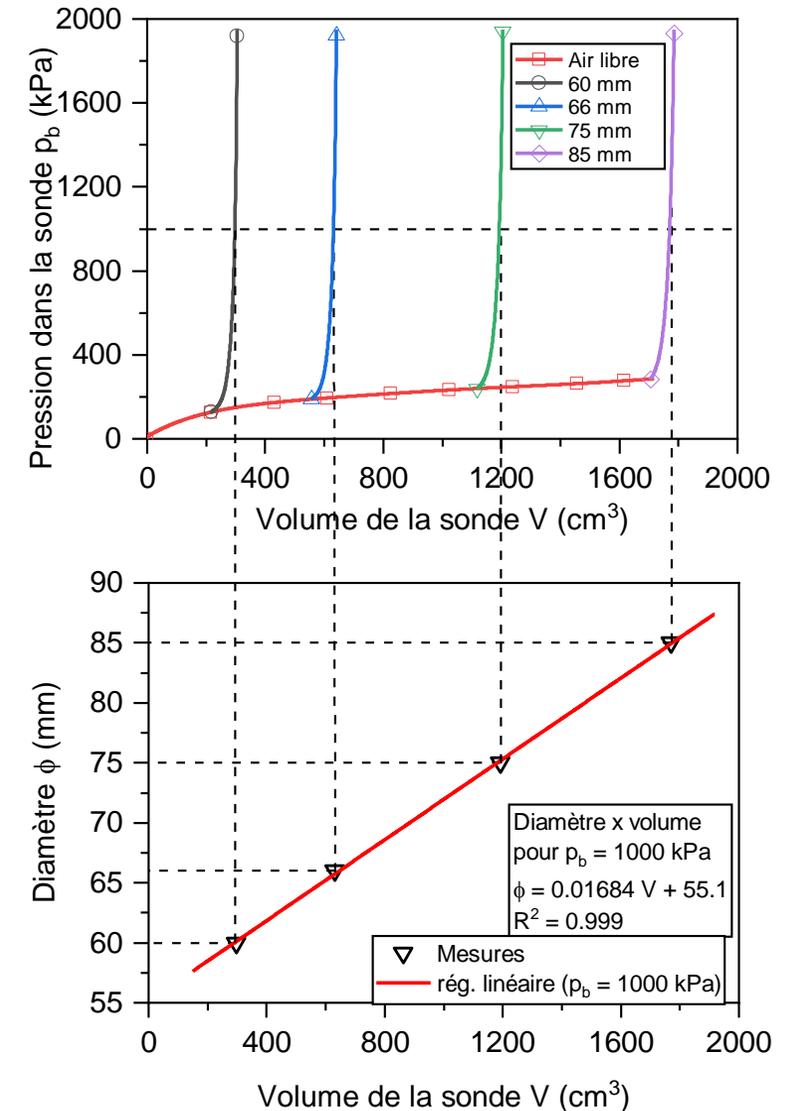
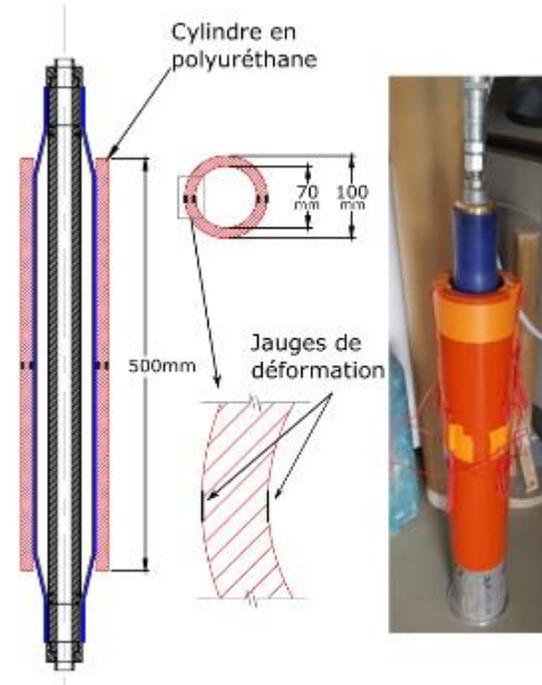
► Protocoles d'essais : chargement

- **3 boucles minimum** : dépendance de la contrainte et 'redondance'
- Recommandation de valeurs de **pression de début de boucle $p_{c,i}$**
 - Sables : $1/3p_{IM}$, $1/2p_{IM}$, $3/4p_{IM}$
 - Argiles : $1/2p_{IM}$, $3/4p_{IM}$, $7/8p_{IM}$
- **Amplitude de la boucle = $0,4 p_{c,i}$**
- **Palier de fluage long** (3 à 10 min)
 - Evite les boucles ouvertes



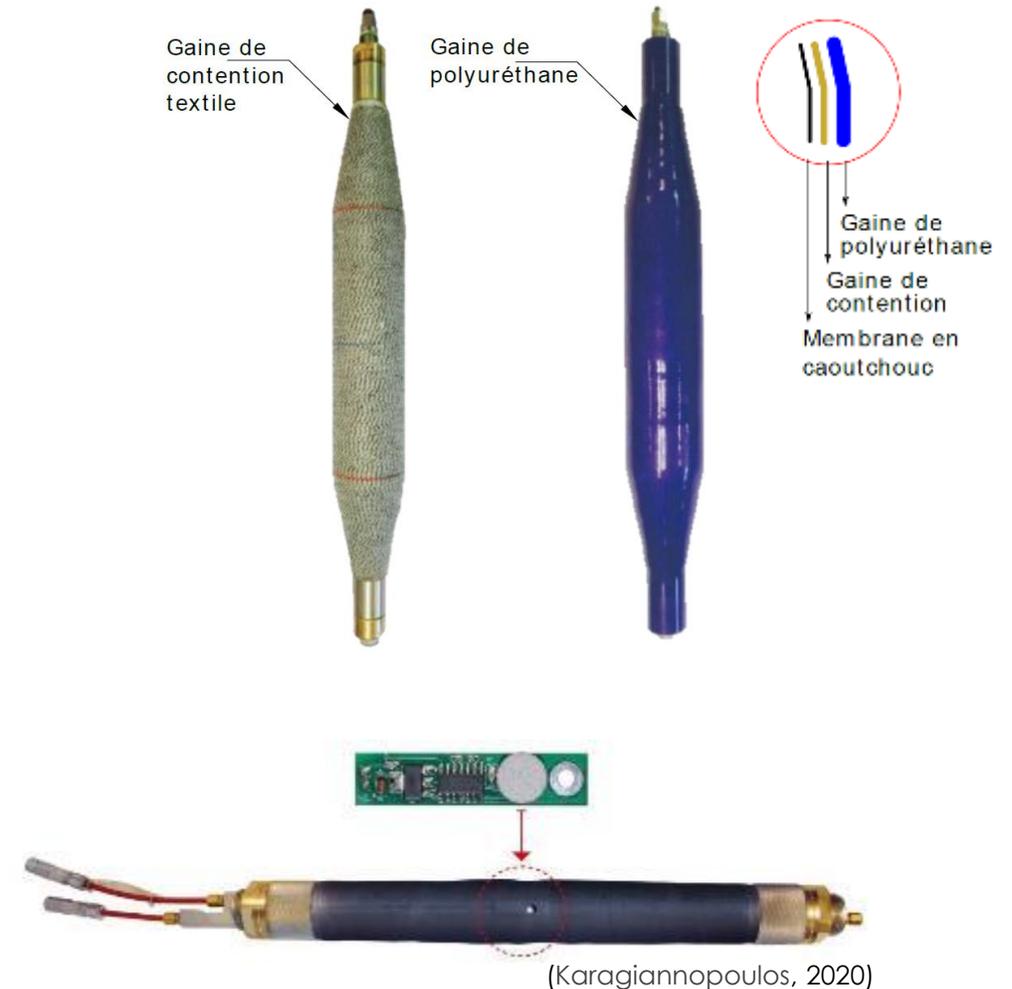
► Protocoles d'essais : étalonnages spécifiques

- Réalisation de **calibrages avec cylindres de diamètre variable** pour fiabiliser la relation volume-diamètre de la sonde
- Etalonner le **comportement de la sonde en décharge-recharge** pour caractériser le phénomène d'**accommodation de membrane** (pour $G > 100$ MPa)
- Etalonnages particuliers si besoin (faux sol instrumenté avec jauges de déformation)



► Matériel d'essais : fiabilisation des mesures au niveau de la sonde

- Améliorations de la membrane
 - Sondes Francis Cour ® utilisées dans le cadre de la thèse Cifre FUGRO
 - Gaine de contention
- Mise en place de capteurs dans la sonde
 - Mesures par inductance (Francis Cour ®)
 - Mesures par effet Hall (Aissaoui et al.)
 - Capteurs de pression interstitielle → Présentation de LUTZ
- Limitation des pertes de charge hydrauliques par l'augmentation du diamètre des tubulures ou adaptation du programme de chargement aux débits / réactivité du système
- Pilotage de l'essai assisté / automatisé
→ Présentation d'APAGEO



- ▶ Les procédures spécifiques d'essai et d'interprétation permettent l'accès
 - Aux modules de cisaillement à faibles niveaux de déformation,
 - À la dépendance du module à l'état de déformation et de contraintes

- ▶ Un soin particulier doit être porté à la réalisation de l'essai
 - Améliorations matérielles ou calibrages spécifiques
 - Formation requise des opérateurs à l'application du protocole et aux nouveaux enjeux
 - Intérêt de l'automatisation mais aussi de la sensibilisation à la qualité de la mesure

- ▶ Des protocoles qui assurent la continuité avec les procédures Ménard
 - Cibler certains horizons lors de la définition de la campagne géotechnique
 - Complémentarité et intégration