

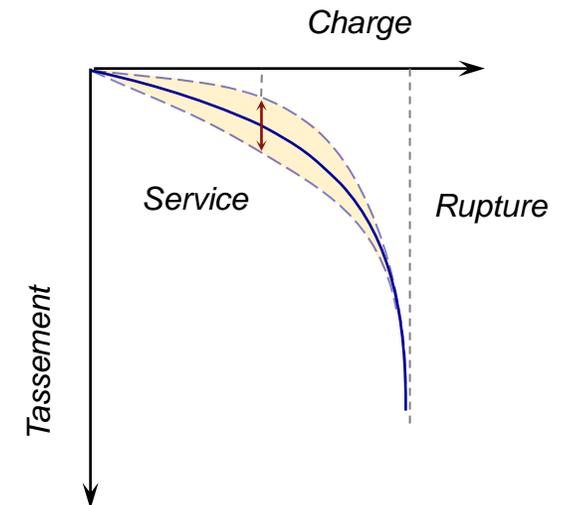
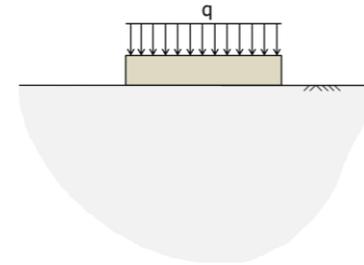
Apport d'une caractérisation plus fine
de la déformabilité du terrain

Sommaire

- Introduction
- Notions préliminaires : modèles, domaines de sollicitation et techniques de mesure
- Exemples d'optimisation à partir d'une caractérisation plus fine
- Nouvelles approches de caractérisation à partir du pressiomètre
- Conclusions

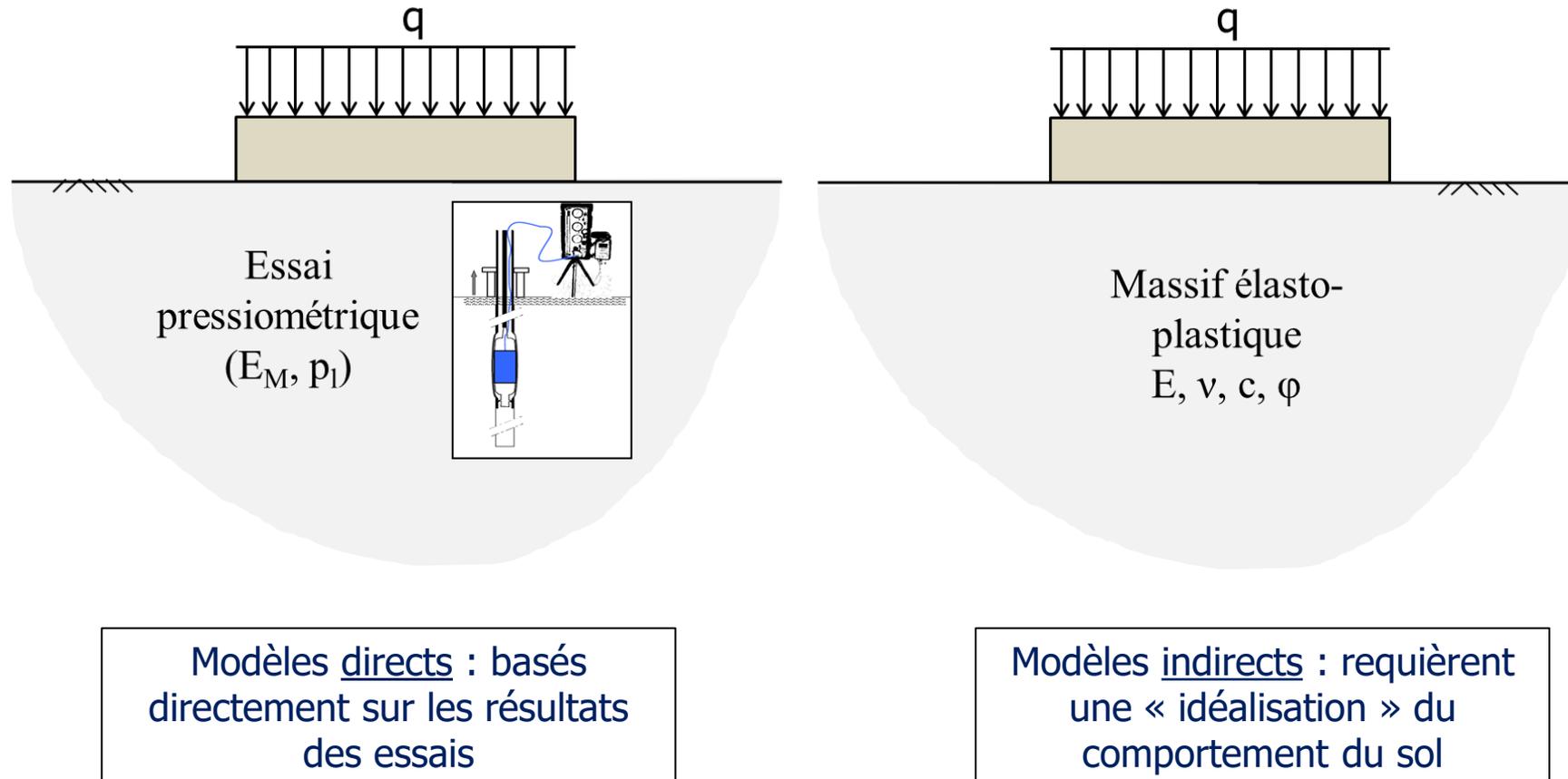
Introduction

- Conception des ouvrages
 - Superstructure
 - Charges
 - Fondation
- Plusieurs leviers d'optimisation
 - Méthodes observationnelles (auscultation, essais de chargement)
 - Aspects calculatoires (ISS, optimisation des actions)
 - Réglementation
- Etat de la pratique
 - Corpus géotechnique solide vis-à-vis de la stabilité des ouvrages
 - Fort potentiel d'optimisation vis-à-vis réponse dans domaine de service



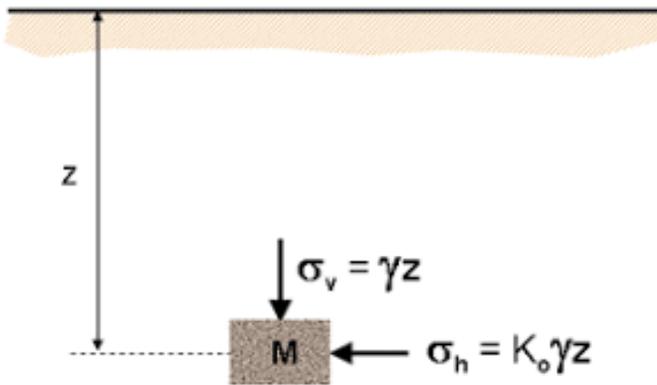
Notions préliminaires

- Les modèles de calcul géotechnique

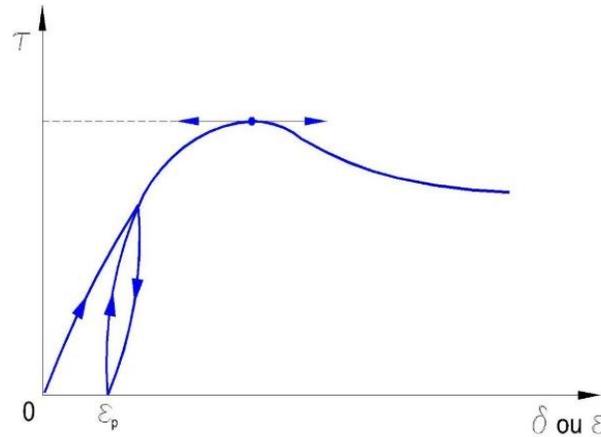


Notions préliminaires

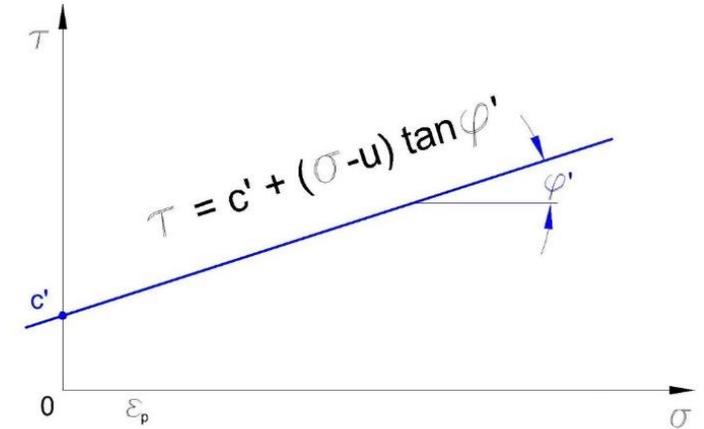
- Comportement élémentaire des terrains



L'état de contraintes initiales (K_0 , OCR, β)



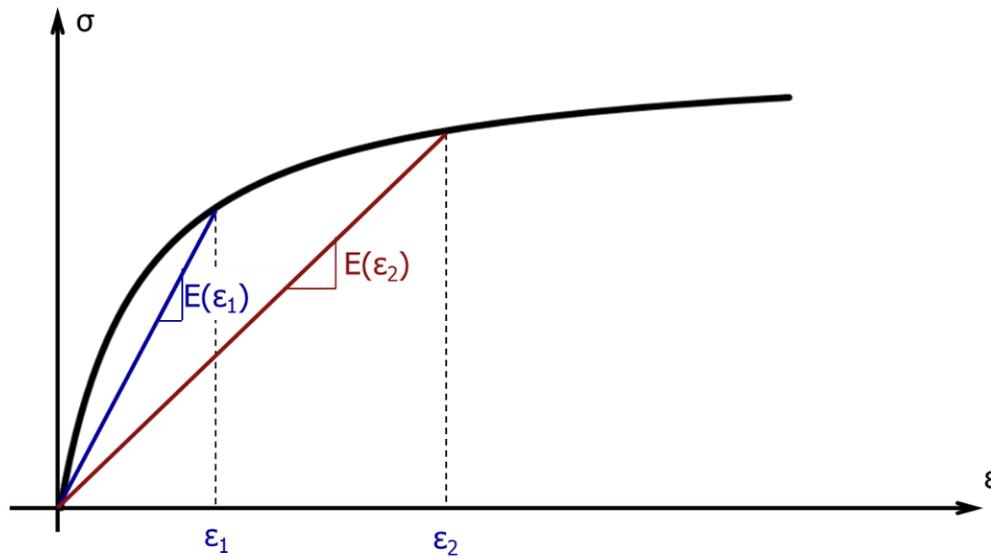
Loi de contrainte – déformation (les « modules »)



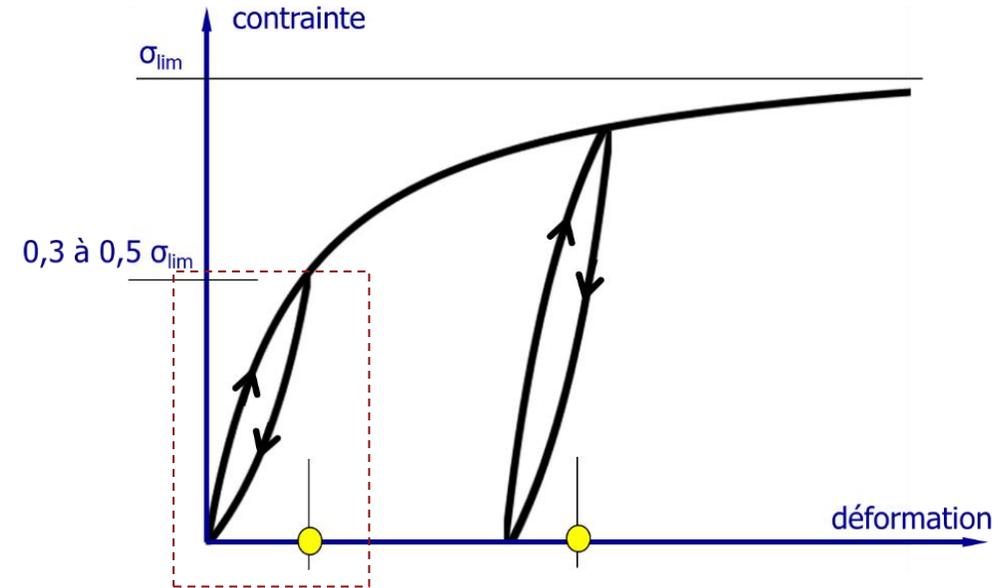
Critère de rupture (c' , ϕ' ou c_u)

Notions préliminaires

- Comportement élémentaire des terrains



- ⇒ Déformabilité du sol usuellement associée à la notion de « module » : $E = \sigma/\epsilon$
- ⇒ Valable pour une gamme de chargement donnée (ou un chemin de chargement donné)



- ⇒ $\sigma \leq 0,3$ à $0,5 \sigma_{lim}$: élasticité = les déformations sont réversibles
- ⇒ Au-delà : élastoplasticité = les déformations sont irréversibles

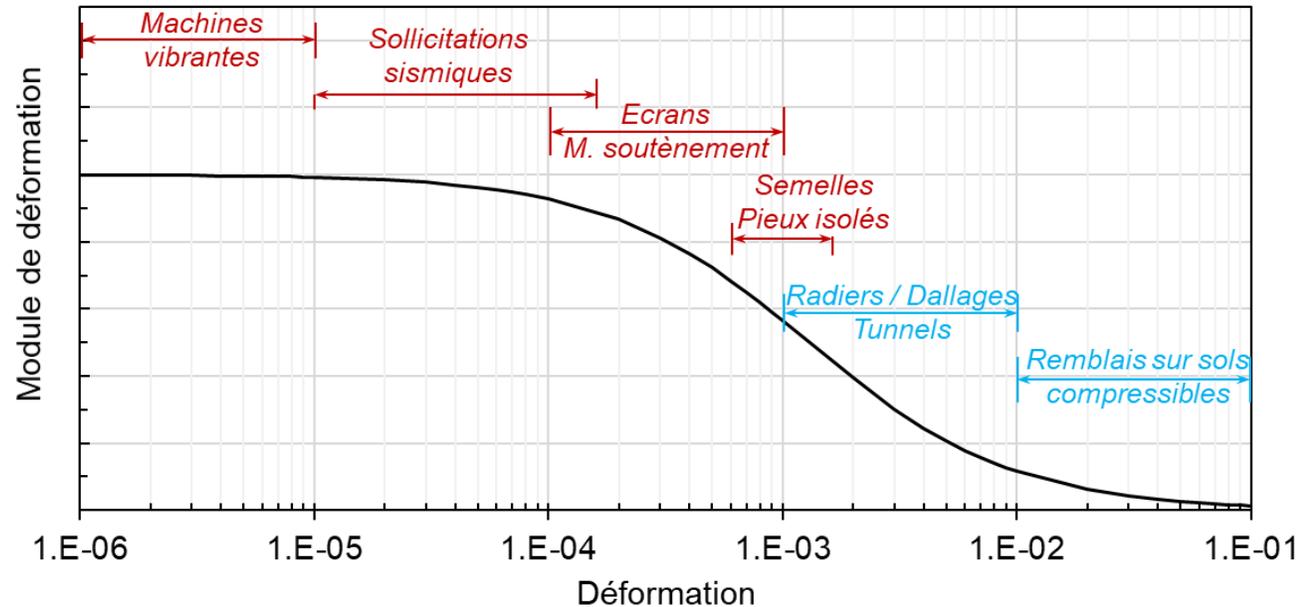
Notions préliminaires

- Les domaines de sollicitation des ouvrages

Déformation
prépondérante

Déviatorique

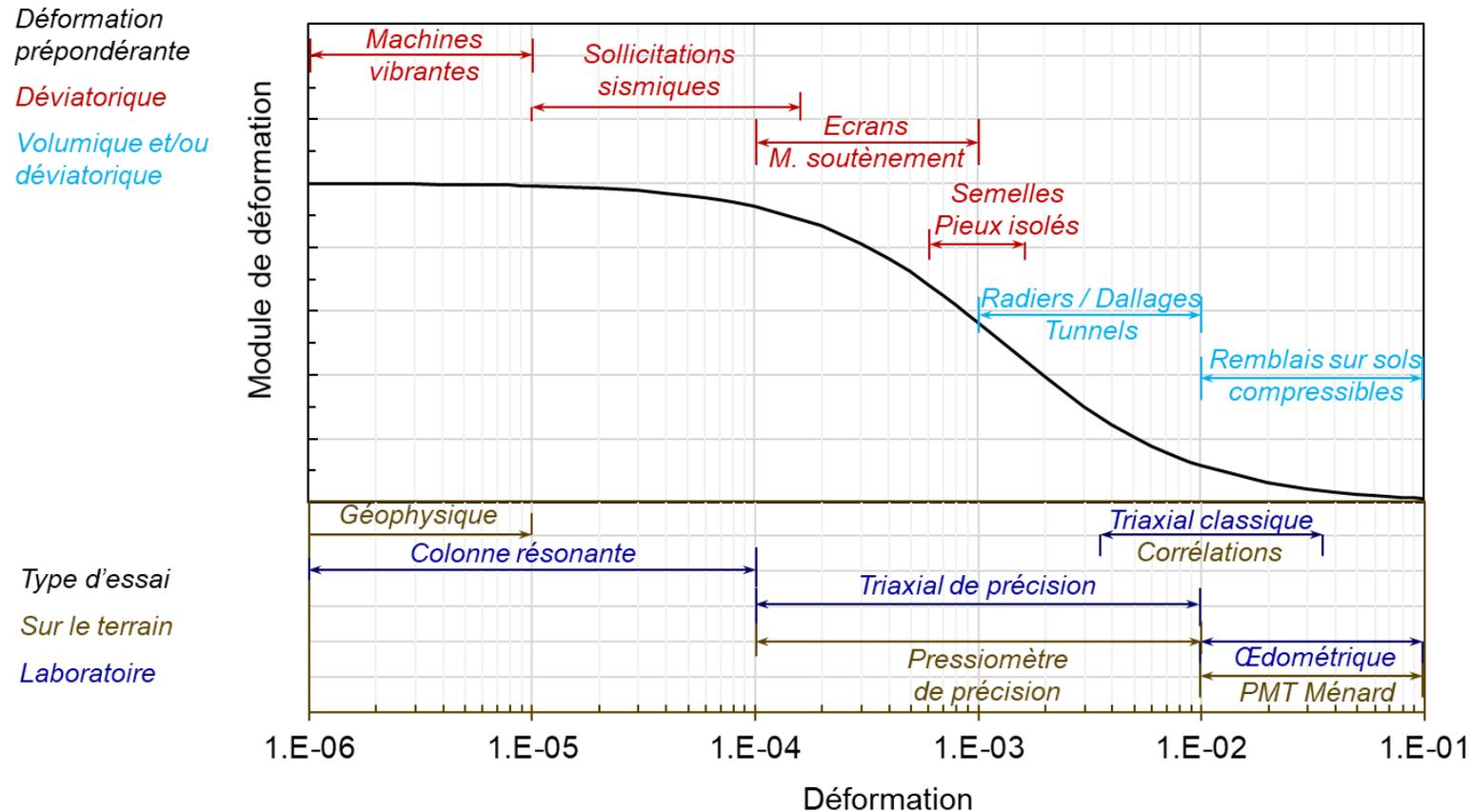
Volumique et/ou
déviatorique



- ⇒ Variation du module avec la déformation traduite par la notion de courbe de « décroissance »
- ⇒ Pour un même terrain, on peut ainsi définir plusieurs modules selon l'ouvrage étudié

Notions préliminaires

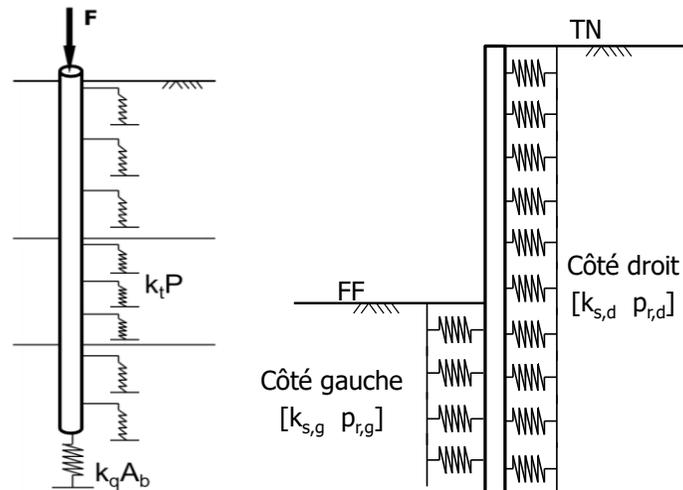
- Les techniques de mesure des modules de déformation



⇒ Technique de mesure à adapter (idéalement) à la déformation du problème étudié

Caractérisation du comportement

- Caractérisation plus fine = choix ciblé des essais et des modules
- Réalisation d'essais adaptés au problème
 - Essais de laboratoire (coût important, difficultés de prélèvement)
 - Essais *in situ* adaptés
- Calage du comportement
 - Ouvrages en vraie grandeur instrumentés
 - Ouvrages « modèles » (modèles directes de référence)



Exemples d'application

- Fondations des tours à la Défense
 - Tours de différentes hauteurs, en grande partie sur radier général
 - Tassements en profondeur : Argiles de l'Yprésien



Exemples d'application

- Fondations des tours à la Défense
 - Tours de différentes hauteurs, en grande partie sur radier général
 - Tassements en profondeur : Argiles de l'Yprésien

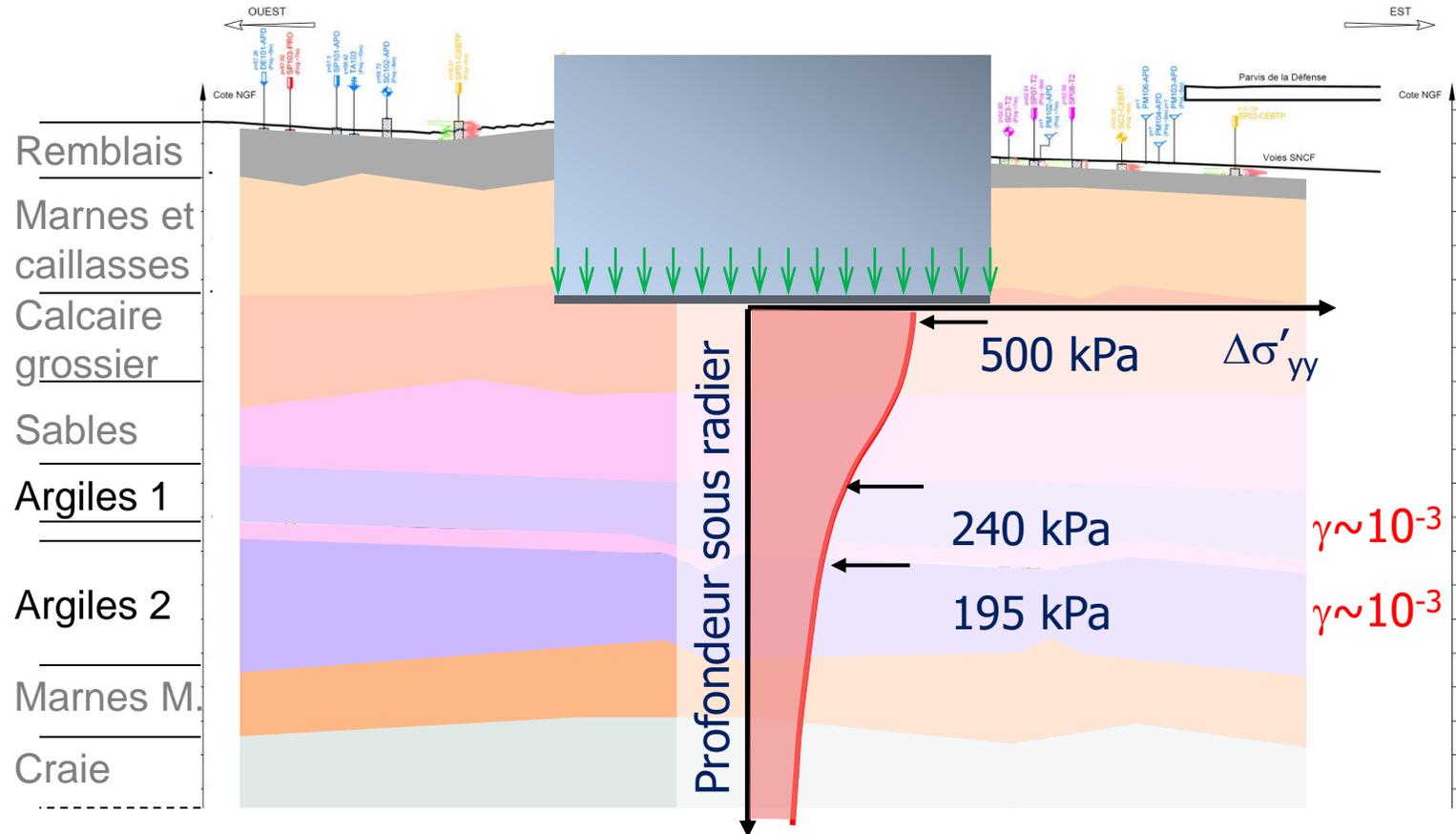
Rapport E/E_M dans Argiles	Modèle numérique (éléments finis 3D)	Modèle analytique (Boussinesq)	Rapport des résultats
6,0	5,2 cm	5,5 cm	1,06
4,5	6,0 cm	6,5 cm	1,08
3,0	7,5 cm	8,5 cm	1,13
1,5	12,0 cm	14,2 cm	1,18

En affinant le choix du « modèle » : marge de 5 à 20%

En affinant le choix du « module » : rapport de 1 à 3 sur le résultat !

Exemples d'application

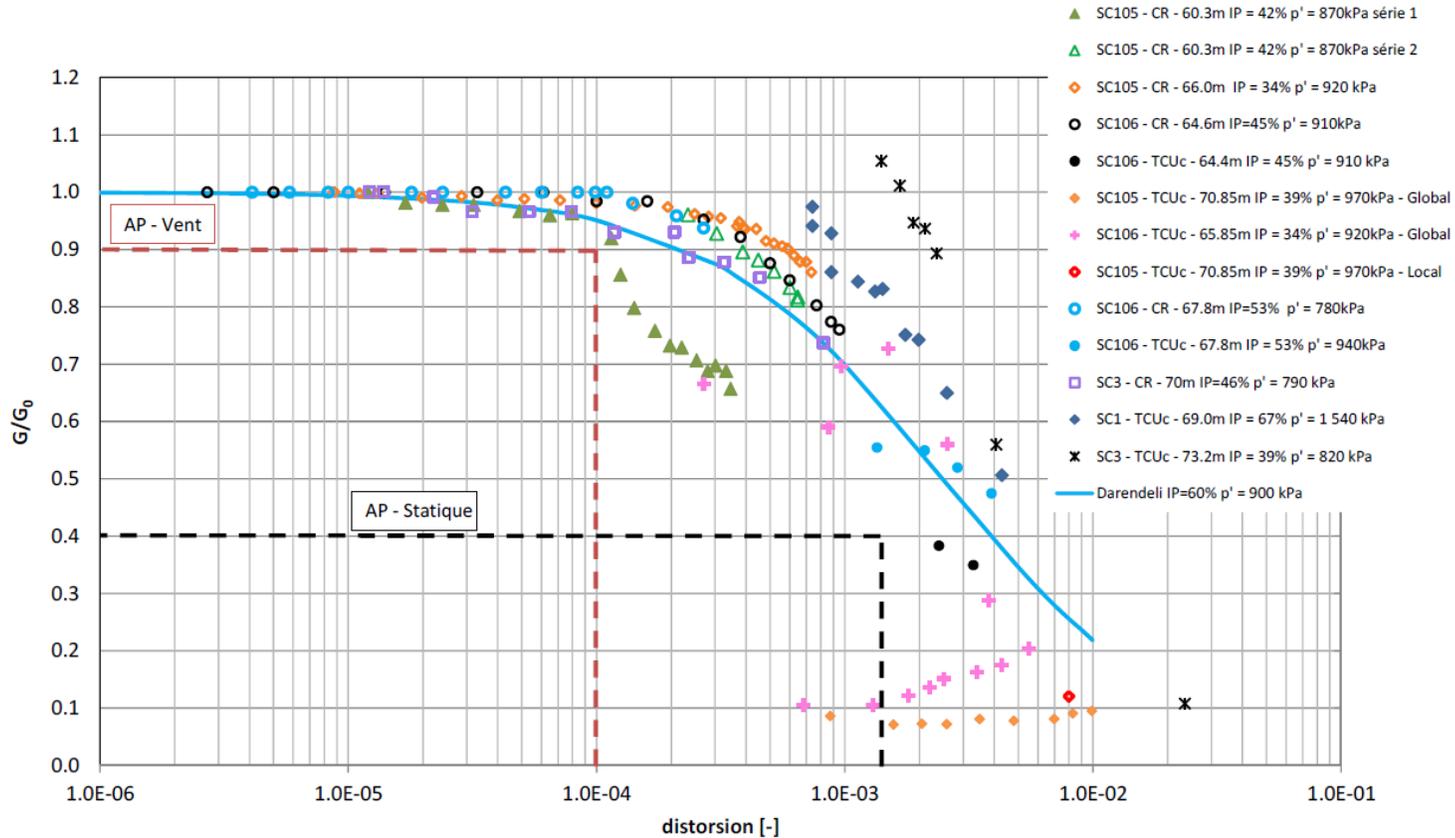
- Fondations des tours à la Défense



Taux de travail des argiles en profondeur (de l'ordre de $1/10^e$ de $p_1^* = 2 \text{ à } 3 \text{ MPa}$)

Exemples d'application

Fondations des tours à la Défense



➤ Pressiomètre : $E_M = 35 \text{ MPa}$

➤ Sollicitations statiques

$$\gamma = 1,5 \times 10^{-3}$$

$$E = 4 \text{ EM}$$

➤ Sollicitations dues au vent

$$\gamma = 1,0 \times 10^{-4}$$

$$E = 10 \text{ EM}$$

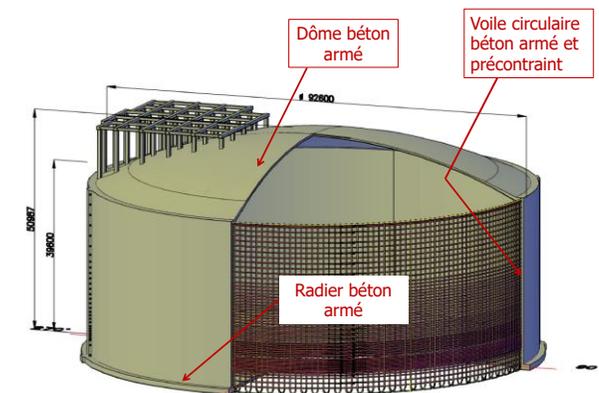
Exploitation d'une courbe de décroissance établie à partir d'essais de précision

Exemples d'application

- Cas d'un réservoir sur radier : terminal méthanier de Dunkerque



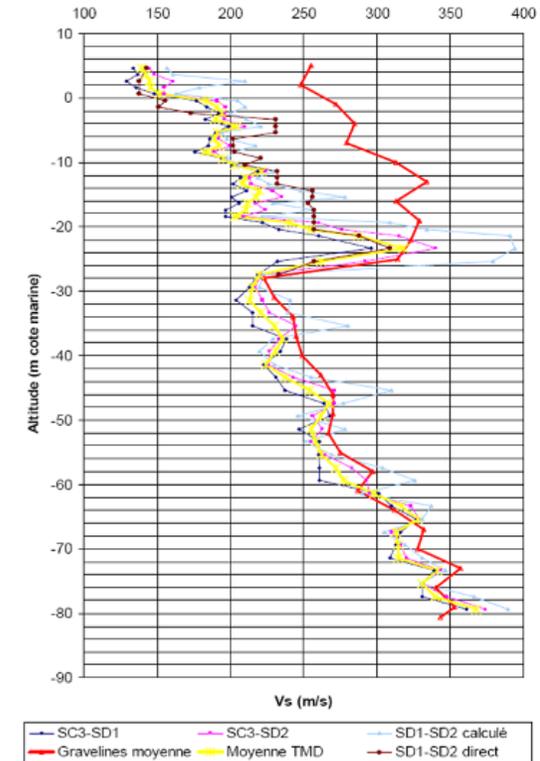
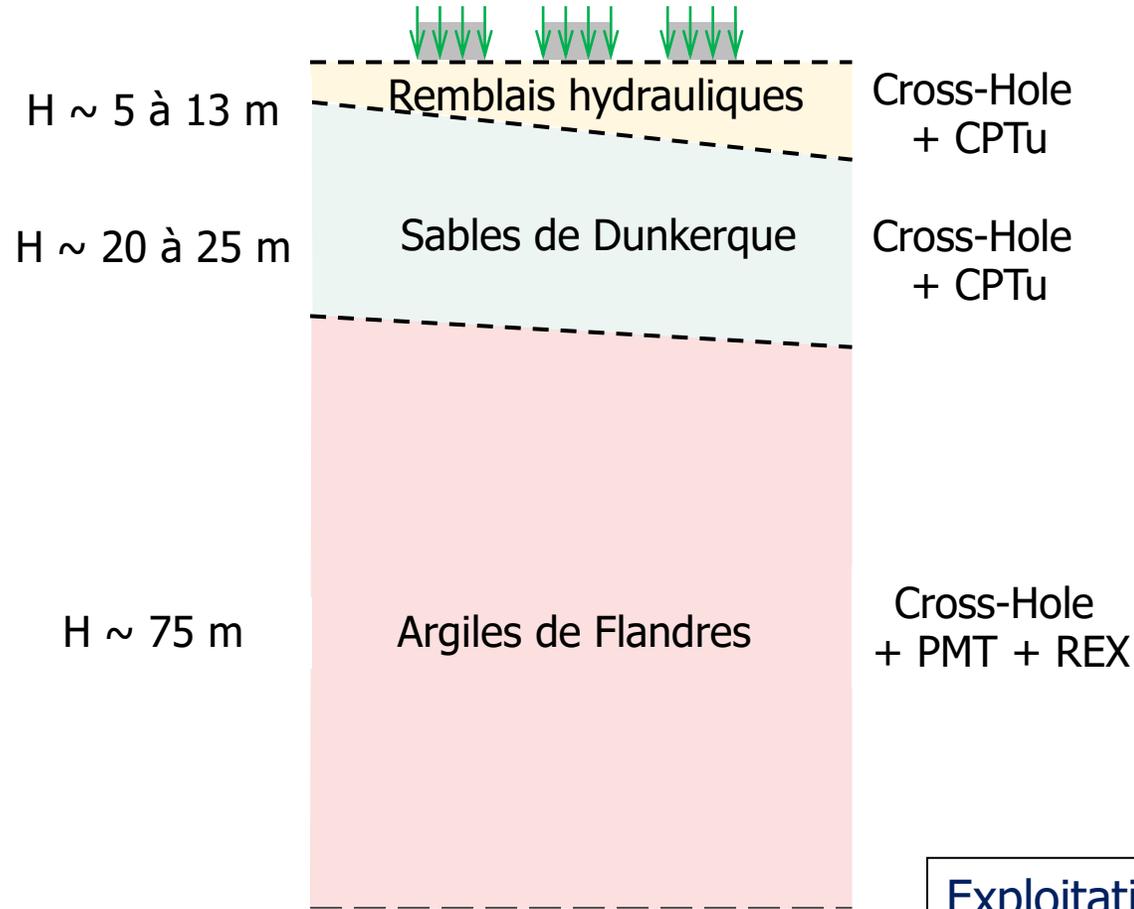
$B = 90 \text{ m} / H = 50 \text{ m}$



- $q \sim 200 \text{ kPa}$ sur une surface étendue + présence de terrains argileux
- Estimation initiale des tassements = plusieurs dizaines de centimètres
- Nécessité d'une caractérisation plus fine de la déformabilité du terrain

Exemples d'application

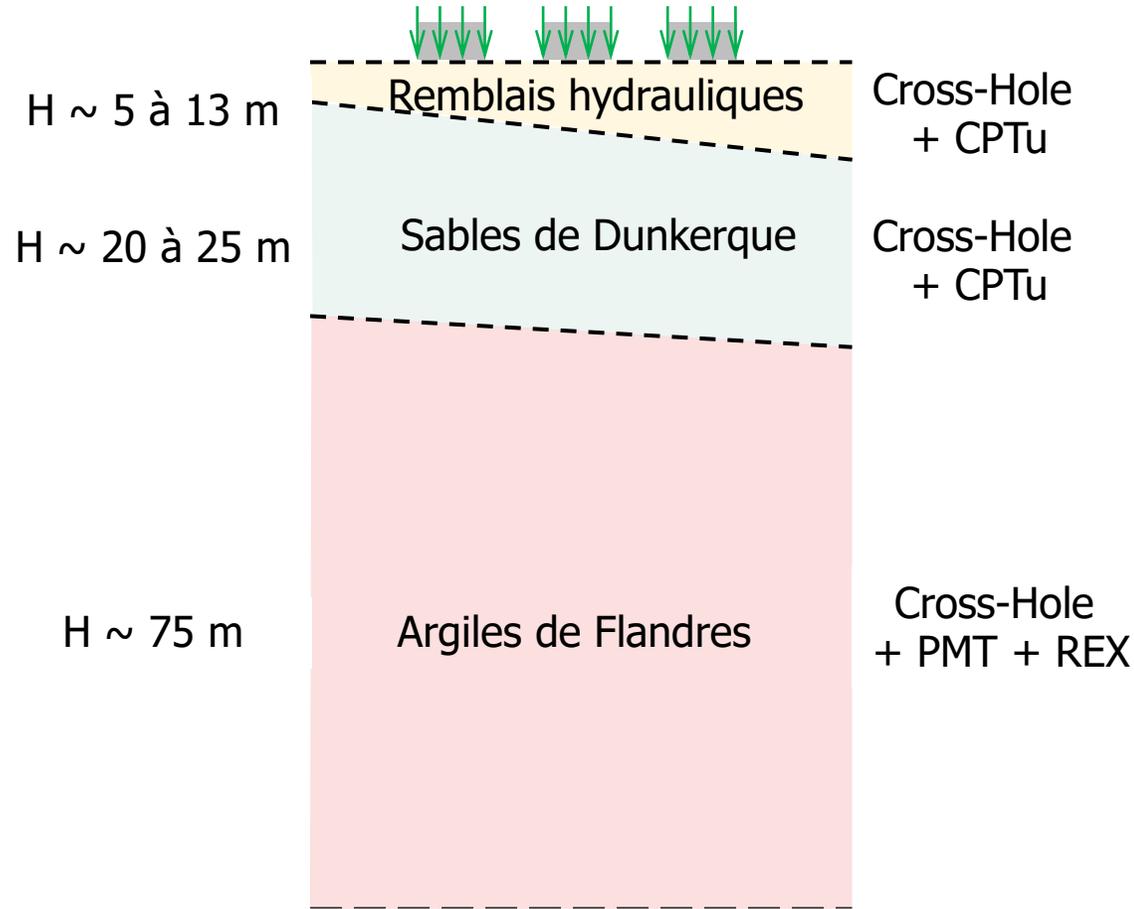
- Cas d'un réservoir sur radier : terminal méthanier de Dunkerque



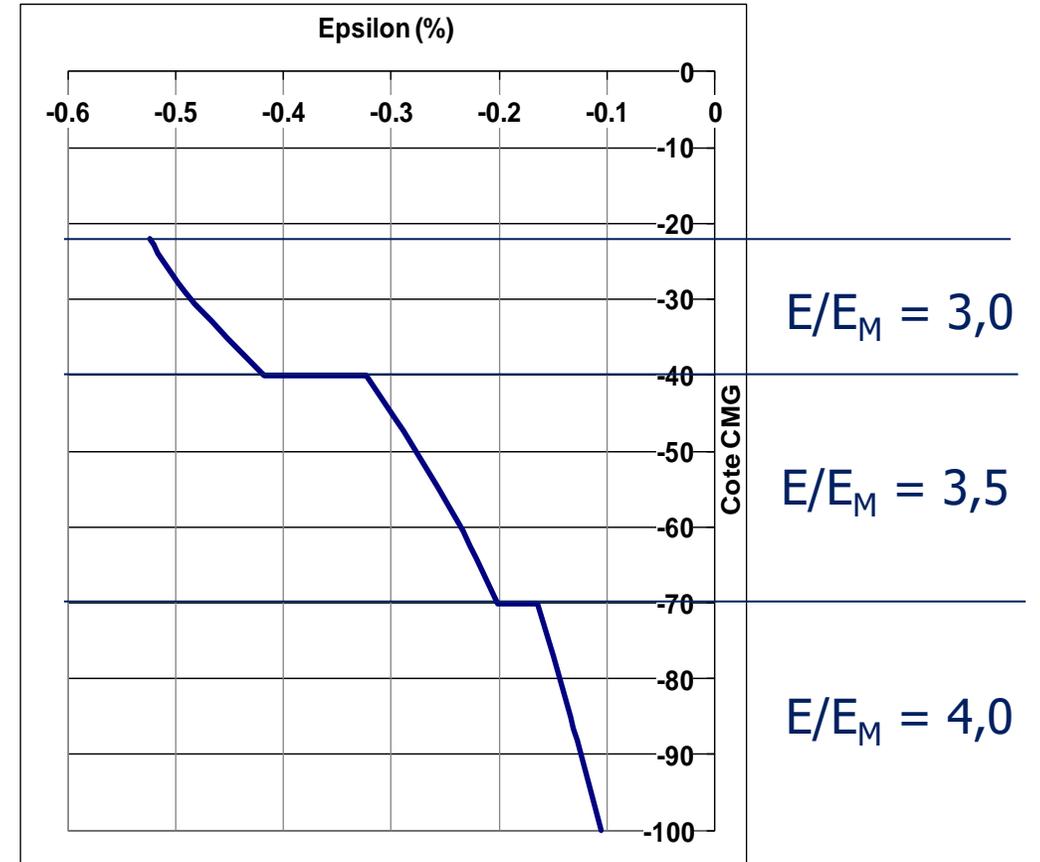
Exploitation du suivi de tassement sous la centrale nucléaire de Gravelines pour affiner l'estimation des modules

Exemples d'application

- Cas d'un réservoir sur radier : terminal méthanier de Dunkerque

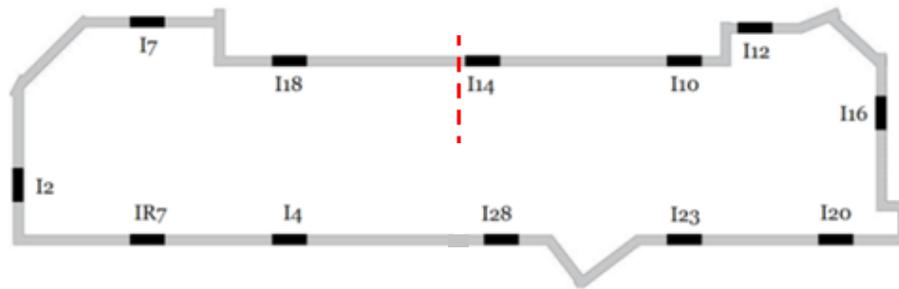


Déformation verticale dans les argiles



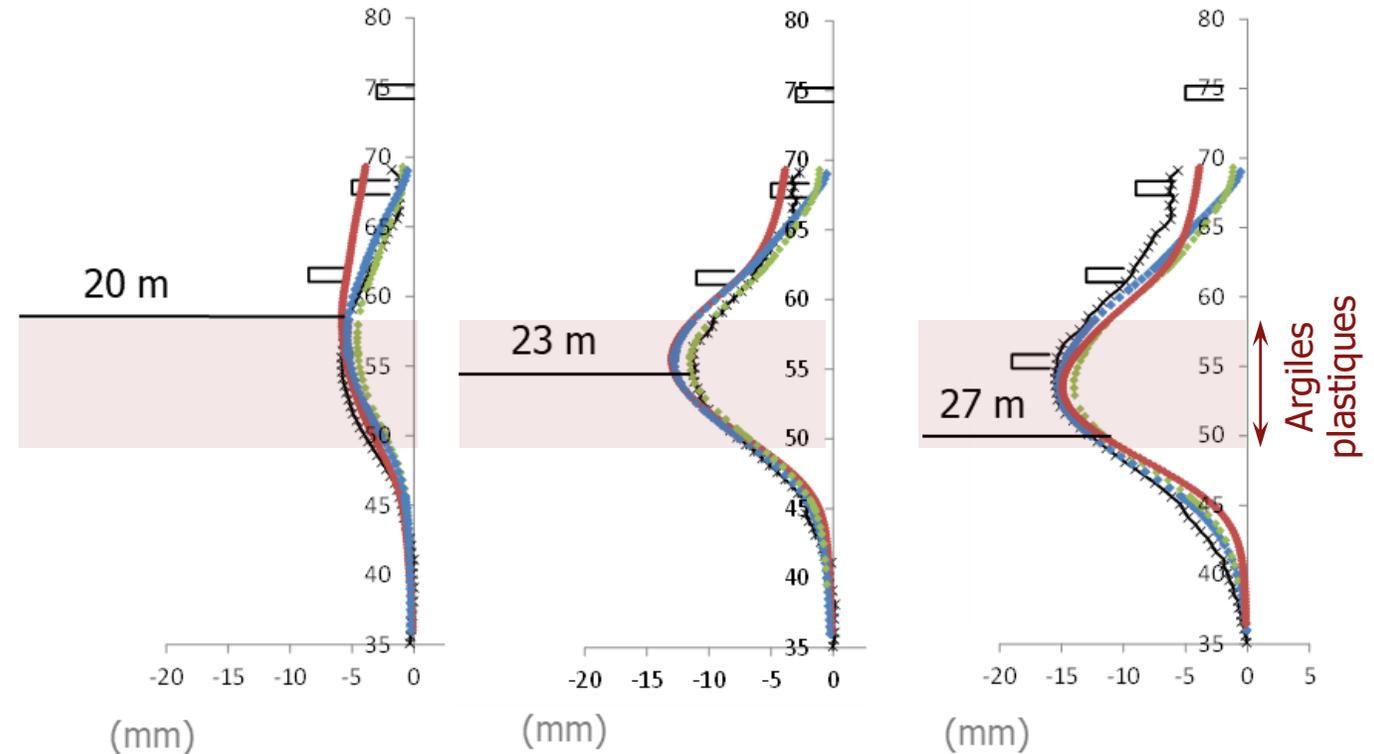
Exemples d'application

- Le cas d'un écran de soutènement : REX Gare Fort d'Issy (Clamart)



- ◆ MISS-K
- ◆ EF 2D
- ◆ EF 3D
- * Inclinomètre I14

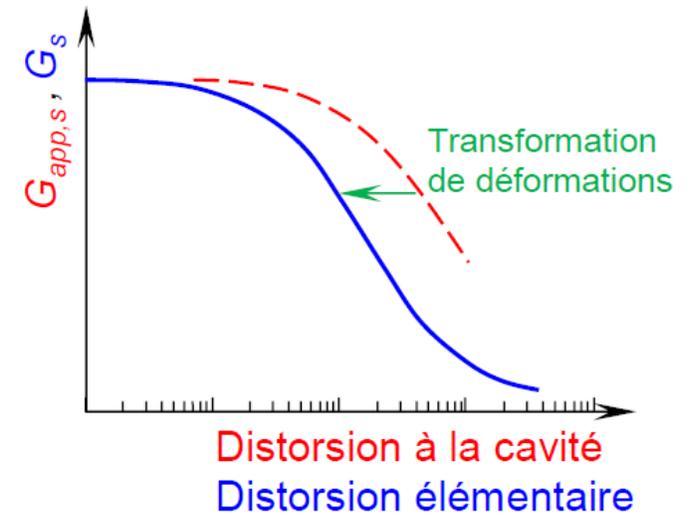
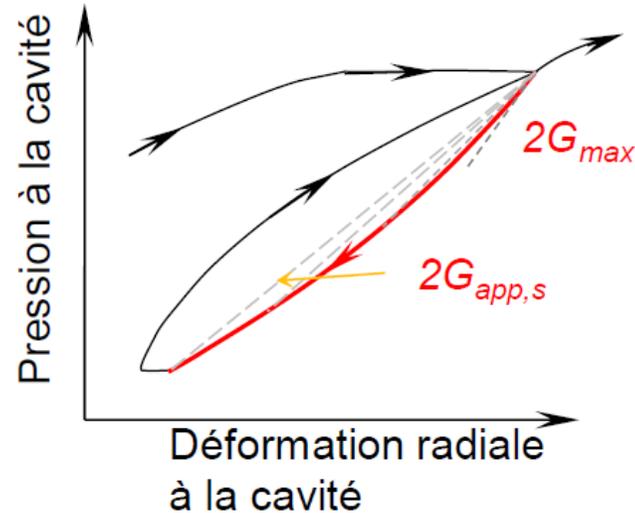
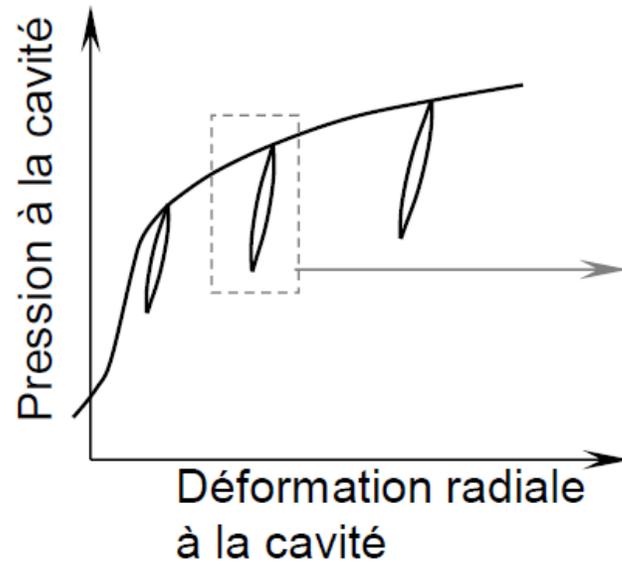
$$E_{MC} = 4,5E_M/\alpha$$



Les mesures confortent l'utilisation de la méthode directe comme méthode de référence
Auscultation disponible favorise le calage des modules si besoin de modèles complexes

Nouvelles approches de caractérisation

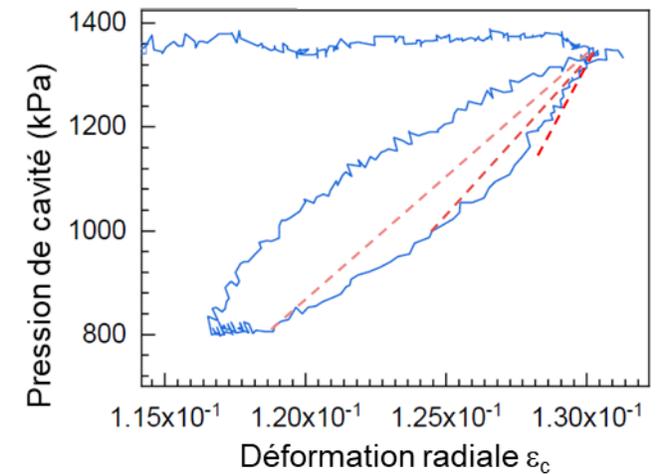
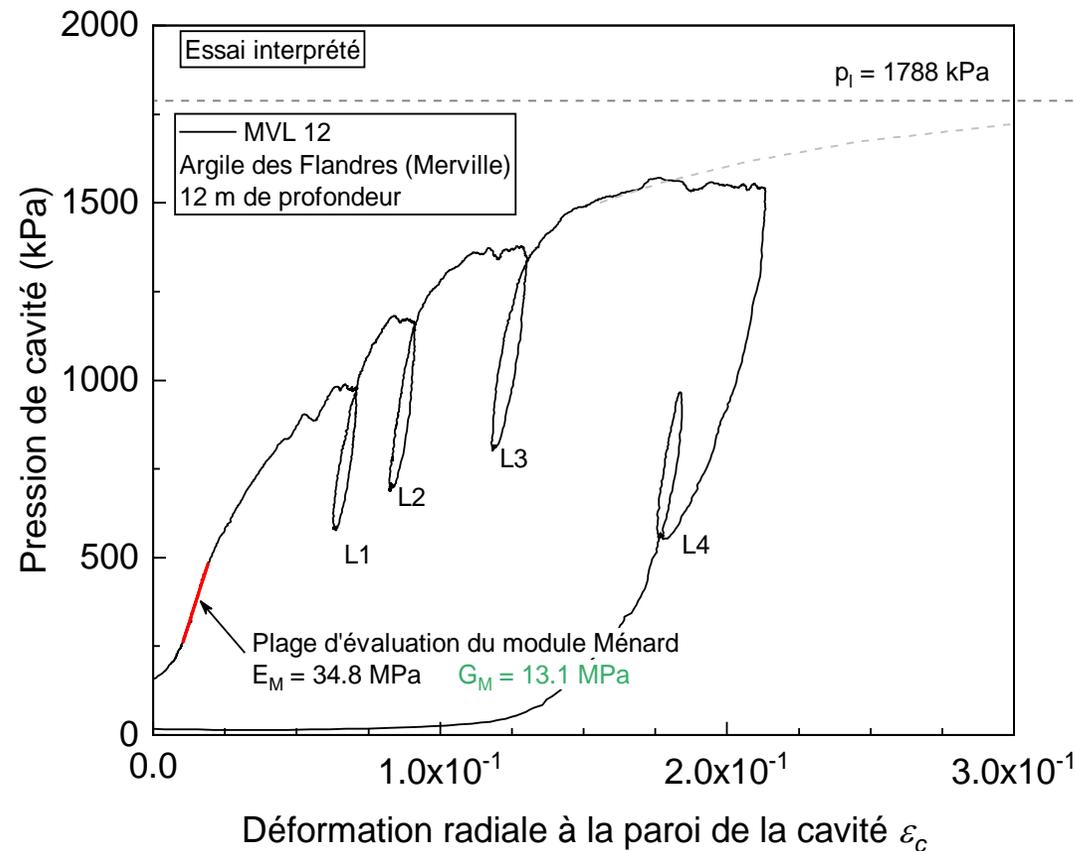
- Amélioration de la procédure d'essai



Nouvelles techniques d'essai (boucle décharge-recharge, interprétation en élasticité NL)
Module mesuré utilisé comme donnée d'entrée pour les modèles indirectes

Nouvelles approches de caractérisation

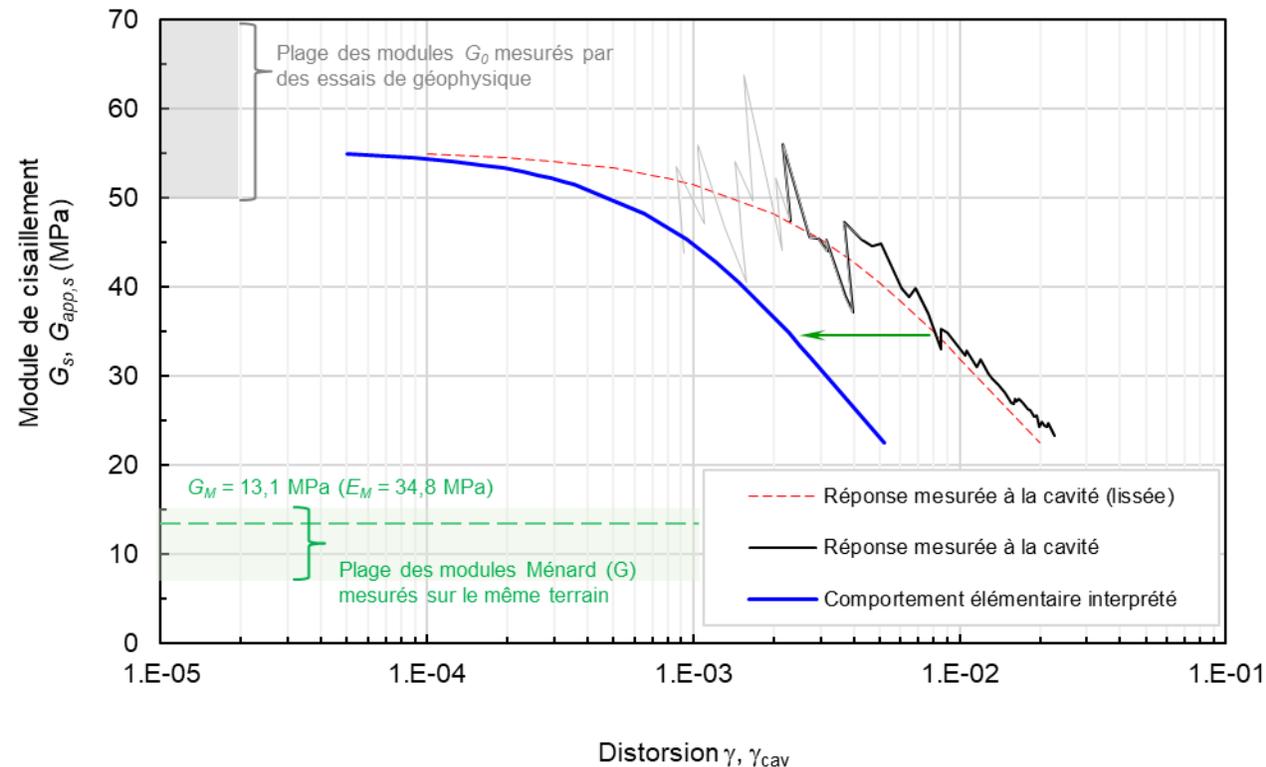
- Nouvelles techniques d'essai
 - Essai dans les argiles des Flandres (12m de profondeur)



$$G_S(\varepsilon_c) = \frac{\Delta p_c}{2\Delta \varepsilon_c}$$

Nouvelles approches de caractérisation

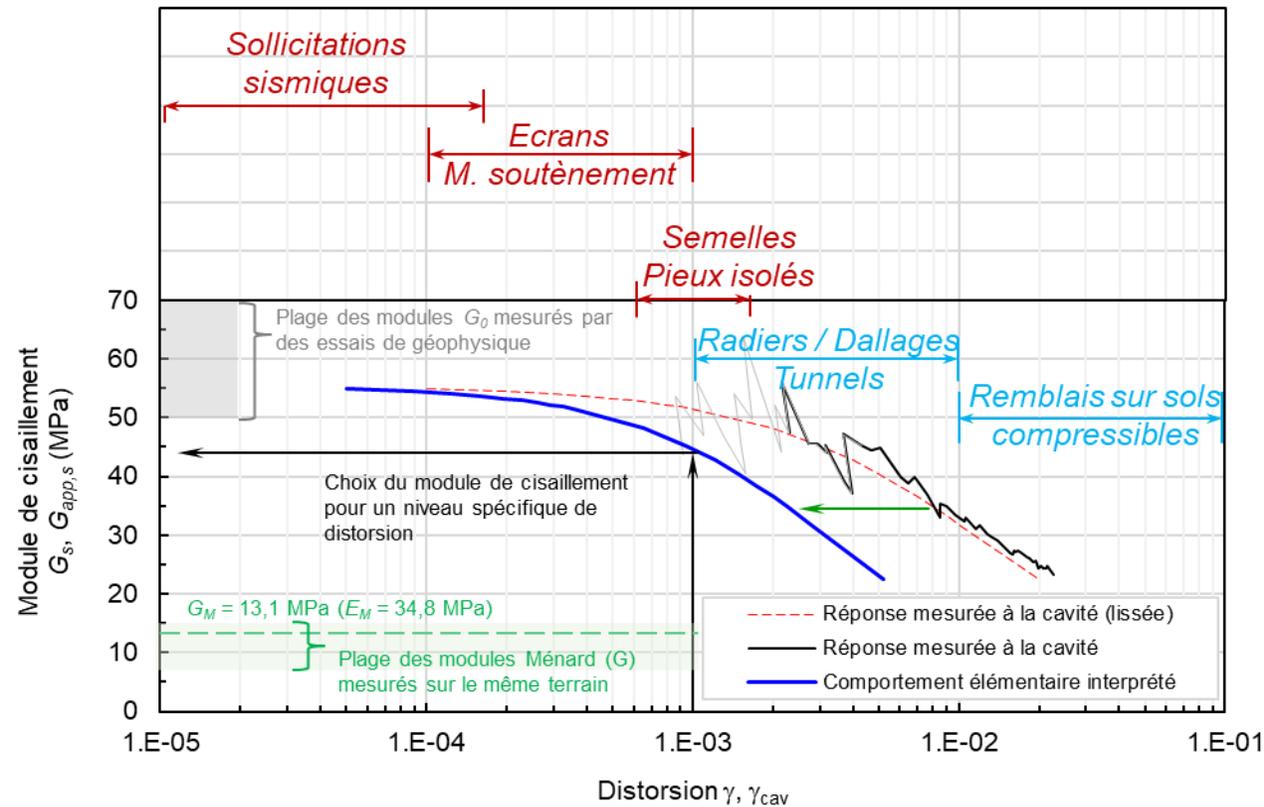
- Nouvelles techniques d'essai
 - Détermination de la courbe de décroissance du module de cisaillement directement à partir des mesures pressiométriques



Nouvelles approches de caractérisation

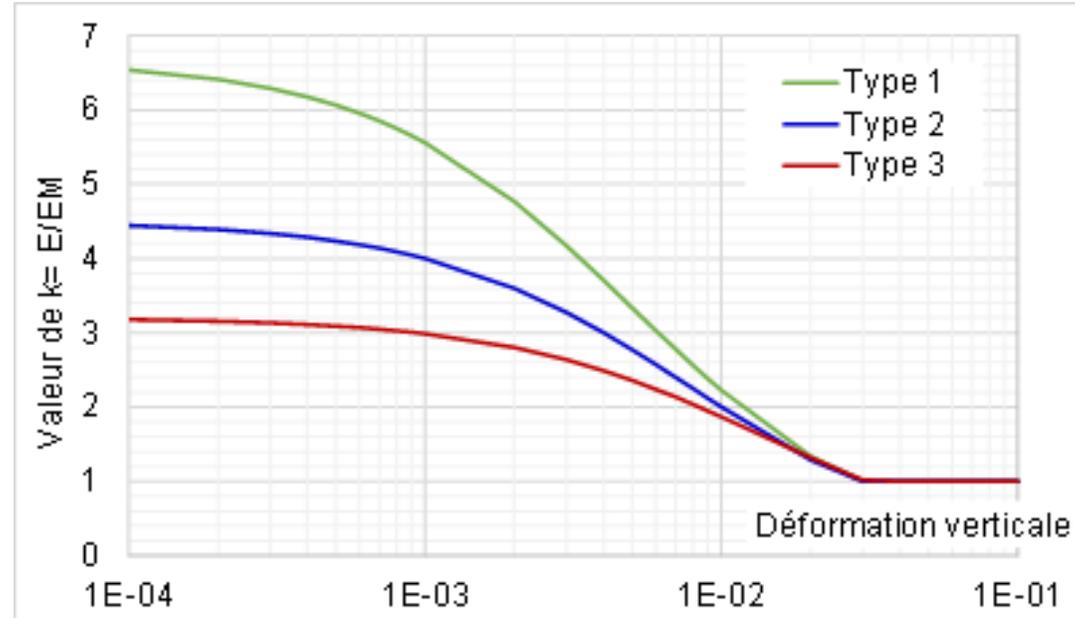
- Nouvelles techniques d'essai

- Détermination de la courbe de décroissance du module de cisaillement directement à partir des mesures pressiométriques



Nouvelles approches de caractérisation

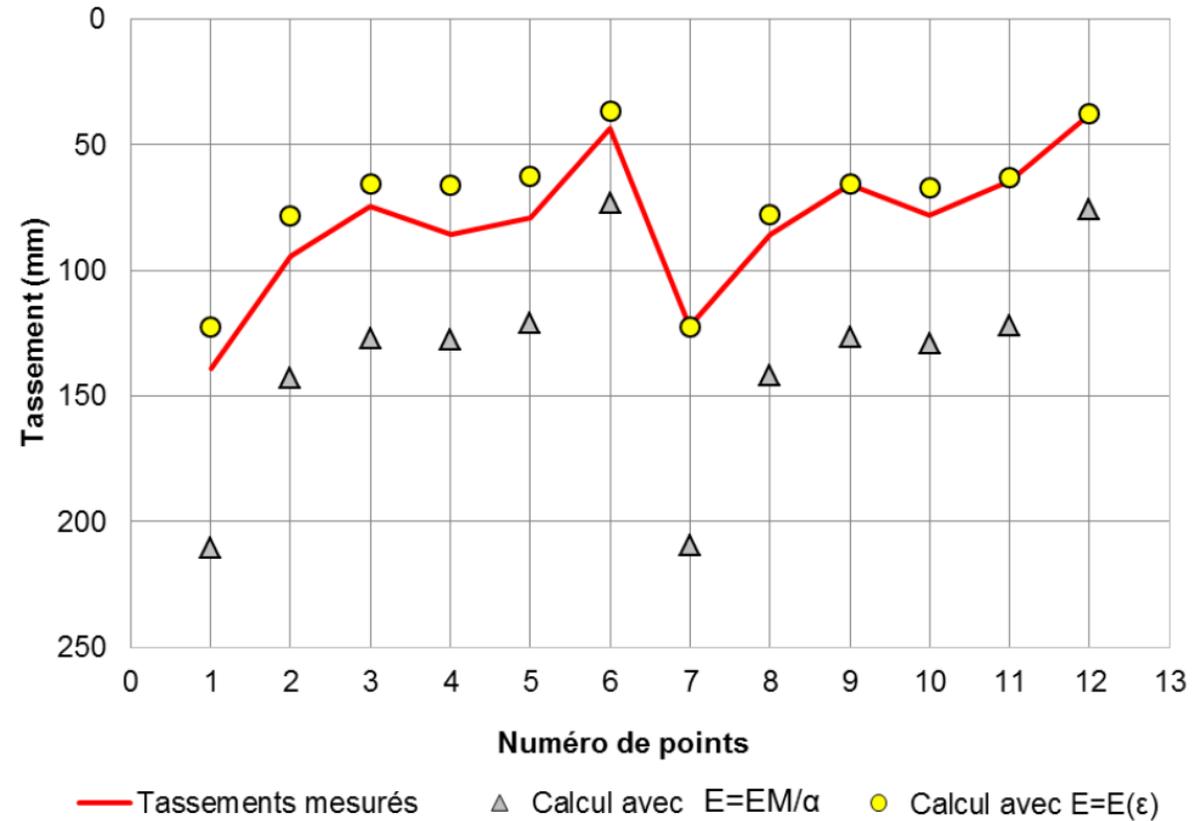
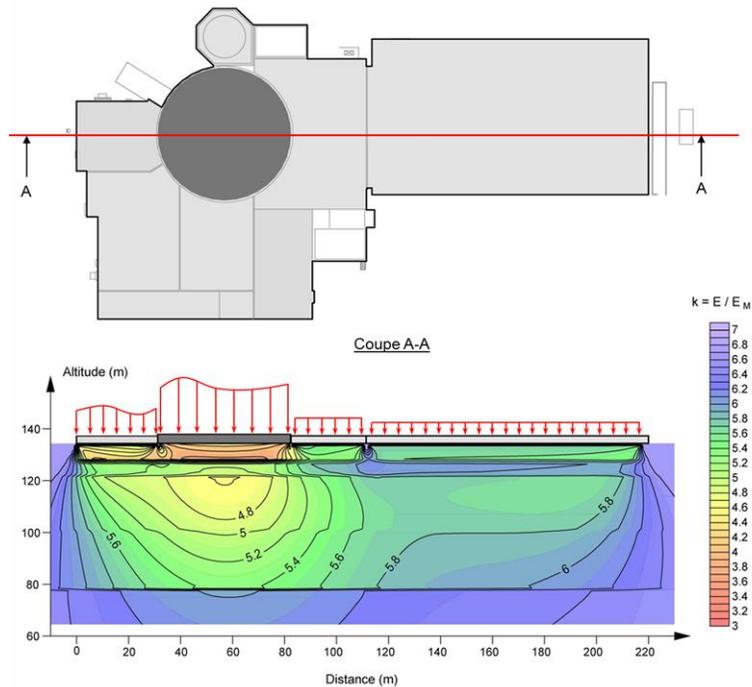
- Amélioration des règles empiriques
 - Utilisation d'un rapport E/E_M dépendant du niveau de déformation $\rightarrow E/E_M = f(\varepsilon)$
 - Loi validée sur des mesures de tassement existantes (semelles, IGH, centrales nucléaires)
 - Paramètres d'entrée : E_M , type de terrain, niveau de déformation
 - Méthode unifiée pour les semelles et radiers



- 1 - Sols granulaires
- 2 - Sols intermédiaires
- 3 - Sols fins

Nouvelles approches de caractérisation

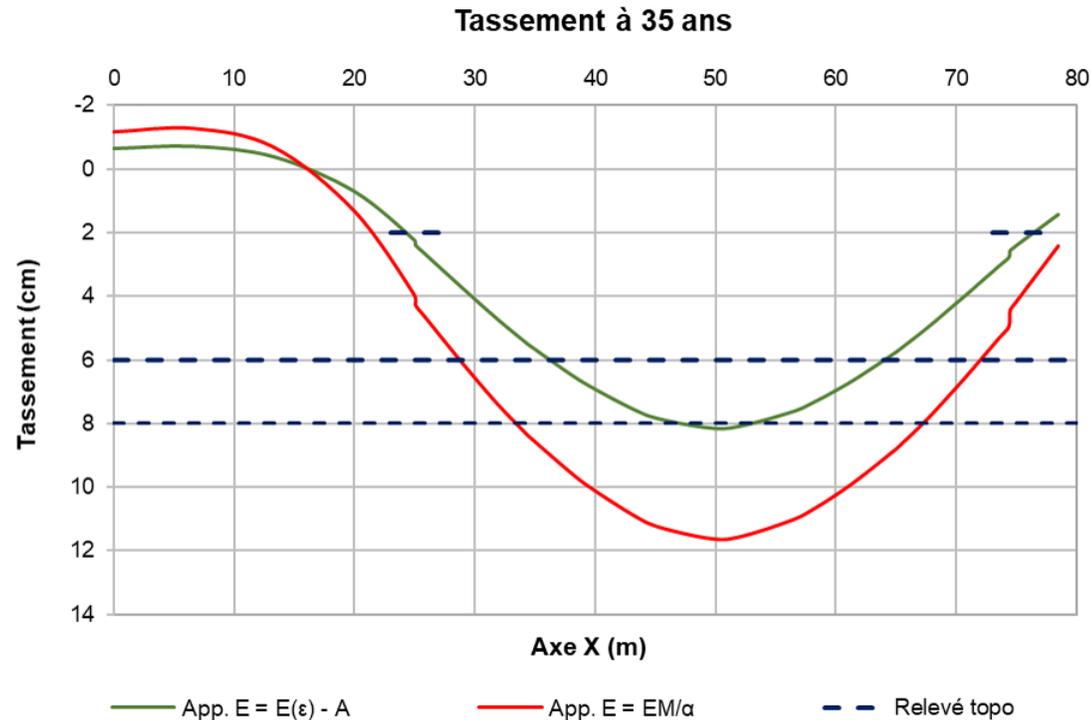
- Apport de la méthode pour l'évaluation des tassements
 - Cas d'une installation nucléaire sur radier général



(Hoang et al, 2018)

Nouvelles approches de caractérisation

- Apport de la méthode pour l'évaluation des tassements
 - Cas d'un IGH sur radier général



Tour CB21 (200 m)



Conclusion

- Utilisation de plus en plus fréquente de modèles indirectes pour évaluer le comportement des ouvrages
- Besoin de caractériser la déformabilité des terrains
 - Modèles constitutifs plus ou moins complexes (selon problème étudié)
 - Le module n'est pas un paramètre intrinsèque
 - Caractérisation fine des modules
- Un modèle plus simple combiné à un module bien choisi apporte plus que la réalisation de modèles complexes avec un terrain caractérisé par défaut
- De nouvelles méthodes de caractérisation sont à disposition des ingénieurs