

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



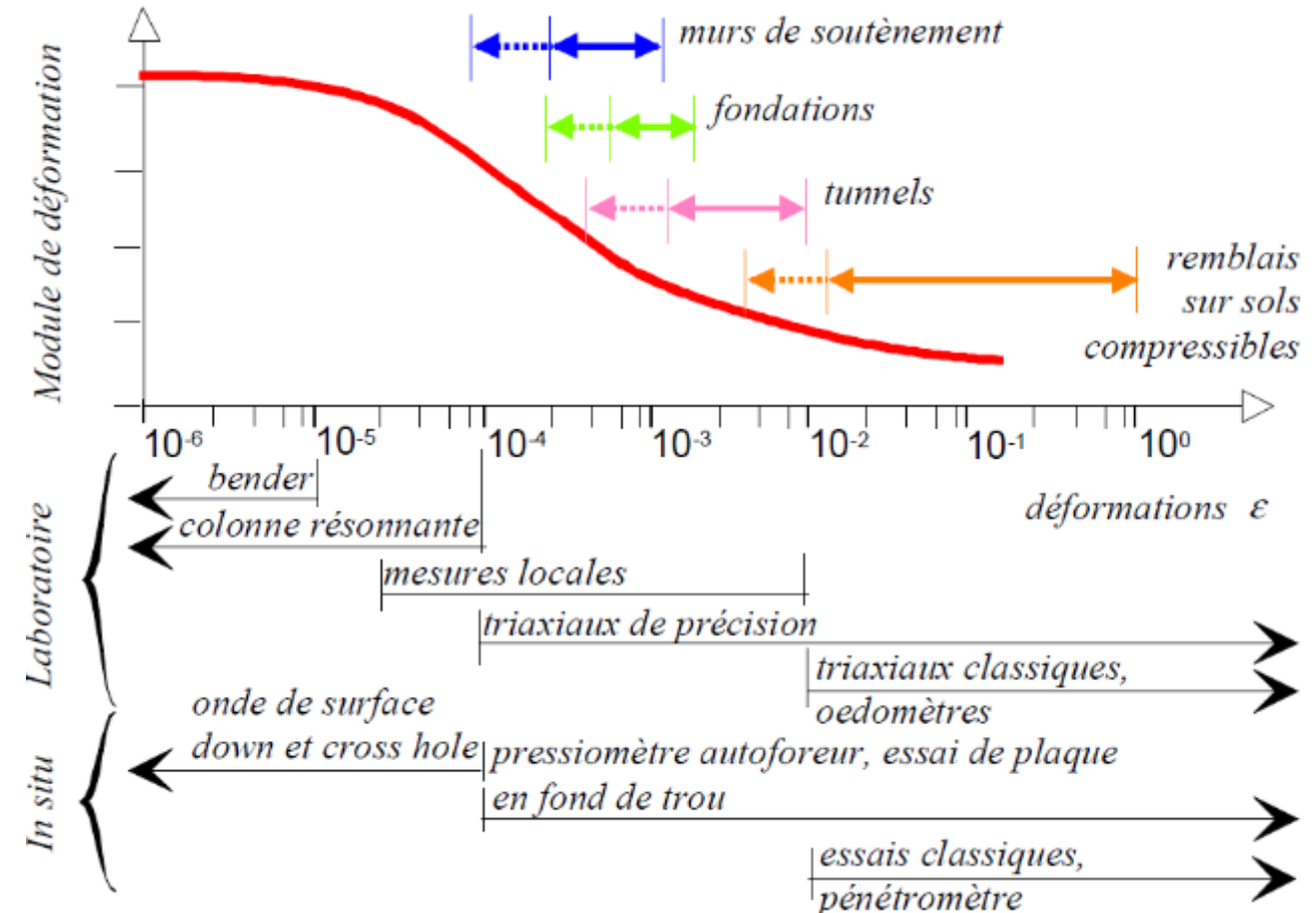
# Journée de restitution

**Dépendance des modules à la déformation - Optimisation des ouvrages géotechniques**

*Grégory MEYER (EGIS)*

1. Présentation de la méthode
2. Application sur un jeu de données du GPE (L16 – LBM)
3. Recalage des modules / auscultations
4. Perspectives

- ▶ Article JNGG 2024 (collaboration avec Christophe Dano, UGA)
- ▶ Courbe de dépendance
- ▶ Adaptation des modules aux taux de déformations
- ▶ Traduction de la non-linéarité des modules avec la déformation



(Reiffsteck, PARAM 2002)

- ▶ Loi de Hardin et Drnevich (1972)
- ▶ Modules de cisaillement  $G$  ou d'Young  $E$   
Pour  $\nu = 1/3$  alors  $a = 0,375$
- ▶ Déformation de référence 0.7 à 70% de  $G_0$  ou  $E_0$   
(72,7% pour  $a = 0,375$ )
- ▶ Module en petite déformation  $G_0$  ou  $E_0$  (cross hole, corrélation type (Petitjean, Jacquard, 2022))

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1}{1 + a \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0.7}} \right)}$$

$$G = \frac{1}{2(1 + \nu)} E = a E$$

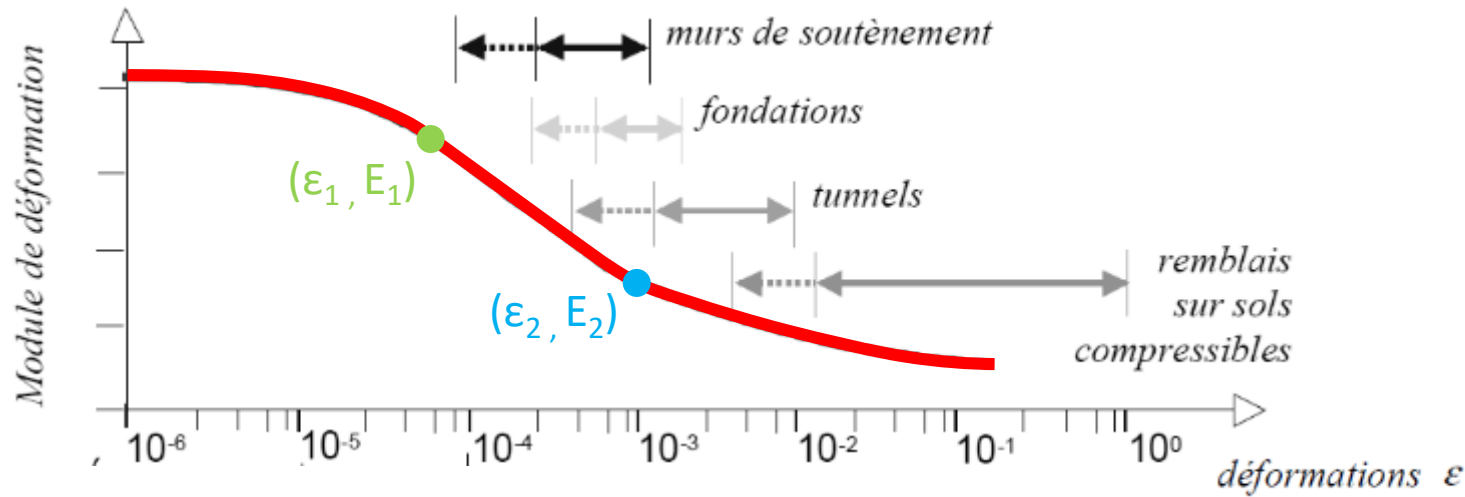
$$G_0 = \rho V_S^2$$

$$E_0 = 2\rho (\alpha \cdot E_M^\beta)^2 (1 + \nu)$$

Type de terrain	$E_M$ (MPa)	a	b
Calcaire et craie	50 - 500	168	0,32
Marne	35 - 350	189	0,25
Gravier et sable dense	10 - 350	125	0,33
Sable	5 - 150	116	0,27
Argile	10 - 180	98	0,29

*Petitjean et al., JNGG 2022)*

- ▶ Facteur de courbure  $d = a / \varepsilon_{0.7} = a / \gamma_{0.7}$
- ▶ Couples  $(\varepsilon_1, E_1)$  et  $(\varepsilon_2, E_2)$  : Savatier et al. (2018)

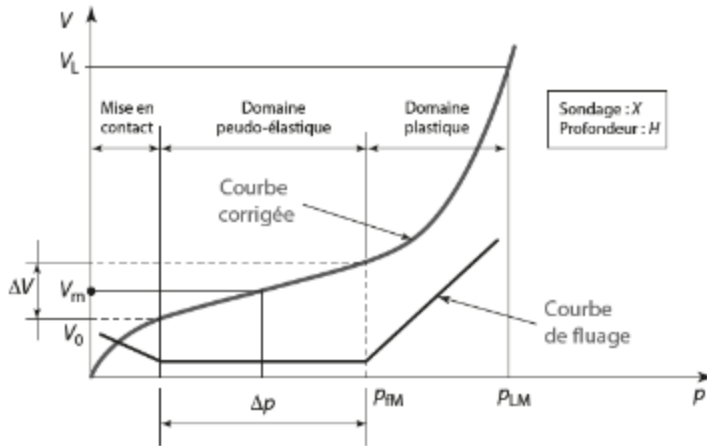


$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{1}{1 + a \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{0.7}} \right)}$$

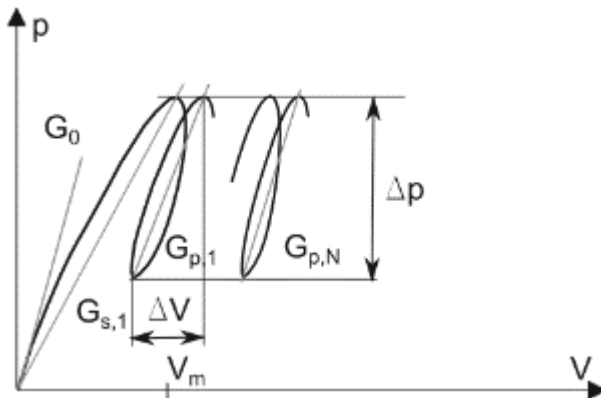
$$\frac{E_2}{E_0} = \frac{1}{1 + a \left( \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{0.7}} \right)}$$

$$d = \frac{a}{\varepsilon_{0.7}} = \left( \frac{E_2 - E_1}{\varepsilon_1 E_1 - \varepsilon_2 E_2} \right)$$

## 1. Essais pressiométriques monotones

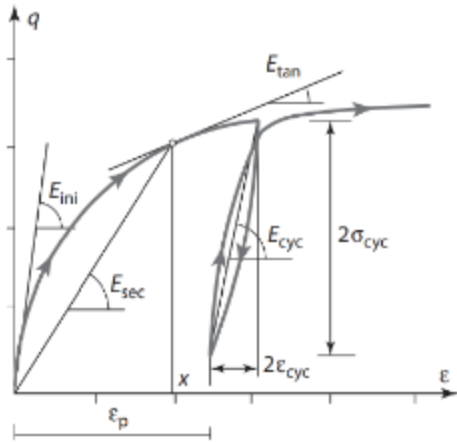


## 2. Essais pressiométriques cycliques

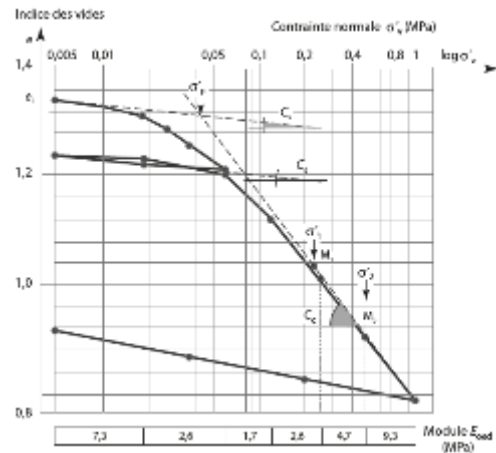


Type d'essais	Taux de déformation	Modules	Gamme de déformations
Essai pressiométrique monotone	$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V_S}$ (sur la plage pseudo-élastique)	$E_M / \alpha$	$9,0 \cdot 10^{-3}$ à $4,8 \cdot 10^{-1}$
Essai pressiométrique cyclique	$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V_S}$ (sur la plage pseudo-élastique)	$E_r$	$1,6 \cdot 10^{-3}$ à $6,2 \cdot 10^{-1}$
Essai triaxial	$\varepsilon (E_{sec})$	$E_{sécant}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$ à $1,5 \cdot 10^{-1}$
Essai œdométrique	$\varepsilon = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$ Dans le domaine élastique	$E = 2/3 E_{oedo}$ (pour $\nu = 1/3$ )	$1,9 \cdot 10^{-3}$ à $5,4 \cdot 10^{-2}$
Cross hole	$\varepsilon \approx 10^{-5}$	$E_0$	$10^{-5}$

## 3. Essais triaxiaux



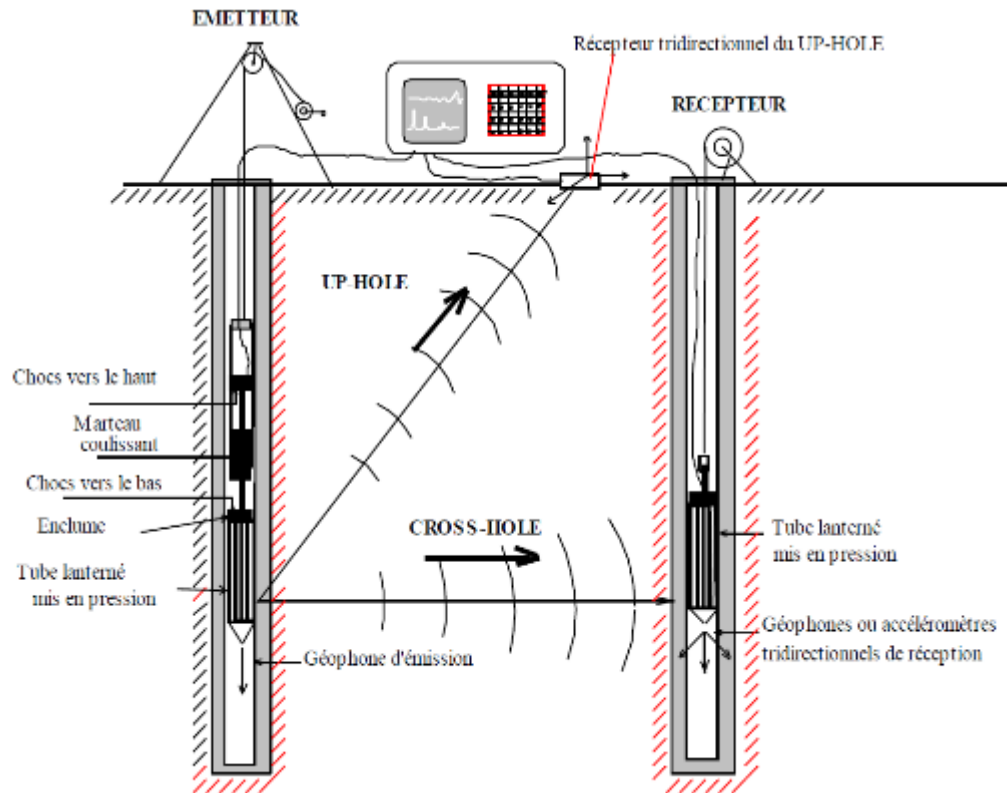
## 4. Essais oedométriques



Type d'essais	Taux de déformation	Modules	Gamme de déformations
Essai pressiométrique monotone	$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V_S}$ (sur la plage pseudo-élastique)	$E_M / \alpha$	$9,0 \cdot 10^{-3}$ à $4,8 \cdot 10^{-1}$
Essai pressiométrique cyclique	$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V_S}$ (sur la plage pseudo-élastique)	$E_r$	$1,6 \cdot 10^{-3}$ à $6,2 \cdot 10^{-1}$
Essai triaxial	$\varepsilon (E_{sec})$	$E_{sécant}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$ à $1,5 \cdot 10^{-1}$
Essai œdométrique	$\varepsilon = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$ Dans le domaine élastique	$E = 2/3 E_{oedo}$ (pour $\nu = 1/3$ )	$1,9 \cdot 10^{-3}$ à $5,4 \cdot 10^{-2}$
Cross hole	$\varepsilon \approx 10^{-5}$	$E_0$	$10^{-5}$

## 5. Géophysique

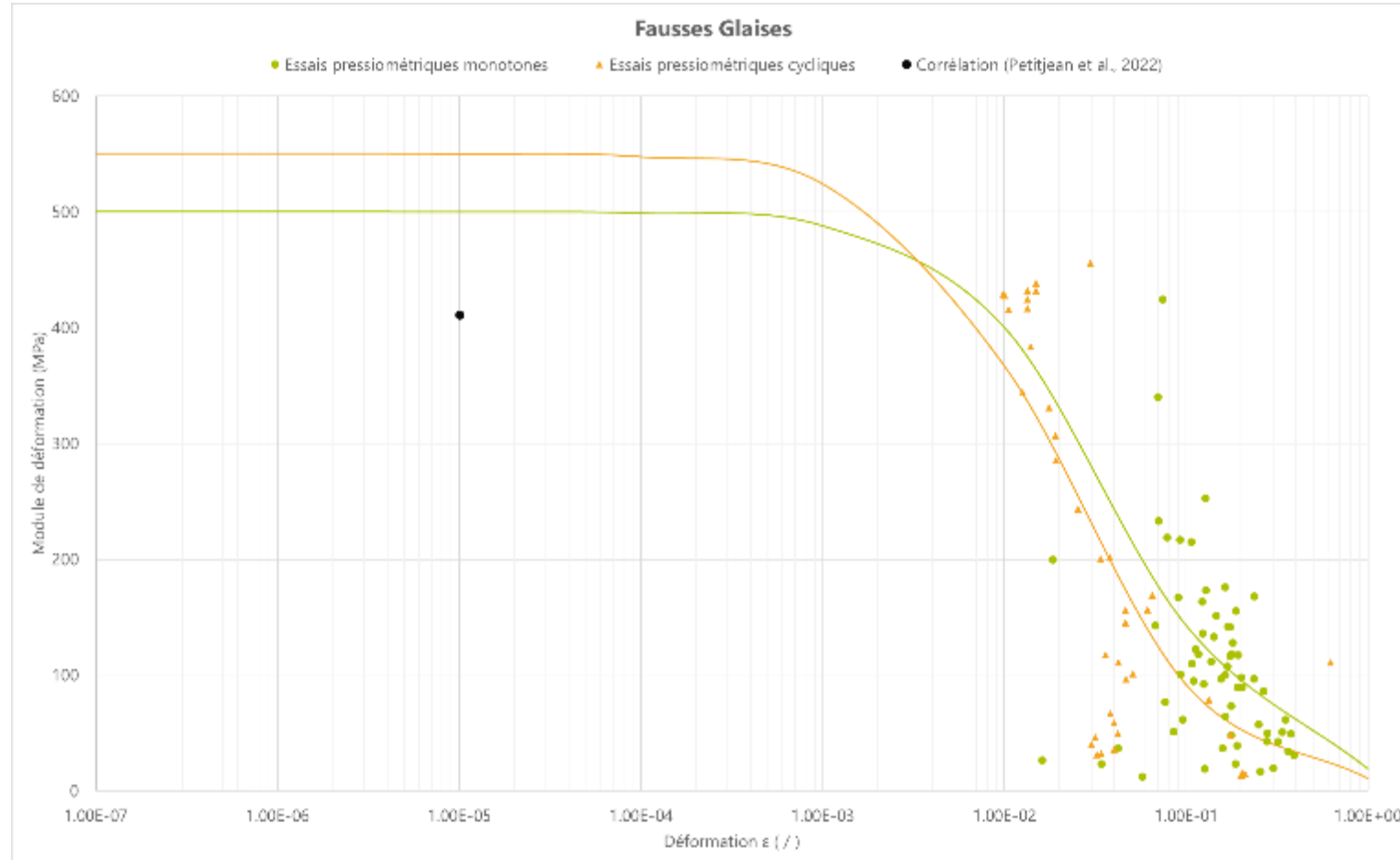
- Cross hole, down hole, up hole
- Sismique passive



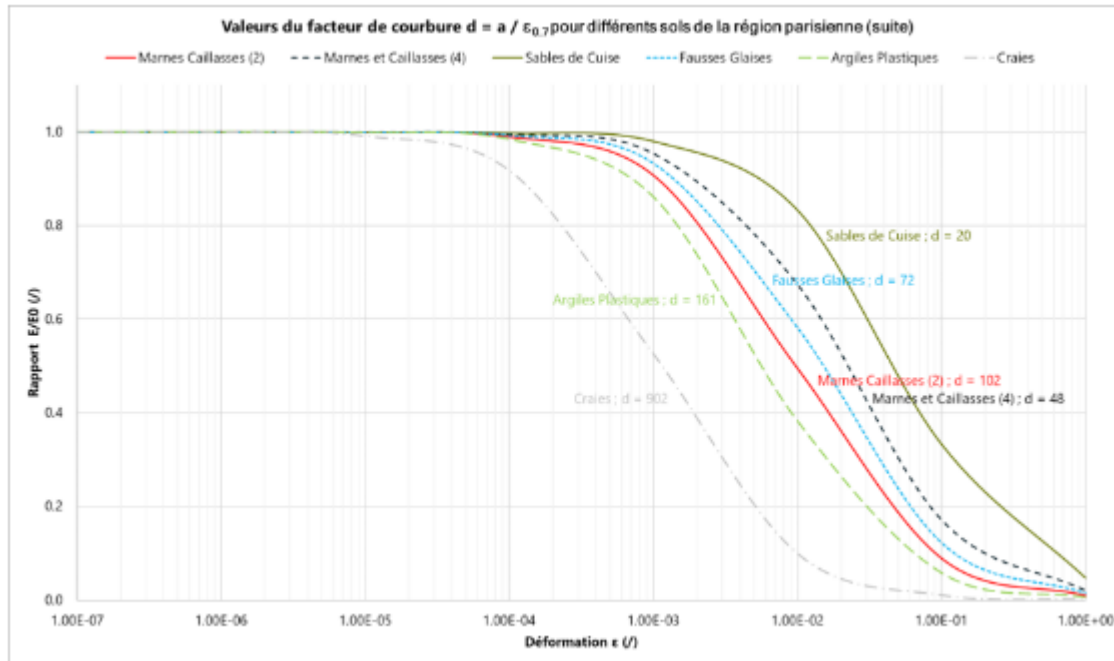
Type d'essais	Taux de déformation	Modules	Gamme de déformations
Essai pressiométrique monotone	$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V_S}$ (sur la plage pseudo-élastique)	$E_M / \alpha$	$9,0 \cdot 10^{-3}$ à $4,8 \cdot 10^{-1}$
Essai pressiométrique cyclique	$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V_S}$ (sur la plage pseudo-élastique)	$E_r$	$1,6 \cdot 10^{-3}$ à $6,2 \cdot 10^{-1}$
Essai triaxial	$\varepsilon (E_{sec})$	$E_{sécant}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$ à $1,5 \cdot 10^{-1}$
Essai œdométrique	$\varepsilon = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$ Dans le domaine élastique	$E = 2/3 E_{oedo}$ (pour $\nu = 1/3$ )	$1,9 \cdot 10^{-3}$ à $5,4 \cdot 10^{-2}$
Cross hole	$\varepsilon \approx 10^{-5}$	$E_0$	$10^{-5}$



► Multitude de mesures à trier

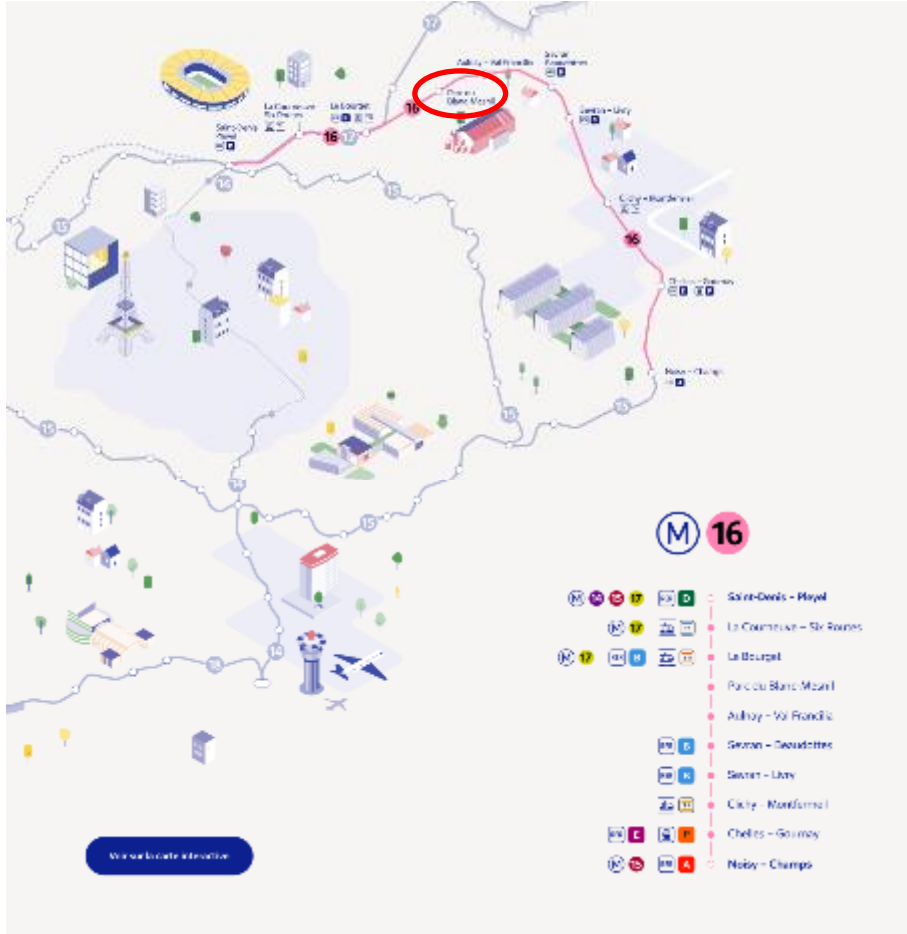


- ▶ Normalisation par  $E_0$  sur certains terrains de la région parisienne
- ▶ Proposition de valeurs du facteur de courbure (à vérifier au cas par cas)
- ▶ Facteur de courbure faible : courbe décalée vers les grandes déformations



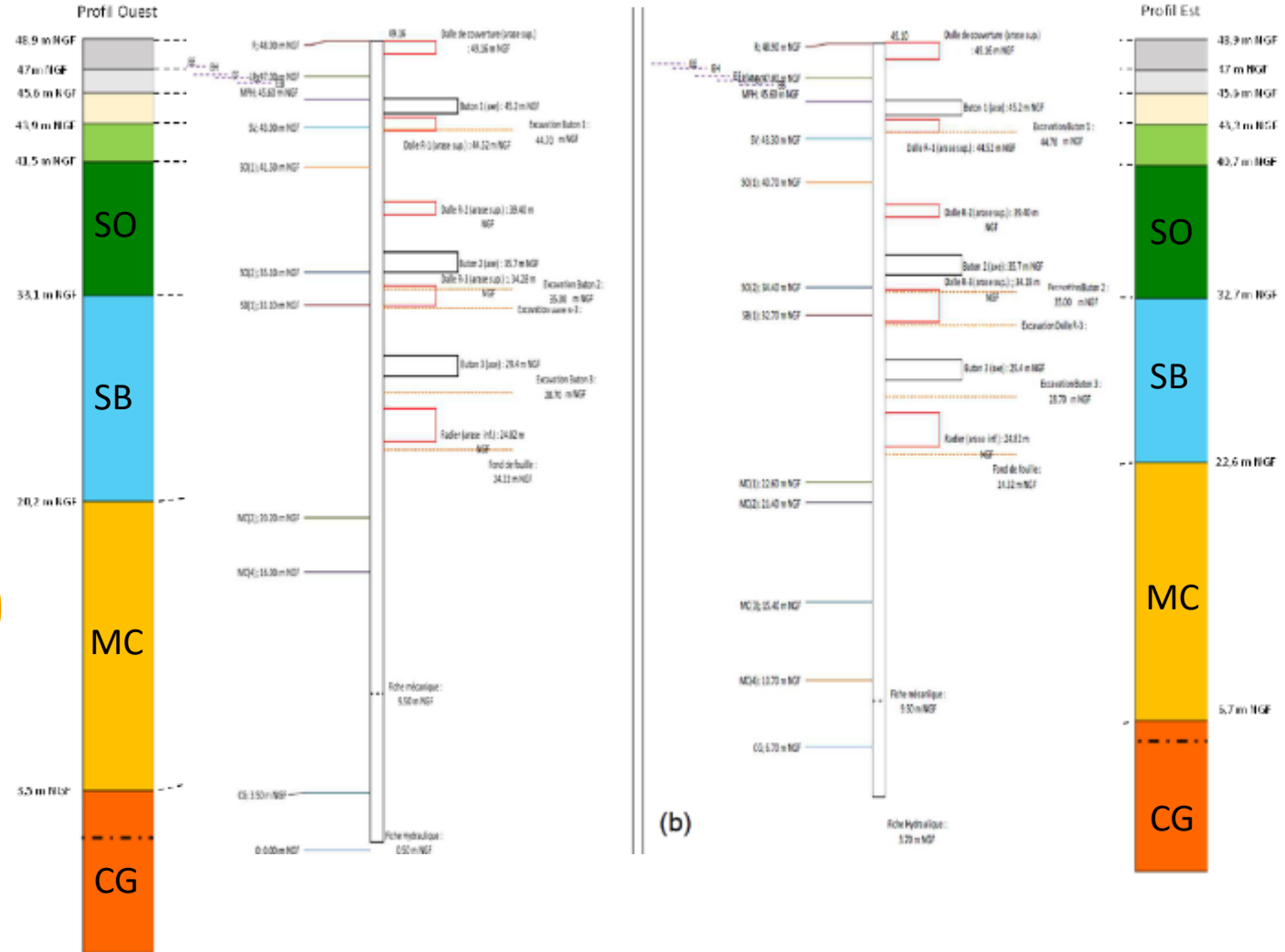
Formations	Classification	Facteur de courbure $d = \frac{a}{\epsilon_{0.7}}$
Argiles (limons)	molles	150 – 300
	fermes	100 – 200
Sables (graves)	propres	20 – 50
	argileux	40 – 75
Marno-calcaires	tendres	300 – 600
	compactes	50 – 200
Craies	compactes	500 – 1000

➤ L16 : 10 gares entre NCH et SDP (27,5 km) à horizon 2028

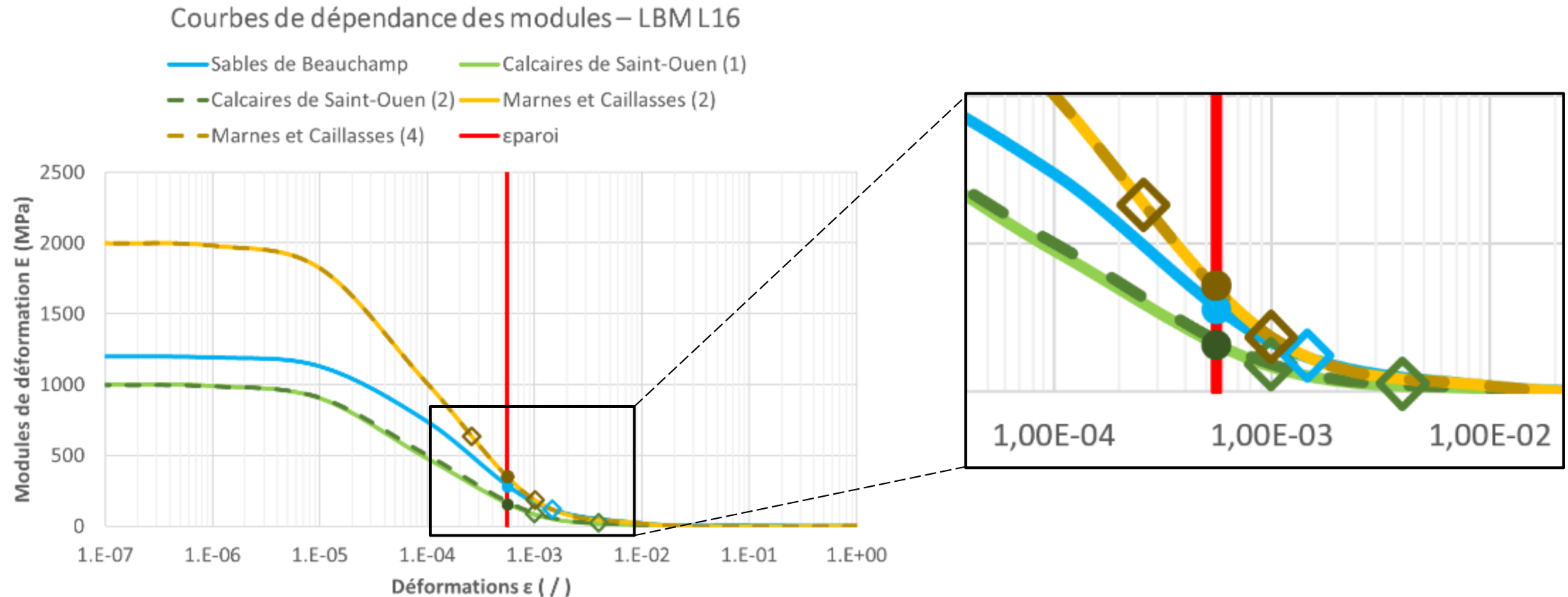


(Gérard Rollando®, SGP®)

- ▶ LBM → Parc du Blanc-Mesnil
- ▶ Boite rectangulaire 56m x 32m
- ▶ 24,8m d'excavation
- ▶ PM 1,2m d'épaisseur (H = 39,7m)
- ▶ 3 niveaux de butonnage provisoire



# 1. Recalage modules pour $\varepsilon (PM) = \Delta y_{(horiz)} / H \approx 5.10^{-4}$

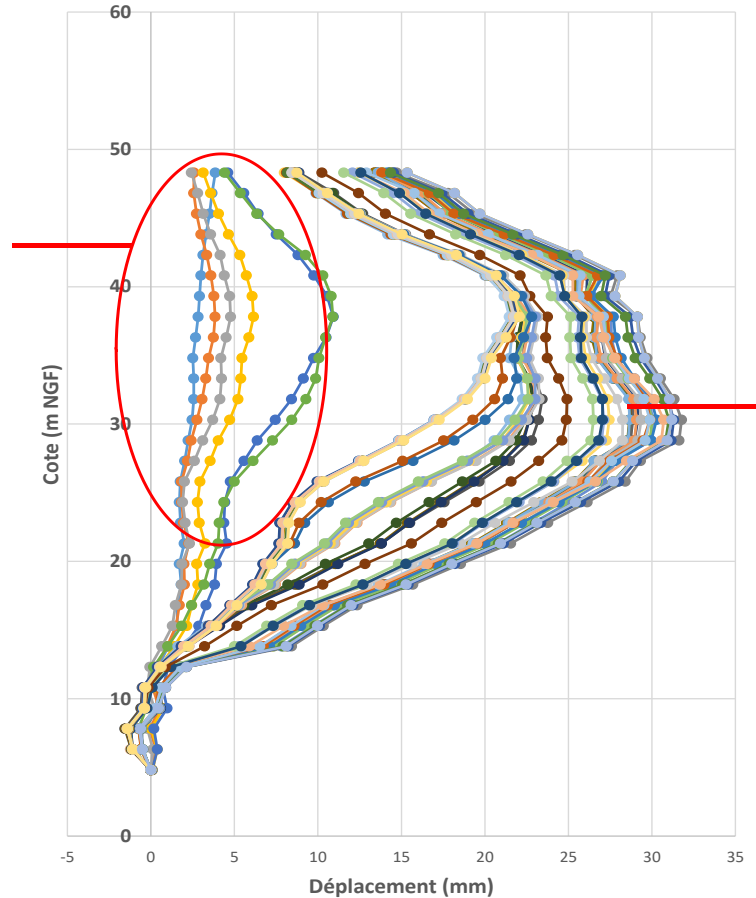


# 2. Intégration directe dans le logiciel de calculs (loi HS small : $G_0$ et $\gamma_{0,7}$ )

## ► Comparaison avec les mesures inclinométriques EXE (P23)



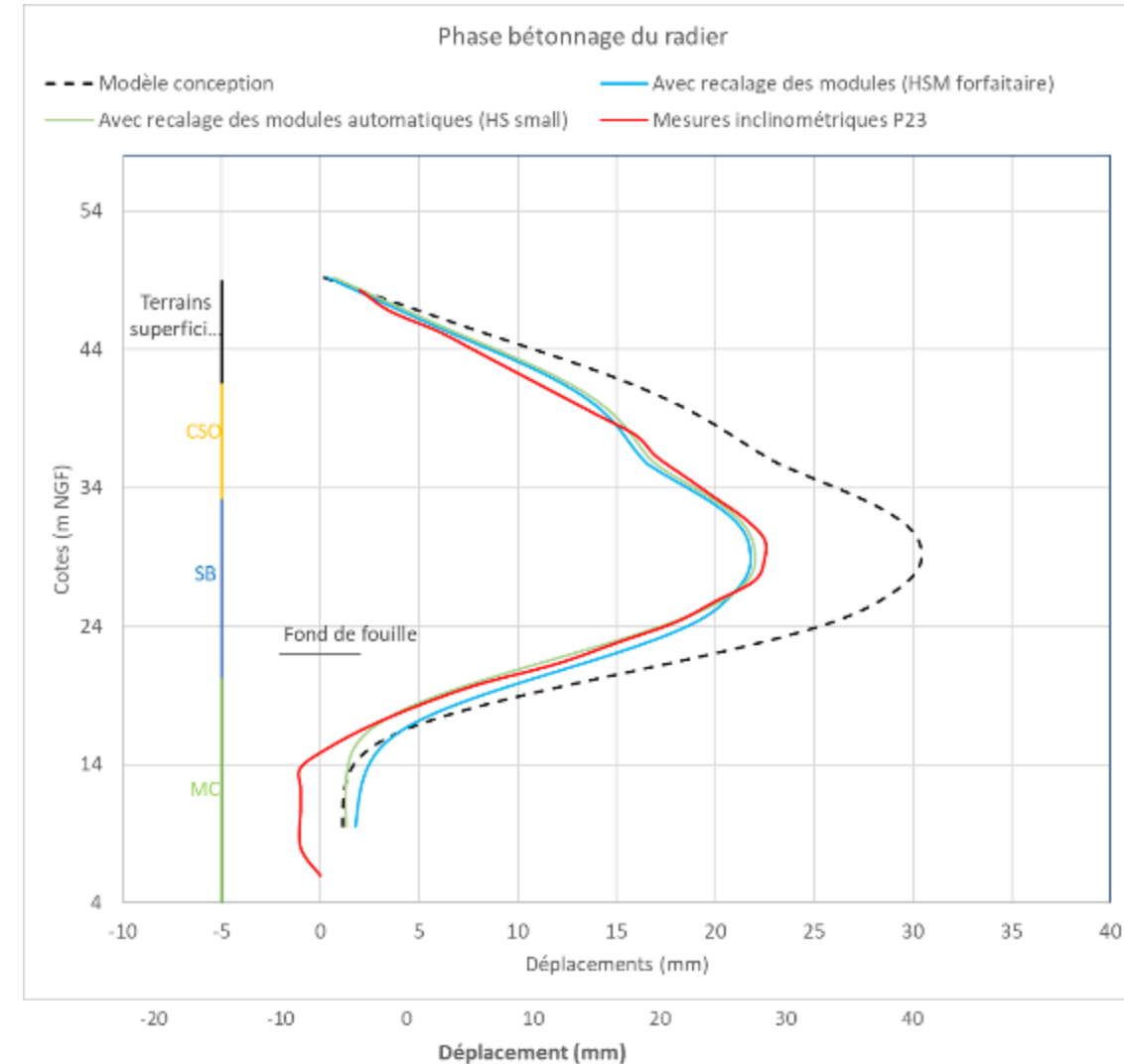
Mesures manuelles



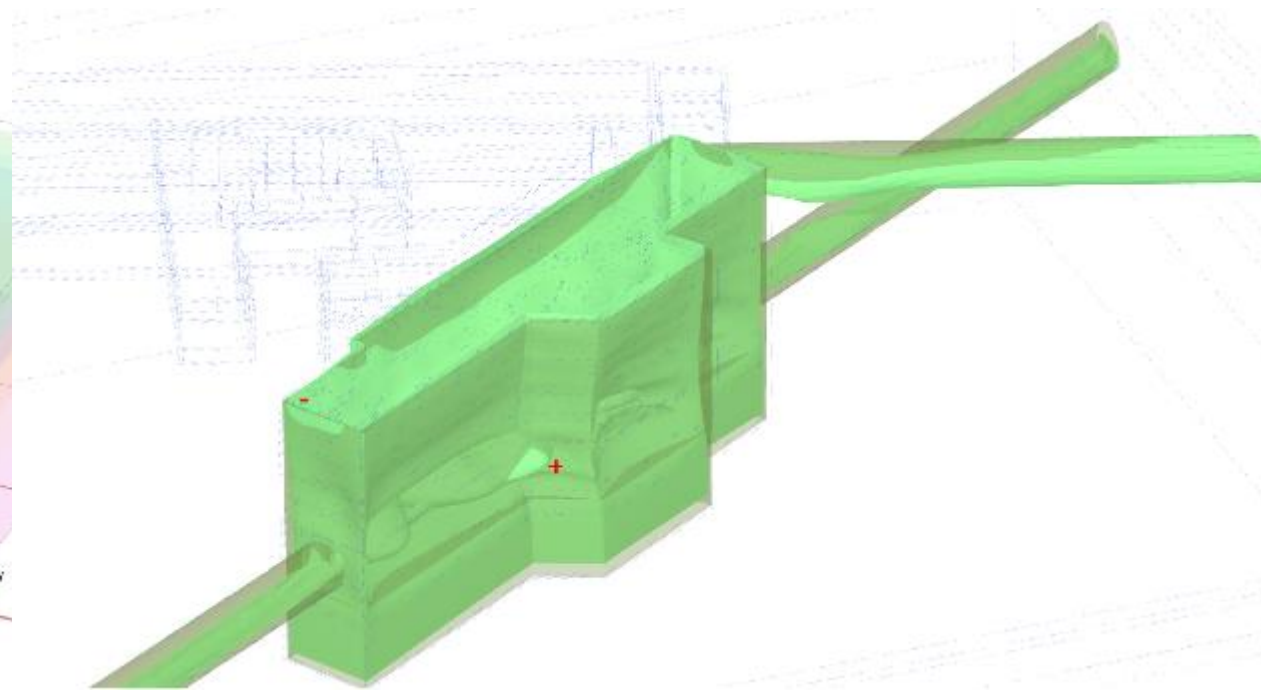
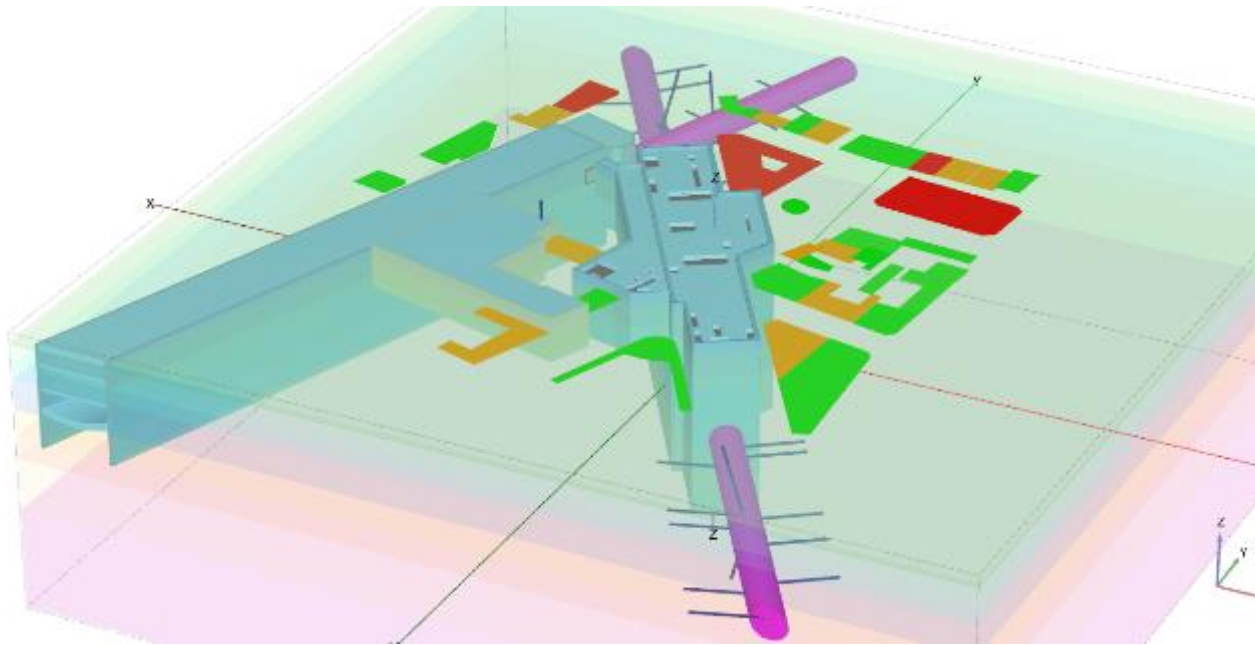
Mesures automatiques

- Calculs proches des mesures de P23
- Précision des déplacements en fiche avec la loi HS small
- Possibilité d'optimiser les parois en 1m (EXE : 1,2m)
- Economie : 400 k€
- Economie carbone : 257 t CO2e (- 17%)

Phase 09 : bétonnage du radier



- ▶ Calculs en cours sur la L15N
- ▶ Précision avec la campagne G2-G3 (sismique passive, cross hole)



- ▶ Loi de Oztoprak & Bolton (2013)  
Compilation de 454 essais labo dans les sables

$$G = \frac{A(\gamma) \cdot p_a}{(1+e)^3} \cdot \left(\frac{p'}{p_a}\right)^{m(\gamma)}$$



Merci pour votre attention