LES PLÉNIÈRES 2025
Sciences et techniques du Génie Civil
JOURNÉES de GÉOTECHNIQUE du RST
en ligne, 5-6/11/2025

ANALYSE CROISÉE DE DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ÉVALUATION DES MODULES EN PETITES DÉFORMATIONS DANS LES ARGILES ET MARNES DU BASSIN PARISIEN

Nicolas BERTHOZ
Cédric GAILLARD
(Centre d'Études des Tunnels)

Nathalie DUFOUR
Hélène CALISSANO
Laurent BATILLIOT
Michel VANWOLLEGHEM
(Cerema, GéoCoD)

Antoine RALLU
Yara ASLAN
Denis BRANQUE
(ENTPE – LTDS – Université de Lyon – UMR CNRS 5513)

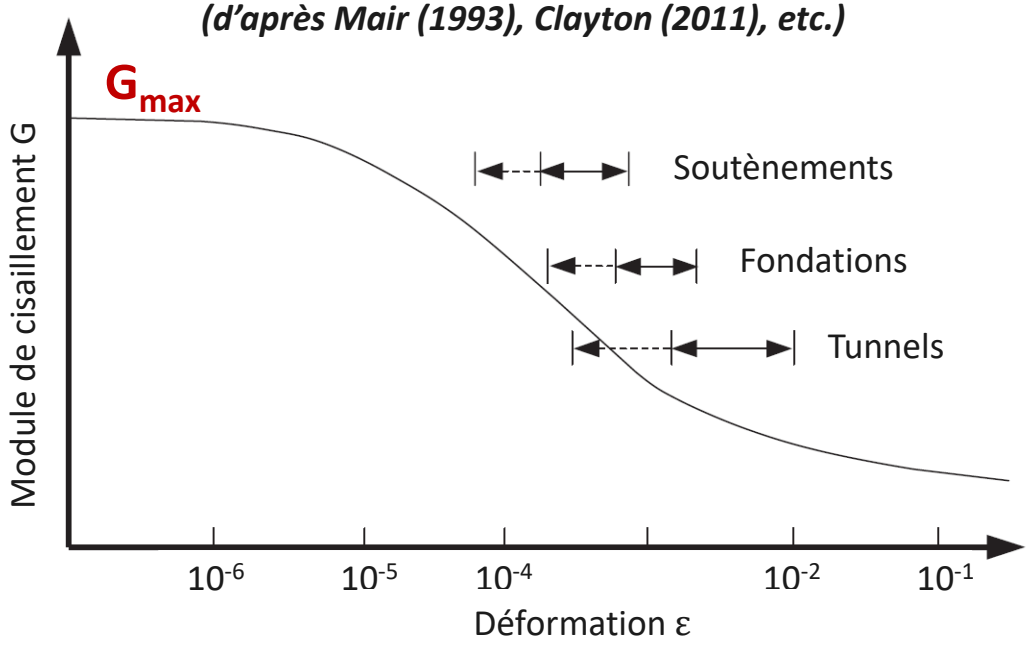
Projet ANR : E-PILOT

LES PLÉNIÈRES 2025
Sciences et techniques du Génie Civil
JOURNÉES de GÉOTECHNIQUE du RST
en ligne, 5-6/11/2025

Contexte et objectifs

- Le dimensionnement des ouvrages géotechniques nécessite une évaluation pertinente du module de déformation des terrains
- Les modules dépendent de la gamme de déformation : constants jusqu'à $\varepsilon \approx 10^{-5}$ (→ G_{max}), ils diminuent significativement au delà (rapport pouvant atteindre 5 voire 10)

Evolution des modules avec la déformation
(d'après Mair (1993), Clayton (2011), etc.)

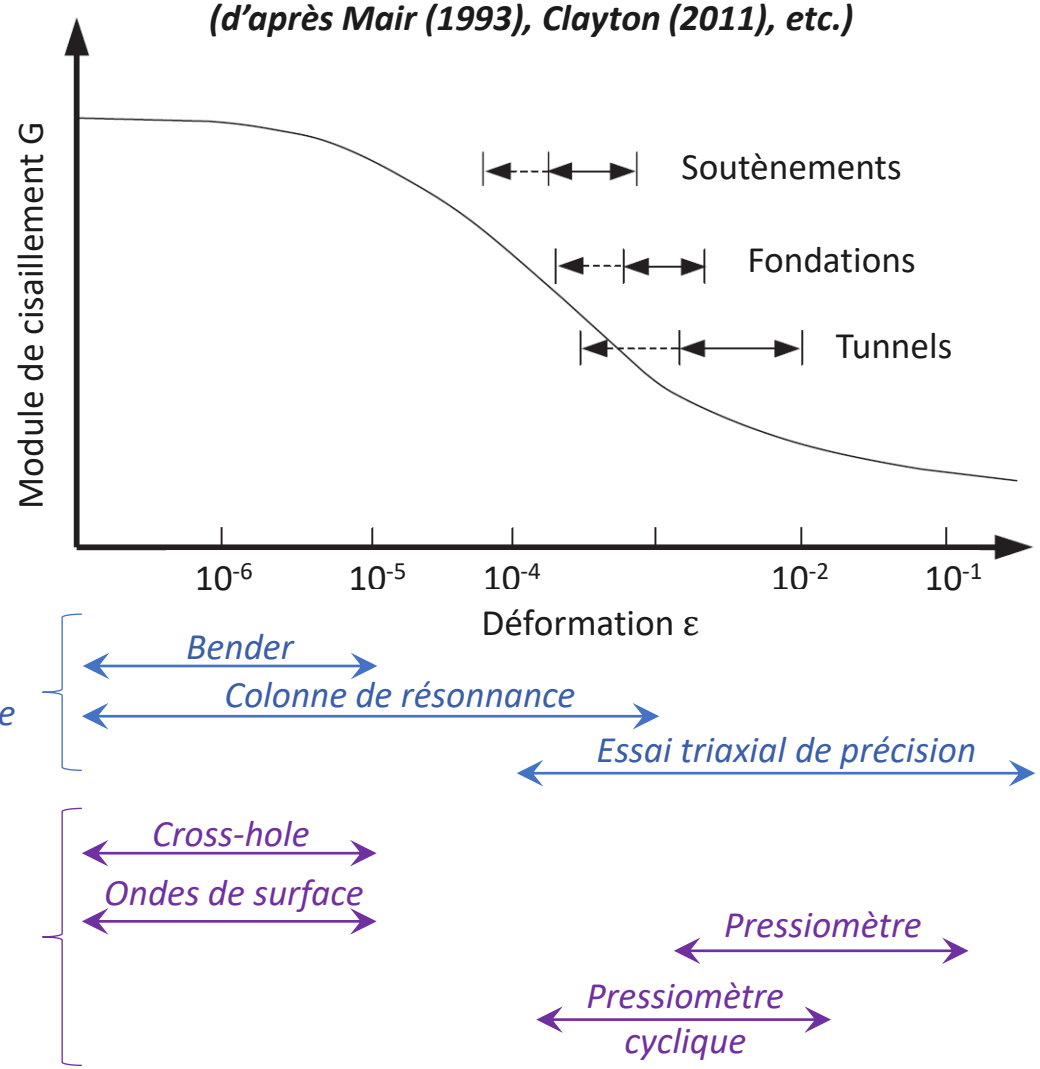


LES PLÉNIÈRES 2025
Sciences et techniques du Génie Civil
JOURNÉES de GÉOTECHNIQUE du RST
en ligne, 5-6/11/2025

Contexte et objectifs

- Le dimensionnement des ouvrages géotechniques nécessite une évaluation pertinente du module de déformation des terrains
- Les modules dépendent de la gamme de déformation : constants jusqu'à $\varepsilon \approx 10^{-5}$ (→ G_{max}), ils diminuent significativement au delà (rapport pouvant atteindre 5 voire 10)
- Différentes méthodes permettent de mesurer le G_{max}

Evolution des modules avec la déformation
(d'après Mair (1993), Clayton (2011), etc.)



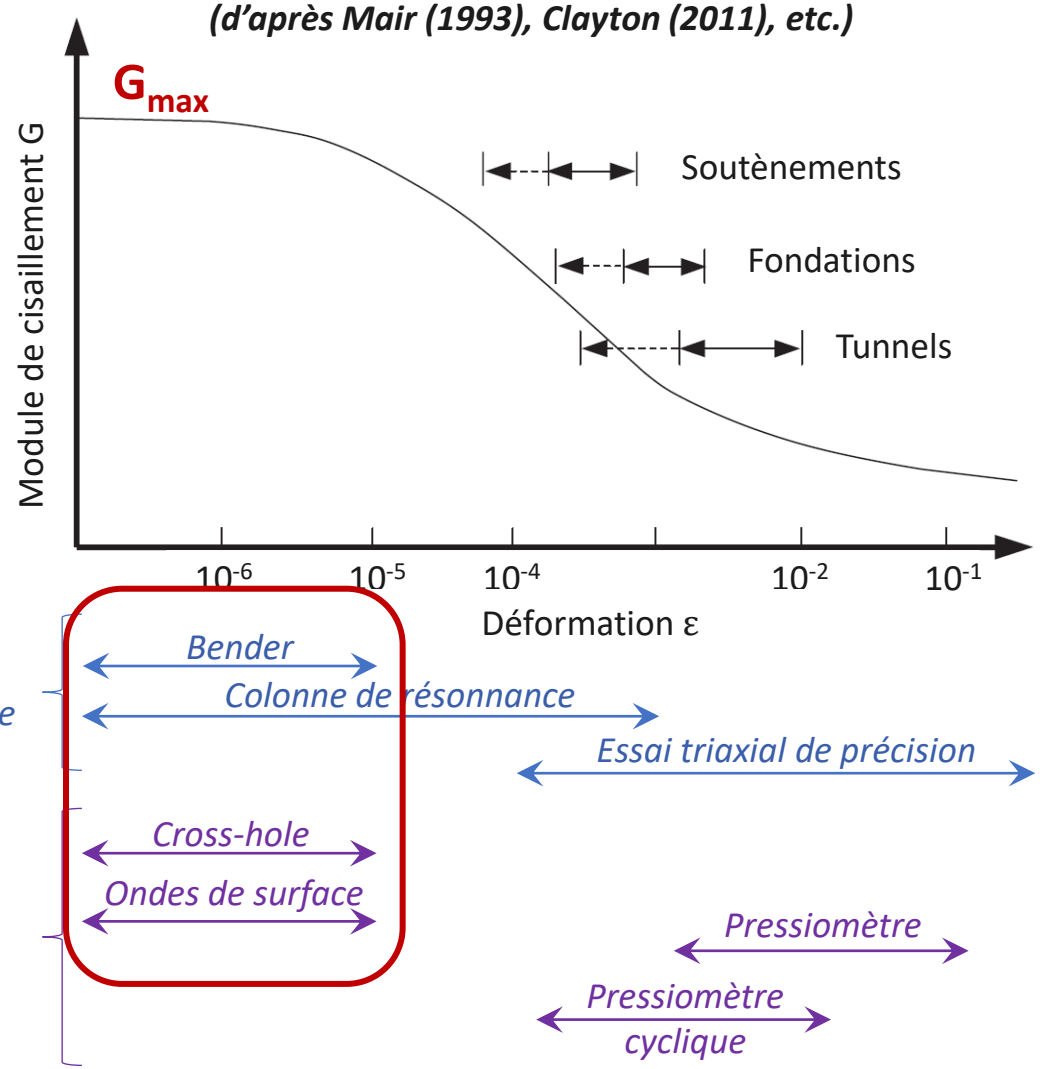
LES PLÉNIÈRES 2025
Sciences et techniques du Génie Civil
JOURNÉES de GÉOTECHNIQUE du RST
en ligne, 5-6/11/2025

Contexte et objectifs

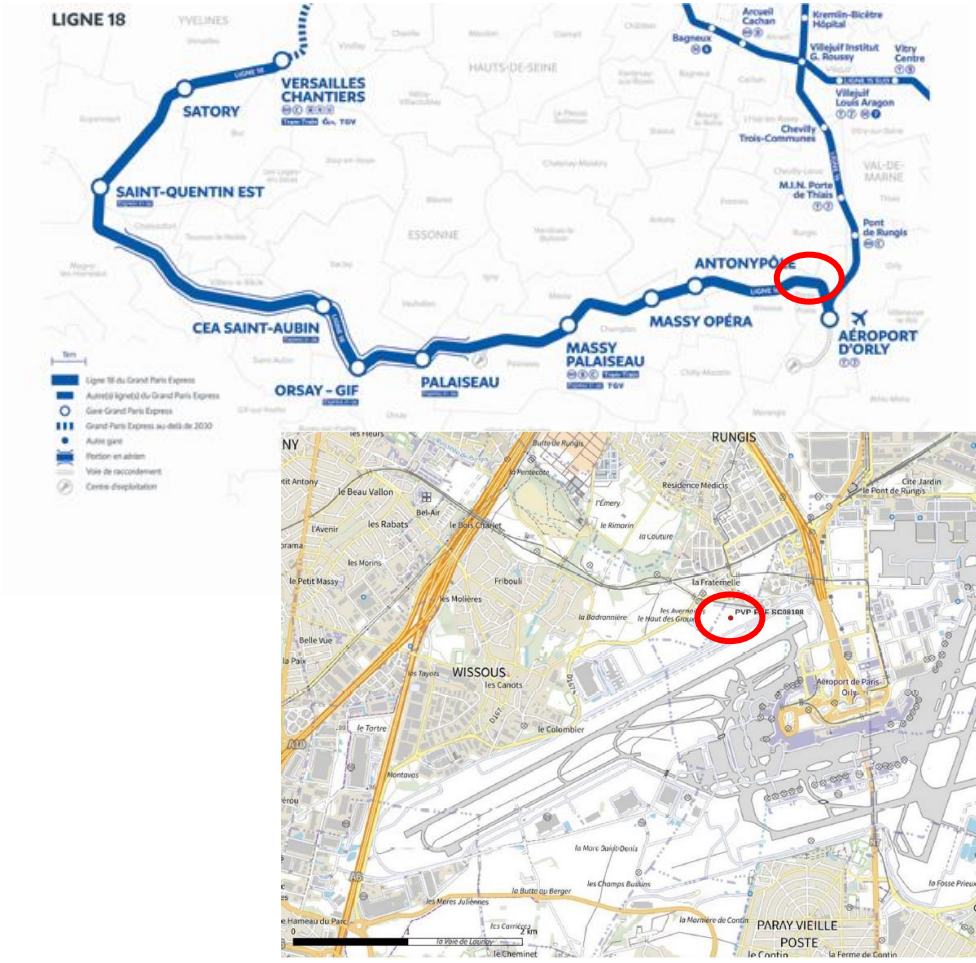
- Le dimensionnement des ouvrages géotechniques nécessite une évaluation pertinente du module de déformation des terrains
- Les modules dépendent de la gamme de déformation : constants jusqu'à $\varepsilon \approx 10^{-5}$ (→ G_{max}), ils diminuent significativement au delà (rapport pouvant atteindre 5 voire 10)
- Différentes méthodes permettent de mesurer le G_{max}

Intérêt d'une campagne de mesures des vibrations induites par les tunneliers (Cf. présentation Aslan & Rallu) pour comparer différentes méthodes d'estimation du G_{max}

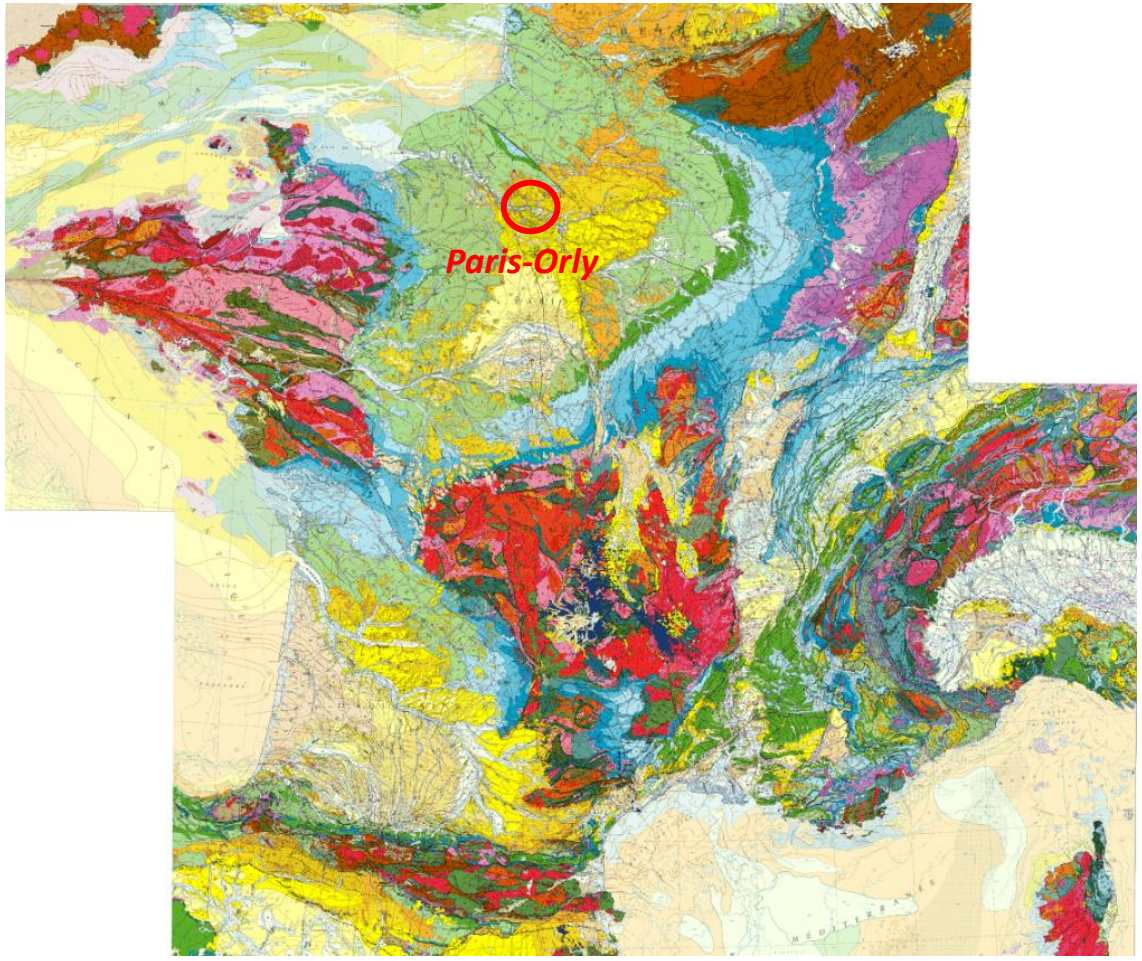
Evolution des modules avec la déformation
(d'après Mair (1993), Clayton (2011), etc.)



Localisation du site expérimental



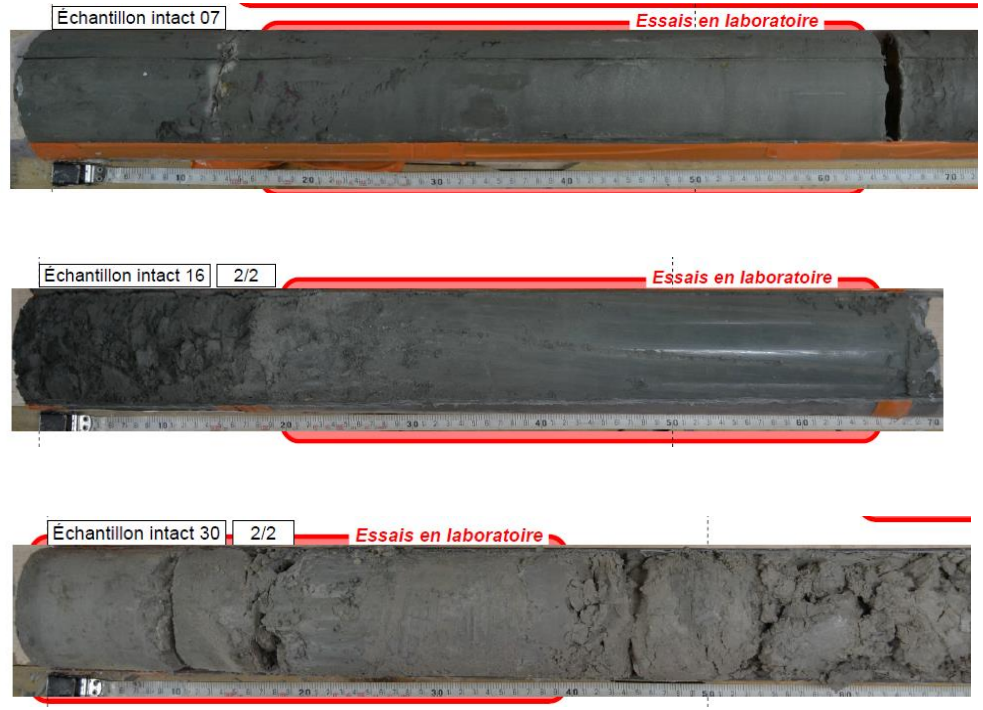
Localisation du site

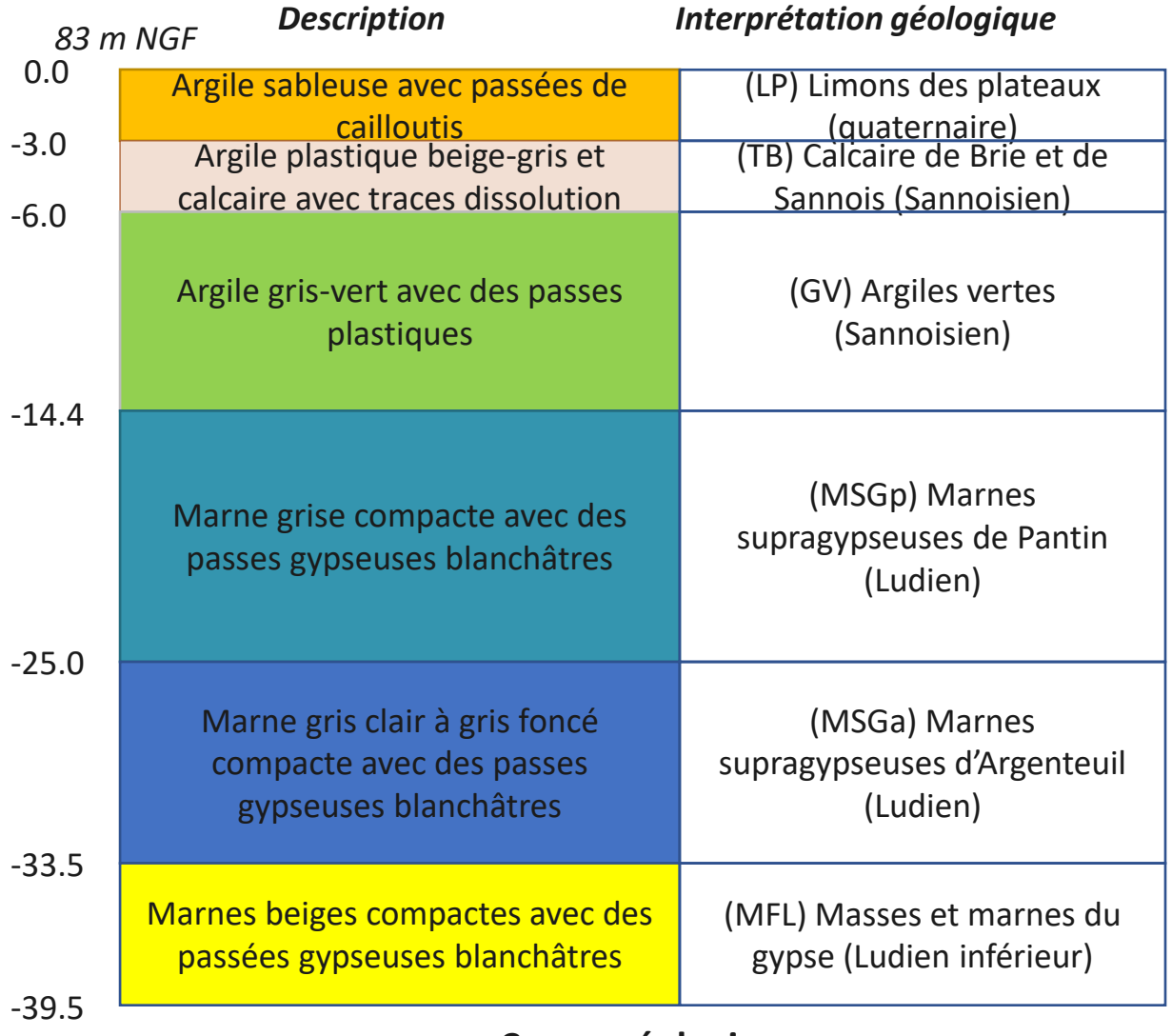


Carte géologique (source : BRGM – Infoterre)

83 m NGF	Description	Interprétation géologique
0.0	Argile sableuse avec passées de cailloutis	(LP) Limons des plateaux (quaternaire)
-3.0	Argile plastique beige-gris et calcaire avec traces dissolution	(TB) Calcaire de Brie et de Sannois (Sannoisien)
-6.0	Argile gris-vert avec des passes plastiques	(GV) Argiles vertes (Sannoisien)
-14.4	Marne grise compacte avec des passes gypseuses blanchâtres	(MSGp) Marnes supragypseuses de Pantin (Ludien)
-25.0	Marne gris clair à gris foncé compacte avec des passes gypseuses blanchâtres	(MSGa) Marnes supragypseuses d'Argenteuil (Ludien)
-33.5	Marnes beiges compactes avec des passées gypseuses blanchâtres	(MFL) Masses et marnes du gypse (Ludien inférieur)
-39.5		

Coupe géologique





Coupe géologique

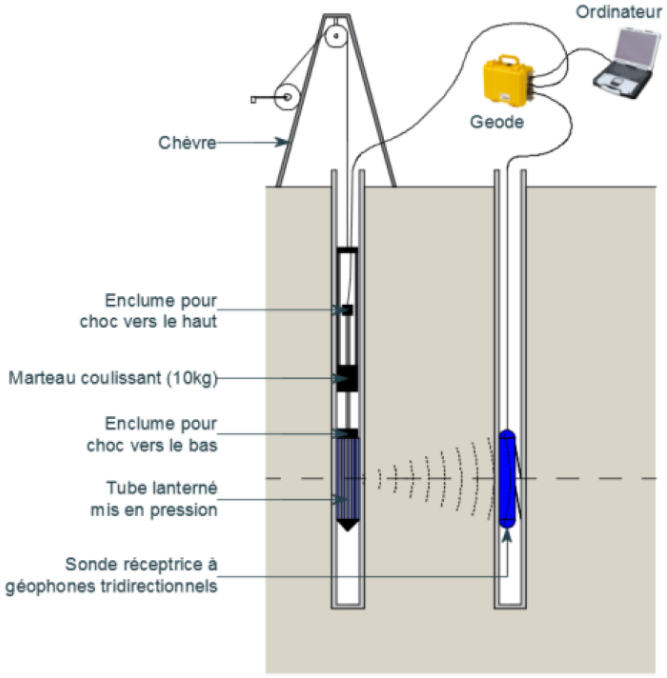
	LP	TB	GV	MSGp	MSGa	MFL
State parameters						
ρ (kg/m^3)	1980	1990	1950	1930	1980	1810
ρ_d (kg/m^3)	1660	1640	1560	1530	1600	1380
w (%)	20	21	25	26	23	31
e (-)	0.58	0.61	0.70	0.73	0.65	0.92
Sr (%)	--	93	97	97	97	92
VBS (-)	3	2	6	2	5	3
PI (-)	12	19	33	28	37	45
OCR (-)	1	1	2	1	1.5	1
FC (%)	80	56	97	86	97	87
Mechanical parameters						
E_M (MPa)	8	23	13	43	45	180
p_l^* (MPa)	0.8	2.1	1.1	3.2	3.1	5.8
c' (kPa)	5	15	20	30	30	60
φ' (°)	28	32	15	25	20	35

Synthèse des caractéristiques géotechniques

LES PLÉNIÈRES 2025
Sciences et techniques du Génie Civil
JOURNÉES de GÉOTECHNIQUE du RST
en ligne, 5-6/11/2025

Mesures réalisées

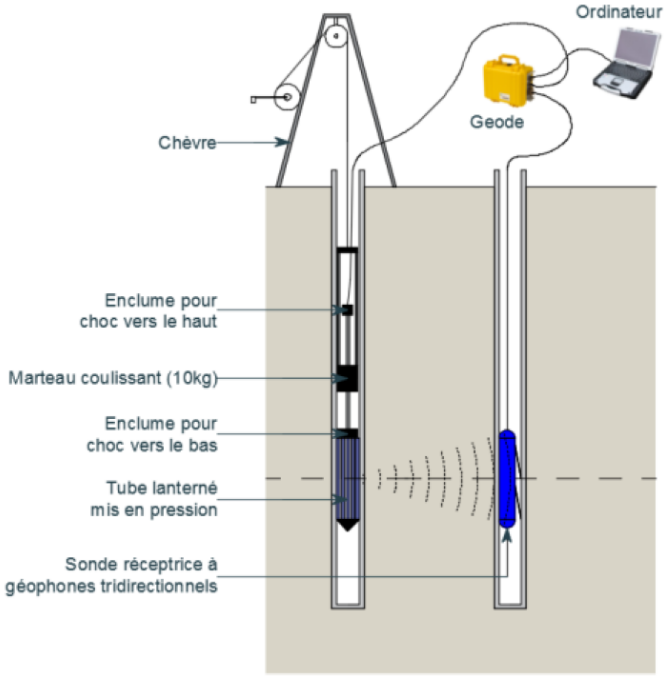
Essai cross-hole



LES PLÉNIÈRES 2025
Sciences et techniques du Génie Civil
JOURNÉES de GÉOTECHNIQUE du RST
en ligne, 5-6/11/2025

Mesures réalisées

Essai cross-hole



Mesures sous bruit mécanique ambiant (H/V)

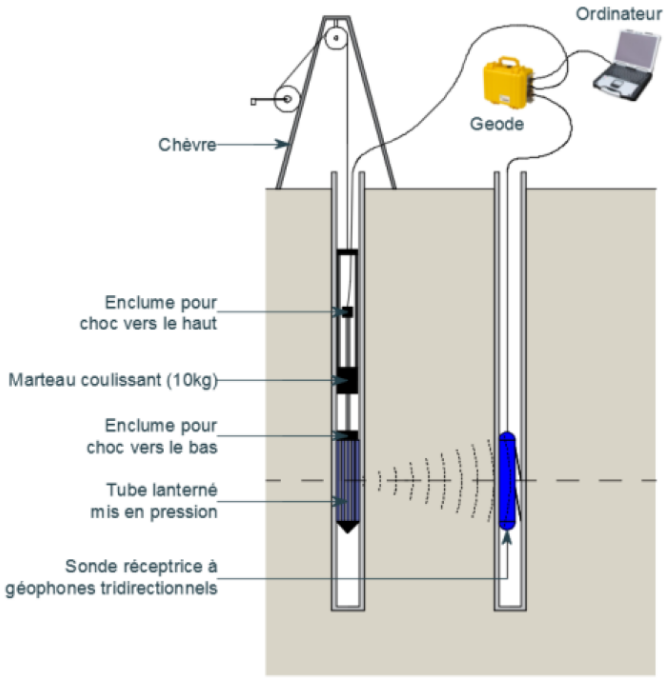
L'école de l'aménagement durable des territoires



LES PLÉNIÈRES 2025
Sciences et techniques du Génie Civil
JOURNÉES de GÉOTECHNIQUE du RST
en ligne, 5-6/11/2025

Mesures réalisées

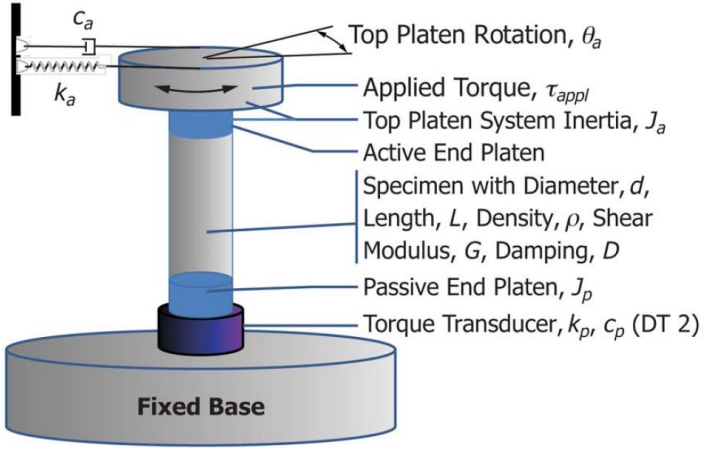
Essai cross-hole



Mesures sous bruit mécanique ambiant (H/V)



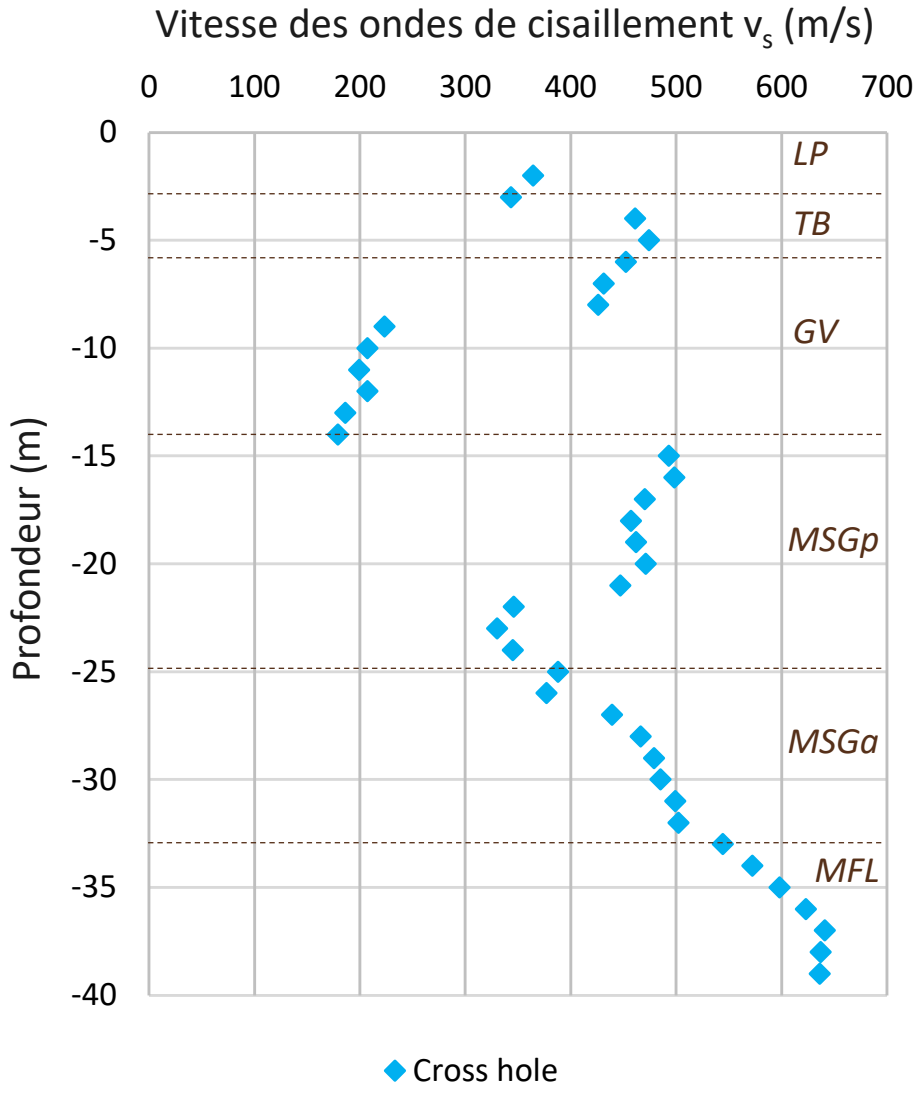
Mesures à la colonne résonnante



ASTM-D4015-15 (2017)

Résultat n°1 : intérêt des essais cross-hole

- Les essais cross-hole donnent des valeurs intéressantes de G_{max} $(= \rho . V_s^2)$ car :
  - Ils affectent un volume de terrain important
  - Ils donnent des valeurs à toutes les profondeurs



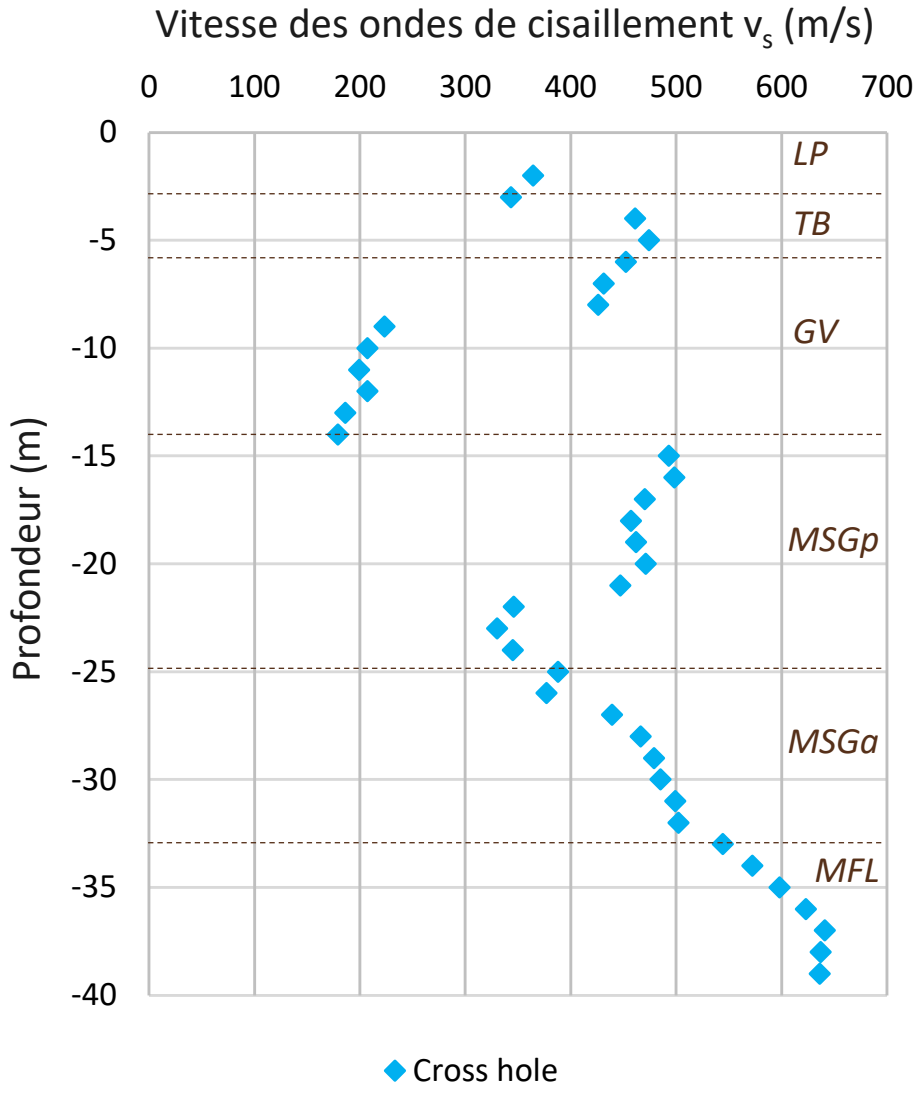
Résultat n°1 : intérêt des essais cross-hole

- Les essais cross-hole donnent des valeurs intéressantes de G_{max} $(= \rho . V_s^2)$ car :
  - Ils affectent un volume de terrain important
  - Ils donnent des valeurs à toutes les profondeurs

- Nota : un bon accord est obtenu avec la corrélation de Reiffsteck et al (2022) à partir des modules pressiométriques :

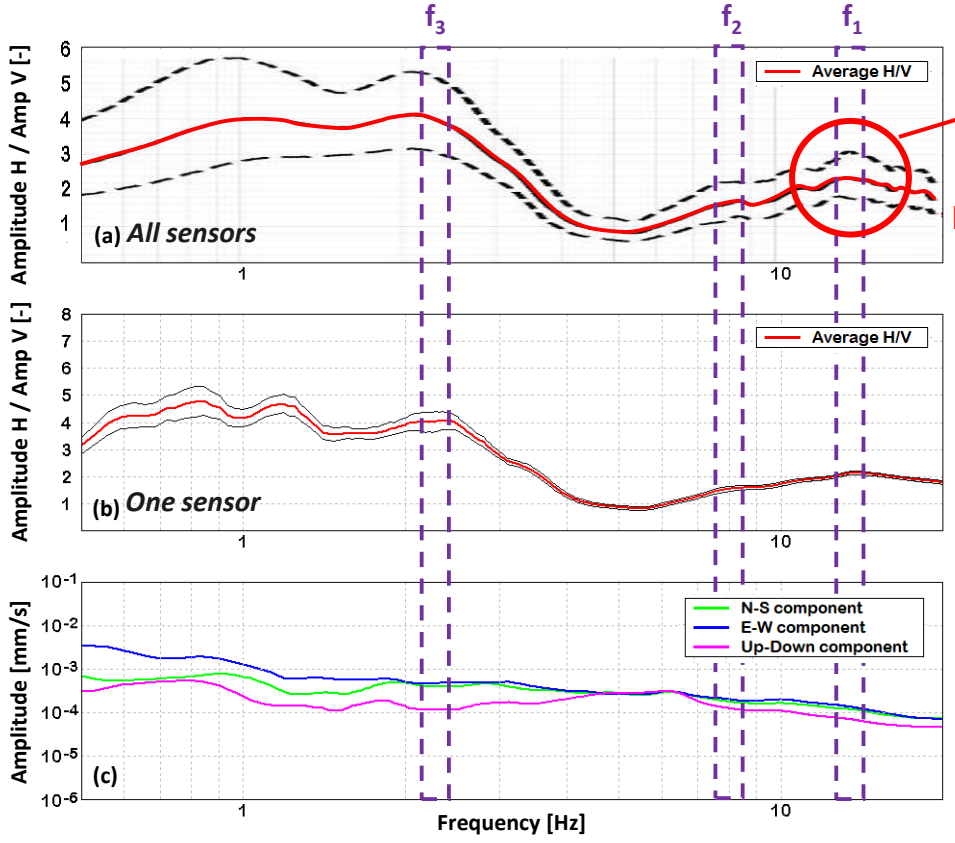
G_{max} (MPa)	LP	TB	GV	MSGp	MSGa	MFL
Essai cross-hole	248	425	78	352	404	1018
Formulation empirique de Reiffsteck et al (2022) à partir de E_M	96	340	93	452	474	867

Reiffsteck P., Jacquard C., Jandel E., Petitjean E., Benoit J. (2022). *Prediction of Shear Wave Velocity Vs from PMT*, ISSMGE, Sydney.



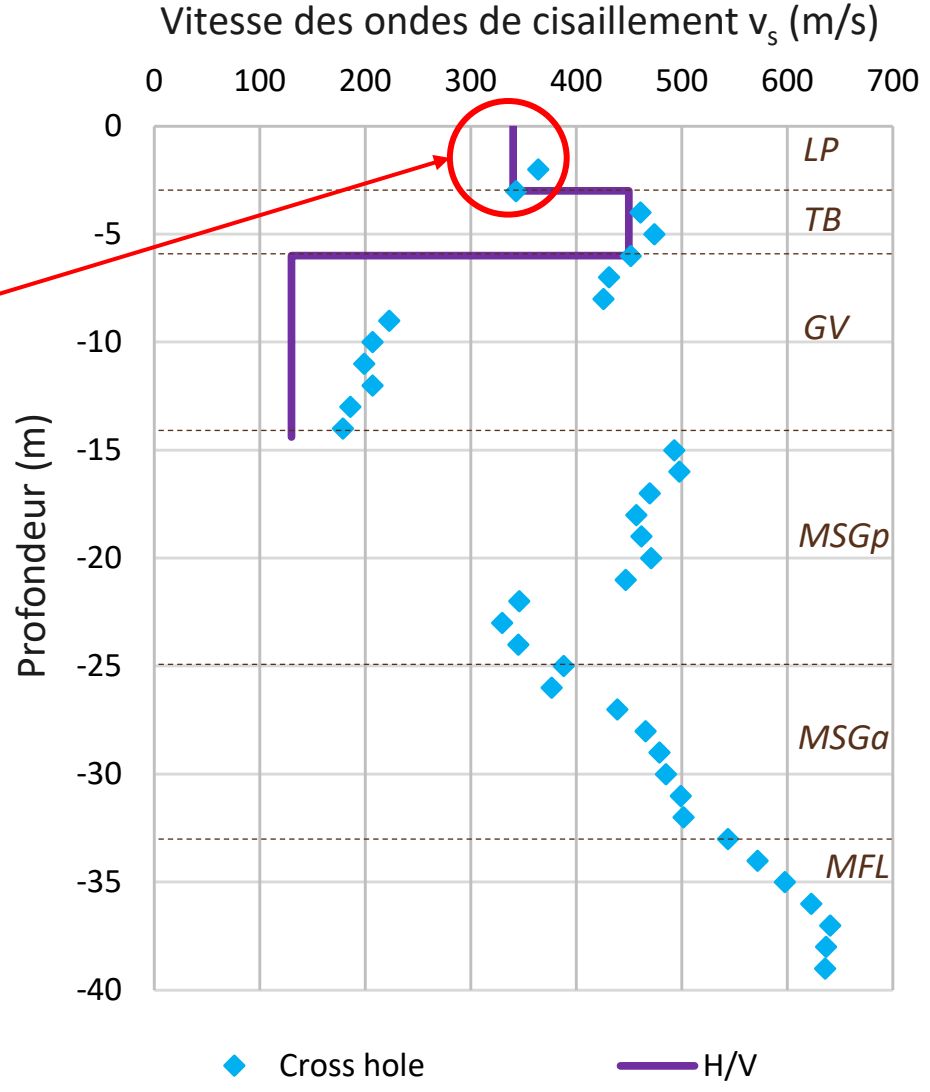
Résultat n°2 : capacités de l'analyse H/V

- L'analyse H/V sous bruit ambiant permet de retrouver des valeurs similaires de V_S à condition de connaître la stratigraphie pour contraindre le processus d'inversion



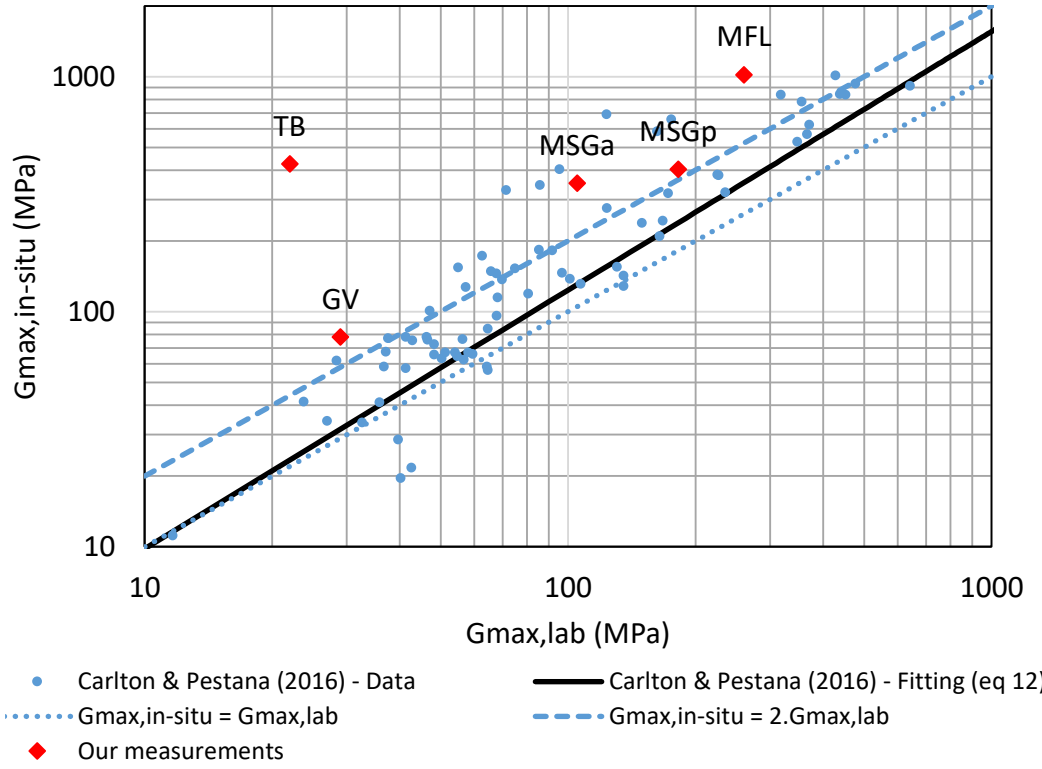
$V_{S1} = 4.H_1.f_1$

Maximum local

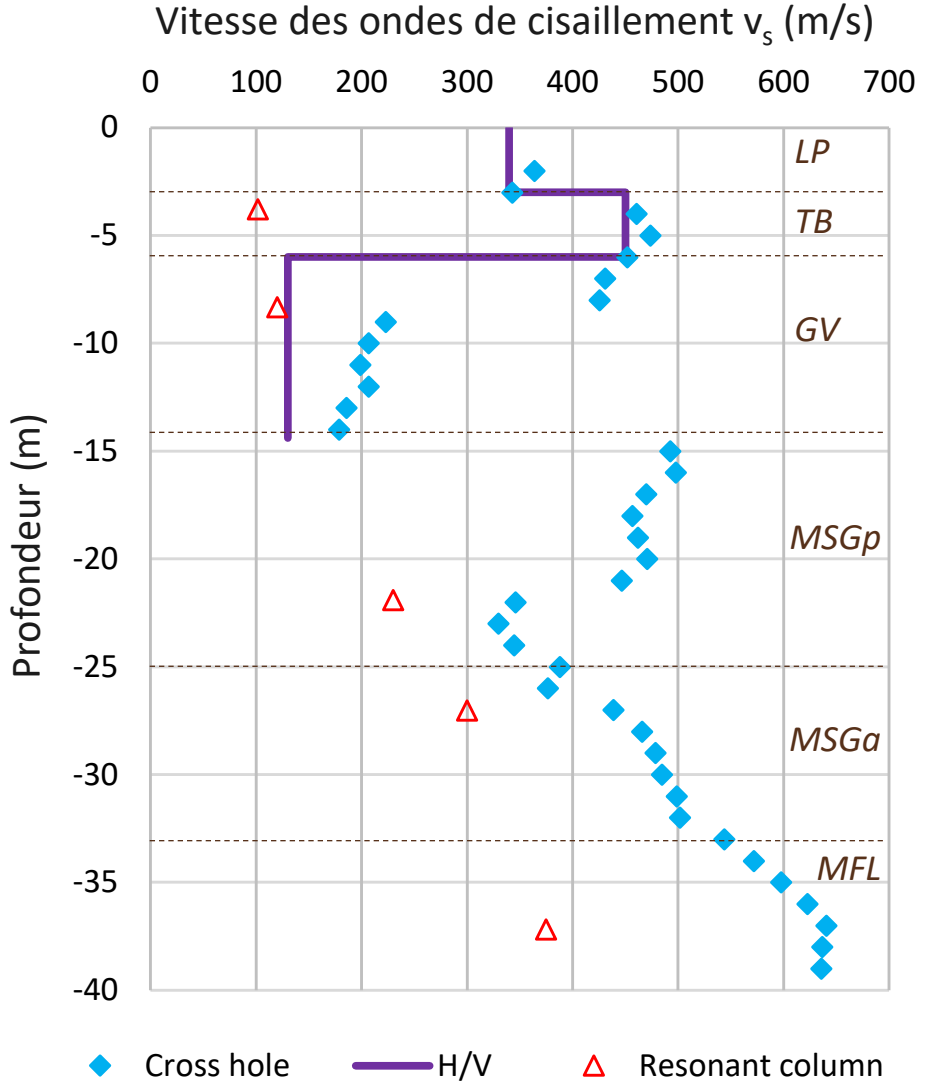


Résultat n°3 : des modules plus faibles en laboratoire

- Les essais à la colonne de résonnance conduisent à des modules G_{max} 2 à 4 fois plus faibles que ceux mesurés in-situ (cross-hole), ce qui confirme les observations de la littérature

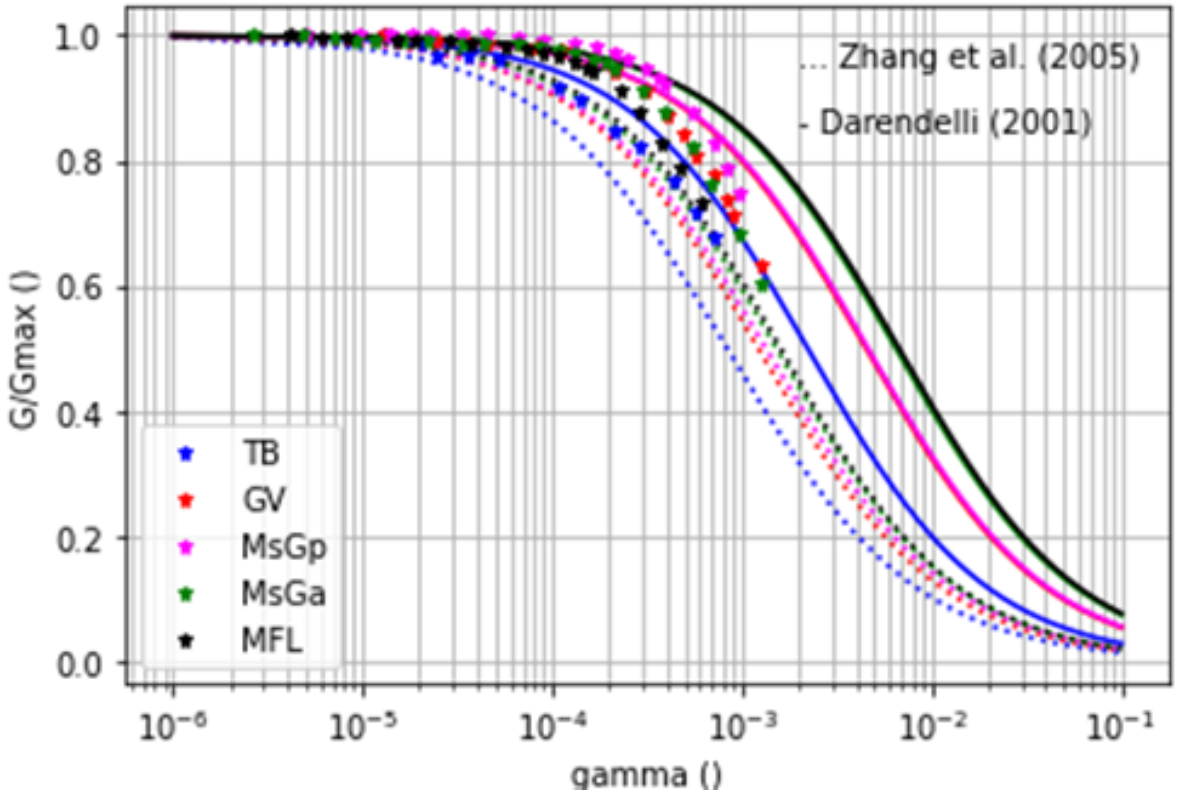


Carlton, B.D., Pestana, J.M. (2016). *A unified model for estimating the in-situ small strain shear modulus of clays, silts, sands and gravels,* Soil dyn. & Earth Eng, 88, 345-355.



Complément : évolution des modules avec la déformation

- Profil d'évolution de G/G_{max} avec la distorsion mesuré en laboratoire semble coherent avec les formulations proposes par Darendelli (2001) et Zhang *et al* (2005), mais il aurait été necessaire de poursuivre les essais jusqu'à des déformations supérieures à 10^{-3}



$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1+(\gamma/\gamma_r)^{\alpha}}$$

Darendeli, M. B. (2001). *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves.* Ph.D. thesis, Univ. of Texas.

Zhang, J., Andrus, R.D., Juang, C.H. (2005) *Normalized shear modulus and material damping ratio relationships*, J.G.G.E., 131, 453–464.

Conclusion et perspectives

- Une analyse croisée des différentes méthodes d'estimation de G_{max} illustrant :
  - l'intérêt des essais cross-hole
  - la complémentarité des autres approches (ondes sismiques, corrélation pressiomètre, essais à la colonne de résonnance) à condition d'avoir conscience des biais de mesures associés

- Une analyse similaire en cours dans les molasses toulousaines avec davantage d'essais de laboratoire :
  - Plus d'essais d'identification
  - Des essais de Bender
  - Peut être des triaxiaux cycliques

➡ **La volonté de mieux comprendre les phénomènes expliquant les écarts entre les différentes méthodes de mesure, afin de fiabiliser leurs mises en œuvre**

NOTA : nous sommes également preneurs de vos essais si vous disposez d'essais cross-hole et d'essais en laboratoire (colonne de résonnance ou Bender) au même endroit

Merci de votre attention

*Merci également à la **Société des Grands Projets**, **Arcadis**, **Vinci Construction** et **Me2i** qui ont permis l'acquisition des mesures, ainsi qu'à l'agence nationale de la recherche (**ANR**) pour son soutien financier via le projet E-PILOT (ANR-21-CE22-0011).*