

# Projet National



*nouvelles Approches de Reconnaissance des Sols et  
de Conception des Ouvrages géotechniques avec le Pressiomètre*

## Journée de restitution

# Recueil des présentations

26 septembre 2024

FNTP Paris

Site internet : [www.arscop.fr](http://www.arscop.fr)

Plateforme collaborative : [www.omnispace.fr/arscop](http://www.omnispace.fr/arscop)

Président : Roger FRANK

Directeurs Techniques : Sébastien BURLON et Philippe REIFFSTECK

Gestion administrative et financière : IREX ([www.irex.asso.fr](http://www.irex.asso.fr)), 9 rue de Berri 75008 PARIS, [contact@irex.asso.fr](mailto:contact@irex.asso.fr)



# Projet National ARSCOP

Nouvelles Approches de Reconnaissances des Sols et de conception des  
Ouvrages Géotechniques à partir du Pressiomètre

**Journée de restitution : le 26 septembre 2024**

## Recueil des présentations

	<b>Thème</b>	<b>Page</b>
<b>09h30</b>	<b>Introduction</b> Introduction de la journée, Bilan du Projet National (axes, thèses, lignes directrices, présentation de la journée) : Roger Frank ( <i>ENPC</i> ), Sebastien Burlon ( <i>terrasol</i> ), Philippe Reiffsteck ( <i>Université Gustave Eiffel</i> )	1
<b>10h00</b>	<b>Etat de la pratique essais croises</b> Etat de la pratique et résultats de la campagne d'essais croisés : Catherine Jacquard ( <i>Fondasol</i> ) Point de vue d'un bureau d'étude géotechnique #1 : Patrice Désourtheau ( <i>Ginger</i> ) Point de vue d'un bureau d'étude géotechnique #2 : Thomas Simonnot ( <i>Accotec</i> ) Réflexions sur l'interprétation de l'essai pressiométrique : Jacques Monnet ( <i>Gaiatech</i> )	17 27 33 37
<b>11h30</b>	<b>Développements matériels</b> Mesure des modules à petite déformation : Alexandre Lopes ( <i>terrasol</i> ) Développements sur l'automatisation de l'essai : Lionel Dare, Damien Bréchet ( <i>Apageo</i> ) Développements sur la mesure de pression interstitielle : Mickael Peronne ( <i>Lutz</i> ) Développements des protocoles d'essai et d'interprétation : Philippe Reiffsteck ( <i>Université Gustave Eiffel</i> )	45 59 69 77
<b>14h30</b>	<b>Normalisation et vision internationale</b> Normalisation en France et en Europe : Jean-Pierre Baud ( <i>Eurogé</i> ), Julien Habert ( <i>terrasol</i> ) Vision internationale : Marcos Arroyo ( <i>université de Barcelone</i> )	95 107
<b>15h30</b>	<b>Application aux ouvrages géotechniques</b> Interprétation de l'essai en conditions non saturées et non drainées : Jacques Monnet ( <i>Gaiatech</i> ), Luc Boutonnier ( <i>Egis</i> ) Recalage des modules de déformation en fonction de la déformation d'un soutènement en parois moulées : Grégory Meyer ( <i>Egis</i> ) Application au dimensionnement : Minh Tuan Hoang, Julien Habert ( <i>terrasol</i> ) Le pressiomètre dans les normes de dimensionnement : Gilles Valdeyron ( <i>cerema</i> )	109 117 127 143
<b>17h00</b>	<b>Conclusions</b> Perspectives : Wissem Frikha ( <i>setec</i> ) Clôture de la journée : Roger Frank ( <i>ENPC</i> )	159 165





# Journée de restitution

## Introduction – Présentation de la journée

*Roger Frank (Président)*

*Sébastien Burlon (Directeur Technique)*

*Philippe Reiffsteck (Directeur Technique)*

1. Le Projet National ARSCOP : quelques chiffres
2. Origine et motivations
3. Quelques résultats et enseignements
4. Présentation de la journée de restitution



47 PARTENAIRES



A. Hardouin, C. Duran et P. Gotteland

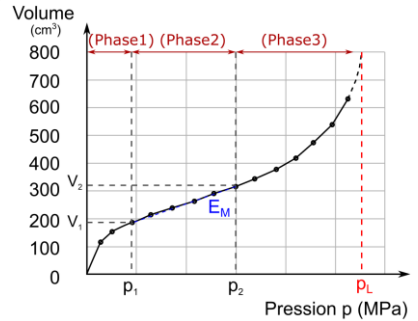
Bureau  
CST (les pilotes d'axes en particulier)

4 développeurs, 21 BE, 3 MOE, 3 MOA, 6 entreprises, 1 Bureau de Contrôle,  
1 Strat-up (big data), 4 Universités ou EP, 2 syndicats, Ministère TES, IREX

1. Durée du projet : près de 9 ans de 2015 à 2024 avec la période du COVID à gérer et un montage entre 2013 et 2015
2. Budget total : 1 770k€  
Apports en nature : 1 286 k€
3. 4 tranches :
  1. Tranche 1 : 514 k€
  2. Tranche 2 : 430 k€
  3. Tranche 3 : 423 k€
  4. Tranche 4 : 403 €

• un outil de reconnaissances des sols et des roches :

- une courbe pression-volume déduite d'un essai de chargement à petite échelle
- un état de contrainte,
- un module ( $E_M$ ),
- un paramètre de résistance ( $p_{IM}^*$ )



→ Conserver cette particularité de l'essai pressiométrique et améliorer les protocoles d'essais

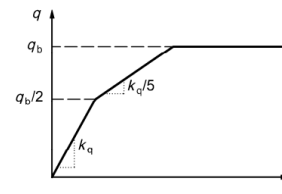
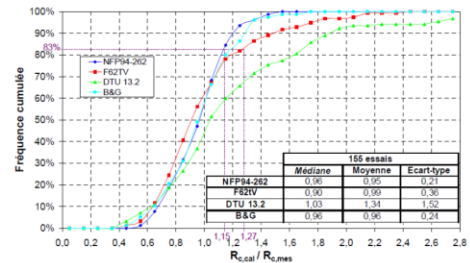
• un outil de dimensionnement des ouvrages géotechniques :

- des méthodes directes (portance, tassement) en constante évolution depuis les années 60 (Fond72, DTU, Fascicule 62 Titre V)
- des méthodes indirectes (méthode t-z, méthode p-y, méthode des éléments finis, etc.)

→ Garder la mémoire de ces méthodes de calcul et poursuivre leur évolution à la fois pour les méthodes directes et indirectes

$$s_c = \frac{\alpha}{9E_c} (q - \sigma_{v0}) \lambda_c B$$

$$s_d = \frac{2}{9E_d} (q - \sigma_{v0}) \beta_d \left( \lambda_d \frac{B}{B_0} \right)^\alpha$$



- Le pressiomètre :
  - **pérenniser le savoir-faire et le savoir autour de cet outil**  
→ Garder l'idée de départ d'un essai « intégrateur » et la développer
  - **poursuivre son évolution par rapport aux enjeux géotechniques actuels**  
→ optimiser les ouvrages géotechniques (empreinte carbone)
  - **Renforcer son positionnement à l'international** (notamment face à d'autres méthodes de reconnaissance in-situ)



1. **Axe 1 – Systèmes de mesure et de protocoles**  
(C.Jacquard et S.Varaksin)
2. **Axe 2 – Méthodes de calcul des ouvrages géotechniques**  
(A.Puech et D.Dias)
3. **Axe 3 – Valorisation et communication**  
(J.Habert et L.Carpinteiro)

- Réalisation d'un retour d'expérience auprès de la profession dans le cadre de la pratique quotidienne.

- Mesure de la pression interstitielle pour faciliter l'interprétation de l'essai dans les différentes natures de sol et cerner les facteurs d'influence.
- Mise en œuvre de techniques de forage et d'autoforage pour répondre au problème de création de la cavité cylindrique d'essai.
- Développement de matériel et protocoles d'essais adaptés au domaine des faibles déformations.
- Développement de l'appareillage cyclique pour permettre l'étude de la liquéfaction des sols.
- Développement de l'appareillage sismique pour optimiser la qualité du signal et la rapidité de la réalisation de la mesure.

- Caractérisation des sites expérimentaux.

- Etude du comportement des ouvrages dans le domaine des petites déformations.
- Obtention de lois de comportement permettant d'alimenter des calculs numériques.
- Prédiction du module de déformation du sol en fonction des différents cycles de chargement.

- Modélisation de l'aléa des propriétés des sols.

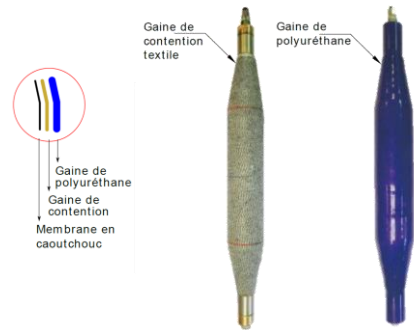
- Consolidation ou constitution de bases de données relatives aux fondations profondes, aux fondations superficielles et aux écrans.

Elargir la communauté des utilisateurs du pressiomètre par :

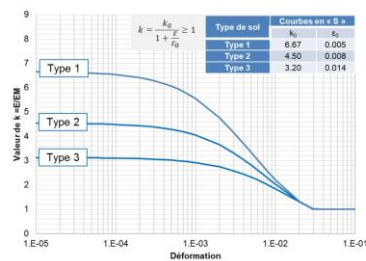
- la réalisation d'un ouvrage de synthèse,
- la présentation et la participation à des conférences,
- la réalisation de séminaires, de supports de formation pour la pratique quotidienne.

- Alexandre Lopes (2020) : Determination of soil shear modulus at low strain level using an innovative pressuremeter probe : Application to cyclic pile design, thèse UPE-ENPC
- Panagiotis Karagiannopoulos (2020) : Développement de capteurs de pression interstitielle pouvant être mis en place sur tout type de sonde dont la sonde nue Ménard, thèse UPE
- Rym Baccara (---) : Contribution à l'étude des pieux sous charge transversale
- Anas ABBASSI SABER (---) : Détermination de la dégradation des caractéristiques mécaniques des sols à court terme lors des séismes ou des ruptures d'ouvrage à l'aide de méthodes combinées géotechniques/Géophysiques», thèse CIFRE avec la société Géomatech - U. Paris Est/ENPC
- Soufiane AISSAOUI, (2021). Détermination de la dégradation des caractéristiques mécaniques des sols à court terme lors des séismes ou des ruptures d'ouvrages, thèse Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen

- Une synthèse des pratiques nationales
- Des campagnes d'essais croisés
- Des évolutions matérielles :
  - Sonde monochambre FC®
  - Capteur de déformation par inductance
  - Capteur de déformation par effet Hall
  - Intégration de capteurs sismiques
  - Mesure de pression interstitielle
  - Mesure  $K_0$
- Des expérimentations



- Quelques évolutions dans les méthodes de calcul :
  - Une meilleure analyse du terrain autour de la sonde
  - NF P94-261 : fusion Fascicule 62 Titre V/DTU13.12 + Base d'essais de chargement du LCPC – repris dans l'EN 1997
- NF P94-262 : nouvelle méthode de calcul avec la base d'essais de chargement du LCPC – repris dans l'EN 1997
- Nouvelle méthode de calcul de tassement des semelles
- Approche unifiée du tassement des semelles et des radiers
- Frottements axiaux pour les tirants et les micropieux



$(E_H = E_0)$

Type de sol	Type
Sables et graves Roche très fracturée	1
Sables, graves serrés Limons	2
Argiles, argiles surconsolidées Roche peu fracturée	3

(Projet National ARSCOP, 2018)

- Une certaine reconnaissance internationale :
  - P. Reiffsteck puis J. Habert : chair du groupe « essais d'expansion » au ISO\TC182
  - C. Jacquard : conférence plénière à ISC6 en 2021
  - A. Lopes : Prix Boussinesq en 2021 et Bright Spark Lecture à ISC7 en 2024 et
  - Sessions dédiées au pressiomètres aux conférences ISC6 et ISC7
- Des publications lors de conférences : ISC6, ISC7, JNGG 2020, JNGG2022, etc.
- Revues internationales (ASTM, Canadian Geotechnical Journal, EJECE, etc.)
- Des recommandations en cours de finalisation...
- Une revue des pratiques à analyser.



#### Bright Spark Lecture

**Innovative procedures to derive ground moduli from pressuremeter tests**

#### Dr. Alexandre Lopes

Dr. Lopes is a senior geotechnical engineer at Terrasol (Detec group), France. He obtained his PhD degree in 2020, having as main research goal the improvement of deep foundation design methods based on pressuremeter tests. Focus was on the assessment of ground moduli. His work was later honored with the prestigious "Boussinesq Award" given by the French Society on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (CFMS).

Dr. Lopes holds a joint degree in Civil Engineering between Brazil (Universidade Federal de Minas Gerais) and France (École des Ponts-ParisTech), where he also obtained his Master's degree in 2013. He started his career as a geotechnical engineer in a consulting company in Brazil, where he worked for three years before starting his PhD in France.

He is an active member of the CFMS, having chaired its Young Member's chapter from 2021 to 2023, and now as a member of its Scientific Board. He is part of the team responsible for drafting the ARSCOP recommendations aimed at enhancing the practice of pressuremeter tests.



- Chapitre 1 : Introduction
- Chapitre 2 : Procédures courantes d'essais et d'interprétations
- Chapitre 3 : Procédures d'essais et d'interprétations avancées
- Chapitre 4 : Applications aux ouvrages géotechniques
- Chapitre 5 : Commande d'essais pressiométriques



**09h00 : Accueil des participants****09h30 : Ouverture de la journée**

- Roger Frank (*ENPC*) : introduction
- Sebastien Burlon (*terrasol*) et Philippe Reiffsteck : bilan du Projet National (axes, thèses, lignes directrices, présentation de la journée)

**10h00 : Synthèse de l'axe 1 : Etat de la pratique essais croisés**

- Catherine Jacquard (*Fondasol*) : état de la pratique et résultats de la campagne d'essais croisés
- Patrice Désourtheau (*Ginger*) : point de vue d'un bureau d'étude géotechnique #1
- Thomas Simonnot (*Accotec*) : point de vue d'un bureau d'étude géotechnique #2
- Jacques Monnet (*Gaitech*) : réflexions sur l'interprétation de l'essai pressiométrique

**Pause 20'****11h30 : Synthèse de l'axe 2 : Développements matériels**

- Alexandre Lopes (*terrasol*) : mesure des modules à petite déformation
- Lionel Dare, Damien Bréchet (*Apageo*) : développements sur l'automatisation de l'essai
- Mickael Peronne (*Lutz*) : développements sur la mesure de pression interstitielle
- Philippe Reiffsteck (*Université Gustave Eiffel*) : développements des protocoles d'essai et d'interprétation

**13h00 : Déjeuner à la FNTF****14h30 : Normalisation et vision internationale**

- Jean-Pierre Baud, Julien Habert (*Eurogé, terrasol*) : normalisation en France et en Europe
- Marcos Arroyo (*université de Barcelone*) : vision internationale

**15h30 : Synthèse de l'axe 2 : application aux ouvrages géotechniques**

- Jacques Monnet (*Gaitech*), Luc Boutonnier (*Egis*) : Interprétation de l'essai en conditions non saturées et non drainées
- Grégory Meyer (*Egis*) : Recalage des modules de déformation en fonction de la déformation d'un soutènement en parois moulées
- Minh Tuan Hoang, Julien Habert (*terrasol*) : Application au dimensionnement
- Gilles Valdeyron (*cerema*) : Le pressiomètre dans les normes de dimensionnement

**17h00 : Conclusions et perspectives**

- Wissem Frikha (*Setec*) : perspectives
- Roger Frank (*ENPC*) : clôture de la journée

**Michel Gambin  
(1930-2024)**



**François Schlosser  
(1938-2024)**



**Michel Bustamante  
(1939-2024)**



**Bonne journée de restitution**

**Merci pour votre participation  
et votre temps consacré au pressiomètre**

- Aissaoui S., Zadjouli A., Reiffsteck P. (2018). Cyclic Tests with a New Pressuremeter Apparatus, China-Europe Conference on Geotechnical Engineering, I.-W. Wu and H.-S. Yu Eds., SSGG, pp. 1–5, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-97112-4\\_148](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97112-4_148)
- Aissaoui S., Zadjouli A., Reiffsteck P. 2020, A New Protocol for Measuring Small Strains with a Pressuremeter Probe: Development, Design, and Initial Testing Measurement, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108507>
- Aissaoui S., Zadjouli A. Reiffsteck P. (2020) Contribution of modification of a pressuremeter for an effective prediction of soil deformability Geomechanics and Engineering, Vol.23, No.4000-000DOI: <https://doi.org/10.12989/gae.2020.23.4.000>
- Burlon, S., Cuiru, F., Frank, R., Habert, J., Jacquard, C., Puech, A., Reiffsteck, P., Varaksin, S. Préparation des recommandations du Projet National ARSCOP (2022) JNGG 2022, Lyon.
- Burlon, S. Reiffsteck, P., Frank, R. (2020) Le Projet National ARSCOP, Revue Travaux, n°965 – décembre 2020.
- Cour, F., Lopes dos Santos, 2021. An innovative pressuremeter probe, in: ISC'6. Budapest. Cour, F., Lopes dos Santos, A., 2018a. Paramètres de forage pour un positionnement judicieux de la sonde pressiométrique, in: JNGG2018. Champs-sur-Marne.
- Cour, F., Lopes dos Santos, A., 2018b. Sonde monocellulaire innovante pour la réalisation d'essais d'expansion de cavité cylindrique, in: JNGG2018. Champs-sur-Marne. Frank, R., Zhao, S.R., 1982. Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins. BLPC 17–24.
- Dang Q.H., Karagiannopoulos P.G., Reiffsteck P., Fanelli S., Benoit J., Desanneaux G. (2019), Application of cyclic pressuremeter tests to evaluate soil liquefaction, Proc. XVII ECSMGE, Reykjavik, ISBN 978-9935-9436-1-3

- Karagiannopoulos P.G., Peronne M., Reiffsteck P., Szymkiewicz F., (2019), Measure of the pore water pressure during expansion tests - physical and numerical approach, Proc. XVII ECSMGE, Reykjavik, ISBN 978-9935-9436-1-3.
- Karagiannopoulos, P.G., 2020. Apport de la mesure de la pression interstitielle à l'essai pressiométrique : Chargements cycliques et monotones (Thèse de doctorat). Paris Est.
- Karagiannopoulos P.G., Peronne M., Reiffsteck P., (2020) Measure of the water pressure during the pressuremeter test in a calibration chamber-physical and numerical approach, 6th Int. Conf Geotechnical and Geophysical Site Charac., Budapest Hongrie, 8 pages
- Reiffsteck P., Saussaye L., Habert J., (2020) Borehole quality influence on expansion test results, 6th Int. Conf Geotechnical and Geophysical Site Charac., Budapest Hongrie, 8 pages
- Karagiannopoulos P.G. Peronne M., Dang Q.H., Reiffsteck P., Benoît J., (2020) Cyclic pressuremeter tests with pore pressure measurements, application to CSR evaluation, 6th Int. Conf Geotechnical and Geophysical Site Charac., Budapest Hongrie, 8 pages
- Karagiannopoulos, P.G., Reiffsteck, P., Peronne, M., (2021). Pore water pressure measurements during PMT in calibration chamber, in: ISC'6. Budapest. Lopes dos Santos, A., 2020. Détermination of soil shear modulus at low strain level using an innovative pressuremeter probe. Application to cyclic pile design.
- Karagiannopoulos P.-G., Dang Q.-H., Reiffsteck P., Benoît J., Dupla J.-C., M. Peronne (2022) Multicycle expansion tests in natural soils European Journal of Environmental and Civil Engineering, DOI: 10.1080/19648189.2022.2030805.

- Karagiannopoulos P.G. & Peronne M. Reiffsteck (2022) Measurement of the pore pressure around the pressuremeter probe in a calibration chamber. Numerical, analytical and physical approaches Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney 2021
- Karagiannopoulos P.G., Reiffsteck P., Peronne M. (2022) Monotonous and cyclic pressuremeter tests with pore pressure measurements – application to csr evaluation.. Numerical, analytical and physical approaches Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney 2021.
- Jacquard, C., Rispal, M., 2020. Essais pressiométriques Ménard – réflexion sur les matériels et protocoles, in: JNGG2020.
- Habert J., Lopes A. 2024. A practical method to derive shear modulus from pressuremeter tests in clay. Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization. Barcelona, June 2024.
- Habert J., Reiffsteck P., Baud J.P., (2020) Total horizontal at rest pressure measurement with the pressuremeter test, 6th Int. Conf Geotechnical and Geophysical Site Charac., Budapest Hongrie, 8 pages.
- Habert, J., Burlon, S., 2021. Taking into account inhomogeneous distortion around the pressuremeter probe to determine shear modulus, in: ISC'6. Budapest.
- Habert, J., Guimond, A., Cuira, F., 2021. Pressuremeter based methods to predict the behaviour of grouted micropiles and anchors, in: ISC'6. Budapest.

- Habert, J., Reiffsteck, P., Baud, J.-P., Rispal, M., Jacquard, C., 2020. Essai pressiométrique et résistance hydraulique des tubulures, in: JNGG2020. Hoang, M.-T., Cuira, F., Dias, D., Miraillet, P., 2018. Estimation du rapport E/EM : application aux radiers de grandes dimensions, in: JNGG2018. Champs-sur-Marne.
- Hoang, M.-T., El Khotry, N., Burlon, S., Cuira, F., 2021. Settlement of shallow foundations using pressuremeter tests, in: ISC'6. Budapest.
- Hoang, M.-T., Cuira, F., Dias, D., Miraillet, P., 2018. Estimation du rapport E/EM : application aux radiers de grandes dimensions, in: JNGG2018. Champs-sur-Marne.
- Hoang, M.-T., El Khotry, N., Burlon, S., Cuira, F., 2021. Settlement of shallow foundations using pressuremeter tests, in: ISC'6. Budapest.
- Lopes A., Habert J. 2024. Détermination pratique des modules de cisaillement non linéaire à partir d'essais pressiométriques avec boucles dans les sols fins. In: 12èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Poitiers, 2024
- Habert J., Lopes A. 2022. Elasticité non-linéaire appliquée à l'essai pressiométrique. In: 11èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Lyon, 2022.
- Lopes A., Habert, J., Cuira F. 2022. Interprétation de l'essai pressiométrique pour l'estimation directe des déplacements des ouvrages. In: 11èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Lyon, 2022.
- Lopes A., Puech A., Dupla J.C., Canou J. 2022. Determination of non-linear elasticity parameters from innovative pressuremeter tests. Strain transformed approach for hyperbolic undrained behaviour. In : Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney. 2022.

- Lopes A. 2022. A contribution to the improvement of ground investigation using the pressuremeter. Proceedings of the 7th International Young Geotechnical Engineers Conference (IYGEC). Australian Geomechanics Society, Sydney, Australia. ISBN 978-0-9946261-5-8.
- Lopes, A. 2022. Prix Boussinesq 2021 : Détermination du module de cisaillement des sols sous faibles déformations à partir d'une sonde pressiométrique innovante. Rev. Fr. Geotech., 172 (2022) 5. DOI: 10.1051/geotech/2022013.
- Lopes, A., Dupla, J. C., Canou, J., Puech, A., Cour, F. 2021. Evaluation of small-strain shear modulus of Fontainebleau sand based on innovative pressuremeter probe testing in a calibration chamber. Canadian Geotechnical Journal. DOI: 10.1139/cgj-2021-0130
- Lopes A., Dupla J.C., Canou J., Cour F., Puech A., Droniuc N. 2020. Laboratory validation of the measuring capabilities of an innovative pressuremeter probe in dry sand. ASTM. Geotechnical Testing Journal. DOI : 10.1520/GTJ20190209
- Lopes A., Puech A., Dupla J.C., Canou J. 2020. Essais pressiométriques et dimensionnement cyclique des pieux : premiers résultats et perspectives. Dixièmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. JNGG. France. 2020.
- Cour F., Lopes A. 2020. An innovative MonoCell pressuremeter probe to meet the recent needs of geotechnical engineering. 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, 2020.
- Lopes A., Droniuc N., Puech A., Cour F. 2020. Assessment of shear stiffness at small strain rate using an innovative monocell pressuremeter probe. 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, 2020.

- Lopes A., Dupla J.C., Canou J., Droniuc N. 2019. Laboratory validation of an innovative mono-cell pressuremeter probe: test procedures and first results. European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 8 pages.
- Lopes A., Puech A., Droniuc N., Cour F. 2019. In-situ validation of an innovative mono-cell pressuremeter probe: first results. European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 8 pages.
- Lopes A. 2018. Cyclic pressuremeter tests – Shear modulus determination at low strain rate. Conférence européenne des jeunes ingénieurs géotechniciens, EYGEC (Graz, Autriche, septembre 2018).
- Lopes A., Puech A., Droniuc N., Geisler J., Cour F. 2018. Mesures de G à faibles déformations à partir d'une sonde pressiométrique monocellulaire. Neuvièmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. JNGG. Champs sur Marne, France. 13 - 15 juin, 2018.
- Lopes dos Santos, A., Cour, F., Puech, A., Dupla, J.-C., Canou, J., 2021. Assessment of shear stiffness at small strain level using an innovative monocell pressuremeter probe, in: ISC'6. Budapest.
- Lopes dos Santos, A., Dupla, J.-C., Canou, J., Puech, A., Droniuc, N., Cour, F., 2020. Laboratory Evaluation of the Measuring Capabilities of an Innovative Pressuremeter Probe in Dry Sand. <https://doi.org/10.1520/GTJ20190209> Geotechnical Testing Journal 44.
- Lopes dos Santos, A., Puech, A., Droniuc, N., Geisler, J., Cour, F., 2018. Mesures de G à faibles déformations à partir d'une sonde pressiométrique monocellulaire, in: JNGG2018. Champs-sur-Marne.

- Monnet, J., Boutonnier, L., Mahmutovic, D., 2020. Interprétation élastique de l'essai pressiométrique dans les argiles en condition non drainée et non saturée, in: JNGG2020.
- Monnet, J., 2021. Expected precision of the pressuremeter test, in: ISC'6. Budapest.
- Reiffsteck, P., Benoit, J., Habert, J., Karagiannopoulos, P., Desanneaux, G., Fanelli, S., 2018. Procédure pour la détermination du coefficient des terres au repos K0 par les essais en place, in: JNGG2018. Champs-sur-Marne.
- Reiffsteck, P., Saussaye, L., Habert, J., 2021. Borehole quality influence on expansion test results, in: ISC'6. Presented at the ISC'6, Budapest.
- Reiffsteck Ph., Benoit J., Dang Q.-H., Karagiannopoulos P.-G., (2022) Simplified method for evaluation of liquefaction based on expansion tests, Revue Française de Géotechnique (accepté, en cours de publication) <https://doi.org/10.1051/geotech/2022014>
- Toubassy, L., Darras, V., Cuiru, F., Habert, J., 2018. Etude du comportement en déplacement de micropieux en traction, in: JNGG2018. Champs-sur-Marne.





## État de la pratique et résultat des essais croisés

Catherine Jacquard

- ▶ **Enquête relative à la pratique quotidienne des essais pressiométriques** (Fondasol, Apageo) **1 livrable**
- ▶ **Campagnes d'essais croisés**
  - 5 sites : calcaires (Gouvieux), molasse (Toulouse), sables (Messanges), limons (Plancoët), argiles molles (Cran) **7 livrables**
- ▶ **Essais et matériels spécifiques**
  - Essais pressiométriques cycliques avec mesure de la pression interstitielle à Newington, Plancoët, Saint-Benoit des Ondes et Saint Malo (UGE, Jean Lutz, Cerema) **1 livrable**
  - Validation de la sonde Monochambre FC® comme outil pressiométrique et dilatométrique (Fugro, Calyf) **1 livrable**
  - Mesure très haute définition de la déformation radiale d'une sonde mono-chambre par inductance (Calyf)- étude de faisabilité **1 livrable**
  - Dégradation du module de cisaillement des sols à l'aide de mesures combinées géotechniques/géophysiques (Geomatech, Apageo, UGE, ENSTA) -étude de faisabilité **1 livrable**
- ▶ **Réflexions sur la précision des mesures**
  - Calcul de la précision des résultats pressiométriques : modules, pression limite et module cyclique en fonction de la précision des mesures de pression et de volume (Gaiatech)
- ▶ **Rapport de synthèse** (Fondasol, Apageo) **1 livrable**

### ► Enquête pratique quotidienne (2018)

- 27 réponses dont
  - 2 international
  - 85% secteur privé
  - 15% organismes publics.
  - La moitié des organismes qui ont répondu est partenaire d'ARSCOP
- Types de sonde utilisées:
  - Sonde tri-cellulaire 60 mm (BX) 58mm
  - Sonde tri-cellulaire 44 mm avec tube fendu court
- Types de tubulures:
  - Coaxiale haute pression
  - Jumelée haute pression
- Fluide: eau pure / eau avec anti-gel
- Gaines:
  - Majorité caoutchouc 3mm (argiles, limons),
  - Gaine toilée dans tous types de sols,
  - Gaine toilée haute pression dans sables et roches

Auteur(s) / Organisme(s) :  
C. Jacquard – Fondasol  
S. Varaksin - Apagéo

- CPV:
  - 15 CPV Ménard manuel
  - 10 CPV à acquisition automatique
  - 4 pressiomètres Ménard auto-contrôlés

Tableau 3 — Types de contrôleurs pression-volume

Type de contrôleur pression-volume	Type de régulation d'essai	Type de relevé et d'enregistrement
A	manuel	manuel
B	manuel	automatique
C	automatique	automatique

- Fluides forage: eau et bentonite
- Plages de pression conformes à NF EN ISO 22 476-4 sauf un utilisateur:  $p_{max} = 3 \text{ MPa}$
- Essais haute pression: critère d'arrêt variable 6 à 20 MPa
- Critère d'arrêt volume: inférieur à celui préconisé par la norme
- Description par les sondeurs: 81%
- Récupération des échantillons: 18%
- Enregistrement des paramètres de forage: 50%

- Outils de forage
  - CFA (tarière hélicoïdale continue): tous types de terrain sauf roche dure
  - OHD (outil désagrégateur rotation): tous types de terrain
  - DST (tube fendu battu): sables lâches sous nappe, mais aussi vases et argiles molles

Introduction de la sonde		Sans refoulement du sol								Avec refoulement du sol			
Types de sols et de roches selon les normes ISO 14688 (toutes les parties) et ISO 14699		Technique de forage											
		1 <math>d_s/d_c \le 1,1</math> ( $V_a < 90 \text{ m/h}$ ; $F_f < 500 \text{ kPa}$ ; $Q_i < 15 \text{ l/min}$ ; $V_r < 60 \text{ tours par minute}$ ) <sup>a</sup>										$d_s/d_c \le 1$	
		Forage par rotation				Rotoperçussion			Tube foncé			Sonde foncée	
		OHD	HA/HAM	CFA	RCD	RP	RPM	STDTM	OS-T/W/P	OS-TK/W/H	VDT	PP	DST
Sols fins	Argile très molle à molle	**	***	0	0			*	***	*		*	0
	Argiles molles à fermes	***	***	0	0		*	**	**	*	*		
	Argiles raides	***	*	0	0	*	**	**	*	*	*		
Limons:	- au-dessus de la nappe phréatique	***	***	0	0		*	**	**	*	*		0
	- sous la nappe phréatique	***	**	0	0		*	**	*	*	*	*	0
Sols grossiers	Sables lâches:												
	- au-dessus de la nappe phréatique	***	***	0	0		**	**	*	*	*		0
	- sous la nappe phréatique	***	**	0	0		**	**	*	*	*	*	0
	Sables moyennement compacts et compacts	***	**	0	0	*	***	***	*	*	*		**
Grave		**	*	0	0	*	***	***	*	*	*		***
	Sols très grossiers	**	*	0	0	**	***	**	*	*	*		**
Sols intermédiaires	Sols grossiers cohérents (par exemple, argile avec blocs)	**	*	0	0	*	***	**	*	*	*		*
	Sols lâches non homogènes, sols atypiques (par exemple, moraines non consolidées, certains dépôts alluvionnaires, sols artificiels, remblais traités ou non)	**	*	0	0	*	**	**	*	*	*	*	**
Sols durs	Grave	***	*	0	0	**	**	**	*	*	*		**
	Roches tendres	***	*	0	0	***	**	**	*	*	*		**
Roche	Roches moyennement dures et dures	**	*	0	0	***	***	*	*	*	*		**

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

37

37

- Longueurs de passe : en majorité 3 m, mais aussi 5 m dans le rocher, la roche altérée, voire les argiles très fermes et les graviers

Type de sol	Longueur maximale d'une passe de forage ou de fonçage continue (m)
Vase et argiles molles	1 <sup>a</sup>
Argiles moyennement compactes	3
Argiles raides	5
Limons:	
- au-dessus de la nappe phréatique	4
- sous la nappe phréatique	2
Sables lâches:	
- au-dessus de la nappe phréatique	3
- sous la nappe phréatique	1 <sup>a</sup>
Sables moyennement compacts et compacts	5
Sols grossiers: grave, cailloux	5
Sols grossiers cohérents	5
Sols lâches non homogènes, sols atypiques (comme par exemple moraines non consolidées, etc.)	3 à 5
Roches altérées, roches tendres	5
Roches moyennement dures et dures	5

<sup>a</sup> Ou l'intervalle requis entre deux essais successifs.

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

38

38

- Norme de référence:
  - 35% se réfèrent à NF EN ISO 22 476-4 (2015)
  - 35% se réfèrent à NF P 94-110-1
  - 30% se réfèrent à NF P 94-110 (obsolète depuis 2000!)
- Mode opératoire de l'essai
  - Selon procédure B (enregistrement): 50%
  - S'ils sont demandés à la consultation: 37,5%
    - Impression systématique des tickets: 21%
    - Impression des tickets si demandés à la consultation: 29%
- Haute pression : 8 MPa en majorité
- Nombre de paliers
  - 8 paliers demandés: 54.5%
  - 10 paliers demandés : 23%
  - Moins de 7 paliers: 7%

- Dilatation propre de l'appareillage (« calibrage »)
  - À chaque éclatement: 61%
  - À chaque modification de tubulure: 43%
  - À chaque chantier: 30%
  - Une fois par an: 9%

$$a < 6 \text{ cm}^3/\text{MPa}$$

- Résistance propre (« inertie »)
  - Étalonnage à chaque chantier: 42%
  - À chaque éclatement: 67%!

$$0,05 \text{ MPa} < p_{ei} < 0,3 \text{ MPa}$$

Les contrôles décrits en B.4.3 et B.4.4 doivent être effectués dans les cas suivants:

- à chaque modification de la configuration de la sonde pressiométrique;
- à chaque changement de tubulure entre la sonde et le contrôleur pression-volume;
- à des intervalles appropriés en relation avec la fréquence d'utilisation de la sonde, par exemple une fois par semaine pour un fonctionnement en continu.

Ces contrôles doivent être effectués lorsque la sonde est prête à être insérée dans la cavité pressiométrique, c'est-à-dire lorsqu'elle a été équipée d'une tubulure convenable et que les bulles de gaz ont été purgées de la cellule centrale et du circuit d'injection du liquide.

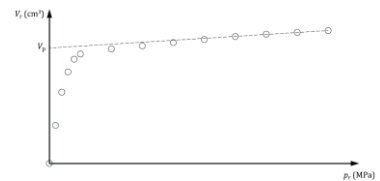


Figure B.2 — Étalonnage de la dilatation propre — Exemple

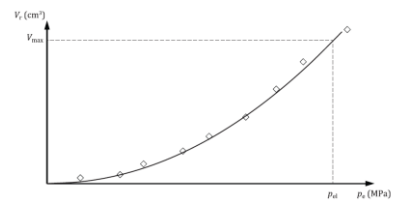


Figure B.4 — Exemple d'une courbe de résistance propre d'une sonde pressiométrique

- Critères d'arrêt:
  - Le critère volume est majoritairement cité: est très rarement respecté en pratique
  - Pression max: 5 MPa
  - Pression de fluage: 17.6% seulement évoquent 2 ou 3 points après fluage
  - Aucune réponse n'indique le doublement du volume de la sonde comme critère d'arrêt

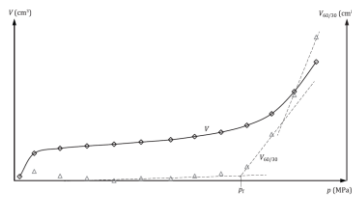


Figure D.4 — Détermination de la pression de fluage pressiométrique

- la pression  $p_f$  atteint au minimum la pression limite pressiométrique ou une pression au moins égale à 5 MPa (ou jusqu'à 8 MPa si spécifiées);
- le volume de liquide injecté dans la cellule de mesure dépasse la valeur indiquée en 4.2;
- au moins trois paliers de pression au-delà de  $p_f$  sont obtenus;
- la sonde éclate.

NOTE Pour une sonde tricellulaire de 60 mm, le volume de la sonde  $V_c$  donné en 4.2 correspond approximativement à un volume de 600 cm<sup>3</sup>.

La sonde pressiométrique doit être capable d'une expansion volumétrique permettant d'évaluer la pression limite pressiométrique Ménard, dans la limite de ses capacités en termes de pression.

NOTE 3 Pour les sondes de 60 mm et les sondes à tube fendu de 60 mm, la somme  $200 + V_c$  peut être utilisée, où 200 et  $V_c$  sont en cm<sup>3</sup>.

### ► Interprétation : 57%

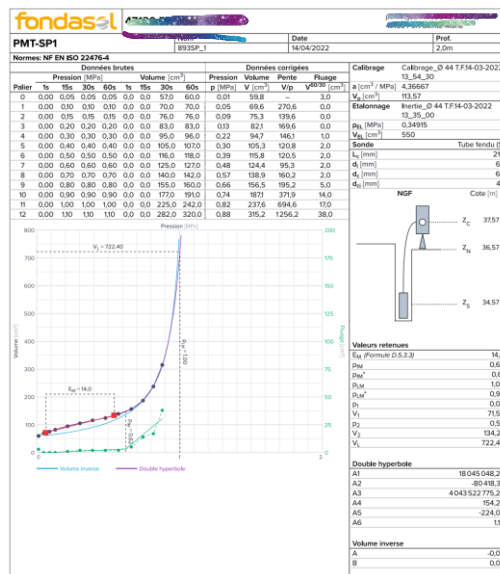
- Respect des critères de la norme N -1
- Critère visuel  $p_1/p_2$  pour la plage élastique
- Rapport  $E_M/P_{LM}$
- $p_2 < p_f$  indiqué par 43%
- 2 se préoccupent de la cohérence de l'essai avec le contexte lithologique

► Document transmis au client

- Log pressiométrique :
  - 91% : Description de la lithologie, niveau(x) d'eau,  $p_{LM}^*$ ,  $E_M$
  - 70%:  $p_f^*$ ,  $E_M/P_{LM}^*$
  - 9%: ne fournit pas de log pressio
  
- Courbes pression-volume fournies dans 28% des cas, 62% quand elles sont demandées à la consultation
  - Rappel P 22 476-4 (2015)
    - Le rapport de terrain doit contenir l'ensemble des données collectées sur le terrain (voir 5.4 et 6.1).
    - Le rapport de terrain doit permettre d'identifier l'opérateur responsable (6.1.1 et 6.1.2).
    - Un exemple de rapport de terrain pour un essai pressiométrique unique est disponible à l'Annexe F.

► Données minimale requises (ISO 22 476-4 2015)

- a) la référence au présent document (ISO 22476-4:2021);
- b) le type de contrôleur pression-volume utilisé pour l'essai: A, B ou C;
- c) le numéro de sondage dans lequel l'essai pressiométrique a été réalisé;
- d) la cote altimétrique de l'essai ou sa profondeur depuis le sommet du sondage ou le haut du tube;
- e) le type de technique et d'outil de forage utilisé pour réaliser la cavité et les cotes altimétriques supérieure et inférieure de la passe de forage;
- f) l'heure de la fin de formation de la cavité pressiométrique, à la minute près;
- g) le type, la marque et le numéro de série du CPV, et de l'enregistreur de données s'il est dissocié du CPV;
- h) les informations sur les contrôles récents effectués sur les appareils de mesure et de contrôle utilisé (voir B.1);
- i) l'heure de début de l'essai, à la minute près;
- j) le type de sonde utilisé (voir 4.2) et ses caractéristiques (type de gaine, protection rigide, tube fendu, etc.) ainsi que les résultats de l'essai d'étalonnage de la dilatation propre et de la résistance propre, tels que définis à l'Annexe B;
- k) la pression différentielle ( $p_f - p_0$ ) à la cote altimétrique du CPV;
- l) un tableau des relevés de la pression et du volume du liquide à 1 s (types B et C uniquement), 15 s, 30 s et 60 s à chaque palier de pression de chargement;
- m) les coordonnées  $p$ - $V$  de chaque point permettant de tracer la courbe pressiométrique corrigée;
- n) tous les incidents survenus pendant l'essai (tels que l'éclatement de la sonde);
- o) les cotes altimétriques du sommet du sondage pressiométrique,  $z_0$ , et des capteurs de pression,  $z_p$ , représentés en E2 et à la Figure D.1;
- p) les cotes altimétriques du niveau de fluide de forage le cas échéant et de la nappe phréatique, si celle-ci est connue,  $z_g$ ;
- q) le nom de l'organisme procédant au sondage pressiométrique, c'est-à-dire au forage et aux essais;
- r) la courbe pressiométrique corrigée et les méthodes utilisées pour les corrections de résistance propre et de dilatation propre.



### ► Attente des utilisateurs

- Améliorer la qualité des essais (86%)
  - Améliorer le matériel standard
  - Matériel plus facile à manipuler et à monter
  - Retour d'expérience souhaité dans certains terrains : argiles gonflantes, sables et graviers sous nappe
- Améliorer la qualité du forage (71%)
  - Systèmes d'auto-forage
  - Matériels plus faciles à utiliser
  - Meilleure formation des opérateurs (formation diplômante souhaitée)
- Améliorer l'interprétation (67%)
  - Représentativité du module avec une sonde foncée, utilisation du module sécant..

### ► Conclusions de l'enquête

- L'essai est sensiblement le même que celui décrit par Ménard il y a 60 ans
- Une attente de l'amélioration de la qualité des matériels: précision des mesures,...
- La qualité du trou de forage reste la difficulté principale pour un essai de bonne qualité
- Intérêt de réaliser des campagnes d'essais croisées avec des protocoles spécifiques
- Utilisation de la norme NF EN ISO 22 476-4 (2015), améliorations souhaitables:
  - (re)définition de la pression limite ou redéfinition de critères d'arrêt en phase avec la pratique
  - Définition de la pression de fluage  $p_{iM}$
  - Utilisation des modules mesurés: cyclique (cf 22476-5), sécant
  - Besoins de formation des opérateurs

► 17 réponses (2017)

► Quelques points sensibles:

- Essai de dilatation propre de l'appareillage:
  - préciser les points de calcul de la pente de la droite de correction des volumes
  - Influence sur le calcul des modules en terrain raide
  
- Choix des points p1 et p2 pour le calcul du module:
  - 3 outils, 3 choix différents!
  
- Calcul de la pression limite:
  - 3 outils, 3 extrapolations différentes!

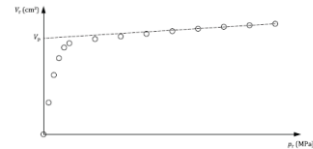


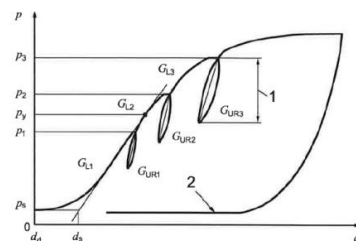
Figure B.2 – Etalonnage de la dilatation propre – Exemple

SONDAGE A- 29m										
CALCUL	OUTIL D'INTERPRETATION	P <sub>LM</sub> - MPa	P <sub>LM</sub> * - MPa	P <sub>LM</sub> - MPa	E <sub>u</sub> - MPa	p1 - MPa	p2 - MPa	Pel (MPa)	a (cm³/MPa)	Vc (cm³)
12		12.6	12.2	8.03	156	0.99	5.07	0.33	3.68	143
8B		15.2	14.8	5.10	130	1.01	5.10	0.36	2.42	151
1C		8.05	7.68	8.04	119	1.00	7.10	0.32	3.03	147

SONDAGE B- 21m										
CALCUL	OUTIL D'INTERPRETATION	P <sub>LM</sub> - MPa	P <sub>LM</sub> * - MPa	Pf - MPa	E <sub>u</sub> - MPa	p1 - MPa	p2 - MPa	Pel (MPa)	a (cm³/MPa)	Vc (cm³)
12		4.16	4.00	2.34	22.4	0.28	2.34	0.30	3.47	224
8B		4.32	4.14	2.37	19.2	0.30	2.37	0.35	2.59	229
1C		3.93	3.74	2.48	20.6	0.28	2.35	0.38	2.70	228

► 5 campagnes d'essais

- Objectifs: apprécier quelle sont les influences des protocoles de forage (outil, fluide, vitesse...) et le type de sonde et son équipement sur la qualité des mesures
  
- Calcaires (Gouvieux): Fondasol, Fugro, Apageo) - site EDF
  - Protocole B norme ISO 22 476-5 essais dilatométriques
  - 6 carottés à 4m diamètres 101, 66 et 46mm- 12 essais
  - Résultats proches pour le 1<sup>er</sup> module de chargement (0.5 < p < 1,5 MPa)

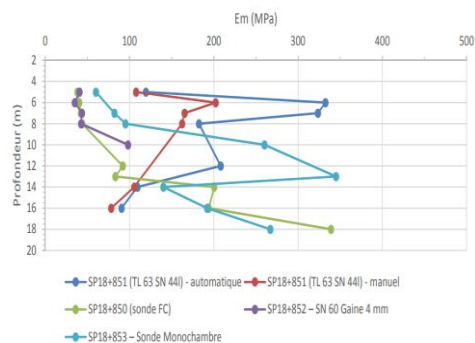
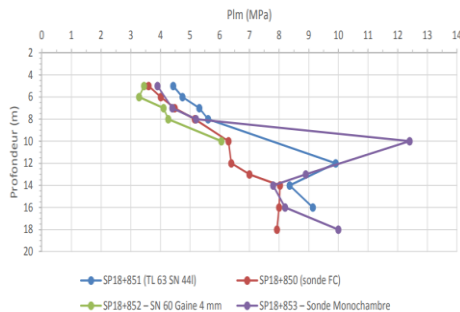




### ► Molasse tertiaire (Toulouse): Ginger Cebtp

- Campagne Tisséo – 3<sup>ème</sup> ligne métro
- Comparer  $p_{1M}$  et  $E_M$  avec

- Sonde LATHP dite Francis COUR – Contrôleur PREVO – enregistreur BAP – logiciel ExPRS
- TF63 sonde 44 longue – Contrôleur HYPERPAC – enregistreur GeoBOX – logiciel GeoVISION
- SN60 - Contrôleur HYPERPAC – enregistreur GeoBOX – logiciel GeoVISION
- Sonde Monochambre FUGRO – enregistreur logiciel FUGRO – dépeuillement FUGRO



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

49

49

### ► Sables dunaires (Messanges): Fondasol

- 2 campagnes en 2019 et 2021
- Sonde nue gaine 3 mm et tube fendu cellule longue, et tube fendu cellule courte
- L'utilisation de tubes fendus dans un préforage affecte sensiblement les valeurs de modules calculés si on utilise la méthode de la gaine souple (§ D.5.2.2 de la norme NF EN ISO 22476-4:2015)
- il est donc vivement recommandé de modifier cette pratique et d'utiliser la méthode du tube fendu.

### ► Limons (Plancoët): Geotec

- Résultats difficiles à exploiter

### ► Argiles molles (Cran): Ginger Cebtp

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

50

50



## État de la pratique et résultat des essais croisés (2/3)

Patrice Désourtheau (Ginger)

### ► Objectif de l'étude

- Comparer les pratiques quotidiennes actuelles avec les recommandations de la NF EN ISO 22476-4

### ► Méthodologie

- Choix du site de Pont de CRAN : grande homogénéité dans ses caractéristiques géotechniques
- Réalisation d'un forage de référence SP1 selon NF EN ISO 22476-4
- Réalisation de forage annexe en changeant d'outils, de sondes, ...

### ► Programme

Dénomination	Technique C.2 (type de sol Argile molle)	Fluide	Viscosité s/MARSH	Outil	Vitesse de Rotation (tr/min)	Type de Sonde	Type de Gaine	Prof. (m)	Nb d'es sais
SP1	OHD - Approprié	bentonite	57	2"1/2 tricône	400	Sonde 60 mm	1.5 mm	10.5	7
SP2	OHD - Approprié	bentonite	55	drag-bit 3 doigts	100	Sonde 60 mm	1.5 mm	10.5	8
SP3	OHD - Approprié	bentonite	47	drag-bit 3 doigts	50	Sonde 60 mm	3 mm	10.5	8
SP4	OHD - Approprié	bentonite	47	drag-bit 3 doigts	50	Sonde 60 mm	4 mm (dite toilée)	10.5	8
SP5	Tarière simple sous boue (recommandé)	tarière creusée à injection - bentonite	46	63 mm fish tool	50	Sonde 60 mm	1.5 mm	10.5	8
SP6	DST - Acceptable	tube fendu battu direct	-	TF 63	Sans	sonde 44 courte	3 mm	10.5	8
SP7	DST - Acceptable	tube fendu battu direct	-	TF 63	sans	sonde 44 longue	Gaine FC	15.5	8
SP8	OHD - Approprié	bentonite	47	drag-bit 3 doigts	50	sonde monocha mbre FUGRO			
SP9	CFA - ne convient pas	Sans	51	Bilâme 63 mm	50	Sonde 60 mm	1.5 mm	10.5	5
SP10	OHD - Approprié	bentonite	54	drag-bit 3 doigts	50	Sonde 60 mm	1.5 mm	15.5	8



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

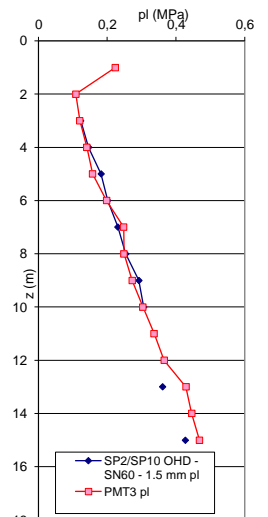
55

55

**► Objectif du Sondage : Référence SP10 – (#SP2)**

Foration	Outil : Tricône 2" 1/2
Tiges : 50 CR	
Passes : 1 m	
PO : 26 Bars (SP2 : 30 Bars)	
Vitesse moyenne : 81 m/h (SP2 : 200 m/h)	
VR : SP10 : 50 tr/min / SP2 : 100 tr/min	
Fluide : 55 s/Marsh – Pres. pompe 2 Bars	

Sonde SN60	Membrane : Trinil 50 shore
Gaine : 1.5 mm / Bague polyuréthane	
Calibration : 25 Bars / a = 3.84 cm <sup>3</sup> /MPa	
Inertie : Pel 0.077 MPa	



- PMT3 : LCPC Jezequel Guigan 1968

**► Point de Vue : Réglages Atelier de Sondage / Effet de succion de la gaine 1.5 mm**

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

56

56

► Objectif du Sondage : Gaine 3 mm

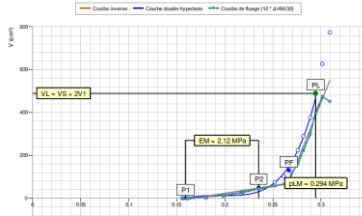
**Foration**

- Outil : Drag-Bit 2" 1/2
- Tiges : 50 CR
- Passes : 1 m
- PO : 26 Bars
- Vitesse moyenne : 90 m/h
- VR : 50 tr/min
- Fluide : Boue - 47 s/Marsh – Pres. pompe 2 Bars

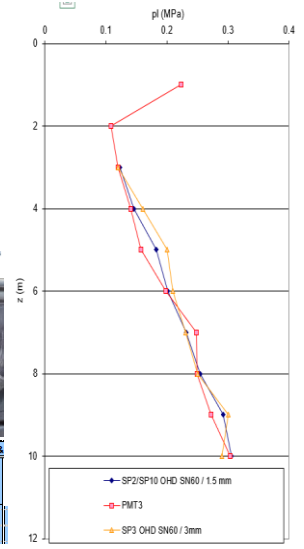
**Sonde SN60**

- Membrane : Trinil 50 shore
- Gaine : 3 mm
- Cal. : 25 Bars / a = 3.46 cm<sup>3</sup>/MPa
- Inertie : Pel 0.125 MPa

Essai d'expansion en forage conforme à la norme EN ISO 22476-4 procédure B (Apogee - Geo/Vision 5)  
CRAN\_SP3\_10m



UTES					DONNEES CORRIGÉES en P & S			
VOLUMES V(t) (cm³)					PRESSION p (MPa)	VOLUME V60 (cm³)	PENTE ΔV60/Δp (cm³/MPa)	FLUAGE ΔV60/Δp (cm³/MPa)
1 s	15 s	30 s	60 s					
513.329	549.993	580.345	627.782	0.301	626.535	#####	47.437	
659.204	698.746	729.516	774.059	0.306	773.336	#####	45.143	



– PMT3 : LCPC Jezequel Guigan 1968

► Point de Vue :

- ΔV60/30 < au palier n°16 qu'au palier n°15
- Au-delà de 700 cm<sup>3</sup>, le caoutchouc semble « retenir » la déformation de la gaine

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

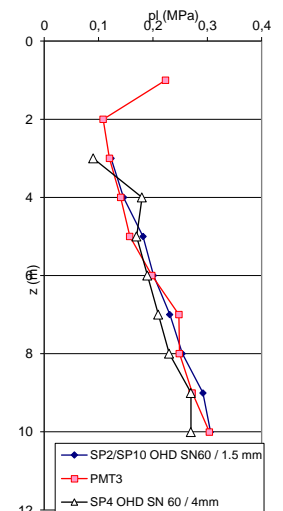
► Objectif du Sondage : Gaine 4 mm

**Foration**

- Outil : Drag-Bit 2" 1/2
- Tiges : 50 CR
- Passes : 1 m
- PO : 26 Bars
- Vitesse moyenne : 34 m/h
- VR : 50 tr/min
- Fluide : Boue - 50 s/Marsh – Pres. pompe 2 Bars

**Sonde SN60**

- Membrane : Trinil 50 shore
- Gaine : 4 mm
- Cal. : 50 Bars / a = 3.107 cm<sup>3</sup>/MPa
- Inertie : Pel 0.181 MPa



– PMT3 : LCPC Jezequel Guigan 1968

► Point de Vue :

- Gaine 4 mm plus facile à monter que les deux autres

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

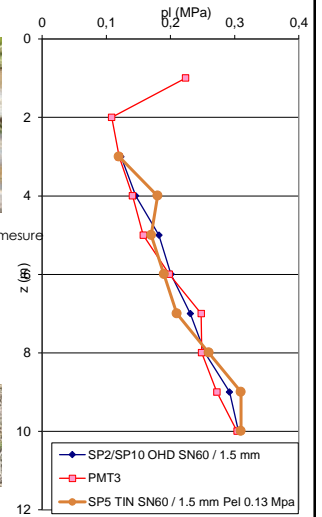
► Objectif du Sondage : Tarière à injection (TIN 94-110-1 mais absent dans 22476-4:2012)

<b>Foration</b>	Outil : Tarière hélicoïdale creuse à injection d 63 mm
	Tiges : Tarières
	Passes : 1 m
	PO : 29 Bars
	Vitesse moyenne : 138 m/h
	VR : 50 tr/min
Fluide : Boue - 50 s/Marsh – Pres. pompe 2 Bars	



– Outil d 63 mm fabriqué sur mesure (absent des catalogues)

<b>Sonde SN60</b>	Membrane : Trinil 50 shore
	Gaine : 3 mm
	Cal. : 25 Bars / a = 4.539 cm3/MPa
	Inertie : Pel 0.168 MPa



– PMT3 : LCPC Jezequel Guigan 1968

► Point de Vue :

- « C'est rangé ou dans le dépôt ? »
- Essai à 7m « linéaire »



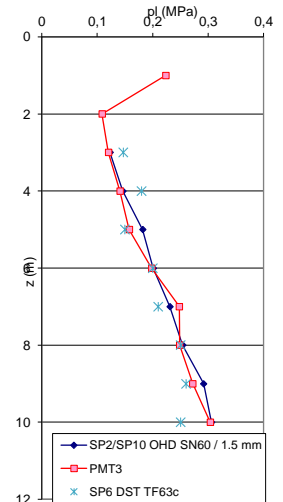
Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

► Objectif du Sondage : Tube Foncé / Battu – Sonde 44 courte

<b>Foration</b>	Outil : Sans (tube battu)
	Tiges :
	Passes : 1 m
	PO : 28 Bars
	Vitesse moyenne : 51 m/h
	Energie de battage < 100
Fluide : /	



<b>Sonde 44c</b>	Membrane : Trinil 50 shore
	Gaine : 3 mm
	Cal. : 25 Bars / a = 2.974 cm3/MPa
	Inertie : Pel 0.308 MPa



– PMT3 : LCPC Jezequel Guigan 1968

► Point de Vue Chantier :

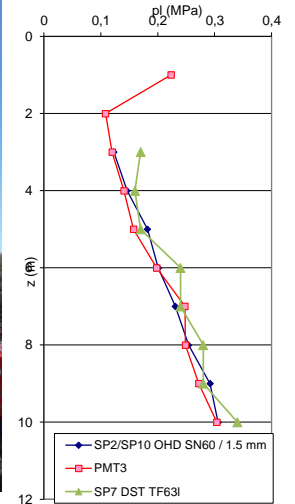
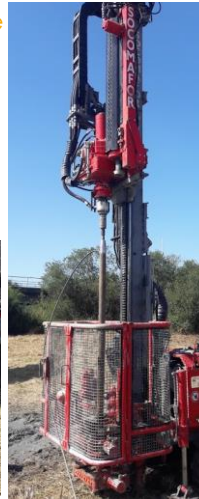
- tube fendu ovalisé post forage: 58.20mm/66.20 mm
- abondante présence d'argile entre la gaine et le tube fendu. Plaquage pour les premiers points de mesures.

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

► Objectif du Sondage : Tube Foncé / Battu – Sonde 44 longue

Foration	Outil : Sans (tube battu)
	Tiges :
	Passes : 1 m
	PO : 28 Bars
	Vitesse moyenne : 28 m/h
	Energie de battage < 100
	Fluide : /

Sonde 44	Membrane : Trinil 50 shore
	Gaine : 3 mm
	Cal. : 25 Bars / a = 4.828 cm <sup>3</sup> /MPa
	Inertie : Pel 0.258 MPa



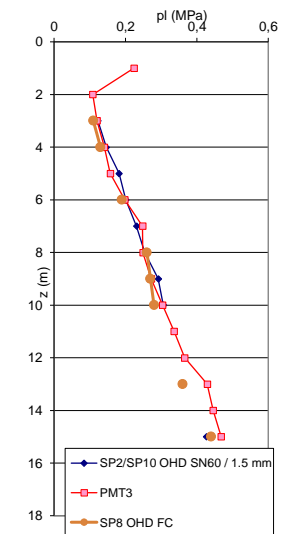
– PMT3 : LCPC Jezequel Guigan 1968

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

► Objectif du Sondage : Sonde Monochambre en contexte Argileux

Foration	Outil : Drag-Bit 2" 1/2
	Tiges : 50 CR
	Passes : 1 m
	PO : 26 Bars
	Vitesse moyenne : 27 m/h
	VR : 50 tr/min
	Fluide : Boue - 47 s/Marsh – Pres. pompe 2 Bars

Sonde	Membrane : /
Mono chambre	Gaine : Monochambre
FC	Cal. : 50 Bars / a = 3.107 cm <sup>3</sup> /MPa
	Inertie : Pel 0.181 MPa



– PMT3 : LCPC Jezequel Guigan 1968

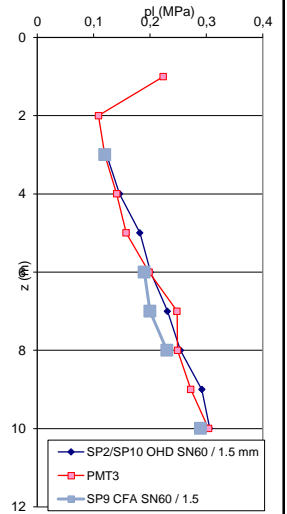
Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024



► Objectif du Sondage : THC et Argile sous nappe (Interdit)

Foration	Outil : Bilame d 63 mm
	Tiges : Tarières
	Passes : 1 m
	PO : 27 Bars
	Vitesse moyenne : 83 m/h
	VR : 50 tr/min
	Fluide sans

Sonde SN60	Membrane : Trinil 50 shore
	Gaine : 1.5 mm / Bague polyuréthane
	Cal. : 25 Bars / a = 3.84 cm3/MPa
	Inertie : Pel 0.089 MPa



— PMT3 : LCPC Jezequel Guigan 1968

- Point de Vue :
- Certes plus rapide

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

► NF EN ISO 22476-4 : 2012

D.2.2 Module pressiométrique Ménard (EM)

Par définition, le module pressiométrique est calculé à partir de la formule :

$$E_M = 2(1 + \nu) \left[ V_1 + \left( \frac{V_1 + V_2}{2} \right) \left( \frac{p_2 - p_1}{V_2 - V_1} \right) \right]$$

où :

$\nu$  est le coefficient de Poisson pris conventionnellement égal à 0.33.

Le module  $E_M$  s'exprime en mégapascals.

► NF EN ISO 22476-4 : 2022

D.5.3.3 Tube fendu

Lorsqu'un tube fendu est utilisé, le module pressiométrique  $E_M$  doit être obtenu soit à partir de la formule donnée en D.5.3.2, soit à partir de la formule suivante :

$$E_M = 2(1 + \nu) \left[ (V_m + V_c) \left( \frac{p_2 - p_1}{V_2 - V_1} \right) \right]$$

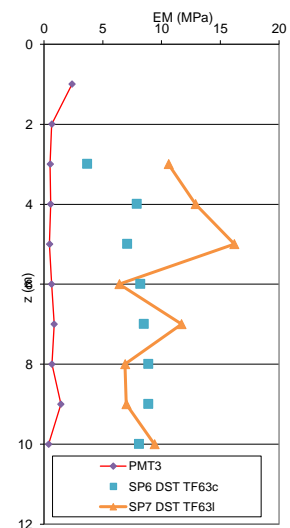
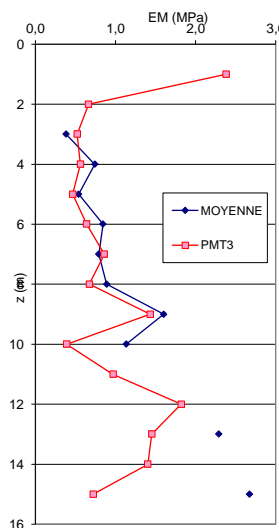
où :

$V_c = \pi \frac{d^2}{4} l_c$  est le volume de la cellule de mesure centrale après étalonnage;

$V_1 = \pi \frac{d^2}{4} l_c$  est le volume de la cellule de mesure centrale, incluant le tube fendu;

$$V_m = (V_1 + V_2) / 2.$$

La formule utilisée, soit celle donnée en D.5.3.2, soit celle du présent paragraphe, doit être précisée.



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024



## Pratique quotidienne : Point de vue d'un bureau d'études

Thomas SIMONNOT  
ACCOTEC

### ► Pratique imposée

- Norme NF EN ISO 22476-4
- Procédure B (enregistrement systématique)
- Tarière privilégiée, sinon tricône avec injection et enregistrement
- Étalonnage et calibrage pour chaque sonde utilisée et pour chaque chantier
- 5 MPa (ou 8 MPa si besoin)

### ► Constats

- Habitudes d'entreprises très ancrées et déconnectées de la norme
- Tableaux C1 et C2 très peu respectés
- Les non-conformités les plus courantes :
  - Volume d'arrêt trop faible (<500 cm<sup>3</sup>)
  - Nombre de point après fluage très insuffisant
  - Paliers de pression trop grands au fluage

Tableau C.1 — Longueur maximale d'une passe de forage avant de procéder à l'essai

Type de sol	Longueur maximale d'une passe de forage (m)		
	Forage rotatif adapté <sup>b</sup>	Roto percusion <sup>b</sup>	Battage, fonçage et vibrofonçage du tube lisse <sup>c</sup>
Vase et argiles molles	1 <sup>a</sup>	—	1 <sup>a</sup>
Argiles moyennement compactes	2	2	3
Argiles compactes	5	4	4
Limons			
— au-dessus de la nappe	4	3	3
— sous la nappe	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	—
Sables lâches			
— au-dessus des eaux souterraines	3	2	—
— sous la nappe	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	—
Sables moyennement compacts et compacts	5	5	4
Sables grossiers: graviers, cailloux	3	5	3
Sols grossiers cohérents	4	5	3
Sols non homogènes, sols atypiques (comme par exemple tills, etc.)	2	3	2
Roches altérées, roches tendres	4	5	3

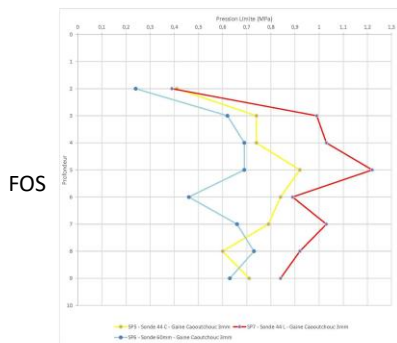
- Longueurs passes de forage pas adaptées aux sols en place
- « j'ai toujours fait comme ça »

### ► Les causes ?

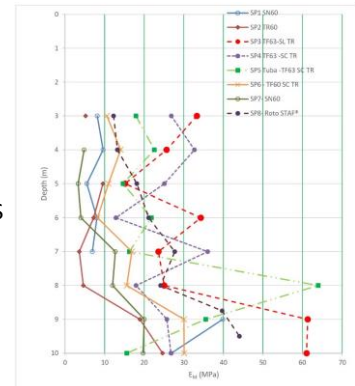
- L'équipe terrain n'est pas impliquée dans les résultats des essais
- Très peu savent lire une courbe pressiométrique (malgré les outils numériques actuels)
- Les ingénieurs ne suivent pas la réalisation des essais (malgré les outils numériques actuels)
- Trop peu se préoccupent de la cohérence des résultats

### ► Sur les campagnes d'essai croisés

- Les résultats sont homogènes lorsque les équipes sont concernées par la qualité du résultat
- Le choix du matériel a un impact fort sur les résultats dans certains sols (type de sonde notamment) : cas des campagnes FOS et MESSAGES



MESSANGES



Point de vue d'un bureau d'études

69

69

### ► Les solutions ?

- Sortir de la seule formation interne qui impose les mauvaises habitudes de travail
- Établir des fiches PEX communes pour les équipes terrain = traduction de la norme
- Imposer progressivement la procédure C automatique
- Avoir une **formation homogène** pour les sondeurs



Point de vue d'un bureau d'études

70

70

► Le « titre Sondeur en géotechnique »

- Mis en place par l'USG avec le GRETA Midi-Pyrénées
- 456 heures de formation en centre, dont 4 semaines sur l'essai pressiométrique
- Alternance 12 mois



► 2<sup>ème</sup> site à GRENOBLE

- Mis en place par l'USG avec le GRETA Nord-Isère / Pôle géosciences UNICEM Campus AURA
- 469 heures de formation,
- Alternance 12 mois

Unités d'Enseignements				
UE1 Initiation aux lithologies (notions générales et terrain)	UE2 Topographie et implantation	UE3 Enseignements généraux et transverses, remises à niveau	UE4 <b>Géotechnique et essais</b>	UE5 Missions géotechniques et dimensionnement
UE6 <b>Equipements et instrumentation</b>	UE7 Technologie et matériels	UE8 QHSE, organisation-gestion chantier	UE9 Communication, transmission et vie entreprise	UE10 Evaluations/CCF

**Durée de formation en centre :**

- Alternance sur 1 an,
- 469 h au total,
- répartie sur 14 semaines.

**Savoirs modularisés en fonction du référentiel rénové de 2021**

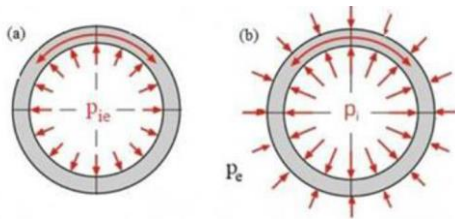
- Début des enseignements : 18 septembre 2023
- Formation regroupée sur un unique site de travail avec diversité de terrain et contexte géologique sur 10 hectares de terrain privé dans le campus
- Inscription administrative auprès du GRETA Nord-Isère
- Renseignements sur le contenu de formation auprès de l'UNICEM campus AURA, pôle Géosciences : [www.unicem.fr](http://www.unicem.fr)

## Journée de restitution

### Réflexions à propos de l'interprétation de l'essai pressiométrique

Jacques Monnet (Gaiatech)

1. Influence de la géométrie de la Sonde
  - a) Corrections sur la géométrie
  - b) Conséquence 1 : Analyse des essais de Messange
2. Calcul d'Erreur et précision
  - a) Principe du calcul d'erreur, précision des modules  $E^e$ ,  $E_M$
  - b) Conséquence 2 : Application aux essais de référence
  - c) Précision des modules de  $p_{LM}$
  - d) Conséquence 3 : Application aux essais de référence
3. Perspectives et conclusions
  - a) Perspectives
  - b) Conclusions

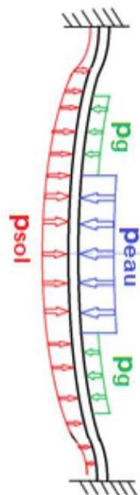


► Le pressiomètre mesure une pression interne dans la sonde et l'épaisseur de la membrane + lanterne (de 4mm à 16mm) diminue la pression appliquée au sol selon (1)

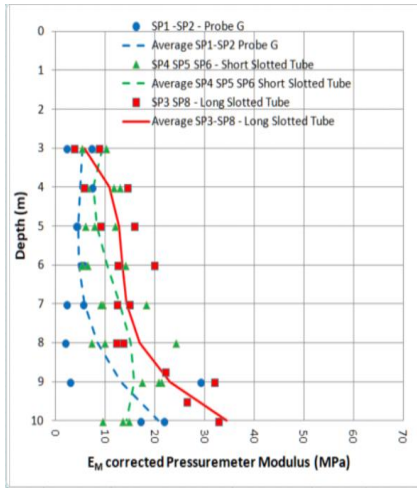
► 
$$p_e = p_i \cdot \frac{R_e - e_p}{R_e} \quad (1)$$

- La différence entre la pression mesurée et la pression réelle appliquée sur le sol est de l'ordre de -5% à -23%.

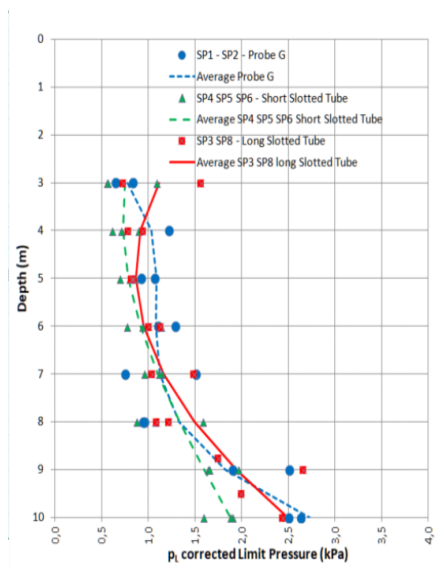
NB : La norme suppose que l'épaisseur n'a aucune influence sur la pression appliquée au sol



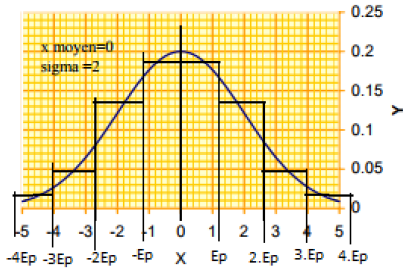
- La sonde se déforme comme un ballon de rugby, ce qui peut être modélisé par une poutre sur deux appuis simples.
  - Le tube fendu se déforme avec une extrémité fixe, ce qui peut être modélisé par une poutre sur deux appuis fixes.
  - La pression de réaction du sol est supposée proportionnelle à sa déformation.
- NB : La norme suppose une déformation cylindrique et une pression uniforme.



- ▶ Le projet ARSCOP a réalisé 59 essais pressiométriques avec différentes sondes qu'on peut regrouper en 3 types différents (Sonde Nue type G; Tube Fendu Court; Tube Fendu Long)
- ▶ On voit que le module pressiométrique standard dépend du type de sonde utilisée ( $E_{M\_SST} \approx 3.E_{M\_G}$ ;  $E_{M\_LST} \approx 2.E_{M\_G}$ )
- ▶ Le module pressiométrique corrigé est moins affecté par le type de sonde utilisée ( $E_{M\_SST} \approx 2.E_{M\_G}$ ;  $E_{M\_LST} \approx 1,5.E_{M\_G}$ )
- ▶ Le module pressiométrique corrigé est entre 1,5 à 2 fois plus faible que le module standard
- ▶ La dispersion des résultats est beaucoup plus faible.



- ▶ On voit que la pression limite standard dépend du type de sonde utilisée ( $p_{LM\_SST} \approx 1,5.p_{LM\_G}$ ;  $p_{LM\_LST} \approx 1,6.p_{LM\_G}$ )
- ▶ La pression limite corrigée est indépendante du type de sonde utilisée ( $p_{LM\_SST} \approx p_{LM\_G}$ ;  $p_{LM\_LST} \approx p_{LM\_G}$ )
- ▶ La pression limite corrigée est entre 1,5 et 2 fois plus faible que la pression limite standard
- ▶ La dispersion des résultats est beaucoup plus faible.



► Les mesures répétées pour un même mesurande suivent généralement une courbe de Gauss (ou loi normale) permettant de déduire:

- La moyenne (2)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (2)$$

- L'écart type (3)

$$\sigma = E_{mq} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3)$$

► La loi de composition des erreurs (4) permet de calculer l'incertitude composée

$$\sigma_F^2 = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial F}{\partial X_i} \right]^2 \sigma_{X_i}^2 \quad (4)$$

► Précision de  $E_M$  (5) se calcule selon la loi de propagation (4) des erreurs :

$$\sigma_{Em} = \left\{ 7,08 \cdot \frac{(p_2 - p_1)^2}{(V_2 - V_1)^2} \cdot \sigma_{V_s}^2 + 3,54 \cdot \frac{(p_2 - p_1)^2}{(V_2 - V_1)^2} \cdot \left\{ 1 + \frac{2}{(V_2 - V_1)} \left[ V_s + \frac{V_1 + V_2}{2} \right] \right\}^2 \cdot \sigma_V^2 + 14,15 \cdot \left[ V_s + \frac{V_1 + V_2}{2} \right]^2 \cdot \frac{\sigma_p^2}{(V_2 - V_1)^2} \right\}^{0,5} \quad (5)$$



## 2.B CALCUL D'ERREUR – PRÉCISION DU MODULE PRESSIOMÉTRIQUE

- ▶ La précision de  $E_M$  dépend de la précision des grandeurs unitaires :
- ▶ Sur les essais types fournis par Fondasol, avec le processus A de type lecture visuelle la précision est **entre 4 et 17%**
- ▶ Avec le processus B de type saisie numérique la précision est **entre 2 et 10%**
- ▶ Avec le processus C de type saisie numérique améliorée la précision est **entre 1 et 10%**
- ▶ La précision du Module Elastique (mesuré sur le cycle décharge-recharge) est similaire à celle du module pressiométrique

Forage	Prof. m	$\sigma_r$ cm <sup>3</sup> (32)	$\sigma_{V_2}$ cm <sup>3</sup> (33)	$\sigma_{V_3}$ cm <sup>3</sup> (34)	a cm <sup>3</sup> /kPa (18)-(27)	$\sigma_a$ cm <sup>3</sup> /MPa	$E_M$ MPa (11)	$\sigma_{EM}$ MPa (52)	Erreur relative %	Tolérance MPa (4)	$E_{ExpMoy}$ MPa	$\sigma_{Exp}$ MPa
A	29	1.2	1.7	5.8	3,380	0.1891	152,3	1.4	0.8	4,0	133	13,3
B	21	1.8	2.6	6.7	3,470	0.2793	21,6	0.2	2,2	1,3	24	4,4
B	22	1.8	2.6	6.7	3,470	0.2793	20,6	0.6	4,9	2,7	21,8	5,35
E	1,5	0.4	0.7	4.8	1,411	0.1282	5,3	0.4	9,9	1,4	4,99	0,3

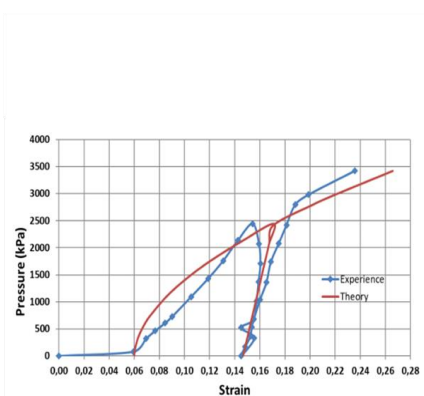
## 2.C CALCUL D'ERREUR – PRÉCISION DE LA PRESSION LIMITE

- ▶ Précision de  $p_{LM}$  (6) selon la loi de propagation (4) des erreurs pour la relation en inverse du volume :

$$\sigma_{Plm} = \left\{ \frac{1}{A^2 \cdot (V_s + 2 \cdot V_1)^4} \cdot \sigma_{V_s}^2 + \frac{4}{A^2 \cdot (V_s + 2 \cdot V_1)^4} \cdot \sigma_{V_1}^2 + \frac{1}{A^4} \left[ B + \frac{1}{(V_s + 2 \cdot V_1)} \right]^2 \cdot \sigma_A^2 + \frac{1}{A^2} \cdot \sigma_B^2 \right\}^{0.5} \quad (6)$$

- ▶ La précision de  $p_{LM}$  dépend de la précision des grandeurs unitaires :
- ▶ Sur les essais types fournis par Fondasol, avec le processus A, B ou C de type lecture visuelle la précision reste **entre 0,1 et 32%**
- ▶ Il n'y a pas d'influence de la précision des mesures principales sur la précision de la pression limite

Forage	Profondeur m	$p_{LM}$ Ma (59)	$\sigma_{EM}$ MPa (63)	Erreur relative %	Tolérance MPa	$p_{LMoy}$ MPa	$\sigma_{exp}$ MPa
A	29	15,4	5.2	32.4	13.8	11,2	2,19
B	21	3,9	0,1	1,3	0,1	3,8	0,29
B	22	3,1	0,2	0,1	0,1	3,0	0,34
E	1,5	0,74	0,01	0,1	0,1	0,77	0,06



L'évolution de la mesure pressiométrique corrigée permet :

- ▶ De mesurer l'angle de frottement :
  - Par la correspondance entre la pression limite théorique et celle corrigée.
  - Par la correspondance entre la courbe pressiométrique théorique et la courbe réelle.
  - La précision de la mesure de  $\Phi'$  est proche de  $1,5^\circ$ .
- ▶ De mesurer le module d'élasticité moyen sur le cycle

NB : L'interprétation standard procède par corrélation entre la pression limite et la friction avec une erreur plus grande et sans correction de mesure.

Les contributions de Gaiatech incluent :

- La détermination de la correction de membrane ( épaisseur et forme)
- La détermination de la précision liée aux grandeurs mesurées au pressiomètre ( $E_M$ ,  $E^e$ ,  $p_{LM}$ )

Les bénéfices pour le projet ARSCOP :

- Une réduction de la dispersion des mesures et homogénéisation des résultats obtenus avec des sondes différentes,
- Une mesure de la précision des résultats pressiométriques,

Perspectives :

- En optionnel il est possible de déterminer l'angle de frottement du sol, directement par superposition de la courbe expérimentale corrigée et de la courbe théorique pressiométrique (Monnet, 2012)

Merci de votre attention



## Mesure des modules à faibles déformations

Présenté par Alexandre LOPES  
[alexandre.lobes@setec.com](mailto:alexandre.lobes@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

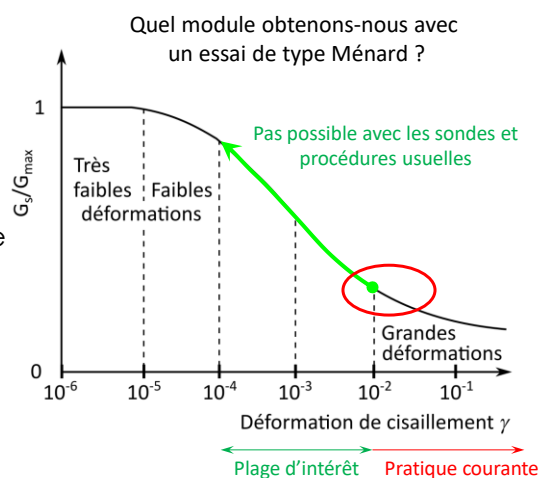
- Détermination des modules de cisaillement à faibles déformations
- Développements sur l'automatisation de l'essai
- Développements sur la mesure de la pression interstitielle
- Développements des procédures d'essai et d'interprétation

#### ► 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**

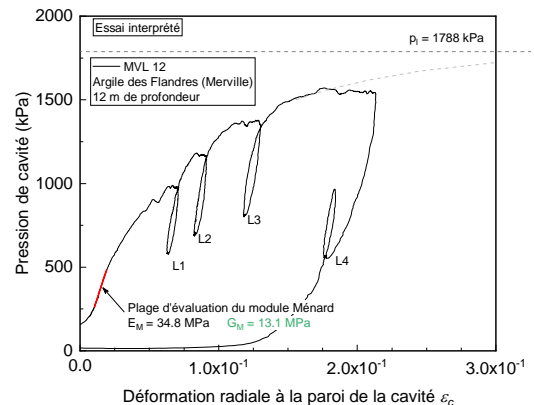


► Procédure avec trois boucles

- Chargement de la cavité par **incrément 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  $p_{IM}$



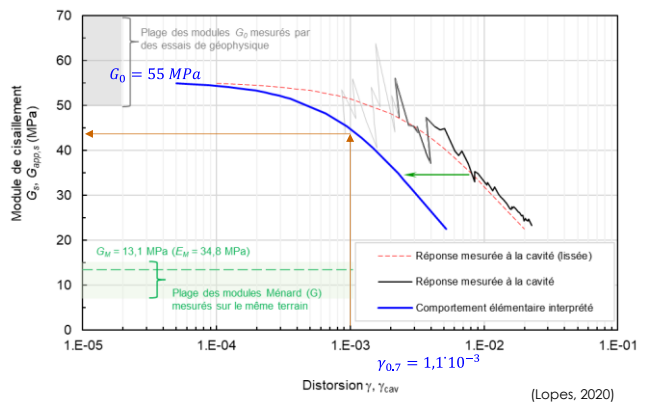
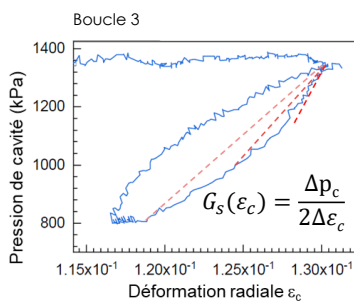
Argiles des Flandres, 12m de profondeur :  
 •  $IP = 40$  à  $60$   
 •  $c_u \sim 200$  kPa  
 • Géophysique:  $G_{0,h} = 50$  à  $70$  MPa  
 • Autres essais in situ disponibles



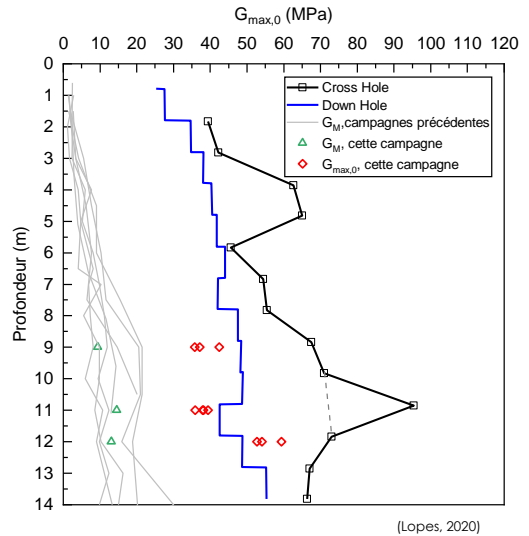
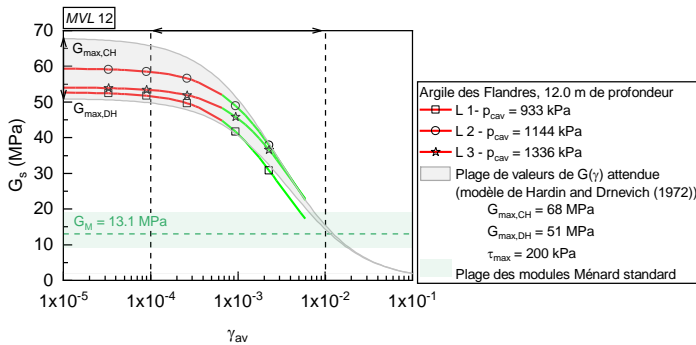
- Calcul des **modules apparents sécants**
- Interprétation : empirique ou analytique
- Cas des argiles (comportement considéré non drainé) : les trois boucles sont similaires



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



- 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)

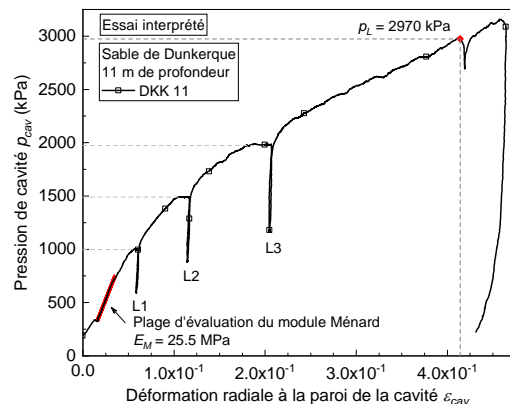
► Même procédure avec trois boucles

- 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 :

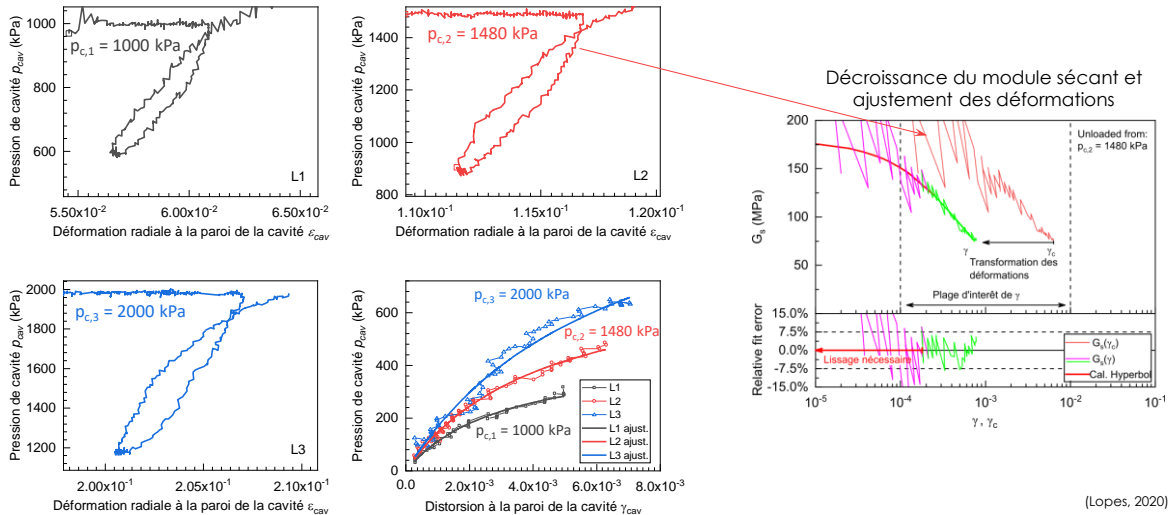
- $ID = 0.75$ .
- CPT :  $q_t = 20$  à  $30$  MPa
- Géophysique :  $G_{0,h} = 90$  à  $140$  MPa



(Lopes, 2020)

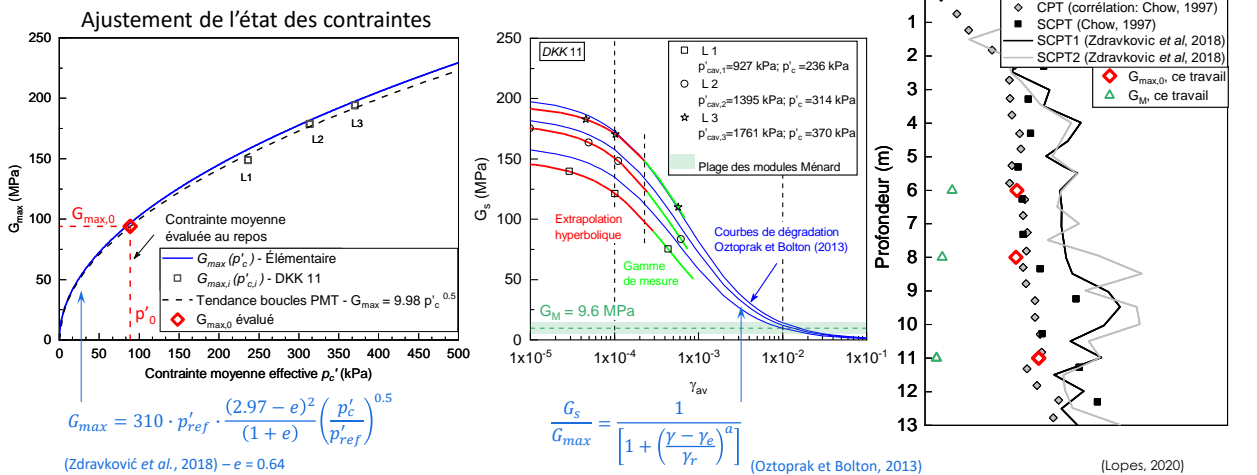


- Détail des boucles et influence de la pression sur la raideur



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

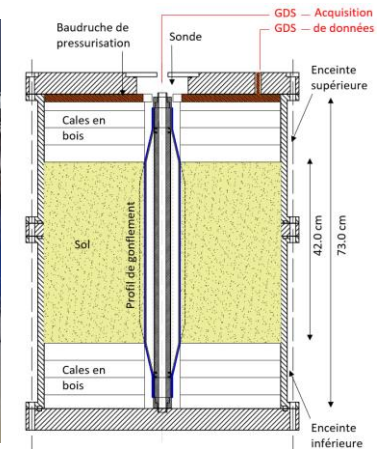
- Comparaison avec des courbes de référence et mesures sismiques sur le terrain



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

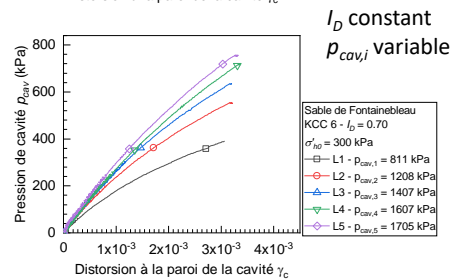
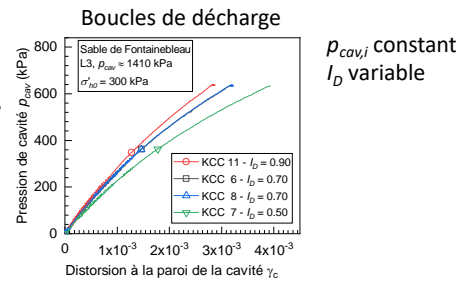
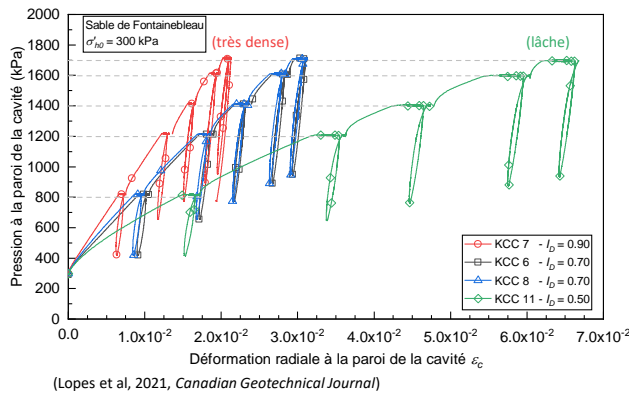
► Essais en chambre d'étalonnage

- 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

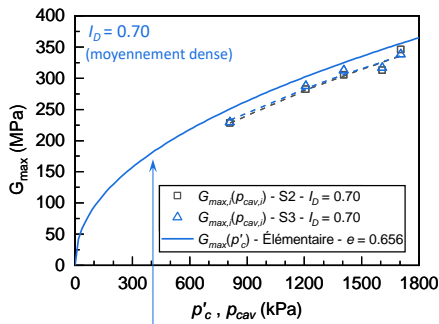


► Etude paramétrique

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



- Validation par comparaison aux courbes de référence
  - Module maximum et courbe de décroissance

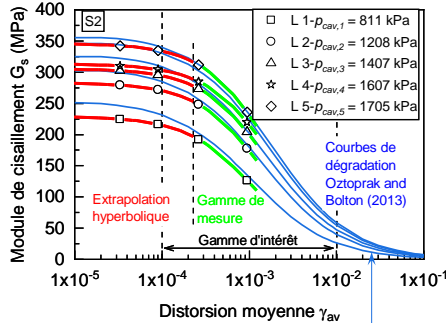


Comportement Élémentaire de référence

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

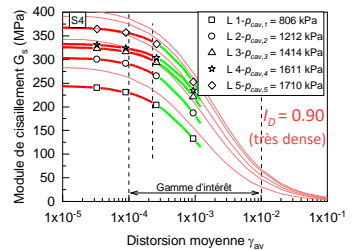
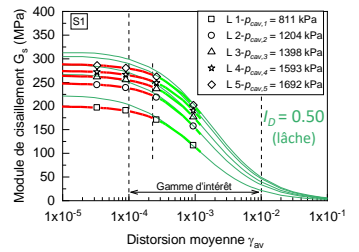
Dans ce cas :  $p'_{c,i} \approx p_{cav,i}$

(Delfosse-Ribay et al., 2004)



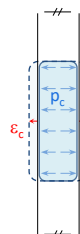
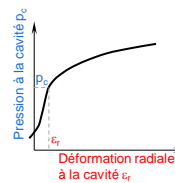
$$\frac{G_s}{G_{max}} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\gamma - \gamma_{\epsilon}}{\gamma_r}\right)^a\right]}$$

(Oztoprak et Bolton, 2013)

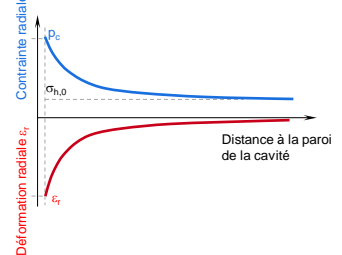


- Éléments théoriques
  - Le terrain autour de la cavité est associé à un **niveau de déformation et de contrainte variable en fonction de la distance**
  - Les mesures de p-V (ou p-r) ne concernent que la **réponse du massif vues à la paroi**
  - Elles sont une **intégration du comportement global du 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

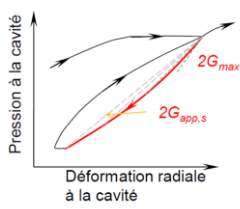


Réponse dans le terrain

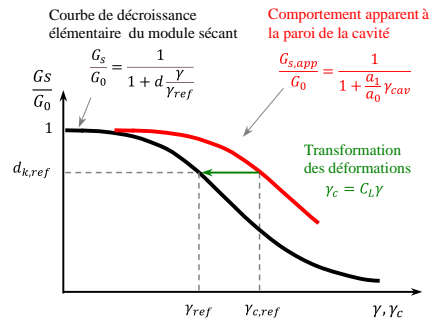
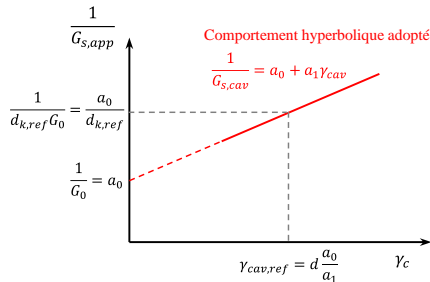


► Méthodes semi-empiriques : transformation des déformations et contraintes

- 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  $\gamma_{ref}$



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



Méthodes de transformation des déformations :

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

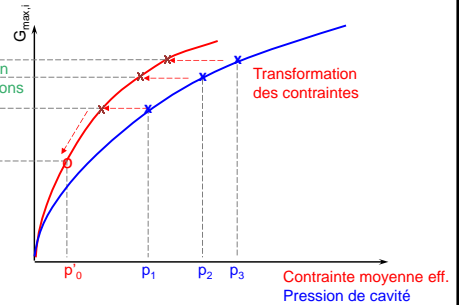
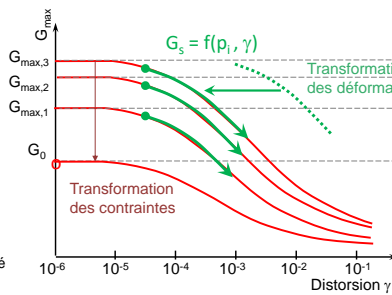
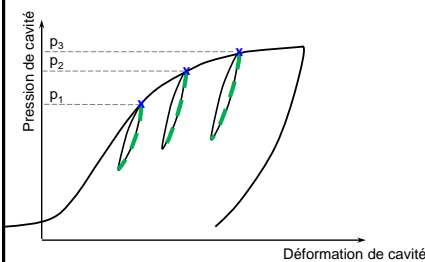
Jardine (1992)  
Calibré sur essais de laboratoire

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

Lopes et al. (2022)  
Calibré via calculs EF

► Méthodes semi-empiriques : transformation des déformations et contraintes

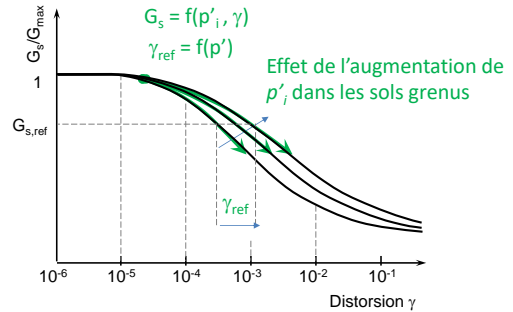
- Appliquer un coefficient pour transformer l'état des contraintes autour de la sonde au début de la boucle  $p_{c,i}$  en contrainte moyenne effective  $p'_i$  (comportement drainé)
  - Obtenir une loi d'évolution du module maximal  $G_{max}$  en fonction de  $p'_i \rightarrow G_{max} = f(p'_i)$
  -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



► 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)

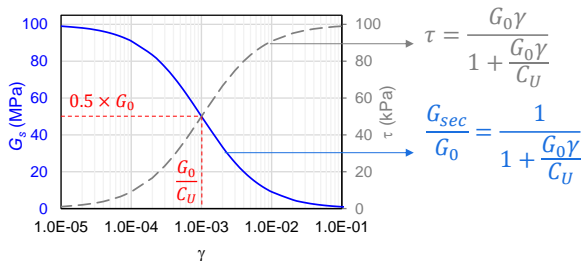
Méthodes de transformation des contraintes :	
(1)	$p'_i = \frac{\left( \frac{1}{2 \sin \varphi'} - \frac{p'_0}{p'_{c,i}} \frac{1 + \sin \varphi'}{2 \sin \varphi'} \right) p'_{c,i}}{\ln \left\{ \left[ \frac{p'_{c,i}}{p'_0 (1 + \sin \varphi')} \right]^{1 + \sin \varphi' / 2 \sin \varphi'} \right\}}$ Bellotti 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  $\varphi'$  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

<b>Courbe pressiométrique</b>	$p = p_0 + c_U \ln \left( 1 + \gamma \frac{G_0}{C_U} \right)$
<b>Boucle pressiométrique</b>	$p = p = p_{0i} + (\tau_{0i} + c_U) \ln \left( \frac{1}{1 - \frac{G_0}{\tau_{0i} + c_U} (\gamma - \gamma_{0i})} \right)$

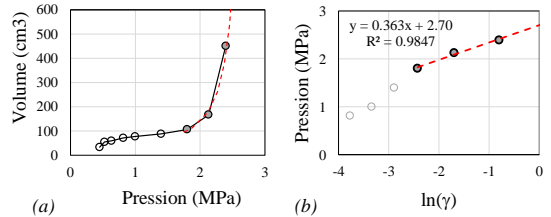
► Méthodes analytiques : Procédure sur **essais monotones non drainés : calage**

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

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

$c_u$  est la pente  
 $p_i$  est l'ordonnée à l'origine

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



Calcul manuel ou à partir de la courbe PMT

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

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

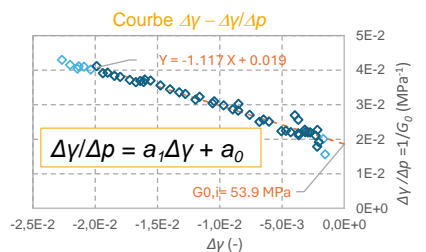
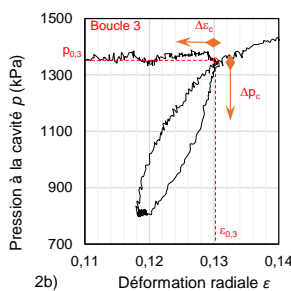
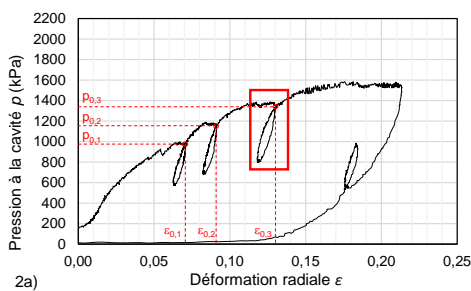
Estimation de  $p_0$

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

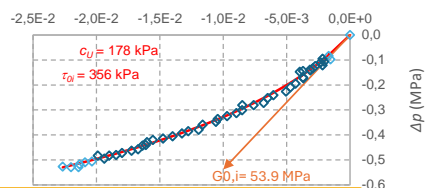
Détermination de  $\gamma_{0.5} = c_u/G_0$ , ou  $\gamma_{0.72} = 0.385 * \gamma_{0.5}$

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

► Méthodes analytiques : Procédure **avec boucles non drainés : calage**



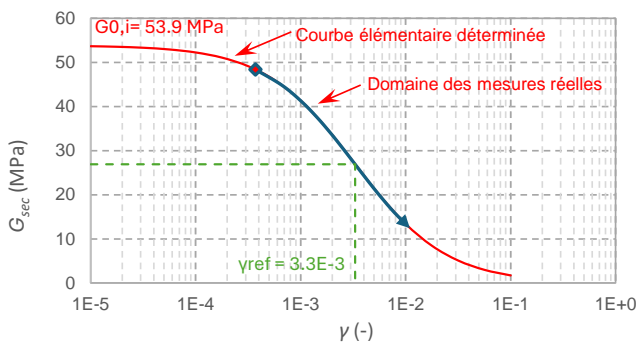
Calage pour la détermination de  $c_u$



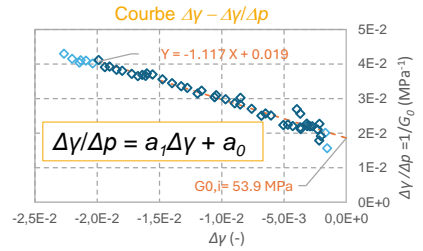
$$p = p_{oi} + (\tau_{oi} + c_u) \ln\left(1 + \frac{G_0}{\tau_{oi} + c_u} (\gamma - \gamma_{oi})\right)$$

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

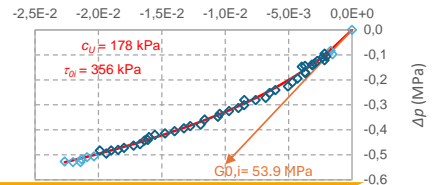
► Méthodes analytiques : Procédure avec boucles non drainés : calage



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

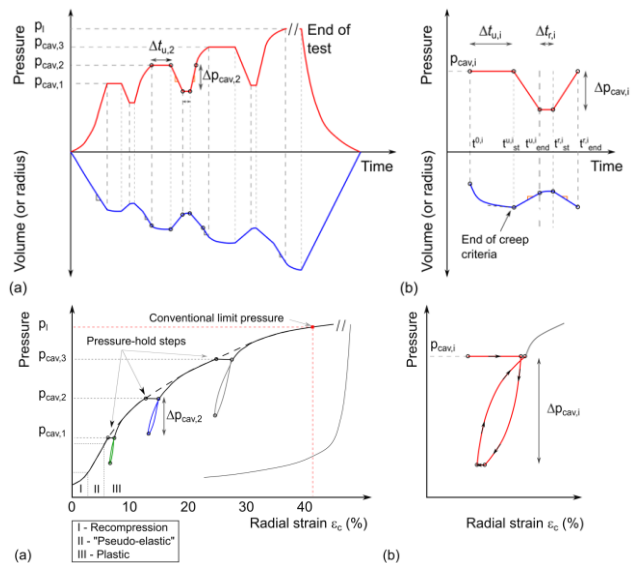
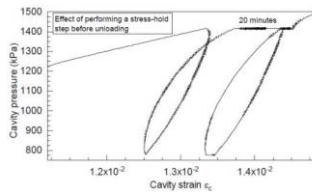


Calage pour la détermination de  $c_u$



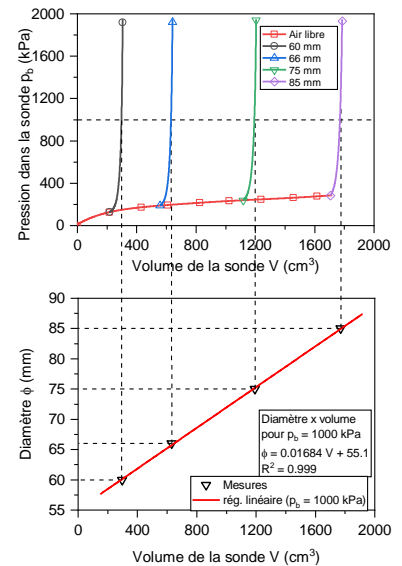
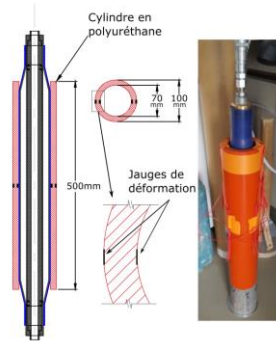
► Protocoles d'essais : chargement

- **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



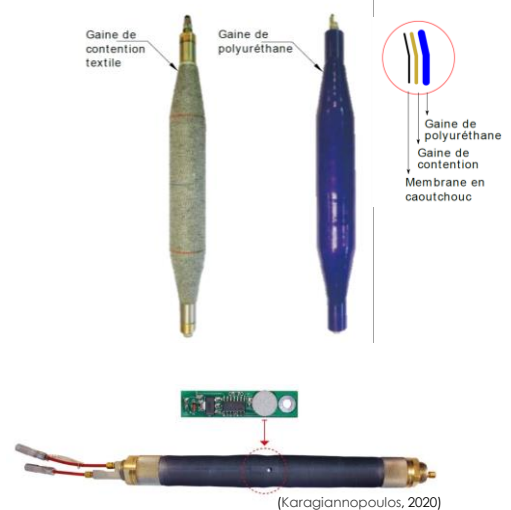
► Protocoles d'essais : étalonnages spécifiques

- 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





nouvelles Approches de Reconnaissance des Sols et de Conception des Ouvrages géotechniques avec le Pressiomètre



# Automatisation de l'essai pressiométrique

Présentation des modes automatisés mis en place dans la gamme GeoPAC

Lionel DARE – Chef de Produits APAGEO – [l.dare@apageo.com](mailto:l.dare@apageo.com)  
Damien BRECHOT – Directeur Technique APAGEO – [d.brechot@apageo.com](mailto:d.brechot@apageo.com)



Journée de restitution des résultats - 26 septembre 2024

117



## SOMMAIRE DE LA PRÉSENTATION

### ► Automatisation de l'essai pressiométrique

- 1. Présentation de l'équipement PMT
- 2. GéoPAC : Principe de la mise en pression mécanique du circuit d'eau
- 3. Automatisation de procédures hors essais
- 4. Démarrage d'un essai PMT : calibrage des pertes de charge
- 5. Prise de décisions, paramètres de régulation, calcul automatique des pas de paliers
- 6. Présentation des modes de travail développés
- 7. Conclusion

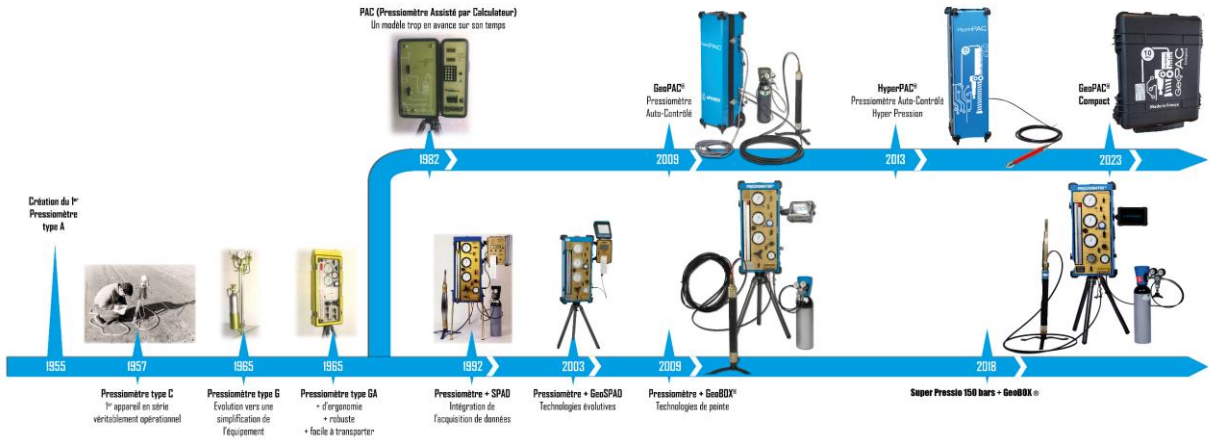
Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

118

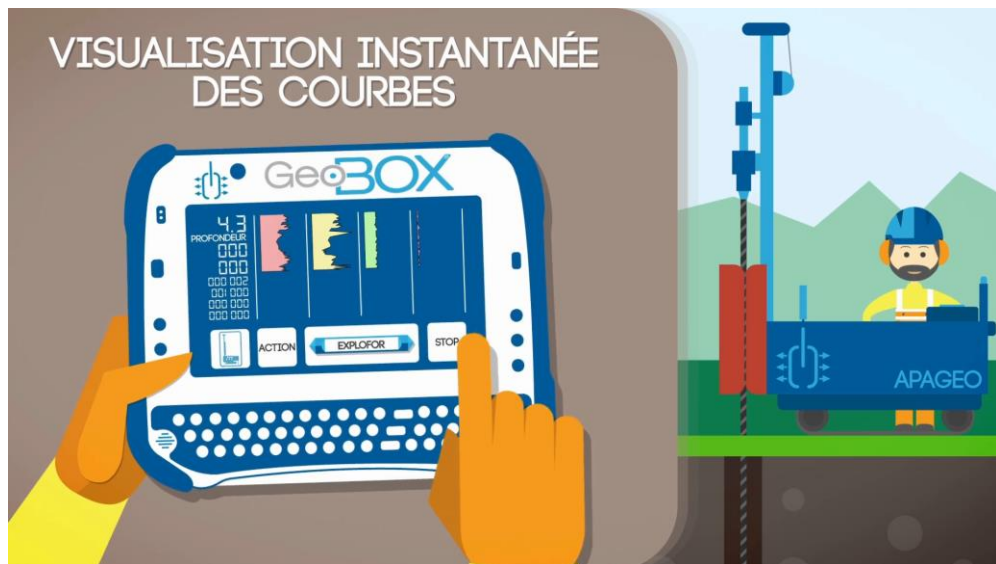
118



APAGEO  
L'ÉVOLUTION DU PRESSIOMÈTRE® MÉNARD®



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

### PRESENTATION DE DIFFERENTS EQUIPEMENTS PRESSIOMETRIQUES AYANT PARTICIPES AU PROJET NATIONAL ARSCOP



CPV et sonde FC® (prototype de recherche)

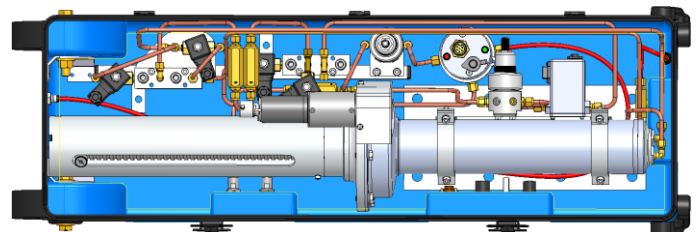
Prevo100 avec ADN, Jean Lutz SA

GeoPAC® avec GeoBOX®, APAGEO

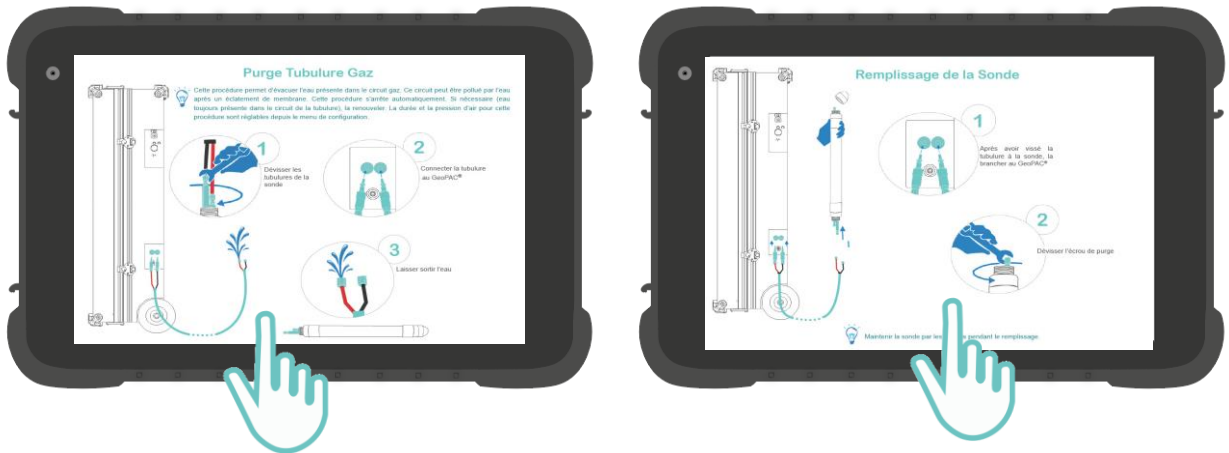


Le pilotage de la Pression et du Volume du GéopAC est essentiellement assuré par un piston, dans un cylindre de volume adapté à la gamme des sondes proposées par la norme ISO 22476-4:2021.

Ce piston est déplacé par une micro-motorisation de précision, entièrement pilotée par la tablette de chantier GeoBOX communiquant sans fil avec les organes de commande, de régulation et de mesure.



EXEMPLE D'AUTOMATISATION DES DIFFÉRENTES OPÉRATIONS HORS ESSAIS LIÉES À L'UTILISATION D'UN PRESSIOMÈTRE



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

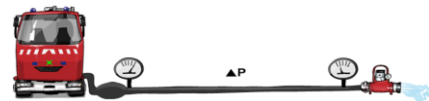
123

123

DÉMARRAGE D'UN ESSAI PRESSIOMÉTRIQUE : CALIBRAGE DES PERTES DE CHARGES

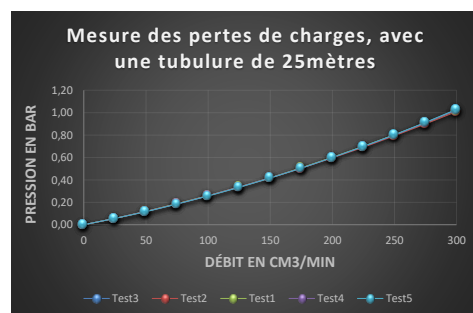
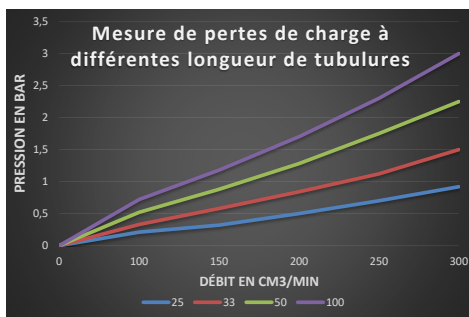
► Principe et compréhension des pertes de charge:

Lors de l'écoulement d'un fluide au travers d'un tuyau ou tubulure, il existe une différence de pression entre l'amont du tuyau et la sortie du fluide.



► La mesure instantanée et la prise en compte dans la régulation de la perte de charge, impossibles lors d'un essai classique avec un contrôleur pression-volume à détendeurs manipulés manuellement, est devenue avec le pressiomètre autocontrôlé GeoPAC, à la fois **une possibilité et une nécessité**.

► Exemple de mesures in situ faites pour déterminer les pertes de charges :



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

124

124

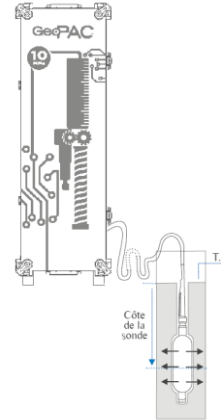
- ▶ Obligation de **maintien de la pression différentielle** entre la cellule d'eau & d'air, surtout pendant les phases de montée en pression & maintien du palier à la consigne de pression.  
le circuit liquide se bloque si le circuit gaz peine à atteindre sa consigne, et vice versa.
- ▶ Changement de palier en moins de 20 secondes (norme ISO 22476-4:2021) impliquant un **ajustement continu** des paramètres de régulation, suivant la réaction & dynamique de l'essai
- ▶ Mode automatique / semi-automatique:
  - **Automatique** : Calcul des pas de palier par le GeoPAC, prise de décision par l'automate si un changement de pas est nécessaire afin de limiter le nombre de palier de l'essai, en fonction de la réaction du terrain
  - **Semi-Automatique** : réglage par l'opérateur à tout moment de l'essai des consignes de pas de palier, le Géopac poursuivant la régulation selon les paliers imposés jusqu'en fin d'essai ou changement d'avis de l'opérateur.
- ▶ Zoom sur le calcul des pas de palier :  
en fonction des 1eres mesures, et en visant un essai pressiométrique standard en 10-12 paliers, l'automate augmentera (2 fois maximum) la consigne de pas de palier au cours de l'essai . Un algorithme de calcul de la Pression Limite potentielle dès la fin du 4è palier permet, en fonction de la réaction de tous les paliers réalisés, une prise de décision automatique de changement de pas.  
L'automate compare aussi son résultat avec la valeur de pas introduite par l'opérateur au démarrage de l'essai

**LA TECHNOLOGIE INNOVANTE DU GEOPAC DONNE LA MAÎTRISE DES RELATIONS ENTRE PRESSION ET VOLUME, ET PERMET L'AUTOMATISATION DE PLUSIEURS MODES DE TRAVAIL :**

- ▶ Essai pressiométrique en mode pression contrôlée standard (NF EN ISO 22476-4:2021)
- ▶ Essai pressiométrique en mode pression contrôlée cyclique (NF EN ISO 22476-5:2023)
- ▶ Essai en mode volume contrôlé (NF EN ISO 22476-5:2023)
- ▶ Essai en mode volume contrôlé cyclique (NF EN ISO 22476-5:2023)
- ▶ Essai en mode mixte pression et volume contrôlés, standard ou cyclique (NF EN ISO 22476-5:2023)
- ▶ Essai en mode pression contrôlée, sinusoïdale (NF EN ISO 22476-5:2023)
- ▶ Essai pressiométrique en Hyper Pression (NF EN ISO 22476-5:2023)

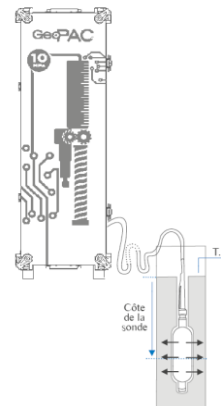
Pour chaque mode de travail, le GeoPAC enregistre les données d'essai à chaque seconde, dans un format lisible directement sur tableur Excel.

- ▶ Le GeoPAC effectue des paliers de **PRESSION** (liquide) d'une durée d'une minute, jusqu'à atteindre la pression ou le volume maximal défini dans la norme pour la sonde utilisée.
- ▶ Les paliers de PRESSION sont **croissants**, engendrant une expansion de la sonde dans le forage.



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

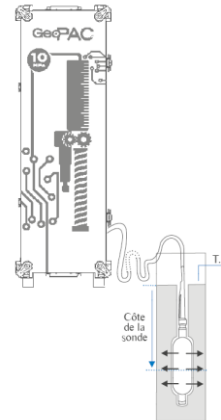
- ▶ Le GeoPAC effectue des paliers de **PRESSION** (liquide) croissant d'une durée d'une minute (ou plus, paramétrable), jusqu'à atteindre la **pression de déchargement** (paramétrée par l'opérateur) en fin de phase pseudo élastique proche de P2 puis entame les paliers de pression à la descente (un ou plusieurs, toujours au choix de l'opérateur) avant d'atteindre la **pression de rechargement** proche de P1 pour repartir en phase ascendante, etc.. en fonction du nombre de cycles choisi au début de l'essai.



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024



- ▶ Le GéoPAC effectue des paliers de **VOLUME** d'une durée réglable, jusqu'à atteindre la pression ou le volume maximal définis dans la norme pour la sonde utilisée.
- ▶ Les paliers de **VOLUME** sont croissants, engendrant une expansion de la sonde dans le forage.

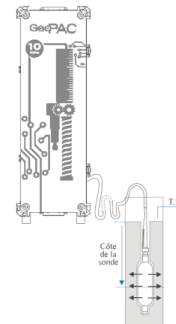


Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

129

129

- ▶ Volume Contrôlé Cyclique : Le GeoPAC effectue des paliers de **VOLUME** croissant d'une durée réglable, jusqu'à atteindre le volume de fin de phase pseudo élastique (paramétrée par l'opérateur) puis entame les paliers de volume à la descente (un ou plusieurs, toujours au choix de l'opérateur) avant d'atteindre le volume proche de V1 pour repartir en phase ascendante, en fonction du nombre de cycles choisi au début de l'essai
- ▶ Mode Mixte, Pression & Volume Contrôlé : Le GeoPAC travaille selon le choix de l'opérateur en **mode pression ou volume contrôlé** et peut **basculer de mode en cours d'essai**, sur demande de l'opérateur;



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

130

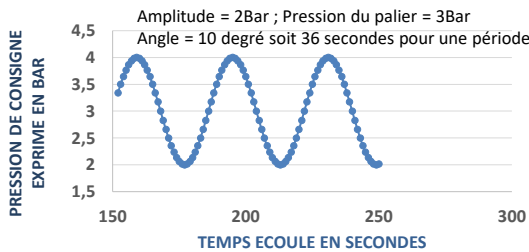
130

• Principe & algorithme :

- Palier à consigne de **pression constante ou en sinus**.
- Définition du sinus par son amplitude (bar), sa période (degré) et le nombre de période souhaité sur le palier
- **Génération d'une nouvelle consigne de pression** toutes les 500ms

• **Consigne** =  $PressionPalier + (Amplitude/2) * \sin(Angle)$   
 Où l'angle est en fonction du temps & de la période (en s) :

**Angle** =  $(Temps * 2 * \pi * 360) / période + numéropériode * 2 * \pi$



- ▶ **Extension des modes de travail** (pression & volume contrôlé, cyclique, ...) du Geopac à la **très haute pression** (300Bar max)
- ▶ Utilisation / développement d'une **sonde pressiométrique**, monocellulaire, permettant d'atteindre ces pressions élevées. 2 types de gaines sont validés et proposés : en polyuréthane et en caoutchouc toilé



Le développement de l'automatisation de l'essai pressiométrique nous a conduit à devoir quantifier et qualifier tous les phénomènes intrinsèques à l'écoulement et la mise en pression mécanique d'un liquide pour la mesure volumétrique (circuit d'eau) et en parallèle à avoir une profonde réflexion sur la régulation indépendante des 2 circuits gaz et eau.

- ▶ Mise en évidence de l'intérêt essentiel de la mesure des pertes de charge jusqu'alors jamais prise en compte par les pressiomètres classiques à pression de gaz sur la colonne d'eau et mesure volumétrique de la déformation.
- ▶ Création d'un algorithme de changement automatique de pas de pression pour rendre l'appareil autonome, tout en y intégrant la possibilité de prise de contrôle par l'opérateur (mode semi automatique.)
- ▶ Fort des possibilités offertes par la régulation mécanique de la pression et du volume du circuit d'eau, élaboration de plusieurs programmes d'essai permettant tous les scénarii d'essai possibles ( pression et volume contrôlés, cyclique en pression et en volume, mode mixte volume/pression, mode Hyper Pression jusqu'à 300 bars, cyclique sinusoïdal...), décrit maintenant dans la toute dernière révision de la norme NF EN ISO 22476-5:2023
- ▶ Apport d'un gain très important de précision sur les volumes et les pressions avec le contrôle micrométrique du piston, la régulation permanente des pressions et la simultanéité des prises de données
- ▶ Ne jamais oublier que l'automatisation de toute la procédure d'essai libère le sondeur d'une tâche répétitive, mais que l'essentiel pour la qualité de l'essai reste la maîtrise du calibrage du forage et de la réduction de la décompression entre forage et essai : un essai automatisé dans un forage médiocre donnera une courbe précise, celle d'un sol sous-estimé.

Merci à tous pour votre attention!



## Mesure de la pression interstitielle

Travaux réalisés pour l'ARSCOP dans le cadre de la thèse CIFRE  
soutenue par P.G. Karagiannopoulos le 11 décembre 2020

Présenté par Michaël PERONNE (encadrant entreprise) et Philippe REIFFSTECK (directeur de thèse)  
[mperonne@jeanlutzsa.com](mailto:mperonne@jeanlutzsa.com) - [philippe.reiffsteck@univ-eiffel.fr](mailto:philippe.reiffsteck@univ-eiffel.fr)

### ► Mesure de la pression interstitielle

- 1. Problématique et objectifs
- 2. Revue de la littérature
- 3. Méthodologie
- 4. Chambre d'étalonnage
- 5. Résultats des essais monotones
- 6. Résultats des essais cycliques
- 7. Modélisation et simulations
- 8. Essais sur site
- 9. Instrumentation développée
- 10. Conclusions et perspectives

### ► Problématique

- Rôle prépondérant à la mécanique des sols :
  - Caractérisation du sous-sol.
  - Evaluation de la portance.
- Pas de mesure directe de la pression interstitielle lors des essais pressiométriques.
- Limite l'analyse des contraintes effectives et du drainage du sol.
- Besoin de méthodes fiables pour évaluer le risque de liquéfaction des sols.

### ► Objectifs

- Développer des prototypes pour mesurer la pression interstitielle.
- Réaliser des essais monotones et cycliques sur différents types de sols.
- Comparer les résultats des essais *in situ* et en chambre d'étalonnage.
- Développer une méthode pour évaluer le potentiel de liquéfaction des sols.

### ► Historique de l'essai pressiométrique

- Développement initial par Louis Menard en 1955.
- Devenu indispensable pour mesurer la portance et analyser le comportement des sols.

### ► État de l'art et évolution des matériels

- Prototypes de pressiomètres avec mesure de la pression interstitielle (PAF LPC, SBP Cambridge *in situ*, Diflupress).
- Innovations récentes et leurs applications : miniaturisation, amélioration de la précision et de la fiabilité.

### ► Importance de la mesure de la pression interstitielle

- Fournit des informations supplémentaires sur les contraintes effectives et le comportement du sol sous chargement.
- Améliore l'analyse pressiométrique : conception sécurisée des fondations.
- Problèmes et défis : mise en œuvre, fiabilité, précisions.

### ► Prototypes développés

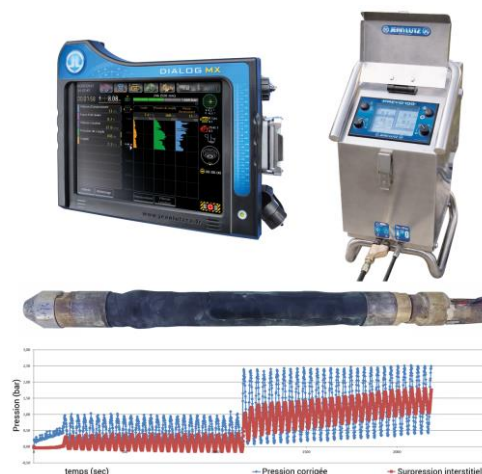
- Sondes utilisées : Menard 60 et 44 (tube fendu), SBP Cambridge *in situ*.
- Intégration d'un capteur de mesure de la pression interstitielle, optimisation de la protection électronique.

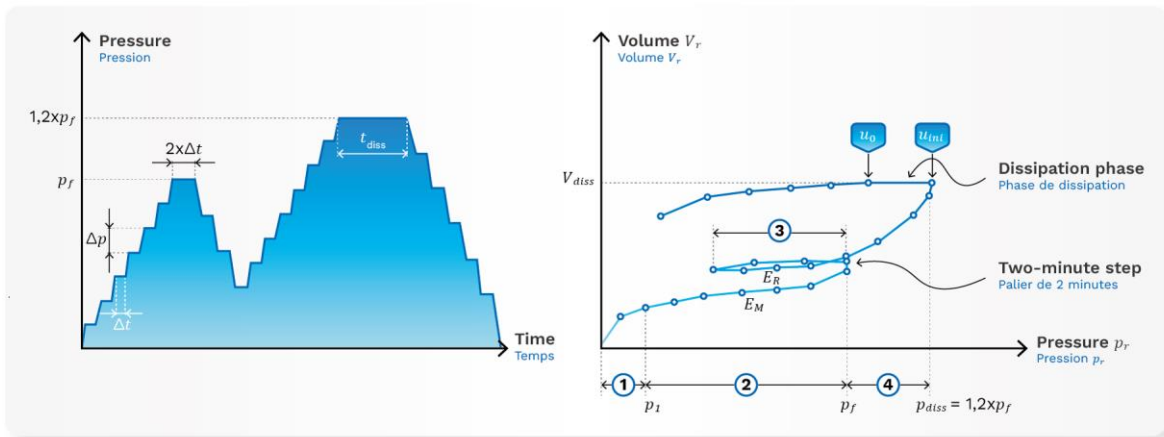
### ► Procédure des essais

- Essais monotones : mesures qualitatives (type de sol, drainage) et quantitatives (portance en contraintes effectives).
- Essais cycliques : simulation des conditions réelles pour évaluer la fatigue et la liquéfaction des sols.

### ► Chambre d'étalonnage

- Environnement contrôlé, conception étanche, répartition des capteurs.
- Procédures expérimentales : installation sonde, étanchéité, choix du type d'essai.
- Validation : homogénéité des contraintes, comparaison avec des essais triaxiaux et simulations numériques.





### ► Conception et utilité

- Construction d'une chambre d'étalonnage pour des essais sous conditions contrôlées.
- Conception étanche avec capteurs de pression et de déformation.
- Utilisation des sondes Menard et SBP Cambridge *in situ*.
- Étude des pressions totales et interstitielles, isolation des paramètres influents.

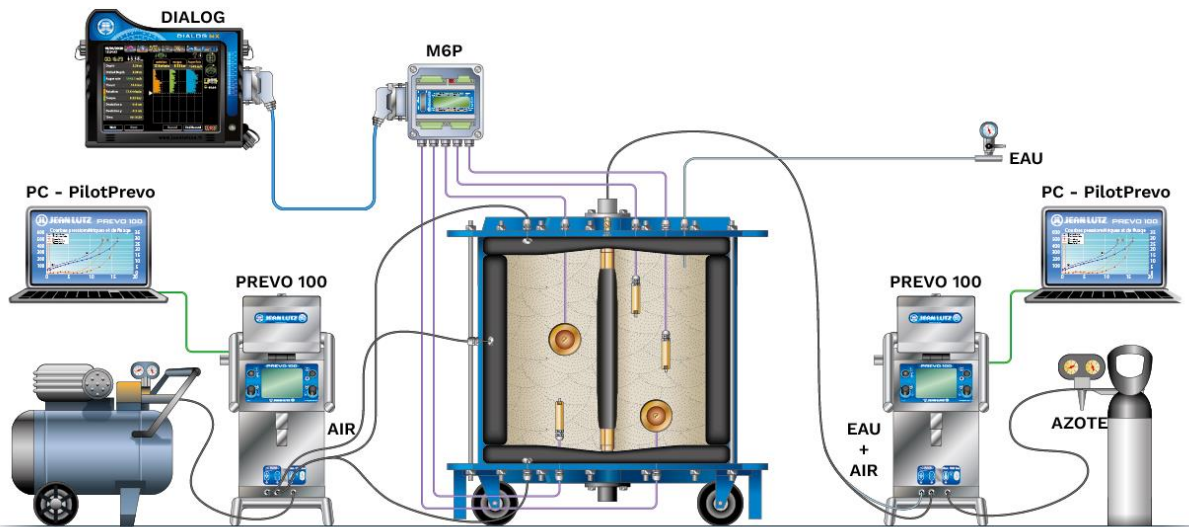
### ► Procédures expérimentales

- Préparation des échantillons de sol, installation et vérification des sondes.
- Essais monotones (atteinte rupture) et cycliques.
- Contrôle des conditions de drainage pour des essais drainés et non drainés.

### ► Validation et homogénéité des contraintes

- Vérification de la précision et de la fiabilité des mesures.
- Comparaison avec les essais triaxiaux et autres méthodes de laboratoire, simulations numériques.





Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

Mesure de la pression interstitielle

145

145

### ► Types de sols testés

- Argile (plastique, peu perméable, courant).
- Sable (perméable, faible cohésion, impacté par les conditions de drainage).
- Limon (intermédiaire, commun : affecte la stabilité des structures).

### ► Analyse qualitative

- Identification rapide du type de sol.
- Indication sur le niveau de drainage (perméabilité et dissipation).

### ► Analyse quantitative

- Calcul de la portance réelle en contraintes effectives.
- Obtention des déformations et contraintes.

### ► Phénomènes observés

- Comportements différents des sols sous sollicitations monotones (argile, sable, limon).
- Impact de la pression interstitielle sur les résultats : évaluation des risques (liquéfaction, déformation).

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

Mesure de la pression interstitielle

146

146

### ► Types de chargements

- Chargements statiques :
  - Evaluer la capacité portante du sol, les déformations associées.
  - Charge monotone jusqu'à rupture (application progressive), mesure des pressions interstitielles.
- Chargements cycliques :
  - Evaluer la fatigue du sol sous des cycles répétés de charge et de décharge (conditions dynamiques réelles : vagues, vent, séismes).
  - Cycles de charge-décharge contrôlés en amplitude et en fréquence, surveillance continue.

### ► Phénomènes observés

- Fatigue du sol, liquéfaction :
  - Diminution de la résistance au cisaillement, augmentation des déformations.
  - Analyse des cycles critiques, impacts sur la stabilité du sol (conception des fondations).
- Comportement à la rupture :
  - Observation des déformations et de la résistance sous charges cycliques.
  - Identification des seuils critiques, comparaisons avec les essais monotones.

### ► Simulations numériques avec Cesar-LCPC

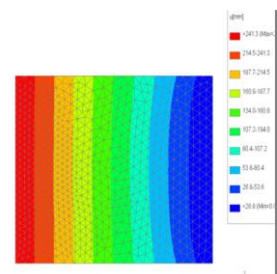
- Modélisation des essais pressiométriques.
- Utilisation de lois de comportement rhéologique pour les matériaux.

### ► Modélisation analytique avec Python

- Développement de modèles pour analyser les résultats des essais.
- Calcul des paramètres principaux du sol.

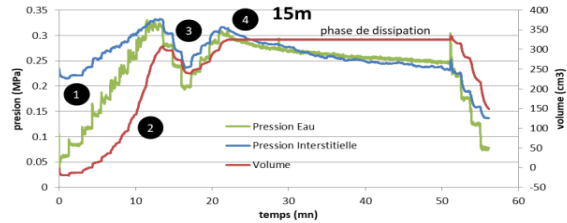
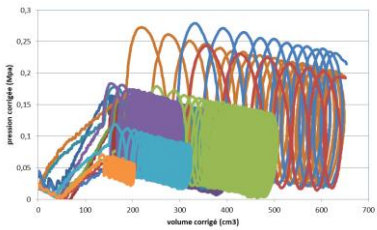
### ► Comportement rhéologique des matériaux

- Analyse des résultats expérimentaux, analytiques, et numériques.



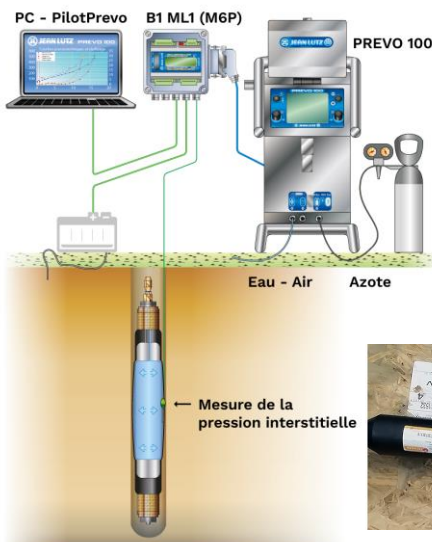
► **Résultats des essais in situ**

- Réalisation d'essais sur différents sites (Newington, Saint Malo, Saint Benoit des Ondes, Messanges).
- Comparaison des résultats des essais monotones et cycliques.



► **Nécessité de la mesure de la pression interstitielle**

- Importance de cette mesure pour une meilleure compréhension du comportement du sol.
- Apport à la caractérisation des sols et à l'évaluation du risque de liquéfaction.



### ► Conclusions principales

- La mesure de la pression interstitielle améliore significativement l'analyse des essais pressiométriques.
- Les essais cycliques permettent d'évaluer la liquéfaction des sols.

### ► Implications pratiques et théoriques

- Meilleure reconnaissance des sols pour les projets de construction.
- Nouvelles méthodes pour évaluer les risques de liquéfaction.

### ► Perspectives

- Développement d'outils plus précis et robustes pour la mesure de la pression interstitielle.
- Études supplémentaires pour valider les modèles théoriques et numériques.
- Possibilité d'évaluer la fatigue d'un sol.

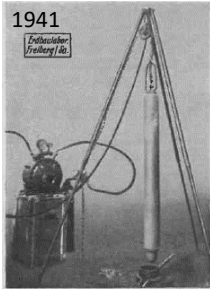
# Merci de votre attention.



## Synthèse du chapitre 3

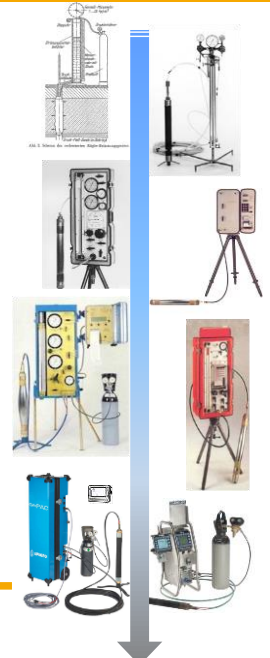
# Développement des procédures d'essais et d'interprétation

1. Introduction
2. Historique rapide (sous l'angle des innovations)
3. Les nouveaux besoins
4. Les différents protocoles
5. Discussions
6. Avancement des recommandations
7. Points divers



- 1934 Premiers appareillages d'essais d'expansion par Kögler,
- 1955 Ménard propose une nouvelle version le "pressiomètre TM"
- 1975 nouvelle génération de contrôleur pression volume et de sonde dite G
- 1978 Mort de Louis Ménard
- 1984 Apagéo et 1986 Geomatech sont créés
- 1986 premiers systèmes d'acquisitions dans le CPV
- 1992 enregistrement obligatoire et logiciels de dépouillement
- 2009 développement d'une nouvelle génération de pressiomètre contrôlé par ordinateur

et au Japan, Oyo propose le LLT-M et en Amérique du Nord Rocktest le Texam

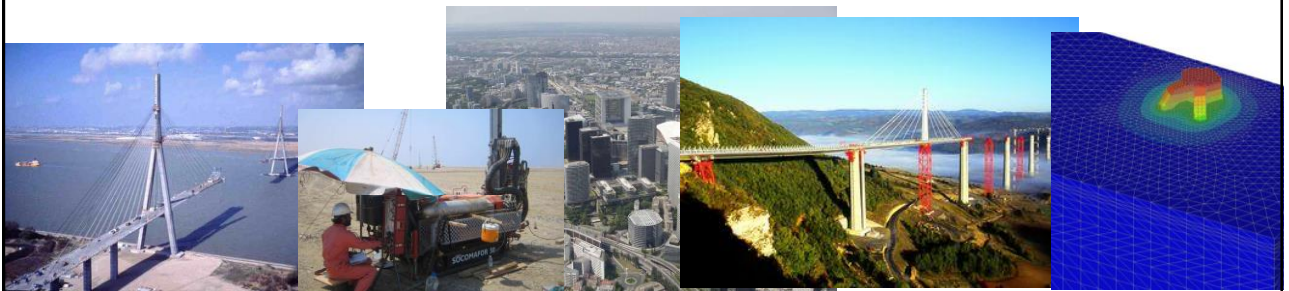


### 3 grands objectifs

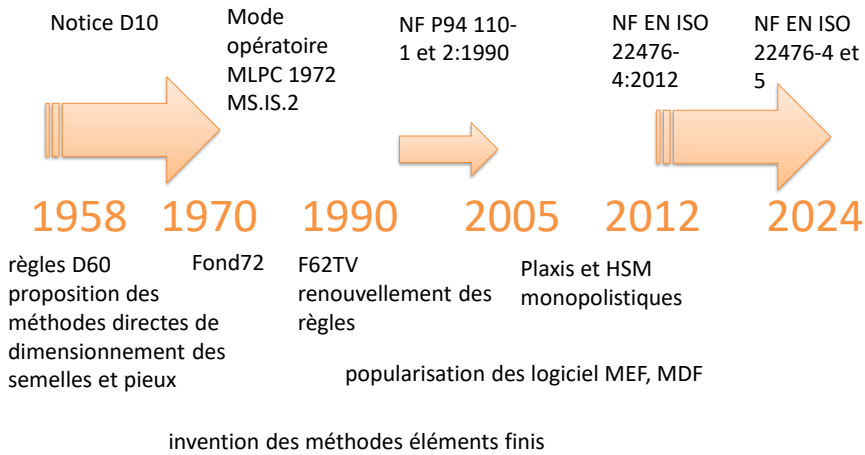
Pérenniser la pratique française

Poursuivre et renforcer le développement de l'outil pressiométrique et des méthodes de calcul associées

Créer une dynamique de diffusion de l'ingénierie pressiométrique à l'étranger

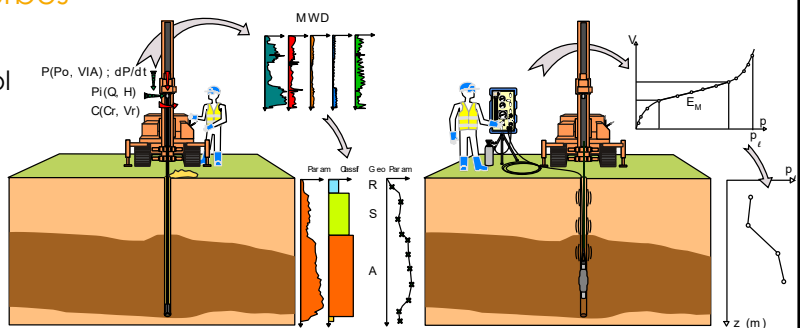


des périodes intenses et des périodes de latences

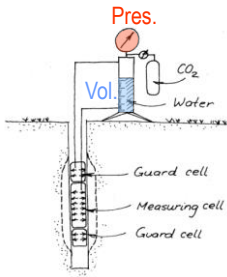


- ▶ Un forage
- ▶ Un matériel
- ▶ Un protocole
- ▶ Une interprétation des courbes
- ▶ Des méthodes directes et la mesure de la rigidité du sol

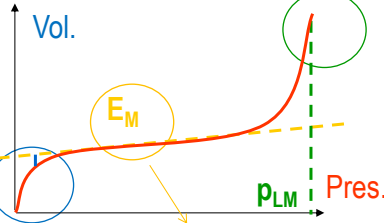
[ un outil de forage  
une sonde (Ø60, 74, etc.)  
un contrôleur pression-volume  
un programme de chargement ]



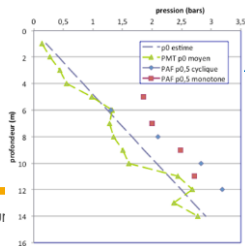
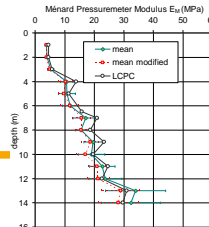
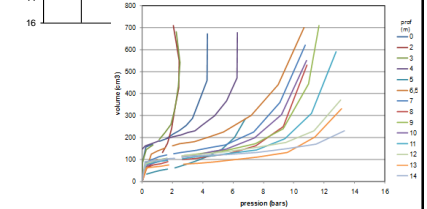
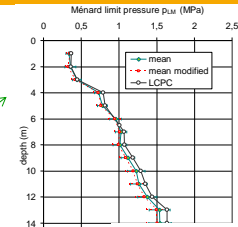
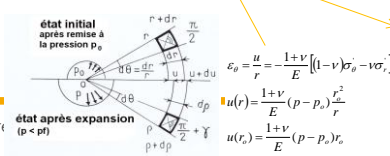
► Les paramètres dérivés



Menard limit pressure  
Menard  $E_M$  or shear  $G$  modulus  
Horizontal stress at rest



$$E_M = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \left[ V_s + \left( \frac{V_2 + V_1}{2} \right) \right] \cdot \frac{(p_2 - p_1)}{(V_2 - V_1)}$$



Jour 26 septembre

► Les travaux d'ARSCOP et leurs retombées

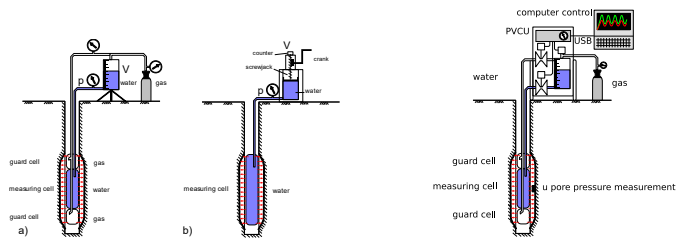
- essais croisés (Cran, Messanges, Plancoet, etc.)
- développement de matériels (automatisation, capteurs, etc.)
- les avancées au niveau des normes ISO (nouveaux protocoles permis, etc.)



► Appareillage

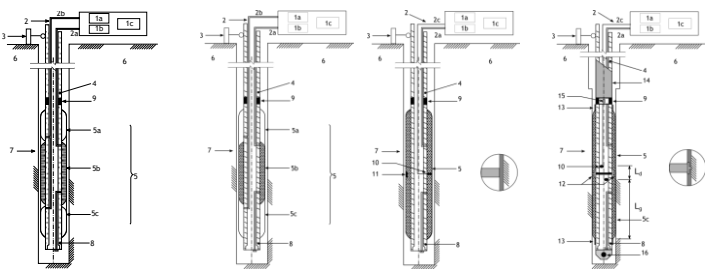
- contrôleur pression volume

c.f. présentation de D.Brechot-L. Daré



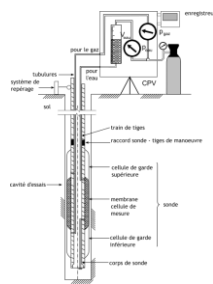
▪ sonde

- gaine souple
- gaine souple avec protection
- tri ou monocellulaire

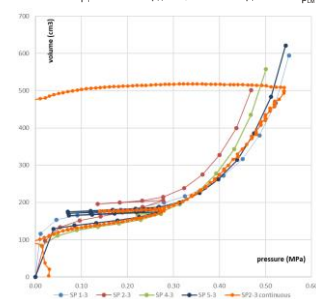
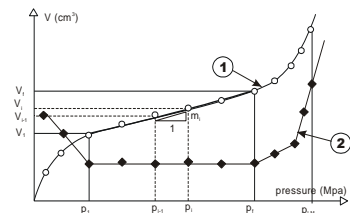
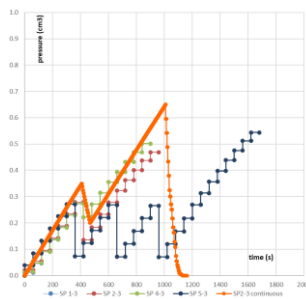
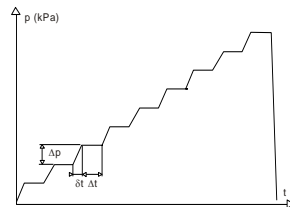


► Mode opératoire

- protocole Ménard

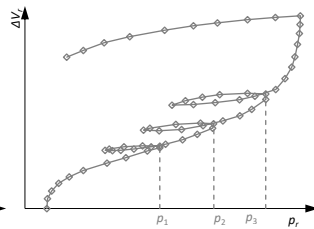
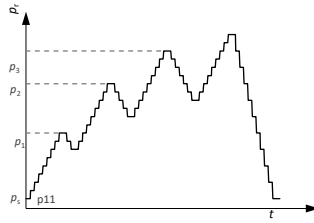


protocole robuste et éprouvé

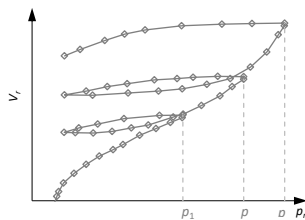
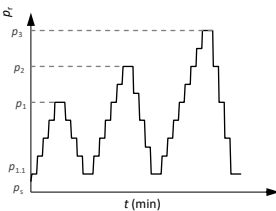


► Protocoles ouverts  
 ■ avec boucles

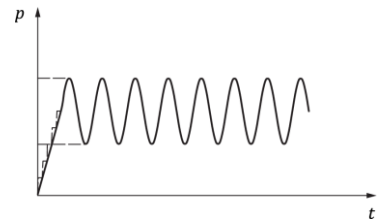
voir aussi présentation de A. Lopes



avec palier de volume ou pression constante

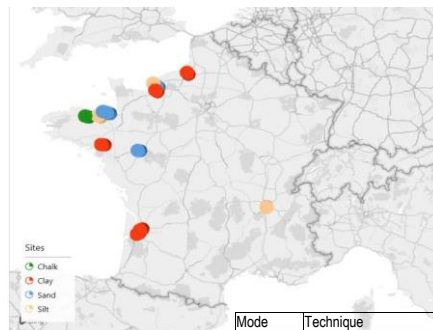


avec cycles



► Démarche partagées,  
 ■ quelques difficultés

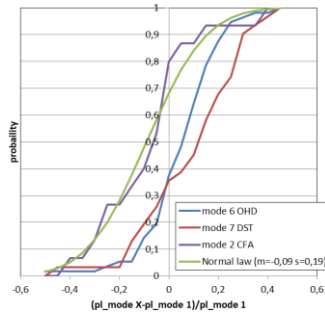
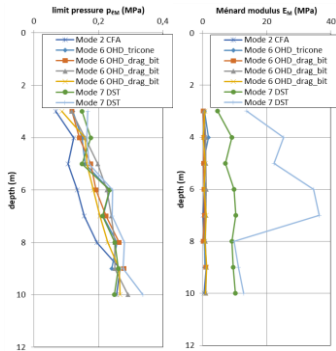
		Ground classification												
		fine soils			silt		sand			gravel		rock		
		1	2	3	1	2	1	2	3	1	2	1	2	
open hole	hand auger	-	+		-	+	-	+						
	hand auger mud	+	+		+	+	+	+						
	continuous flight auger	-	o	+	-	+	-	+	+	o	o	+		
	drag bit	-	o	+	o	o	o	+	+	o	o	+	+	+
	sampler	-	-	+	-	-	-	-	-				+	+
full disp.	rotary percussion	-	-	o	-	o	-	o	+	o	o	+	+	+
	hammered thick tube	-	-	o	-	o	-	o	+	o	o	+	+	+
	vibro driven sampler	-	-	o	-	o	-	o	+	o	o	+	+	+
tubing	driven slotted tube	-	-	o	-	o	-	o	o	o	o	o	+	+
	vibro driven slotted tube	-	-	o	-	o	-	o	o	o	o	o	+	+
	self-boring probe	+	+		+	+	+	+						
	slotted tube with inside drilling tool	-	-	o	o	o	o	+	+	+	+	+	+	+
	- not recommended	1 soft		2 medium		3 stiff		1 below Water Table		2 medium		3 dense		1 weathered
	+ recommended													2 sound
	o Permitted													



Mode	Technique	Acronym	Diam
Mode 1	Hand Auger, meter by meter	HA	60
Mode 2	Continuous flight auger, meter by meter	CFA_u	63
Mode 3	Continuous flight auger, in a single pass	CFA_u	63
Mode 4	Rotary percussion, meter by meter	ROTOP	
Mode 5	Desagregating tool, in a single pass	OHD_u	63.5
Mode 6	Desagregating tool meter by meter	OHD	63.5
Mode 7	Driven slotted tube	DST	63
Mode 8	vibro-driven slotted tube	VDT	63
Mode 9	Hammered thick tube	CS-TKWH	63
Mode 10	Core drilling	CD	

► Etude de l'influence du mode de forage

- sur la pression limite
- sur le module



soil displacement		without						with		
		rotary			Rotary perc.			Driven tube		
Soil and rock type ISO 14688-1&2 and ISO 14689		OHD (M)	HA (M)	CFA	CD	RP (M)	ST DT (M)	OS T	VD	DST
fine	soft clay	++	+++	+	+		+	+++	-	
	firm	+++	+++	++	++		++	++	+	
	stiff	+++	+	+++	+++	-/+	++	+	+	
coarse	silt	+++	+++	+++	++		++	++	+	-
	above WT below WT	+++	++	-	+	-/+	++	-	-	+
very coarse	sand	+++	+++	++	+		++	-	-	-
	above WT below WT	+++	++	-	-	-/+	++	-	-	+
intermediate	gravel	++	-	-	+	-/+	+++	+	+	+++
	cobbles, cobbles with gravels, boulder	++			++		++		-	++
hard soil	cohesive and non-cohesive soils: tills, alluvial depos- its, man-made, (un) treated fills	++	-/+	+	++	+/+	++		+	+
	chalk weathered rock, weak rock	+++	+/-	+	++		+++	++	+	-
rock	sound rock	++			+++	+++	+		-	-

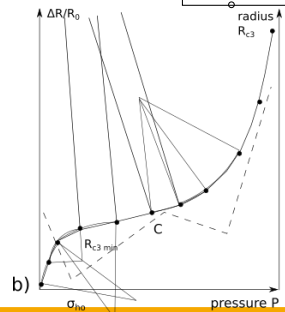
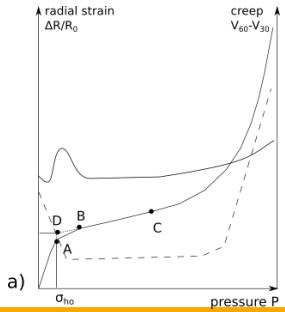
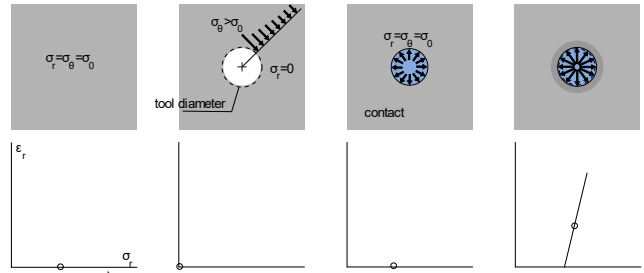
Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

► Quelques exemples complémentaires de travaux et de retombées de l'Axe 1 d'ARSCOP

- estimation de  $K_0$
- évaluation du risque de liquéfaction
- mesure de  $t_{100}$

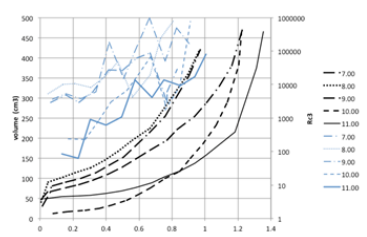
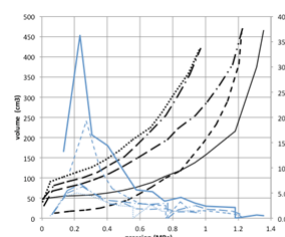
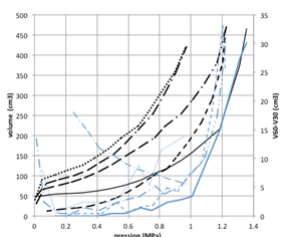
Organisation restitution #01

- ▶ méthodes basées sur les points caractéristiques de la courbe
  - Gan et Briaud (1990)
  - rayon de courbure minimal
  - Hawkins et al. (1990)
- ▶ ou des protocoles spéciaux
  - Hoopes et Hugues (2014)

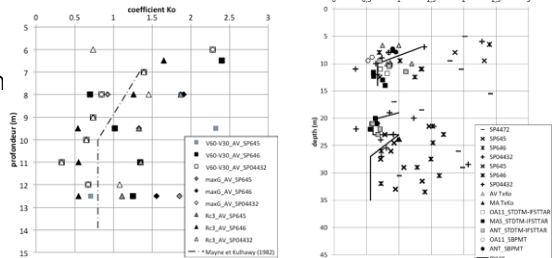


$$R_{c3} = \frac{\sqrt{[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2][(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2][(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2]}}{2[x_1y_2 + x_2y_3 + x_3y_1 + x_1y_3 - x_2y_1 - x_3y_2]}$$

▶ Quelques résultats



- Bonne qualité de prédiction
- Difficulté sur des essais de production sans précautions particulières



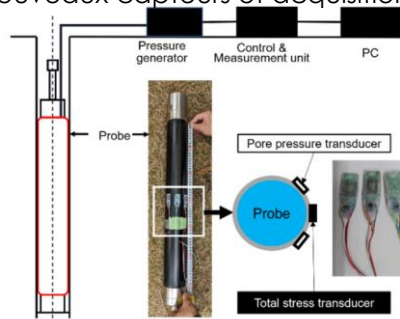
► Recherche constante

- innovation importante de tout temps demandée,
- nombreuses tentatives (LPC, Cambridge, etc.),
- faisabilité augmentée avec les nouveaux capteurs et acquisitions

c.f. présentation de M. Peronne



Karagiannopoulos, 2022

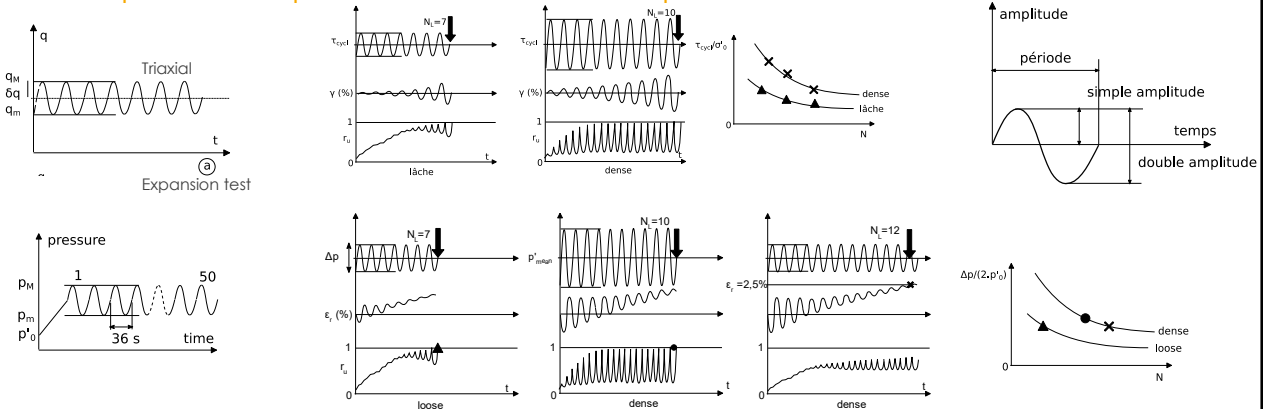


Kazama et al., 2024



Masuda et al., 2006

► Adaptation du protocole du triaxial au pressiomètre

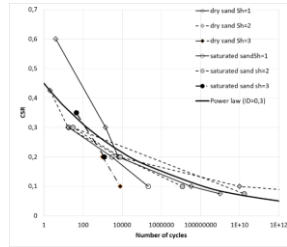
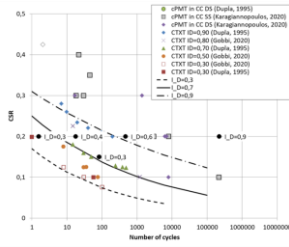


En raison de la similitude avec les essais en laboratoire, c'est-à-dire le chemin de contrainte, la mesure des contrainte-déformation-surpression interstitielle.

Déjà proposé par Masuda ou Briaud ou Jézéquel

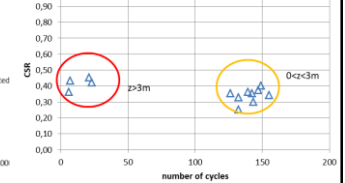
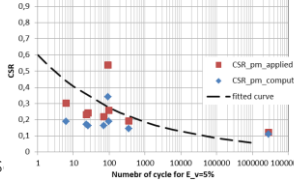
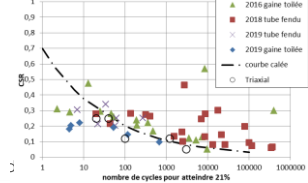
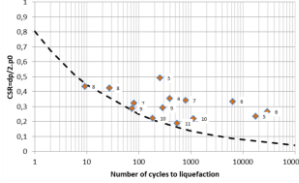
► Rappel sur les résultats avec le pressiomètre

Réalisation d'essais en chambre d'étalonnage



$$CSR_{PMT} = \frac{\delta(\sigma_r)_{cy}}{2 \cdot \sigma_{H,mean}} = \frac{\frac{p_M - p_m}{2}}{2 \cdot \left(\frac{p_M + p_m}{2}\right)} = \frac{p_M - p_m}{2 \cdot (p_M + p_m)}$$

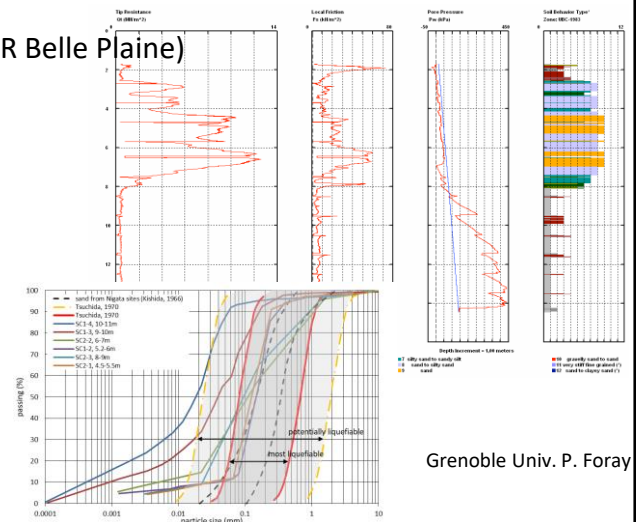
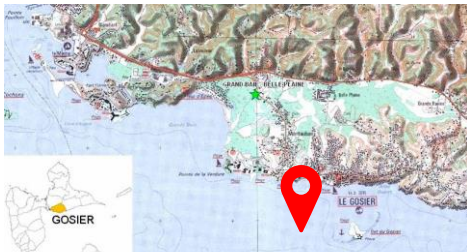
Réalisation d'essais en place



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

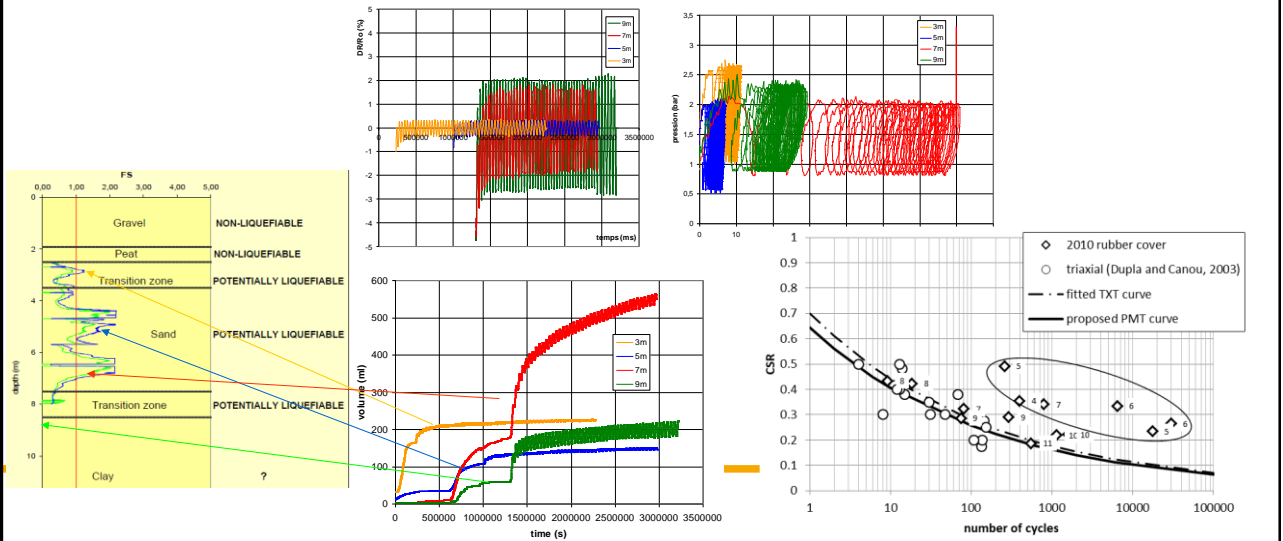
► Essais à Gosier, Antilles Françaises, Craïbes

Premiers essais sur sites réels 2010 (projet ANR Belle Plaine)



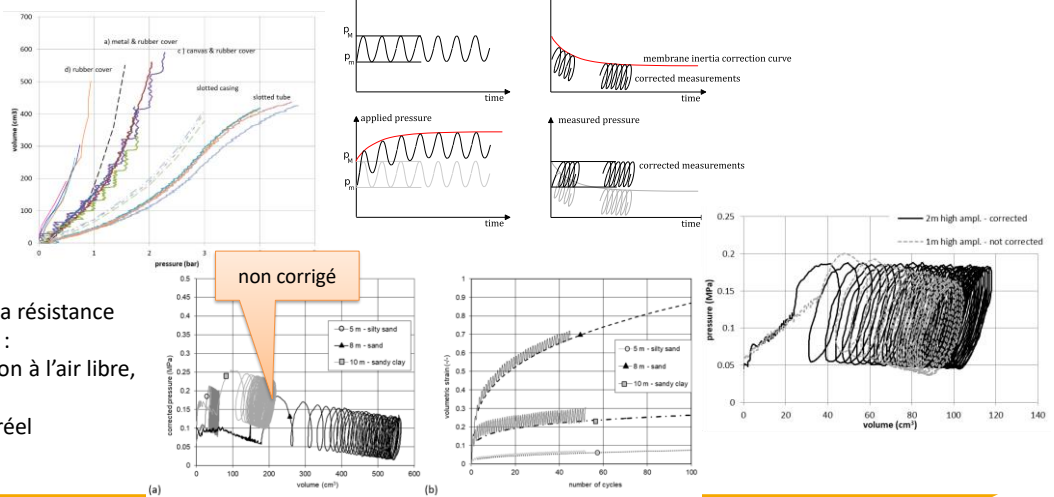
Grenoble Univ. P. Foray

- Expansion cyclique dans une zone potentiellement liquéfiable
  - indépendant de la sonde



173

- Intégration de la correction de pression en temps réel grâce aux nouveaux CPV



Problématique de la résistance propre de la sonde :

- essais d'expansion à l'air libre,
- calage,
- pilotage temps réel

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

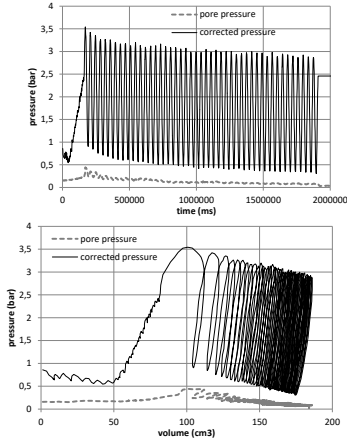
174

174

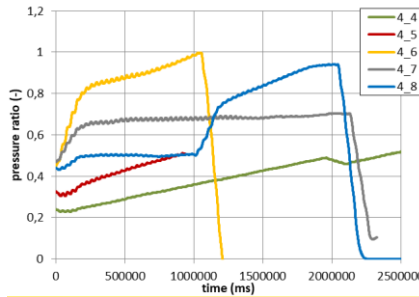


► Amélioration apportée par la mesure de la pression interstitielle

- Exemples d'essais réalisés avec le SBP avec mesure de la pression interstitielle
- réactivité, qualité de la mesure



transducteur à prix abordable (pour les montres de plongée)

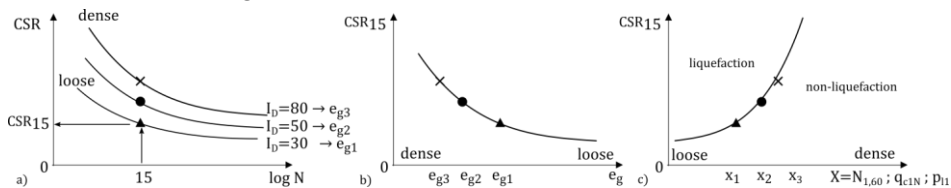


le calcul d'un ratio de surpression interstitielle  $r_u$  équivalent à celui défini pour le triaxial

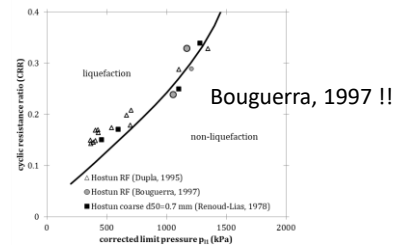
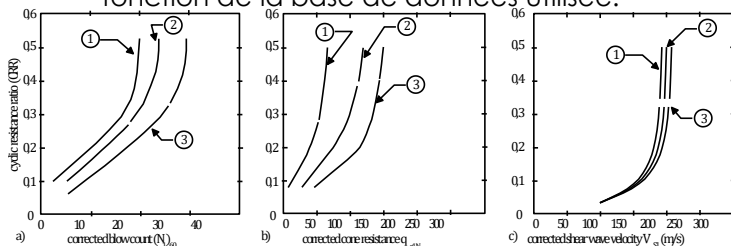


► Principe des méthodes simplifiées

- Construction de diagrammes relatifs aux paramètres de l'état d'influence



- Appliqué aux principaux tests in situ avec une version différente ou un compromis en fonction de la base de données utilisée.



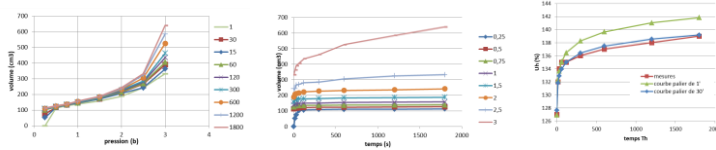
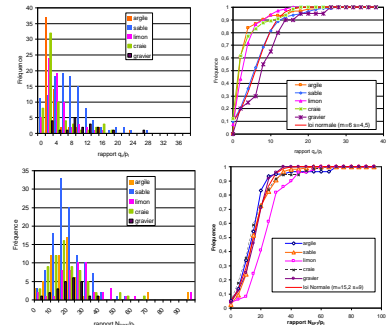
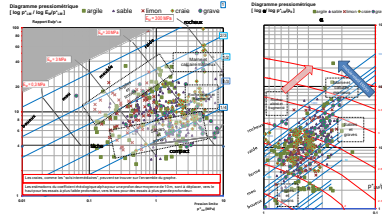


► Transposition au pressiomètre

- trois constats principaux

Corrélations fiables entre la pression limite  $p_l$  et le nombre de coups NSPT ou la résistance du cône  $q_c$

Existe à l'heure actuelle le Pressiorama cité dans les normes NF P 94-261 et 262 et une variante => pas suffisamment discriminant



La procédure d'essai comprend des phases de maintien de la pression qui permettent de mesurer la dissipation du volume.

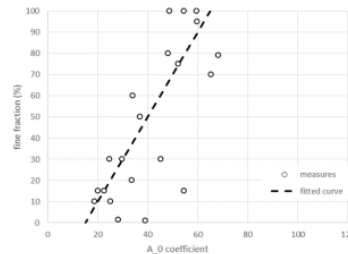
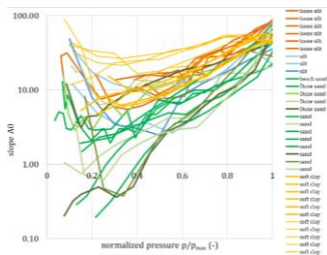
► Détermination de la quantité de fines

- Comme avec le CPT, un indice équivalent peut être utilisé pour l'estimation du pourcentage des fines. Ce coefficient est calculé par la formule suivante:

$$A_0 = \text{slope} \left( \frac{V(p)}{\log(t)} \right)$$

- Une corrélation du coefficient  $A_0$  à la phase plastique (près de la  $p_{max}$ ) avec le pourcentage des fines de l'échantillon peut être décrit par la formule suivante:

$$FC(\%) = 2 \cdot A_0 - 30$$



Base de données composée de sols réels  
Erreur sous les incertitudes dues à la variabilité spatiale

► Méthode simplifiée adaptée à l'essai pressiométrique préforé - chargement monotone

- Sur la base de résultats antérieurs

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - 2 \cdot p_{\ell 1Ncs}} + \frac{2 \cdot p_{\ell 1Ncs}}{135} + \frac{10}{(20 \cdot p_{\ell 1Ncs} + 25)^2} - \frac{1}{200}$$

avec la pression limite normalisée

$$p_{\ell 1N} = \frac{p_{\ell}}{p_a} \cdot \left( \frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n$$

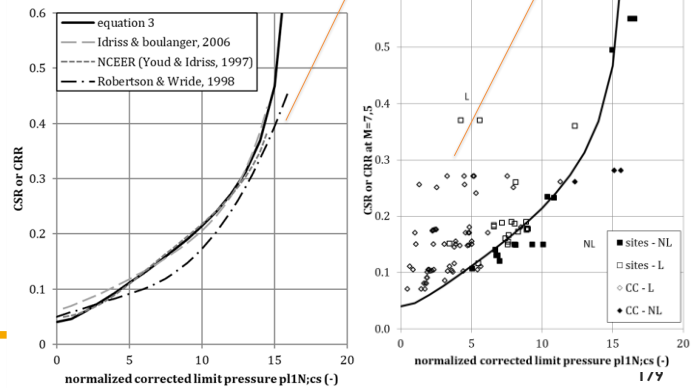
et la correction des fines

$$p_{\ell 1Ncs} = p_{\ell 1N} + \Delta p_{\ell FC}$$

- if  $FC < 5\%$        $\Delta p_{\ell FC} = 0$
- if  $5 < FC < 35\%$      $\Delta p_{\ell FC} = e^{1,6 - 190/FC^2}$
- if  $FC > 35\%$        $\Delta p_{\ell FC} = 4,3$

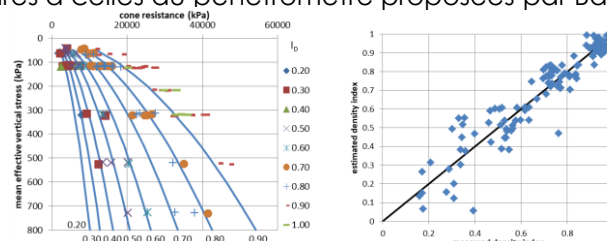
courbes obtenues par corrélation avec le CPT ou le SPT

PMT en chambre d'étalonnage et essais PMT in situ sur des sites américains, japonais et français



► Détermination de l'indice de densité

- Équations utilisées similaires à celles du pénétromètre proposées par Baldi

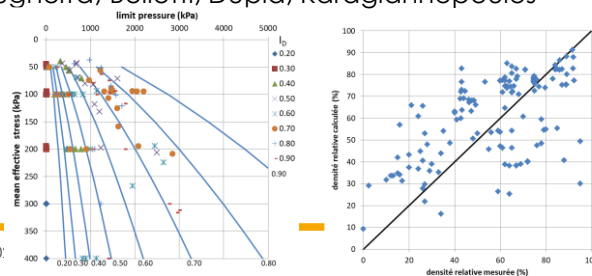


Sable Ticino chambre d'étalonnage

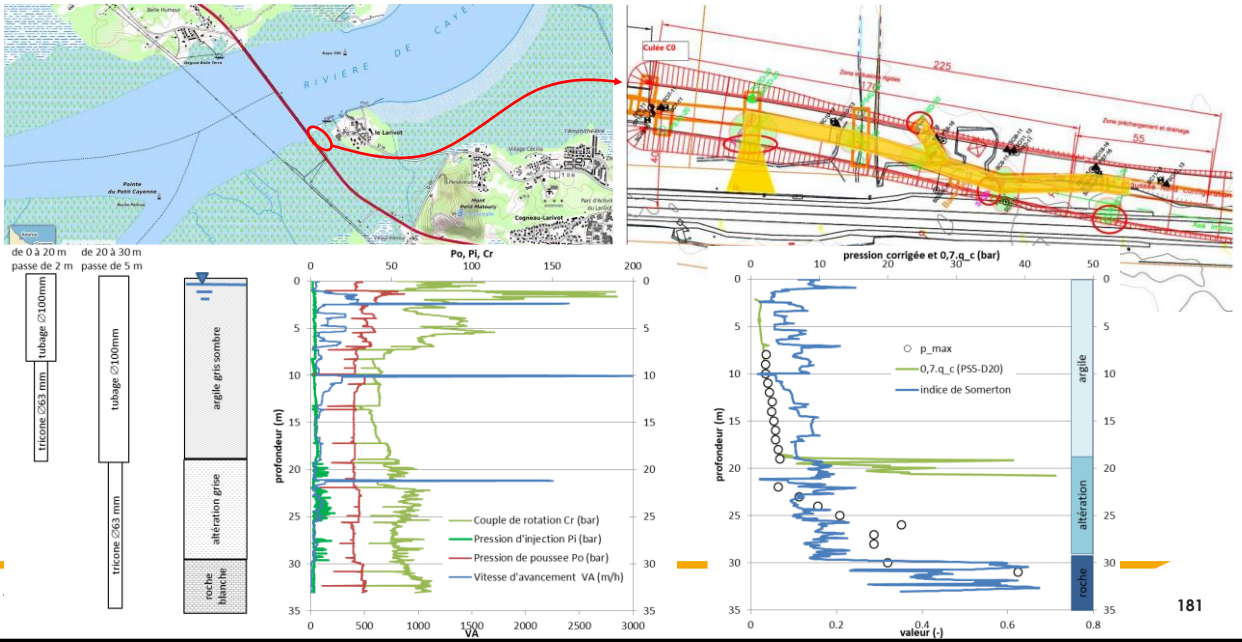
- Données de Mokrani, Bougherra, Bellotti, Dupla, Karagiannopoulos

$$I_D = \frac{1}{C_2} \cdot \ln \left[ \frac{p_{\ell}}{C_0 \cdot (\sigma'_m)^{C_1}} \right]$$

avec  $C_0=3, C_1=0.7, C_2=4$



Différents sable y compris naturels, chambre d'étalonnage et in situ



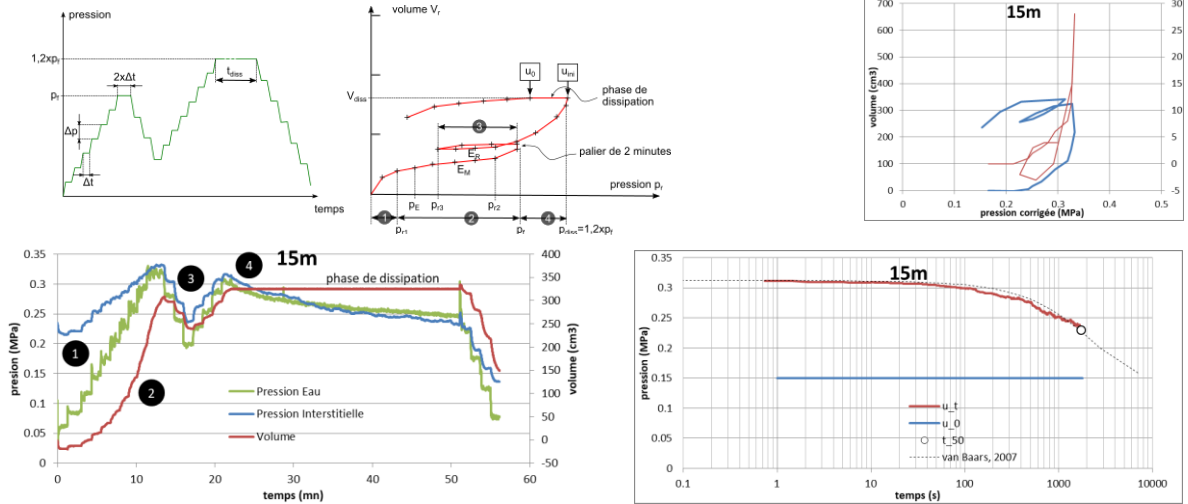
181

► Matériel



182

► Programme d'essais et résultats

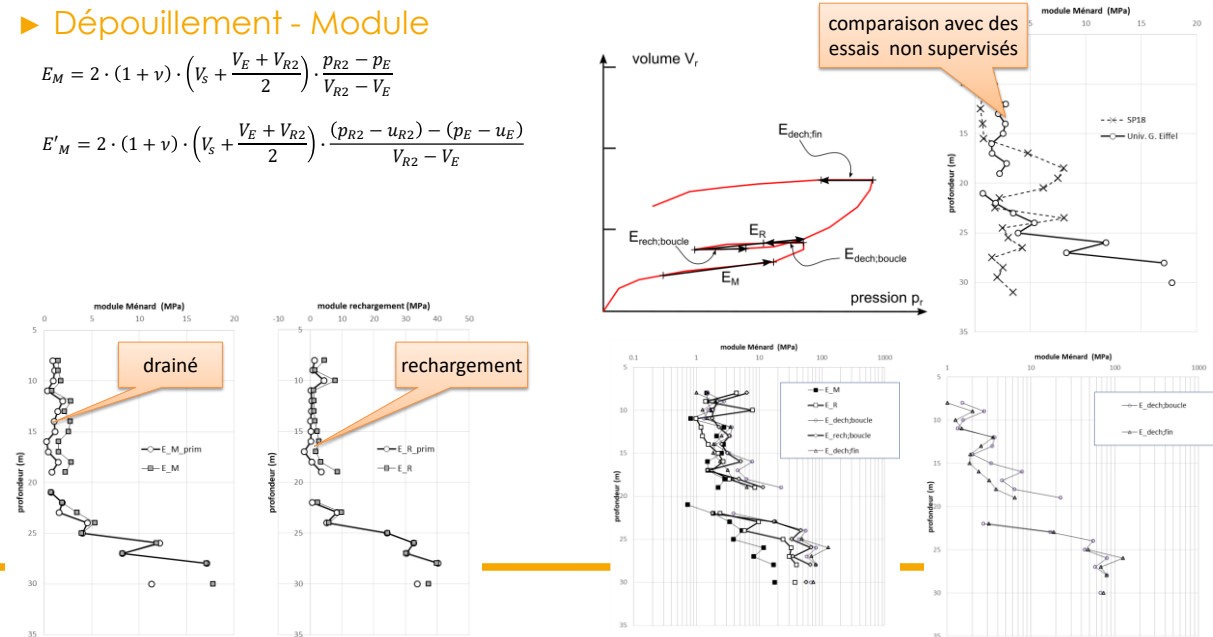


Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

► Dépouillement - Module

$$E_M = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \left( V_s + \frac{V_E + V_{R2}}{2} \right) \cdot \frac{p_{R2} - p_E}{V_{R2} - V_E}$$

$$E'_M = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \left( V_s + \frac{V_E + V_{R2}}{2} \right) \cdot \frac{(p_{R2} - u_{R2}) - (p_E - u_E)}{V_{R2} - V_E}$$



comparaison avec des essais non supervisés

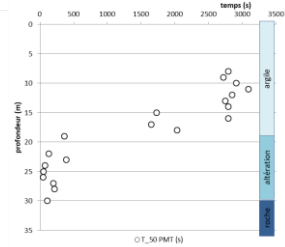
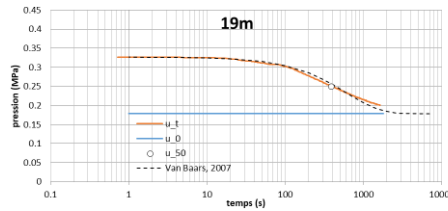
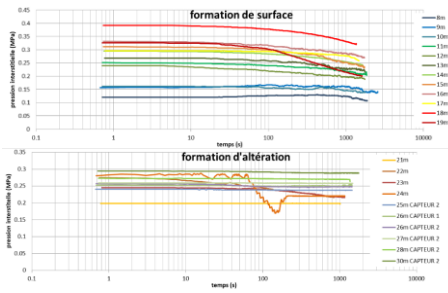
drainé

rechargement

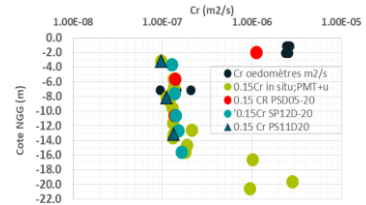
► Dépouillement – dissipation

- (van Baars, 2007)

$$\frac{\delta p}{\delta t} = c_{\beta} \cdot \left( \frac{\delta^2 p}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\delta p}{\delta r} \right)$$



FIN CPT



► Synthèse du chapitre 3

- mesure de module en petites déformations
- développement sur l'automatisation de l'essai
- développement sur la mesure de la pression interstitielle
- développement des procédures d'essais et d'interprétation

► des outils pratique et utilisables :

- matériels : CPV, sondes, capteurs, etc.,
- des protocoles: avec boucles, multicycles, dissipation,
- de nouvelles interprétations : modules,  $K_0$ , Cr, liquéfaction,

► Place aux questions

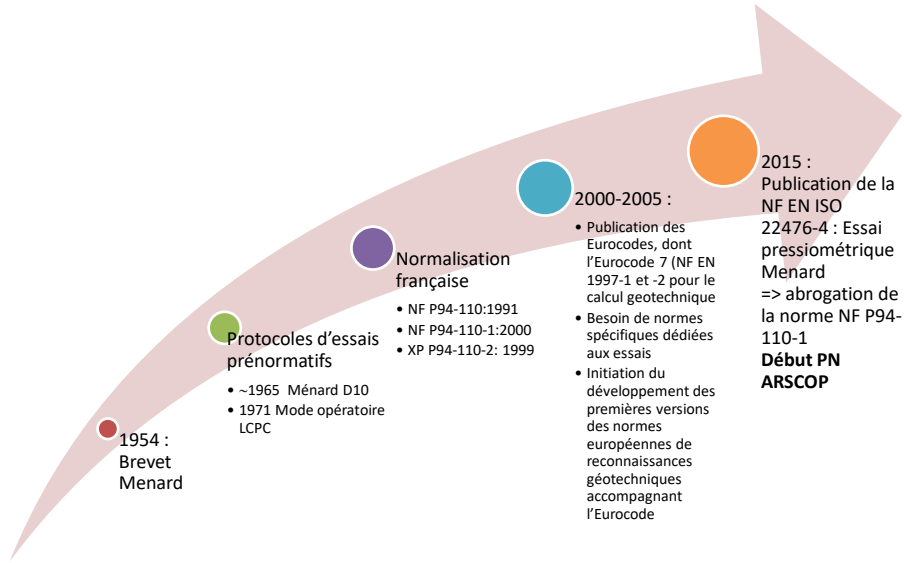
## Journée de restitution

### Essais d'expansion en forage : normalisation en France et en Europe

Jean-Pierre BAUD (Eurogéo)

Julien HABERT (Terrasol)

1. Organisation normative au début du PN ARSCOP
2. Apports du PN, mise en place de la sonde
3. Evolutions et organisation actuelle
4. Evolutions à venir



Des normes d'essais développées par le CEN (\TC341) pour accompagner l'Eurocode 7,

Reprises au niveau ISO (\TC182) : accords de Vienne

=> normes NF EN ISO 22476-i

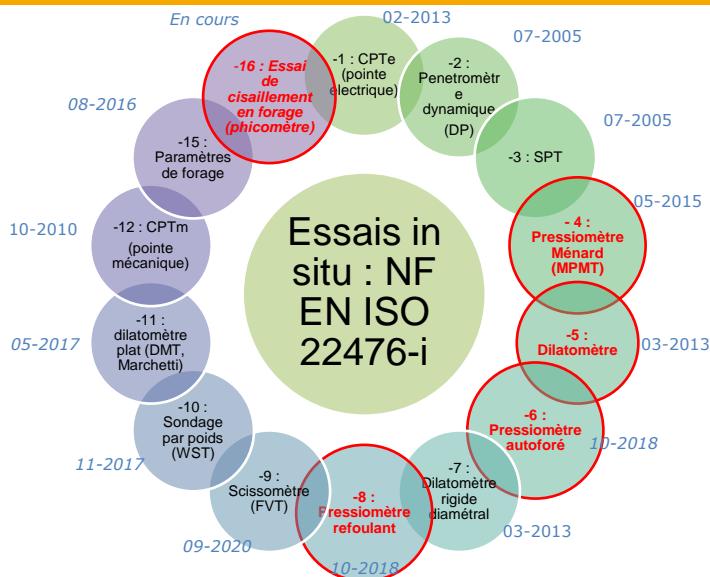
Normes d'essais d'expansion en forage organisées en 4 documents :

- selon la technique de mise en place de la sonde
- une spécificité (22476-5) pour les dilatomètres

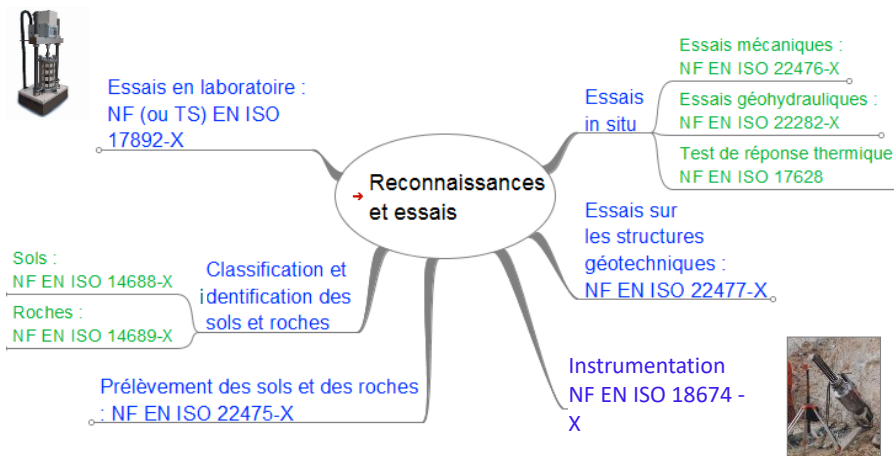




Des normes d'essais d'expansion en forage qui s'inscrivent dans la série des essais in situ mécaniques



Des normes d'essais in situ s'inscrivent elles-mêmes dans le panel de normes EN ISO sur les investigations géotechniques



## Normes NF EN ISO 22476-i : différents niveaux de directivité

Norme directive, dans la continuité de la pratique française

Des normes plus ouvertes

Protocole fixé (matériel, programme de chargement, etc.)

Différents protocoles

Paramètres dérivés et méthodes de dérivation fixés

Paramètres dérivés et méthodes associées non fixés

-4 : Essai pressiométrique Ménard

-5 : Essai dilatométrique  
→ Essai pressiométrique

-6 : Essai pressiométrique autoforé

-8 : Essai pressiométrique refoulant

## ESSAI PRESSIOMÉTRIQUE MÉNARD NF EN ISO 22476-4 : 2015

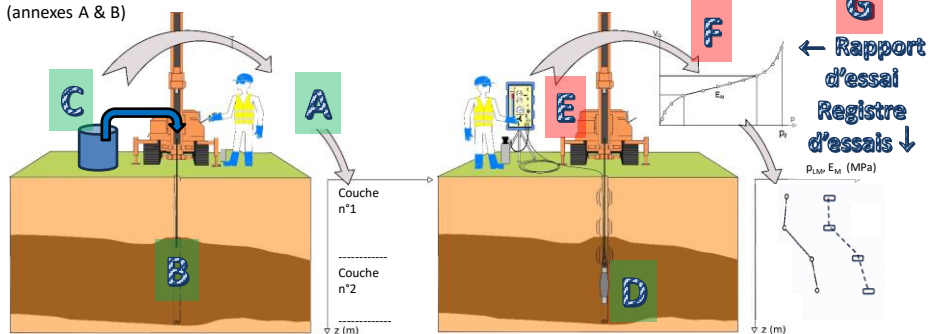
1 passe de forage de quelques mètres → 1 temps de manœuvre limité → 1 passe de 1 à 5 essais  
(annexe C.1.2, annexe C.2 et tableau C2) (annexe C.1.3) (tableau C1)

Spécifications **conseillées** pour :

- A Compte-rendu de forage
- B Diamètre des outils (C.2.2)
- C Utilisation d'une boue de forage (Avant-propos Nat.)
- D Choix des sondes (§ 4.2), étalonnages (§ 5.2), (annexes A & B)

Spécifications **imposées** pour :

- E Enregistrement des données d'essai, type A ou B (§ 1 & avant-propos, § 6.1)
- F Protocole Ménard (§5.4 à 5.7)
- G Calculs normatifs (§6 & annexe D)



G Calcul des paramètres pressiométriques et consignation dans un rapport (§6.3, 7 & annexe D)

► Mise en place de la sonde (1/2)

- Longueur maximale de passe
- Techniques de forage
- (Paramètres de forage)

► Exemple des longueurs de passe

Tableau C.1 — Longueur maximale d'une passe de forage avant de procéder à l'essai

Type de sol	Longueur maximale d'une passe de forage (m)		
	Forage rotatif adapté <sup>b</sup>	Roto percusion <sup>b</sup>	Battage, fonçage et vibrofonçage du tube lisse <sup>c</sup>
Vase et argiles molles	1 <sup>a</sup>	—	1 <sup>a</sup>
Argiles moyennement compactes	2	2	3
Argiles compactes	5	4	4
Limons:			
— au-dessus de la nappe	4	3	3
— sous la nappe	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	—
Sables lâches:			
— au-dessus des eaux souterraines	3	2	—
— sous la nappe	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	—
Sables moyennement compacts et compacts	5	5	4
Sables grossiers: graviers, cailloux	3	5	3
Sols grossiers cohérents	4	5	3
Sols non homogènes, sols atypiques (comme par exemple tills, etc.)	2	3	2
Roches altérées, roches tendres	4	5	3

<sup>a</sup> Du l'intervalle requis entre deux essais successifs.  
<sup>b</sup> Se référer au Tableau C.2 pour les techniques acceptables.  
<sup>c</sup> Non applicable à la technique TFEM (voir C.2.6.3).

► Mise en place de la sonde (2/2)

ISO 22476-4:2012(F)

Tableau C.2—Lignes directrices pour les techniques de placement de la sonde pressiométrique

Type de sol	Technique de forage	Placement de la sonde sans refolement de sol											avec fonçage direct ( $dc/dc \approx 0$ )	
		1 < $dc/dc$ ≤ 1.08												
		Forage rotatif				Rotopercussion				Tube battu, foncé ou vibrofoncé				Tube fendu foncé
		OHD	HA/HAM	CFA	CD	RP	RPM	STDTM	PT	DT	VDT	DST		
	en français	ODG	TAM/TAM-B	THC	CAR	ROTOP	ROTOP-B	TFEM	TAPM	TB	TVB-TVF	BTFD		
FINES	Vase et argile molle	**	*	***	*	—	—	—	***	*	—	*	■	
	Argiles moyennement compactes	***	*	***	**	**	—	*	*	*	—	*	■	
	Argiles compactes	***	**	***	**	*	*	*	*	*	*	*	■	
	Limons secs	**	***	**	**	—	*	*	*	*	*	*	■	
GROSSIERS	Limons sous nappe	*	*	*	*	—	*	*	*	—	—	*	■	
	Sables lâches secs	**	***	*	*	—	*	*	*	—	—	*	■	
	Sables lâches sous nappe	*	*	*	*	—	*	*	*	—	—	*	■+	
	Sables moyennement compacts et compacts	***	***	***	*	*	*	*	*	*	*	*	■+	
Cohérents hétérogènes	Graviers, cailloux	**	*	*	■	■	■	■	■	*	*	*	■+	
	Sols granulaires lâches hétérogènes	**	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	■+	
Roches altérées, roches tendres		**	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	■	
		26	25	16	15	5	19	17	2	8	5	7		

Première partie de la case (faisabilité générale) :

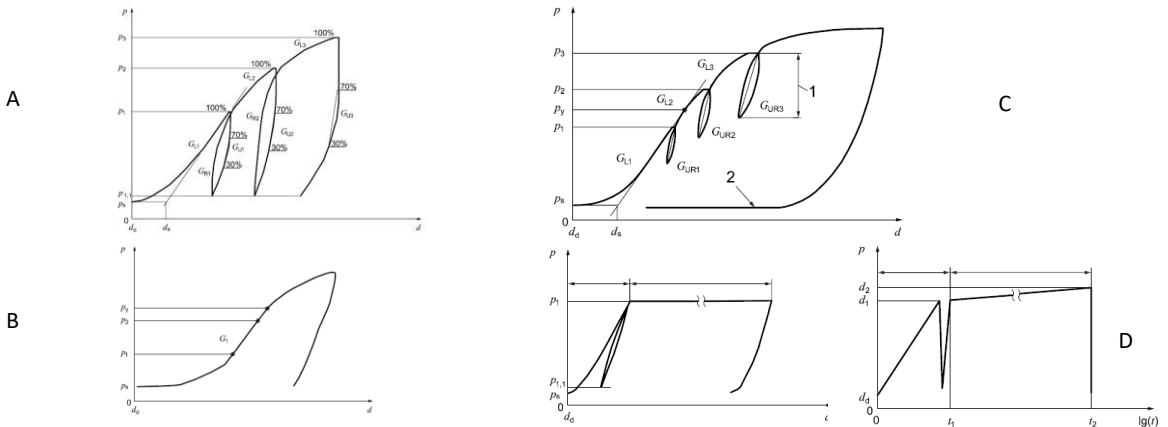
***	<b>Recommandé</b>
**	<b>Approprié</b>
*	<b>Acceptable</b>
-	<b>Ne convient pas</b>
■	<b>Non couvert par la présente norme</b>

Deuxième partie de la case : précisions éventuellement cumulées sur les conditions de mise en œuvre

■	Dépend des conditions sur sites réelles et de l'évaluation de l'opérateur -
*	La vitesse de rotation ne doit pas excéder 1 s et le diamètre de l'outil ne doit pas être plus important que 1,15 $dc$
o	Circulation de la boue: la pression ne doit pas excéder 500 kPa et le débit 15 l/min. Le débit peut être temporairement interrompu si nécessaire.
+	Trou pilote avec des techniques de préforage possibles: DST, RP et RPM
^	Nécessite des soins particuliers: ajouter un tube de protection au bout du tube fendu ; effectuer les essais en descendant ; garder le niveau de boue dans le tubage au-dessus du niveau de la nappe phréatique

► Etat des recommandations des méthodes dans la norme 22476-5: 2014

- Norme réservée au dilatomètre
- 4 modes opératoires : A, B, C, D



Normalisation France & Europe

Journée de restitution - 26/09/2024

199

199

► Plusieurs sujets traités d PN ARSCOP

- Comparaison
  - des méthodes de forage et de mise en place de la sonde
  - des résultats fournis par les différents types de sondes, etc.
- Comparaison des méthodes d'interprétation automatiques
- Critères d'arrêt

Voir ci-dessous

Définition des critères d'arrêts généralisés

Ouverture des méthodes d'interpolation  
Directivité pour le calcul de  $p_f$

Extension du protocole Ménard différents types de sonde

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

200

200

► Sondage auprès de 18 sociétés productrices d'essais

Cumul 18 réponses (1/04/19)

ISO 22476-4:2021(F)

Tableau C.2—Lignes directrices pour les techniques de placement de la sonde pressiométrique

Type de sol	Technique de forage	Placement de la sonde sans refoulement de sol											Première partie de la case			
		1-c d <sub>f</sub> / d <sub>c</sub> ≤ 1,08											1.95-2.60	***		
		Rotopercussion											1.30-1.95	**		
		Tube battu, foncé ou vibrofoncé											0.65-1.30	*		
		Forage rotatif				Rotopercussion				Tube battu, foncé ou vibrofoncé			Placement de la sonde avec fonçage direct (d <sub>f</sub> / d <sub>c</sub> = 0)			
		OHD	HA/HAM	CFA	CD	RP	RPH	STDTH	PT	DT	VDT	DST				
		Open Hole Drilling (+ Mud)	Hand Auger (+ Mud)	Continuous Flight Auger	Core Drilling	Rotary Percussion	Rotary Percussion + Mud	Slotted Tube + Inside Drilling Tube +	Pushed Tube	Driven Tube	VibroDriven Tube	Direct Slotted Tube				
		ODG	TAM/TAM+B	THC	CAR	ROTOP	ROTOP+B	TFEM	TAPM	TB	TVB-TVF	BTFD				
		Outill Destructif	Tarière A Main (+Boue)	Tarière Hélicoïdale Continue	Carrotier (en rotation)	Roto-percussion	Roto-percussion+ Boue	Tube Fendu (ouvert) avec Endoement des Matériaux	Tube (carottour) A Paroi Mince	Tube Battu	Tube VibroBattu / Vibrofoncé	Battage Tube Fendu Direct (fermé)				
FINS	Vase et argile molle	1.6	2.4	1.1	0.8	-0.1	0.2	0.8	2.2	0.3	0.0	0.4	0	< 0	Non couvert par la présente norme	
	Argiles moyennement compactes	2.3	2.1	2.1	1.7	0.3	0.9	1.3	1.3	0.9	0.4	0.0	0	0		
	Argiles compactes	2.4	1.4	2.3	2.4	0.9	1.6	1.6	0.7	0.8	0.4	0.0	0	0		
	Limons secs	1.9	2.3	2.3	1.7	0.4	1.3	1.9	1.3	0.9	0.8	0.2	0	0		
	Limons sous nappe	1.6	1.7	0.6	1.0	0.4	1.2	1.5	1.0	0.3	0.1	0.6	0	0		
GROSSIERS	Sables lâches secs	1.8	2.0	1.6	0.9	0.6	1.5	1.8	0.4	0.4	0.4	0.6	0	0		
	Sables lâches sous nappe	1.4	1.6	0.4	0.4	0.6	1.5	1.8	0.6	0.5	0.3	1.2	0	0		
	Sables moyennement compacts et compacts	2.6	1.4	2.0	1.1	1.6	2.1	2.1	0.4	0.9	0.8	1.2	0	0		
	Graviers, cailloux	1.9	-0.1	0.2	0.2	1.4	2.4	2.1	0.3	0.9	1.0	1.9	0	0		
	Cohérents hétérogènes	2.0	0.4	0.8	1.2	1.1	2.4	1.3	0.0	0.6	0.8	0.4	0	0		
Sols granulaires lâches hétérogènes		1.9	0.7	0.9	0.8	1.1	2.1	1.6	0.3	0.8	1.0	1.4	0	0		
Roches altérées, roches tendres		2.6	0.5	1.1	1.6	1.8	2.3	1.7	0.0	0.6	0.5	0.1	0	0		
Moyenne		2.0	1.4	1.3	1.1	0.8	1.6	1.6	0.7	0.7	0.5	0.7	0	0		

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

► Choix des méthodes de forage et de placement de la sonde

NF EN ISO 22476-4:2021

Introduction de la sonde		SANS REFOULEMENT du sol :											AVEC REFOULEMENT du sol		
Types de sols et de roches		Technique de forage préalable											d <sub>f</sub> /d <sub>c</sub> ≤ 1		
		1-c d <sub>f</sub> / d <sub>c</sub> ≤ 1,1 (V <sub>r</sub> < 90 m/h ; P <sub>r</sub> < 500 kPa ; Q <sub>r</sub> < 15 U/min ; V <sub>r</sub> < 60 tours par minute)													
		Forage par ROTATION				Forage par ROTOPERCUSION			Forage au CAROTTIER				Sonde FONCÉE / BATTUE		
		Outill rot. + boue	TAM	THC	Carottier rotation	ROTOP à sec	ROTOP + boue	TUBE AUTOFORE	Foncé	Battu / Vibrofoncé	Sonde foncée	Tube fendu vibrofoncé			
FINS	ARGILES	A très molles à molles	**	**	*	*	-	-	**	**	*	*	*	***	Recommandé
		B molles à fermes	***	***	**	*	-	*	**	**	*	*	*	**	Autorisé
	LIMONS	C raides	***	*	***	***	*	**	**	*	*	*	*	*	Possible
		SECS	***	**	***	**	-	*	**	**	*	*	*	*	Non autorisé
		SOUS NAPPE	***	**	-	*	-	*	**	-	*	*	*	*	Non autorisé
GROSSIERS	SABLES A lâches	SECS	***	**	**	*	-	**	**	-	-	-	-	Non autorisé	
		SOUS NAPPE	***	**	-	-	-	**	**	-	*	*	*	Non autorisé	
	SABLES & GRAVES	B moyens à compacts	***	**	***	**	*	***	***	-	*	*	*	**	Non autorisé
		C Graves	**	-	-	*	*	***	***	*	*	*	*	***	Non autorisé
		D Cailloux	**	-	-	**	**	***	**	*	*	*	*	**	Non autorisé
INTER	GROSSIERS COHERENTS	**	-	*	**	*	***	**	*	*	*	*	**	Non autorisé	
MÉDIAIRES	NON HOMOGENES	**	*	*	*	*	**	**	-	*	*	*	**	Non autorisé	
S.I.R.T.	CRAIE	***	*	**	**	**	**	**	*	*	*	*	*	Non autorisé	
	ROCHES TENDRES	***	-	*	***	**	**	**	*	*	*	*	*	Non autorisé	
ROCHE	ROCHES DURES	**	-	-	***	***	***	*	*	*	*	*	*	Non autorisé	
SCORE * par méthode		39	21	19	26	14	30	30	8	8	4	12			

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

## Normes NF EN ISO 22476-i : évolution

-4 : Essai pressiométrique Ménard

-5 : Essai dilatométrique

-6 : Essai pressiométrique autoforé

-8 : Essai pressiométrique refoulant

Edition 2 en 2021

Edition 2 en 2022

non modifié à ce stade

non modifié à ce stade

Modifications citées ci-dessus

Étendu à tous les essais préforés

Titre modifié : essai pressiométrique préforé

Et des normes d'essais désormais développées par ISO (\TC182)  
Également reprises par le CEN (\TC341) pour accompagner l'Eurocode 7

## ESSAI PRESSIOMÉTRIQUE MÉNARD NF EN ISO 22476-4 : 20212

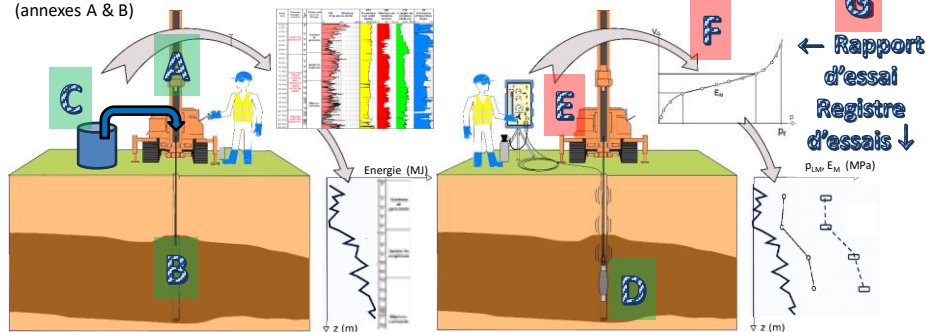
1 passe de forage de quelques mètres → 1 temps de manœuvre limité → 1 passe de 1 à quelques essais  
(annexe C.1.3, annexe C.2 et tableau C2) (annexe C.1.4) (tableau C1)

Spécifications **conseillées** pour :

- A Enregistrement des paramètres de forage (C.2.1)
- B Diamètre des outils (C.2.2)
- C Utilisation d'une boue de forage (C.2.3)
- D Choix des sondes (§ 4.2), étalonnages (§ 5.2), (annexes A & B)

Spécifications **imposées** pour :

- E Enregistrement des données d'essai, type A, B ou C (§ 4.4 & tab. 3, § 6.1)
- F Protocole Ménard (§5.4 à 5.7)
- G Calculs normatifs



G Calcul des paramètres pressiométriques et consignation dans un rapport (§6.3, 7 & annexe D)

► Longueur des passes

- Simplification
  - Ed1\_2015

Table C.1 — Longueur maximale d'une passe de forage avant de procéder à l'essai

Type de sol	Longueur maximale d'une passe de forage (m)		
	Forage rotatif adapté a	Roto percussif b	Battage du tube, forçage et vibroforçage c
Vase et argiles molles	1a	---	1a
Argiles moyennement compactes	2	2	3
Argiles compactes	5	4	4
Limons :			
: au-dessus de la nappe	4	3	3
: sous la nappe	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	---
Sables lâches :			
: au-dessus des eaux souterraines	3	2	---
: sous la nappe	1a	1a	---
Sables moyennement compacts et compacts	5	5	4
Sables grossiers : graviers, cailloux	3	5	3
Sols grossiers cohérents	4	5	3
Sols non homogènes, sols atypiques (comme par exemple tills, etc.)	2	3	2
Roches altérées, roches tendres	4	5	3

<sup>a</sup> Ou méthode plus entre deux essais successifs.  
<sup>b</sup> De préférence au Tableau C.2 pour les techniques acceptables.  
<sup>c</sup> Non applicable à la technique TFEM (voir C.2.6.3).



Ed2\_2021

Tableau C.1 — Longueur maximale d'une passe de forage ou de forçage avant de procéder à l'essai

Type de sol	Longueur maximale d'une passe de forage ou de forçage continue (m)
Vase et argiles molles	1 <sup>a</sup>
Argiles moyennement compactes	3
Argiles raides	5
Limons :	
: au-dessus de la nappe phréatique	4
: sous la nappe phréatique	2
Sables lâches :	
: au-dessus de la nappe phréatique	3
: sous la nappe phréatique	1 <sup>a</sup>
Sables moyennement compacts et compacts	5
Sols grossiers : grave, cailloux	5
Sols grossiers cohérents	5
Sols lâches non homogènes, sols atypiques (comme par exemple moraines non consolidées, etc.)	3 à 5
Roches altérées, roches tendres	5
Roches moyennement dures et dures	5

<sup>a</sup> Ou l'intervalle requis entre deux essais successifs.

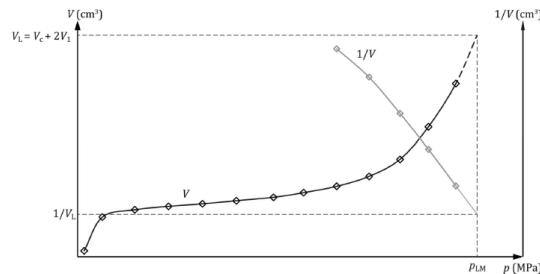
- Avant-propos national (à venir) : ajout d'une référence au même poste de travail pour les rochers

► Interprétation

- Régression sur les données pressiométriques
  - Au moins deux méthodes
    - Méthode « inverse »
    - Méthodes hyperboliques
  - Choix des méthodes laissé libre
  - Appréciation de la régression la plus précise

$$1/V = Ap + B$$

$$V = A_1 + A_2p + \frac{A_3}{(A_4 - p)} \quad V = A_1 + A_2p + \frac{A_3}{(A_4 - p)} + \frac{A_5}{(A_6 - p)}$$



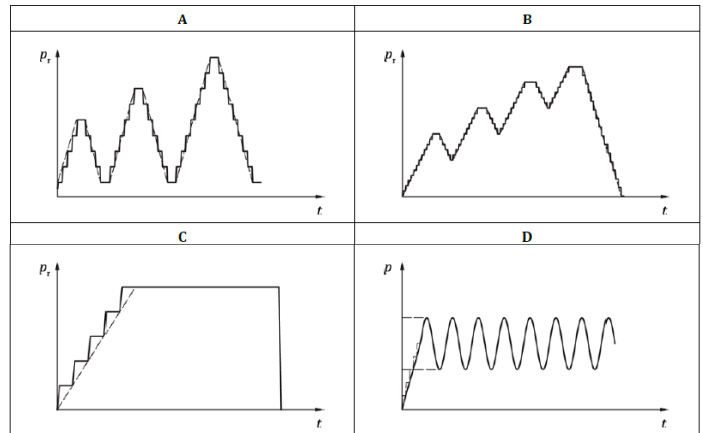
- Avant-propos national : méthode d'Hansbo recommandée pour la détermination du module pressiométrique Ménard si sonde avec tube fendu

► Evolution de la norme 22476-5:2023

- Protocoles de référence
- Etalonnage
- Commentaires sur l'interprétation

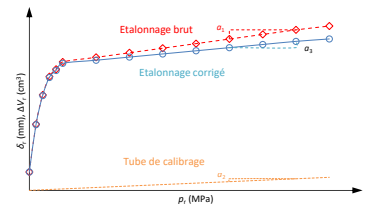
► Exemple des protocoles de référence

- Reprise des modes opératoires de la 22476-5:2013
- « Ajout » d'un programme de chargement cyclique

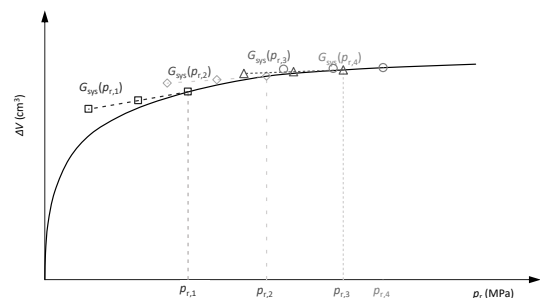
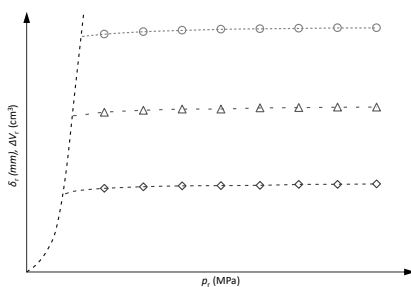


► Diversité des protocoles de la norme 22476-5 : 2022

- Etalonnages
  - Prise en compte de la déformabilité du tube



- Etalonnages supplémentaires pour modules de cisaillement G apparentes supérieurs à 200 MPa





22476-5 : ESSAI PRESSIOMETRIQUE par toute méthode de forage et/ou d'essai			
Insertion de la sonde → / Protocole d'essai ↓	Forage préalable	Autoforage	Fonçage
Pression imposée par paliers égaux	22476-4 MÉNARD		
Déformation imposée	22476-5	22476-6	22476-8
Cycles du paramètre imposé			
Hautes et très hautes pressions			
Autres formes du paramètre imposé (longue durée, sinusoïde, etc.)	22476-5 : tous autres protocoles imaginables		

► A venir :

- Une norme unique pour les essais pressiométriques autres que Ménard (22476-5, 6 et 8)?
- Méthodes d'interprétation ou corrélations?

Merci de votre attention

211

212

L'optimisation  
de la conception  
des procédés  
et des performances



nouvelles Approches de Reconnaissance  
des Sols et de Conception des Ouvrages  
géotechniques avec le Pressiomètre



## Vision internationale

### Essais d'expansion en forage : vision internationale

Marcos ARROYOS



MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE  
ET DE LA COHÉSION  
DES TERRITOIRES

Journée de restitution des résultats - 26 septembre 2024

213



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

214

214



## Journée de restitution

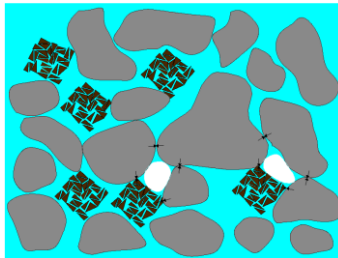
# Développements sur l'interprétation de l'essai pressiométrique en condition Non Saturée et Non Drainée

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

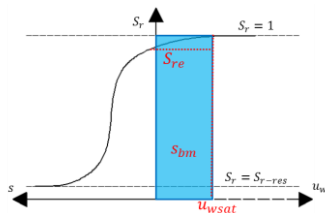
L'interprétation de l'essai pressiométrique dans l'argile peut être réalisée:

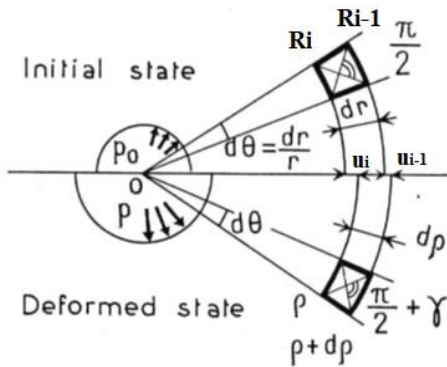
- ▶ Avec une hypothèse de Contrainte Totale, en supposant le sol saturé comme un matériau homogène et une élasticité linéaire ou non-linéaire (Gibson and Anderson 1961), (Wroth and Windle 1977), (Monnet and Chemaï 1994), (Arulrajah et al. 2011), (Habert and Burlon 2020); (Hughes and Whittle 2023) cet 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)





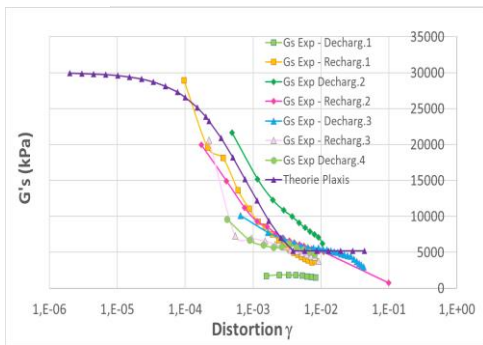
- L'équilibre du prisme élémentaire peut s'écrire par (1) ce qui permet d'avoir:
- l'évolution élastique de la contrainte radiale totale (2),
- de la contrainte radiale effective (3) et de la contrainte ortho-radiale effective (4)

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

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

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

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



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

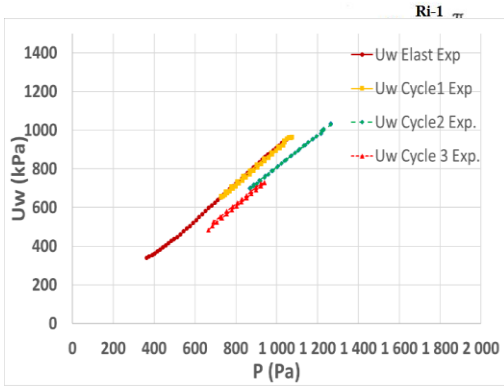
- Au chargement vierge, un comportement hyperbolique (Duncan et Chang, 1970) selon (5) avec Q le cisaillement

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

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

$$\frac{1}{G'_s(\epsilon_\theta)} = \frac{1}{G'_0} \cdot \left(1 + 0.385 \cdot \frac{\epsilon_\theta}{\epsilon_{\theta,0.7}}\right) \quad (6)$$

1.A. INTERPRÉTATION DANS L'ARGILE – VARIATION DE VOLUME ÉLASTIQUE



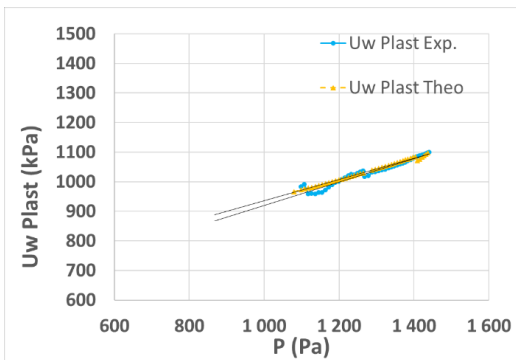
Le comportement élastique Non Linéaire a pour effet :

- 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)

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

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

1.A. INTERPRÉTATION DANS L'ARGILE – VARIATION DE VOLUME PLASTIQUE



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

- De définir le seuil plastique à partir de  $c'$  et  $\Phi'$
- De déterminer la contractance  $\Psi$  par la pente de la relation  $u_w - \epsilon_\theta$  (8)

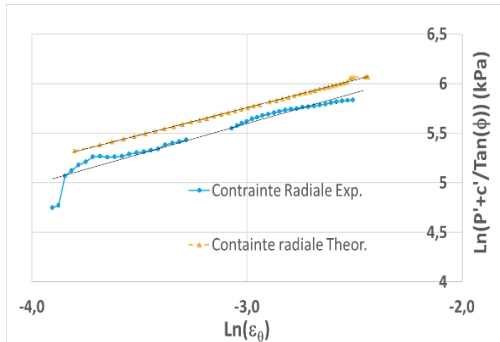
$$\sigma'_r - \sigma'_\theta - \sin \Phi' \cdot (\sigma'_r + \sigma'_\theta) - 2 \cdot c' \cdot \cos \Phi' = 0 \quad (7)$$

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

- 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):

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

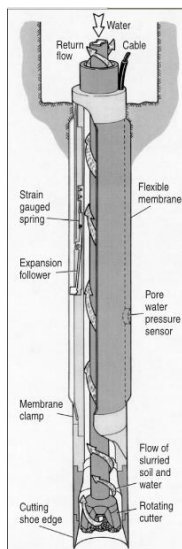
- De définir la Pression Interstitielle au seuil plastique (11) :

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

- De définir l'expression de la courbe pressiométrique corrigée du coefficient  $C_\gamma$  (12)

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

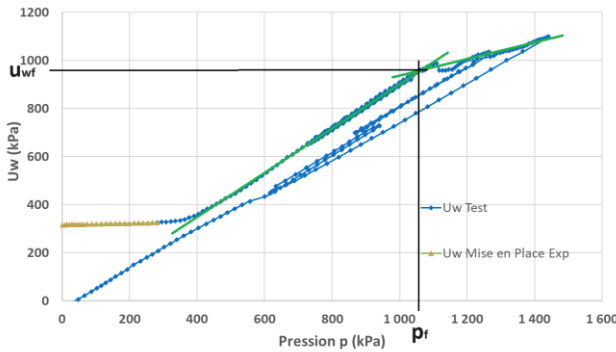
- Cette linéarité théorique est retrouvée expérimentalement



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)

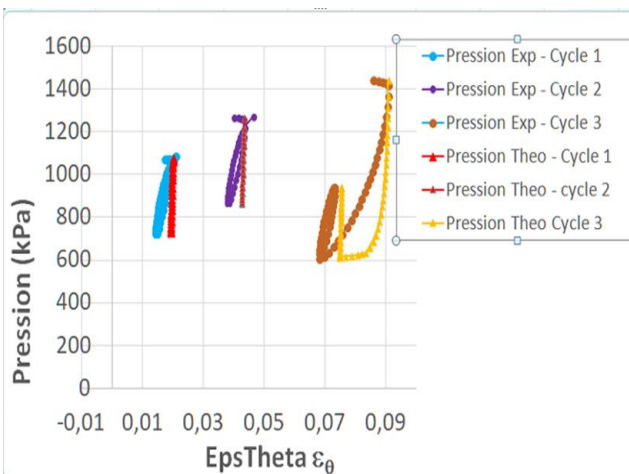
### 1.B. INTERPRÉTATION DANS L'ARGILE – ESSAI UTILISÉ



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,  $(u_{wf}, p_r)$

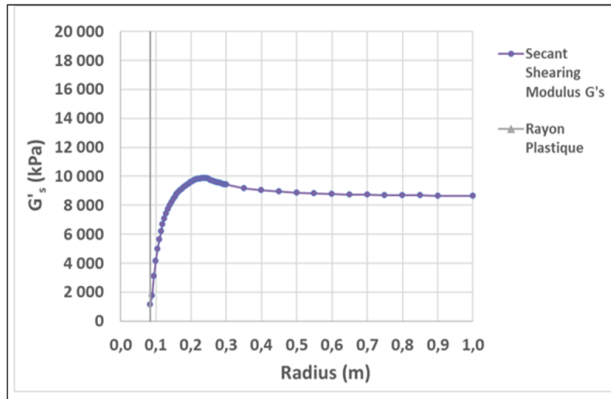
### 1.B. INTERPRÉTATION DANS L'ARGILE – VALIDATION



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

## 1.B. INTERPRÉTATION DANS L'ARGILE – RÉSULTATS



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

## 1.C. INTERPRÉTATION DANS L'ARGILE – PRESSION INTERSTITIELLE

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	$G'_{ss0}$	$G'_{s50}$	$G'_{sFin}$	$G_e/G'_s$	$G_s$ 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,...)

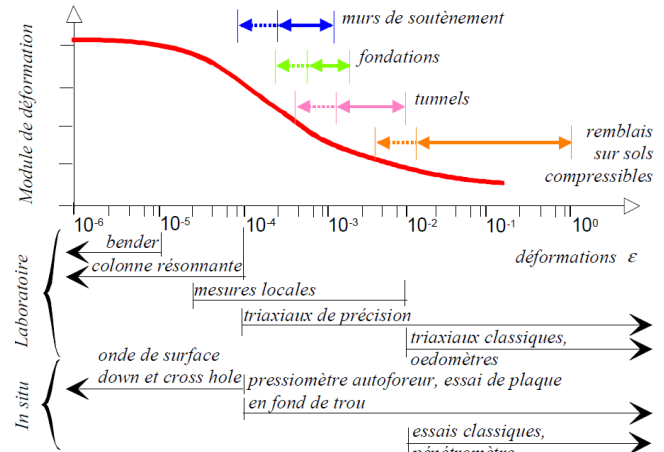
Merci de votre attention

## 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

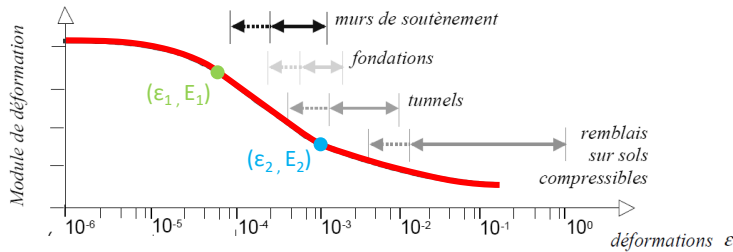
Petitjean et al., JNGG 2022)

► Facteur de courbure  $d = a / \epsilon_{0.7} = a / Y_{0.7}$

$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{1}{1 + a \left( \frac{\epsilon_1}{\epsilon_{0.7}} \right)}$$

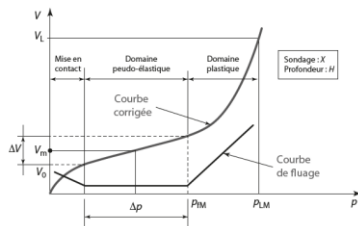
► Couples  $(\epsilon_1, E_1)$  et  $(\epsilon_2, E_2)$  : Savatier et al. (2018)

$$\frac{E_2}{E_0} = \frac{1}{1 + a \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon_{0.7}} \right)}$$

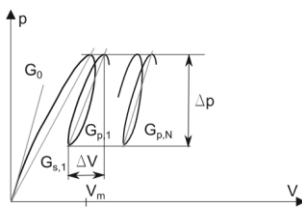


$$d = \frac{a}{\epsilon_{0.7}} = \left( \frac{E_2 - E_1}{\epsilon_1 E_1 - \epsilon_2 E_2} \right)$$

1. Essais pressiométriques monotones

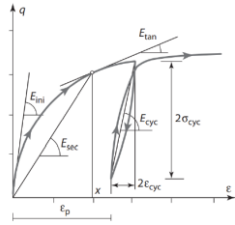


2. Essais pressiométriques cycliques

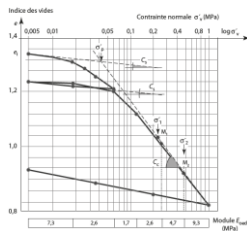


Type d'essais	Taux de déformation	Modules	Gamme de déformations
Essai pressiométrique monotone	$\epsilon = \frac{\Delta V}{V_s}$ (sur la plage pseudo-élastique)	$E_M / \alpha$	$9,0 \cdot 10^{-3}$ à $4,8 \cdot 10^{-1}$
Essai pressiométrique cyclique	$\epsilon = \frac{\Delta V}{V_s}$ (sur la plage pseudo-élastique)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

3. Essais triaxiaux



4. Essais oedométriques

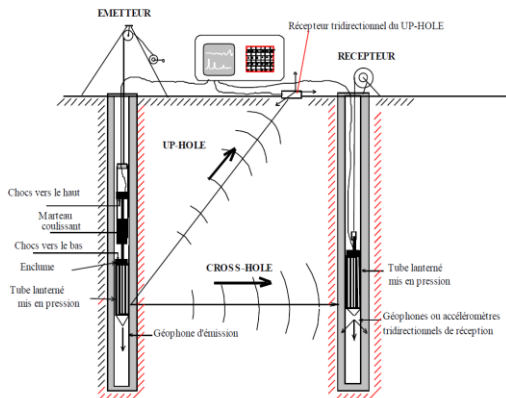


Type d'essais	Taux de déformation	Modules	Gamme de déformations
Essai pressiométrique monotone	$\epsilon = \frac{\Delta V}{V_s}$ (sur la plage pseudo-élastique)	$E_M / \alpha$	$9,0 \cdot 10^{-3}$ à $4,8 \cdot 10^{-1}$
Essai pressiométrique cyclique	$\epsilon = \frac{\Delta V}{V_s}$ (sur la plage pseudo-élastique)	$E_r$	$1,6 \cdot 10^{-3}$ à $6,2 \cdot 10^{-1}$
Essai triaxial	$\epsilon (E_{sec})$	$E_{sécant}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$ à $1,5 \cdot 10^{-1}$
Essai oedométrique	$\epsilon = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$ 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	$\epsilon \approx 10^{-5}$	$E_0$	$10^{-5}$

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

5. Géophysique

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

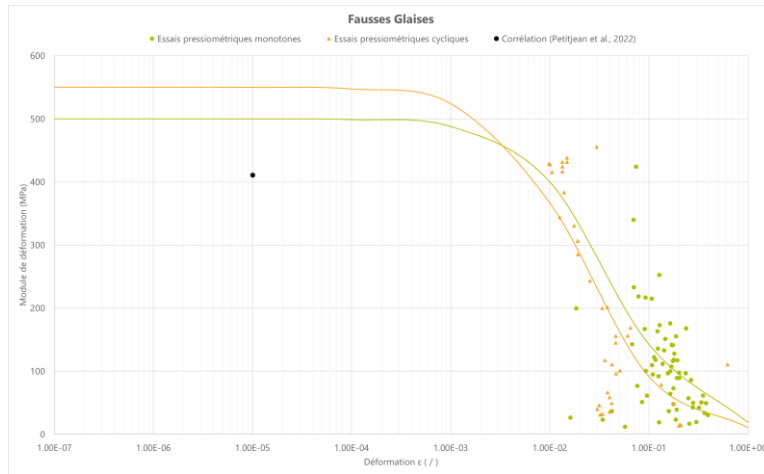


Type d'essais	Taux de déformation	Modules	Gamme de déformations
Essai pressiométrique monotone	$\epsilon = \frac{\Delta V}{V_s}$ (sur la plage pseudo-élastique)	$E_M / \alpha$	$9,0 \cdot 10^{-3}$ à $4,8 \cdot 10^{-1}$
Essai pressiométrique cyclique	$\epsilon = \frac{\Delta V}{V_s}$ (sur la plage pseudo-élastique)	$E_r$	$1,6 \cdot 10^{-3}$ à $6,2 \cdot 10^{-1}$
Essai triaxial	$\epsilon (E_{sec})$	$E_{sécant}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$ à $1,5 \cdot 10^{-1}$
Essai oedométrique	$\epsilon = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$ 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	$\epsilon \approx 10^{-5}$	$E_0$	$10^{-5}$

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024



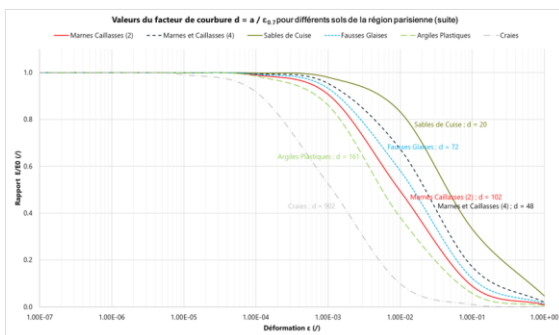
► Multitude de mesures à trier



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

241

- 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

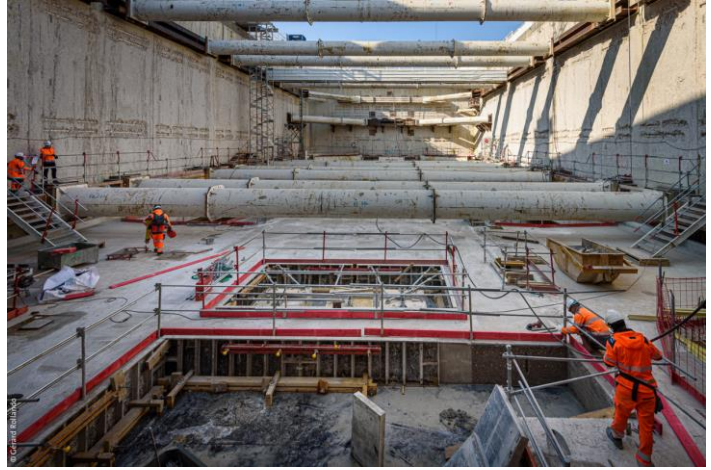


Formations	Classification	Facteur de courbure $d = \frac{\alpha}{E_{0,7}}$
Argiles (limons)	molles	150 – 300
	fermes	100 – 200
Sables (graves)	propres	20 – 50
	argileux	40 – 75
Marno-calcaires	tendres	300 – 600
	compactes	50 – 200
Craies	compactes	500 – 1000

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

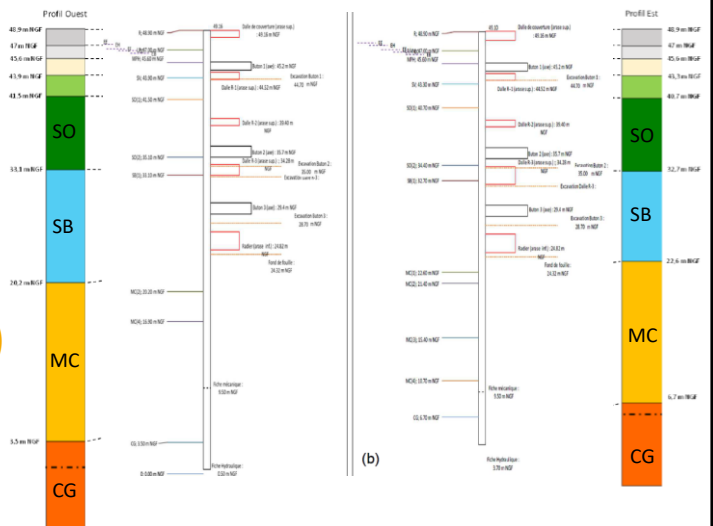
242

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

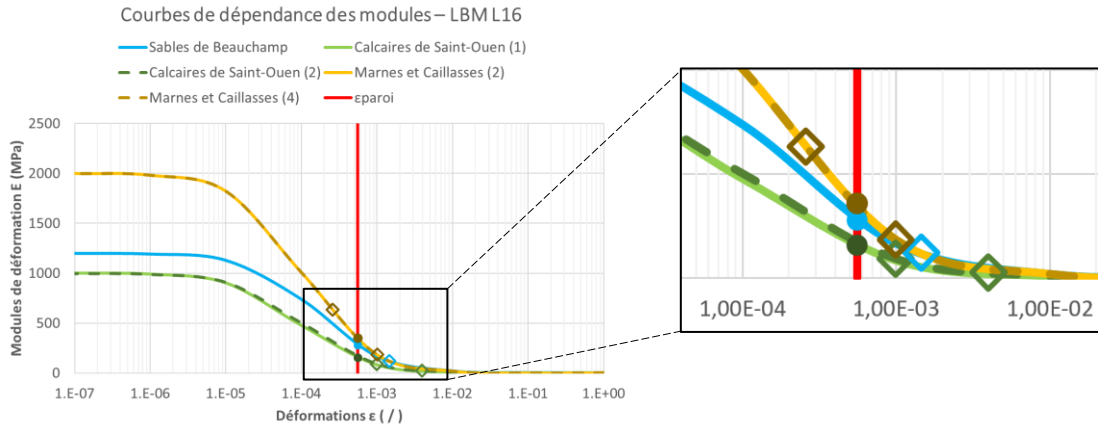


(Gérard Rollando®, SGP®)

- 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



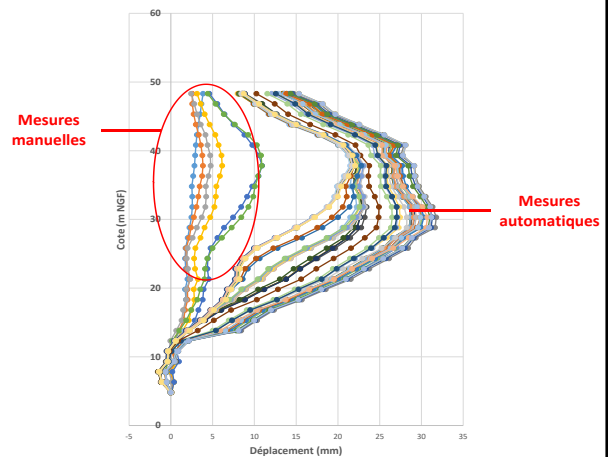
1. Recalage modules pour  $\epsilon (PM) = \Delta y_{(horiz)} / H \approx 5.10^{-4}$



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

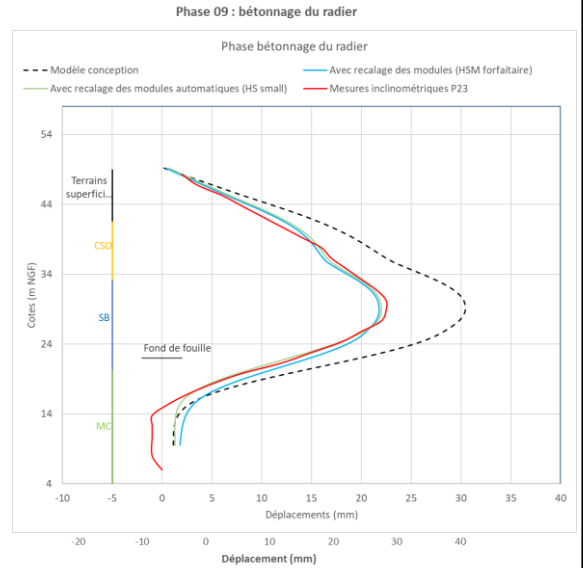
Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

► Comparaison avec les mesures inclinométriques EXE (P23)

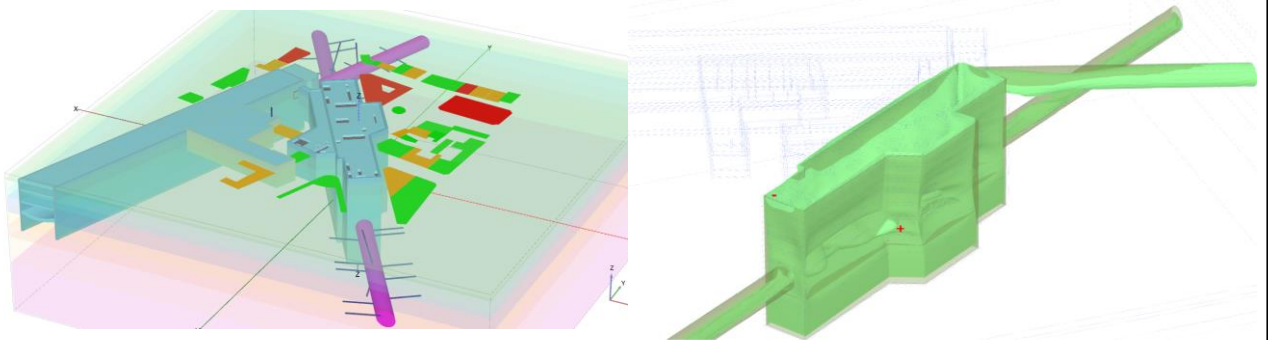


Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

- 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%)



- 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

249

250



## Interprétation et dimensionnement

*Minh Tuan Hoang, Julien Habert (Terrasol)*

1. Contexte et objectifs

2. Construction de la base de données

3. Résultats et analyse

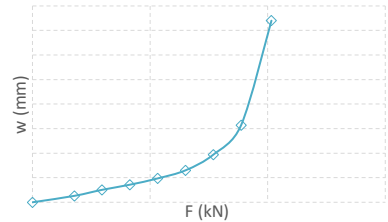
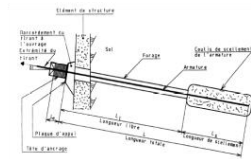
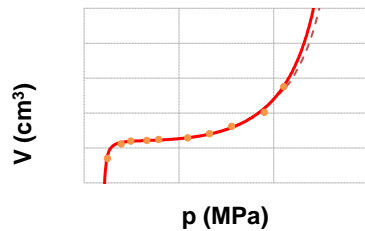
4. Conclusions

Valoriser les règles pressiométriques semi-empiriques

Travail initié pour les micropieux...

Estimation du comportement axial des ouvrages en traction (résistance/ charge critique de fluage/ déplacements)

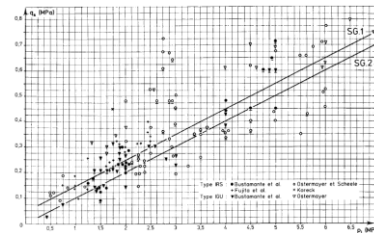
...finalement étendu également aux tirants d'ancrage scellés



		IGU		IRS		
		$\alpha$	$q_s$ (MPa)	$\alpha$	$q_s$ (MPa)	
Sols fins	Argile	1,2	0,06 $p_{IM}+0,04$	1,8 à 2,0	0,08 $p_{IM}+0,10$	
	Limon	1,1 à 1,2		1,4 à 1,6		
Sols grenus	Sable	Sable	0,10 $p_{IM}$	1,4 à 1,5	0,10 $p_{IM}+0,05$	
		Sable graveleux		1,2 à 1,3		1,5 à 1,6
	Grave	Grave sableuse		1,2 à 1,4		1,6 à 1,8
		Grave		1,3 à 1,4		1,8
Marne et craie		1,1 à 1,2	0,05 $p_{IM}+0,10$	1,8	0,07 $p_{IM}+0,13$	
Rocher altéré ou fragmenté		1,1	0,10 $p_{IM}+0,06$	1,2	0,12 $p_{IM}+0,08$	

$$R_s = \pi L_s (\alpha B) q_s$$

Bustamante et Doix, 1985, BLPC, Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés



Des règles semi-empiriques... encore utilisées aujourd'hui

Nécessité de confirmer leur validité

Quantifier leur dispersion conformément aux prescriptions des eurocodes

Valeur caractéristique de la résistance (probabilité fixée de mise en défaut)

$$R_{s,k} = \frac{R_s}{\gamma_{R,d}}$$

Valeur issue du calcul (ie des abaques)

Facteur de modèle

(En phase de prédimensionnement uniquement car tous les tirants d'ancrage sont réceptionnés)



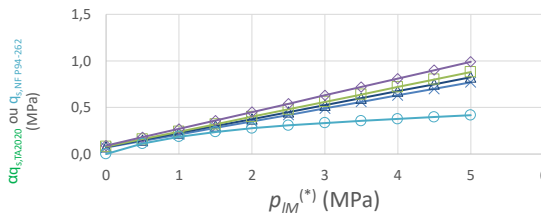
Différentes règles en vigueur pour des ouvrages « relativement similaires »

Micropieux  
NF P94-262:2012

$$q_s = \alpha_{\text{pieu-sol}} f_{\text{sol}}$$

	Micropieu type III	Micropieu type IV
Argile et limon	2,7	3,4
Sable et grave	2,9	3,8
Craie	2,4	3,1
Marne	3,1	3,1

$$R_s = \pi L_s B q_s$$



Tirants d'ancrages scellés  
Règles TA2020

		IGU		IRS	
		$\alpha$	$q_s$ (MPa)	$\alpha$	$q_s$ (MPa)
Sols fins	Argile	1,2	0,06 $p_{lim} + 0,04$	1,8 à 2,0	0,08 $p_{lim} + 0,10$
	Limon	1,1 à 1,2		1,4 à 1,6	
Sols grenus	Sable	Sable	1,2 à 1,3	1,4 à 1,5	
		Sable graveleux	1,2 à 1,4	1,5 à 1,6	0,10 $p_{lim} + 0,05$
	Grave	Grave sableuse	1,3 à 1,4	1,6 à 1,8	
		Grave	1,3 à 1,4		
Marne et craie		1,1 à 1,2	0,05 $p_{lim} + 0,10$	1,8	0,07 $p_{lim} + 0,13$
Rocher altéré ou fragmenté		1,1	0,10 $p_{lim} + 0,06$	1,2	0,12 $p_{lim} + 0,08$

$$R_s = \pi L_s (\alpha B) q_s$$

Analyse des essais de chargement à la rupture (préalables et de conformité) disponibles à la SNCF, à RTE et au Cerema

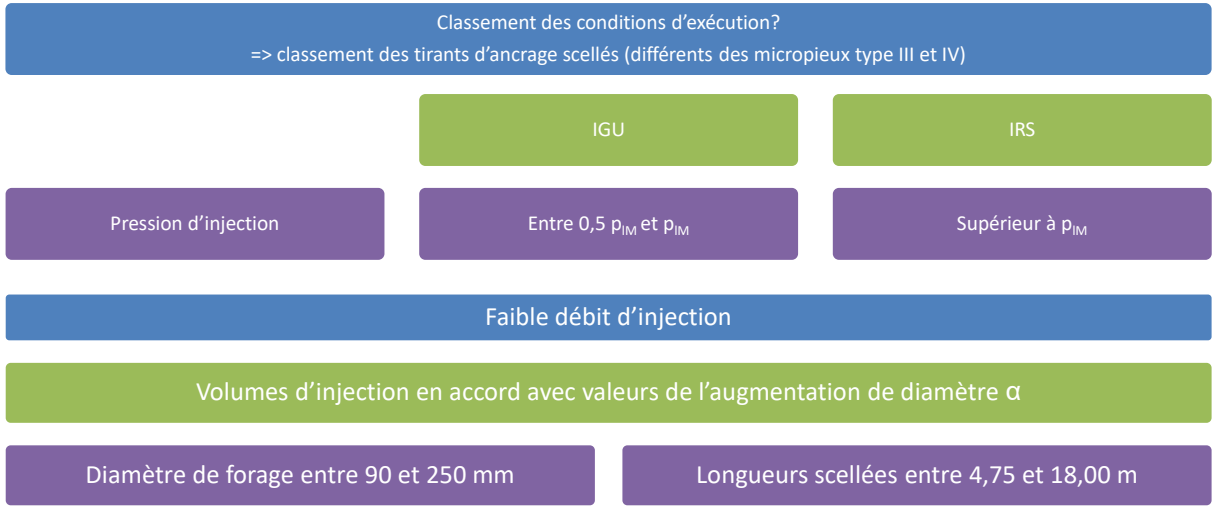
350 essais analysés... mais seulement une cinquantaine d'essais conservée

Conditions géotechniques complexes, conditions d'injection difficilement renseignées, charge maximale d'essai insuffisante, etc.

Ajout des essais utilisés pour établir les abaques TA95

Analyse statistique globale





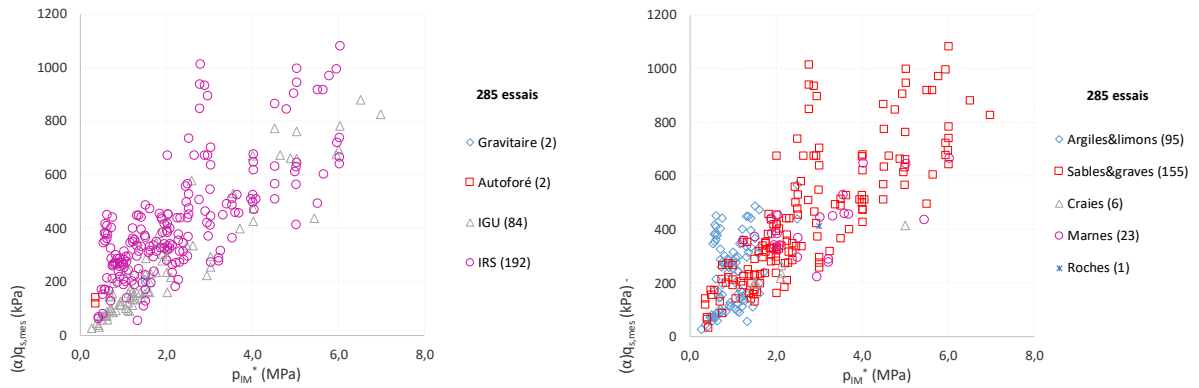
Nombre de mesures	Gravitaire	Autoforé	IGU	IRS	Sous-total
Argiles & limons	21	11	39	56	<u>127</u>
Sables & graves	1	4	42	114	<u>161</u>
Craies	2	0	1	3	<u>6</u>
Marnes	0	0	5	19	<u>24</u>
Roches altérées	2	0	10	20	<u>32</u>
Diverses	2	4	2	0	<u>8</u>
<b>Sous-total</b>	<u>28</u>	<u>19</u>	<u>99</u>	<u>212</u>	<u>358</u>

Certaines mesures sont des mesures globales (scellement dans terrains différent / caractéristiques mécaniques différentes)

*Micropieux uniquement*

14 éléments instrumentés

Variation du frottement axial unitaire mesuré :  
 - par technique d'exécution  
 - par type de terrain

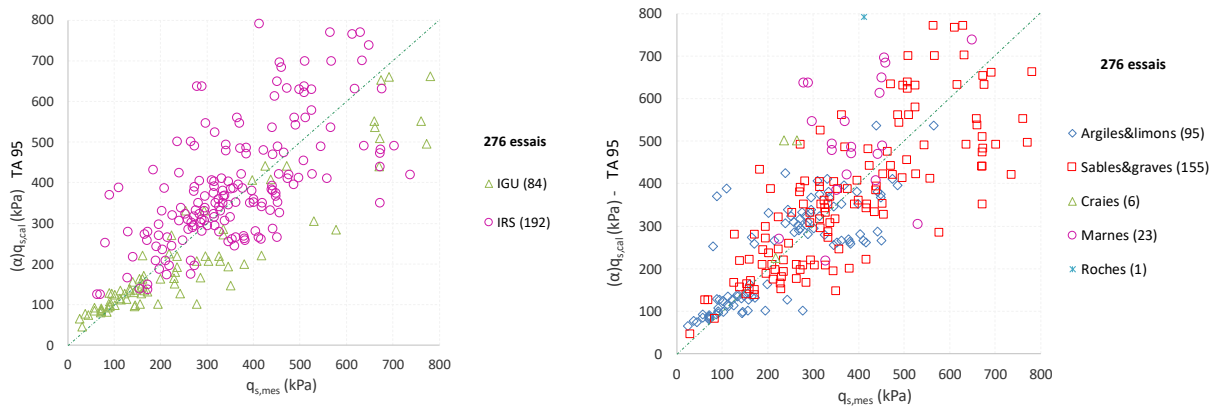


Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

261

261

Comparaison des mesures ( $q_{s,mes}$ ) aux valeurs calculées avec les abaques ( $q_{s,cal}$ ):  
 - par technique d'exécution  
 - par type de terrain

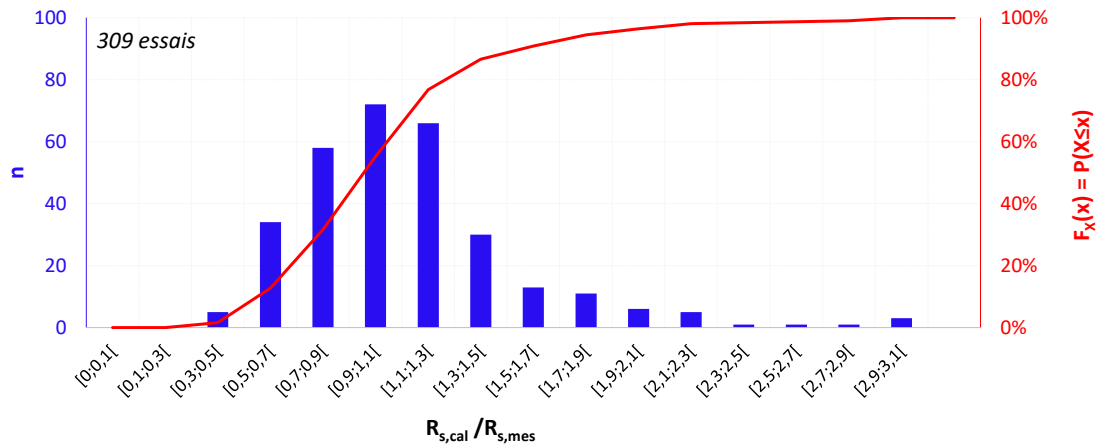


Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

262

262

Rapport entre les résistances calculées et mesurées ( $R_{s,cal}/R_{s,mes}$ )  
 - Histogramme des effectifs  
 - Fonction de répartition

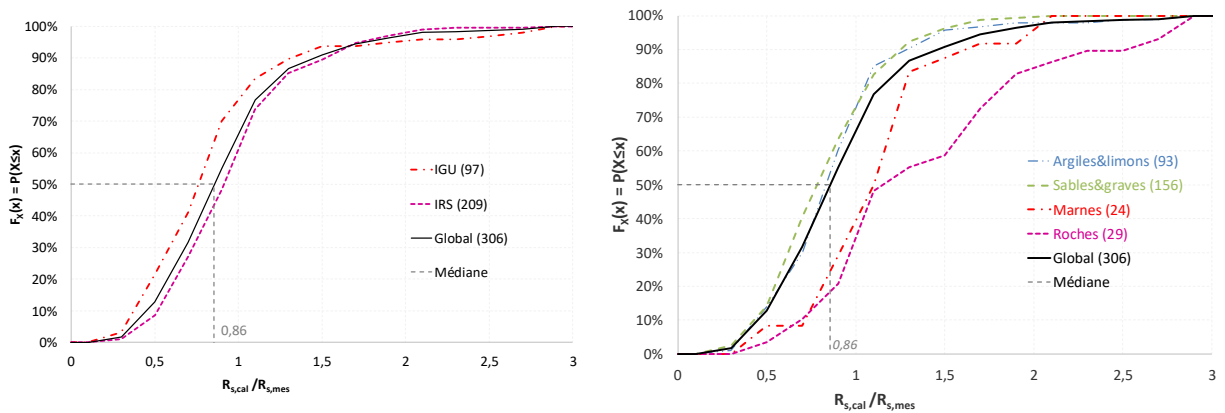


Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

263

263

Fonctions de répartition du rapport entre les résistances calculées et mesurées ( $R_{s,cal}/R_{s,mes}$ ):  
 - par technique d'exécution  
 - par type de terrain

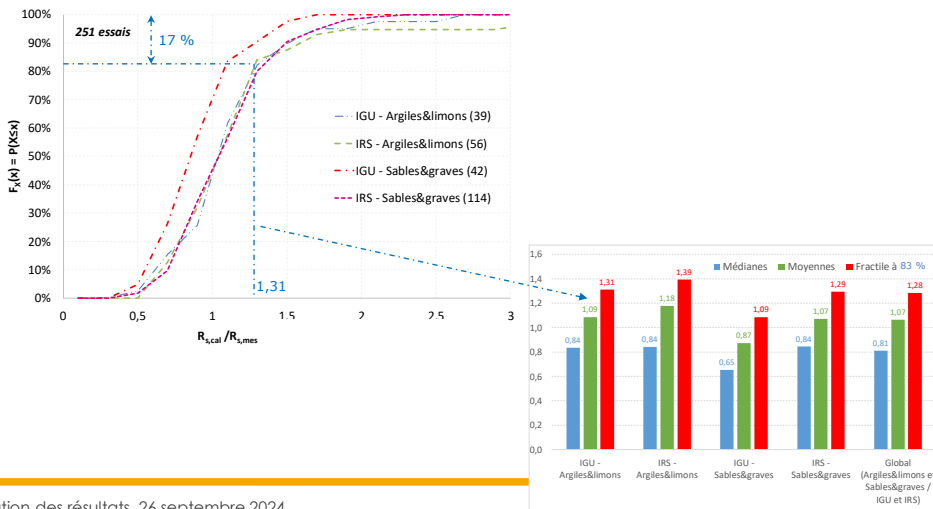


Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

264

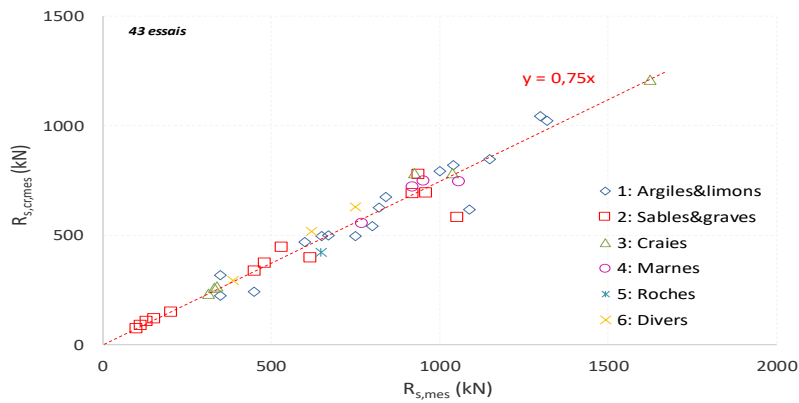
264

... au facteur de modèle qui permet de surestimer la résistance avec une probabilité désormais acceptable



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

Rapport entre la charge critique de fluage  $R_{s,cr}$  (vérifications ELS) et la résistance  $R_s$



=>  $R_{s,cr} / R_s = 0,75$  (proche de 0,7 conventionnellement utilisé)

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

Sous réserve des conditions d'exécution « strictes » associées aux tirants IGU et IRS (pressions, volumes et débits d'injection), les abaques de prédimensionnement, **simples ( $q_s = a p_{IM} + b$ )** sont bien calés!

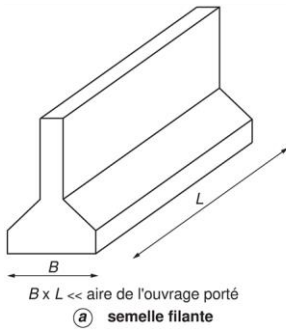
La dispersion est **quantifiée et limitée**.

Pour les sols fins et grossiers, quel que soit le type d'injection sous-pression (IRS et IGU), une mise en défaut similaire à celle des fondations profondes (83 %) peut être couverte par un **facteur de modèle entre 1,3 à 1,4**.

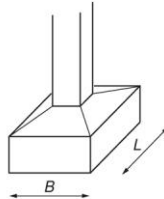
La **charge critique de fluage** représente en moyenne **75 %** de la résistance (ultime / limite).

- ▶ Estimation des tassements à partir du pressiomètre
- Cas élémentaires : Modèles semi-empiriques dérivés du pressiomètre (méthode directe)
  - ❖ Semelle isolée/filante : Modèle de Ménard
  - ❖ Pieu isolé : Modèle de Frank et Zhao
  - ❖ Ecran de soutènement : Modèle de Schmitt
  - Peuvent servir de base de calage (dans domaine de validité = gamme de déformation)
- Cas complexes : Modèles numériques ou semi-analytiques dérivés de la théorie de l'élasticité (méthode indirecte)
  - ❖ Approche forfaitaire :  $E = k E_M / a$  par couche
  - ❖ **Approche élastique non linéaire ARSCOP :  $E = f(E_M, \epsilon)$**

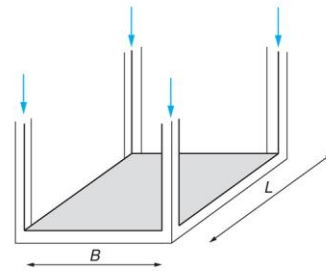
► Type des fondations superficielles



(a) semelle filante



(b) semelle isolée



(c) radier (ou dallage)

Fondation relativement indéformable par rapport au terrain

Fondation relativement déformable par rapport au terrain

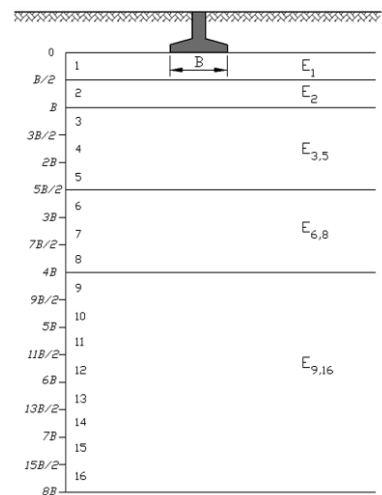
► Semelle isolée : modèle de Ménard

$$s = \frac{q - q_0}{9} \left( \frac{\lambda_c B \alpha}{E_c} + 2 \frac{B_0}{E_d} \left( \frac{\lambda_d B}{B_0} \right)^\alpha \right)$$

$$E_c = E_1$$

$$\frac{1}{E_d} = \frac{0,25}{E_1} + \frac{0,30}{E_2} + \frac{0,25}{E_{3,5}} + \frac{0,10}{E_{6,8}} + \frac{0,10}{E_{9,16}}$$

L/B	Circle	Square	2	3	5	20
$\lambda_c$	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	<b>1.50</b>
$\lambda_d$	1.00	1.12	1.53	1.78	2.14	<b>2.65</b>

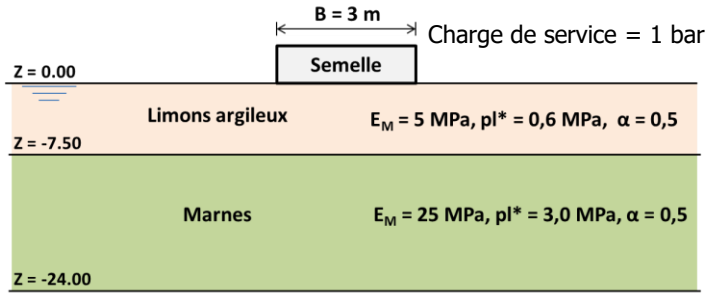


► Exemple d'une semelle isolée : modèle de Ménard

$$s = \frac{q - q_0}{9} \left( \frac{\lambda_c B \alpha}{E_c} + 2 \frac{B_0}{E_d} \left( \frac{\lambda_d B}{B_0} \right)^\alpha \right)$$

$$E_c = E_1$$

$$\frac{1}{E_d} = \frac{0,25}{E_1} + \frac{0,30}{E_2} + \frac{0,25}{E_{3,5}} + \frac{0,10}{E_{6,8}} + \frac{0,10}{E_{9,16}}$$



L/B	Circle	Square	2	3	5	20
$\lambda_c$	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	<b>1.50</b>
$\lambda_d$	1.00	1.12	1.53	1.78	2.14	<b>2.65</b>

$$E_1 = E_2 = E_{3,5} = 5 \text{ MPa}$$

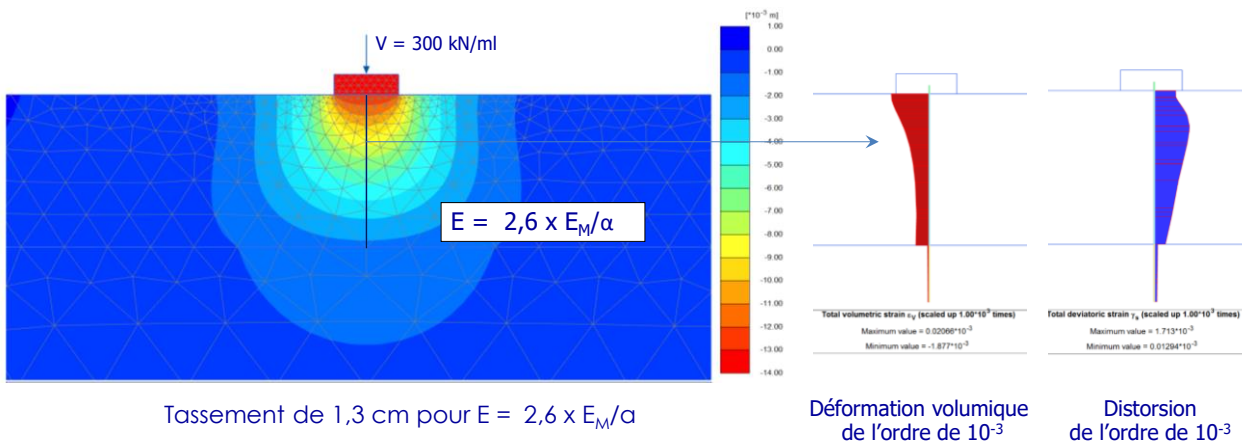
$$E_{6,8} = E_{9,16} = 25 \text{ MPa}$$

$$E_c = 5,00 \text{ MPa} / E_d \sim 5,95 \text{ MPa}$$

$$\lambda_c = 1,50 / \lambda_d = 2,65 / \alpha = 0,5$$

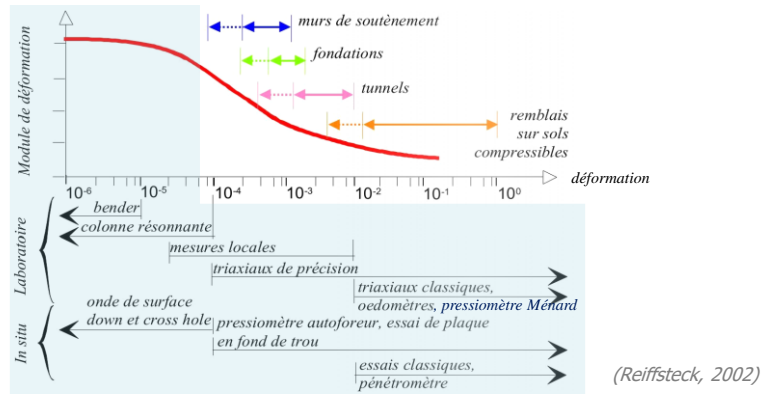
$$s \sim 1,3 \text{ cm}$$

► Exemple d'une semelle isolée : confrontation au modèle de Ménard





► Notion de la décroissance/dégradation du module de déformation



- ❑ Variation du module avec la déformation traduite par la notion de courbe de « dégradation »
- ❑ Niveau de déformation des ouvrages géotechniques courants :  $10^{-4}$  (0,1cm/10m) à  $10^{-2}$  (10cm/10m)

► Mise en œuvre d'un modèle élastique non linéaire

**Loi de dégradation**

$$\frac{E}{E_{ref}} = k(\varepsilon) = \frac{k_0}{1 + \varepsilon/\varepsilon_0}$$

**Théorie de Boussinesq/Steinbrenner**

$$\varepsilon = \frac{\sum_{j=1}^n f_j(z)}{E} = \frac{\sum_{j=1}^n f_j(z)}{E_{ref}} \times \frac{1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}}{k_0}$$

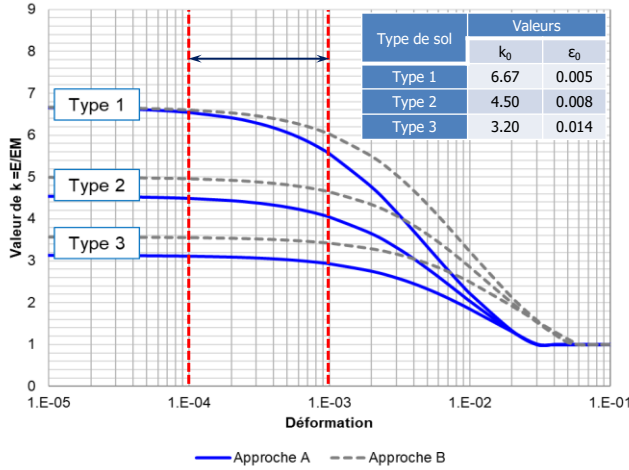
Avec  $f_j(z)$ - incrément de contrainte en 1D ou 3D

$$\varepsilon = \frac{\frac{\sum_{j=1}^n f_j(z)}{E_{ref}} \times \frac{1}{k_0}}{1 - \frac{\sum_{j=1}^n f_j(z)}{E_{ref}} \times \frac{1}{\varepsilon_0 k_0}}$$

→  $s = \varepsilon \times H$

Mise en œuvre d'un modèle élastique non-linéaire simplifié

► Loi non linéaire à partir du pressiomètre



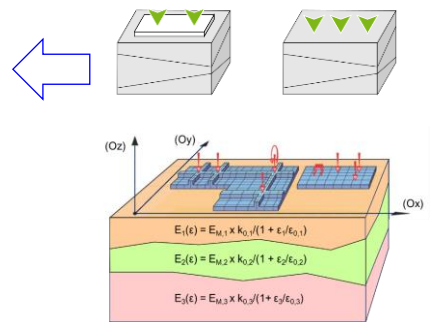
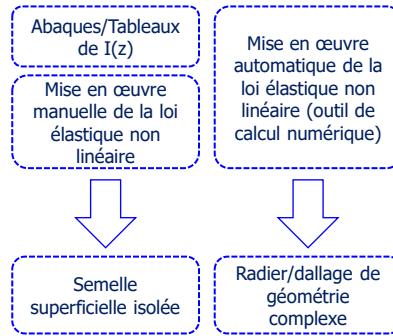
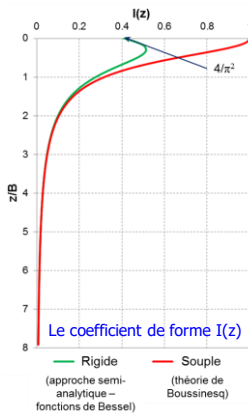
$$\frac{E}{E_M} = k(\epsilon) = \frac{k_0}{1 + \frac{\epsilon}{\epsilon_0}}$$

Où  $k_0$  et  $\epsilon_0$  sont deux paramètres calés à partir du modèle de Ménard pour semelle isolée

Type de sol	Type
Sables et graves Roche très fracturée	1
Sables, graves serrés Limos	2
Argiles, argiles surconsolidées Roche peu fracturée	3

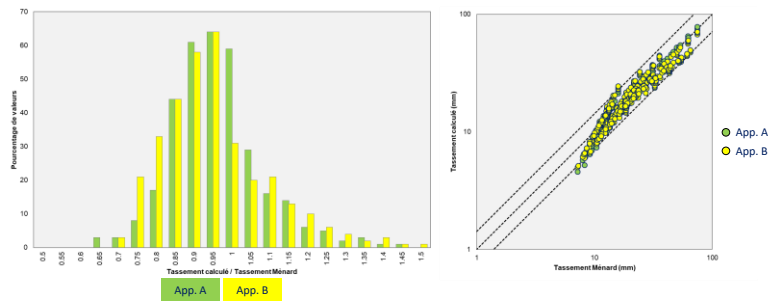
- Calage à partir du modèle de Ménard (semelle isolée)
- Validation : REX centrales EDF, IGH, remblai de préchargement

► Vers une approche de calcul unifiée du tassement



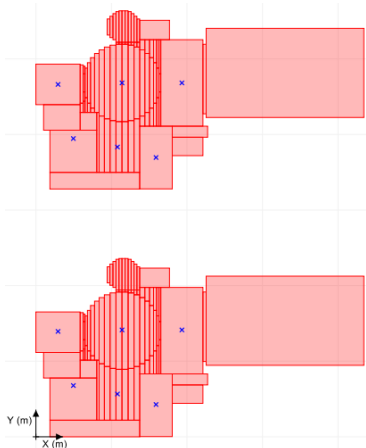
► Cas des semelles isolées : Comparaison avec le modèle de Ménard

Géométrie	Q = 300 kPa
	B = 1.5 m, 2 m, 2.5 m et 3 m
	L/B = 1, 2, 3, 5, 10, 15 et 20
Ex 1	$E_M = 10 \text{ MPa}$ et $p_i^* = 1 \text{ MPa}$
Ex 2	$E_M = 10 \text{ MPa}$ et $p_i^* = 1 \text{ MPa}$ pour $0 \leq z/B < 4.5$ $E_M = 20 \text{ MPa}$ et $p_i^* = 2 \text{ MPa}$ pour $z/B > 4.5$
Ex 3	$E_M = (10+z/B) \text{ MPa}$ et $p_i^* = (1+z/B) \text{ MPa}$

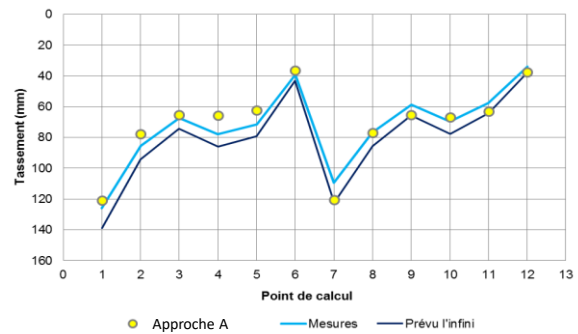


Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

► Cas d'une installation nucléaire sur radier général

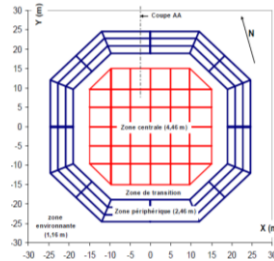


Formation	$E_M$ (MPa)	$p_r$ (MPa)	$p_i$ (MPa)	$\alpha$
Remblais	8.8	0.6	1.3	-
Sables et graves	20.0	1.0	2.2	0.33
Sables jaunes	37.0	2.7	4.2	0.33
Argiles sableuses	51.9	3.0	4.3	0.67
Argiles compactes	54.8	3.4	4.3	0.67
Sables grossiers	76.1	4.1	4.5	0.50

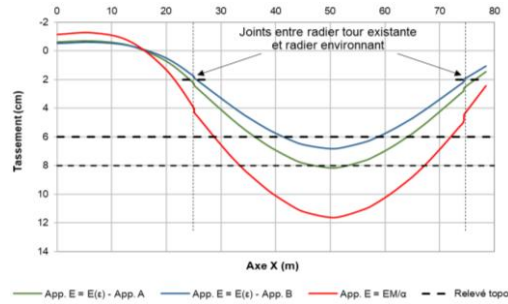


Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

► Cas d'un IGH sur radier général : CB21 (200 m)

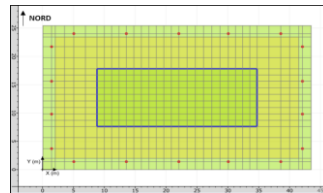


Type de sol	Base de couche (mNGF)	$E_H$ (MPa)	$\rho^*$ (MPa)
Sables et graviers	17.2	28	3.2
Sables supérieurs	5.8	68	5.1
Fausses Glaises	0.4	17	2.1
Sable d'Auteuil	-6.3	50	5.1
Argiles Plastiques	-22.3	36	3.4

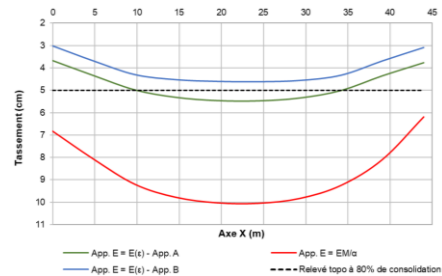


Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

► Cas d'un IGH sur radier général : Aurore (100 m)



Formation	Cote base (NGF)	$E_H$ (MPa)	$\rho$ (MPa)
Alluvions Anciennes	20	35	3.8
Alluvions Anciennes (Zone colluvionée)	18	25	2.7
Calcaire Grossier	13	75	4.4
Sables supérieurs	1	90	4.5
Fausses Glaises (Facès silto-argileux)	-4	25	2.7
Fausses Glaises (Facès silto-sableux)	-8	75	4.5
Sables d'Auteuil	-10	60	4.7
Argiles Plastiques	-25	20	1.7
Marno-calcaire de Meudon	-40	140	4.6

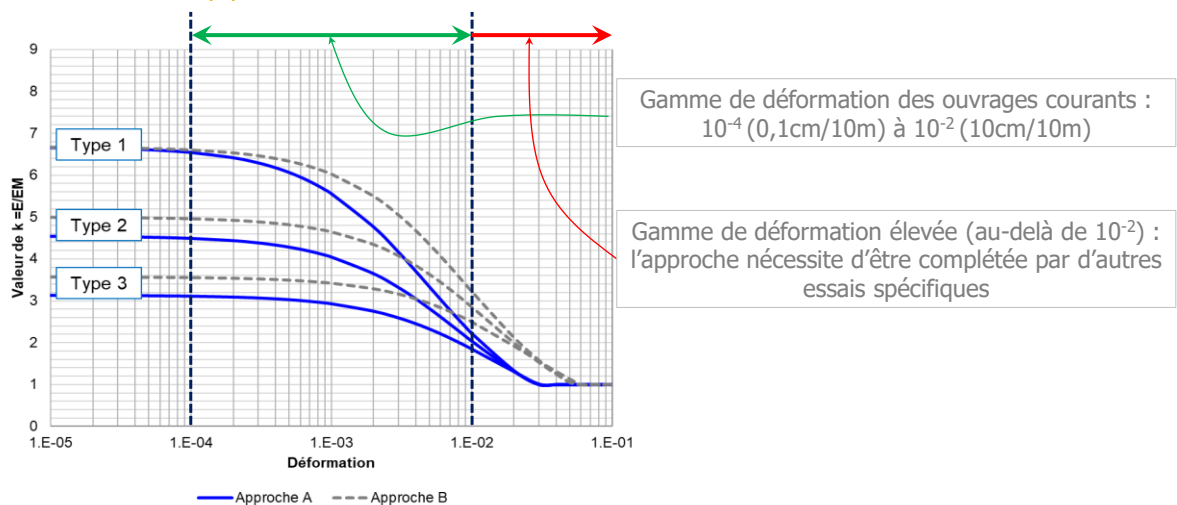


Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

► Récapitulatif

Type d'ouvrage	Ouvrage	Type de sol concerné	Tassement calculé (mm)	Tassement mesuré (mm)
Centrales nucléaires	Site n°1	Sables, sables graves et argiles	37 à 121 mm	38 à 139 mm
	Site n°2	Calcaires altérés et compacts	30 mm	26 à 31 mm
	Site n°3	Sables, limons, argiles des Flandres	125 à 310 mm	132 à 281mm
	Site n°4	Marnes altérées et compactes	41 à 95 mm	48 à 92 mm
	Site n°5	Calcaires altérées et compactes	266 à 389 mm	286 à 290 mm
Tours de grande hauteur	CB1	Sables, sables graves et argiles plastiques	72 à 86 mm	60 à 80 mm
	Majunga	Calcaire grossier, sables denses et argiles plastiques	43 à 54 mm	55 mm
	Aurore	Calcaire grossier, sables denses et argiles plastiques	45 à 55 mm	50 mm
	Trinity	Calcaire grossier, sables et argiles plastiques	20 à 33 mm	20 à 35 mm
Remblais	R4	Sables et argiles des Flandres	33 mm	30 à 40 mm
	R5	Sables et argiles des Flandres	46 à 50 mm	43 à 46 mm
Réservoir	N°2	Argiles	349 mm	337 mm
	N°4	Argiles	216 mm	220 mm

► Domaine d'application



### ► Conclusion sur l'évaluation des tassements

- Les lois de décroissance proposées à partir du pressiomètre rendent compte d'un comportement élastique non linéaire du terrain permettant une approche de calcul unifiée des tassements sous les semelles et les radiers.
- Des bases expérimentales pour caler ces lois de décroissance sont disponibles et pérennisées.
- Les lois peuvent être étendues à l'étude d'une fondation superficielle quelconque dès lors que les déformations induites par celle-ci restent compatibles avec la gamme de déformation sur laquelle le calage des courbes proposées a été mené, soit pour des déformations comprises entre  $10^{-4}$  à  $10^{-2}$ .
- Ces lois peuvent également être étendues à d'autres ouvrages, sous réserve toujours de vérifier que les déformations induites par celle-ci restent compatibles avec la gamme de déformation sur laquelle le calage des courbes proposées a été mené.

Merci de votre attention

## Journée de restitution

*Le pressiomètre dans les normes de dimensionnement*  
Gilles Valdeyron, Cerema

Incorporation du pressiomètre dans les normes de dimensionnement

Historique

Place du pressiomètre dans les règles actuelles

Portance des fondations

Classes conventionnelles de sol (abaque de JP Baud)

Déplacements des fondations

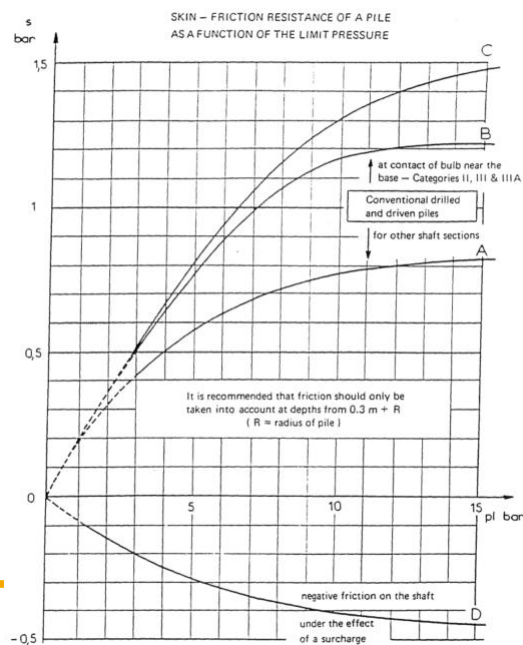
Tirants d'ancrage et clous

Les évolutions en cours / à venir

NF P94-261 : nouvelles règles de calcul des tassements superficielles

► Historique

- 1967 : Règles Ménard – D60/67 Règles d'utilisation des techniques pressiométriques et d'exploitation des résultats obtenus pour le calcul des fondations (revue Sols Soils n°26) :
  - Corrélation entre résistance pointe (pénétromètre statique) et pression limite
  - Premières règles de portance pour les semelles et les pieux
  - Règle de calcul du tassement sous les semelles
  
- Octobre 1972 : Les premières règles de dimensionnement intégrant le pressiomètre : FOND72 (fondations courantes d'ouvrages d'art)
  
- Décembre 1993 : Fascicule 62 – Titre V du CCTG : Circulaire n°93-66 du 20 décembre 1993
  
- 2012/2013 : Normes « fondations superficielles » et « fondations profondes » - Eurocode 7
  
- 2027...



Ranges of pressures limit $p_l$	Nature of soil	Soil categories
0 - 12 bars 0 - 7	Clay Silt	category I
18 - 40 12 - 30 4 - 8 10 - 30	Firm clay or marl Compact silt Compressible sand Soft or weathered rock	category II
10 - 20 40 - 100	Sand and gravel Rock	category III
30 - 60	Very compact sand and gravel	category IIIA

The maximum values of  $k$  which are obtained for a depth greater than the critical depth of embedment are given below and are used for calculating the end bearing capacity of foundations (rules R1 for piles, R2 for cast in-situ walls).

$$q_t \cdot q_0 = k (p_t \cdot p_0)$$

Soil categories	Bearing factor		
	Drilled pile	Driven pile	Cast in-situ walls
I	1.8	2	1.4
II	3.2	3.6	2.1
III	5.2	5.8	2.9
III bis	7	9	4



► Eurocode 7 (juin 2005 – différentes façons de justifier un ouvrage géotechnique :

- Dimensionnement géotechnique par le calcul portance ⇒ **Méthode pressiométrique** ;
- Dimensionnement par mesures prescriptives ;
- Dimensionnement par essai de chargement et essai sur modèle ;
- Méthode observationnelle.

► Norme NF P94-261 – Fondations superficielles – Justifications à mener :

- ELU de portance ⇒ **Méthode pressiométrique** ;
- ELU de glissement sur la base ;
- ELU de stabilité générale ;
- ELU/ELS d'excentrement (sans objet) ;
- ELS de tassement ⇒ **Méthode pressiométrique** ;
- ELS de limitation de la contrainte transmise à la fondation ⇒ **Méthode pressiométrique** ;
- ELU Structural – cas des radiers ⇒ Module d'Young / **Module pressiométrique** ;

► Norme NF P94-262 – Fondations profondes – Justifications à mener :

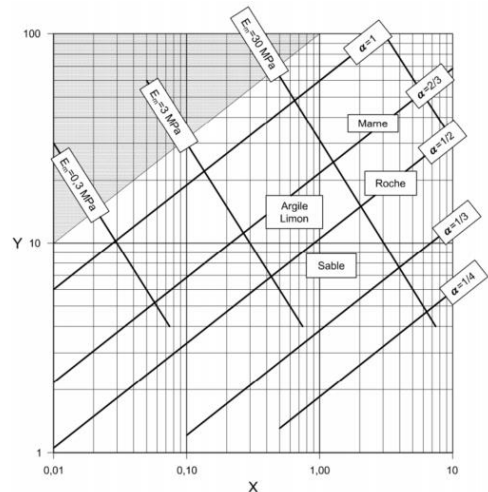
- ELU de portance ⇒ **Méthode pressiométrique** ;
- ELU de sollicitations transversales ⇒ **Méthode pressiométrique** ;
- ELU Structural ;
- ELU de stabilité générale ;
- ELS de déplacement/déformation du (des) pieu(x) ⇒ **Méthode pressiométrique** ;
- ELS de mobilisation du sol support ⇒ **Méthode pressiométrique** ;

► Normes NF P94-261 et NF P94-262 – Justification des fondations

- La classification des terrains en fonction des caractéristiques pressiométriques :

Tableau A.2.1 — Classement des sols selon différents critères

Classes de sol	$I_c$	$p_r$ (MPa)	$q_c$ (MPa)	$(N_{1,60})$	$c_u$ (kPa)
<b>Argiles et limons</b>	Très mous à mous	0,0 – 0,50	< 0,4	< 1,0	< 75
	Fermes	0,50 – 0,75	0,4 à 1,2	1,0 à 2,5	75 à 150
	Raides	0,75 – 1,00	1,2 à 2	2,5 à 4,0	150 à 300
	Très raides	> 1,00	≥ 2	≥ 4,0	≥ 300
<b>Sols intermédiaires</b> (sable limoneux, sable argileux, argille sableuse)	Classement à réaliser selon les indications des Figures A.2.1 à A.2.4				
<b>Sables et graves</b>	Très lâches		< 0,2	< 1,5	< 3
	Lâches		0,2 à 0,5	1,5 à 4	3 à 8
	Moyennement denses		0,5 à 1	4 à 10	8 à 25
	Denses		1 à 2	10 à 20	25 à 42
	Très denses		> 2	> 20	42 à 58
<b>Craies</b>	Molles		< 0,7	< 5	
	Altérées		0,7 à 3	5 à 15	
	Saines		≥ 3	≥ 15	
<b>Marne et calcaire marneux</b>	Tendres		< 1	< 5	
	Raides		1 à 4	5 à 15	
	Très raides		> 4	> 15	
<b>Rocher</b>	Altéré		2,5 à 4		
	Fragmenté		> 4		



Légende

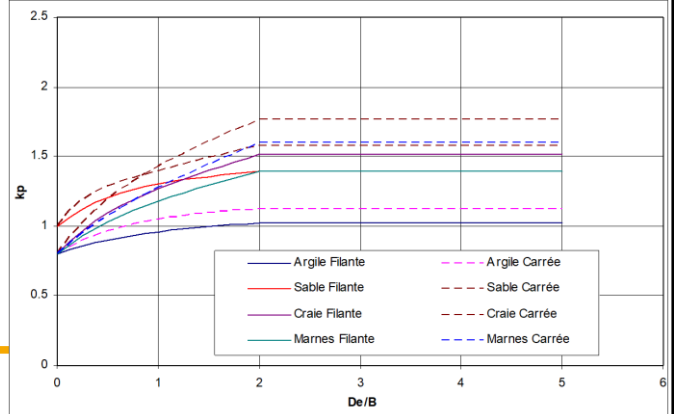
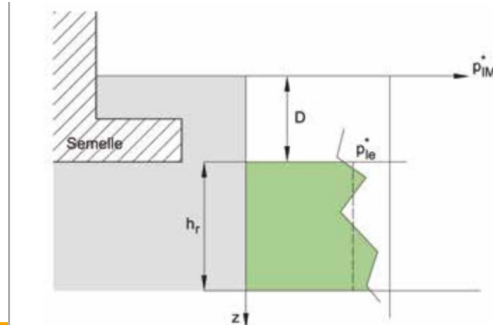
X :  $p_r$  [MPa] – Y :  $E_u/p_r$

Figure A.2.4 — Abaque de Baud (2011) (Note 1)

► Norme NF P94-261 – Justification des fondations superficielles

- Les règles de calcul de la portance :  $V_d - R_0 < R_{v;d}$

$$R_{v;d} = \frac{R_{v;k}}{\gamma_{R;v}} = \frac{R_v}{\gamma_{R;v} \gamma_{R;d;v}} \quad R_{v;k} = \frac{R_v}{\gamma_{R;d}} = \frac{A' q_{net}}{\gamma_{R;d;v}} = \frac{A_i e q_{net}}{\gamma_{R;d;v}} \quad q_{net} = k_p p_{le}^* i_\delta i_\beta \quad p_{le}^* = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n p_{l;k;i}}$$



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

► Norme NF P94-261 – Justification des fondations superficielles

- Le calcul des tassements pour les semelles isolées (Relations de Ménard) :

Sol homogène :

$$s_c = \frac{\alpha}{9E_M} (q' - \sigma'_{v0}) \lambda_c B$$

$$s_d = \frac{2}{9E_M} (q' - \sigma'_{v0}) B_0 \left( \lambda_d \frac{B}{B_0} \right)^\alpha$$

Sol non homogène :

$$E_c = E_1$$

$$\frac{1}{E_d} = \frac{0,25}{E_1} + \frac{0,3}{E_2} + \frac{0,25}{E_{3,5}} + \frac{0,1}{E_{6,8}} + \frac{0,1}{E_{9,16}}$$

$$\frac{1}{E_{i,j}} = \frac{1}{j-i+1} \sum_{k=i}^j \frac{1}{E_k}$$

$$\frac{1}{E_d} = \frac{0,25}{E_1} + \frac{0,3}{E_2} + \frac{0,25}{E_{3,5}} + \frac{0,2}{E_{6,8}}$$

Tableau H.2.1.1.1 – Coefficient rhéologique des sols

Type	Tourbe		Argile		Limon		Sable		Grave	
	$\alpha$	$E_M/p_1$	$\alpha$	$E_M/p_1$	$\alpha$		$\alpha$		$E_M/p_1$	$\alpha$
surconsolidé ou très serré	-	>	1	>14	2/3	>12	1/2	>10	1/3	
normalement consolidé ou normalement serré	1	9 - 16	2/3	8 - 14	1/2	7 - 12	1/3	6 - 10	1/4	
surconsolidé altéré et remanié ou lâche	1	9 - 16	2/3	8 - 14	1/2	5 - 7	1/3	-	-	

Rocher	
Type	$\alpha$
très peu fracturé	2/3
normal fracturé	1/2
très fracturé	1/3
très altéré	2/3

### ► Norme NF P94-261 – Justification des fondations superficielles

- Corrélations avec le module d'Young :

Tableau J.2.1 — Valeurs indicatives d'un module de type Young E d'un sol par corrélation avec le module pressiométrique  $E_M$  pour le calcul des tassements des fondations superficielles à l'ELS quasi-permanent

		$E/E_M$
Argiles	Normalement consolidées	4,5
	Surconsolidées	3
Limons	Normalement consolidés	4,5
	Surconsolidés	3
Sables	Lâches	4,5
	Denses	3
Graves	Lâches	6
	Serrées	4,5

Notes :

a Les modules de type Young de sols comme les craies ou les marnes peuvent être déterminés par analogie avec les sols correspondants dans ce tableau.

b Dans le cas de surfaces chargées de grandes dimensions, comme les radiers où la pression de préconsolidation peut être dépassée, un module de type oedométrique sécant peut être défini à partir de la relation suivante :

$$M = \frac{E_M}{\alpha}$$

(où  $\alpha$  est le coefficient rhéologique défini dans l'annexe H)

Des valeurs plus faibles de ce module de type oedométrique sécant peuvent être prises compte, notamment dans le cas de matériaux argileux faiblement consolidés. Dans ces cas, en l'état actuel de nos connaissances, il est par conséquent vivement recommandé de calculer les valeurs de tassement à partir de modules de déformation mesurés en laboratoire.

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

295

### ► Norme NF P94-262 – Justification des fondations profondes

- Approche originale pour l'édification de la méthode « pressiométrique » reposant sur :
  - Une base de données d'essais de chargements statiques de pieux (initiée en 1968, largement complétée par Bustamante et Gianceselli – LCPC ) associés à des reconnaissances géotechniques (pressiomètre, nature du terrain, etc.) ;
  - Une modélisation par « courbes de transfert » et par les premières applications de la méthode aux éléments finis (Frank, Zhao, Baguelin – LCPC).

Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

296

296

► Norme NF P94-262 – Justification de la portance

- La base de données :

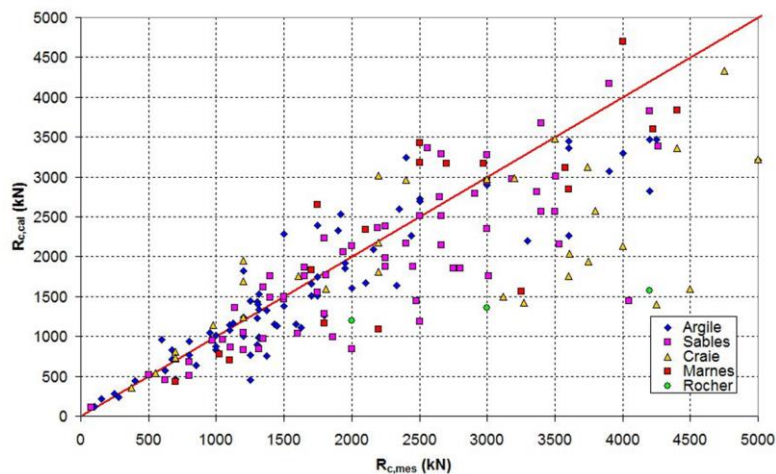
Tableau 2 . Répartition des essais par type de sol et type de pieu

Type de sol	Classe du pieu								Groupe de pieux		Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	
Argile Limon	10	13	8	18	9	4	8	0	67	3	70
Sable Grave	4	8	14	14	5	1	4	3	48	5	53
Craie	4	0	4	9	1	2	4	0	21	3	24
Marne et Calcaire Marneux	8	1	3	0	0	1	3	4	15	5	20
Roche altérée et fragmentée	4	0	0	0	0	0	0	3	4	3	7
<b>Total</b>	<b>30</b>	<b>22</b>	<b>29</b>	<b>41</b>	<b>15</b>	<b>8</b>	<b>19</b>	<b>10</b>	<b>155</b>	<b>19</b>	<b>174</b>

Catégorie	Technique de mise en œuvre	Classe	Groupe
1	Foré simple (pieux et barrettes)	1	G1
2	Foré boue (pieux et barrettes)		
3	Foré tubé (virole perdue)		
4	Foré tubé (virole récupérée)		
5	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits		
6	Foré tarière continue simple rotation, ou double rotation		
7	Vissé moulé	3	
8	Vissé tubé		
9	Battu béton préfabriqué ou précontraint	4	G2
10	Battu enrobé (béton – mortier – coulis)		
11	Battu moulé		
12	Battu acier fermé	5	G1
13	Battu acier ouvert		
14	Profilé H battu	6	G2
15	Profilé H battu injecté		
16	Palplanches battues	7	G1
17	Micropieu type I	1	G2
18	Micropieu type II		
19	Pieu ou micropieu injecté mode IGU (type III)		
20	Pieu ou micropieu injecté mode IRS (type IV)		

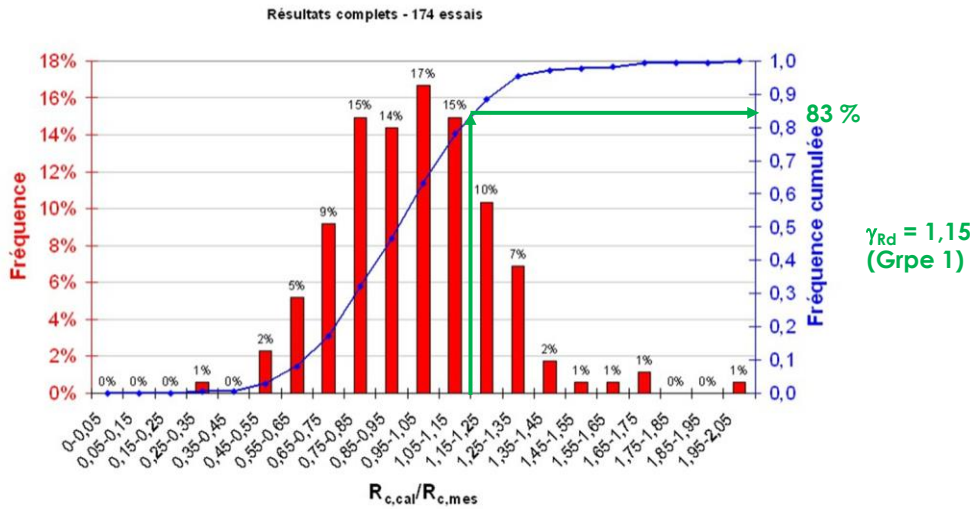
Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

► Norme NF P94-262 – Justification de la portance



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

► Norme NF P94-262 – Justification de la portance



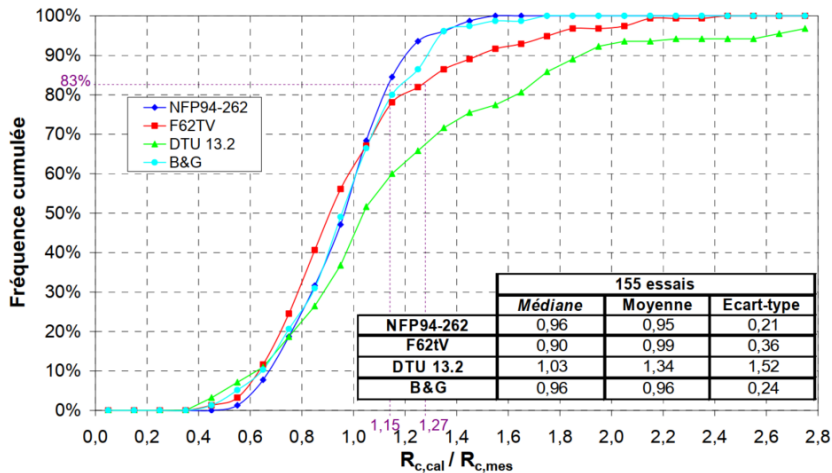
Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

299

299

► Norme NF P94-262 – Justification de la portance

- Baguelin, Burlon, Bustamante, Frank, Gianceselli, Habert, Legrand (JNGG 2012) :



Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

300

300

► Norme NF P94-262 – Justification de la portance

- Baguelin, Burlon, Bustamante, Frank, Gianceselli, Habert, Legrand (JNGG 2012) :

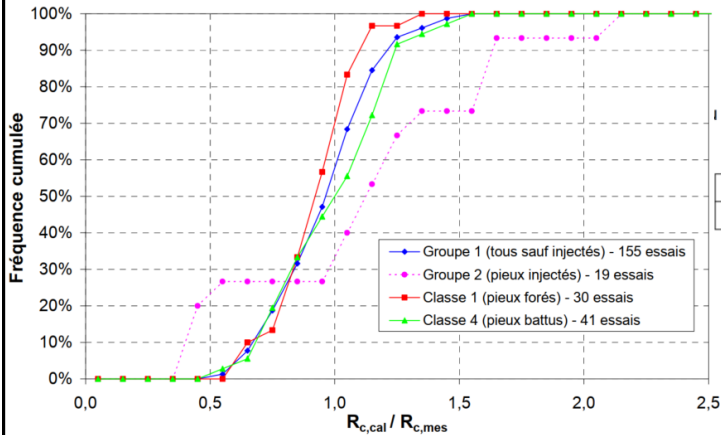
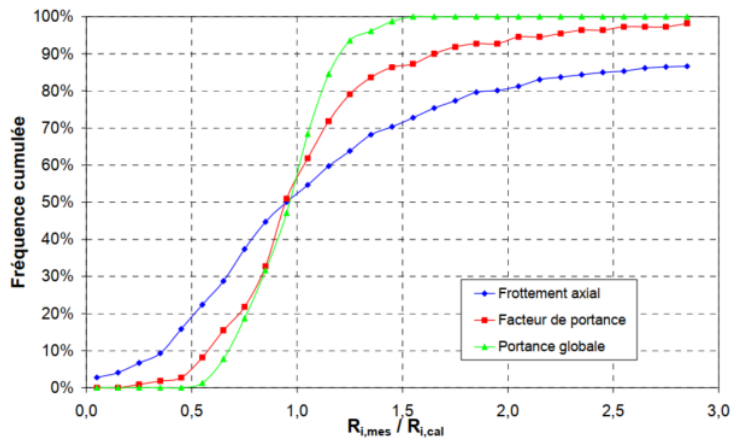


Figure 3. Valeurs des coefficients de modèle à considérer (NF P 94-262)

	Groupe 1	Groupe 1 ancrés dans la craie	Groupe 2
$\gamma_{R,d}$	1,15	1,40	2,00
$\gamma_t$	1,10		

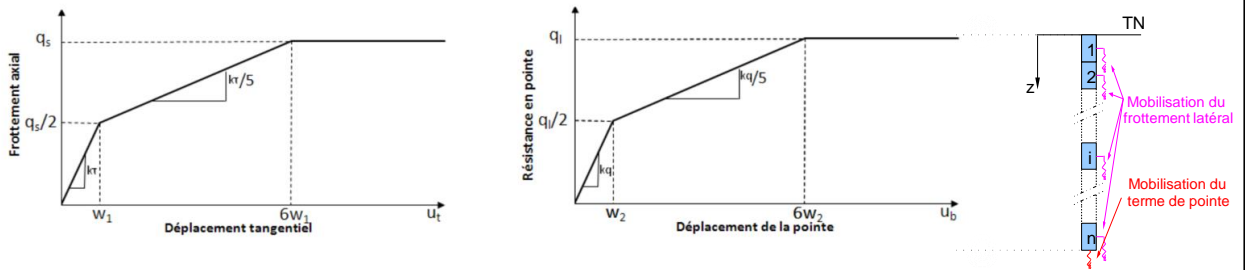
► Norme NF P94-262 – Justification de la portance

- Baguelin, Burlon, Bustamante, Frank, Gianceselli, Habert, Legrand (JNGG 2012) :



► Norme NF P94-262 – Calcul du tassement et interaction sol-structure

- Fonctions de transfert de Frank et Zhao (1982) pour la mobilisation du frottement axial et de la résistance de pointe :



	Symbole	Sols cohérents	Sols frottants
Terme de pointe	$k_{sp}$	$11 \frac{E_m}{B}$	$4,8 \frac{E_m}{B}$
Frottement latéral	$k_{sf}$	$2 \frac{E_m}{B}$	$0,8 \frac{E_m}{B}$

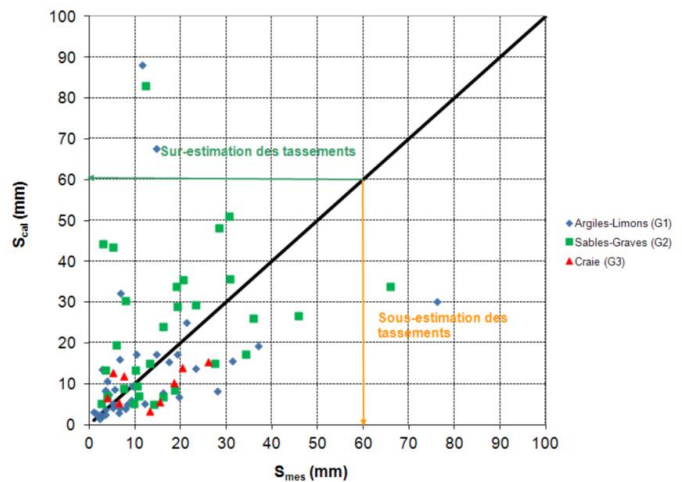
Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

303

303

► Norme NF P94-262 – Calculs du tassement et interaction sol-structure

- Vérifications sur la base de données (Abchir, Habert, Legrand, Burlon) :
  - Le modèle de Frank et Zhao permet d'estimer de manière « fiable » le tassement pour une charge allant de la charge de service à 80% de la charge limite.



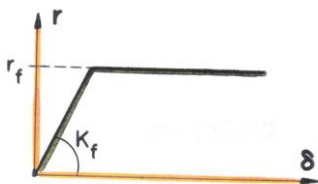
Journée de restitution des résultats, 26 septembre 2024

304



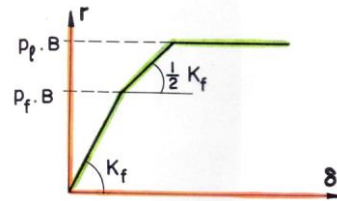
► Norme NF P94-262 – Vérifications de la résistance transversale et des déplacements horizontaux

- Exemples de fonctions de transfert de Frank et Zhao pour les courtes durées d'application et actions accidentelles :



Courte durée

$$K_f = \frac{12E_M}{\frac{4}{3} \frac{B_0}{B} \left[ 2,65 \frac{B}{B_0} \right]^\alpha + \alpha} \text{ lorsque } B \geq B_0$$



actions accidentelles

$$K_f = \frac{12E_M}{\frac{4}{3} [2,65]^\alpha + \alpha} \text{ lorsque } B \leq B_0$$

► Norme NF P94-262 – Justification des fondations profondes

- La méthode pressiométrique – terme de pointe :

$$R_b = A_b q_b \quad q_b = k_p p_{le}^*$$

$$p_{le}^* = \frac{1}{b+3a} \int_{D-b}^{D+3a} p_l^*(z) dz \quad D_{ef} = \frac{1}{p_{le}^*} \int_{D-l_D}^D p_l^*(z) dz$$

lorsque l'encastrement relatif  $D_{ef}/B$  est supérieur à 5 :

$$k_p(D_{ef}/B) = k_{pmax}$$

lorsque l'encastrement relatif  $D_{ef}/B$  est inférieur à 5

$$k_p(D_{ef}/B) = 1,0 + (k_{pmax}-1,0)(D_{ef}/B)/5$$

Tableau F.4.2.1 – Valeur du facteur de portance pressiométrique  $k_{pmax}$  pour un encastrement effectif  $D_{ef}/B > 5$

Terrain	Argile % CaCO3 < 30% Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Marne et calcaire- maimeux	Roche altérée et fragmentée (a)
1	1,15 (b)	1,1 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)
2	1,3	1,65	1,6	1,6	2,0
3	1,55	3,2	2,35	2,10	2,10
4	1,35	3,1	2,30	2,30	2,30
5 #	1,0	1,9	1,4	1,4	1,2
6 #	1,20	3,10	1,7	2,2	1,5
7 #	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2
8	1,15 (b)	1,1 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)

(#) pour les pieux de type BAO, HB et PP, mis en œuvre par vibrofonçage, au lieu de battage, il y a lieu de faire un abattement de 50% sur le facteur  $k_p$ .

(a) La valeur de  $k_p$  pour les roches altérées et fragmentées doit être prise égale à celle de la formation meuble du tableau à laquelle le matériau concerné s'apparente le plus. Dans le cas des roches saines, il convient (F.1 (2) Note 1) d'apprécier si une justification basée sur les méthodes de la présente annexe F et à l'évidence pessimiste est suffisante, ou bien s'il convient d'avoir recours aux méthodes spécifiques de la mécanique des roches.

(b) Pour les micropieux, le terme de pointe n'est normalement pas pris en compte.

(c) Il convient de se référer à l'article A.10 pour le choix des périmètres et des aires des pieux à considérer dans les calculs.

(d) D'autres valeurs de  $k_{pmax}$  peuvent être utilisées à condition de satisfaire les conditions de la clause 9 de la section 1.

► Justification des fondations profondes

- Le terme de frottement latéral :

$$R_s = P_s \int_0^D q_s(z) dz \quad q_s(z) = \alpha_{pieu-sol} f_{sol} [p_l^*(z)]$$

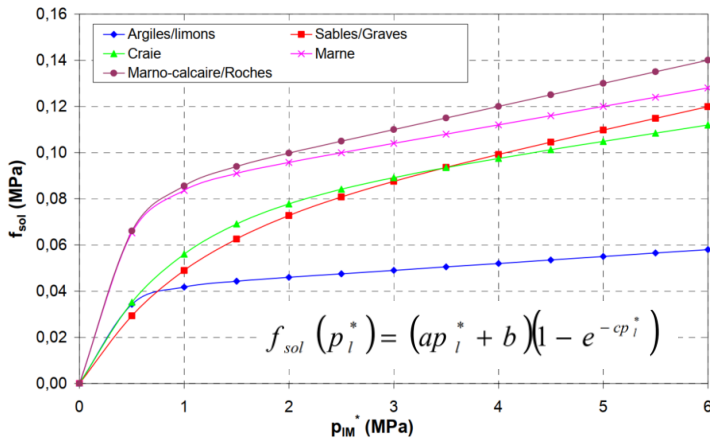


Tableau F.5.2.1 – Choix des valeurs de  $q_{pi,0.01}$  – Méthode pressiométrique

N°	Abréviation	Technique de mise en œuvre	Argile % CaCO <sub>3</sub> < 30% Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Gravier	Craie	Marne et Calcaires-Marnaux	Roche altérée ou fragmentée
1	FS #	Foré simple (pneus et barattes)	1,1	1	1,8	1,5	1,6
2	FB #	Foré boue (pneus et barattes)	1,25	1,4	1,8	1,5	1,6
3	FTP	Foré tube (voile percée)	0,7	0,6	0,5	0,9	—
4	FTR	Foré tube (voile non percée)	1,25	1,4	1,7	1,4	—
5	FSR, FBR, PU #	Foré simple ou boue avec ramurage ou puits	1,3	—	—	—	—
6	FTC, FTCD (c)	Foré continue simple rotation ou double rotation	1,5	1,8	2,1	1,6	1,6
7	VM	Visé moulé	1,9	2,1	1,7	1,7	—
8	VT	Visé tubé	0,6	0,6	1	0,7	—
9	BPF**, BPH**	Battu béton préfabriqué ou précontraint	1,1	1,4	1	0,9	—
10	BE**	Battu enrobé (béton – mortier – craie)	2	2,1	1,9	1,6	—
11	BM*	Battu moulé	1,2	1,4	2,1	1	—
12	BAF**	Battu acier fermé	0,8	1,2	0,4	0,9	—
13	BAC** #	Battu acier ouvert	1,2	0,7	0,5	1	1
14	HB** #	H battu	1,1	1	0,4	1	0,9
15	HB** #	H battu injecté ISU ou IRS	2,7	2,9	2,4	2,4	2,4
16	PP** #	Palplanches battues	0,9	0,8	0,4	1,2	1,2
17	M1	Micropieu type I	—	—	—	—	—
18	M2	Micropieu type II	—	—	—	—	—
19	PIGU, MGIU	Pieu ou micropieu injecté (type III)	2,7	2,9	2,4	2,4	2,4
20	PIRS, MIRS	Pieu ou micropieu injecté (type IV)	3,4	3,8	3,1	3,1	3,1

► Norme NF P94-282 – Ecrans de soutènement – Justifications à mener :

- ELU et ELS Structuraux ⇒ **Utilisation du module pressiométrique Ménard (Méthode aux coefficients de réaction) ;**
- ELS de déplacement/déformation de l'écran ⇒ **Utilisation du module pressiométrique Ménard (Méthode aux coefficients de réaction) ;**
- ELU de résistance géotechnique des tirants d'ancrage ⇒ **Méthode pressiométrique ;**

► Norme NF P94-282 – Ecrans de soutènement – Tirants d'ancrage

Argile et limon

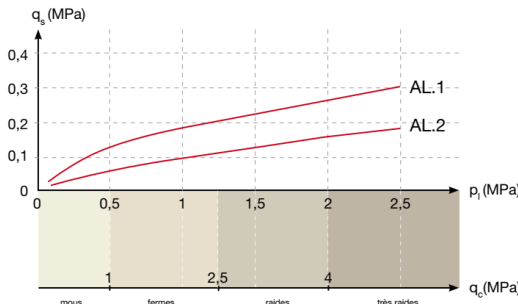


Figure H.2 : abaque de pré-dimensionnement pour les tirants d'ancrage scellés dans les argiles et limon

Légende :  
AL.1 : abaque pour les tirants IRS  
AL.2 : abaque pour les tirants IGU

Sable et grave

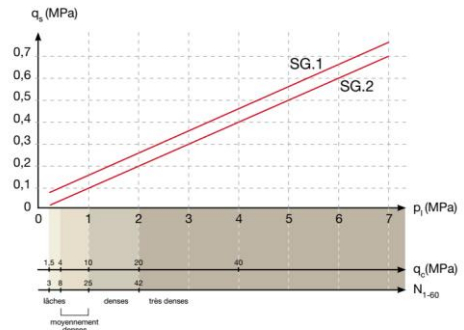


Figure H.1 : abaque de pré-dimensionnement pour les tirants d'ancrage scellés dans les sables et graves

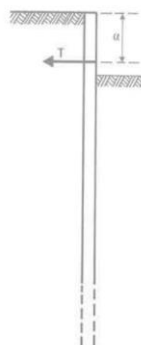
Légende :  
SG.1 : abaque pour les tirants IRS  
SG.2 : abaque pour les tirants IGU

► Norme NF P94-282 – Ecrans de soutènement – Méthode aux coefficients de réaction :

- Etude expérimentale et notion de coefficient de réaction (P. Schmitt) :

$$k_h = 2 \frac{\left( \frac{E_M}{\alpha} \right)^{\frac{4}{3}}}{\left( \frac{E_{str} I_{str}}{B_0} \right)^{\frac{1}{3}}}$$

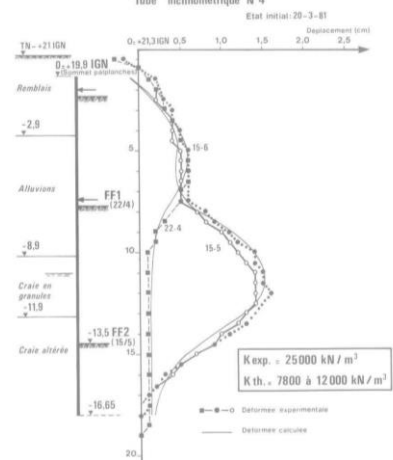
Sollicitation



Réaction du sol



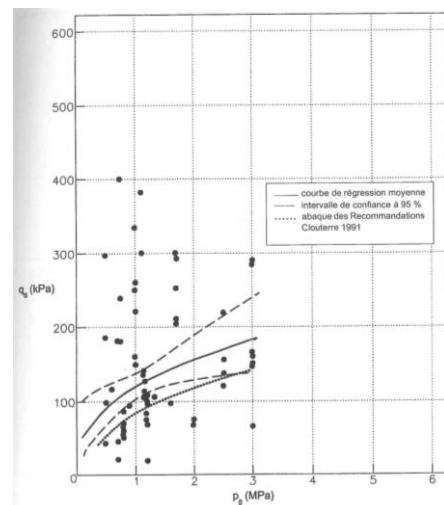
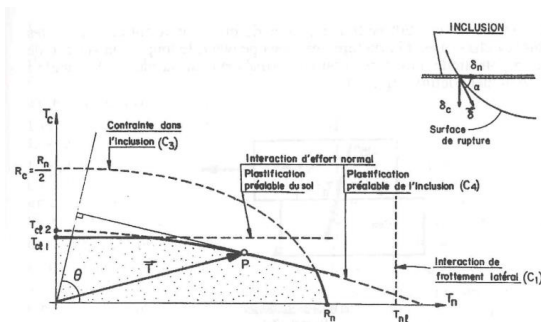
METRO DE LILLE  
DEFORMATION DU RIDEAU DE PALANCHES



► Norme NF P94-270 – Massifs de sols cloués – Justifications à mener :

- ELU de stabilité mixte, interne ⇒ **Méthode pressiométrique** ;
- ELS de déplacement/déformation de l'écran ⇒ **Méthode pressiométrique** ;

► Norme NF P94-270 – Massifs de sols cloués – Détermination de la résistance géotechnique :



► Norme NF P94-270 – Massifs de sols cloués – les lois de transfert :

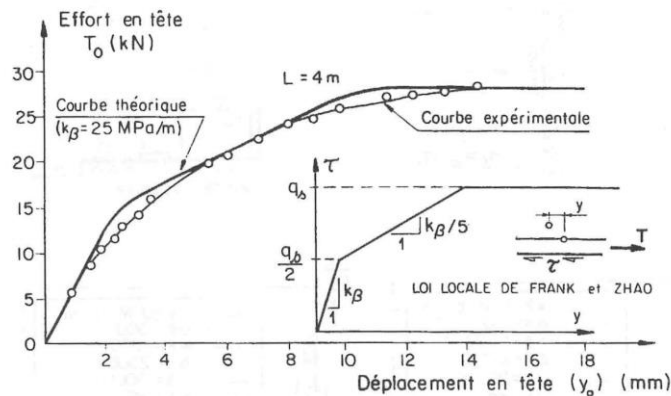


Fig. 8 – Approche de la courbe d'arrachement expérimentale par une loi de type Frank et Zhao (CEBTP, CLOUTÈRE, 1988).

► Intégration de nouvelles règles pour le calcul des tassements des semelles superficielles :

Annex H  
(informative)

Procédures d'estimation du tassement d'une fondation superficielle à partir des modules pressiométriques Ménard – Méthode ARSCOP

H.1 Préambule

(1) On donne dans cette annexe, des procédures alternatives nommées ARSCOP (Note 1) à celle de Ménard qui peuvent être utilisées pour estimer le tassement d'une fondation superficielle rigide (filante ou isolée) à partir des valeurs de module pressiométrique  $E_M$  déduites des essais pressiométriques réalisés conformément à la norme NF EN ISO 22476-4. La procédure directe de calcul du tassement dite « méthode pressiométrique » est présentée.

NOTE 1 ARSCOP est un projet national de recherche dédié au pressiomètre et à ses applications pour le calcul des ouvrages géotechniques : il a permis le développement d'une méthode alternative à celle historique de Ménard afin de pérenniser l'utilisation du pressiomètre en France.

(2) Cette méthode permet d'estimer le tassement final d'une fondation superficielle en considérant l'amortissement des contraintes avec la profondeur au droit de la fondation (Note 1).

NOTE 1 Cette méthode est adaptée à l'estimation des tassements pour des chargements proches de ceux de l'ELS quasi-permanent. Elle fournit pour des chargements très faibles des valeurs trop importantes.

(3) Cette méthode de calcul des tassements d'une fondation superficielle constitue un ensemble indissociable à considérer dans son intégralité (Note 1).

NOTE 1 Par exemple, les valeurs de tassements sont à calculer avec des modules pressiométriques Ménard et non avec des modules d'élasticité.

► Intégration de nouvelles règles pour le calcul des tassements des semelles superficielles :

**Approche A**

$$s = \frac{B}{2} \sum_{i=1}^{16} \frac{\eta_i \times a}{1 - \eta_i \times b} \quad \text{avec } \eta_i = \frac{q}{E_{M,i}} I(z)$$

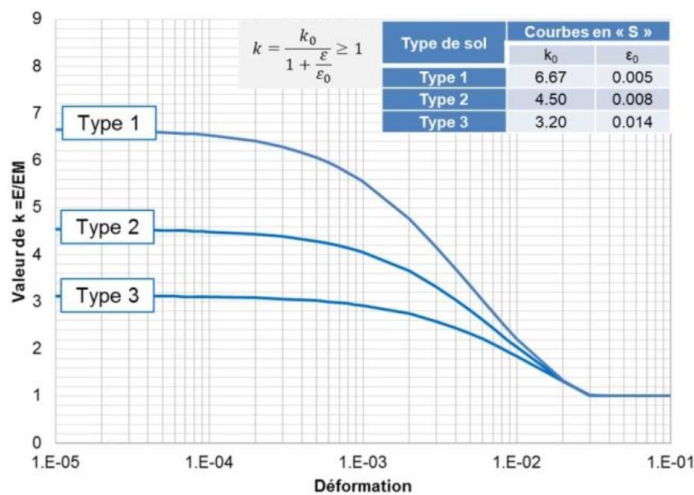
**Approche B**

$$s = \frac{B}{2} \sum_{i=1}^{16} \frac{\mu_i \times a}{1 - \mu_i \times b} \quad \text{avec } \mu_i = \frac{q}{E_{M,i}} F(z)$$

i	z/B	I(z)						F(z)					
		L/B						L/B					
		1	2	3	4	5	20	1	2	3	4	5	20
1	0.0 - 0.5	0.353	0.354	0.355	0.363	0.370	0.395	0.335	0.308	0.311	0.316	0.322	0.343
2	0.5 - 1.0	0.265	0.309	0.319	0.325	0.330	0.351	0.365	0.392	0.392	0.393	0.396	0.417
3	1.0 - 1.5	0.148	0.212	0.233	0.241	0.246	0.261	0.222	0.301	0.319	0.322	0.324	0.336
4	1.5 - 2.0	0.088	0.142	0.169	0.181	0.187	0.200	0.134	0.210	0.242	0.253	0.257	0.265
5	2.0 - 2.5	0.057	0.099	0.124	0.138	0.146	0.160	0.087	0.148	0.183	0.199	0.206	0.216
6	2.5 - 3.0	0.039	0.071	0.094	0.108	0.117	0.132	0.061	0.108	0.140	0.158	0.168	0.181
7	3.0 - 3.5	0.029	0.054	0.073	0.086	0.095	0.112	0.044	0.082	0.109	0.127	0.139	0.156
8	3.5 - 4.0	0.022	0.042	0.058	0.070	0.078	0.097	0.034	0.063	0.087	0.104	0.116	0.136
9	4.0 - 4.5	0.017	0.033	0.046	0.057	0.065	0.084	0.027	0.051	0.070	0.086	0.097	0.120
10	4.5 - 5.0	0.014	0.027	0.038	0.048	0.055	0.074	0.021	0.041	0.058	0.072	0.083	0.106
11	5.0 - 5.5	0.011	0.022	0.032	0.040	0.047	0.066	0.018	0.034	0.049	0.061	0.071	0.095
12	5.5 - 6.0	0.010	0.019	0.027	0.034	0.040	0.059	0.015	0.029	0.041	0.052	0.061	0.085
13	6.0 - 6.5	0.008	0.016	0.023	0.030	0.035	0.052	0.013	0.024	0.035	0.045	0.053	0.077
14	6.5 - 7.0	0.007	0.014	0.020	0.026	0.031	0.047	0.011	0.021	0.031	0.039	0.047	0.069
15	7.0 - 7.5	0.006	0.012	0.017	0.023	0.027	0.043	0.009	0.018	0.027	0.034	0.041	0.063
16	7.5 - 8.0	0.005	0.010	0.015	0.020	0.024	0.039	0.008	0.016	0.024	0.030	0.037	0.057

Type de sol (coefficient rhéologique)	Famille A	Famille B
$\alpha = 1/3$	a = 0,15 et b = 30	a = 0,15 et b = 16
$\alpha = 1/2$	a = 0,22 et b = 27	a = 0,20 et b = 15
$\alpha = 2/3$	a = 0,32 et b = 22	a = 0,28 et b = 12
$\alpha = 1$	a = 0,60 et b = 15	a = 0,46 et b = 10

► Corrélation entre module d'élasticité (Young) et module Ménard :



( $E_M = E_0$ )

Type de sol	Type
Sables et graves Roche très fracturée	1
Sables, graves serrés Limon	2
Argiles, argiles surconsolidées Roche peu fracturée	3

(Projet National ARSCOP, 2018)

## Journée de restitution

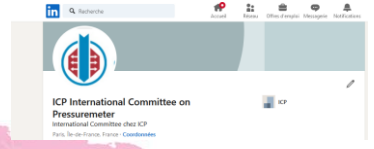
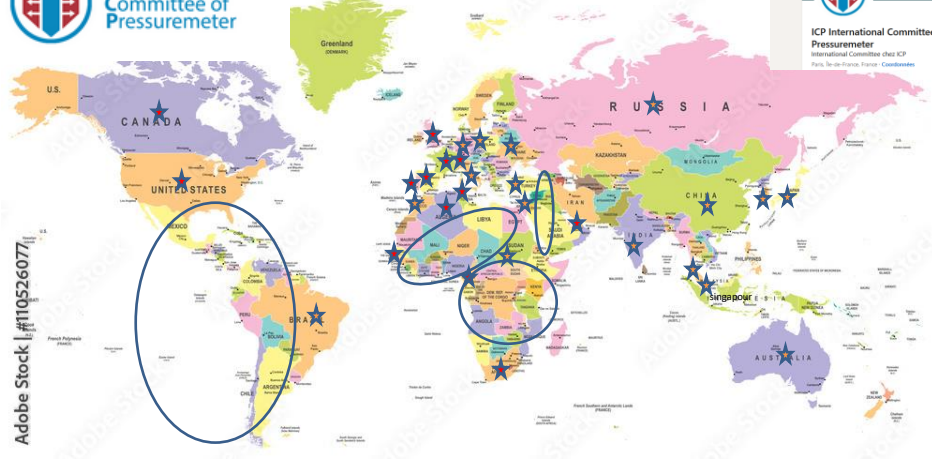
### Perspectives internationales

*Wissem FRIKHA (Setec)*

1. ICP: comité international sur le pressiomètre
2. ISP : symposium international sur le pressiomètre
3. Perspectives et développement



50 membres  
29 pays



<https://icp-pressuremeter.com/medias/>

319



320



► Penser à un statut propre à l'ICP:

- Adhérer au TC102 en tant que sub-committee
- Former une association indépendante
- Réflexions !!!

The creation of International Committee on Pressuremeter "ICP" was proposed during the last international Symposium for the 60th Anniversary of the pressuremeter "ISP7-Pressio2015" under the auspice of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

ICP offers an opportunity to exchange experience in the field of pressuremeter between manufacturers, practitioners, contractors, consultants, engineers, academics and scientists.

The main objectives of this committee are to provide scientific, technical assistance and a data base on the use and interpretation of the pressuremeter test results, and it will help to advance the knowledge of pressuremeter testing by providing the latest methods, technologies and advanced testing equipment through its website.



ISP1 et ISP2: Symposium on the pressuremeter and its marine applications

ISP3: Pressuremeters

ISP4: Pressuremeter and its new avenues

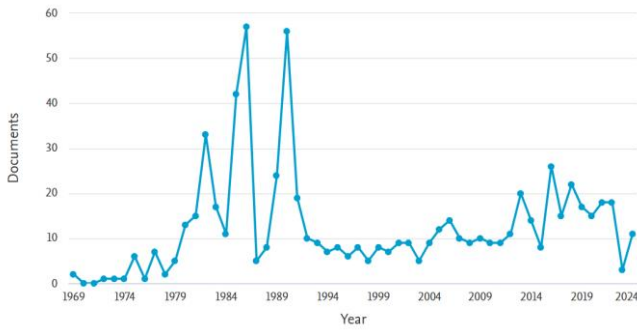
ISP5: 50 Years of Pressuremeters, International Symposium

ISP6: Pressio 2013 - Parallel International Symposium on Pressuremeters

ISP7: 60 Years of Pressuremeters, International Symposium

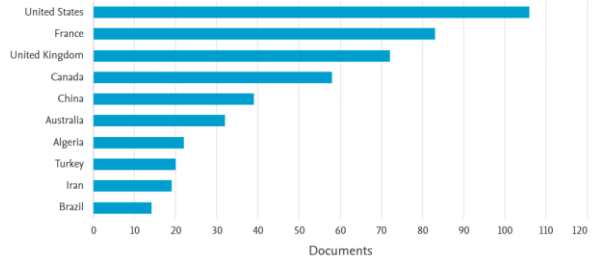
► Analyse « scopus » sur les publications sur le pressiomètre

Documents by year



Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.



Select year range to analyze: 1969 to 2024



Save the date  
for  
**ISP 8**

**8<sup>th</sup> International Symposium « 70 years of pressuremeters »**

*Scheduled to take place from the 2<sup>nd</sup> to the 5<sup>th</sup> of September 2025  
at the University of Luxembourg (Esch/Alzette)*

*Under the auspices of the Geological Survey of Luxembourg  
and the International Committee of Pressuremeter*



Contacts : Dr Romain Meyer (mail : [romain.meyer@pch.etat.lu](mailto:romain.meyer@pch.etat.lu) )  
 Prof Dr Jean-Frank Wagner (mail : [wagnerf@uni-trier.de](mailto:wagnerf@uni-trier.de))  
 Prof Dr Wissem Frikha (mail : [frikha\\_wissem@yahoo.fr](mailto:frikha_wissem@yahoo.fr))  
<https://icp-pressuremeter.com/medias/>



L'ISP8 est la huitième édition qui se tiendra du 2 au 5 septembre 2025 à l'université du Luxembourg

70 ans de pressiomètre / 70 years of pressuremeter  
 Symposium International pour le 70ème anniversaire du pressiomètre  
 International Symposium for the 70th Anniversary of the Pressuremeter  
 2 au 5 Septembre 2025, LUXEMBOURG  
 2nd to 5th of September 2025, LUXEMBOURG

#### Dates importantes

- 01/12/2024 – Date limite pour la soumission des résumés
- 06/01/2025 – Avis d'acceptation des résumés
- 01/03/2025 – Date limite pour la soumission des articles
- 01/05/2025 – Avis d'acceptation des articles
- 01/06/2025 – Date limite pour la resoumission des articles

<https://isp8-pressio2025.com/>

- ▶ Le pressiomètre fêtera bientôt ses 70 ans
- ▶ Certains défis ont été relevés
  - Acquisition des données et électronique embarquée → réalité
  - Automatisation de la mise en œuvre des protocoles de chargement
  - Elargissement du domaine d'application
    - Très faibles déformations
    - Comportement cyclique, séisme
- ▶ Mais d'autres restent à relever
  - Qualité et adéquation de la méthode de forage : axe de travail qui reste majeur
  - Formation des opérateurs aux nouveaux enjeux
  - Mise en œuvre à échelle industrielle des technologies développées dans ARSCOP
    - Amélioration de la membrane, capteurs intégrés dans la sonde
- ▶ Tout en assurant la continuité avec les procédures Ménard

- ▶ Quel message porter pour les prochains 30 ans ?
- ▶ Axe 1 – Systèmes de mesures et protocoles
  - L'essai pressiométrique va au-delà des procédures Ménard, de  $E_M$  et de  $p_{IM}$
  - Des procédures spécifiques doivent être utilisées pour les besoins de chaque ouvrage
  - Investir dans les procédures novatrices → complémentaires et non pas concurrentielles
    - Valoriser la diversité des protocoles possibles
    - Développement continu : pousser pour une utilisation quotidienne
- ▶ Axe 2 – Méthodes de calcul des ouvrages géotechniques
  - Alimenter et faire vivre les bases de données associées aux méthodes directes de détermination de la portance et calcul des déplacements ( $p$ - $y$  et  $t$ - $z$ )
    - Savoir-faire français à valoriser à l'international
  - Mise en œuvre effective des méthodes indirectes et lien avec les paramètres utilisés dans les modèles numériques
  - Prise en compte des effets du temps : drainage, fluage, etc
  - Quantifier et tenir compte de la variabilité des mesures



nouvelles Approches de Reconnaissance des Sols et de Conception des Ouvrages géotechniques avec le Pressiomètre



# Clôture de la journée

Roger Frank (Président)



Journée de restitution des résultats - 26 septembre 2024

