

## LOUIS MENARD ET L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE

Par **Alexandre Lopes dos Santos**, membre jeune du Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique (CFMS Jeunes), avril 2022

Ce rapport présente une brève biographie de Louis Ménard et une brève description de son invention remarquable, l'essai pressiométrique, une technique innovante de reconnaissance géotechnique, qui fournit à la fois les paramètres de déformabilité et de rupture des terrains pour la conception des fondations.

### L'ingénieur et inventeur



Louis Ménard était un ingénieur français qui a vécu de mai 1931 à janvier 1978. Il est connu pour l'invention et le développement du pressiomètre tel qu'il est encore employé de nos jours.

Ménard a breveté le matériel d'essai en 1955, à l'âge de 23 ans, et a réalisé les premiers développements théoriques visant à déterminer les propriétés des sols (résistance et déformabilité) lors de son projet de fin d'études en France à l'École Nationale des Ponts et Chaussées, puis lors de sa thèse de master à l'Université de l'Illinois aux États-Unis.

En plus d'être un ingénieur et inventeur, Ménard était un homme d'affaires : il a créé la société « Les pressiomètres Louis Ménard S.A. » en 1957. Cette même année, il commence à fournir des licences à d'autres entreprises intéressées par l'utilisation du pressiomètre. Il est également l'auteur de plusieurs autres brevets relatifs à l'amélioration de la capacité portante des pieux, à l'amélioration des sols par compactage dynamique et autres.

Le développement des techniques d'investigation des terrains avec le pressiomètre a évolué de manière significative au cours des années 60. En 1962, Ménard crée la revue bilingue "Sols-Soils", où sont publiés de nombreux articles sur le nouvel essai et d'autres innovations en géotechnique. Cette même année, il

commence à réaliser des essais de chargement en grandeur réelle sur des fondations superficielles. L'objectif était d'étudier la relation entre les paramètres déterminés à l'aide du pressiomètre et le comportement et la capacité portante des fondations, permettant ainsi l'utilisation directe de l'essai pressiométrique pour leur dimensionnement. Les premières formules de calcul semi-empiriques ont été établies sur la base de ces études et ont rencontré un grand succès auprès des praticiens français en raison de leur fiabilité et de leur facilité d'utilisation. Elles n'ont que peu évolué et sont toujours utilisées dans la pratique actuelle, ce qui témoigne de leur robustesse.

Au début des années 70, Ménard s'est consacré à l'étude et à la mise en œuvre de techniques d'amélioration des terrains par compactage dynamique. En tant qu'entrepreneur, il a développé et breveté les premières machines de compactage dynamique qui étaient capables de soulever une masse allant jusqu'à 40 tonnes à environ 40 m de hauteur. La technique consistait à faire tomber la masse sur le terrain afin de le compacter. Elle a été utilisée sur plusieurs chantiers dans différents pays (Saint Domingue, États-Unis, Bangladesh, Singapour, Afrique du Sud, Allemagne). L'aéroport de Nice est l'un de ces ouvrages notoires.

Louis Ménard est décédé à l'âge de 46 ans, 23 ans seulement après avoir posé son premier brevet sur le pressiomètre. Il a promu une évolution notable dans les domaines de la reconnaissance géotechnique, du dimensionnement des fondations et de l'amélioration des sols. Aujourd'hui, plus de 90 ans après sa

naissance, son génie inspire toujours les jeunes générations d'ingénieurs géotechniciens passionnés, désireux d'innover et de développer de nouvelles techniques. Une immense source d'inspiration, en effet, car "en moins de dix années, partant de rien, Louis Ménard a développé, non seulement un essai de sol *in situ* et divers appareillages de forage et de mesures, mais des concepts, une méthode, une véritable École originale qui fait maintenant partie de notre patrimoine." (Gonin, 2005)

## La technique

Le principe général de l'essai pressiométrique consiste à insérer une sonde cylindrique équipée d'une membrane flexible expansible dans un forage dans le sol (parfois elle est insérée à l'intérieur d'un tube fendu). La sonde est dilatée selon un programme de chargement prédéfini, et le sol réagit à la charge appliquée. Une courbe de pression appliquée à la cavité en fonction de la déformation volumétrique de la cavité est obtenue. Cette courbe est appelée **courbe d'expansion de cavité** et peut être interprétée pour dériver les **paramètres de déformabilité et de résistance** du terrain. Les paramètres obtenus peuvent être utilisés de nombreuses façons, telle que pour estimer les paramètres de dimensionnement des fondations. L'interprétation des essais repose soit sur un cadre analytique théorique, soit sur des corrélations semi-empiriques.

L'essai est réalisé selon le schéma simplifié de la Figure 1a. Une coupe transversale simplifiée et une photo d'une sonde pressiométrique de type Ménard sont présentées en Figure 1b et c. Les étapes successives suivantes sont réalisées :

- Réalisation d'un forage dans le terrain,
- Insertion de la sonde dans la cavité,
- Contrôle de l'expansion de la sonde avec un Contrôleur Pression Volume,
- Enregistrement des mesures de pression et de volume en cours d'essai.

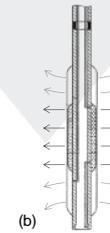
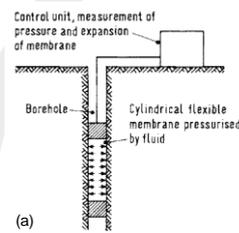


Figure 1 – Principe d'un essai pressiométrique, schéma et photo d'une sonde type Ménard.

Cette procédure générale peut être appliquée aussi bien aux sols qu'aux roches, à condition que le matériel d'essai soit adapté en conséquence.

Après l'invention de Ménard, différents types de sondes ont été développés dans le monde entier, ainsi que différentes techniques d'insertion, de protocoles de chargement et méthodes d'interprétation. La méthode de mise en place de la sonde peut être choisie en fonction des conditions du terrain, tel que :

- Méthode par pré-forage,
- Méthode par auto-forage,
- Méthode par battage / fonçage.

Les technologies de sonde ont également évolué. La sonde peut être :

- Tri-cellulaire (type Ménard),
- Monocellulaire.

Les sondes tri-cellulaires sont généralement contrôlées avec du gaz comprimé (cellules de garde) et de l'eau (cellule de centrale de mesure). Les sondes monocellulaires peuvent être contrôlées avec du gaz comprimé ou avec de l'eau uniquement.

La détermination de la déformation de la cavité peut être faite de deux façons :

- Par la mesure du volume d'eau (ou autre fluide peu compressible) injecté dans la cellule de mesure,
- Par des capteurs de déplacement locaux installés à l'intérieur de la sonde.

Dans les deux cas, la détermination de la contrainte et de la déformation à la paroi de

la cavité n'est pas directe et la sonde doit être préalablement étalonnée pour prendre en compte des pertes internes dans le système. Ménard a établi des protocoles d'étalonnage qui sont toujours utilisés dans la pratique actuelle.

Le contrôleur pression-volume (CPV) est le dispositif qui permet d'injecter le fluide dans la sonde et de contrôler sa pression en fonction du protocole d'essai souhaité. Ces dispositifs ont considérablement évolué depuis l'invention de l'essai pressiométrique. Alors que les premiers appareils créés par Ménard étaient contrôlés manuellement, du matériel entièrement automatisé est couramment utilisé aujourd'hui. Le programme de chargement peut être contrôlé automatiquement par le CPV, ainsi que l'acquisition des données.

Les essais de type Ménard suivent un programme de chargement spécifique normalisé, tel que défini dans Figure 2(a) (NF EN ISO 22476-4, AFNOR, 2015). La réponse typique du terrain obtenue est présentée dans la Figure 2 (b). Trois phases peuvent être distinguées sur la courbe : une phase de recompression au début de la courbe d'expansion (Phase 1), une phase quasi-linéaire habituellement appelée "pseudo-élastique" (Phase 2), et une phase plastique (Phase 3), caractérisée par des incréments de volume significatifs pendant les paliers de pression constante (comportement différé). La **pression de fluage pressiométrique  $p_f$**  définit la frontière entre les phases "pseudo-élastique" et plastique. Le **module pressiométrique Ménard  $E_M$**  est calculé à partir de la pente de la phase "pseudo-élastique" (phase 2). La **pression limite pressiométrique conventionnelle  $p_l$**  est calculée comme la pression correspondant au doublement du volume initial de la cavité.

D'autres types de programme de chargement peuvent être réalisés, incluant une ou plusieurs boucles de décharge-recharge, ou utilisant d'autres techniques pour contrôler la pression ou l'expansion de la sonde (AFNOR 2013a), permettant la détermination d'autres paramètres

géomécaniques en dehors du cadre de la procédure Ménard.

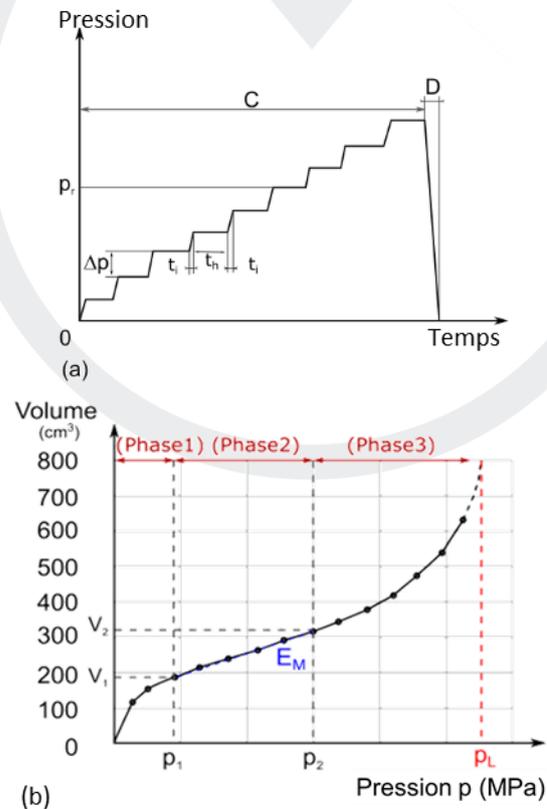


Figure 2 – (a) Programme de chargement type Ménard. (b) Réponse typique du terrain.

## Un travail remarquable

Il serait difficile, voire impossible, de choisir un travail remarquable spécifique fait par Louis Ménard. Comme déjà mentionné, il a développé des concepts et des méthodes qui ont contribué à un changement profond dans la façon dont la reconnaissance des terrains et le dimensionnement des ouvrages géotechniques sont réalisées en France. Le pressiomètre est connu et réputé dans le monde entier et a fait l'objet, depuis son invention, de conférences internationales dédiées, de manuels publiés dans différents pays, de plusieurs brevets et de normes internationales. Parmi ses contributions directes et indirectes à la communauté géotechnique liées à l'essai pressiométrique, on peut citer :

- Le Symposium International sur le Pressiomètre, ISP, aujourd'hui à sa 7ème édition (de 1982 à 2015),

- La revue internationale Sols-Soils, éditée de 1962 à 1980,
- Le développement des premières règles de calcul des fondations avec le pressiomètre (Notice D60), qui ont été incorporées dans les recommandations du LCPC (LCPC-SETRA, 1972) dans les années 70.
- Ces règles sont aujourd'hui incluses dans les annexes d'application nationale de l'Eurocode 7 pour le calcul des fondations (AFNOR 2012, 2013b). Pour plus d'informations sur les méthodes de calculs, voir Frank *et al.* (2022).
- Le Projet National ARSCOP, démarré en 2016 dédié à l'amélioration des techniques de reconnaissance et des méthodes de calcul avec le pressiomètre (Burlon and Reiffsteck, 2015).

Plusieurs livres consacrés à l'essai pressiométrique et/ou à son utilisation pour

l'ingénierie des fondations sont disponibles au niveau international. Le lecteur désireux d'en savoir plus sur cet essai peut se référer aux ouvrages suivants : Baguelin *et al.* (1978), Mair and Wood (1987), Briaud (1992), Clarke (1995), Frank *et al.* (2022).

## Interview

Cette contribution au Projet Time Capsule comprend un entretien avec le Professeur Roger Frank, qui a consacré toute sa carrière au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, le LCPC, et à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Il a été impliqué dans de nombreux aspects des essais pressiométriques au cours de sa carrière.

Si vous voulez voir l'interview, visitez la page du Projet Time Capsule sur le site internet du CFMS !

## Références

- AFNOR. (2012). *Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes. French standard NF P94-262.*
- AFNOR. (2013a). *Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 5: Flexible dilatometer test. European standard NF EN ISO 22476-5.* 31 pages.
- AFNOR. (2013b). *Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles. French standard NF P 94-261.*
- AFNOR. (2015). *Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 4: Ménard pressuremeter test. European standard NF EN ISO 22476-4.* 55 pages.
- Baguelin, F., Jézéquel, J., and Shields, D. (1978). *The pressuremeter and foundation engineering.* Trans Tech Publications, Clausthal.
- Briaud, J. L. (1992). *The pressuremeter.* A.A. Balkema/Rotterdam/ Brookfield.
- Burlon, S., and Reiffsteck, P. (2015). *ARSCOP: a French national project to continue with the development of the pressuremeter.* 7<sup>th</sup> International Symposium on Pressuremeters, ISP 7. Hammamet, Tunisia. May 2015.
- Clarke, B. G. (1995). *Pressuremeters in geotechnical design.* Blackie Academic and Professional, Glasgow.
- Frank, R., Cuira, F., Burlon, S. (2022). *Design of shallow and deep foundations.* CRC Press, 205 p.
- Gonin, H. (2005). *Louis Ménard, mon camarade d'école. 50 Years of Pressuremeters.* 5th International Symposium on Pressuremeters, ISP 5. Presses de l'ENPC/LCPC. 41–50. Paris, France, August 2005.
- LCPC-SETRA. (1972). *Fondations courantes d'ouvrages d'art, FOND. 72.*
- Mair, R. J., and Wood, D. M. (1987). *Pressuremeter Testing: Methods and Interpretation.* Construction Industry Research and Information Association.
- Ménard, L. (1967). *Règles d'utilisation des techniques pressiométriques et d'exploitation des résultats obtenus pour le calcul des fondations. Notice Générale D-60.*

## Remerciements

Merci au Professeur Roger Frank pour l'interview et pour son aide lors de la préparation de ce rapport. Merci à Nicolas Utter, François Depardon, Fabrice Emeriault et Pierre Delage pour les riches discussions lors des réunions du Projet Time Capsule.