

L'HyperPac 25 MPa comble le vide entre le pressiomètre Ménard et le dilatomètre flexible

HyperPac 25 MPa fills the gap between
the Ménard pressuremeter and the flexible dilatometer

G. Arsonnet

Géomatech, Champlan, France

J.-P. Baud¹

Eurogé, Avrainville, France

M. Gambin

Apagéo, Magny-les-Hameaux, France

R. Heintz

Eurasol, Luxembourg

ABSTRACT

The bore hole expansion test can be applied to any ground material, from the softer to the harder ones, so as to obtain their stress-strain behavior in situ. The authors submit their research on an equipment which permits to extend the use of the Ménard pressuremeter up to 25 MPa test pressure. They also give the first test diagrams towards this pressure in slightly fractured rocks.

RÉSUMÉ

L'essai d'expansion in situ d'une cavité cylindrique peut s'appliquer à tous les types de matériaux, des plus mous aux plus résistants, pour déterminer leurs propriétés mécaniques. Les auteurs présentent un appareil permettant d'étendre le domaine du pressiomètre Ménard jusqu'à des pressions d'essai de 25 MPa, ainsi que ses premières utilisations dans des roches peu fracturées.

Keywords: Pressuremeter, flexible dilatometer, rock moduli, rock limit pressure, hard soils.

Mots-clés : Pressiomètre, dilatomètre, modules des roches, pression limite des roches, sols raides.

1 INTRODUCTION

Les essais géotechniques in situ par expansion d'une cavité cylindrique dans les sols meubles et les roches tendres ont été développés sous l'impulsion de Louis Ménard à partir de 1955. Ainsi a été créé un corpus de techniques de réalisation des mesures et de méthodes d'exploitation des résultats obtenus dans le but de concevoir et

calculer toutes sortes de fondations et ouvrages en terre [1] [2].

Les mesures de déformation in situ dans les roches franches peu altérées ont connu un développement parallèle. Ainsi s'est développé le dilatomètre flexible encore appelé dilatomètre au rocher, sans toutefois avoir sur l'histoire de la mécanique des roches un impact comparable à celui du pressiomètre sur la géotechnique.

¹ Corresponding Author.

Pressiomètre et dilatomètre poursuivent le même objectif de mesure de modules par mesures de déformations radiales, mais pour des niveaux moyens de déformations comme de contraintes très différents, l'un en gardant l'objectif d'obtenir aussi une pression limite p_{LM} des sols, l'autre celui de réaliser des mesures précises des très faibles déformations des roches [3]. Enfin, le premier reste plus maniable que le second.

2 BESOINS SPECIFIQUES AUX ROCHES TENDRES ET ALTEREES

Un hiatus a toujours existé entre les mesures du pressiomètre dans les sols et celles du dilatomètre dans les roches.

La grande précision des dilatomètres type A a pour contrepartie une course limitée de leurs capteurs de déplacement, qui freine considérablement leur utilisation dans les roches trop fissurées ou altérées, dans lesquelles le calibrage du trou de forage est souvent impossible à l'endroit où l'on souhaiterait faire la mesure.

Par ailleurs avec le pressiomètre Ménard, malgré l'augmentation progressive, réalisée au cours de son histoire, de la pression maximale utilisable, il n'a pas été possible de rejoindre la gamme des pressions utilisées par le dilatomètre au rocher. Sur le plan des Normes Françaises ou Européennes puis ISO, son utilisation reste limitée à 5 MPa [4] [5] et son utilisation au-delà de cette limite, bien que de plus en plus demandée, ne dépasse guère 10 MPa.

Néanmoins, le besoin de solliciter à des niveaux très élevés les sols les plus raides et les terrains situés à la frontière subjective entre sols et roches, amène de plus en plus souvent la demande de sondes et contrôleurs pressiométriques (CPV) utilisables au-delà de 10 MPa. La connaissance des modules E_M et des pressions limites p_{LM} des roches altérées, plus généralement du comportement de ces terrains sous une déformation de type expansion radiale, reste un domaine peu exploré qui correspond à des besoins croissants en génie civil, comme le rappelle l'objet du colloque Athènes 2011.

3 AU-DELA DES LIMITES NORMALES DU PRESSIOMETRE

Le « pressiomètre » Ménard, malgré son nom, utilise quasi-systématiquement depuis son origine l'énergie d'un gaz sous pression pour réaliser les paliers égaux de chargement d'un liquide servant à la fois à l'expansion de la sonde et à la mesure des volumes déplacés. Les limitations qui en résultent sont d'une part celle de la pression de conditionnement des gaz industriels soit 20 MPa, d'autre part la résistance des sondes, dimensionnées pour satisfaire à l'obligation normative de 5 MPa avec une marge de sécurité qui permet d'aller bien au-delà, généralement jusqu'à 10 MPa, soit au double de cette limite, mais de façon exceptionnelle ou du moins avec un risque d'éclatement systématique croissant avec le degré de l'expansion de la sonde.

3.1 Au-delà de 10 MPa avec un pressiomètre type Ménard au gaz comprimé

Des exemples jalonnent l'utilisation du pressiomètre normal, souvent à grande profondeur, d'abord avec l'appareil à enregistrement manuel dès la fin des années 60, quand Ménard avait déjà développé des recommandations concernant l'utilisation du pressiomètre dans le rocher [6] [7], ou avec un pressiomètre à enregistrement numérique, le Géopress dans les années 90 :

- Bologne, Italie, 1986, granite, de 80 m à 190 m, pression d'essai 7 MPa
- Alise-Sainte-Reine, France, 1991, marnes, moins de 40 m, pression d'essai 10 MPa
- Limoges, France, 2004, gneiss, moins de 20 m, pression d'essai 11 MPa

Ces trois derniers sont représentés graphiquement² (figures 1, 2 et 3).

² Les graphes représentent, en échelles arithmétiques :

- la courbe pressiométrique, pour laquelle le volume est en ordonnée en fonction de la pression en abscisse,
- la courbe des volumes de fluage sur le même graphe, les valeurs de l'échelle de volume, écrites pour la courbe pressiométrique, étant à diviser par 10,
- la courbe des modules sécants à partir du point [P1], dont les valeurs sont données en ordonnées sur un axe secondaire à droite ; sa forme, en cloche ou directement décroissante est liée à la loi hyperbolique que suit la courbe pressiométrique elle-même [8].

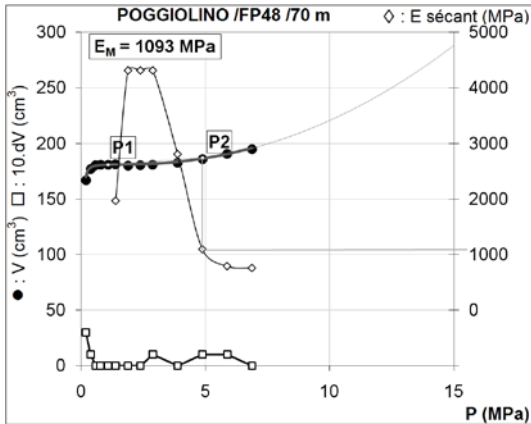


Figure 1. Un essai haute pression, Poggiolino, province de Bologne, 1986, pressiomètre Ménard type GA.

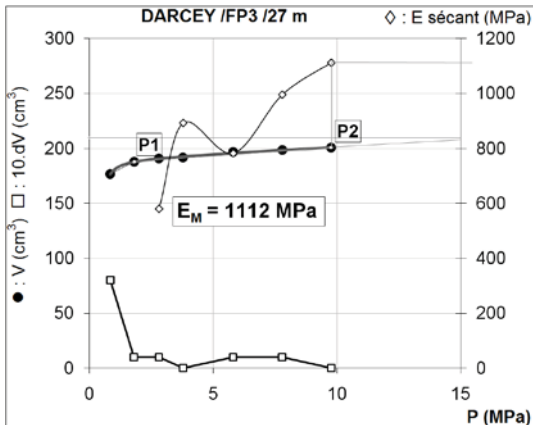


Figure 2. Un essai haute pression, marnes du Lias, Alise-Sainte-Reine, 1991, pressiomètre Géopress.

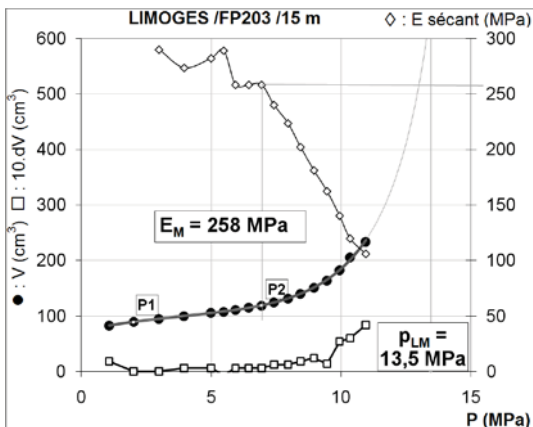


Figure 3. Un essai haute pression avec fluage, gneiss altéré, Limoges, 2004, pressiomètre Géopress.

Dès 1976, un rapport interne CERCHAR / Houillères du Bassin de Lorraine relate des essais à 90 MPa avec un prototype de "pressiomètre 1000 bars" de Ménard équipé d'une sonde à embouts rétractables [9] [10]. Avec ce pressiomètre remis en service par la société Eurasol au Luxembourg, une pression de 36 MPa été atteinte avant rupture de la sonde d'origine [11]. Une étude récente de sa fiabilité tant pratique que théorique a été entreprise au LCPC [12].

Enfin, Massonnet [13] a présenté des résultats d'essais poussés à 12 MPa, effectués avec un pressiomètre classique pourvu de manomètres types Bourdon de 16 MPa en pleine échelle, renforcé au niveau des gaines toilées métalliques et de leurs bagues de serrage. Les essais présentés sont dans les sables du Thanétien de Londres. L'auteur note la fragilité du voyant de lecture volumétrique avec fissuration fréquente au-delà de 10 MPa,

Les conclusions de cette pratique d'essais pressiométriques en très haute pression furent donc les suivantes :

- Dans des roches dures peu fissurées, dans lesquelles la pression de fluage n'est pas obtenue, il est possible d'atteindre 12 MPa avec un matériel pressiométrique en parfait état, sans fuites, d'une façon relativement sûre. Les sondes pressiométriques standard montées avec soin, soit à gaine caoutchouc directement au contact du sol, soit en tube fendu, supportent la pression sans risques de débayer la gaine dans un forage bien calibré dont la paroi se déforme peu.
- Lorsque le sol induré présente des pressions de fluage entre 5 MPa et 12 MPa, la même performance est plus difficile à réaliser, et les occasions de le faire au cours d'une reconnaissance géotechnique sont plus rares. Les quelques exemples présentés montrent qu'une roche altérée peut présenter le même type de comportement pressiométrique qu'un sol, avec une courbe de forme hyperbolique extrapolable vers des pressions limites de 12 MPa à 20 MPa.
- Malgré ces tentatives réussies, sporadiques au cours de l'histoire du pressiomètre, les donneurs d'ordre sont souvent restés peu intéressés, soit en raison du manque de pré-

cision sur le module E_M imputé à la mesure du déplacement par déformations volumétrique, soit également en raison de la difficulté d'approcher de façon fiable une pression limite p_{LM} .

- De nombreux utilisateurs de résultats pressiométriques restent cependant demandeurs d'une extension significative du domaine d'utilisation du pressiomètre. Ceci notamment en raison de la difficulté à trouver, sur échantillons carottés une mesure équivalente à la pression limite ; les mesures de R_c par exemple perdent leur signification pour l'ensemble d'un massif en raison de la fracturation des roches, que la mesure pressiométrique prend en compte.
- Des pressiomètres enregistreurs dépourvus du voyant de lecture visuelle (Géospad2 d'Apagéo) existent maintenant ; ils restent limités à une pression de 15 à 18 MPa, au-delà de laquelle la consommation de gaines de sondes standard et surtout de gaz devient une limitation d'usage.

3.2 L'apport du pressiomètre automatisé (GéoPac) et son évolution en version 25 MPa (HyperPac)

Le principe de ce pressiomètre de génération récente (article à paraître³) est d'assurer le programme de chargement pressiométrique par un système volumétrique à piston motorisé, auto-contrôlé par un dispositif d'asservissement électronique qui analyse la courbe en cours de construction, et stabilise les paliers de pression normalisés sans intervention d'un opérateur. Le pressiomètre est piloté à distance par un ordinateur de chantier « durci », la Géobox.

La nécessité de mise en œuvre d'une avance micrométrique du piston a d'emblée apporté à ce dispositif :

- une très grande précision des mesures de volume, déterminées lors des essais pressiométriques courants à 2.10^{-3} cm^3
- une stabilisation précise des paliers de pression du circuit de mesure (selon la précision des capteurs employés), et ne

nécessitant plus le recours au gaz comprimé industriel (azote), qui n'est utilisé que pour les cellules de garde.

Dès la mise au point de ce dispositif pour un appareil standard avec des composants électromécaniques, et notamment des capteurs de pression, dans une plage de mesures limitée peu au-dessus de la limitation normative de 5 MPa, il est apparu que le même principe constructif fonctionnerait à des pressions beaucoup plus élevées.

Pour la construction d'un prototype HyperPac, l'objectif visé a été une pression de 25 MPa, soit 5 fois la limite des essais normaux, qui a le mérite de correspondre à la fois au domaine de mesures à combler entre essais au pressiomètre et essais au dilatomètre, et à un dimensionnement des composants mécaniques et électromécaniques industriels éprouvés et fiables.

L'utilisation d'un cylindre (fig. 4), celui où circule le piston, largement dimensionné supprime tout risque d'explosion en cas de fuite ou rupture d'un composant du système hydraulique, des tubulures ou de la sonde.

La résolution de mesure de déplacement du piston motorisé est inférieure à $1 \mu\text{m}$, correspondant à une mesure théorique de déplacement du volume de 1.10^{-3} cm^3 , soit pour la sonde décrite (fig. 5) un déplacement moyen de la paroi de l'ordre de $3.10^{-2} \mu\text{m}$.

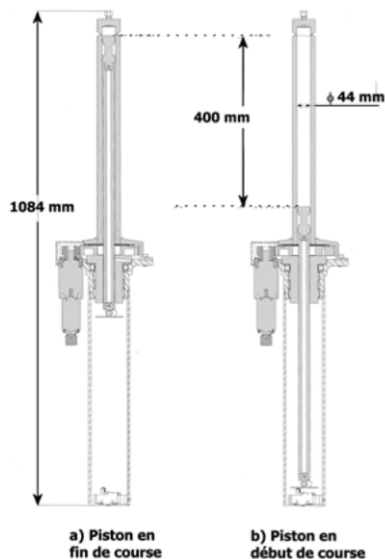


Figure 4. Pressiomètre auto-contrôlé HyperPac. Schéma de principe du volumètre à piston motorisé asservi.

³ G. Arsonnet, J.P. Baud, M. Gambin, W. Youssef, Le pressiomètre auto-contrôlé GéoPac.

C'est sur la sonde de mesure (au contact du forage, et au calibrage de celui-ci, que devait être portée l'attention. Nous avons utilisé une sonde monocellulaire de 46 mm de diamètre, avec différents types de gaines, selon une gamme de résistances (de dureté 40 à 90 Shore), similaires à celles des sondes dessinées par Ménard pour son « pressiomètre 1000 bars » [9].

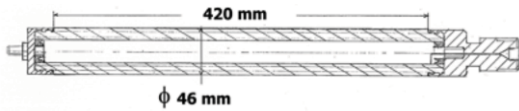


Figure 5. Schéma de la sonde 46 mm THP Géomatech

3.3 Exemples d'essais au pressiomètre automatique Hyperpac 25 MPa

Les mesures et essais présentés ici apparaissent comme une « simple » transposition des opérations usuelles pour un essai pressiométrique normal, avec les dispositions propres aux sondes dilatométriques de type B [14] :

- Le calibrage d'une sonde très haute pression se fait par paliers de l'ordre de 2 à 3 MPa dans un tube épais d'acier de forte résistance élastique, avec correction de sa déformation propre, vérifiée soit par le calcul soit par l'utilisation d'un tube double en équipression [15].
- L'étalonnage d'une sonde 46 mm très haute pression amène à des valeurs de la résistance propre des gaines de l'ordre de 0,6 à 1,2 MPa selon la dureté Shore et l'épaisseur de la gaine utilisée.
- La capacité de déformation de ces sondes est actuellement limitée à 350 cm³, soit, pour une cellule de mesure (fig. 5), une déformation relative de 50 % en dV/V (23 % en dr/r).

On retrouve ces deux éléments classiques de correction sur les pressions et les volumes mesurés sur les graphiques d'essais dans des roches ci-après, faites dans des forages réalisés avec un carottier de 46 mm à couronne diamantée :

- Grès de Fontainebleau, anciennes carrières de pavés à Saulx-les-Chartreux (91) et

- Calcaire de Beauce, carrière de Roncevaux (45).

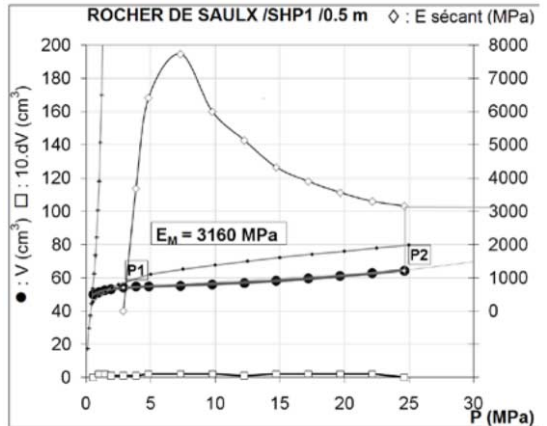


Figure 6. Grès de Saulx à 25 MPa sans fluage, (expansion et résistance propres de la sonde en gris).

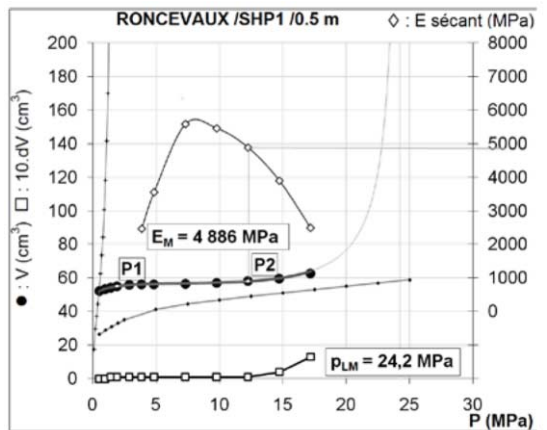


Figure 7. Calcaire de Beauce, avec un début de fluage à 18 MPa (expansion et résistance propres de la sonde en gris).

On remarquera la pente des courbes de calibrage, quasi-rectilignes entre le contact du tube et 25 MPa, la pente étant ici de l'ordre de 1 cm³/MPa en utilisant l'eau comme fluide de transfert et mesure. La qualité d'ajustement par une régression linéaire d'une part, à l'aide d'une hyperbole d'autre part, est une mesure indirecte de la précision atteinte par l'appareil sur les volumes, ce qui permet de présager une excellente fiabilité des mesures et une diminution drastique de la pente en utilisant une huile incompressible.

3.4 Mesures de modules dans la plage 0 – 25 MPa et fluage des sols très indurés et des roches tendres

L'interprétation des essais en très haute pression peut donner lieu à des estimations de modules variant selon l'intervalle de pression retenu.

Sur les exemples présentés, et en considérant l'intervalle de pression le plus étendu, les modules E_M obtenus sont respectivement de 3 200 MPa dans un grès et de 4 900 MPa dans un calcaire. Pour ce dernier essai, l'amorce de fluage permet d'extrapoler une pression limite de 24,2 MPa, soit un rapport E_M/p_{LM} de 200.

4 CONCLUSION. DEVELOPPEMENTS FUTURS

L'appareil présenté, l'HyperPac 25 MPa, comprend un contrôleur pression-volume doté d'un volumètre à piston asservi, les paliers de pression normalisés étant stabilisés sans intervention d'un opérateur. Cet appareil permettant d'atteindre 25MPa et doté d'une capacité de 600 cm³, est destiné à la mesure pressiométrique des roches tendres pouvant présenter un début de rupture avant cette pression, et des roches cimentées.

En vue d'une utilisation courante d'essais pressiométriques à 25 MPa par les bureaux d'études, le développement de l'appareil porte actuellement sur les points suivants :

- Elargissement de la gamme des sondes très haute pression dont le diamètre pourra être aussi de 63 mm ou 76 mm selon les normes pressiométriques.
- Réduction à une valeur minimale du terme de correction de calibrage ; les sondes garderont par contre, pour une robustesse compatible avec leur utilisation, une valeur de résistance propre élevée (mesurée au cours de l'étalonnage), qui n'est pas préjudiciable à la précision de la mesure.
- Mise à disposition d'une gamme d'outil de forage calibrés, carottiers et outils destructifs adaptés aux sols et roches visés⁴.

REMERCIEMENTS

Remerciements à l'équipe technique des sociétés Géomatech, Apagéo et Cedarnet, qui a fait en sorte que le prototype HyperPac soit complètement opérationnel au cours de l'année 2010. La première présentation publique de fonctionnement à 25 MPa a été faite lors de Journées Techniques Apagéo les 23 et 24 septembre 2010.

REFERENCES

- [1] M. Cassan, Les essais pressiométriques et leurs applications en France, rappels historiques et état des connaissances, *ISP5-PRESSIO 2005 Vol. 2. Gambin, Magnan et Mestat (ed.), LCPC, Paris* (2006), 125-200.
- [2] M. Gambin, Le pressiomètre, in I. Sharour et R. Gourvès, *Reconnaissance des terrains in situ, Hermès Sciences - Lavoisier Ed.* (2005), Chapitre 4, 104-146.
- [3] M. Galera, M. Alvarez, Z.T. Bienawski, Evaluation of the deformation modulus of rock masses. Comparison by pressuremeter and dilatometer test, *ISP5-PRESSIO 2005 Vol. 2. Gambin, Magnan et Mestat (ed.), LCPC, Paris* (2006), 239-256.
- [4] Norme NF P94-110-1, Afnor (2000).
- [5] Norme EN-ISO 22476-4, CEN, en enquête probatoire.
- [6] L. Ménard, Essais pressiométriques dans le rocher, *Notice Etudes Pressiométriques Louis Ménard D21* (1967).
- [7] L. Ménard, Application des essais pressiométriques aux études de tunnel en terrain rocheux, *Notice Etudes Pressiométriques Louis Ménard D36* (1966).
- [8] J.-P. Baud et M. Gambin, Homogenising MPM test curves by using a hyperbolic model, *ISC3 Taipei, Geotechnical and Geophysical Site Characterization – Huang & Mayne (eds) London* (2008), 975-980.
- [9] L. Ménard, Le pressiomètre éclateur de roches, *Notice Etudes Pressiométriques Louis Ménard D23* (1974).
- [10] J. Arcamone, R. Poirot et R. Schwartzmann, Utilisation de la pressiométrie dans les études minières, *C.R. Symposium. Int. Essais en place*, Paris (1983), vol. 2, 187-193.
- [11] R. Heintz, Rapport national du Grand-Duché du Luxembourg, *ISP5 – PRESSIO 2005 Vol. 2. Gambin, Magnan et Mestat (ed.), LCPC, Paris* (2006), 431-440.
- [12] R. Heintz et P. Reiffsteck, Essais pressiométriques haute pression, Rapport de recherche n°11J021, *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris* (2003).
- [13] R. Massonnet, Le pressiomètre sous haute pression, *ISP5-PRESSIO 2005, Vol. 1. Gambin, Magnan et Mestat (ed.), Presses ENPC/LCPC, Paris* (2005), 81–90.
- [14] Norme EN-ISO 22476-5, CEN, projet.
- [15] L. Ménard, Exécution des essais pressiométriques dans le rocher, *Notice Etudes Pressiométriques Louis Ménard D3* (1966).

⁴ Pour les terrains indurés et même pour les roches, les auteurs estiment que la minimisation du délai entre forage et

essai reste aussi essentielle à la qualité de la mesure des modules que dans les sols meubles.