

RotoSTAF[®], une amélioration déterminante de l'autoforage du pressiomètre Ménard.

RotoSTAF[®], a major improvement in self bored Ménard pressuremeter.

Gérard ARSONNET,
Géomatech, Champlan, France

Jean-Pierre BAUD
Eurogé, Avrainville, France

Michel GAMBIN
Apagéo, Magny les Hameaux, France

RÉSUMÉ – L'autoforage d'un tube fendu à la base d'un train de tube de même diamètre (méthode STAF) est mis en œuvre pour les essais pressiométriques depuis une dizaine d'années. Elle permet la réalisation, dans une gamme assez large de sols, d'essais pressiométriques Ménard de très bonne qualité, puisqu'ils ont toutes les caractéristiques des essais par autoforage déjà connus en sols mous. Des difficultés apparaissent toutefois dans les sols cohérents, en raison du ralentissement progressif de l'autoforage par le frottement. Cela conduit les utilisateurs à réaliser des passes de l'ordre de la dizaine de mètres dans les sols granulaires et moins dans les sols cohérents. Pour résoudre cela, un système de rotation du tubage simultanément à son avancement a été imaginé et a conduit à la construction d'une tête de forage dite RotoSTAF, permettant à la fois la roto-percussion du train de tige interne et la rotation simultanée du tubage externe, ainsi que, chaque fois que nécessaire, la rotation à droite ou à gauche du train de tiges de forage pour soit déployer l'outil soit le rentrer. Les résultats en termes de qualité des essais pressiométriques sont extrêmement encourageants, et la gamme des terrains couverts par le RotoSTAF a été élargie des sols mous à des terrains très raides. La communication expose des essais comparés dans un même site, entre le RotoSTAF, le STAF et forage préalable traditionnel.

ABSTRACT – The self-boring of a slotted tube at the base of a casing of the same diameter, i.e. the STAF method, whereby a protubing drag-bit is rotated, has been implemented in pressuremeter tests for the last ten years. It allows carrying out Ménard pressuremeter tests of very good quality in a broad range of soils. However, difficulties arise in more cohesive soils, due to the gradual slowing of the tube driving by wall friction. This lead users to limit drilling depth to stages of ten meters in granular soils and even less in cohesive soils. To solve this problem, a mechanical system which can simultaneously rotate the casing during its advance and apply percussion to the drill bit was devised and led to the construction of a typically new drill head called RotoSTAF, permitting rotary percussion of the string of drill rods and simultaneous rotation of the casing. Further the head can also simply rotate the string of rods, clockwise or anti-clockwise, to actuate the extendable drilling bit either at the start or at the end of the drilling stage. The results in terms of quality of pressuremeter tests are extremely stimulating, and soil range covered by RotoSTAF was extended from soft soils to soft rocks. This paper presents results comparing tests performed on the same site using either RotoSTAF technique, or the previous STAF method and traditional pre-drilling.

KEYWORDS: Ménard PMT, drilling, self boring casing, hard soil
MOTS-CLÉS : pressiomètre Ménard, forage, tubage autoforé, sols raides

1. L'AUTOFORAGE DE LA SONDE PRESSIOMETRIQUE : UNE EVOLUTION INDISPENSABLE.

1.1. Définition, principe, historique.

La mise en place idéale de la sonde pressiométrique dans un forage du terrain « vierge » est un idéal que Louis Ménard avait intégré à son raisonnement sur la nature de l'essai dès les premiers dessins de courbes de son mémoire de fin d'étude à l'Ecole de Ponts et Chaussées (Ménard, 1955) et sa thèse à l'Université de l'Illinois (Ménard, 1957). C'était un homme pragmatique, comme les premiers collaborateurs dont il s'est entouré, et soucieux de leur faire mettre en service rapidement un outil pratique et opérationnel. Les 10 à 15 premières années du forage pressiométrique ont donc tout entier été consacrées à la mise au point de méthodes de forage accessibles à la majorité des ateliers de forages, et notamment à l'utilisation de la boue bentonitique comme moyen de contrebalancer la décompression des parois du forage. De cette époque date également le besoin pour les sociétés du groupe Ménard de concevoir, parce qu'elle

n'existait pas sur le marché, une foreuse hydraulique spécialement adaptée, au niveau de ses pompes d'injection notamment, aux techniques pressiométriques.

1.2. Développement initial dans les sols compressibles.

Dès les premières évaluations de l'influence du mode de forage sur les résultats, à la fois dans le groupe Ménard et ses concessionnaires privés, et chez les concessionnaires publics du réseau des LPC, l'idée de la nécessité de tendre vers une mise en place sans remaniement ni décompression du sol s'est fait jour, non sans confrontations parfois polémiques sur la possibilité même de continuer à utiliser les résultats d'essais en forage préalable pour le dimensionnement géotechnique. Baguelin et Jezéquel (1970) sont les premiers à avoir développé la notion d'autoforage, et à recevoir de Louis Ménard l'autorisation de l'accoler à celui de son invention, et utiliser le terme « Pressiomètre Autoforeur » pour les sondes autoforeuses et contrôleurs pression-volume mis au point au LCPC.

Dans le même temps, d'autres techniques comparables de mise en place et de contrôle de la sonde ont vu le jour : le Camkometer de Cambridge initialement pensé pour la mesure de K_0 , et devenu le pressiomètre autoforeur de Cambridge In-Situ, la sonde autoforeuse marine de l'IFP.

Comme le PAF, ces développements très prometteurs ont donné lieu à un travail de recherche dans les sols compressibles, pour lesquels le « remaniement » des essais semblait plus grave, et ont évolué vers un protocole d'essais en volume contrôlé. Une dichotomie d'usage s'est faite entre autoforage et volume imposé d'une part, essais en forage préalable et essais type Ménard en pressions imposées d'autre part. Mais cette « division du marché » correspondait également à une pratique de l'autoforage limitée aux sols compressibles, avec des instruments dédiés à la recherche sur le comportement des sols, et une pratique du forage préalable dans tous les sols jusqu'aux roches tendres, avec des instruments dédiés à la pratique quotidienne du dimensionnement des fondations.

1.3. Difficultés de l'extension de l'autoforage à tous les sols.

La difficulté pour les sondes autoforeuses de sortir du domaine des sols compressibles vient de leur concept d'outil de forage interne à la sonde, qui va de pair avec un certain refoulement du terrain par le corps de sonde lui-même, dont l'épaisseur n'est jamais négligeable. Le frottement dans les terrains raides limite alors rapidement la pénétration de la sonde.

L'apparition dans les années 70 des outils de forage avec une couronne excentrique rétractable (méthode Odex), dans des applications de forage assez différentes (mines et carrières) avait été pressentie dès cette époque pour le tube fendu pressiométrique, et exposée en 1983 dans une conférence du groupe Ménard, peu avant la dissolution des sociétés de Louis Ménard. La réalisation opérationnelle d'un outil d'autoforage du tube fendu n'est survenue qu'une vingtaine d'années plus tard chez Géomatech.

Dans l'état des connaissances sur le pressiomètre en 1991 (Amar et al.), le pressiomètre autoforeur donne lieu à l'appréciation suivante : « L'obtention d'un remaniement minimum lors du forage dépend de la position de l'outil de coupe, de la pression de circulation du fluide et de la vitesse de pénétration ». Nous verrons que cette remarque s'applique également au tubage autoforé.

2. ESSAI AUTOMATIQUE DANS UN TUBE FENDU AUTOFORE.

2.1. La méthode d'autoforage STAF

La mise au point progressive du système de tubage autoforé STAF (Arsonnet, Baud, Gambin, 2005) a été menée avec la conviction que la décompression avant le début des essais en forage préalable affectait la mesure des modules non seulement des sols mous, mais de toute la gamme des sols, fermes, raides durs, y compris les roches altérées, et que ce problème devait être résolu indépendamment du type de programme de chargement de l'essai, programme normalisé Ménard à pressions imposées ou programmes à déplacements imposés.

Les photos du système vu en coupe, forage tube et mise en place de la sonde, en rappellent le principe (figure 1).

Dérivant d'un système de forage préalable parmi les plus utilisés, la rotopercussion avec injection de boue de forage, le but était la maîtrise du degré de décompression à réduire en tendant vers l'équilibre entre le diamètre de forage et la mise en place du tubage qui le suit immédiatement. Au contraire, les sondes autoforeuses sont essentiellement des systèmes de fonçage de la sonde dans le sol mou, avec outillage de forage

interne à la sonde, dont le but est de réduire le degré de refoulement du sol produit par le fonçage.



Fig.1 Vue éclatée du tubage autoforé avec l'outil excentrique en position fermée, en position ouverte, et remplacé par la sonde.

2.2. Description du système de forage autoforé RotoSTAF.

Le système STAF en vibration, en service depuis plusieurs années, souffre du problème du « freinage » par le frottement : limitation des passes, obligation de casser le frottement par intermittences, soit par rotation soit par réalésage. Afin d'augmenter l'efficacité de la remise en rotation différée du train de tubages STAF, le procédé RotoSTAF a été développé dans un objectif de recherche d'une mise en rotation simultanée (figure 2).

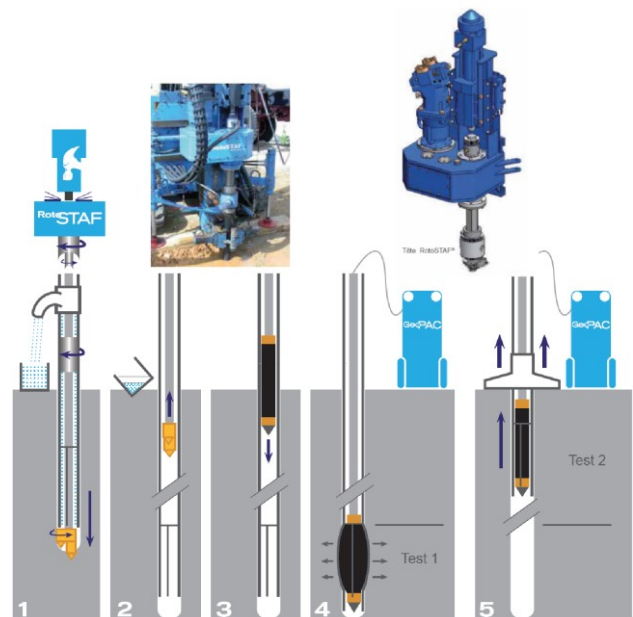


Fig.2. Séquences d'autoforage et d'essais pressiométriques avec le système RotoSTAF.

Le matériel de forage dans le trou est exactement celui du système STAF avec progression du tube par vibration, déjà décrit. La différence fondamentale consiste en la mise en rotation lente du train de tubage en contact avec le sol. La tête de foration RotoSTAF est un équipement de foration spécifique conçu à cet effet : rotation du train de tubages autoforés en sens inverse (à droite, avec filetage à butée antiblocage) de la rotation des tiges de forage en rotopercussion (à gauche, filetage type cordon) ; la rotation des tubes est deux fois plus lente que celle des tiges de forage. La tête RotoSTAF est donc équipée de deux sorties rotatives concentriques, l'une intérieure avec emmanchement R32, l'autre extérieure avec un emmanchement hexagonal entraînant un raccord hexagonal vissé en tête du train de tubages 63 mm. La percussion est également partagée entre les deux équipements, tiges et tubes concentriques.

La progression de la descente simultanée du tubage autoforé et de l'outil destructif excentrique à sa base devient ainsi beaucoup plus régulière. Dans les sols mous à meubles, les sols cohérents peu consistants et les sols granulaires peu compacts, la percussion est très peu sollicitée, pratiquement pas dans les sols fins. Au fur et à mesure de l'apparition de bancs plus consistants ou de terrains à blocs et éléments durs, la percussion entre en action progressivement avec une fréquence croissante, toujours en soutien de la double rotation.

Un des avantages majeurs de ce système est la possibilité de réduire le débord annulaire de l'outil excentrique au strict minimum pour assurer le découpage correspondant au diamètre du tubage 63 mm. La couronne de forage à la base du sabot de pied du tube fendu 63 mm constituant la base du train de tubage 63 mm en cours d'autoforage assure l'arasement de la paroi du trou des éléments du sol éventuellement restés en hors-profil après le découpage par l'outil excentrique. Le frottement du train de tubage autoforé contre le sol est réduit à la pellicule de contact, lubrifiée à la fois par le fluide de forage et par l'eau en sol saturé. Au moment de l'arrêt d'une passe d'autoforage, l'ensemble du tubage 63 mm est en contact avec le sol et constitue pour le tube fendu qui sera remonté essai par essai une poche autoforée calibrée et en équilibre avec la pression des terres au repos, qui aura été « dérangée » le moins possible par l'autoforage.

2.3 Essai Géopac dans un forage RotoSTAF : alliance de l'autoforage et de l'automatisation de l'essai.

La cavité d'essai parfaitement autoforée et que représente le positionnement du tube fendu par autoforage RotoSTAF permet d'exploiter au mieux les potentialités offertes par le pressiomètre automatique GéoPAC (Figures 3 et 7).

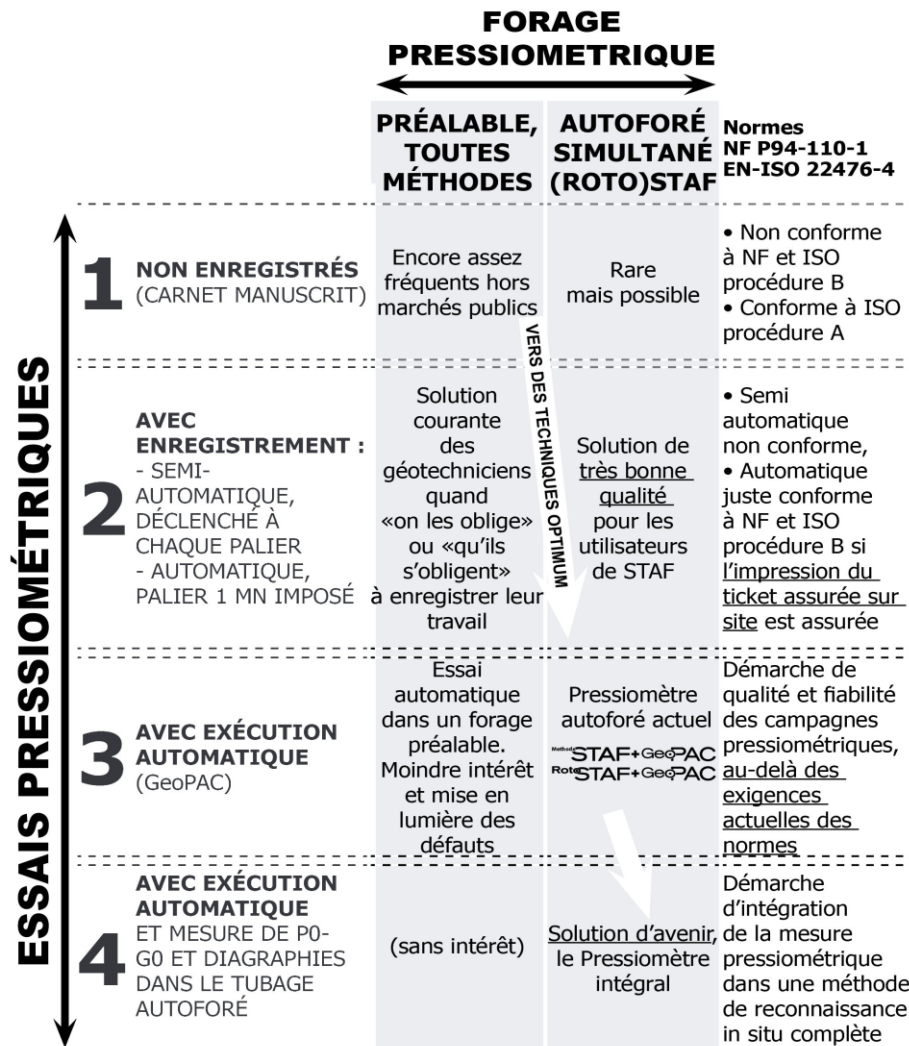


Fig.3. Optimisation des techniques de forage et d'essais pressiométriques

3. PRESENTATION DE QUELQUES ESSAIS ROTOSTAF+GEOPAC DANS DES TERRAINS DIVERS.

Nous donnons ci-dessous trois exemples de chantiers sur lesquels le donneur d'ordre a donné l'occasion d'utiliser sur plusieurs forages le système Rotostaf et le pressiomètre automatique GéoPAC, et rendu possible la comparaison avec des profils d'essais réalisés par forage préalable, soit provenant de campagnes antérieures, soit de forages pressiométriques réalisés en parallèle.

3.1. Chantier 1 : station d'épuration

Cet ouvrage situé dans un horizon de sables et graviers de Seine sur Fausses Glaises et Argiles plastiques a été l'occasion dans sa phase de conception de comparer les techniques classiques de forage et les techniques STAF. La figure 4 montre les résultats en termes de modules d'Young, par $E_y = E_M / \alpha^2$ (Baud et Gambin, 2013). Les modules dérivés des techniques STAF et RotoSTAF se placent au dessus de la moyenne de l'ensemble des essais réalisés par forage classique et en dessous des valeurs de modules E_0 obtenus par cross-hole.

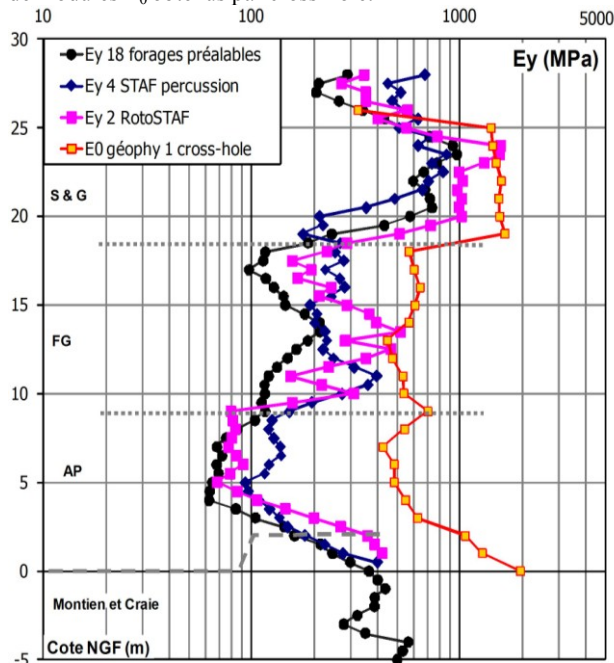


Fig.4. Comparaison (échelle logarithmique) des modules d'Young obtenus sur le chantier 1, et par mesure sismique.

3.2. Chantier 2 : site expérimental remblai sur sol compressible

Situé dans des sols limono-tourbeux très mous d'une vallée alluviale, ce site expérimental de remblais sur sols compressibles a été étudié par une campagne complète de sondages pressiométriques. Les méthodes de forage classiques avec tarière à main à sec ou avec injection de boue, forages en rotation bicône tricône, sonde foncée ont servi de référence aux essais au STAF, RotoSTAF et pressiomètre autoforeur. Les profils obtenus par les techniques STAF et RotoSTAF se positionnent entre les techniques classiques et le pressiomètre autoforeur.

Les résultats mettent en évidence l'importance de la qualité du forage, et l'importance des passes de forage dans ces sols très mous. Le profil tiré du forage STAF classique réalisé par passes de 2 m est très proche des profils du pressiomètre autoforeur.

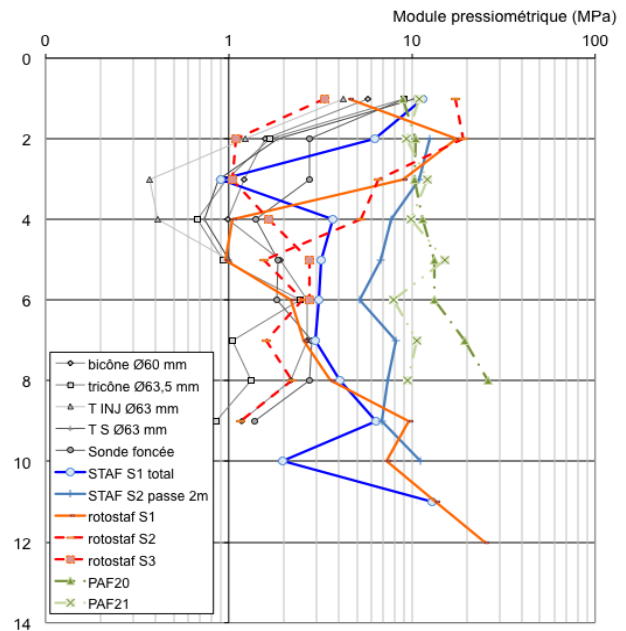


Fig.5. Comparaison (échelle logarithmique) des modules pressiométriques obtenus sur le chantier 2.

3.4. Chantier 3 : rénovation bâtiment industriel

Ce chantier de reprise en sous-œuvre intéresse des terrains du Bartonien parisien, principalement Calcaire de Saint-Ouen. Une importante campagne de reconnaissance fournit une comparaison du RotoSTAF avec une série de données antérieures. Ces résultats montrent que dans ces terrains hétérogènes les techniques de tubages autoforés limitent les dispersions en préservant au mieux les parois du forage.

Les techniques de forage classiques ont eu tendance à sous estimer de manière importante les modules des matériaux en place.

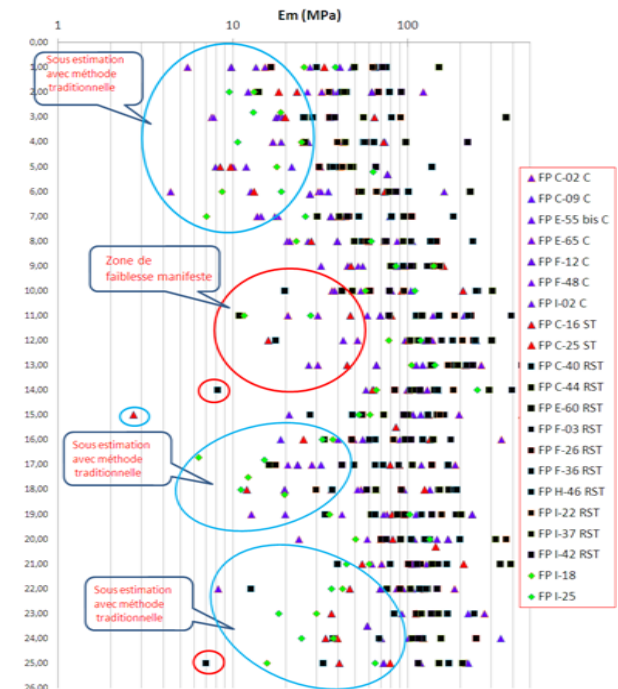


Fig.6. Comparaison (échelle logarithmique) des modules pressiométriques obtenus sur le chantier 3.

4. LES COURBES D'ESSAIS ROTOSTAF + GEOPAC : VERS LA FORME HYPERBOLIQUE PARFAITE.

En conclusion, la figure 7 examine les effets de différentes solutions de forage sur le sol vierge, la pression des terres au repos, et le remaniement que ces différentes méthodes tentent de minimiser, pour emprunter entre décompression et recompression, une voie centrale idéale étroite.

Dans cette figure, l'axe horizontal schématise les conditions de variation de la pression initiale à la paroi du forage pressiométrique p_0 , soit décomprimé par mise à la pression atmosphérique, soit comprimé par refoulement et son évolution au cours de l'essai.

Le temps de recompression à p_0 est d'autant plus long que le forage est alésé trop grand (surdimensionné) et que le temps d'attente sans soutènement a été long. Par conséquent, la durée de décompression sans soutènement de la paroi doit être réduite au minimum pour limiter la progression de l'anneau remanié, lié à la chute de p_0 à zéro à la paroi. D'où la notion de longueur de passe de forage ouvert dans les normes, liée directement au temps de décompression.

La compression de la paroi due au refoulement produit une pression interstitielle de valeur variable, d'autant plus préjudiciable qu'elle est élevée par rapport à la pression limite dans les sols mous cohérents. Elle implique un temps de dissipation de la pression interstitielle aussi long que possible avant l'essai, et non contrôlé, sauf avec capteur de pression interstitielle sur la sonde.

Après un autoforage STAF et RotoSTAF, la recompression à p_0 n'exige qu'un faible déplacement du contact tube/sol qui peut être équilibré en quelque(s) minute(s) avant départ de l'essai.

Les essais pressiométriques Ménard automatisés au pressiomètre GéoPAC et réalisés dans la cavité autoforée d'un tube fendu présentent, entre un point de contact représentant une mesure de p_0 et le dernier point d'essai, une dérivée par points $\Delta V/\Delta P$ continuellement croissante, qui permet une modélisation par une hyperbole, développée par ailleurs (Figure 8) (Baud et al., 2013). L'obtention in-situ d'essais pressiométriques autoforés parfaits, et leur ajustement sur un modèle hyperbolique simple, ou de leur dérivée en module tangent sur un autre modèle plus complexe est dans nos objectifs, et rejoint les préoccupations actuelles d'élargissement de l'usage de l'essai pressiométrique (Briaud, 2013).

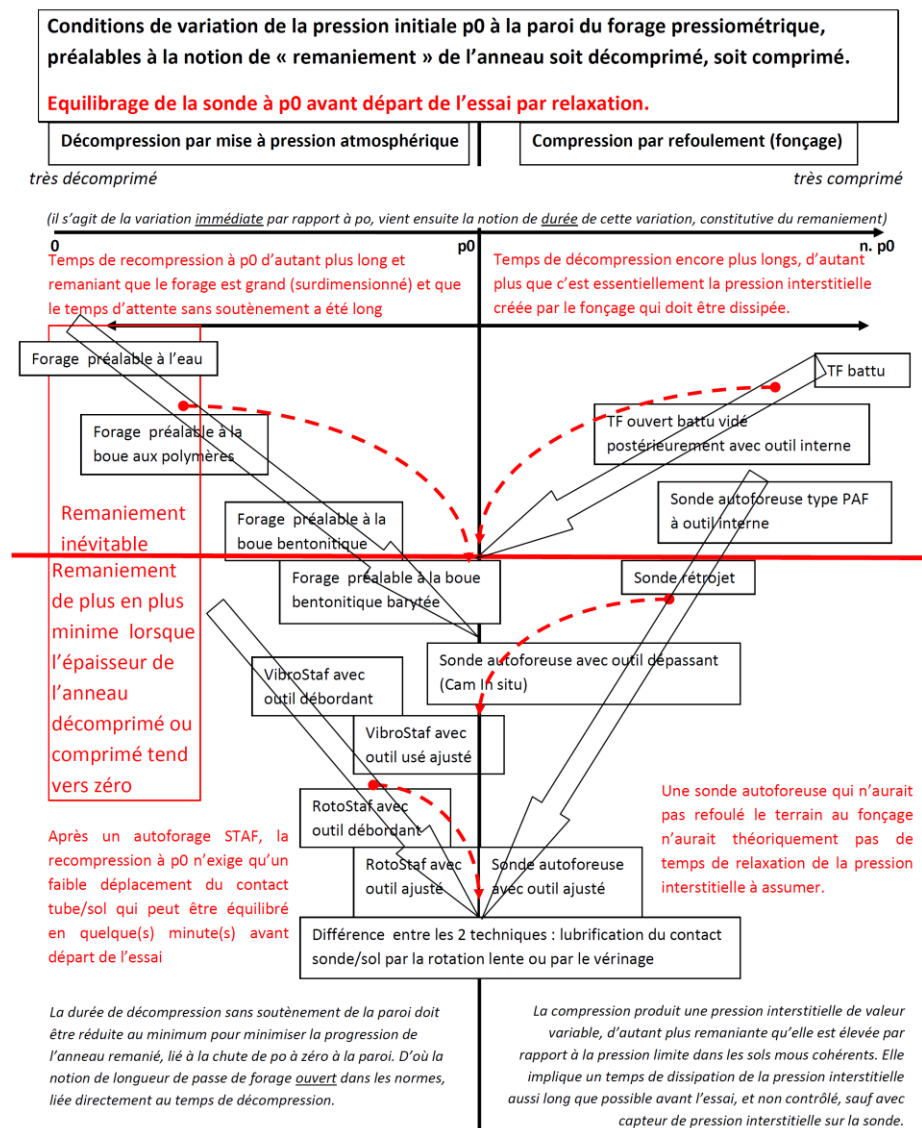


Fig.7. Effets de différentes méthodes d'autoforage vis-à-vis de la modification de la pression des terres au repos.

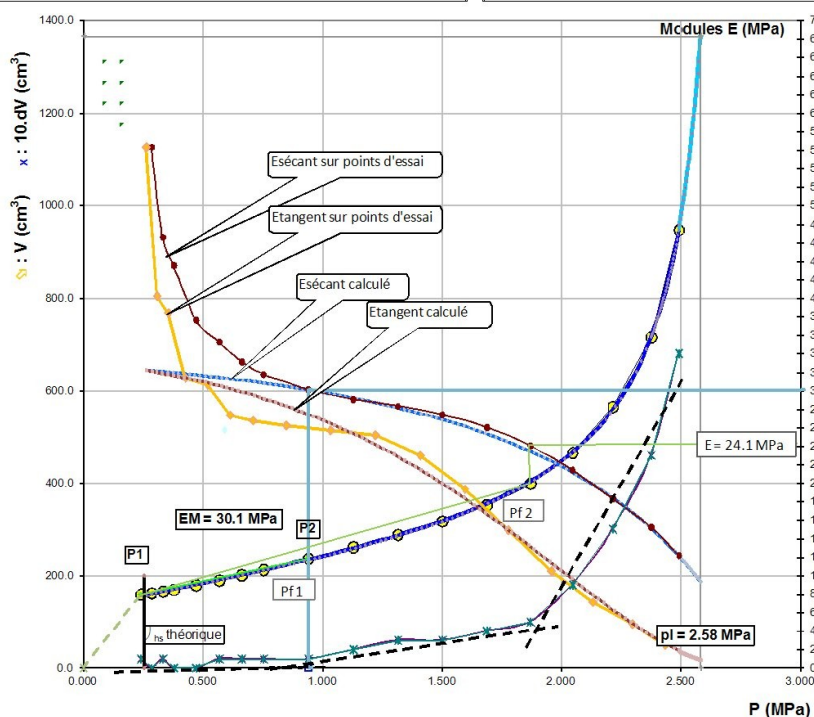


Fig.8. Exploitation d'une courbe d'essai, autoforage Rotostaf, essai GéoPAC. (in Baud et al. 2013). En regard de la courbe du module sécant à partir des points d'essai, la figure 3 de L. Ménard, 1961, sur laquelle est surimposée la courbe module-déformations de cet essai. Elle souligne la vision prémonitrice de Ménard, remarquablement confirmée par les essais autoforés.

5. REMERCIEMENTS.

Cette présentation des applications du Pressiomètre automatique GéoPAC dans un tubage autoforé RotoSTAF est écrite par des géotechniciens utilisateurs des essais, et un des constructeurs, qui ont collaboré pour la mise au point de l'appareil et ses premiers essais sur le terrain. Le projet n'aurait pas abouti sans le travail assidu et passionné de nombreux collaborateurs, à différents stades du projet au fur et à mesure de la découverte que les difficultés étaient l'occasion d'améliorer la mesure pressiométrique, et la volonté de la direction des sociétés impliquées. Il y a lieu de citer en particulier, Jean-Pierre Arsonnet, Damien Bréchet, Lionel Daré et leur équipe « métrologie » pour Apagéo, Salvador Dos Santos et Nicolas Girard pour Géomatech, Thierry Lartigaud pour Eurogéo, Jean-Yves Boumedi pour Bouygues TP (chantier figure 4), Stéphane Curtil (aujourd'hui Géos), Thibaut Perini et Philippe Reiffsteck pour Terrasol (chantiers fig. 5 et 6).

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amar S. Clarke B., Gambin M. & Orr T. (1991) The Application of Pressuremeter Test Results to Foundation Design in Europe" State-of-the-art report, ISSFME European Regional Technical Committee Pressuremeters. Part 1 : Predrilled Pressuremeters, Self-boring Pressuremeters. 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.4, A. A. Balkema, Rotterdam, May 1991
- Arsonnet G., Baud J.-P., Gambin M., (2005) Réalisation du forage pour essais pressiométrique par tube fendu auto-foré (STAF®). *PRESSIO 2005 Paris*.
- Baguelin F., Jézéquel J., Le Mée E. et Le Méhauté A. (1972) Expansion de sondes cylindriques dans les sols cohérents. *Bull. Liaison Labo. P.et Ch. N°61* p.189-202.
- Baud J.-P. (1985) Le PAC, Pressiomètre Assisté par Calculateur, *Revue Travaux* n° 599, Mai 1985.
- Baud J.-P., Gambin M., Uprichard S. (1992) Modeling and automatic analysis of a Ménard pressuremeter test. *Géotechnique et informatique*, Presses des Ponts, Paris.
- Baud, J.-P., Gambin, M. (2013). Détermination du coefficient rhéologique α de Ménard dans le diagramme Pressiorama®. *Actes du 18ème CIMSG, Paris, 2-6 sept 2013*.
- Baud, J.-P., Gambin, M. Schlosser F. (2013). La courbe contrainte-déformation au pressiomètre Ménard. *Actes du 18ème CIMSG, Paris, 2-6 sept 2013*.
- Briaud J.-L. (2013) The pressuremeter test : expanding its use. Ménard Lecture, *Actes du 18ème CIMSG, Paris, 2-6 sept*.
- Cassan M. (1978) *Les essais in situ en mécanique des sols*. Eyrolles, Paris
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (1973) *Essai pressiométrique normal*, Mode opératoire, Dunod, Paris, 52 pages.
- Ménard L. (1955) *Le pressiomètre*. Travail de fin d'étude. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Ménard L. (1957) *An apparatus for measuring the strength of soils in place*. Thesis for the degree of Master of Science, University of Illinois.
- Ménard L. (1961) *Influence de l'amplitude et de l'histoire d'un champ de contraintes sur le tassement d'un sol de fondation*, Ve ICSMFE, 1961, Paris.
- Pressiomètres Louis Ménard (Les) (1962) *La réalisation du forage dans la méthode pressiométrique d'étude des sols*, Techniques Louis Ménard (1960) Brochure D-10 pour les concessionnaires, Paris
- Reiffsteck P., Lossy, D. and Benoît, J., (2012). *Forages, Sondages et Essais In Situ Géotechniques – les outils pour la reconnaissance des sols et des roches*, Presses des Ponts, Paris, 796 pages.

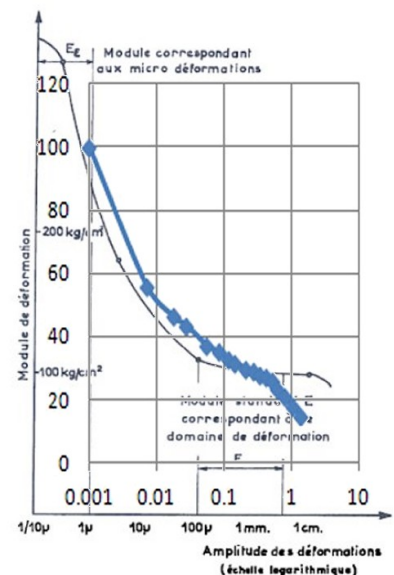


Fig. 3 Variation du module en fonction de l'amplitude des déformations. Variation of E modulus versus strain.