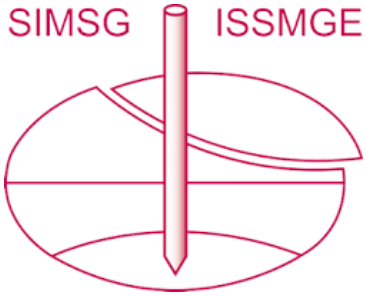
INTERNATIONAL SOCIETY FOR
SOIL MECHANICS AND
GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

https://www.issmge.org/publications/online-library

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Le GéoPAC®, un contrôleur pression volume automatisé pour les essais pressiométriques de qualité.

The Geopac®, an Automated Control Unit for Quality Ménard PMTs.

G. ARSONNET
Géomatech, Champlan, France

J.- P. BAUD
Eurogéo, Avrainville, France

M. GAMBIN
Apagéo, Paris, France

W. YOUSSEF
Cedarnet, Montataire, France

RÉSUMÉ Le GéoPac est un pressiomètre qui révolutionne complètement le mode de fonctionnement des appareils à pression de gaz utilisés depuis plus de 50 ans. Le programme de chargement est assuré par un système volumétrique à piston motorisé, dont le contrôle de la pression par incréments constants est assuré à l'aide d'un dispositif d'asservissement électronique qui analyse pas à pas la réponse du sol en temps réel sous l'effet de l'expansion, et stabilise les paliers de pression normalisés sans intervention d'un opérateur. Ce CPV est piloté à distance par un ordinateur de chantier « durci », la GéoBOX. Le CPV du GéoPAC peut être utilisé soit en mode de chargement « tout-automatique », soit en mode de contrôle du chargement par l'opérateur. La régulation micrométrique du piston motorisé a d'emblée apporté à ce dispositif : une stabilisation précise des paliers de pression du circuit de mesure (selon la précision des capteurs employés), le recours au gaz comprimé industriel (azote) n'étant plus nécessaire que pour les cellules de garde ; une précision des mesures de volume considérablement améliorée. La résolution de mesure de déplacement du piston motorisé est inférieure à 0,2 µm, correspondant à une mesure théorique de déplacement du volume de l'ordre de 1.10^{-3} cm^3, soit pour la sonde habituelle de diamètre 60 mm un déplacement moyen de la paroi de la membrane de l'ordre de 2.10^{-2} µm. La communication décrit le fonctionnement détaillé de l'appareil et renvoie à certain nombre d'études géotechniques où cet appareil a été utilisé, la cavité étant le plus souvent créée par le système du tube fendu auto-foré STAF (Arsonnet et al. 2005, ISP5), notoirement amélioré par la rotation simultanée du tube, le RotoSTAF (Arsonnet et al , 2013, ISP6).

ABSTRACT The GeoPac is a new pressuremeter, Control Unit and PMT probe altogether, which brings a total change in the running mode of the usual equipment more than 50 years old where the pressure increments are obtained by pressurized gas. In the new GeoPAC, the loading program, still by constant pressure increments, is obtained by a motorized piston within the volumeter which is controlled in real time by an electronic automated system which analyze the soil response under probe expansion variation and stabilize the standardized pressure holds without the help of the operator. This CU is conducted afar by a ruggedly built laptop computer: the newly designed GéoBOX. The GeoPAC CU can be used either in « all automatic » mode, or directly by the operator. The micrometric resolution of the motorized piston immediately brought: a precise stabilization of the pressure holds on the measuring circuit, as a function of the used sensors own precision, the gas being only used for the guard cells a volume readings precision largely improved. The motorized piston stroke measurement is smaller than 0,2 µm, value which corresponds to a theoretical volume displacement in the order of 1.10^{-3} cm3, that is a mean radial displacement of a 60mm diameter Ménard probe cover of 2.10^{-2} µm. This paper describes the operation of this equipment. It refers to various site investigations where the GeoPAC was used, the PMT cavity being often obtained either by the STAF or the RotoSTAF technique described in a twin paper.

MOTS-CLES : essais pressiométriques, contrôleur pression volume, automatisation.

KEYWORDS: Ménard PMTs, control unit, automation.

1. AUTOMATISATION DE L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE.

L'automatisation de la procédure de l'essai pressiométrique Ménard était pressentie par Louis Ménard dès la conception de l'essai. En effet le principe d'un essai en contrainte imposée, consistant pour l'opérateur à concilier un nombre de paliers de pression si possible égaux visés approximativement, par rapport à une pression de rupture par principe non connue ou mal estimée avant le début de l'essai, implique un processus d'ajustement des pas, de façon la plus précoce dans les premiers stades de l'essai, de façon à approcher la pression limite quand le volume atteint sa valeur maximale permise par la sonde, en visant à ne pas faire varier exagérément la durée de l'essai par un nombre de paliers trop petit ou trop grand.

Les modes opératoires (Notice Ménard D10 1960, Mode opératoire LCPC, 1973) puis les différentes versions nationales et internationales de la norme de l'essai n'ont apporté que peu de modifications à ce principe initial, sinon de préciser que le nombre de paliers de pression souhaitable devait se trouver entre 7 et 15, et le nombre de changements de la valeur du pas de pression réduit à un maximum de 2. Il va sans dire que les surprises que réserve le sol aux géotechniciens aboutissent à ce qu'un certain nombre d'essais pressiométriques, par ailleurs corrects du point de vue de la qualité du forage préalable et de la fiabilité des mesures de pression et volume, se trouvent « en dehors des clous » de ce point de vue, l'opérateur ayant choisi de rattraper la dérive qu'il voit inéluctable, en dérogeant à une des deux règles, c'est-à-dire, soit en réalisant plus de 2

changements de pas, soit en terminant avec un nombre de points inférieur à 7 ou supérieur à 15 ; au pire, l'essai peut même, arrivé à son terme, avoir failli aux deux règles.

Ces entorses aux règlements ne sont pas les plus fondamentales, par rapport à celles qui résultent des défauts de qualité du forage, du temps de décompression trop long entre forage et mise en place de la sonde, de mauvais référencement des tarages de la sonde (calibrage des volumes et étalonnage des pressions), voire d'autres malfaçons plus graves encore pour l'essai. L'attitude du géotechnicien qui doit tirer de l'interprétation de l'essai les caractéristiques pressiométriques usuelles est, en règle générale, de considérer que :

- les changements de pas par augmentation de celui-ci, même importante, au vu d'un début d'essai pratiqué avec des pas prudents et limités, sont plus acceptables que des changements par diminution d'un pas initial trop audacieux ; en effet, la vitesse de déformation différée du sol joue un rôle perturbateur qui se marque par une irrégularité très marquée dans le cas d'une diminution du pas ;
- un nombre de paliers trop petit, 6, 5 voire 4, peut permettre de mesurer une pression limite si l'expansion finale est suffisante, en général dans des sols très mous dont la faiblesse a surpris l'opérateur, mais la mesure du module basée sur deux points aléatoires est alors assez approximative ;
- un nombre de paliers trop grand, supérieur à 15, est généralement jugé sans trop de sévérité, puisqu'il semble correspondre à un dessin plus détaillé de la courbe d'essai ; il y a lieu de signaler cependant que l'augmentation de la durée totale de l'essai a généralement comme effet de décaler la rupture vers une pression limite un peu plus élevée.

Le but des algorithmes d'une mise en œuvre automatisée du programme de chargement pressiométrique sera donc de générer des changements de pas de pression réguliers selon ces principes jusqu'à expansion complète de la sonde utilisée.

2. LE PRESSIOMETRE GEOPAC.

2.1. Principe de fonctionnement. Régulation électronique des débits, volumes et pressions depuis la tablette Géobox.

Le Pressiomètre GéoPAC est essentiellement un piston, dans un cylindre de volume adapté à la gamme des sondes proposées, déplacé par une micro-motorisation de précision entièrement pilotée par l'ordinateur portable de chantier GéoBOX en relation sans fil avec les organes de commande et de mesure. Les capteurs de pression choisis pour l'appareil sont dans une classe de précision élevée, permettant d'atteindre et de réguler la pression de consigne rapidement et sans dérive. La régulation assure la simultanéité de prise de données aux temps imposés.

La précision sur la mesure des volumes est d'un ordre de grandeur jamais atteint jusqu'ici en pressiométrie : de l'ordre de 1/100ème de cm^3, valeur améliorable par la fréquence de mesure du déplacement du piston motorisé, dont la résolution est inférieure à 0,2 µm. La déformation au niveau de l'interface entre sonde et paroi du forage est donc mesurable avec une résolution, selon le type de sonde utilisée et son degré d'expansion, rapportée à la surface mise en charge, de l'ordre de 1 µm.

Avant même de débuter les essais dans les sols, cette précision est tangible, par la fiabilité et la répétitivité des mesures, lorsque l'on réalise sur une sonde des essais d'étalonnage en série ou des essais de calibrage en série, qui sont exactement superposables (Fig.2).

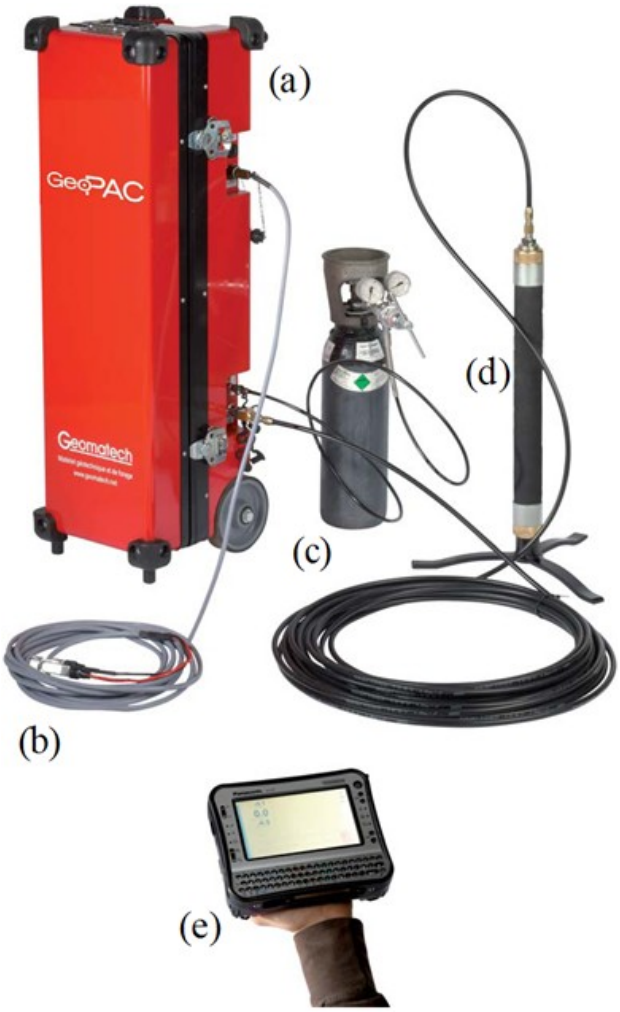


Fig.1 Ensemble du Pressiomètre GéoPAC® : (a) Contrôleur Pression-Volume motorisé (b) alimentation électrique (c) alimentation en gaz comprimé (d) sonde (e) ordinateur portable de contrôle GéoBOX® en liaison sans fil.

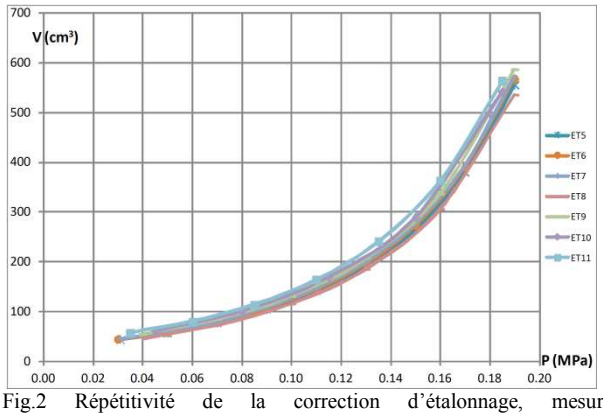


Fig.2 Répétitivité de la correction d'étalonnage, mesurée automatiquement.

Une autre mesure directe de la précision est réalisable en faisant fonctionner l'appareil en injection dans un milieu à perméabilité connue très faible. La simulation de fuite sous pression que constitue cette expérience montre par exemple la mesure avec fiabilité sur une longue période de temps d'un gradient de 1.10^{-9} m^3/s, ce qui correspond pour la surface d'une sonde 60 mm standard à une perméabilité de l'ordre de 3.10^{-10} m/s. On confirme là, ce qui était déjà vrai pour les enregistreurs

GéoPRESS (Géomatech, 1991) ou GéoSPAD (Apagéo, 2001), qu'un bon Pressiomètre est un débitmètre de grande précision dès les très faibles débits.

2.2. Pilotage d'un essai pressiométrique Ménard entièrement automatique.

La régulation d'un objectif de pression étant réalisée par le système de pilotage du piston sans aucune intervention humaine, il fallait rajouter dans le cahier des charges de l'appareil, la réalisation de l'essai selon le programme de chargement normalisé de l'essai pressiométrique Ménard, avec les règles bien connues sur les bornes initiales et finales, la progression des paliers, et leur nombre souhaité, notions traitées en introduction.

La stratégie d'utilisation sur laquelle nous nous sommes arrêtés est la demande à l'opérateur d'une seule donnée numérique, la valeur ΔP (en 10^{-1} MPa ou en bar, unité qui reste plusieurs dizaines d'années après son retrait du système international la plus utilisée et la mieux comprise sur chantier) qu'il désire pour le premier palier d'essai. La recommandation est qu'elle soit de l'ordre de grandeur du $1/10^{ème}$ de la pression limite qu'il estime en fonction de sa plus ou moins grande connaissance du terrain d'essai, intuitive ou basée sur son expérience locale, résultant d'essais proches, ou plus générale en fonction de son vécu du forage, éventuellement au vu de paramètres de forage. Mais il peut aussi désirer un début d'essai à très faible vitesse de chargement ou au contraire très audacieuse. Dans tous les cas, dès le « top départ » donné, l'essai se déroule entièrement automatiquement, le processeur analyse les résultats instantanés (fluage, relations pression-débits-volumes) de façon à gérer la suite de l'essai en conformité avec le programme de chargement pressiométrique poussé à son terme.

Le contrôle automatique du déroulement de l'essai par l'ordinateur pilote GéoBOX décharge également l'opérateur d'un élément important du mode opératoire des sondes tri-cellulaires : le réglage permanent de la pression différentielle. L'équilibrage, précis et invariant au cours de l'essai, de la pression de gaz des cellules de garde par rapport à la pression du liquide des cellules de mesure participe également beaucoup au gain de précision et de fiabilité de la mesure.

Ce pilotage automatique est destiné à être celui que les opérateurs peuvent utiliser de façon routinière, et se détacher ainsi de toute manipulation du poste de commande (la GéoBOX) qui mènera l'essai à terme, dégonflage de la sonde compris. D'autres modes de pilotage sont proposés aux opérateurs pressiométriques :

- L'automatisation « intégrale » : l'opérateur ne fixe aucune valeur, le pilotage se fera par ajustement du système lui-même sur le débit instantané du premier palier, corrigé aux suivants.
- L'automatisation sur critères géotechniques qualitatifs. Un tableau à double entrée sur le pronostic de sol attendu est proposé : en ligne le caractère mou, meuble, raide ou rocheux du terrain, en colonne le caractère plus argileux, intermédiaire ou sableux, soit douze grandes catégories de sol. Là aussi, l'erreur de pronostic est corrigée, plus ou moins vite sur les premiers points, par le pilote automatique.
- Le mode semi-automatique. L'opérateur a la possibilité, à tout moment au cours d'un essai automatisé en cours, et dès le départ s'il le souhaite, de fixer la valeur du prochain pas, qui restera constant tant qu'il ne modifie pas sa décision en cours d'essai. Bien entendu dans ce cas, l'opérateur doit rester présent devant le clavier, et attentif au déroulement de son essai, son choix n'étant plus modifié par le pilote automatique.

3. ANALYSE DE LA REACTION SONDE/SOL.

Dès les premiers essais d'expansion d'une sonde pressiométrique classique par le GéoPAC en vue de l'automatiser en conformité avec le mode opératoire souhaité, deux particularités sont apparues, sur deux points auxquels les opérateurs de pressiomètres manuels ou enregistreurs ne prêtaient d'habitude pas d'attention particulière :

1) Il est nécessaire que l'appareil détecte à quel moment la surface de la sonde se trouve en contact avec le terrain (ou le tube de calibrage), de façon à ne pas réaliser avant ce contact de points d'essais inutiles (expansion dans le vide annulaire de forage), et inutilisables pour prévoir le pas de pression adapté.
2) La pression visée à chaque palier par l'appareil doit être la pression « vraie » au niveau de la sonde, selon son altitude relative par rapport au volumètre et les caractéristiques du système de tubulures de liaisons. Autrement dit, le système de pilotage doit tenir compte de la correction de la hauteur de colonne d'eau, $\gamma_w.(zc-zs)$ selon le schéma pressiométrique classique, et de la correction de perte de charges pendant l'injection dans les tubulures, beaucoup plus difficile à établir analytiquement, et que le mode opératoire pressiométrique néglige jusqu'ici.

En cherchant à faire prendre en charge ces mesures par l'automatisme, il est rapidement apparu que les deux étaient liées, et que le contact sonde/sol ne pouvait être correctement donné que si la pression correspondante était correctement corrigée.

3.1. Principe de la mesure des pertes de charge.

Les pertes de charges dans un essai pressiométrique sont liées à différents paramètres, notamment, au diamètre et à la longueur de la tubulure d'une part et au débit instantané du circuit liquide d'autre part.

Elles viennent perturber la mesure de la pression du liquide de la sonde dans le sol lorsque le capteur de pression est placé dans l'appareil hors-sol, ce qui est le cas de la majorité des pressiomètres utilisés couramment, qu'ils soient manuels ou automatisés.

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 GéoPAC, à la fois une possibilité et une nécessité.

Les conséquences des pertes de charges sur le déroulement d'un essai sont différentes selon que le processus se trouve dans la phase de montée en pression entre 2 paliers ou bien dans le déroulement d'un palier présentant un certain fluage.

Dans la phase de montée en pression entre 2 paliers, nous visons deux objectifs principaux :

- Atteindre la pression du prochain palier sans dépassement et dans un temps optimal ne dépassant pas 20 s
- Garantir pendant la montée une pression différentielle correcte entre les circuits liquide et gaz

Ne pas tenir compte des pertes de charges pendant cette phase de montée aura deux conséquences néfastes sur le déroulement de l'essai :

- La pression différentielle dans la sonde n'est pas respectée du fait de la surestimation de la pression liquide. En effet, à la pression hydrostatique près, pour une pression différentielle visée de 0,1MPa et avec une perte de charges de 0,2MPa, la pression différentielle réelle dans la sonde sera de -0,1MPa

- La régulation de la pression subit une forte perturbation aux alentours de la pression visée du prochain palier. En effet, cette régulation tend à freiner le débit lorsque la pression mesurée est proche de la consigne, mais cette chute du débit provoque une chute de la pression mesurée due au décroissement des pertes de charges. La régulation réagit à cette chute en poussant de nouveau le débit ce qui se traduit par un phénomène d'oscillation allant jusqu'à l'excitation de tout le circuit hydraulique.

Sur un palier présentant un certain fluage, un débit plus ou moins important dans le circuit liquide est nécessaire pour maintenir la pression constante. Ce débit crée une perte de charge qui s'ajoute à la pression de la sonde et qui rend cette dernière surestimée par le capteur. Ceci aura, comme dans le premier cas, deux conséquences néfastes sur le déroulement de l'essai :

- La pression différentielle dans la sonde n'est pas respectée du fait de la surestimation de la pression liquide
- Le palier n'est pas réalisé à la pression voulue mais à une pression inférieure variable en fonction du débit instantané injecté pendant le palier. Cette conséquence se manifeste surtout dans un essai d'étalonnage où le fluage est maximal et peut provoquer des phénomènes d'oscillation intenses sur des essais avec de longues tubulures.

Pour pallier ces problèmes, une première approche envisagée pour compenser les pertes de charges, consistait à identifier les caractéristiques de la tubulure, à travers des essais en laboratoire, et déterminer ainsi les coefficients de pertes de charge par mètre linéique. On établit que la courbe « perte de charge / débit » pour une tubulure donnée est parabolique, que les paramètres de la parabole évoluent selon le diamètre et la longueur de tubulure, et que le phénomène est reproductible pour une tubulure donnée dans un état donné (figures 3 et 4).

Il s'est rapidement avéré, à travers les premiers relevés effectués, que les résultats sont différents d'une tubulure à l'autre, même à l'état neuf, alors qu'elles proviennent d'un même lot et sont censées avoir les mêmes caractéristiques.

S'ajoute à ce constat, le fait qu'il fallait tenir compte des pertes de charges singulières dans l'ensemble du circuit hydraulique pouvant varier notablement avec le moindre phénomène d'obturation occasionnel ou permanent, lié à l'usage prolongé en chantier des tubulures, leur déformation lors de la remontée des sondes, et leur réparation par raccourcissement et mise en place d'un connecteur.

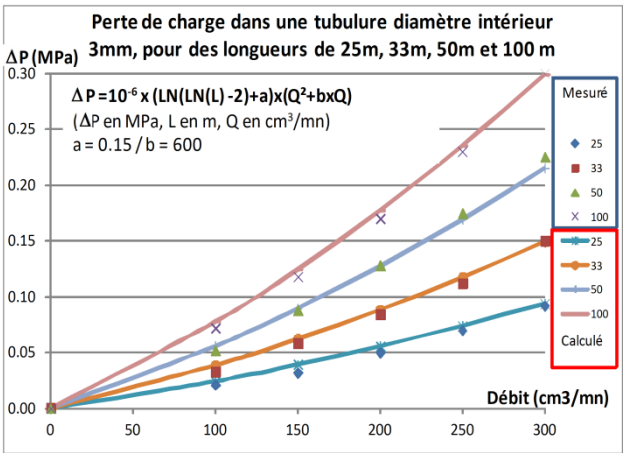


Fig.3 Perte de charge ΔP en fonction du débit pour différentes longueurs de tubulures.

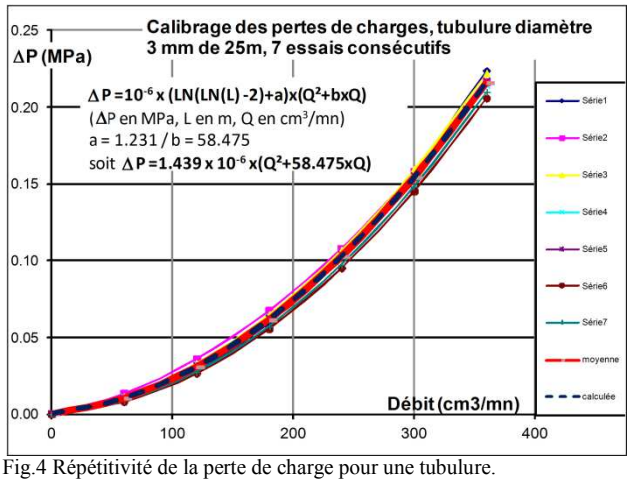


Fig.4 Répétitivité de la perte de charge pour une tubulure.

Partant de ce constat et du fait qu'un essai nécessite toujours l'injection d'un volume minimal de liquide avant que l'enveloppe souple de la sonde habillée d'une gaine caoutchouc arrive en contact, soit avec l'intérieur du tube fendu, soit avec la paroi du forage, nous avons cherché à exploiter cette opportunité pour réaliser, à travers ce volume à injecter en début de l'essai, une procédure d'identification automatique pour calculer dynamiquement les coefficients de la courbe représentative de l'ensemble des pertes de charges du circuit hydraulique dans la disposition où il se trouve avant le début de l'essai. Cette procédure est appelée « procédure de calibrage des pertes de charges ».

Le déroulement de cette procédure se fait automatiquement et sans intervention de l'opérateur, au lancement de l'essai et en amont de la procédure de mise en contact, en s'appuyant sur une régulation en débit.

Plusieurs points « pression / débit » sont mesurés à différents débits après stabilisation du circuit hydraulique. Ces points sont utilisés alors pour caractériser les pertes de charges en calculant les coefficients de leur fonction représentative.

Cette fonction est utilisée par la suite pour corriger les mesures de pression du circuit liquide en fonction du débit instantané, afin que la mesure de pression reflète, à la pression hydrostatique près, la pression dans la sonde.

Cette solution mise au point exclusivement pour GeoPAC, présente des avantages multiples et d'un grand intérêt :

- La procédure est intégrée dans l'essai et se déroule en toute transparence au démarrage sans affecter l'essai lui-même et en temps masqué.
- Les pertes de charges caractérisées ne s'arrêtent pas à la tubulure mais couvrent l'ensemble du circuit liquide.
- La précision sur les pressions des paliers représentant un certain fluage est nettement améliorée. C'est le cas notamment pour les essais entre le début du fluage et la fin de l'essai en rupture, ainsi que pour les essais d'étalonnage qui gagnent en répétitivité et en justesse.
- Les phénomènes oscillatoires sont complètement atténués et maîtrisés et la régulation automatique gagne en efficacité et en précision

Les figures 3 et 4 montrent que l'ordre de grandeur de la perte de charge ainsi corrigée peut atteindre 0,15 MPa pour une tubulure courante de 50 m et un débit de 250 cm^3/mn, rarement atteint en fin d'essai. La moyenne au dernier point des essais courants même poussés assez loin en volume près de la rupture reste de moins de 150 cm^3/mn, soit une perte de charge généralement inférieure à 0,1 MPa. L'influence éventuelle des

pertes de charges sur les résultats de l'essai est donc éliminée, sans intervention de l'opérateur.

L'expérience d'essais comparatifs sur des sites connus montre que la dérive habituelle n'est pas significative, et inférieure à la variabilité naturelle des sols. Par contre la qualité des ajustements des valeurs de fluage s'en trouve nettement améliorée, et on a pu ainsi commencer à repérer dans la « courbe » de fluage des sections plus rectilignes et plus nombreuses (voir fig. 5 et Baud, Gambin, Schlosser, 2013).

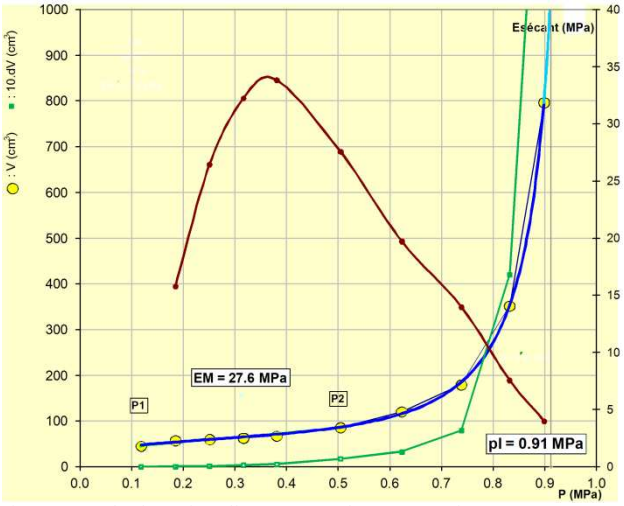


Fig.5 Exemple d'essai réalisé en procédure automatique par GéoPAC, dans un forage préalable, en tarière hélicoïdale, dans une craie sableuse altérée, au-dessus de la nappe.

3.2. Principe de la détection du contact sonde/sol et de la stabilisation à p_o avant début de l'essai.

La connaissance que nous avons acquise à ce stade de la relation débit/pression au niveau de la sonde nous autorise à procéder au remplissage rapide de la sonde dans l'espace annulaire existant, entre gaine caoutchouc et tube (cas du forage STAF ou ROTOSTAF), entre sonde et terrain (cas de tous les forages préalables avec essai à la sonde nue) ou la somme des deux (cas des forages préalables et sonde avec tube fendu).

L'expansion de la sonde est faite en imposant un débit constant, que l'on choisit d'ailleurs assez modéré pour ne pas augmenter inutilement la perte de charge, même si, celle-ci étant parfaitement connue, la relation pression volume pendant cette expansion est elle-même parfaitement linéaire. Cette expansion se fait donc dans un milieu soit à la pression atmosphérique, soit à une pression hydrostatique due à l'eau sous le niveau de la nappe, ou à la boue de forage le cas échéant.

Le contact est décelé par une cassure dans la pente d'expansion, d'autant plus marquée que le sol est résistant. L'expansion sous débit constant est stoppée quelques millisecondes après la détection de ce contact. La pression atteinte à l'issue de cette phase de mise en contact est réputée très proche de la pression horizontale des terres au repos au niveau de l'essai. En réalité, elle va se trouver inférieure dans le cas où le forage a subi une trop longue phase de décompression sans soutènement, et supérieure dans le cas où la mise en place de la sonde a entraîné un refoulement du sol.

Le mode opératoire de l'essai en forage préalable et toutes les recommandations des différentes normes sur l'essai pressiométrique (tableaux C1 et C2 de la norme EN ISO 22476-4 et de la norme AFNOR qui doit en découler) visent précisément depuis toujours à éviter au maximum ces deux causes de perte d'information et de « remaniement » du terrain avant l'essai, par décompression ou par création de surpressions interstitielles provoquées par le fonçage de la sonde, notamment en limitant la longueur de passe de forage avant l'essai. La mise en place de la sonde par autoforage d'un tube fendu a été mise au point et est largement utilisée dans ce but (Arsonnet, Baud, Gambin, 2005, 2013).

A ce stade, un temps de relaxation, géré automatiquement par le système GéoBOX-GéoPAC, avec mesure en continu de l'évolution de la pression pendant le maintien du volume de la sonde en contact avec la paroi du forage, permet de détecter une évolution positive ou négative de la pression dans la sonde. L'asymptote de cette évolution de p = f(t) est une mesure de la pression horizontale des terres p_o. Nous montrons par ailleurs que ce temps d'observation de la stabilisation de la pression peut être réduit à la minute « normale » de mesure des points d'essai, dès lors que le contact sonde-sol n'a fait l'objet ni d'un refoulement, ni d'un long temps de décompression, ce qui est réalisable par la méthode RotoSTAF (Arsonnet et al., 2013). Ce premier point doit être considéré comme le premier point de l'essai pressiométrique, et permet donc de débuter le plus souvent possible, dans un sondage pressiométrique bien réalisé, les essais à une pression très proche de la pression horizontale p_o vraie in situ.

3.3. Dégonflage de la sonde et risques de cavitation.

En fin d'essai, le dégonflage automatique de la sonde est assuré par l'automatisme du GéoPAC. Usuellement dans l'essai pressiométrique Ménard, aucune mesure n'est faite au cours de ce dégonflage, destiné uniquement à la remise de la sonde en état de pratiquer un nouvel essai, et réalisé en laissant la pression de gaz accumulée dans les cellules de garde expulser l'eau de la cellule de mesure. Dès les premiers instants d'une action trop rapide sur le piston pour accélérer cette remontée, il s'est avéré que cette remontée trop rapide provoquait de la cavitation dans le circuit d'eau de la sonde. Rappelons que la cavitation est la création de bulles de vapeur d'eau dans le liquide, dont le déclenchement est aléatoire et peut créer au contact des matériaux constitutifs du circuit des dégâts par arrachement de matière.

La procédure automatique de dégonflage par le piston du GéoPAC a donc été régulée, de façon à maintenir constante pendant toute sa durée la pression différentielle équilibrée entre les deux circuits de mesure et de garde. On se rend compte alors que pour la plupart des sols, il faut ralentir significativement la vitesse de dégonflage, et prendre plusieurs minutes pour parvenir au dégonflage total de la sonde. La mise au point de cette procédure permet de s'assurer que le contact entre le sol et la cellule de mesure est maintenu pendant le dégonflage. La vitesse de déformation du sol soumis à une diminution de contrainte radiale peut ainsi être maîtrisée lors d'une procédure d'essais cycliques à pression imposée. Lors d'essais cycliques à vitesse de déformation imposée, par contre, il est difficile d'être certain que le contact sonde-sol reste conservé.

4. APPLICATIONS DU SYSTEME ROTOSTAF+GEOPAC A D'AUTRES TYPES D'ESSAIS.

L'objectif du projet était la construction d'un appareil à pilotage électronique pour réaliser, dans tout forage spécifique adapté, un essai pressiométrique entièrement automatique. Le cahier des charges du projet est très ancien. Il prend sa source dans l'échec commercial de la diffusion du pressiomètre Ménard PAC, pressiomètre à conduite automatique de l'essai utilisant classiquement un circuit de gaz pour mise en pression de la colonne d'eau (Baud, 1985). Conçu au début des années 1980, seul le prototype a été utilisé sur quelques dizaines de chantiers Ménard à l'époque, mais il est resté sans suite en raison de la disparition du « Centre d'Etudes Géotechniques » cinq ans

après le décès de Louis Ménard. Par la suite, il nous est apparu nécessaire de disposer au préalable de méthodes d'autoforage permettant de placer dans tous les types de sols une sonde pressiométrique tricellulaire « standard », sans autres capteurs dans le forage que la cellule de mesure gonflable à l'eau ; cette problématique est résolue par le système de forage STAF, radicalement amélioré par la tête RotoSTAF (Arsonnet et al. 2013). Enfin, l'expérience de la construction et de l'utilisation en sondage des pressiomètres enregistreurs, de plus en plus précis notamment en mesure du volume, mais toujours sans vraie régulation, avait achevé de nous persuader que le moment était mûr - seulement aujourd'hui – pour une automatisation complète de l'essai dont nous savions que Louis Ménard la souhaitait.

L'outil tel qu'il est conçu, est maintenant utilisable pour beaucoup d'autres applications à venir, qui dépassent largement le champ de l'essai pressiométrique Ménard.

Les premiers développements, pour certains déjà très avancés, portent sur des types d'essais divers, s'éloignant plus ou moins des invariants de l'essai pressiométrique Ménard :

- Automatisation de l'essai pressiométrique Ménard à un cycle (norme NF P94-110-2) et son interprétation également automatisée dans Géovision.
- Programmation dans la GéoBOX d'un essai de type pressiométrique Ménard à plusieurs cycles. Les possibilités deviennent ici multiples. L'utilisateur aura à déterminer avant l'essai le nombre de cycles qu'il veut réaliser, ainsi que la plage de pression sur laquelle il souhaite les cycles, plages identiques ou décalées en pression.
- La très haute pression. Essai de type pressiométrique Ménard poussé au-delà de la pression normative de 5 MPa. La demande des géotechniciens est récurrente pour la connaissance des pressions limites réelles en s'affranchissant de la limite de 5 MPa des différentes normes, qui s'explique en partie par le manque de précision des pressiomètres manuels à circuit de gaz. L'appareil y répond de deux façons : d'une part la possibilité pour le GéoPAC de poursuivre les essais jusqu'à 10 MPa en version standard, d'autre part la mise à disposition de la profession de l'Hyperpac. Basé sur le même principe, avec des composants adaptés à une gamme de mesures plus élevée, il permet des essais pressiométriques jusqu'à 50 MPa (Baud, Gambin, Heintz, 2013).
- Essai de type pressiométrique Ménard, avec une loi de croissance exponentielle de la pression couvrant de très petits incréments à partir de Po, et de plus en plus grands dans les grandes déformations. L'essai vise à une mesure très précise du module dans les faibles déformations, tout en atteignant avec un nombre de pas limité la pression limite quelle que soit sa valeur.
- Essai par paliers de volumes imposés, avec détermination préalable du nombre de paliers et de leur durée.
- Essai continu sans paliers, à débit imposé, soit croissant, soit avec cycles de déchargement-chargement programmés à l'avance.
- Essai phicométrique : le contrôle simultané des paliers de l'essai au phicomètre et de la régulation de la traction à vitesse constante sur la sonde par un vérin hydraulique, apporte au phicomètre une répétabilité et une fiabilité jamais atteintes.
- Essai au pressio-perméamètre. La très grande précision de mesure des très faibles débits permet d'automatiser la conduite de la sonde du pressio-permamètre par le volumètre GéoPAC, pour la mesure des perméabilités faibles à très faibles.

5. REMERCIEMENTS.

Cette présentation des applications du Pressiomètre automatique GéoPAC est écrite par deux géotechniciens utilisateurs des essais, un des constructeurs, et un informaticien, 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 Bréchot, Lionel Daré et leur équipe « métrologie » pour Apagéo, Salvador Dos Santos et Nicolas Girard pour Géomatech, Thierry Lartigaud pour Eurogéo, Arnaud Thomas pour Cedarnet.

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Arsonnet G., Baud J.-P., Gambin M., (2013) RotoSTAF®, une amélioration déterminante de l'autoforage du pressiométre Ménard, *Proceedings of the 18th ICSMGE* , Parallel session ISP 6, Paris 2013

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 Menard Pressuremeter Test. *Géotechnique et informatique*, Presses des Ponts, Paris.

Baud J.-P ;, Gambin M. Heintz R. (2013) 50 MPa Ménard PMTs Help Linking Soil and Rock Classifications, *Proceedings of the 18th ICSMGE* , Parallel session ISP 6, Paris 2013

Cassan M. 1978 *Les essais in situ en mécanique des sols*. Eyrolles, Paris

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 1971 Essai pressiométrique normal, Dunod, Paris, 52 pages.

Ménard L. 1957 *An apparatus for measuring the strength of soils in place.* Thesis for the degree of Master of Science, University of Illinois.