



HAL
open science

PN ARSCOP -Un projet national pour le développement du pressiomètre

Sébastien Burlon, Philippe Reiffsteck, Roger Frank

► **To cite this version:**

Sébastien Burlon, Philippe Reiffsteck, Roger Frank. PN ARSCOP -Un projet national pour le développement du pressiomètre. TRAVAUX - Revue Technique des entreprises de travaux publics, 2020, 965, pp.40-44. hal-04424796

HAL Id: hal-04424796

<https://univ-eiffel.hal.science/hal-04424796>

Submitted on 29 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PN ARSCOP - UN PROJET NATIONAL POUR LE DÉVELOPPEMENT DU PRESSIOMÈTRE

AUTEURS : SÉBASTIEN BURLON, DIRECTEUR TECHNIQUE DU PROJET NATIONAL ARSCOP, DIRECTEUR D'ÉTUDES, TERRASOL-SETEC - PHILIPPE REIFFSTECK, DIRECTEUR TECHNIQUE DU PROJET NATIONAL ARSCOP, DIRECTEUR DE RECHERCHE, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL - ROGER FRANK, PRÉSIDENT DU PROJET NATIONAL ARSCOP, DIRECTEUR DE RECHERCHE ÉMÉRITE, ÉCOLE DES PONTS

LE PRESSIOMÈTRE CONSTITUE L'OUTIL DE BASE DE LA RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE ET DU CALCUL DES OUVRAGES GÉOTECHNIQUES EN FRANCE. LE PROJET NATIONAL PN ARSCOP RÉPOND À UN TRIPLE OBJECTIF : PÉRENNISER LA PRATIQUE DE L'INGÉNIERIE ACTUELLE DU PRESSIOMÈTRE EN PROCÉDANT À UN ÉTAT DES LIEUX APRÈS 60 ANS D'UTILISATION, POURSUIVRE LE DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL QU'EST LE PRESSIOMÈTRE ET DES MÉTHODES DE CALCUL ASSOCIÉES. L'OBJECTIF EST D'ENCORE MIEUX RÉPONDRE AUX ENJEUX DE CONCEPTION ACTUELS, NOTAMMENT EN LIEN AVEC LA PRÉVISION DES DÉPLACEMENTS DES CONSTRUCTIONS ET ENFIN DE DIFFUSER TOUT CE SAVOIR-FAIRE À L'INTERNATIONAL.



© JEAN LUTZ SA



© GEOMATECH

GENÈSE DU PROJET NATIONAL ARSCOP

L'ingénierie française du génie civil est dépositaire d'un savoir-faire précieux. Ainsi, au cours des quarante dernières années, elle a accumulé de nombreux succès techniques et s'est exportée dans le monde entier. Les grands ponts (Pont de Normandie, Viaduc de Millau, Pont Vasco de Gama, Pont

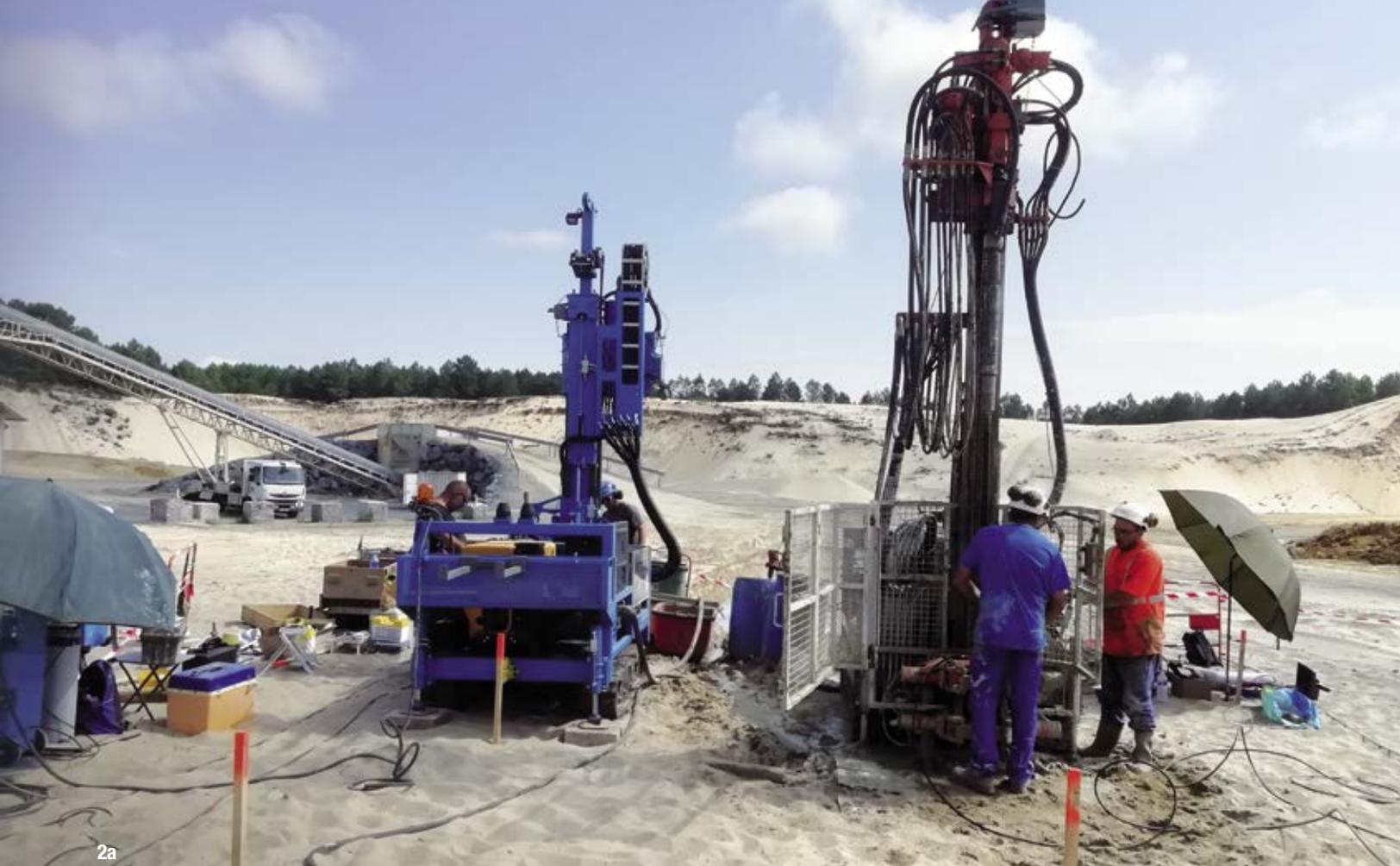
de Rion-Antirion, etc.), les grandes tours (Khalifa, Petronas, Tours de La Défense), les aménagements en mer (Dubai, Monaco), les grandes installations industrielles (barrages et centrales nucléaires) ainsi que les infrastructures linéaires (autoroutes, lignes ferroviaires à grande vitesse, tramways) et souterraines (Jubilee line, métro parisien) en sont des exemples remarquables.

Ces réussites n'auraient pu se faire sans une ingénierie géotechnique capable de dimensionner les ouvrages dans leur environnement complexe et de maîtriser les risques induits par leur construction.

Cette maîtrise dans le dimensionnement des ouvrages géotechniques s'appuie pour une large part sur le pressiomètre qui est devenu, en France

et dans d'autres pays, près de 60 ans après son invention par Louis Ménard, un outil incontournable de l'ingénierie géotechnique.

La capacité du pressiomètre à alimenter de manière fiable les méthodes de calcul pour concevoir les ouvrages souterrains, les soutènements et les fondations des ouvrages d'art et des bâtiments, pour suivre leur construction



2a

© JEAN LUTZ SA

1a & 1b- Vue de la chambre d'étalonnage de Jean Lutz SA pour valider le dispositif de mesure de pression interstitielle et du montage expérimental mis en œuvre par Géomatech pour tester le canon géotechnique.

2a & 2b- Essais croisés sur les sites de Messanges (a) et du métro de Toulouse (b) impliquant les partenaires Eurogé, Fondasol, Ginger, Apagéo, Jean Lutz SA.

1a & 1b- View of the calibration chamber of Jean Lutz SA to validate the pore pressure measuring device and the experimental test rig used by Géomatech to test the geotechnical test barrel.

2a & 2b- Combined tests on the sites of Messanges (a) and the Toulouse metro (b) involving the partners Eurogé, Fondasol, Ginger, Apagéo and Jean Lutz SA.



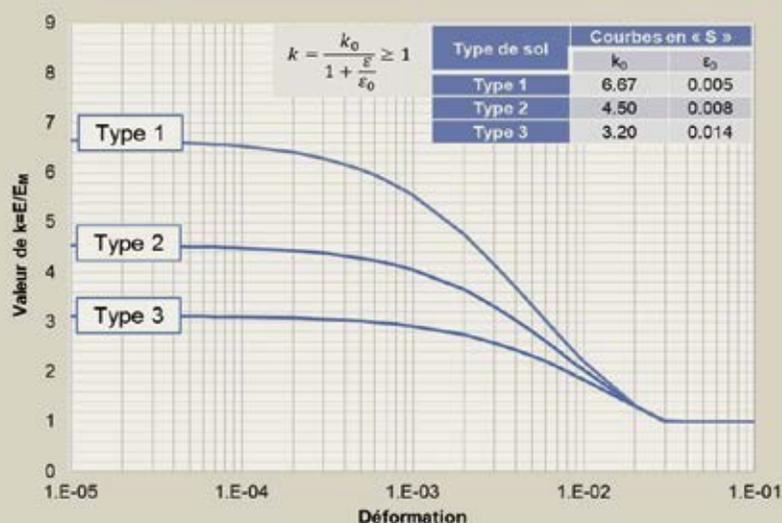
© GINGER

2b

et pour analyser en service leur comportement, a permis à l'ingénierie de minimiser les risques pour les maîtres d'ouvrages et les maîtres d'œuvre. Les ouvrages cités précédemment ont pu être réalisés car l'essai pressiométrique présente plusieurs avantages par rapports aux autres essais in situ et aux essais de laboratoire :

- C'est un essai in situ, qui permet de mesurer le comportement du sol dans son état de contrainte naturelle, sans remaniement ni changement de contrainte important comme c'est le cas du prélèvement par carottage nécessaire aux essais de laboratoire ;
- C'est un essai qui permet de mesurer le comportement mécanique du sol depuis les petites déformations jusqu'à la rupture ;
- C'est un essai qui implique un volume de plusieurs dm³ et intègre ainsi un volume de sol beaucoup plus important que les échantillons de laboratoire souvent limités à 0,5 dm³ ;
- C'est un essai qui est moins sensible à la granulométrie du sol que les essais de laboratoire ou le pénétromètre. Avec l'essai pressiométrique, on peut réaliser des essais représentatifs dans des sols grossiers ;
- C'est un essai qui concerne un volume de sol important, et permet d'intégrer l'ensemble du comportement du sol à un niveau altimétrique choisi, contrairement aux essais de laboratoire qui sont de dimension finie ;

VALEURS DES MODULES DE DÉFORMATION À UTILISER POUR LE CALCUL DU TASSEMENT DES SEMELLES ET DES RADIERS



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

(Projet national ARSCOP, 2018)

3

© PROJET NATIONAL ARSCOP

→ C'est un essai qui permet d'identifier les couches de sol, de localiser leurs interfaces.

Cet outil possède donc des potentialités remarquables : il permet au cours d'un seul essai d'apprécier à la fois les propriétés de déformation et de rupture des sols et des roches tendres à travers la mesure d'un module dit pressiométrique, d'une pression de fluage et d'une pression limite. Dans des versions plus évoluées comme le pressiomètre auto-foréur, il permet aussi d'accéder à la mesure de l'état initial des contraintes dans le terrain et donc du coefficient de pression des terres au repos. Les travaux menés en France, notamment au sein des Laboratoires des Ponts et Chaussées puis au travers de précédents Projets Nationaux, ont permis d'utiliser les résultats de l'essai pressiométrique comme des données de conception des ouvrages géotechniques, pour les écrans de soutènement, les fondations superficielles ou profondes ou les renforcements de sol. Depuis son invention, le pressiomètre apparaît donc comme un outil de reconnaissance des sols, d'une part, et de conception des ouvrages géotechniques, d'autre part. Un certain nombre de réflexions a été mené à l'occasion de la présentation des états de l'art nationaux et internationaux des congrès sur le pressiomètre de 2005 et 2013 et lors des réunions des groupes de travail sur la norme européenne relative au pressiomètre et sur les normes de dimensionnement des fondations profondes et des fondations superficielles. Notamment,

un certain nombre de possibilités sont apparues pour son évolution future : adaptations du mode opératoire aux besoins, amélioration du matériel, de l'interprétation et de l'analyse des données déduites de l'essai, etc. Pour la construction d'ouvrages présentant des enjeux majeurs comme les grandes fouilles et les tunnels du Grand Paris, les remblais et les ouvrages d'art des LGV ou les grands centres de production d'électricité, les limitations actuelles constituent un frein à l'utilisation du pressiomètre et à une gestion plus appropriée des risques.

Sur la base de ce constat, le Projet National dédié au pressiomètre a été mis en place : ARSCOP pour nouvelles Approches de Reconnaissances des Sols et de Calcul des Ouvrages géotechniques avec le Pressiomètre. Labelisé Projet National par le ministère, il est administré et géré par l'IREX (Institut pour la Recherche Appliquée et l'Expérimentation en Génie Civil). Ce projet de recherche collective s'articule autour de trois axes : l'axe 1 est dédié au développement des procédures et du matériel d'essai, l'axe 2 à la synthèse des méthodes de calcul actuelles et à la proposition de nouvelles approches permettant notamment une meilleure estimation des déplacements des constructions et l'axe 3 à la diffusion des connaissances acquises dans le cadre de recommandations.

AXE 1

L'axe 1 a pour objectif le développement de matériels et de méthodes

3- Valeurs des modules de déformation à utiliser pour le calcul du tassement des semelles et des radiers.

3- Modulus of deformation values to be used for calculating the compression of foundation slabs and rafts.

d'essais permettant, d'une part d'accroître la fiabilité de l'essai et, d'autre part, de mesurer des propriétés du terrain que le matériel actuel ne peut pas permettre. Cet axe a démarré par un retour d'expériences réalisé auprès de la profession pour mieux cerner les écarts entre les prescriptions des normes d'essais en vigueur et les besoins actuels. Des échanges, entre les fabricants de matériels (Lutz, Apageo, Geomatech, Calyf), les entreprises (Fondasol, Geotec, Ginger Cebtp, Hydrogéotechnique et d'autres encore) ou encore Ifsttar et le Cerema, ont permis de préciser les contraintes des matériels actuels et de travailler à la conception de nouvelles sondes et contrôleurs pression-volume (sonde monochambre avec enveloppe kevlar, sonde haute pression, système de pilotage automatisés, etc.) (figure 1), de nouveaux modes opératoires et de nouvelles méthodes d'interprétation. Des techniques indirectes de mesure

de la déformation radiale (dans le cadre d'une thèse Cifre au sein de l'entreprise Fugro) et des dispositifs de mesure de la pression interstitielle au cours de l'expansion d'une sonde pressiométrique (dans le cadre d'une thèse Cifre au sein de l'entreprise Jean Lutz SA) ont fait l'objet d'un développement industriel. Ces développements ont bénéficié des nouveaux matériaux comme le kevlar ou de la miniaturisation de l'électronique et des nouvelles générations de capteurs de pression pour résoudre les difficultés inhérentes à un essai dans un forage. Ces avancées ont permis de dépasser les difficultés qu'avaient rencontrées les développements antérieurs. Ces nouvelles techniques ont été testées en laboratoire en chambre d'étalonnage puis sur le terrain lors des essais croisés entrepris dans le cadre du projet, mais aussi lors de projets industriels en conditions tout à fait réelles (figures 1 et 2). Ces travaux ont abouti à la proposition de protocoles d'essais dédiés à la conception de pieux sous charges latérales.

Le développement d'un appareillage capable d'appliquer des sollicitations cycliques et de modes opératoires adaptés pour permettre l'étude du chargement latéral cyclique des fondations et de la liquéfaction des sols a été aussi un développement majeur de cet axe. Les matériels et les données collectées ont permis de construire une base de données nécessaire pour valider un cadre de construction des courbes liant la contrainte de cisaillement cyclique normalisée au nombre

de cycles à la liquéfaction à l'instar des essais de laboratoire et élaborer des abaques de liquéfaction comparables à ceux disponibles pour le pénétromètre statique (CPT) et l'essai de pénétration au carottier (SPT). Par ailleurs, les résultats obtenus ont permis le développement d'outils de calcul (axe 2) pour la détermination de paramètres en petites déformations et l'étude des chargements cycliques : loi de comportement pour la mécanique des milieux continus, courbe de transfert t-z et p-y pour le calcul des pieux sous charge axiale et transversale, etc.

Des recherches théoriques et numériques ont été réalisées pour faciliter l'interprétation de l'essai dans les différentes natures de sol et cerner les facteurs d'influence comme la mauvaise saturation. Une étude des phénomènes déterminant la génération de pression interstitielle et leur dissipation en fonction du type de sol a été entreprise pour proposer des méthodes d'estimation de la perméabilité. Certaines études ont été consacrées à l'analyse des facteurs

d'erreurs de l'essai tels que les pertes de charges ou les effets des membranes. Cet axe a également permis le développement d'une sonde totalement innovante capable de générer des ondes à sa base et de suivre leur propagation dans le sol environnant grâce à des géophones. Cette sonde a pu être validée dans un massif de sol en étudiant différentes configurations de position de la source afin d'optimiser la qualité du signal et la rapidité de réalisation de la mesure (figure 1).

4- Variation du module de déformation du terrain sous le bâtiment réacteur d'une centrale nucléaire.

4- Variation in the ground modulus of deformation under the reactor building of a nuclear power station.

Ces matériels et les données collectées ont fourni une base de données utilisée dans les tâches de l'axe 2.

Une campagne d'essais croisés (figure 2) a réuni tous les partenaires sur différents sites de référence très bien connus afin de comparer les pratiques et valider les différents développements et résultats obtenus lors du projet par des techniques de mesure in situ ou en laboratoire validées.

AXE 2

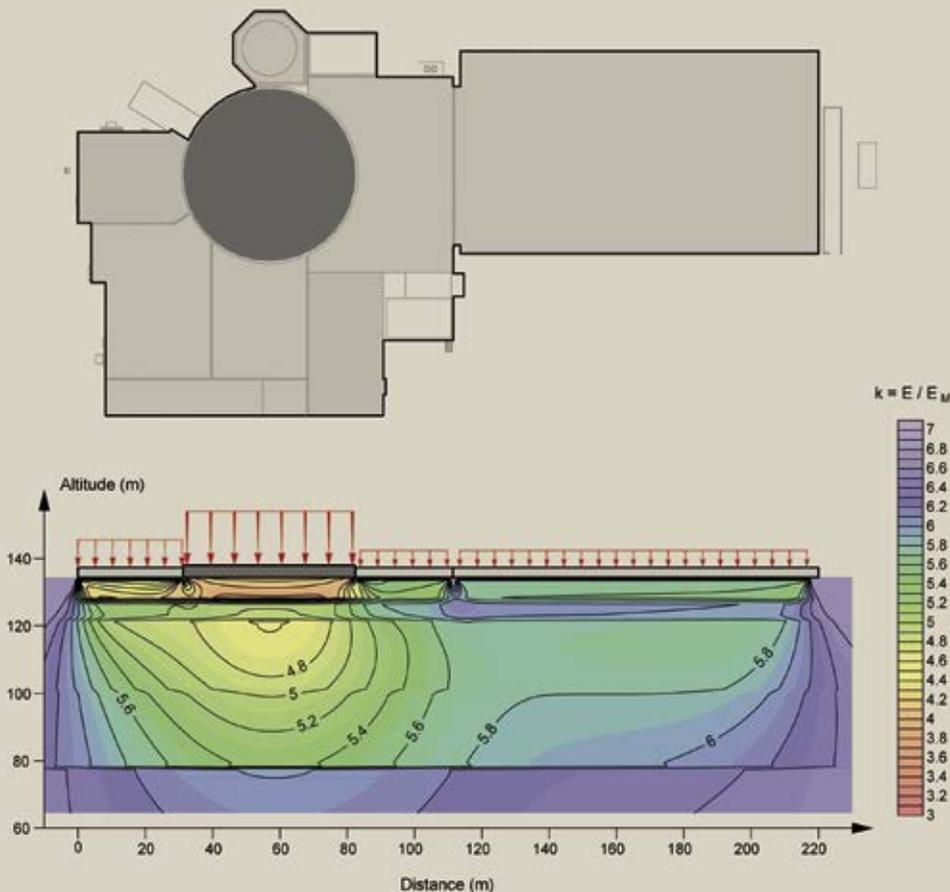
L'axe 2 dédié à la synthèse des méthodes de calcul actuelles et à la proposition de nouvelles approches permettant une meilleure estimation des déplacements des constructions comprend trois contributions majeures. La première contribution est dans la lignée des travaux réalisés durant la rédaction de la norme NF P 94-262, relative au dimensionnement des fondations profondes en France selon l'Eurocode 7. Elle permet d'aboutir à la proposition de nouvelles règles pour l'estimation de la raideur axiale des

micropieux. Cette contribution complète ainsi les règles de portance qui avaient été complètement révisées en 2012 et reprend l'analyse plus détaillée de la méthode de calcul pour l'estimation de la raideur axiale des pieux. Ce travail a en outre permis de fusionner les bases d'essais de chargement de micropieux de l'Ifsttar et de la SNCF. Toujours dans le domaine des fondations profondes, la prise en compte des charges transversales a aussi été étudiée en proposant de nouvelles règles d'interaction entre le pieu et le terrain. Ces règles, pour partie, dérivent de travaux plus anciens basés sur l'utilisation d'un pressiomètre autoforeur.

La seconde contribution est relative au calcul des radiers et des semelles (figure 3). Elle assure une approche unifiée du calcul de ces deux types d'ouvrages fondés superficiellement. L'approche développée, tout en rendant compte du comportement non linéaire des terrains, se veut simple et facile à mettre en œuvre. Son utilisation peut être étendue à des calculs complexes mettant en œuvre des méthodes hybrides (association de solutions numériques et de solutions analytiques permettant un gain avéré en temps de calcul) ou des méthodes numériques comme la méthode des éléments finis. Cette approche, mise en œuvre dans le logiciel Foxta développé par Terrasol, a été validée sur des ouvrages de taille très variable : des semelles ayant fait l'objet d'essais de chargement par le Lcpc dans les années 80 aux radiers des tours de La Défense ou d'ouvrages nucléaires (figure 4). Pour les semelles, l'approche proposée permet de mettre à jour les formules historiques développées par Ménard lors de la mise au point du pressiomètre il y a un peu plus de 60 ans. Dans tous les cas, l'objectif est de proposer une approche plus fiable et plus robuste de l'estimation des tassements pour concevoir des ouvrages plus économiques.

La troisième contribution est relative au calcul des pieux sous chargements cycliques. À la suite d'un précédent Projet National SOLCYP, il s'est agi de proposer, sur la base du matériel d'essais dans l'axe 1 d'ARSCOP, des procédures d'essais et d'interprétation de l'essai pressiométrique permettant de fournir des modules de déformation dans les gammes des faibles déformations de l'ordre de 10^{-4} (figure 5). Les modules ainsi obtenus permettent de mieux appréhender les raideurs des terrains mises en jeu lors de chargements cycliques.

VARIATION DU MODULE DE DÉFORMATION DU TERRAIN SOUS LE BÂTIMENT RÉACTEUR D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE



La démarche développée permet aussi d'alimenter les méthodes de calcul de tassement des radiers et des semelles en fournissant un module spécifique à chaque niveau de déformation.

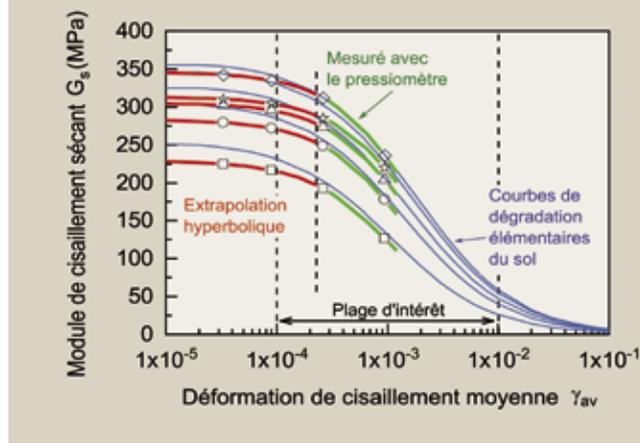
Enfin, des travaux ont aussi été réalisés dans le cadre des excavations du Grand Paris. Il apparaît que le module pressiométrique permet de bien estimer les déformées des écrans, mais que les cuvettes de tassements résultent de mécanismes liés à la contractance et la dilatance des terrains qui ne peuvent pas être pris en compte par le pressiomètre. Pour ces ouvrages, à défaut de résultats positifs sur l'utilisation du pressiomètre, c'est le domaine d'application de l'outil qui est désormais bien précisé, ce qui est malgré tout un résultat en soi. La mesure de la pression interstitielle ouvre de nouvelles perspectives pour ces applications.

D'autres développements plus fondamentaux sont aussi proposés pour interpréter plus en détail les résultats de l'essai pressiométrique et dériver des propriétés fondamentales du terrain, comme son angle de frottement ou son module de déformation, en fonction de différentes conditions de drainage autour de la sonde.

AXE 3

Traditionnellement, tous les Projets Nationaux comprennent un axe dédié à la valorisation des travaux réalisés. Dans le cas du PN ARSCOP, cette valorisation passe par la publication de recommandations qui sont en cours de rédaction. Ces recommandations, rédigées en français et en anglais, constitueront un document de référence pour la réalisation des essais pressiométriques et l'uti-

EXEMPLE DE COURBE DE DÉGRADATION DU MODULE DE CISAILLEMENT G ALIMENTÉE PAR DES MESURES PRESSIOMÉTRIQUES



5

© A.LOPES, D'APRÈS LA THÈSE DE A.LOPES, UNIVERSITÉ. PARIS EST, 2020

lisation de méthodes de calcul basées sur des données pressiométriques.

Rédigées en anglais, elles ont pour vocation à faire reconnaître à une grande échelle les avantages du pressiomètre dans certaines conditions et à faciliter l'exportation des entreprises françaises qui devraient disposer, avec ces recommandations, d'une base leur permettant d'expliquer plus aisément certaines options de conception.

Ces recommandations constituent un document de synthèse de la pratique existante en ce qui concerne le pressiomètre : elles répondent à un manque assez paradoxal puisqu'il n'existe pas de livres traitant de manière commune de l'utilisation du pressiomètre comme outil de reconnaissance des terrains et comme outil pour un ensemble de

5- Exemple de courbe de dégradation du module de cisaillement G alimentée par des mesures pressiométriques.

5- Example of the curve of degradation of shear modulus G based on pressure measurements.

méthodes de calcul. Elles constituent un document de diffusion des travaux les plus originaux réalisés dans le cadre du projet ARSCOP, notamment le développement d'une nouvelle sonde pres-

siométrique monochambre, la mesure de la pression interstitielle lors d'un chargement cyclique ou la proposition d'une nouvelle approche de calcul traitant de manière unifiée des fondations superficielles et les radiers.

En parallèle, un certain nombre de manifestations est organisé dans des congrès nationaux et internationaux pour communiquer les principaux résultats de recherche obtenus : par exemple, durant les Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur ou durant les congrès internationaux dédiés aux essais en place, organisés tous les 4 ans sous l'égide de la Société Internationale de Mécanique des Sols et de géotechnique. Un congrès dédié au pressiomètre sera probablement organisé sous 2 ans.

PERSPECTIVES

Rassemblant à la fois de grands maîtres d'ouvrage et des entreprises ainsi que des bureaux d'études géotechniques de plus petite taille (qui constituent néanmoins le cœur de l'utilisation du pressiomètre) et les partenaires du monde de la recherche, le Projet PN ARSCOP doit permettre de contribuer à développer, harmoniser et unifier les pratiques liées à l'utilisation du pressiomètre pour tous les ouvrages géotechniques : les semelles de petite construction, les radiers de tours de grande hauteur, les pieux quels qu'ils soient, les soutènements, etc. Le projet PN ARSCOP garantit ainsi la pérennité et l'actualisation des connaissances relatives au pressiomètre. À travers ses recommandations en cours de rédaction, il contribuera à exporter le savoir-faire géotechnique français dans le monde. □

ABSTRACT

PN ARSCOP - A NATIONAL PROJECT FOR DEVELOPMENT OF THE PRESSURE METER

SÉBASTIEN BURLON, TERRASOL-SETEC - PHILIPPE REIFFSTECK, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL - ROGER FRANK, ÉCOLE DES PONTS

In France, construction design is based mostly on use of the pressure meter as a ground reconnaissance tool, and on a set of design methods based on the pressure-meter test results. This integrated approach from reconnaissance to the design stage is fairly unique in the world, and justified the National Project PN ARSCOP ("new approaches to soil reconnaissance and design of geotechnical structures with the pressure meter"). This collective research project is organised around three main lines: first, the development of test procedures and equipment; second, a review of current design methods and the proposal of new approaches permitting, in particular, improved estimation of building displacements; and third, the dissemination of existing and acquired knowledge, via recommendations. □

PN ARSCOP: UN PROYECTO NACIONAL PARA EL DESARROLLO DEL PRESIÓMETRO

SÉBASTIEN BURLON, TERRASOL-SETEC - PHILIPPE REIFFSTECK, UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL - ROGER FRANK, ÉCOLE DES PONTS

En Francia, el diseño de las construcciones se basa mayoritariamente en el uso del presiómetro como herramienta de reconocimiento de los terrenos, así como en un conjunto de métodos de cálculo basados en los resultados del ensayo presiométrico. Este proceso integrado, que abarca desde los reconocimientos hasta el cálculo, es bastante único en el mundo y ha justificado el proyecto nacional PN ARSCOP (nuevos enfoques de reconocimiento de lo suelos y cálculo de las obras geotécnicas con el presiómetro). Este proyecto de investigación colectiva se articula en torno a tres ejes: el eje 1 está dedicado al desarrollo de los procedimientos y el material de ensayo; el eje 2, a la síntesis de los métodos de cálculo actuales y la propuesta de nuevos enfoques que permitan una mejor estimación de los desplazamientos de las construcciones; y el eje 3, a la difusión, en el marco de recomendaciones, de los conocimientos existentes y adquiridos. □