

LA MESURE DE LA PRESSION INTERSTITIELLE DANS LES SOLS PAR LE PIEZOCONE

Par

Akli TALBI

Ingénieur ENPC Paris - Professeur de Mécanique des Sols à l'ENTP (Alger)

Résumé

Cet article donne une vue d'ensemble sur l'état actuel de développement d'un instrument, le piézocône, qui mesure la pression interstitielle dans les sols. La qualité des résultats obtenus tant pour la reconnaissance des couches de sols fins que pour l'évaluation du potentiel de liquéfaction des sables permet de penser que le piézocône s'imposera dans un proche avenir comme un outil de premier ordre en mécanique des sols.

Mots clés : mécanique des sols - piézomètre - piézocône
pression interstitielle - liquéfaction.

La relation de Terzaghi qui indique que la contrainte totale dans un sol saturé se répartit en contrainte effective sur le squelette solide et pression interstitielle a mis en relief l'importance de la notion de pression interstitielle.

L'évolution de la pression interstitielle dans un sol est fondamentale tant en matière de déformations (consolidation) qu'en matière de résistance (loi de Coulomb).

En terme de temps, cette évolution est commandée par la perméabilité du sol et la mécanique des sols a donc commencé par s'intéresser à la pression interstitielle dans les sols fins, les variations de pression interstitielle dans les sols pulvérulents ne durant que très peu de temps.

Cependant, la résistance aux efforts dynamiques, et en particulier aux séismes, étend l'importance de la pression interstitielle aux sols pulvérulents à travers le phénomène de liquéfaction des sables, phénomène que l'on retrouvera aussi en chargement statique (voir, par exemple, publications de F. Schlosser et F. Blondeau sur les glissements sous-marins).

Ainsi la connaissance et donc la mesure de la pression interstitielle in situ a pris peu à peu une importance capitale en mécanique des sols et ceci pour les sols fins comme pour les sables.

De nombreux types de piézomètres ont été mis au point et utilisés pour suivre les variations de pression interstitielle dans les sols, en particulier pour le suivi de la consolidation des sols compressibles chargés (remblais sur sols mous) et le suivi de la stabilité de pentes. Il s'agit là de mesure de la pression interstitielle régnant dans le sol et non perturbée par la présence de l'appareil de mesure. Les principaux problèmes rencontrés sont liés au temps de réponse de l'appareil aux variations rapides de pression ainsi qu'au problème classique de dérive de tout appareil de mesure.

L'apparition en 1974/75 du piézocône donne à la mesure de la pression interstitielle une autre dimension.

Principe du piézocône

Le principe du piézocône consiste à doter le pénétromètre statique de la possibilité de mesurer la pression interstitielle au niveau de la pointe par incorporation d'une cellule de mesure. La cellule est en contact avec le sol par l'intermédiaire d'une bague-filtre que l'on peut placer à différents niveaux de la pointe.



Piézocône Parez
(filtre sur partie
cylindrique)

Il faut cependant remarquer que, contrairement aux piézomètres qui mesurent la pression en place dans le sol, le piézocône, parce que la pénétration de la pointe perturbe le sol, mesure ce qu'on appelle la pression d'enfoncement c'est-à-dire la pression perturbée par les contraintes créées par la progression de la pointe dans le sol.

Eléments déterminant la mesure

Afin de pouvoir comparer entre eux les résultats obtenus par différents opérateurs pour un même type d'essai, il importe de connaître les éléments sensibles de la mesure, c'est-à-dire ceux dont la variation d'un essai à un autre peut modifier sensiblement le résultat ; la normalisation de l'essai consistera alors à normaliser avant tout ces éléments.

Plusieurs éléments de ce type ont été recensés à l'heure actuelle pour le piézocône. Ce sont :

- 1) *Les caractéristiques du filtre* : pour répondre correctement à sa fonction le filtre doit avoir certaines caractéristiques parfois contradictoires ; il doit être rigide (voir point 3), dur et résistant à l'abrasion pour être durable, à forte perméabilité pour être sensible, et cependant suffisamment fin pour éviter une dessaturation (voir point 4) en particulier par l'air ou les gaz se trouvant dans l'eau contenue dans les couches de sols.
- 2) *La position de la bague-filtre* : différentes positions ont été essayées, soit sur la partie conique soit, plus haut, sur la partie cylindrique de la pointe à distance plus au moins éloignée de la partie conique. Les résultats obtenus varient très fortement d'un cas à l'autre, ce que confirment les recherches théoriques sur la répartition des contraintes, donc des surpressions interstitielles, dues à la pénétration de la pointe dans le sol. La tendance qui se dégage des résultats actuels est de placer la bague dans la partie cylindrique juste au dessus de la partie conique.
- 3) *Le transfert de charge de la pointe vers le filtre* : il est apparu en effet que sur certains piézocônes la charge appliquée pour enfoncer la pointe se transmet partiellement au filtre qui, comprimé, génère alors une surpression parasite. Le phénomène se manifestera par exemple au passage d'une couche molle vers une couche résistante (augmentation brusque de résistance du sol).
- 4) *La préparation de l'appareil* : en effet, derrière la bague-filtre se trouve le capteur de pression interstitielle et la chambre de mesure et cet ensemble doit être saturé d'eau désaérée (la présence de bulles d'air augmente la compressibilité de l'eau et fausse les mesures) ; cette opération de saturation est plus délicate qu'il n'y paraît et aussi bien la méthode adoptée que la manipulation doivent être fiables. On notera cependant que ce problème se pose surtout pour les sols à faible perméabilité.

5) *La réponse de l'appareil* : avec la vitesse de pénétration de la pointe généralement prise égale à 2 cm/s, un temps de réponse de 3 à 4 secondes correspond à un déplacement de la pointe de 6 à 8 cm et on aura donc pu rater une lentille d'un sol différent ; on voit ainsi l'intérêt d'avoir le plus faible temps de réponse possible.

6) *La vitesse de pénétration de la pointe* : il est évident que, s'agissant d'un problème de pression interstitielle, la vitesse de l'essai est fondamentale parce que c'est elle qui fixe le caractère lent ou rapide, c'est-à-dire drainé ou non drainé, de l'essai ; les essais menés en laboratoire confirment que la valeur mesurée de la pression croît avec la vitesse. Les européens utilisent la vitesse standard de l'essai de pénétration soit 2 cm/s, mais, comme indiqué plus haut, l'important est que les essais soient faits à même vitesse pour être comparables.

Que mesure-t-on dans l'essai au piézocône ?

Comme dans tout essai au pénétromètre statique on mesure la résistance en pointe q_c et le frottement latéral f_s ; de plus, comme expliqué plus haut, on mesure la pression interstitielle de fonçage. Enfin, on mesure, quand cela est utile, l'évolution de cette pression avec le temps (pointe bloquée) c'est-à-dire la courbe de dissipation de la pression de fonçage et en particulier le temps t_{50} de dissipation de 50% de cette pression.

Résultats

Pour les sols fins :

L'entrée dans une couche de sol fin se caractérise généralement par :

- une faiblesse de la résistance de pointe q_c ,
- un bon frottement latéral f_s ,
- une augmentation de la pression interstitielle de fonçage,
- un temps t_{50} fonction de la perméabilité de la couche.

Les variations de ces grandeurs n'étant pas toujours très fortes, on arrive à les mettre en évidence plus facilement en utilisant des rapports tels que le Pourcentage de Frottement ou Friction Ratio :

$$FR = 100 f_s / q_c$$

ou le coefficient $Bq = \delta u / (q_t - \sigma_{vo})$
(q_t est la résistance de pointe totale et σ_{vo} la contrainte verticale totale des terres).

On voit à l'heure actuelle peu à peu apparaître les résultats de travaux de divers auteurs permettant, par le croisement des paramètres donnés ci-dessus de caractériser la nature des couches rencontrées. D'autre part, des formules ont été proposées pour retrouver à partir du t_{50} le coefficient de consolidation horizontale.

Pour les sables :

Du point de vue résistance, les sables donnent l'inverse des sols fins, c'est-à-dire une bonne résistance de pointe (surtout pour les sables compacts) accompagnée d'un frottement latéral faible. Mais le point le plus important est que la pression interstitielle de fonçage peut être positive ou négative : il s'agit alors d'un comportement contractant ou dilatant, point fondamental pour le phénomène de liquéfaction. Des travaux de recherche sont actuellement en cours pour relier le potentiel de liquéfaction au groupe de valeurs (q_c , δ_u , t_{50}) par une méthode du type diagramme de SEED. Enfin, la valeur de t_{50} permet de juger la perméabilité du sable donc son caractère de finesse.

CONCLUSION

A la suite de nombreux travaux réalisés dans le monde, le pénétromètre statique s'est imposé comme un outil très performant dans la reconnaissance des sols ; il permet de caractériser la stratigraphie et la résistance des couches de sols et diverses méthodes de dimensionnement de fondations profondes et fondations superficielles par la méthode pénétrométrique ont été développées. Il restait cependant gênant qu'il s'agisse d'un essai "aveugle" (qui ne visualise pas les couches) qui doit toujours être calé par des sondages carottés (beaucoup plus chers que le pénétromètre).

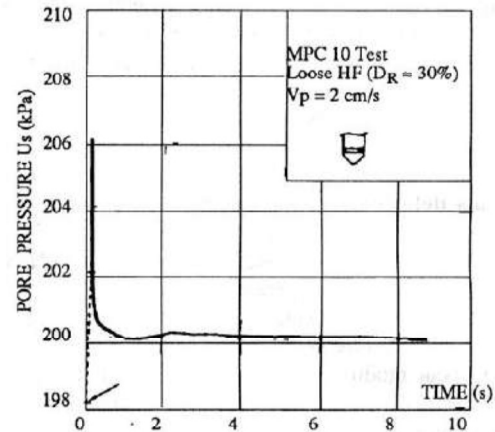
Sans aller jusqu'à supprimer totalement cet inconvénient, l'introduction du piézocône le relativise très fortement. On voit déjà apparaître des diagrammes de classification des sols à partir des essais au piézocône [en ($\delta_u, q_c - \sigma_{vo}$) ou en (q_t, Bq) par exemple]. On relève au moins deux gros avantages du piézocône :

- réduction du nombre de sondages carottés et meilleure implantation de ces sondages,
- précision dans la stratigraphie permettant de repérer des couches minces que les sondages n'ont pas toujours permis de voir.

De ce fait on arrive non seulement à mieux caractériser les couches en nature et en résistance à moindre coût, mais aussi à mieux les repérer (et à repérer des couches minces qu'on aurait pu rater même en sondage carotté).

D'autre part les recherches en cours sur la détermination du potentiel de liquéfaction des sables par le piézocône semblent prometteuses.

En résumé, la mesure de la pression de fonçage jointe à celle des paramètres classiques du pénétromètre (résistance de pointe et frottement latéral) permet une connaissance plus fine des couches rencontrées tant en nature qu'en résistance et ceci, en abaissant le coût de la reconnaissance par une meilleure maîtrise des sondages carottés à réaliser. Les recherches en cours tant technologiques (matériaux, procédures, sondes à filtres multiples) que théoriques et l'accumulation des résultats pratiques devraient permettre de faire de gros progrès dans l'avenir ●



Courbe de dissipation typique de la surpression interstitielle en fin d'essai de fonçage.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ben Said A. [1985] Mesure in situ des pressions interstitielles, application à la reconnaissance des sols, thèse de docteur ingénieur ENPC.
- [2] Blondeau F. [1986] Glissement sous marin du port de Dunkerque Revue Française de Géotechnique n° 37.
- [3] Campanella - Robertson - Gillespie - Grieg [1985] recent developments in in-situ testing of soils - 11ème Congrès International de Mécanique des Sols et Fondations (11th ICSMFE) San Francisco.
- [4] Canou J. [1989] Piézocône et liquéfaction des sables Rapport de recherche de synthèse ENPC - CERMES - MRES.
- [5] Foray P. "Programme Piézocône" Institut Mécanique de Grenoble.
- [6] Levadoux J.N. [1980] Pore pressures in clays due to cone penetration, ph.D dissertation, M.I.T USA.
- [7] Parez L. Faurier R. [1988] Le piézocône, améliorations apportées à la reconnaissance des sols. Revue Française de Géotechnique n° 44.
- [8] Schlosser F. [1985] Liquéfaction des veines de sable lâche dans des talus marins (11ème CIMSF San Francisco).
- [9] ESOPT II (Symposium Européen sur l'essai pénétrométrique) Amsterdam 1982 (en particulier articles de Smiths, Jones - Rust, Tavenas - Leroueil - Roy, Sugawara - Chikaraisi, Senneset - Janbu - Svano, Campanella - Gillespie - Robertson).
- [10] Symposium on Cone Penetration Testing and Experience, Saint Louis, USA, 1981, (articles de Villet-Mitchell, Baligh-Azzouz-Wissa- Martin - Morrison).