Estimation rapide de l'angle de frottement d'un sol granulaire au pressiomètre*

Olivier COMBARIEU

Adjoint au Directeur du laboratoire régional des Ponts et Chaussées

Rouen

Cette note complète l'article consacré à ce sujet paru dans le *Bulletin de liaison* des LPC, n° 196 [1]. Il en précise certains aspects et propose une méthode simple d'estimation de l'angle φ à partir de l'essai pressiométrique Ménard.

La théorie pressiométrique conduit, si l'on adopte un modèle élastique linéaire parfaitement plastique avec dilatance (avec critère de Mohr-Coulomb), aux deux expressions complètes ci-dessous.

La formule (1) est celle classiquement connue et présente l'inconvénient, lorsqu'elle n'est pas assortie de la condition d'utilisation liant K_o et sinφ, de conduire à des pressions limites p_l extrêmement faibles lorsque K_o diminue beaucoup. La formule (2) palie cet inconvénient et est bien sûr théoriquement étayée.

Cette dernière s'applique à la majorité des sols pulvérulents où la condition K_o (1 + sinφ) < 1 est très souvent remplie, et même totalement remplie dans la mesure où l'on fait l'hypothèse non toujours vérifiée $K_o = 1 - \sin\varphi$ (formule de Jaky). Néanmoins, et ce point est important au niveau de l'interprétation, on doit s'inquiéter de l'histoire géotechnique récente des massifs à l'intérieur desquels on effectue les essais.

Ainsi, des essais effectués à un niveau donné avant et après dragage par exemple conduisent, semble-t-il, à des valeurs de p_l peu différentes, correspondant à une persistance après dragage des contraintes horizontales initiales de confinement ; une interprétation un peu hâtive en termes d'angle de frottement sans tenir compte de ce phénomène serait alors erronée. Il en est de même, pour les massifs artificiels compactés, par exemple par pilonnage intensif, où l'appréciation des contraintes horizontales p_o est essentielle. Dans ces deux situations, ce sera plutôt l'expression (1) qui sera applicable.

pour $K_o > \dfrac{1}{1+\sin\varphi}$

$$p_l = p_0\,(1+\sin\varphi)\left[\frac{E}{2(1+\nu)\,p_0\sin\varphi\,(1+\sin\Psi)}\right]^{\frac{\sin\varphi}{1+\sin\varphi}(1+\sin\Psi)} \qquad (1)$$

pour $K_o < \dfrac{1}{1+\sin\varphi}$

$$p_l = q_0\left[\frac{E(1+\sin\varphi)}{2(1+\nu)\,q_0\sin\varphi\,(1+\sin\Psi)}\right]^{\frac{\sin\varphi}{1+\sin\varphi}(1+\sin\Psi)\,**} \qquad (2)$$

Dans les expressions (1) et (2), s'agissant de sols uniquement frottants, le terme p_l représente la pression totale théorique à déformation infinie, $p_{l\infty}$, diminuée de la pression interstitielle u régnant au niveau considéré (niveau piézométrique de la nappe) ; c'est donc une pression limite « effective » ($p_{l\infty} - u$), qui présente l'inconvénient, si on souhaite l'utiliser, de devoir être déterminée par extrapolation à partir de la pression limite conventionnelle, ($p_{lc} - u$), mesurée de façon normalisée au pressiomètre (norme **NF P 94**-110).

La méthode, déjà exposée [1], de détermination de φ, utilise ($p_{l\infty} - u$). En s'en tenant à la formule (2), la mesure des deux caractéristiques E (obtenue par un essai alterné) et $p_{l\infty}$, permet de calculer φ en estimant q_o effectif (= q_o total − u) et en faisant une hypothèse sur Ψ, angle de dilatance.

Dans la référence citée [1], les expressions (1) et (2) ont été simplifiées, par suite de certaines particularités dans les variations des diverses fonctions de φ et ψ ; elles sont l'objet des expressions (7) et (8) de cette même référence.

L'utilisation de cette méthode est rendue plus simple en introduisant en premier lieu la pression limite effective conventionnelle mesurée ($p_{lc} - u$) et en écrivant sous une autre forme l'expression (2) à laquelle seule nous nous intéressons ici. L'expansion en phase plastique permet en effet d'écrire, pour un doublement du volume initial de la sonde :

---

* Rédigé en septembre 1995.

(**) Le terme entre crochet comporte un terme additionnel, totalement négligeable, (voir [1]).

$$p_{lc} - u^* = (q_o - u)\left[\frac{E(1 + \sin\varphi)}{2(1 + \nu)\,(q_0 - u)\,\sin\varphi\,(1 + \sin\Psi)} \times \frac{1}{2}\right]^{\frac{\sin\varphi}{1 + \sin\varphi}(1 + \sin\Psi)} \qquad (3)$$

ce qui, au passage montre que $\dfrac{p_{l\infty}}{p_{lc}} = 2^{\frac{\sin\varphi}{1 + \sin\varphi}(1 + \sin\Psi)}$

On peut également écrire, et ceci à ± 1 % près, et pour $25° < \varphi < 50°$

$$\frac{p_{lc} - u}{q_o - u} = 1{,}25\left(1 - \frac{1}{3}\sin\varphi\right)\left(1 - \frac{2}{3}\sin\varphi\,\sin\Psi\right)\left(\frac{E}{2(q_o - u)}\right)^{\frac{\sin\varphi}{1 + \sin\varphi}(1 + \sin\Psi)}$$

$$= f(\varphi, \Psi)\left(\frac{E}{2(q_o - u)}\right)^{\frac{\sin\varphi}{1 + \sin\varphi}(1 + \sin\Psi)}$$

La particularité de la fonction $f(\varphi, \psi)$, est qu'elle varie peu, elle aussi, avec φ, de telle sorte qu'on peut écrire :

$f(\varphi, \Psi) = a$

avec approximativement :

$a = 1{,}1$ pour $\varphi \leq 32°$

$a = 1$ pour $32° < \varphi < 37°$

$a = 0{,}9$ pour $\varphi \geq 37°$

En ce qui concerne l'angle de dilatance $\psi = \varphi - \varphi_i$, les valeurs de l'angle de frottement intergranulaire φ_i paraissent généralement comprises entre 30° et 37°, les plus basses étant relatives aux sables de granulométrie assez serrée, et plutôt arrondis, les plus fortes aux sables de granulométrie étendue, assez anguleux [2].

L'interprétation est évidemment améliorée si l'on mesure directement φ_i en laboratoire, sachant que par ailleurs le prélèvement de matériau reste indispensable, pour toute étude sérieuse.

Dans l'hypothèse où cette mesure de φ_i, qui constitue bien entendu une sujétion, n'est pas réalisée, on peut néanmoins estimer, avec une moindre fiabilité la valeur de φ.

Ainsi, si l'on réalise seul un essai de type alterné, suivant la norme (en cours de mise au point), on pourra alors utiliser les expressions suivantes, auxquelles on parvient :

$$\sin\varphi = \frac{8}{7}\left(\frac{1}{7} + \frac{ln\,\dfrac{p_{lc} - u}{a\,(q_o - u)}}{ln\,\dfrac{E}{2(q_o - u)}}\right)$$

pour $\varphi_i = 30°$

$$\sin\varphi = \frac{9}{8}\left(\frac{1}{8} + \frac{ln\,\dfrac{p_{lc} - u}{a\,(q_o - u)}}{ln\,\dfrac{E}{2(q_o - u)}}\right)$$

pour $\varphi_i = 33°$

$$\sin\varphi = \frac{10}{9}\left(\frac{1}{9} + \frac{ln\,\dfrac{p_{lc} - u}{a\,(q_o - u)}}{ln\,\dfrac{E}{2(q_o - u)}}\right)$$

pour $\varphi_i = 37°$

Le choix de l'une des trois expressions permet d'approcher l'ordre de grandeur de l'erreur qui peut être commise ; le coefficient **a** varie de 1,1 à 0,9 et peut être choisi pratiquement suivant le critère suivant :

$a = 1{,}1$ si $\dfrac{p_{lc}}{q_o - u} < 6$

$a = 1$ si $6 < \dfrac{p_{lc}}{q_o - u} < 12$

$a = 0{,}9$ si $\dfrac{p_{lc}}{q_o - u} > 12$

Par contre, **à partir du seul essai pressiométrique Ménard**, cette détermination nécessite de fixer la valeur de

$$\frac{E}{(q_o - u)} = \left(\frac{E}{E_M} \times \frac{E_M}{p_{lc} - u} \times \frac{p_{lc} - u}{q_o - u}\right)$$

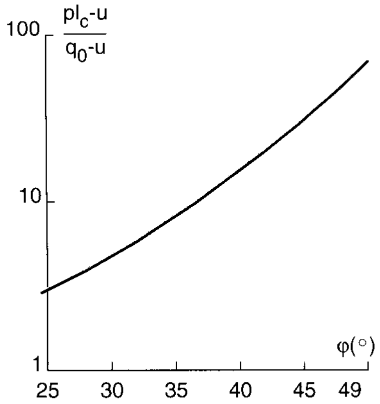
L'étude des essais alternés dans les matériaux pulvérulents conduit à choisir des valeurs E/E_M de l'ordre de 7, et $E_M/p_{lc} - u$ de l'ordre de 8. Ces choix, puisque ces rapports sont en réalité sujet à des variations, font qu'il est alors illusoire de vouloir conserver les critères concernant a, qu'on choisira égal à 1, de même que ceux relatifs à φ_i, angle pour lequel on choisira une valeur moyenne de 33°.

On retiendra donc dans le cas de l'essai classique, où p_{lc} est effectivement mesuré, l'expression unique pratique :

$$\sin\varphi = \frac{9}{8}\left(\frac{1}{8} + \frac{ln\,\dfrac{p_{lc} - u}{q_o - u}}{ln\,\dfrac{p_{lc} - u}{q_o - u} + \left(\dfrac{3}{2}\right)^3}\right)$$

représentée sur le graphique ci-après :

$u^* = 0$ s'il n'y a pas de nappe.



$$\sin\varphi = \frac{9}{8}\left(\frac{1}{2^3} + \frac{ln\,\dfrac{p'_{lc}}{q'_o}}{ln\,\dfrac{p'_{lc}}{q'_o} + \left(\dfrac{3}{2}\right)^3}\right)$$

sol pulvérulent

Cette formule montre bien que la seule connaissance de la pression limite ne permet pas d'accéder directement à l'angle de frottement, la contrainte q_o (« poids des terres »), jouant un rôle très important dans cette détermination. Il est néanmoins évident que, dans les dépôts alluvionnaires naturels « normalement consolidés » (c'est-à-dire non compactés artificiellement, ni dragués) auxquels cette méthode de détermination de φ s'applique, les matériaux situés le plus haut (et donc soumis à de faibles contraintes géostatiques) possèdent des poids volumiques faibles à modérés, qui croissent avec la profondeur. Il en est donc de même naturellement, à matériau homogène identique, pour l'angle de frottement, faible en surface et plus élevé en profondeur. De ce fait, une liaison existe entre les valeurs de p_{lc} et q_o qui se traduit par des rapports $\frac{p_{lc} - u}{q_o - u}$ plus faibles en surface (où q_o est faible) et augmentant en profondeur.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] COMBARIEU O. (1995), L'essai pressiomètrique et la résistance au cisaillement des sols. *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, **196**, (mars-avr.), pp. 43-51.

[2] BOLTON M.D. (1986), The strength and dilatancy of sands. *Géotechnique*, vol. 36, **1**, pp. 65-78.