

NOUVELLE APPROCHE POUR L'EVALUATION DE LA CONTRAINTE ADMISSIBLE D'UN SOL PULVERULENT

Par

Tahar AYADAT

PhD, Enseignant, Institut de Génie Civil, Centre Universitaire de M'sila

Abdelkrim DEGDEG

Ingénieur en Génie Civil

Résumé

Pour évaluer la pression admissible d'un sol, les praticiens recourent généralement aux essais in situ. Le coût, souvent excessif, de ces derniers et les délais, généralement longs, qu'ils nécessitent ont poussé nombre de chercheurs à mettre au point des méthodes de détermination des principaux paramètres fournis par ces essais en les réduisant, voire en se passant carrément d'eux. Pour ce faire, de nombreuses relations reliant les paramètres cherchés à certaines caractéristiques mécaniques des sol -plus aisément obtenues- ont été proposées par divers auteurs. Dans ce contexte, le nombre de coups (N) de l'essai de pénétration normalisé (S.P.T) a été lié, pour les sols pulvérulents, à la densité relative, la compacité et l'angle de frottement interne. Malgré l'importance et l'utilité de ces progrès, le développement d'une nouvelle méthode, liant le nombre N à un seul paramètre du sol, facilement obtenu in situ ou au laboratoire, s'avère nécessaire.

L'objectif de cette étude est de développer une nouvelle approche en essayant de lier N directement au poids volumique du sol.

Mots clés : contrainte admissible • sol pulvérulent • essai de pénétration normalisé (S.P.T) • nombre de coups • poids volumique.

1 INTRODUCTION

Un projet de fondation correct doit répondre à trois sortes de préoccupations :

- tout d'abord, la forme et l'emplacement des fondations doivent être choisis de manière à assurer la sécurité de la construction à l'égard des modifi-

cations prévisibles de l'état des lieux,

- puis, la fondation doit exercer sur le sol des contraintes compatibles avec la résistance à la rupture de celui-ci, c'est le problème de la capacité portante,
- enfin, le tassement de la fondation doit être limité pour éviter le basculement ou la ruine de l'ensemble et pour empêcher l'apparition de fissures localisées qui rendraient l'ouvrage inutilisable.

Pour toutes les constructions de génie civil, il est très important et même indispensable de connaître la contrainte admissible du sol à chaque niveau de fondation. La pression admissible d'un sol portant des immeubles légers est, d'habitude, déterminée à partir de l'expérience [1], [2] et [3]. Dans le cas où la structure est importante, il est recommandé d'utiliser des essais de laboratoire ou des essais in situ pour obtenir la capacité portante.

Pour évaluer pression admissible et capacité portante, on peut déterminer les caractéristiques mécaniques du terrain de fondation par des essais de laboratoire et utiliser ensuite les théories de la capacité portante.

Parmi ceux-ci on peut citer :

- a- La théorie de la pression [4],
- b- La méthode du cercle de glissement [5] et [6],
- c- La théorie de la rupture plastique [7] et [8].

Malgré que ces théories et ces méthodes soient très utiles et fournissent une bonne approximation de la capacité portante, des praticiens de plus en plus nombreux ont recours à des essais in situ pour déterminer, d'une part, le niveau d'assise le plus favorable pour la fondation et, d'autre part, les contraintes admissibles correspondantes. On citera, en particulier :

- l'essai à la table,

- le battage d'un tube carottier (S.P.T),
- le pénétromètre statique, le pénétromètre dynamique,

L'inconvénient de ces essais est qu'ils sont coûteux et prennent beaucoup de temps. Pour surmonter ces difficultés, plusieurs chercheurs ont essayé de lier quelques caractéristiques géotechniques du sol aux principaux paramètres déduits par ces tests.

Pour l'essai de pénétration normalisé (Standard Penetration Test), des relations très utiles ont été établies, exprimant le nombre de coups (N) en fonction de certains paramètres géotechniques du sol. Terzaghi [1] a montré que N dépend essentiellement de l'état naturel du sol ou de la compacité (Tableau 1).

N	Terzaghi & Peck (1948)	Gibbs & Holtz (1957)
	Compacité	Densité relative
0 - 4	très lâche	0 - 15%
4 - 10	lâche	15 - 35%
10 - 30	moyennement compact	35 - 65%
30 - 50	dense	65 - 85%
au-dessus de 50	très dense	85 - 100%

Tableau 1 : Relation entre N et la Compacité, et entre N et la densité relative des sables.

Gibbs et al. [9] ont développé cette idée en reliant le nombre N à la densité relative (Tableau 1). La méthode nécessite la connaissance et la détermination en laboratoire de plusieurs paramètres de sol. Cela fait augmenter les dépenses et les délais et rend ces deux méthodes peu économiques. Une autre relation, présentée sous forme d'abaque, a été proposée par Peck et al. [10]. L'abaque donne le nombre de coups (N) en fonction de l'angle de frottement interne ϕ (Figure 1). Cette méthode, basée sur un seul paramètre, ϕ en l'occurrence, a connu un grand succès mais sa généralisation a été freinée en raison de son coût encore assez élevé, car la connaissance de ϕ nécessite des essais et des équipements très sophistiqués.

La méthode développée dans cet article relie le nombre N à un seul paramètre de sol facilement obtenu soit en laboratoire ou in situ. Dans ce travail, des relations et des abaques ont été élaborés, exprimant le nombre de coups (N) en fonction seulement du poids volumique du sol à l'état naturel.

2 DESCRIPTION DU S.P.T

D'après Costet et Sanglerat [11], ce n'est qu'en 1902 que Charles R. Gow [12] a substitué au système de reconnaissance par lance hydraulique, une méthode de prise d'échantillons à sec. Il utilisait alors un tube d'un pouce de diamètre enfoncé par battage avec une masse de 110 livres.

En 1927, Linton Hart et Gordon A. Fletcher [13] de la société Raymond Concrete Pile, mirent au point un carottier, fendu longitudinalement, de 2 pouces de diamètre, qui fut connu plus tard sous le nom de "Standard Penetration Test" (S.P.T).

Le principe de la reconnaissance dite S.P.T est le suivant : on exécute un forage et on descend ensuite au fond du trou un carottier normalisé (5 cm de diamètre) que l'on enfonce de 15 cm dans la couche à reconnaître. Le sondeur marque alors un repère sur les tiges et enregistre le nombre N de coups nécessaires pour enfoncer à nouveau le carottier sur une profondeur de 30 cm. Le mouton qui sert à battre le carottier pèse 63.5 Kg, sa hauteur de chute est de 76.2 cm.

On trouve aux Etats-Unis de nombreuses recommandations pratiques pour le calcul des fondations en fonction de ce nombre de coups (N). Terzaghi et Peck [1] ont donné en fonction de N les valeurs des coefficients de capacité portante N_γ et N_q . Ils ont, de même, dressé des abaques donnant directement la pression admissible pour des semelles encastrees ou non, avec un coefficient de sécurité égal à 3.

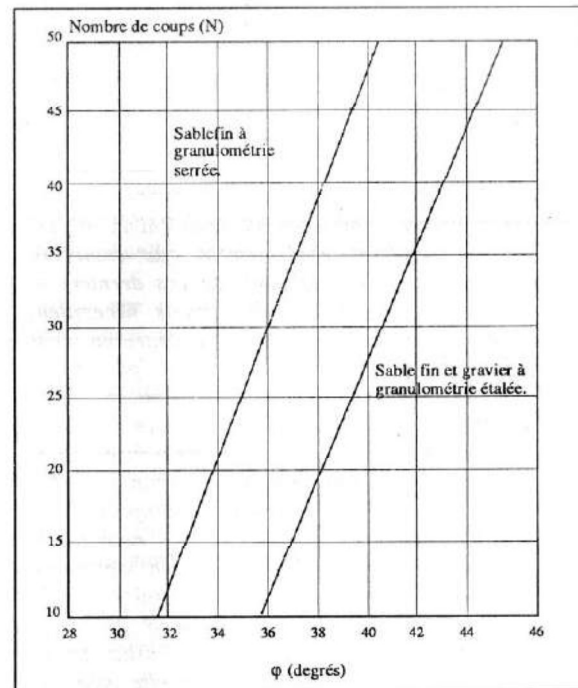


Figure 1 : Relation entre N et ϕ (Peck et al., 1974).

Plusieurs auteurs ont essayé de relier le nombre de coups N du S.P.T à la résistance de pointe R_p du pénétromètre statique. On constate une corrélation assez grossière de la forme $R_p(\text{MPa}) = CN$. Le coefficient de proportionnalité C pouvant varier de 0.2 pour les argiles à 1 pour les sables. La pression admissible est calculée, d'après l'Herminier, par la relation $q_d = R_p/10$. Ceci est vrai seulement dans le cas des semelles de dimensions courantes, ayant un encastrement de l'ordre du mètre et reposant sur un milieu sableux assez serré. Par contre, pour des semelles faiblement ou fortement encastrees ou bien pour des semelles de dimensions exceptionnelles, il est préférable d'utiliser l'abaque proposé par Mayerhof [14] qui donne directement le rapport q_d/R_p en fonction de la largeur B de la semelle et du rapport D/B (D étant l'encastrement de la semelle).

3 DEVELOPPEMENT DE LA METHODE

Dans sa chute le mouton acquiert une énergie MH qu'il communique au carottier. Si toute l'énergie était transmise et s'il n'y avait pas, par ailleurs, des pertes d'énergie, on pourrait écrire :

$$Qd = MHN$$

soit

$$Q = (MHN)/d \quad (1)$$

avec :

- M : Masse du mouton,
- H : Hauteur de chute,
- N : Nombre de coups,
- d : Profondeur d'enfoncement (d = 30 cm),
- Q : Charge portante.

Le carottier peut être considéré comme un pieu ancré dans le sol. D'après les formules statiques de la mécanique des sols on peut écrire :

$$Q = Q_p + Q_f$$

où :

- Q_p : Résistance de pointe,
- Q_f : Résistance latérale.

i) La résistance de pointe du carottier, pour un sol pulvérulent, est :

$$Q_p = (\gamma_h L N_q) A_p$$

avec :

$$N_q = \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \text{tg} \phi}$$

ii) Le frottement latéral dans le cas général est :

$$Q_f = 2 \pi R L \left[c + \frac{1}{2} K \gamma_h L \text{tg} \phi \right]$$

où :

- R : Rayon du carottier,
- L : Longueur du carottier,
- c : Cohésion du sol,
- γ_h : Poids volumique humide
- ϕ : Angle de frottement interne,
- K : Coefficient de la pression des terres ($K_a \leq K \leq K_p$),
- K_a : Coefficient de la poussée active des terres,
- K_p : Coefficient de la poussée passive des terres
- A_p : Section du pieu.

L'expression de Q s'écrit alors :

$$Q = 2 \pi R L \left[c + \frac{1}{2} K \gamma_h L \text{tg} \phi \right] + (\gamma_h L N_q) A_p \quad (2)$$

Puisque le carottier est battu, on admettait qu'il refoulait le sol, soit $K = K_p$; c'est-à-dire que la butée était entièrement mobilisée tout autour du fût. A partir des équations (1) et (2) on peut écrire :

$$\pi R^2 \gamma_h L \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \text{tg} \phi} +$$

$$2 \pi R L \left[c + \frac{1}{2} \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \gamma_h L \text{tg} \phi \right] = \frac{MH}{d} N$$

Pour un sol pulvérulent (cas des sables et graviers) on peut admettre que $c = 0$. Aussi, l'angle de frottement interne (ϕ) est lié à N, d'après les travaux de Peck et al. [10] (voir figure 1), par la relation :

$$N = a\phi - b$$

De la figure 1 on peut tirer les valeurs des coefficients a et b :

$$a = 4.2$$

$$b = 122.8 \text{ pour les sables fins à granulométrie serrée.}$$

$$b = 139.6 \text{ pour les sables et graviers à granulométrie étalée.}$$

Finalement, l'expression donnant N en fonction de γ_h devient :

$$\pi R L \gamma_h \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{N+b}{8.4} \right) \left[R e^{\pi \text{tg} \left(\frac{N+b}{4.2} \right)} + L \text{tg} \left(\frac{N+b}{4.2} \right) \right] - \frac{MH}{Fd} N = 0 \quad (3)$$

Pour faciliter son utilisation, l'expression précédente a été représentée sous forme d'un tableau et d'un abaque (Tableau 2 et Figure 2). Connaissant la valeur de γ_h , on peut rapidement déduire la valeur de N, de l'abaque ou du tableau, ensuite on détermine la contrainte admissible du sol d'après les abaques de Terzaghi et Peck [1] ou de Mayerhof [14].

N	Poids Volumique Humide (Kg/m ³)	
	Sable fin à granulométrie serrée	Sable et gravier à granulométrie étalée
0 - 4	0 - 1 229	0 - 853
4 - 10	1 229 - 2 700	853 - 1 864
10 - 30	2 700 - 5 201	1 864 - 3 492
30 - 50	5 201 - 5 373	3 492 - 3 533
> 50	> 5 373	> 3 533

Tableau 2 : Relation entre N et le poids volumique humide d'un sol pulvérulent.

Pour améliorer la pression fournie par cette méthode, il est nécessaire de prendre en compte différents termes complémentaires représentant certaines pertes d'énergie. En considérant que le carottier est un pieu de petite dimension, la charge portante (Q) peut être estimée par la formule de Crandall [15] ou celle des Hollandais [16] (voir Annexe A). Ces deux formules ont connu beaucoup de succès et sont encore très utilisées. Dans la formule de Crandall, on ajoute au refus proprement dit la moitié du raccourcissement élastique

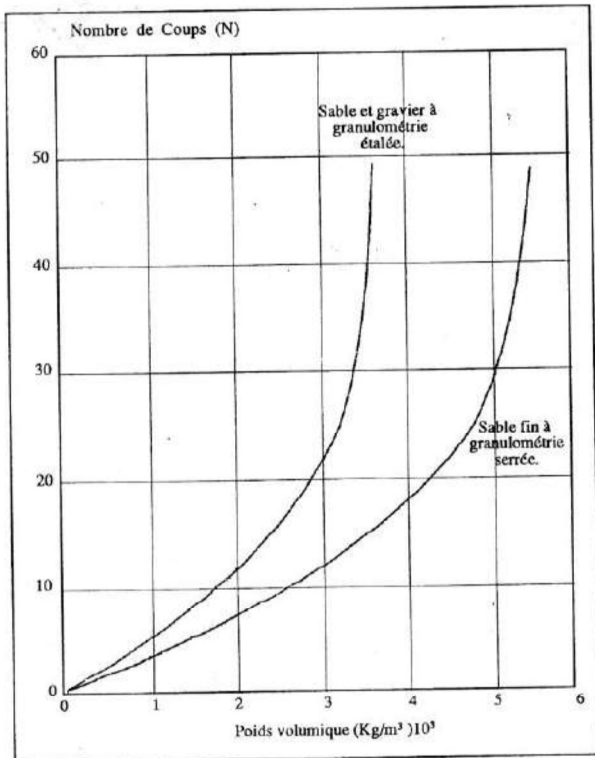


Figure 2 : Relation entre N et le poids volumique humide d'un sol.

du pieu ; dans celle des Hollandais, on ignore ce terme complémentaire. Bien entendu, tant que le raccourcissement élastique est petit devant d, les formules des Hollandais et de Crandall donnent des résultats comparables.

L'équation (1) devient :

$$Q = \frac{1}{F} \frac{MHN}{d} \frac{1}{1 + \frac{P}{M}} \quad (4)$$

où :

F : Coefficient de sécurité (F = 6),
P : Masse du carottier,

En substituant à Q l'expression (4), on obtient pour les sols pulvérulents :

$$\pi R L \gamma_h \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{N+b}{8.4} \right) \left[R e^{\pi \operatorname{tg} \left(\frac{N+b}{4.2} \right)} + L \operatorname{tg} \left(\frac{N+b}{4.2} \right) \right] - \left[\frac{1}{F} \frac{M H}{d} \frac{1}{1 + \frac{P}{M}} \right] N = 0 \quad (5)$$

La dernière expression (équation 5) représente la relation entre N et γ_h compte tenu des pertes d'énergie.

Cette expression peut être aussi exprimée sous forme d'un tableau ou d'un abaque après la connaissance de la masse du carottier.

4 VALIDATION DE LA METHODE

Le tableau 3 permet de juger la validité de la méthode proposée. Ce tableau regroupe les valeurs de N, pour différents sols, déterminées par :

- des essais in situ,
- le principe de la densité relative [9],
- la nouvelle approche.

Référence	Type de sol	Les Valeurs de N		
		Gibbs & Holz (1957)	Expérimental	Nouvelle Méthode
Ayadat [17]	Sable (gr.étalée)	4 - 10	-	4 - 10
Smith [3]	Gros sable	-	20	10 - 20
Smith [3]	Sol pulvérulent	-	12	10 - 20
Touahmia [18]	Sable	4 - 10	-	4 - 10
Smith [3]	Sable	-	15	10 - 20

Tableau 3 : Validation de la nouvelle méthode.

En comparant les valeurs données, on constate qu'elles sont plus ou moins proches les unes des autres, ce qui prouve que la méthode développée peut être appliquée lors de la détermination de la contrainte admissible du sol. Mais il est très important de noter que les valeurs prédites par cette approche sont toujours inférieures à celles déterminées par des essais in situ. On peut remédier à cela par la considération, lors de l'analyse, de la faible cohésion des sables due au phénomène de la capillarité et tenir ainsi compte de la perte d'énergie.

On peut conclure que cette nouvelle méthode peut être très utile puisqu'elle n'utilise qu'un seul paramètre de sol, dont l'obtention est facile et que les valeurs de N qu'elle donne sont toujours du côté de la sécurité.

CONCLUSION

Les conclusions qu'on peut retenir de cette étude sont :

- 1/ On a montré qu'il est possible d'obtenir la contrainte admissible d'un sol en connaissant un seul paramètre de ses caractéristiques mécaniques, le poids volumique à l'état naturel.
- 2/ Le nombre de coups (N) du S.P.T peut être déterminé par l'expression (3) ou (5), le tableau 2 ou l'abaque 2 tout simplement en connaissant γ_h .
- 3/ La méthode est pratique car ne nécessitant qu'un seul paramètre du sol facilement obtenu au laboratoire ou in situ ☺

ANNEXE A

Formules de battage :

- Formule de Crandall [15] :

$$Q = \frac{1}{F} \frac{MH}{e + \frac{e_1}{2}} \frac{1}{1 + \frac{P}{M}}$$

- Formule des Hollandais [16] :

$$Q = \frac{1}{F} \frac{MH}{e} \frac{1}{1 + \frac{P}{M}}$$

où :

- e_1 : Raccourcissement élastique,
- e : Refus (d).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] K. Terzaghi et R.B Peck : "*Soil Mechanics in Engineering Practice*". John Wiley and Sons, 1948.
- [2] P. Charon : "*Le calcul et la vérification des ouvrages en Béton Armé*". Editions Eyrolles, 1983.
- [3] G.N Smith : "*Elements of soil Mechanics for Civil and Mining Engineers*". fifth Edition, Granada Publishing, 1983.
- [4] Bell - cité par Smith (référence [3]).
- [5] W. Fellenius : "*Erdstatische Berechnungen*". Ernst, Berlin, 1927.
- [6] G. Wilson : "*The Calculation of the Bearing of Footings on Clay*". Journal Institution of Civil Engineers, 1941.
- [7] L. Prandtl : "*Über die Eindringungsfestigkeit (Harte) Plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden*". Z. angew. Math. Mech., 1921.
- [8] K. Terzaghi : "*Theoretical Soil Mechanics*". John Wiley, 1943.
- [9] H. Gibbs, W.G Holtz : "*Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Test*". Proceedings International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1957.
- [10] R.B Peck, W.E Hanson et T.H Thornbur : "*Foundation Engineering*". Second Edition, John Wiley

and Sons, New York, 1974.

- [11] J. Costet et G. Sanglerat : "*Cours pratique de Mécanique des Sols*". Troisième édition, Dunod Bordas, Paris, 1983.
- [12] R.G Charles - cité par Costet & Sanglerat référence [11].
- [13] L. Hart et G.A Fleecher : Cité par Costet & Sanglerat référence [11].
- [14] G.G Mayerhof : "*The Ultimate Bearing Capacity of Foundations*". Geotechnique, 1951.
- [15] Crandall - cité par Costet & Sanglerat (référence [11]).
- [16] Hollandais - cité par Costet & Sanglerat (référence [11]).
- [17] T. Ayadat : "*Collapse of Stone Column Foundations due to Inundation*". PhD thesis, University of Sheffield, 1991 .
- [18] M. Touahmia : "*Study of Reinforced earth Element under Statique and Repeated Loads*". PhD thesis, Sheffield University, 1991.

Liste des Notations

- B : Largeur de la semelle
- c : Cohésion du sol
- C : Coefficient de proportionnalité
- d : Profondeur d'enfoncement
- D : Encastrement de la semelle
- e : Refus
- e_1 : Raccourcissement élastique
- F : Coefficient de sécurité
- H : Hauteur de chute
- K : Coefficient de la pression des terres
- K_a : Coeff. de la pression active des terres
- K_p : Coeff. de la pression passive des terres
- L : Longueur du carottier
- M : Masse du mouton
- N : Nombre de coups
- N_q : Facteur de capacité portante
- P : Masse du carottier
- Q : Charge portante,
- Q_f : Résistance latérale
- Q_p : Résistance de pointe
- R : Rayon du carottier
- R_p : Résistance de Pointe de pénétromètre statique