

VALIDITE DE LA METHODE DE SUPERPOSITION POUR LE CALCUL DE LA CAPACITE PORTANTE DES FONDATIONS SUPERFICIELLES

M. MATAR et J. SALENÇON (PALAISEAU)

1. Introduction

L'étude de la capacité portante d'une fondation superficielle sur sol illimité homogène par la méthode de superposition suivant la décomposition de Terzaghi est assez classique. Cette méthode a également été utilisée [1, 2 par ex.] dans le cas d'un sol non homogène. Deux types de non-homogénéité ont ainsi été examinés:

- le cas d'une couche de sol homogène d'épaisseur limitée, reposant sur une assise rigide;
- le cas d'un sol illimité dont la cohésion croît linéairement avec la profondeur.

La méthode de superposition peut aussi être appliquée dans le cas où les deux types de non-homogénéité se produisent simultanément, c'est-à-dire où l'on a affaire à une fondation reposant sur une couche de sol d'épaisseur limitée dont la cohésion croît linéairement avec la profondeur.

On se propose ici d'étudier la validité de cette méthode dans ces divers cas d'application, pour des sols de Coulomb ou purement cohérents, en comparant les résultats qu'elle fournit à ceux obtenus par un calcul global prenant en compte simultanément l'effet du poids spécifique et de la cohésion.

2. Rappels, définitions

Les calculs de capacité portante pour les fondations superficielles ressortissent à l'esprit du «calcul à la rupture»: la résistance de l'élément de sol étant définie par un critère on en déduit une information sur la charge maximale que peut supporter la fondation sans entraîner la ruine de l'ouvrage. On définit ainsi les chargements «potentiellement supportables» [3]: un chargement est dit potentiellement supportable pour l'ouvrage étudié en géométrie initiale s'il existe au moins un champ de contrainte qui l'équilibre en respectant en tout point le critère de résistance (cette condition est évidemment nécessaire pour qu'un chargement puisse être supporté par l'ouvrage en géométrie initiale).

Les critères adoptés pour les sols sont:
le critère de Tresca, pour les sols purement cohérents:

$$(1) \quad |\tau| \leq C, \quad \forall \mathbf{n},$$

et le critère de Coulomb:

$$(2) \quad |\tau| \leq C - \sigma \operatorname{tg} \phi, \quad \forall \mathbf{n} \quad (\phi \neq 0),$$

où σ et τ désignent les composantes normale et tangentielle du vecteur contrainte agissant sur la facette de normale sortante \mathbf{n} . C est la cohésion et ϕ l'angle de frottement interne du sol (Fig. 1).

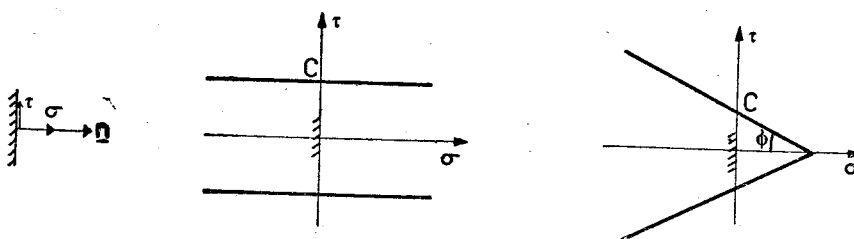


FIG. 1. Critères de Tresca (a) et de Coulomb (b) dans le plan de Mo...

Nous définissons la capacité portante d'une fondation superficielle chargée axialement sur un tel sol comme le plus grand chargement, caractérisé par la pression moyenne correspondante sous la fondation, potentiellement supportable pour cette fondation.

Ainsi la mise en évidence d'un champ de contrainte statiquement admissible et respectant en tout point le critère de résistance conduira à une valeur approchée par défaut de la capacité portante; c'est le «théorème statique du calcul à la rupture».

Considérons une fondation superficielle de largeur B chargée axialement reposant sur un sol homogène semi-infini de poids spécifique γ , obéissant au critère de Coulomb (2), avec une surcharge latérale q (Figure 2), l'emploi de la méthode de superposition pour

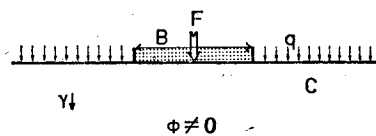


FIG. 2. Sol homogène semi-infini

évaluer la capacité portante conduit à la décomposition habituelle en termes de surface (ou de pesanteur), de surcharge latérale (ou de profondeur) et de cohésion, due à TERZAGHI [4] (Fig. 3a, b, c).

Il découle immédiatement du théorème statique énoncé ci-dessus que cette décomposition fournit une borne inférieure $(p_{ult})_{superp}$ de la capacité portante p_{ult} :

$$(3) \quad p_{ult} \geq (p_{ult})_{superp} = \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma}(\phi) + q N_q(\phi) + C N_c(\phi).$$

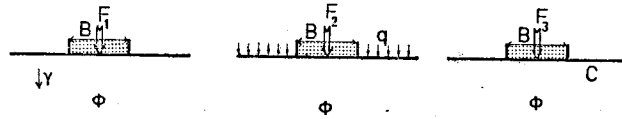


FIG. 3. Méthode de superposition

Sol frottant, pesant non chargé, sans cohésion. (terme de surface)

$$\frac{F_1}{B} = \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma(\phi)$$

Sol frottant, chargé, non pesant, sans cohésion. (terme de surcharge)

$$\frac{F_2}{B} = q N_q(\phi)$$

Sol frottant, avec cohésion, non pesant non chargé. (terme de cohésion)

$$\frac{F_3}{B} = C N_c(\phi)$$

Le théorème des états correspondants (cf. [5]) indique que:

$$N_q(\phi) = N_c(\phi) \operatorname{tg} \phi + 1,$$

et par suite:

$$(4) \quad p_{ult} \geq (p_{ult})_{superp} = \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma(\phi) + (C + q \operatorname{tg} \phi) N_c(\phi) + q.$$

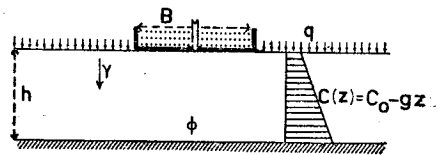
3. Couche de sol d'épaisseur limitée et de cohésion croissante avec la profondeur

3.1. Introduction

On se propose maintenant d'étudier la capacité portante d'une semelle filante de largeur B , chargée axialement, reposant sur une couche de sol, d'épaisseur limitée h , de poids spécifique γ , d'angle de frottement interne ϕ constant et dont la cohésion croît linéairement avec la profondeur selon la formule:

$$(5) \quad C(z) = C_0 - gz;$$

FIG. 4. Couche de sol non-homogène, d'épaisseur limitée. (Problème P)



C_0 est la cohésion en surface et $g = -dC/dz (\geq 0)$ est le gradient de cohésion avec la profondeur; C_0 et g sont constants.

La couche de sol repose sur une assise rigide avec une surcharge latérale q (Figure 4).

3.2. Méthode de superposition

3.2.1. Sol de Coulomb ($\phi \neq 0$)

Si le sol obéit au critère de Coulomb ($\phi \neq 0$), l'étude de la capacité portante d'une fondation superficielle sur une couche de sol non-homogène (problème P , Figure 4) peut être ramenée, comme dans [2], à l'étude de la capacité portante d'une fondation super-

ficielle de même largeur B , reposant sur une couche de sol homogène d'épaisseur h , de poids spécifique:

$$(6) \quad \gamma^1 = \gamma + g \cotg \phi \quad (\text{c'est le théorème «d'équivalence } g - \gamma\text{»})$$

et de cohésion:

$$(7) \quad C^1 = C_0 + q \operatorname{tg} \phi \quad (\text{c'est le théorème «des états correspondants»}).$$

La surcharge latérale est nulle. Les conditions aux limites sous la fondations et à l'interface (sol de fondation-assise rigide) osnt les mêmes que le problème P : c'est le problème P_1 représenté à la figure 5.

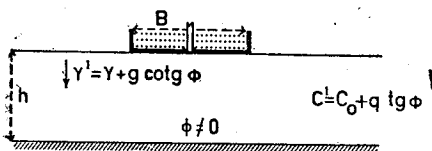


Fig. 5. Couche de sol homogène, d'épaisseur limitée et sans surcharge latérale. (Problème P^1)

Entre p_{ult} et p_{ult}^1 , capacités portantes correspondant aux problèmes (P) et (P^1) on a, d'après la théorie du «calcul à la rupture» [3], la relation suivante:

$$(8) \quad p_{ult} = p_{ult}^1 + q.$$

L'application de la méthode de superposition sur le problème homogène (P^1) (Figure 5) fournit, d'après le «théorème statique du calcul à rupture», une borne inférieure de p_{ult}^1 , et par (8) une borne inférieure de p_{ult} qui est la suivante:

$$(9) \quad p_{ult} \geq (p_{ult})_{superp} = \frac{1}{2} (\gamma + g \cotg \phi) B N_{\gamma}' \left(\frac{B}{h}, \phi \right) + (C_0 + q \operatorname{tg} \phi) N_c' \left(\frac{B}{h}, \phi \right) + q.$$

Les valeurs de $N_{\gamma}'(B/h, \phi)$ et $N_c'(B/h, \phi)$, (coefficients équivalents de $N_{\gamma}(\phi)$ et de $N_c(\phi)$ dans le cas d'une couche de sol d'épaisseur limitée) sont données dans [1], pour une fondation rugueuse avec un interface (sol de fondation - assise rigide) rugueux (Figures 6 et 7).

Ces coefficients sont des fonctions croissantes de B/h et de ϕ .

Sur la figure 6 (resp. (7)) on a représenté en pointillé, la valeur critique de B/h , fonction de ϕ , au-dessous de laquelle l'interface ne joue aucun rôle: $N_{\gamma}'(B/h, \phi)$ (resp. $N_c'(B/h, \phi)$) (est alors égal à $N_{\gamma}(\phi)$ (resp. $N_c(\phi)$).

3.2.2. Sol purement cohérent ($\phi=0$)

Pour une couche de sol purement cohérent ($\phi=0$), la transformation du problème (P) (Figure 4) pour aboutir au problème (P^1) (Figure 5) ne peut être reprise, par suite du facteur $\cotg \phi$ qui figure dans l'expression de γ^1 (6).

Le problème peut cependant être traité directement en superposant l'effet du gradient de cohésion g et de la cohésion en surface C_0 [6]; on peut aussi procéder par passage à la limite, en faisant tendre ϕ vers zéro dans (9). En effet, pour un interface (sol de fonda-

tion-assise rigide) rugueux on a:

$$N'_y\left(\frac{B}{h}, \phi\right) \approx \frac{\phi}{2} \quad \text{quand} \quad \phi \rightarrow 0.$$

(La démonstration de cette propriété est donnée dans l'annexe 1).

Ce qui permet d'écrire que:

$$(10) \quad P_{ult} \geq (P_{ult})_{superp} = q + C_0 N'_c\left(\frac{B}{h}, 0\right) + \frac{1}{4} gB.$$

Les valeurs de $N'_c(B/h, 0)$ sont données sur la figure 7.

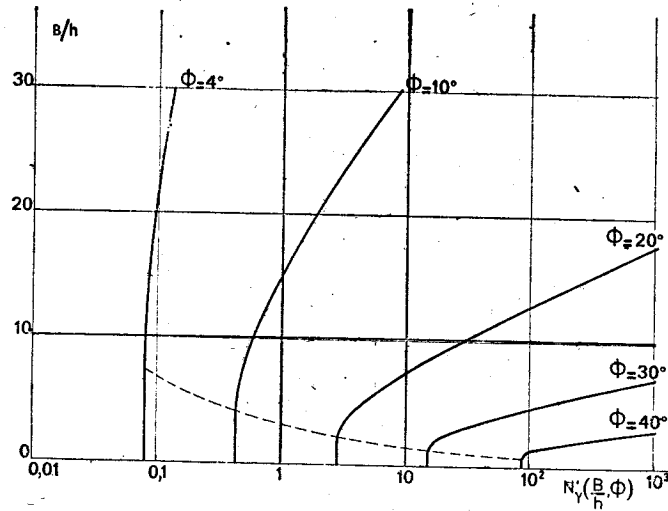


FIG. 6. Valeurs de $N'_y(B/h, \phi)$

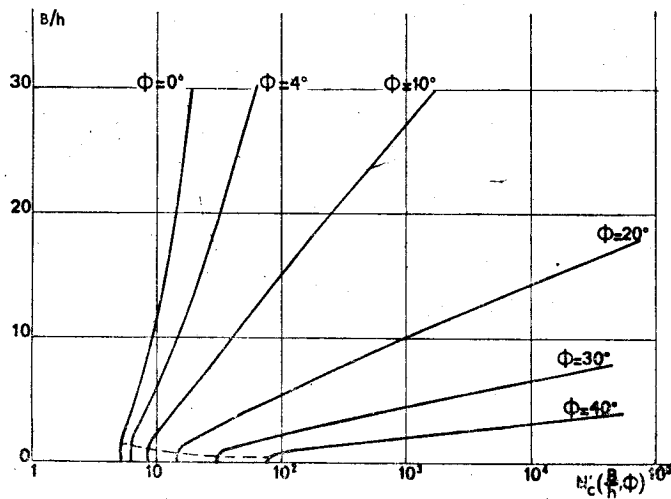


FIG. 7. Valeurs de $N'_c(B/h, \phi)$

3.2.3. Expression générale de p_{ult}

La capacité portante p_{ult} dépend a priori de sept paramètres: $B, \gamma, \phi, C_0, g, q, h$. Pour un sol de Coulomb ($\phi \neq 0$), la relation (8) indique que $p_{ult} - q = p_{ult}^1$, dépend des paramètres du problème (P^1) c'est-à-dire: $B, \gamma + g \cotg \phi, C_0 + q \tg \phi, \phi, h$; p_{ult} est donc nécessairement de la forme:

$$p_{ult} = q + f(\gamma + g \cotg \phi, C_0 + q \tg \phi, B, h, \phi),$$

qui peut se mettre pour des raisons d'analyse dimensionnelle sous les formes suivantes:

$$(11) \quad p_{ult} = q + (C_0 + q \tg \phi) F_c \left(\frac{\gamma + g \cotg \phi}{q + C_0 \cotg \phi} B, \frac{B}{h}, \phi \right) \quad \text{si } C_0 + q \tg \phi \neq 0.$$

$$(12) \quad p_{ult} = (\gamma + g \cotg \phi) BK \left(\frac{B}{h}, \phi \right) \tg \phi \quad \text{si } C_0 + q \tg \phi = 0.$$

Pour un sol purement cohérent ($\phi = 0$) on démontre par application du théorème statique le poids spécifique γ sol n'intervient pas dans l'expression de p_{ult} et que la surcharge latérale q n'y apparaît que sous forme additive. La capacité portante peut se mettre alors sous les formes suivantes:

$$(13) \quad p_{ult} = q + C_0 F_c \left(\frac{gB}{C_0}, \frac{B}{h}, 0 \right) \quad \text{si } C_0 \neq 0,$$

$$(14) \quad p_{ult} = q + gBK \left(\frac{B}{h}, 0 \right) \quad \text{si } C_0 = 0.$$

Dans (11, 12, 13, 14) F_c et K désignent des coefficients sans dimension, fonctions des grandeurs indiquées entre parenthèses.

3.2.4. Remarques

1. Pour une couche de sol de Coulomb ($\phi \neq 0$), l'effet du gradient de cohésion avec la profondeur g , est strictement équivalent à l'addition du terme constant $g \cotg \phi$ au poids spécifique γ du sol (théorème «d'équivalence $g - \gamma$ »).

2. L'inégalité (9) comparée à la formule (11) met en évidence l'effet majorateur du couplage entre le groupement «cohésion en surface C_0 , surcharge latérale q » d'une part, et le groupement «gradient de cohésion g , poids spécifique γ » de l'autre, pour le sol de Coulomb ($\phi \neq 0$). De même pour le sol purement cohérent, par comparaison entre (10) et (13) on voit l'effet majorateur du couplage cohésion en surface - gradient de cohésion.

3. Il est clair sur le problème (P^1) que pour $\gamma = 0$ et $g = 0$, l'inégalité (9) devient une égalité; il en va de même pour $q = 0$ et $C_0 = 0$, ce dont il résulte alors en regroupant les formules (9) et (12) que:

$$(15) \quad K \left(\frac{B}{h}, \phi \right) = \frac{1}{2} N'_\gamma \left(\frac{B}{h}, \phi \right) \cotg \phi.$$

De la même façon pour le sol purement cohérent on a en regroupant (10) et (14):

$$(16) \quad K\left(\frac{B}{h}, 0\right) = \frac{1}{4}.$$

Le cas $C_0 + q \operatorname{tg} \phi = 0$ est ainsi entièrement traité.

3.3. Validité de la méthode de superposition

La valeur de la capacité portante p_{ult} , peut être obtenue par un calcul global effectué dans le cadre de la théorie des équilibres limites plans (semelle filante). La construction de la solution qu'on ne détaillera pas ici, est effectuée pour le sol de Coulomb ($\phi \neq 0$) d'une manière analogue à celle décrite dans [6] pour le sol purement cohérent ⁽¹⁾.

Pour caractériser l'effet de couplage (cf. remarque 2 du § 3.2.4.), on introduit le coefficient μ_c :

$$(17) \quad \mu_c = \frac{p_{\text{ult}} - q}{(p_{\text{ult}})_{\text{superp}} - q}.$$

Celui-ci s'apparente au coefficient μ employé par LUNDGREN et MORTENSEN [15] mais qui devient inutilisable pour le sol purement cohérent ($\phi = 0$).

En se reportant aux formules (9) et (11) on obtient pour μ_c l'expression:

$$(18) \quad \mu_c \left(\frac{\gamma + g \operatorname{cotg} \phi}{q + C_0 \operatorname{cotg} \phi} B, \frac{B}{h}, \phi \right) = \frac{F_c \left(\frac{\gamma + g \operatorname{cotg} \phi}{q + C_0 \operatorname{cotg} \phi} B, \frac{B}{h}, \phi \right)}{\frac{1}{2} \frac{\gamma + g \operatorname{cotg} \phi}{q + C_0 \operatorname{cotg} \phi} B N'_{\gamma} \left(\frac{B}{h}, \phi \right) \operatorname{cotg} \phi + N'_c \left(\frac{B}{h}, \phi \right)},$$

valable pour $q + C_0 \operatorname{cotg} \phi \neq 0$.

Pour $q = 0$ et $C_0 = 0$, on a $\mu_c = 1$, d'après la remarque 3 du § 3.2.4.

Pour le sol purement cohérent, par (10) et (13), il vient:

$$(19) \quad \mu_c \left(\frac{gB}{C_0}, \frac{B}{h}, 0 \right) = \frac{F_c \left(\frac{gB}{C_0}, \frac{B}{h}, 0 \right)}{N'_c \left(\frac{B}{h}, 0 \right) + \frac{1}{4} \frac{gB}{C_0}},$$

valable pour $C_0 \neq 0$.

Pour $C_0 = 0$ on a $\mu_c = 1$, d'après la remarque 3 du § 3.2.4.

Il résulte des inégalités (9) et (10) que, aussi bien pour le sol de Coulomb que pour le sol purement cohérent, on a dans tous les cas:

$$\mu_c \geq 1.$$

D'autre part, on peut obtenir une majoration de μ_c en remarquant que la capacité portante p_{ult} est nécessairement inférieure, d'après le «théorème statique du calcul à la

⁽¹⁾ Les équations d'équilibre limite plan pour un sol non homogène sont données dans [7-12]. Pour la construction de la solution dans quelques cas particuliers et son prolongement au sens de БИ-НОР [13] voir en plus: [14-25].

rupture» et en appliquant le «théorème d'équivalence $g-\gamma$ », à celle obtenue dans le cas d'une couche homogène de même épaisseur, de poids spécifique nul et de cohésion:

$$[C_0 + q \operatorname{tg} \phi + (g + \gamma \operatorname{tg} \phi) h].$$

On a ainsi l'encadrement:

$$(20) \quad 1 \leq \mu_c \left(\frac{\gamma + g \operatorname{cotg} \phi}{q + C_0 \operatorname{cotg} \phi} B, \frac{B}{h}, \phi \right) \leq \frac{1 + \frac{\gamma + g \operatorname{cotg} \phi}{q + C_0 \operatorname{cotg} \phi} B \cdot \left(\frac{B}{h} \right)^{-1}}{\frac{1}{2} \frac{\gamma + g \operatorname{cotg} \phi}{q + C_0 \operatorname{cotg} \phi} B \frac{N'_\gamma \left(\frac{B}{h}, \phi \right)}{N'_c \left(\frac{B}{h}, \phi \right)} \operatorname{cotg} \phi + 1}$$

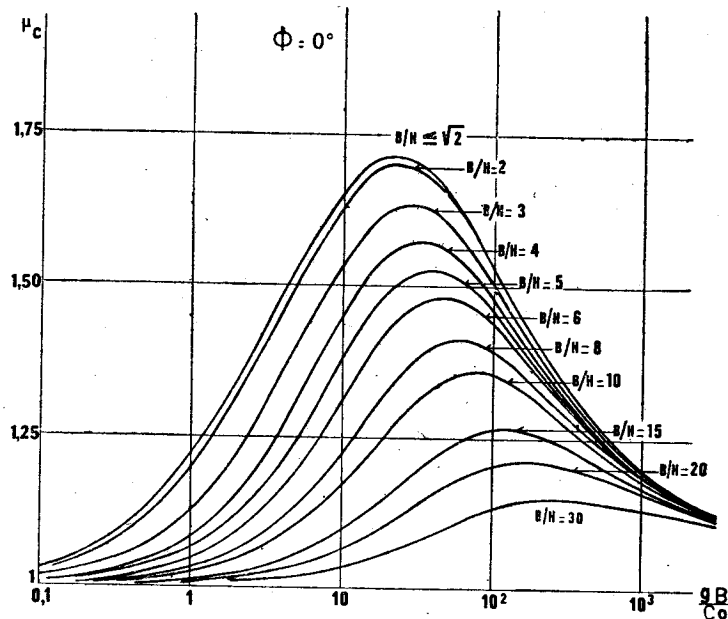


FIG. 8. Valeurs de μ_c pour $\phi = 0^\circ$

et les propriétés suivantes pour μ_c :

$$(21) \quad \mu_c \searrow 1 \quad \text{quand} \quad \frac{\gamma + g \operatorname{cotg} \phi}{q + C_0 \operatorname{cotg} \phi} B \searrow 0 \quad \forall \phi, \quad \forall \frac{B}{h},$$

$$(22) \quad \mu_c \searrow 1 \quad \text{quand} \quad \frac{\gamma + g \operatorname{cotg} \phi}{q + C_0 \operatorname{cotg} \phi} B \nearrow \infty \quad \forall \phi, \quad \forall \frac{B}{h},$$

$$(23) \quad \mu_c \searrow 1 \quad \text{quand} \quad \frac{B}{h} \nearrow \infty \quad \forall \phi, \quad \forall \frac{\gamma + g \operatorname{cotg} \phi}{q + C_0 \operatorname{cotg} \phi} B.$$

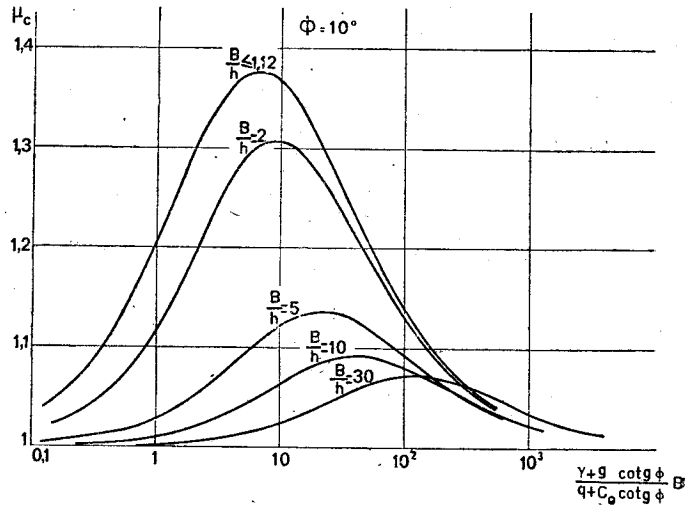


FIG. 9. Valeurs de μ_c pour $\phi = 10^\circ$

On présente sur les figures 8, 9 et 10 par des courbes (iso- B/h) dans le plan $\left(\frac{\gamma + g \cotg \phi}{q + C_0 \cotg \phi} B, \mu_c \right)$ les valeurs de μ_c pour $\phi = 0^\circ, 10^\circ, 30^\circ$, dans le cas d'une fondation rugueuse avec un interface (sol de fondation-assise rigide) rugueux.

On obtient dans chaque cas une famille de courbes en cloches, et on voit que:

- la valeur maximale μ_c^{\max} de μ_c correspondant au pic des courbes est une fonction décroissante de B/h ;

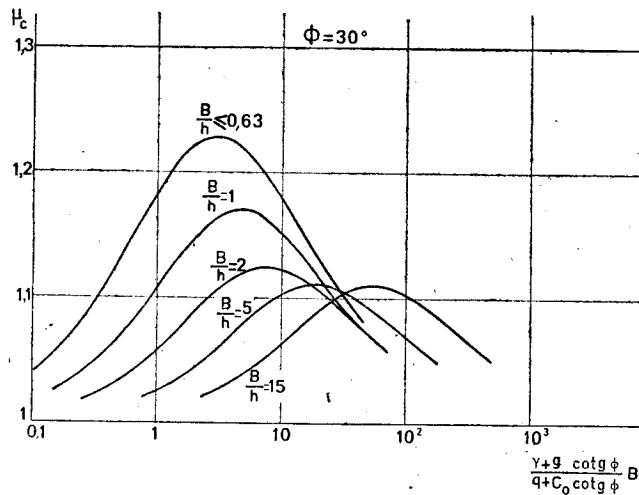
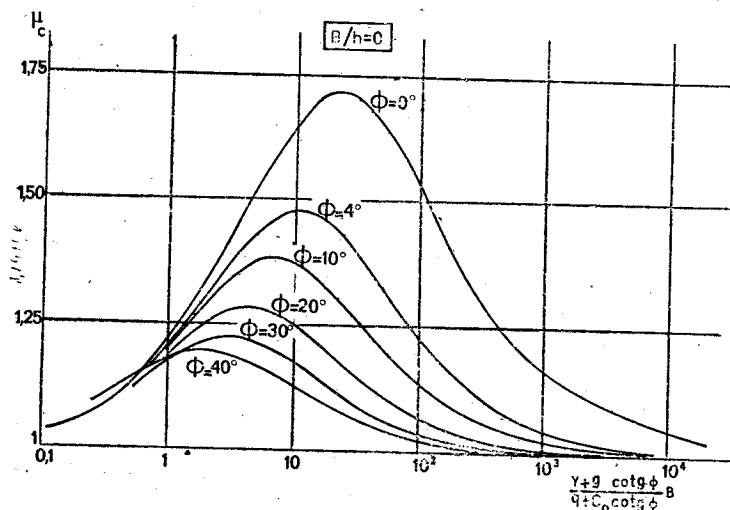


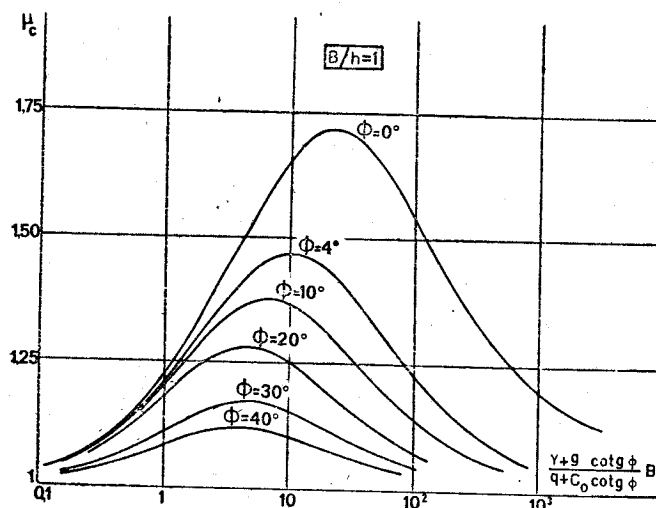
FIG. 10. Valeurs de μ_c pour $\phi = 30^\circ$

FIG. 11. Valeurs de μ_c pour $B/h=0$

— la sous estimation de la capacité portante introduite par l'utilisation de la méthode de superposition peut être importante, en particulier pour les petites valeurs de B/h .

Pour les petites valeurs de B/h , $B/h=0, 1, 2$, on donne sur les figures 11, 12, 13 par des courbes (iso - ϕ) les valeurs de μ_c dans le plan $\left(\frac{\gamma + g \cotg \phi}{q + C_0 \cotg \phi} B, \mu_c \right)$.

Le cas $B/h=0$ correspond au milieu semi-infini; il a été étudié par SALENÇON et coll. [2] qui ont donné les valeurs correspondantes de μ_c .

FIG. 12. Valeurs de μ_c pour $B/h=1$

On a à nouveau affaire à des courbes en cloches, et on voit que:

— la valeur maximale μ_c^{\max} de μ_c correspondant au pic des courbes est une fonction décroissante de ϕ ;

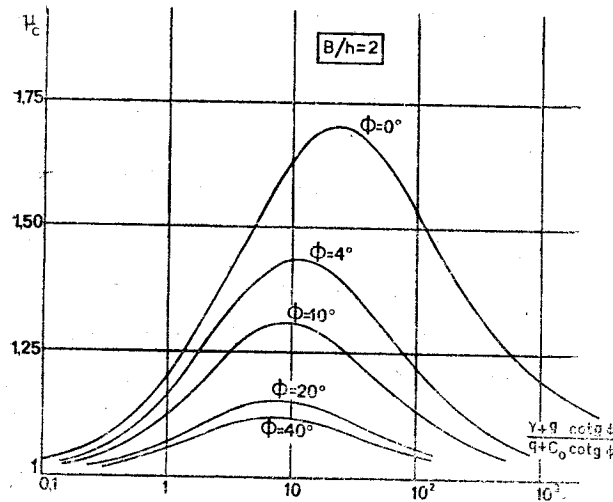


FIG. 13. Valeurs de μ_c pour $B/h=2$

— la sous-estimation de la capacité portante introduite par l'utilisation de la méthode de superposition peut être *importante*, en particulier *pour les petites valeurs de ϕ* .

4. Calculs pratiques

Comme l'utilisation de la méthode de superposition est habituellement assez aisée, nous proposons de fonder le calcul pratique de la capacité portante sur cette méthode en employant des coefficients correcteurs, à partir de la définition de μ_c donnée par la formule (17).

Pour cela, on donne à ϕ fixé les courbes (iso $-\mu_c$) dans le plan $\left(\frac{\gamma + g \cotg \phi}{q + C_0 \cotg \phi} B, \frac{B}{h} \right)$ (voir Annex). A noter que ce plan est séparé en deux régions par la courbe donnant $(B/h)_0$ en fonction de $\frac{\gamma + g \cotg \phi}{q + C_0 \cotg \phi} B$, au-dessous de laquelle la présence de l'assise rigide n'intervient pas dans la valeur de la capacité portante.

En regard de ce plan, on a tracé les courbes donnant $N'_c(B/h, \phi)$ et $N'_\gamma(B/h, \phi) \cotg \phi$ en fonction de B/h .

Ces abaques, où les valeurs des coefficients μ_c , N'_c , $N'_\gamma \cotg \phi$ peuvent être lues ou interpolées, sont d'un emploi commode pour calculer dans la pratique la capacité portante, en appliquant les formules suivantes:

Pour un sol de Coulomb ($\phi \neq 0$)

$$(24) \quad p_{ult} = q + \mu_c (C_0 + q \operatorname{tg} \phi) \left(\frac{1}{2} \frac{\gamma + g \cotg \phi}{q + C_0 \cotg \phi} BN'_y \cotg \phi + N'_c \right).$$

Pour un sol purement cohérent ($\phi = 0$)

$$(25) \quad p_{ult} = q + \mu_c \cdot C_0 \left(N'_c + \frac{1}{4} \frac{gB}{C_0} \right).$$

Nous donnons, dans l'annexe 2, les abaques correspondant à $\phi = 0^\circ, 4^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 36^\circ, 40^\circ$.

5. Exemples d'application

5.1. Premier exemple

Sol de Tresca	: $\phi = 0^\circ$
Largeur de la fondation	: $B = 40$ m
Surcharge latérale	: $q = 0$
Epaisseur de la couche	: $h = 10$ m
Cohésion en surface	: $C_0 = 10^3$ Pa
Gradient vertical descendant de cohésion	: $g = 2,5 \cdot 10^3$ N/m ³ .

En se reportant aux abaques donnés dans l'annexe 2, on lit:

$$\mu_c = \frac{p_{ult}}{(p_{ult})_{superp}} \simeq 1,48.$$

Une telle sous-estimation est évidemment non négligeable.

5.2. Deuxième exemple

Sol de Coulomb	: $\phi = 30^\circ$
Largeur de la fondation	: $B = 5$ m
Poids volumique	: $\gamma = 1,8 \cdot 10^4$ N/m ³
Surcharge latérale (profondeur de la semelle = 1 m)	: $q = 1,8 \cdot 10^4$ Pa
Epaisseur de la couche	: $h = \infty$
Cohésion en surface	: $C_0 = 1,6 \cdot 10^4$ Pa
Gradient vertical descendant de cohésion (milieu homogène)	: $g = 0$.

En se reportant aux abaques donnés dans l'annexe 2, on lit:

$$\mu_c = \frac{P_{ult} - q}{(P_{ult})_{superp} - q} \simeq 1,21$$

et

$$\frac{P_{ult}}{(P_{ult})_{superp}} \simeq 1,21$$

Une telle sous-estimation est encore non négligeable.

Ces deux cas sont typiques de ceux rencontrés dans la pratique courante.

6. Conclusion

Par cette étude, après avoir montré comment la méthode de superposition peut être appliquée dans le cas d'une fondation superficielle reposant sur une couche de sol d'épaisseur limitée et dont la cohésion croît linéairement avec la profondeur, on a mis en évidence que la sous-estimation de la capacité portante introduite par l'utilisation de la méthode de superposition peut être importante, en particulier pour les petites valeurs de B/h et de ϕ .

De plus, au moyen des abaques (iso- μ_c) on peut facilement calculer la capacité portante dans le cas d'une couche de sol homogène ou non-homogène, d'épaisseur limitée ou illimitée.

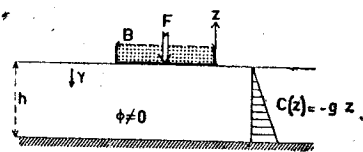
Annexes: $N'_y(B/h, \phi) \simeq \phi/2$ quand $\phi \rightarrow 0$.

On part de la solution du problème (P) pour $\phi \neq 0$, $q=0$ et $C_0=0$ (Figure 14).

Par application directe du théorème «d'équivalence $g-\gamma$ », on obtient:

$$P_{ult} = \frac{1}{2} (\gamma + g \cotg \phi) B N'_y \left(\frac{B}{h}, \phi \right).$$

FIG. 14. Fondation sur couche de sol $\phi \neq 0$, d'épaisseur h de cohésion nulle en surface et croissant linéairement avec la profondeur



En faisant tendre ϕ vers zéro et en admettant «comme physique» la continuité de P_{ult} en ϕ , on tend vers la solution du cas $\phi=0$, $q=0$, $C_0=0$. Soit:

$$P_{ult} = \frac{1}{4} g B,$$

pour un interface (sol de fondation-assise rigide) rugueux [6].

On déduit alors que:

$$\cotg \phi N'_y \left(\frac{B}{h}, \phi \right) \rightarrow \frac{1}{2}$$

quand $\phi \rightarrow 0$.

$\Phi = 0^\circ$

SEMELLE RUGUEUSE — INTERFACE RUGUEUX

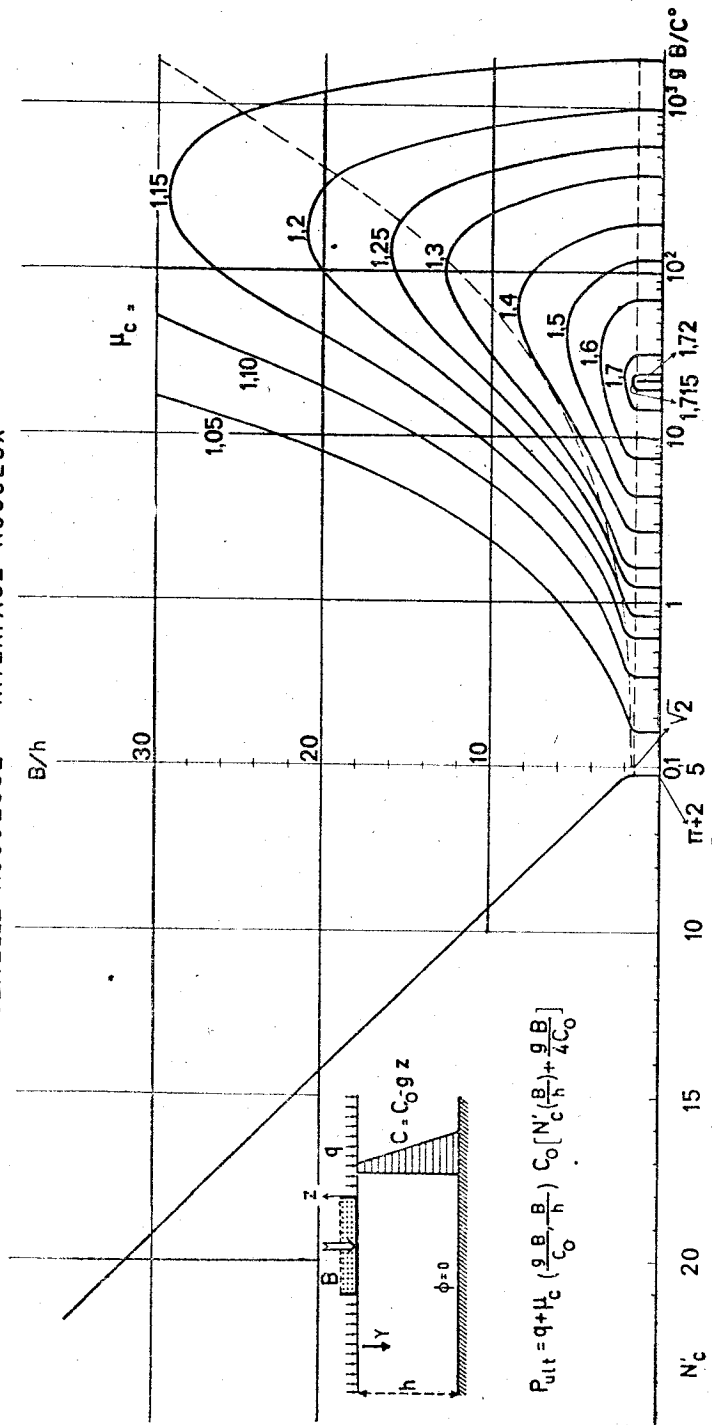


FIG. 15a

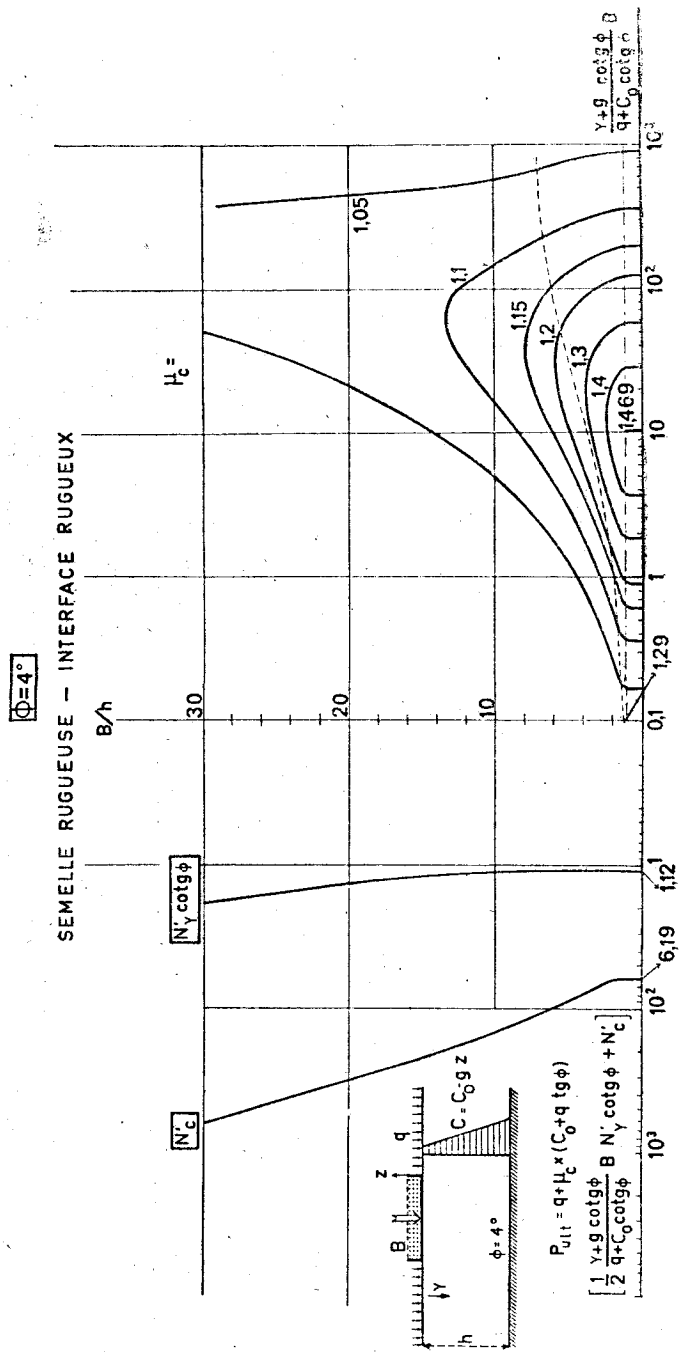


Fig. 15b

$\phi = 20^\circ$

SEMELLE RUGUEUSE — INTERFACE RUGUEUX

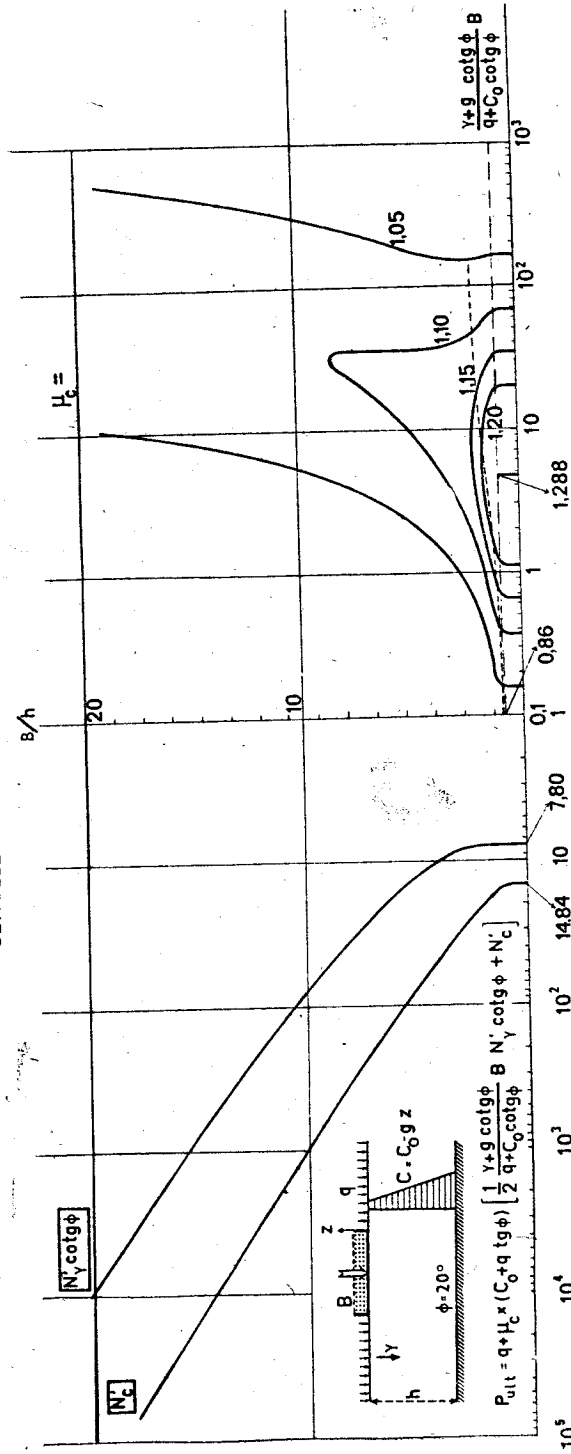


FIG. 15 d

$\Phi = 30^\circ$

SEMELLE RUGUEUSE - INTERFACE RUGUEUX

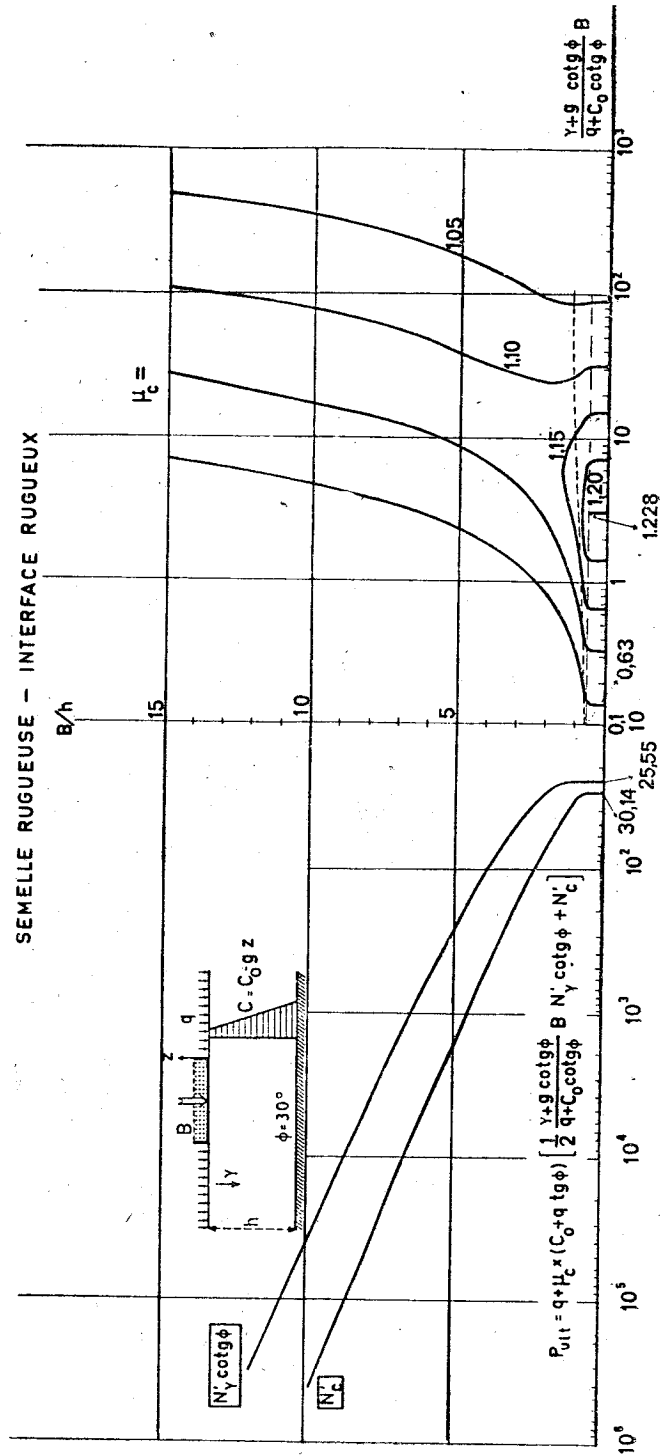


Fig. 15 e

$\phi = 36^\circ$

SEMELLE RUGUEUSE — INTERFACE RUGUEUX

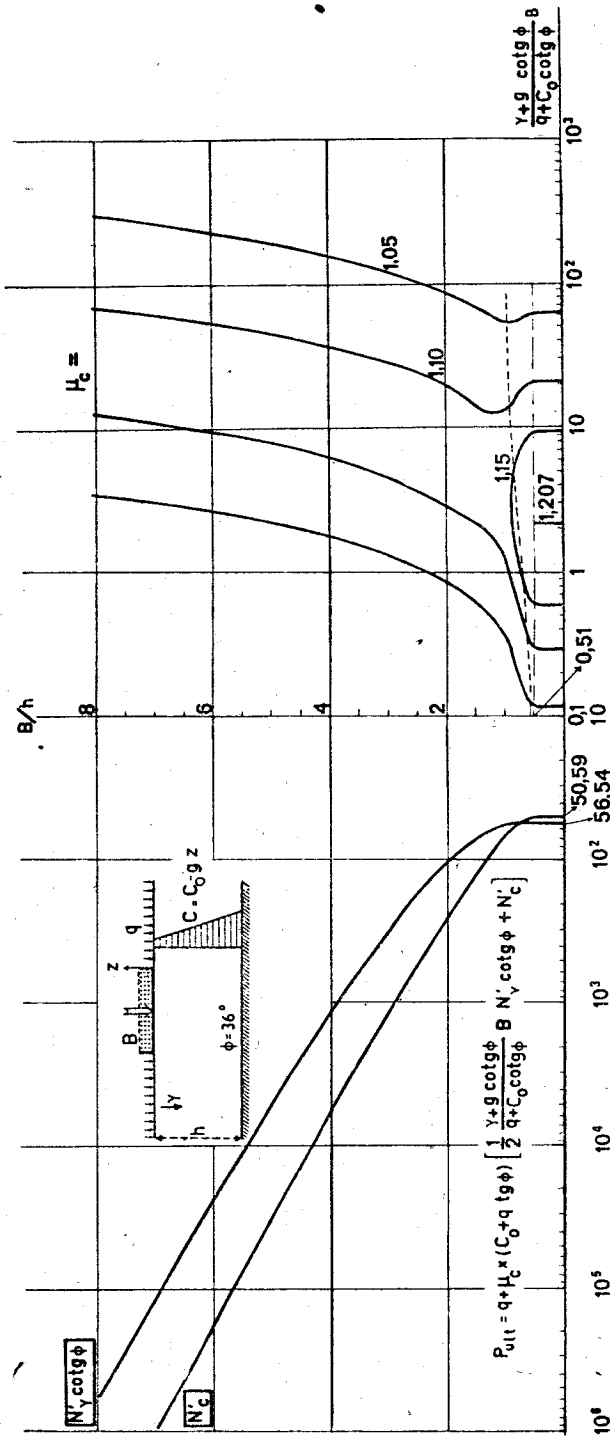


FIG. 15 f

$\phi = 40^\circ$

SEMELLE RUGUEUSE — INTERFACE RUGUEUX

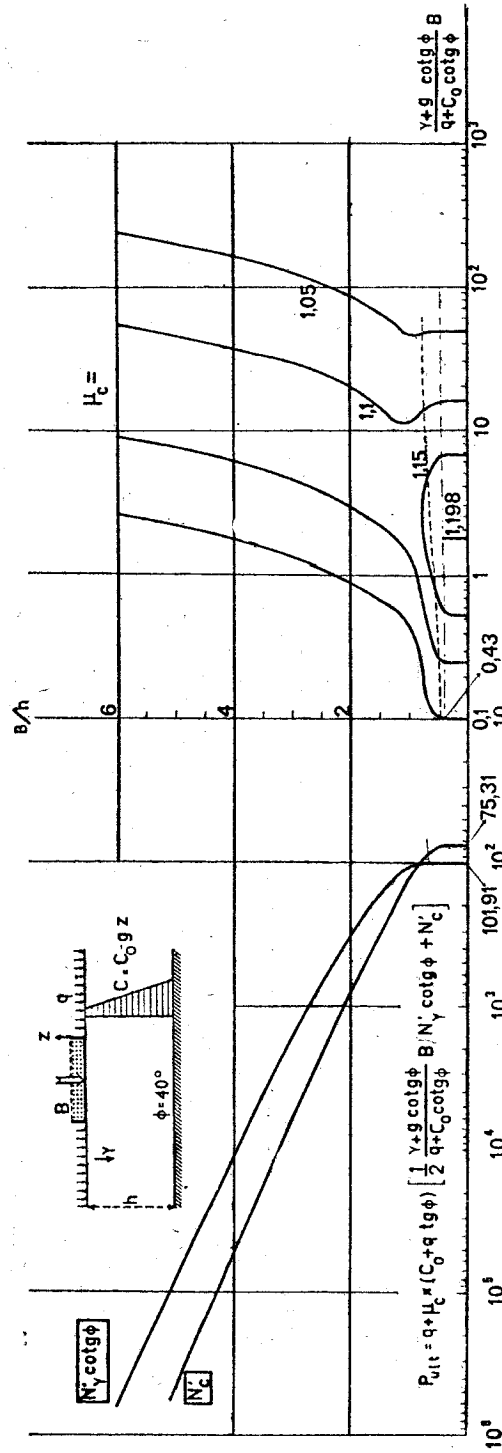


FIG. 15 8

Références

1. J. MANDEL et J. SALENÇON, *Force portante d'un sol sur une assise rigide (étude théorique)*, Géotechnique, 1, 22, (1972), pp. 79-93.
2. J. SALENÇON, P. FLORENTIN et Y. GABRIEL, *Capacité portante globale d'une fondation sur un sol, non-homogène*, Géotechnique, 2, 26, (1976), pp. 351-370.
3. J. SALENÇON, *Calcul à la rupture et plasticité*, Cours D.E.A., E.N.P.C., Paris, (1977).
4. E. TERZAGHI, *Theoretical soil mechanics*, John Wiley and Sons, (1943, 1965).
5. A. CAQUOT, J. KERISEL, *Traité de mécanique des sols*. 4ème édition, Gauthier-Villars, Paris, (1966).
6. M. MATAR et J. SALENÇON, *Capacité portante d'une semelle filante sur sol purement cohérent d'épaisseur limitée et de cohésion variable avec la profondeur*, Annales de l'I.T.B.T.P., n° 352, (1977), pp. 93-108, Revue Française de Géotechnique, 1, (1977), pp. 37-52.
7. A. I. KUZNETZOV, *Déformation plane des corps plastiques non homogènes (en russe)*, Vestnik Leningrad Univ. Ser. Mat. Mech Astr., 3, (1958), pp. 112-131.
8. W. OLSZAK, J. RYCHLEWSKI et W. URBANOWSKI, *Plasticity under non-homogeneous conditions*, Advances in Applied Mechanics. Ac. Press. N. Y., (1962), pp. 132-214.
9. G. FAVRETTI, *Impronta di un punzone rigido su un materiale non omogeneo*, Ingegn, Mecc., 9, 14, (1965), pp. 37-50.
10. G. FAVRETTI, *Dipendenza fra durezza e profondità di cementazione*, Applicazione della teoria della plasticità dello studio del problema. Ingegn. Mecc., 6, 15, (1965).
11. G. FAVRETTI, *Indentation of a rigid punch on a plastically non homogeneous material*, Meccanica, 3/4, 1, (1966), pp. 83-94.
12. J. SALENÇON, *Théorie de la plasticité pour les applications à la mécanique des sols*, Eyrolles, Paris, (1974).
13. J. W. F. BISHOP, *On the complete solution to problems of deformation of a plastic rigid material*, Journ. Mech. Phys. Solids, 1, 2, (1953), pp. 43-53.
14. G. MEYERHOF, *The ultimate bearing capacity of foundation*, Géotechnique 4, 2, (1951), pp. 301-332.
15. H. LUNDGREN et K. MORTENSEN, *Determination by the theory of plasticity of the bearing capacity of continuous footings on sand*, Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech., Zurich, 1, (1953), pp. 409-412.
16. G. G. MEYERHOF et T. K. CHAPLIN *The compression and bearing capacity of cohesive layers*. Br. Jnl. Appl. Phys., 20, 4, (1953).
17. R. T. SHIELD, *Plastic potential and Prandtl bearing capacity solution* - Jnl Appl. Mech. Trans. A. S. M. E., 21, (1954), pp. 193-194.
18. A. I. KUZNETZOV, *The problem of torsion and plane strain of non-homogeneous body*, Arch. Mech. Stos., 4, 10, (1958), pp. 447-462.
19. W. JOHNSON et H. KUDO, *The compression of a rigid perfectly plastic material between rough parallel dies of unequal width*, Int. Jnl. Mech. Sc., 4, 1, (1960), p. 336.
20. J. SALENÇON, *La théorie des charges limites dans la résolution des problèmes de plasticité en déformation plane*, Thèse Dr. es Sc. Univ., Paris, (1969).
21. E. H. DAVIS, J. R. BOOKER, *The bearing capacity of strip footings from the standpoint of plasticity theory*, Univ. Sydney, Civ. Eng. Lab., Research. Rept. n° 170, (1971).
22. D. BERTHET, J. C. HAYOT et J. SALENÇON, *Poinçonnement d'un milieu semi-infini en matériau plastique de Tresca non homogène*, Archives of Mechanics, 1, 24, (1972), pp. 127-138.
23. E. H. DAVIS, J. R. BOOKER, *The effect of increasing strength with depth on the bearing capacity of clays*, Géotechnique, 4, 23, (1973), pp. 551-563.
24. J. SALENÇON, M. BARBIER, M. BEAUBAT, *Force portante d'une fondation sur sol non homogène*, C. R. 8e Congr. Int. Mec. Sols, Moscou, 1, 3, (1973), pp. 219-224.
25. J. SALENÇON, *Bearing capacity of a footing on a $\phi=0$ soil with linearly varying shear strength*, Géotechnique, 3, 24, (1974), pp. 443-446.