

M^u = KERBOUCHE A.E.K

3 G.C L.M.D

Les Fondations

①

① Définition:

Les fondations d'un ouvrage sont les éléments enterrés de la structure qui assurent la transmission des efforts de la superstructure au sol. Ce sont les bases de l'ouvrage qui mettent en contact le bâtiment avec le terrain d'assise (bon sol), elles doivent reporter sur le bon sol les charges et assurer la stabilité et la sécurité de la construction sans tassement, ni glissement, ni affaiblissement préjudiciable.

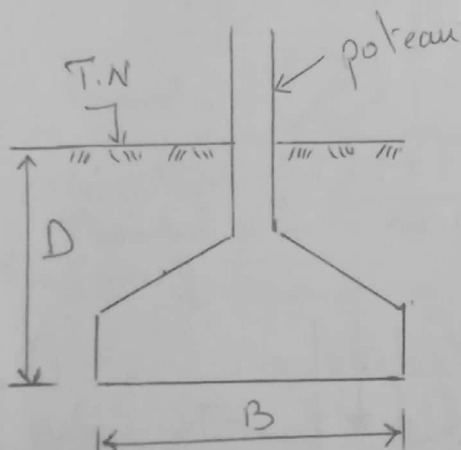
Remarque: Les fondations représentent la partie la plus importante de la construction, elles doivent être exécutées avec un plus grand soin afin de ne pas exposer l'ouvrage à de graves désordres dont la réparation est souvent difficile et très coûteuse.

② Types de fondations:

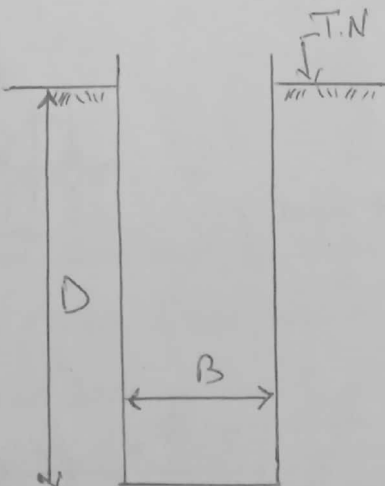
Il existe 2 grands modes de transmission des charges et surcharges des constructions aux couches de sol sous-jacentes: par fondations superficielles et par fondations profondes.

- On appelle "fondation superficielle" toute fondation dont l'encastrement dans le sol n'excède pas 4 à 5 fois la largeur B de la fondation (le plus petit côté de la fondation).

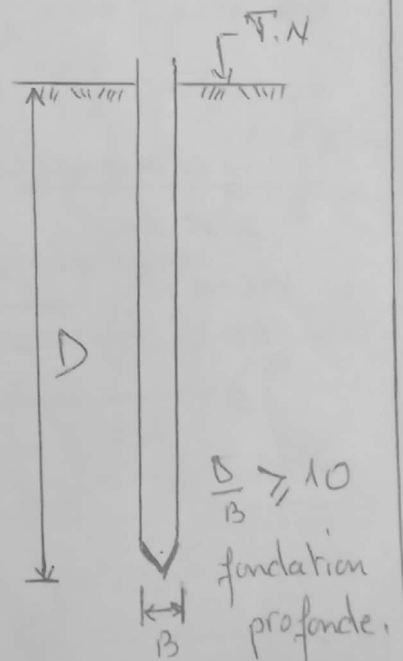
- si $\frac{D}{B} < 4 \text{ à } 5 \rightarrow$ fondation superficielle.
- si $4 \text{ à } 5 \leq \frac{D}{B} < 10 \rightarrow$ fondation semi-profonde.
- si $\frac{D}{B} \geq 10 \rightarrow$ fondation profonde.



$\frac{D}{B} < 4$: fondation superficielle



$4 \leq \frac{D}{B} < 10$: fondation semi-profonde.



③ Fondations superficielles: ces fondations sont proches du sol naturel ② et se trouvent placées directement sous la structure porteuse (mur ou poteaux).

On distingue plusieurs types:

a) Fondations par rigole: ce sont des fondations filantes ou continues dans un bon sol d'assise sous de faibles charges

* la hauteur H doit être:

- au niveau du bon sol.
- soit à l'abri du gel.

N.B: cette fondation massive n'a pas besoin d'être armée et peut donc être exécutée en gros béton dosé à 250 kg/m^3 .

a : épaisseur du mur b : débord $\geq 5 \text{ cm}$ B : largeur de la semelle.
 H : hauteur de la semelle P : charge amenée par une tranchée de $1,00 \text{ m}$ de mur

Prédimensionnement: $b \geq 5 \text{ cm}$. $15 < H \leq 30$ à 35 cm .

$$B(\text{cm}) \geq a(\text{cm}) + 2 \times 5 \text{ cm}.$$

$$B = \frac{P}{100 \times \tau_{\text{sol}}} \quad \text{avec } \tau_{\text{sol}}: \text{contrainte admissible du sol ou taux du travail du sol (kg/cm}^2\text{)}$$

P est en kg/ml ou en kg/100 cm .

b) Fondations filantes ou continues (semelles filantes ou continues):

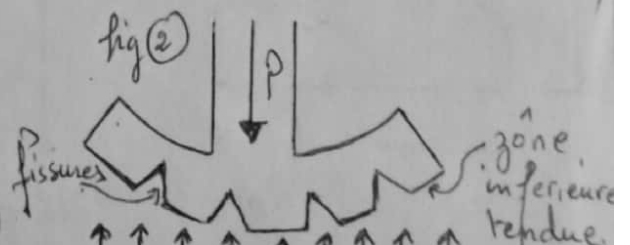
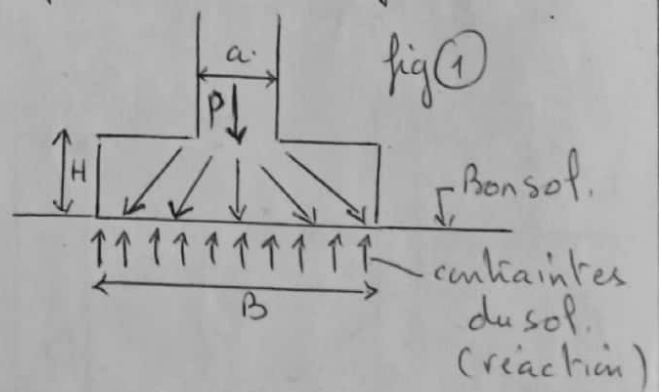
Lorsque les charges sur le mur sont plus importantes, les semelles deviennent plus larges et exécutées en béton armé B.A (Béton + armatures). Ce type de semelle est utilisé aussi pour des poteaux voisins; Ces fondations reçoivent des charges P (mur) et les répartissent au sol d'assise qui à son tour réagit sous forme de contraintes uniformes si les charges sont axiales ou centrées (fig ①)

Prédimensionnement:

$$H \geq 30 \text{ cm}.$$

$$H(\text{cm}) \geq \frac{(B-a)}{4} \text{ cm} + 5 \text{ cm}$$

$$B \geq \frac{P}{100 \cdot \tau_{\text{sol}}}$$



Remarque: par la déformation de la semelle sous la charge, la zone inférieure tendue risque de se fissurer $\rightarrow$ elle doit être armée (fig ②)

2) Fondations isolées (Semelles isolées): Ce type de fondation est utilisé sous les piliers ou des poteaux soumis à des charges ~~abais~~ concentrées et peuvent importantes. Elles sont réalisées en béton armé dosé à 300 ou 350 kg/m³ et de formes différentes, on distingue:

- Semelles carrées ($B = A$)
 - Semelles rectangulaires ($B < A$)
 - Semelles circulaires ($\phi = B$)
- B : largeur de la semelle.
 A : longueur de la semelle.
 ϕ : diamètre de la semelle.

Prédimensionnement:

dimensions du poteau: $a \times b$

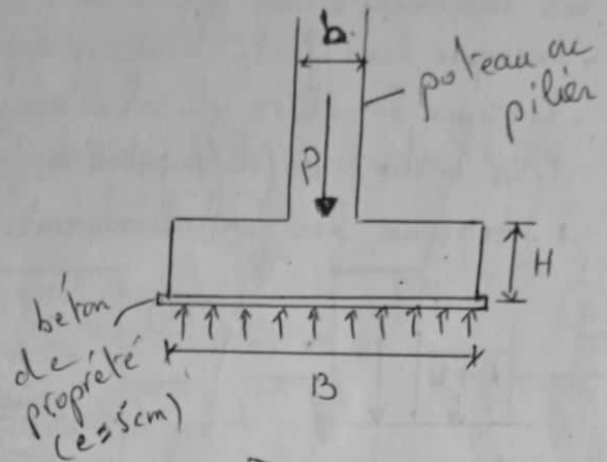
dimensions de la semelle: $A \times B$

$$H \geq \frac{(B-b)}{4} \text{ cm} + 5 \text{ cm}$$

$$H \geq \frac{(A-a)}{4} \text{ cm} + 5 \text{ cm}$$

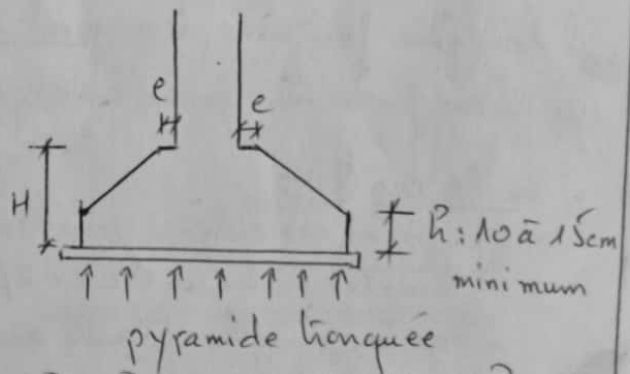
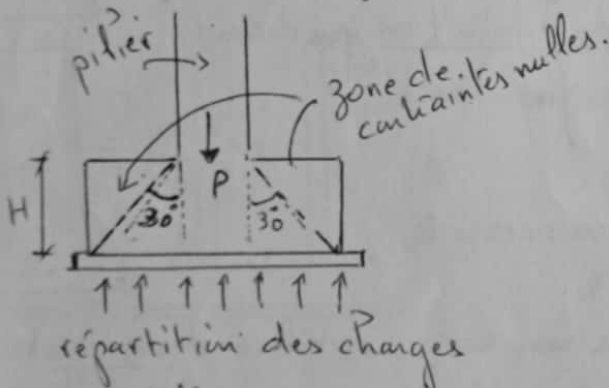
$$S = \text{surface de la semelle} \quad S' = A \times B$$

$$S \geq \frac{P}{\gamma_{sol}} \quad \text{avec } P: \text{poids des charges + surcharges (Kg)}$$



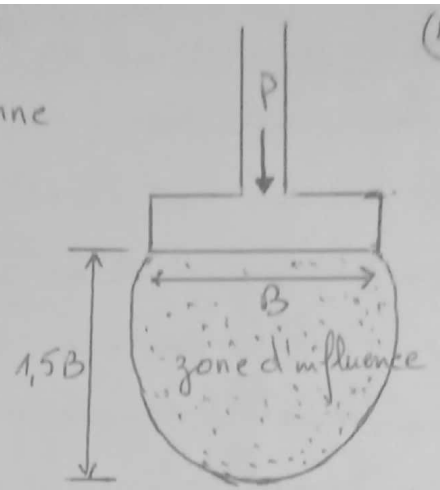
Remarques importantes:

- ① Les charges transmises à la semelle se diffusent ou se répartissent suivant un angle approximatif de 30° sur la verticale (tangente 2/3) c'est pourquoi on utilise une semelle à pyramide tronquée (économie du béton).



- ② Pour une semelle excentrée sous mur, on cherche à recentrer la charge en réalisant un mur épais (mur mince déconseillé)
- ③ Pour une semelle excentrée sous poteau (pilier), l'équilibre est rétabli en réalisant une longrine de redressement.
- ③ Les semelles centrées sous poteau sont reliées entre elles par des longrines.

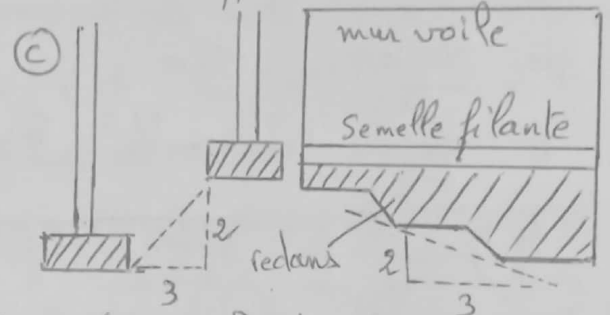
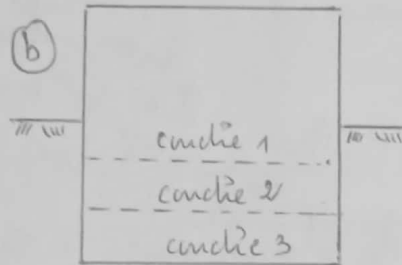
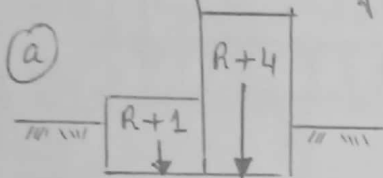
④ La zone d'influence de la fondation dans le sol est prise à 1,5 fois la largeur de la semelle. On donne le nom "Bulbe de pression" à cette zone.



⑤ Il y a une Homothétie entre les dimensions de la semelle isolée et les dimensions du poteau qu'elle supporte. $\frac{A}{a} = \frac{B}{b}$

⑥ Les Tassements des fondations sont à craindre:

- lorsque les efforts transmis aux fondations varient brutalement d'une semelle à l'autre
- lorsque la nature du sol d'assise n'est pas homogène sur la surface de la construction (différentes couches à une profondeur donnée)
- lorsque les fondations ont des niveaux d'assise différents.



- Pour le cas (a): le bâtiment doit être fractionné: les fondations doivent être fractionnées par un joint de rupture de dimension 20 mm

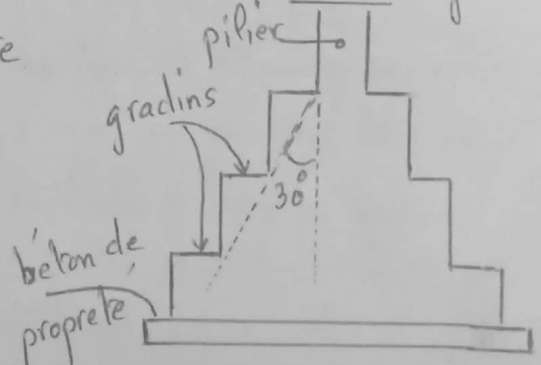
- Pour le cas (b): le sol d'assise doit être uniforme au bâtiment et si sa longueur dépasse 30 m généralement il doit être fractionné par un joint de dilatation qui descend jusqu'aux fondations (la semelle n'est pas fractionnée)

- Pour le cas (c):

- la dénivellée entre 2 semelles voisines est limitée à une pente de 2/3.

- Pour une semelle filante sous mur voile, on utilise des redans en gros béton

⑦ Si la hauteur H de la semelle isolée est importante on utilise une semelle à gradins ou semelle Type crussinot.



4) Fondations sur radier :

(5)
Lorsque le terrain de fondation est médiocre (très faible), les semelles deviennent très importantes et dans certains cas arrivent à se chevaucher. On préfère alors réaliser une fondation unique sous forme de dalle pleine de forme carrée ou rectangulaire qui embrasse toute la surface de la construction que l'on appelle "RADIER".

- Le choix du radier se justifie donc pour :

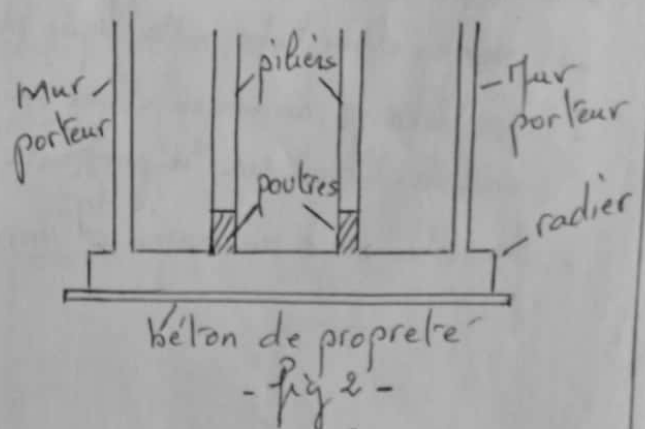
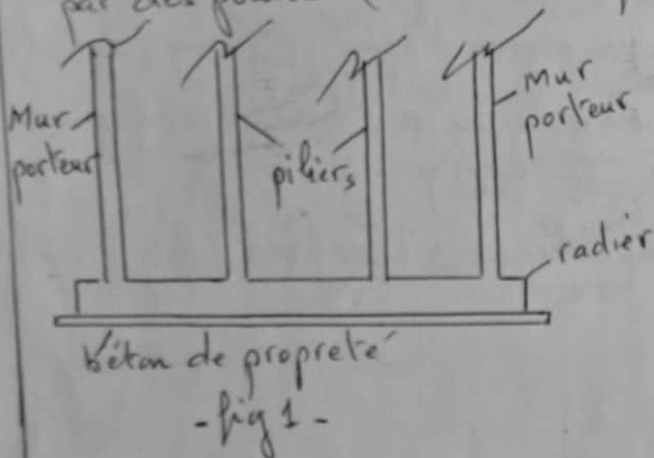
- un terrain médiocre (résistance du sol très faible)
- éviter l'appui de la construction sur le bon sol en profondeur.
- un ouvrage transmettant des charges importantes conduisant à des semelles dont la surface est voisine de la moitié de la construction.

- On distingue 2 types de radier :

- 1- radier général : c'est le radier qui reçoit l'ensemble du poids de la construction (réalisé sur tout le sol de la construction)
- 2- radier partiel : c'est le radier qui reçoit une partie du poids de la construction (réalisé sur une partie du sol de la construction).

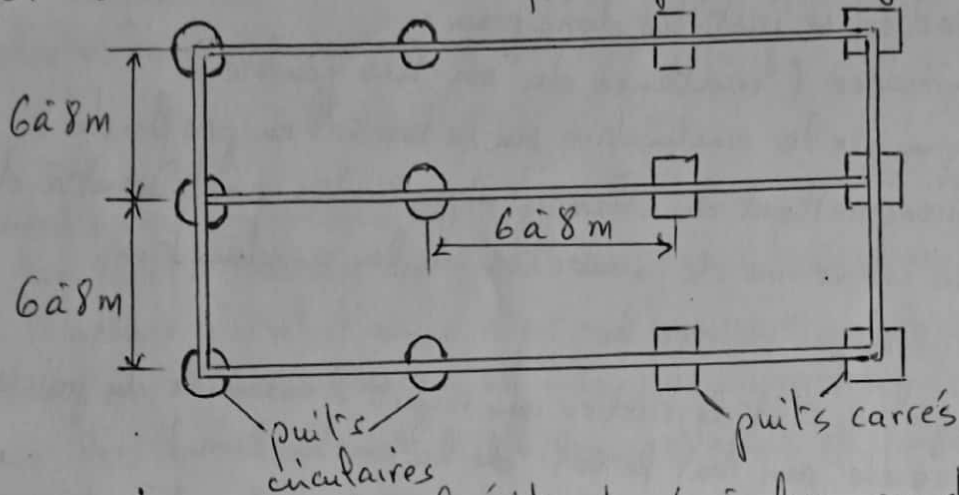
Remarque : Pour le type de radier général, on distingue 2 types :

- 1- radier général plat : c'est une dalle d'épaisseur constante reposant sur le sol par l'intermédiaire du béton de propreté et elle est réalisée sous une structure porteuse par mur continu (fig 1).
- 2- radier général par points d'appui isolés : c'est une dalle de moindre épaisseur réalisée pour une structure de poteaux ou piliers reliés entre eux par des poutres (au droit des files de poteaux : fig 2).



(4) Fondations profondes : Lorsque la qualité du terrain à faible profondeur ne permet pas de fonder la construction sans risque de désordres, il faut chercher à reporter les charges sur les couches inférieures plus résistantes par l'intermédiaire de points d'appui séparés : puits ou pieux réalisés par des entreprises spécialisées.

a) Fondations sur puits: Ce sont des fondations spéciales employées lorsque le sol résistant se trouve entre 3 m et 5 m de profondeur, de forme carrée avec un côté de 1,30 m au minimum ou cylindrique (circulaire) avec un diamètre de 1,50 m au minimum. Elles sont espacées généralement de 6 m à 8 m et comme elles résistent mal aux efforts horizontaux, elles doivent être liaisonnées par des poutres, longrines ou voiles en béton armé.



b) Fondations sur pieux: si le sol résistant est à plus grande profondeur (entre 5 et 30 m) les puits sont remplacés par des pieux de forme circulaire de diamètre variant de 0,30 m à 0,40 m, prefabriqués ou coulés sur place. On distingue principalement deux techniques de mise en œuvre:

- les pieux battus: ce sont des pieux prefabriqués en béton armé et enfoncés à force dans le sol (battage) jusqu'au refus nécessitant l'emploi d'un engin appelé "sonnette" et le portant le "Mouton" avec un casque de battage.
- les pieux montés dans le sol: ce sont des pieux réalisés sur place par remplissage de béton dans un forage exécuté soit:
 - au moyen d'un tube métallique descendu au niveau d'appui par battage (fig II.54)
 - au moyen d'un tube métallique descendu au niveau d'appui par forage (fig II.55)
 - Sans tubage, au moyen d'une simple tarière ou grâce aux boues tixotropiques (cas de chantiers importants) (fig II.56)
 - Sans tubage au moyen d'un cône métallique vibro-foncé (fig II.57)

① Généralités:

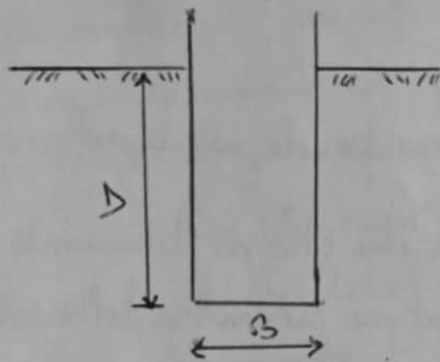
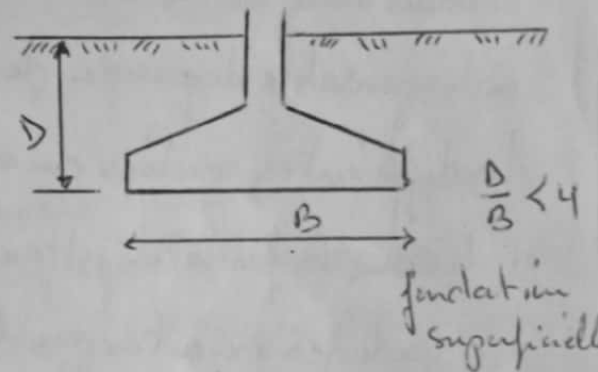
- Il existe 2 grands modes de transmission des charges des constructions aux couches de sol sous-jacentes : par fondations superficielles et par fondations profondes.

- On appelle "fondation superficielle" toute fondation dont l'encastrément D dans le sol n'excède pas 4 ou 5 fois la largeur B (ou le plus petit côté)

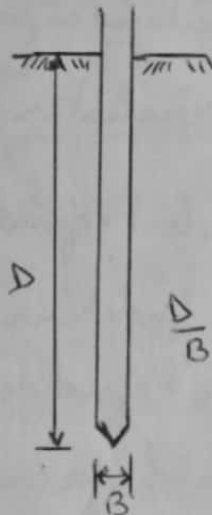
• si $\frac{D}{B} < 4 \rightarrow$ fondations superficielles.

• si $4 \leq \frac{D}{B} < 10 \rightarrow$ fondations semi-profondes.

• si $\frac{D}{B} \geq 10 \rightarrow$ fondations profondes.



$\frac{D}{B} < 4 \rightarrow$ fondation superficielle



$\frac{D}{B} > 10 \rightarrow$ fondation profonde.

② Types de fondations superficielles : on distingue :

- les Semelles isolées : dont les dimensions B et L sont toutes deux au plus de quelques mètres (utilisées sous piliers).

- Semelles isolées :
 - $\nearrow$ Semelles carrées ($B = L$)
 - $\rightarrow$ Semelles rectangulaires ($B < L$)
 - $\searrow$ Semelles circulaires ($\phi = B$)

- Les Semelles filantes (continues) : généralement de largeur B modeste (au plus quelques mètres) et de grande longueur L ($\frac{L}{B} > 10$), utilisées généralement sous murs ou poutres.

- Les radiers: de dimensions B et L importantes. Ce sont des dalles carrées (2) ou rectangulaires de grandes surfaces, exécutées en béton armé. On les utilise:
 - si la résistance du sol est faible.
 - si l'ouvrage transmet des charges importantes conduisant à des semelles dont la surface est voisine de la moitié de celle de la construction.

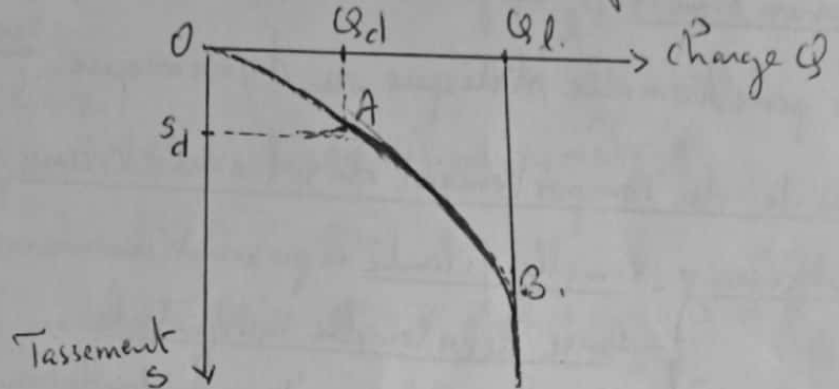
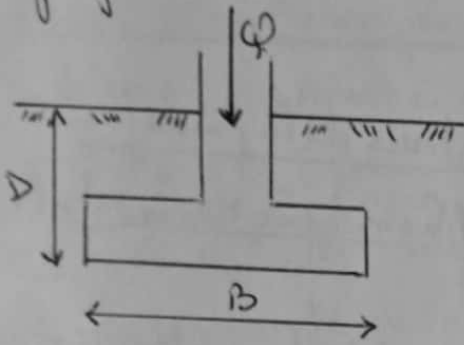
• Remarques importantes:

- ① Parfois, c'est l'ouvrage lui-même qui impose le type de fondation.
- ② Pour projeter correctement une fondation, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance de l'état des lieux au voisinage de la construction mais il est tout aussi indispensable de posséder des renseignements précis sur les caractéristiques géotechniques des différentes couches qui constituent le terrain de fondation et ceci à une profondeur suffisante et dès que la fondation atteint une certaine importance, il est essentiel de procéder à des sondages exécutés par des spécialistes.
- ③ un projet de fondation correct doit répondre à 3 sortes de préoccupations:
 - la forme et l'emplacement des fondations doivent être choisis de manière à assurer la sécurité de l'ouvrage à l'égard des modifications prévisibles de l'état des lieux
 - la fondation doit exercer sur le sol des contraintes compatibles avec la résistance à la rupture du sol (capacité portante)
 - 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 sous le sol de fondation.

③ Charge portante et Tassement: Dans un 1^{er} temps, l'ingénieur géotechnicien cherchera à fonder son ouvrage superficiellement pour des raisons de coût (prix) évidentes. Il devra alors se préoccuper en tout 1^{er} lieu de la charge portante de sa fondation c.à.d. vérifier que les couches de sol superficielles peuvent supporter la charge transmise. Si le résultat des calculs

de considérer systématiquement lors du calcul des fondations superficielles.

- Essai: Appliquons une charge monotone croissante Q à une fondation posée à une profondeur D donnée et relevons les tassements s obtenus en fonction de Q .



• Constatation:

- Au début du chargement, le comportement est sensiblement linéaire c.à.d que le tassement croît proportionnellement à la charge appliquée. (lien OA).
- Puis le tassement n'est plus proportionnel à la charge Q (lien AB): on dit qu'il y a création et propagation de zones de sol plastifiées sous la fondation.
- A partir d'une certaine charge Q_l (pt B) il y a poinçonnement du sol (tassement non contrôlé) et le sol n'est plus capable de supporter une charge supérieure: on dit que l'on a atteint l'écoulement plastique libre.
- la charge Q_l : est la charge portante de la fondation appelée aussi: charge limite, charge de rupture ou encore charge ultime.

- Remarque: le dimensionnement correct de la fondation d'un ouvrage consiste à s'assurer que l'on reste en deca de Q_l avec une certaine marge quantifiée par un coeff de sécurité et que les tassements correspondants sont admissibles $\rightarrow$ le pt A de coordonnées $\left\{ \begin{array}{l} Q_d: \text{charge admissible (charge portante de calcul)} \\ s_d: \text{tassement admissible.} \end{array} \right.$

④ Théorie de la Capacité portante:

- Définition: on appelle capacité portante d'un sol q_d , la pression maximale qu'il peut supporter avant sa rupture.

Remarque: la capacité portante q_d est aussi appelée contrainte de rupture.

(b) Méthode de détermination de la capacité portante q_d :

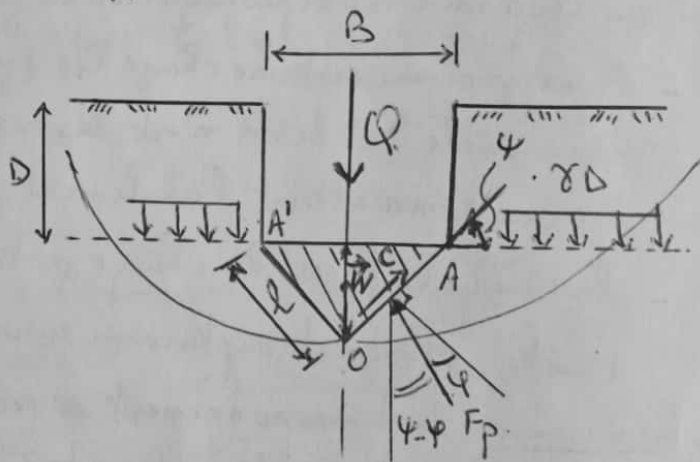
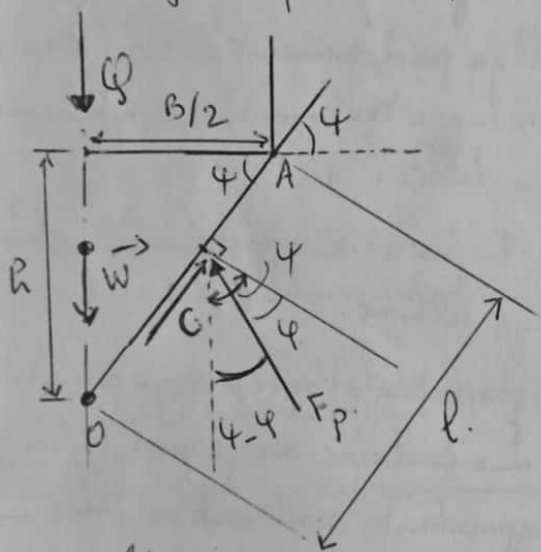
- 2 types de méthodes de calcul de q_d sont développées:
- Méthodes à partir des résultats des essais de laboratoire c.à.d à partir de la cohésion c et de l'angle de frottement φ (dites méthodes « c- φ »)
- Méthodes à partir des résultats des essais in situ c.à.d à partir de la pression limite p_L du pressiométrie Ménard ou à partir de la résistance de pointe q_c du pénétrométrie statique ou dynamique.

(c) Étude du comportement du sol sous et aux alentours de la fondation:

Hypothèses:

- Semelle filante reposant sur un massif homogène horizontal.
- Base de la semelle horizontale.
- la charge qui agit sur la fondation est verticale, constante et axiale.

- La semelle filante est de largeur B encastée dans le massif à une profondeur D .
- On exerce sur la fondation une charge verticale croissante jusqu'à une certaine valeur Q pour laquelle l'équilibre plastique apparaît dans le sol de fondation.



$$\cos \varphi = \frac{B/2}{l} \Rightarrow l = \frac{B}{2 \cos \varphi}$$

$$\tan \varphi = \frac{R}{B/2} \Rightarrow R = \frac{B}{2} \cdot \tan \varphi$$

W : poids du coin AOA' (triangle AOA')

$$W = \frac{1}{2} \cdot \underbrace{AA'}_B \times R \cdot \gamma = \frac{1}{2} \cdot B \cdot R \cdot \gamma = \frac{1}{2} \cdot B \cdot \frac{B}{2} \cdot \tan \varphi \cdot \gamma = \gamma \cdot \frac{B^2}{4} \cdot \tan \varphi$$

• Constatation:

- Après un certain temps, il y a formation du coin triangulaire AOA' solidaire à la fondation (ne dépend plus du sol) et en état d'équilibre.

- les pavois OA et OA' agissent comme des écrans de Butée.
- l'inclinaison $\delta = \varphi$ (angle de frot interne du sol) puisqu'il s'agit du frot du terrain sur lui même.
- le sol situé au dessus de AA' agit comme une surcharge verticale d'intensité $\gamma \Delta$.
- Il y a force de butée sur l'écran OA et OA' qui se décompose en une force de cohésion C sur OA et une force de frottement F_p d'obliquité $\delta = \varphi$ sur OA .

À l'état d'équilibre plastique:

- le coin AOA' est en équilibre.
- $\sum F_H = 0$ (forces horizontales sur le coin AOA') par symétrie.
- $C = c \cdot l$ (c : cohésion du sol)
- la contrainte de butée sur OA et OA' : $\sigma_p = K_{p\delta} \cdot \gamma \cdot l + K_{p\frac{\gamma \Delta}{2}} \cdot \frac{\gamma \Delta}{2} + K_{pc} \cdot c$
- la force $F_p = \frac{1}{2} K_{p\delta} \cdot \gamma \cdot l^2 + K_{p\frac{\gamma \Delta}{2}} \cdot \gamma \Delta l + K_{pc} \cdot cl$
- $\sum F_v = 0 \Rightarrow Q + W = 2 F_p \cos(4 - \varphi) + 2 C \sin \varphi$.

$$Q = -W + 2 F_p \cos(4 - \varphi) + 2 C \sin \varphi$$

$$Q = -\frac{\gamma B^2}{4} \cdot \lg 4 + 2 \cos(4 - \varphi) \left[\frac{1}{2} K_{p\delta} \cdot \gamma l^2 + K_{p\frac{\gamma \Delta}{2}} \cdot \gamma \Delta l + K_{pc} \cdot cl \right] + 2 cl \sin \varphi$$

la force portante $q_{cl} = \frac{Q}{B}$

Après tout calcul fait, on trouve finalement:

$$q_{cl} = \underbrace{\gamma \frac{B}{2} \left[\frac{K_{p\delta} \cos(4 - \varphi)}{2 \cos^2 4} - \frac{\lg 4}{2} \right]}_{N_\gamma \text{ (poids des terres)}} + \underbrace{\gamma \Delta \left[\frac{K_{p\frac{\gamma \Delta}{2}} \cos(4 - \varphi)}{\cos 4} \right]}_{N_q \text{ (surcharge)}} + \underbrace{c \left[\frac{K_{pc} \cos(4 - \varphi)}{\cos 4} + \lg 4 \right]}_{N_c \text{ (cohésion)}}$$

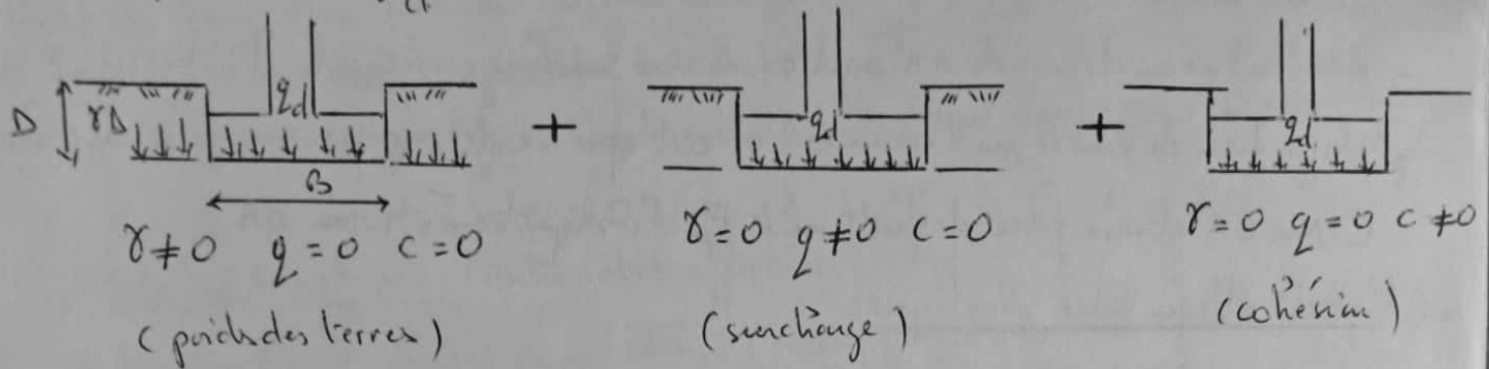
$$q_{cl} = \gamma \cdot \frac{B}{2} \cdot N_\gamma + \gamma \Delta N_q + c N_c$$

Remarques:

1.) les Coefficients N_γ , N_q et N_c sont fonction de 4 et φ .

2.) " " " " " sont minimums pour $\varphi = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$

- 3) les 3 coefficients sont appelés les facteurs de capacité portante. (6)
- 4) l'expression de q_d est obtenue par la méthode de superposition de Terzaghi:



5) Etude des 3 facteurs:

- le facteur N_γ : appelé "terme de surface" ou "terme de pesanteur" → il commande le terme $\gamma \frac{B}{2} N_\gamma$ → c'est la charge limite pour un massif pesant et frottant.

$$\begin{cases} N_\gamma = 1,8 (N_q - 1) \cdot \tan \varphi & (\text{Brinch Hansen}) \\ N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1,4 \varphi) & (\text{Meyerhof}) \\ N_\gamma = 0,01 \cdot e^{\frac{\varphi}{14}} & (\text{Fedar}) \text{ si } 25^\circ < \varphi < 45^\circ \end{cases}$$

- le facteur N_q : appelé "terme de surcharge" ou "terme de profondeur" → il commande le terme $\gamma \Delta N_q$ → c'est la charge limite pour un massif uniquement frottant et chargé latéralement.

$$N_q = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \cdot e^{\pi \cdot \tan \varphi}$$

- le facteur N_c : appelé "terme de cohésion" → il commande le terme $c N_c$ c'est la charge limite pour 1 sol frottant, cohérent et non pesant.

$$N_c = \frac{N_q - 1}{\tan \varphi}$$

6) Tableau donnant les valeurs de N_γ , N_q et N_c d'après Caquot et Kérisel:

angle de frot φ en degrés	N_γ	N_q	N_c
0	0	1	5,1
5	0,2	1,6	6,5
10	1	2,5	8,3
15	2,3	3,9	11
20	5	6,4	14,8
25	10,4	10,7	20,7
30	21,8	18,4	30,1
35	47,9	33,3	46,1
40	113	64,2	75,3
45	299	134,9	133,9

7°) Dans l'application pratique, on doit distinguer selon la mécanique des sols, le calcul à court terme en conditions non drainées (contraintes totales) et le calcul à long terme en conditions drainées (contraintes effectives)

- Calcul à court terme (contraintes totales):

le sol porteur est un sol fin cohérent saturé → il est caractérisé par la cohésion non drainée c_u

$$c = c_u \text{ et } \varphi = 0 \rightarrow N_\gamma = 0 \text{ et } N_q = 1 \rightarrow q = c_u \cdot N_c + \gamma D$$

- Calcul à long terme (contraintes effectives)

le sol porteur (cohérent ou pulvérulent) est caractérisé par les paramètres effectifs.

$$c = c' \text{ et } \varphi = \varphi' \rightarrow q_d = \gamma \cdot \frac{B}{2} \cdot N_\gamma(\varphi') + \gamma D N_q(\varphi') + c' \cdot N_c$$

$$\text{le sol porteur est immergé (saturé): } q_d = \gamma' \cdot \frac{B}{2} \cdot N_\gamma(\varphi') + \gamma' D N_q(\varphi') + c' \cdot N_c$$

8°) la capacité portante limite d'un sol:

- appelée capacité portante admissible ou q_{dl} taux du travail du sol.

$$q_{dl} = \frac{q_d}{3} \text{ avec } 3: \text{coeff de sécurité.}$$

5°) Capacité portante d'une semelle filante pour $\neq$ Cas:

a) Cas où la charge est excentrée:

e : excentricité de la charge Q / axe de la semelle.

• méthode de Meyerhof: consiste à remplacer la largeur B de la semelle par une largeur réduite

ou fictive B' tel que $B' = B - 2e$

• Ce qui revient à avoir une fondation centrée sous la charge:

$$q_d = \gamma \cdot \frac{B'}{2} \cdot N_\gamma + \gamma D N_q + c \cdot N_c \quad \text{et} \quad Q = B' \cdot q_d$$

• si on pose $e' = \frac{e}{B}$ (excentricité relative) on trouve:

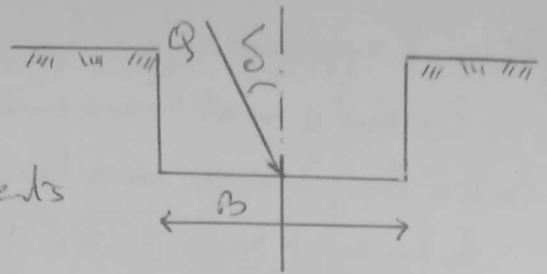
$$q_d = (1 - 2e')^2 \cdot \gamma \cdot \frac{B}{2} \cdot N_\gamma + (1 - 2e') \gamma D N_q + (1 - 2e') c N_c$$

• Remarque: On met en évidence 2 coeff correcteurs:

$$(1 - 2e')^2 \text{ pour } N_\gamma \quad \text{et} \quad (1 - 2e') \text{ pour } N_q \text{ et } N_c$$

⑥ Cas où la charge est inclinée :

δ : angle d'inclinaison de q / verticale.



- On affecte la capacité portante de coefficients correcteurs < 1 pour chaque terme.

$i_{\delta x} \rightarrow$ pour N_x $i_{\delta y} \rightarrow$ pour N_y et $i_{\delta c} \rightarrow$ pour N_c .

$$q_{cd} = \gamma \cdot \frac{B}{2} \cdot N_x \cdot i_{\delta x} + q \cdot N_y \cdot i_{\delta y} + c N_c \cdot i_{\delta c}$$

• Tableau donnant les valeurs de $i_{\delta x}$ en fonction de φ et δ :

$\varphi \backslash \delta$	0	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
10°	1	0,78	0,31	—	—	—	—	—	—
20°	1	0,85	0,58	0,25	0,08	—	—	—	—
30°	1	0,80	0,56	0,35	0,19	0,07	0,02	—	—
40°	1	0,75	0,53	0,35	0,21	0,12	0,06	0,02	0

• Tableau donnant les valeurs de $i_{\delta y}$ en fonction de φ et δ :

$\varphi \backslash \delta$	0	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
10°	1	0,87	0,81	—	—	—	—	—	—
20°	1	0,88	0,73	0,58	0,33	—	—	—	—
30°	1	0,86	0,71	0,56	0,43	0,31	0,15	—	—
40°	1	0,82	0,66	0,52	0,39	0,29	0,20	0,13	0,05

• Tableau donnant les valeurs de $i_{\delta c}$ en fonction de φ et δ :

$\varphi \backslash \delta$	0	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
10°	1	0,78	0,34	—	—	—	—	—	—
20°	1	0,84	0,67	0,49	0,20	—	—	—	—
30°	1	0,84	0,69	0,54	0,40	0,27	0,10	—	—
40°	1	0,81	0,65	0,51	0,38	0,28	0,19	0,12	0,04

③ Cas où la fondation est sur un terrain en pente (Talus)

β : l'angle du Talus

- On affecte les termes de la capacité portante des coefficients < 1 .



$i_{\beta q} \rightarrow$ pour N_q $i_{\beta c} \rightarrow$ pour N_c et $i_{\beta c} \rightarrow$ pour N_c

$$q_d = \gamma \cdot \frac{B}{2} \cdot N_{\gamma} \cdot i_{\beta \gamma} + q \cdot N_q \cdot i_{\beta q} + c \cdot N_c \cdot i_{\beta c}$$

• Tableau donnant les valeurs de $i_{\beta \gamma}$ en fonction de φ et β :

$\varphi \backslash \beta$	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
25°	1	0,79	0,63	0,50	0,39	0,20	0	0	0	0
30°	1	0,78	0,62	0,49	0,37	0,26	0,13	0	0	0
35°	1	0,79	0,62	0,47	0,36	0,25	0,17	0,09	0	0
40°	1	0,77	0,58	0,43	0,32	0,23	0,16	0,10	0,05	0
45°	1	0,76	0,56	0,42	0,30	0,21	0,15	0,10	0,06	0,03

• Tableau donnant les valeurs de $i_{\beta q}$ en fonction de φ et β :

$\varphi \backslash \beta$	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
25°	1	0,86	0,73	0,59	0,45	0,25	0	0	0	0
30°	1	0,85	0,71	0,58	0,46	0,34	0,17	0	0	0
35°	1	0,84	0,69	0,56	0,44	0,34	0,24	0,11	0	0
40°	1	0,82	0,67	0,53	0,42	0,32	0,23	0,16	0,07	0
45°	1	0,80	0,64	0,50	0,39	0,29	0,21	0,15	0,10	0,04

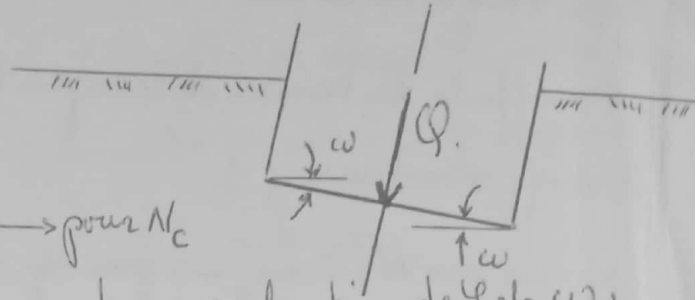
• Tableau donnant les valeurs de $i_{\beta c}$ en fonction de φ et β :

$\varphi \backslash \beta$	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
10°	1	0,95	0,90	0,85	0,80	0,76	0,72	0,67	0,63	0,59
15°	1	0,94	0,88	0,82	0,77	0,72	0,67	0,62	0,58	0,54
20°	1	0,93	0,86	0,79	0,73	0,68	0,62	0,57	0,53	0,48
25°	1	0,91	0,83	0,76	0,69	0,63	0,57	0,52	0,47	0,43
30°	1	0,90	0,80	0,72	0,65	0,58	0,52	0,46	0,41	0,37
35°	1	0,88	0,77	0,68	0,60	0,53	0,46	0,41	0,35	0,31
40°	1	0,86	0,74	0,64	0,55	0,47	0,40	0,35	0,30	0,25

(d) Fondation à Base Oblique (Base de la fondation inclinée) :

- ω : l'inclinaison de la base / à l'horizontale.

- On affecte les termes de la capacité portante de coeff correcteurs < 1 .



$i_{\omega\gamma}$ → pour N_γ $i_{\omega q}$ → pour N_q et $i_{\omega c}$ → pour N_c

• Tableau donnant les valeurs des coeff correcteurs en fonction de φ et ω :

Coef. correcteurs	φ ω	10°	20°	25°	30°	35°	40°
$i_{\omega\gamma}$	0°	→ 1	0,89	0,80	0,76	0,73	0,68
$i_{\omega q}$	10°	→ 0,94	0,88	0,85	0,82	0,78	0,74
$i_{\omega c}$		→ 0,90	0,86	0,83	0,80	0,77	0,74
$i_{\omega\gamma}$	20°	→ 1	0,85	0,69	0,61	0,54	0,45
$i_{\omega q}$		→ 0,88	0,77	0,72	0,67	0,61	0,56
$i_{\omega c}$		→ 0,80	0,73	0,69	0,65	0,60	0,55
$i_{\omega\gamma}$	30°	→ 1	0,79	0,59	0,49	0,40	0,31
$i_{\omega q}$		→ 0,83	0,68	0,61	0,54	0,48	0,41
$i_{\omega c}$		→ 0,71	0,62	0,57	0,52	0,46	0,40
$i_{\omega\gamma}$	40°	→ 0,94	0,72	0,50	0,38	0,30	0,21
$i_{\omega q}$		→ 0,78	0,60	0,52	0,45	0,37	0,31
$i_{\omega c}$		→ 0,63	0,53	0,47	0,41	0,35	0,30

(e) Cas général : fondation à base oblique (ω) établie sur 1 sol en pente (β) et soumise à une charge Q excentrée (e) et inclinée (δ)

- Les effets cumulés de l'inclinaison (δ), de l'excentricité (e), de l'inclinaison (ω) et de la pente du Talus (β) peuvent être calculés par superposition des cas étudiés précédents.

$$q_d = \gamma \cdot \frac{B'}{2} \cdot \frac{N_\gamma \cdot i_{\delta\beta\omega}}{\gamma} + \frac{q \cdot N_q \cdot i_{\delta\beta\omega}}{q} + \frac{c \cdot N_c \cdot i_{\delta\beta\omega}}{c} \quad \text{avec } B' : \text{largeur réduite} \\ (B' = B - 2e)$$

$$q_d = (1 - 2e')^2 \cdot \gamma \cdot \frac{B}{2} \cdot \frac{N_\gamma \cdot i_{\delta\beta\omega}}{\gamma} + (1 - 2e') \cdot \frac{q \cdot N_q \cdot i_{\delta\beta\omega}}{q} + (1 - 2e') \cdot \frac{c \cdot N_c \cdot i_{\delta\beta\omega}}{c}$$

$$\text{ave } e' = \frac{e}{B}$$

⑥ Fondations isolées:

• Relations de Terzaghi:

• Semelle Carrée de côté B:

$$q_{cd} = 0,8 \gamma \frac{B}{2} N_{\gamma} + \gamma D N_q + 1,3 c N_c$$

• Semelle rectangulaire de longueur L et de largeur B:

$$q_{cd} = \left(1 - 0,2 \frac{B}{L}\right) \gamma \frac{B}{2} N_{\gamma} + \gamma D N_q + \left(1 + 0,2 \frac{B}{L}\right) c N_c$$

• Semelle circulaire de diamètre B:

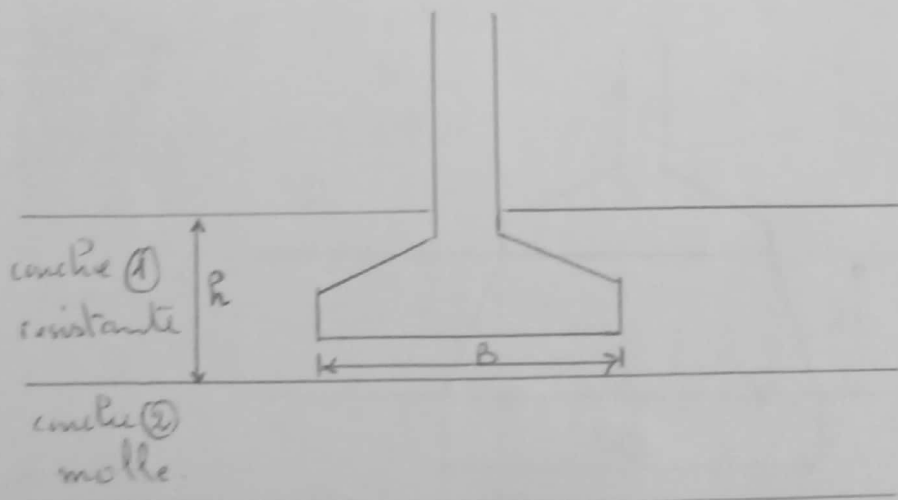
$$q_{cd} = 0,6 \gamma \frac{B}{2} N_{\gamma} + \gamma D N_q + 1,3 c N_c$$

• Remarque importante:
en cas d'encastrement de la semelle dans le sol le terme N_q est remplacé par $(N_q - 1)$ et $q_{adm} = q_{adm} + \gamma D = \frac{q_{cd}}{c.s} + \gamma D$

⑦ Fondations sur sol stratifié:

Il est impossible de donner des règles plus précises si le sol est stratifié (couches hétérogènes) et dans ce domaine l'expérience de l'ingénieur jouera un grand rôle puisque chaque cas nécessite une étude propre à lui.

• Il est toutefois, un cas qui'il convient d'examiner avec la plus grande attention c'est celui d'une couche résistante sur 1 couche compressible ou molle (comme exemple: en travaux maritimes → couche d'argile ou de vase chargée à sa partie supérieure et remplacée par un remblai sableux)



- Pour étudier ce phénomène, des essais de charge sur modèle réduit ont été effectués par Tcheng et ont abouti aux conclusions suivantes: (19)

Cas (1): si $\frac{h}{B} < 1,5 \rightarrow$ l'ensemble des 2 couches se comporte comme un corps cohérent de cohésion améliorée (la couche résistante est poinçonnée)

- On étudie ce cas comme si la couche (1) n'intervient pas

$q_d \rightarrow$ sera calculée avec les caractéristiques de la couche (2) (couche molle)

Cas (2): si $\frac{h}{B} > 3,5 \rightarrow$ l'ensemble des 2 couches équivaut à une couche unique homogène de portance sensiblement égale à celle de la couche (1).

- On étudie ce cas comme si la couche (2) n'intervient pas.

$q_d \rightarrow$ sera calculée avec les caractéristiques de la couche (1) (couche résistante)

Cas (3): si $1,5 < \frac{h}{B} < 3,5 \rightarrow$ les propriétés du bi-couche évoluent $\rightarrow$ il n'est pas possible de donner une règle générale.

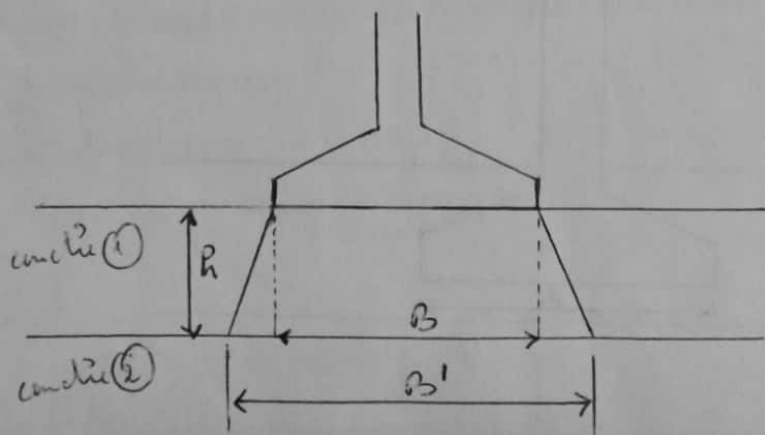
- Pour étudier ce cas: on peut adopter la façon suivante:

- on suppose que la couche (1) résiste seule $\rightarrow q_{d1}$
 - on " " " (2) " " $\rightarrow q_{d2}$ } $q_d = \min(q_{d1}, q_{d2})$

Cas (4): si $\frac{h}{B} \approx 1,5 \rightarrow$ on applique la méthode dite "Semelle fictive"

- Pour étudier ce cas: on adopte une largeur fictive $B' = \left[1 + \frac{2}{3} \left(\frac{h}{B}\right)^2\right] \times B$.

- $q_d \rightarrow$ sera calculée avec les caractéristiques de la couche (1) et avec B' .



Fiche TD N°5 (3eme Année Génie Civil)

Matière : Fondations et Ouvrages géotechniques

Exercice 1 :

Une semelle filante de largeur $B=1\text{m}$ repose sur un sol sableux de poids volumique $\gamma=16,5\text{kN/m}^3$ et d'un angle de frottement $\ell=35^\circ$.

Déterminer : 1- la capacité portante q_d de la semelle.

2- la charge Q que peut supporter cette semelle.

3- la capacité portante admissible q_{adm} de la semelle (coef de sécurité $F=3$).

Exercice 2 :

une semelle filante de largeur $B=1,10\text{m}$ est encastrée à une profondeur $D=1,4\text{m}$ dans un sol de caractéristiques : $\gamma=17\text{kN/m}^3$ - $\ell=30^\circ$ et $C=0,2\text{ daN/cm}^2$ (20 kPa).

Déterminer : 1- mêmes questions que l'exercice 1

2- la charge supportée par la semelle est excentrée de $e = 20\text{cm}$

3- trouver la capacité portante q_d de la semelle.

Exercice 3 :

Dans un sol de caractéristiques physiques à l'état naturel : $\gamma=18\text{kN/m}^3$ - $\ell=25^\circ$

$C=15\text{kPa}$ et $w=23\%$ (teneur en eau) est encastrée à $1,30\text{m}$ les différentes semelles suivantes :

a) Semelle isolée carrée de côté $B=1,20\text{m}$.

b) Semelle rectangulaire de largeur $B=1,20\text{m}$ et de longueur $L=3,50\text{m}$

c) Une semelle circulaire de diamètre $\varnothing=1,10\text{m}$

-Sachant que la nappe d'eau affleure le niveau de la surface libre de la semelle,

Déterminer pour chaque cas :

1-la capacité portante q_d de la semelle.

2-la charge Q que peut supporter la semelle.

ϕ	N_c	N_a	N_y
0°	5.14	1.00	0
1°	5.38	1.09	0.00
2°	5.63	1.20	0.01
3°	5.90	1.31	0.03
4°	6.19	1.43	0.05
5°	6.49	1.57	0.09
6°	6.81	1.72	0.14
7°	7.16	1.88	0.19
8°	7.53	2.06	0.27
9°	7.92	2.25	0.36
10°	8.34	2.47	0.47
11°	8.80	2.71	0.60
12°	9.28	2.97	0.76
13°	9.81	3.26	0.94
14°	10.37	3.59	1.16
15°	10.98	3.94	1.42
16°	11.63	4.34	1.72
17°	12.34	4.77	2.08
18°	13.10	5.26	2.49
19°	13.93	5.80	2.97
20°	14.83	6.40	3.54
21°	15.81	7.07	4.19
22°	16.88	7.82	4.96
23°	18.05	8.66	5.85
24°	19.32	9.60	6.89
25°	20.72	10.66	8.11
26°	22.25	11.85	9.53

ϕ	N_c	N_a	N_y
27°	23.94	13.20	11.2
28°	25.80	14.72	13.1
29°	27.86	16.44	15.4
30°	30.14	18.40	18.1
31°	32.67	20.63	21.2
32°	35.49	23.18	25.0
33°	38.64	26.09	29.4
34°	42.16	29.44	34.7
35°	46.12	33.30	41.1
36°	50.59	37.75	48.8
37°	55.63	42.92	58.2
38°	61.35	48.93	69.6
39°	67.87	55.96	83.4
40°	75.31	64.20	100
41°	83.86	73.90	120
42°	93.71	85.37	144
43°	105.1	99.01	173
44°	118.4	115.3	209
45°	133.9	134.9	254
46°	152.1	158.5	309
47°	173.6	187.2	379
48°	199.3	222.7	467
49°	229.9	265.5	578
50°	266.9	319.1	720
51°	311.8	386.0	900
52°	366.7	470.3	1140
53°	434.4	577.5	1450

Correction Fiche TD n°(5) : 3GC L.P.V

Exercice (1) : semelle filante : $q_d = \gamma \cdot \frac{B}{2} \cdot N_\gamma + \gamma D N_q + c \cdot N_c$
 $\varphi = 35^\circ \rightarrow N_\gamma = 41,1 \quad N_q = 33,30 \text{ et } N_c = 46,12 \text{ (Tableau)}$
 $\gamma = 16,5 \text{ kN/m}^3 \quad B = 1,0 \text{ m} \text{ et } D = 0 \text{ (semelle repose sur le sable)}$
1 - $q_d = \gamma \cdot \frac{B}{2} \cdot N_\gamma + c \cdot N_c = 16,5 \cdot \frac{1}{2} \cdot 41,10 + 0 \cdot 46,12 = 339,08 \approx 339 \text{ kN/m}^2$
2 - $Q = q_d \cdot S$ avec $S = \text{surface de 1m linéaire de la semelle} \rightarrow S = B \times 1,0 \text{ m}$

$$Q = 339 \times 1,0 \times 1,0 = 339 \text{ kN.}$$

$$3 - q_{adm} = \frac{q_d - \gamma D}{F} + \gamma \cdot D = \frac{339 - 16,5 \cdot 0}{3} + 16,5 \cdot 0$$

$$q_{adm} = \frac{q_d}{F} = \frac{339}{3} = 113 \text{ kN/m}^2 = 1,13 \text{ daN/cm}^2.$$

Exercice (2) : $\varphi = 30^\circ \rightarrow N_\gamma = 18,10 \quad N_q = 18,40 \text{ et } N_c = 30,14$

$$B = 1,10 \text{ m} \quad D = 1,40 \text{ m} \quad \gamma = 17 \text{ kN/m}^3 \text{ et } c = 20 \text{ kPa.}$$

$$1 - q_d = \gamma \cdot \frac{B}{2} \cdot N_\gamma + \gamma D N_q + c \cdot N_c = 17 \cdot \frac{1,10}{2} \cdot 18,10 + 17 \cdot 1,40 \cdot 18,40 + 20 \cdot 30,14$$

$$q_d = 169,235 + 437,92 + 602,80 = 1209,96 \approx 1210 \text{ kN/m}^2.$$

$$Q = q_d \cdot S = 1210 \times 1,10 \times 1,0 = 1331 \text{ kN}$$

$$q_{adm} = \frac{1331 - 17 \cdot 1,40}{3} + 17 \cdot 1,40 = 435,73 + 23,80 = 459,53 \text{ kN/m}^2.$$

2 - $e = 20 \text{ cm} \rightarrow \text{méthode de Meyerhof} : B' = B - 2e = 1,10 - 2 \cdot 0,20 = 0,70 \text{ m}$

$$3 - q_d = \gamma \cdot \frac{B'}{2} \cdot N_\gamma + \gamma D N_q + c \cdot N_c = \underbrace{17 \cdot \frac{0,70}{2} \cdot 18,10}_{107,70} + \underbrace{17 \cdot 1,40 \cdot 18,40}_{437,92} + \underbrace{20 \cdot 30,14}_{602,80}$$

$$q_d = 1148,42 \text{ kN/m}^2.$$

Exercice 3: $\varphi = 25^\circ \rightarrow N_\gamma = 8,11$ $N_q = 10,66$ et $N_c = 20,72$.

$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ - $c = 15 \text{ kPa}$ $w = 0,23$ (23%) et $D = 1,30 \text{ m}$.

- la nappe d'eau affleure le niveau de la semelle $\rightarrow$ sol à l'état de saturation

$$\gamma_{\text{sat}} = \gamma(1+w) = 18 \cdot (1+0,23) = 18 \cdot 1,23 = 22,14 \text{ kN/m}^3$$

① Capacité portante pour chaque semelle:

a - Semelle carrée: $B = 1,20 \text{ m}$

$$q_d = 0,8 \cdot \gamma \cdot \frac{B}{2} \cdot N_\gamma + \gamma D N_q + 1,2 \cdot c \cdot N_c = 0,8 \cdot 22,14 \cdot \frac{1,20}{2} \cdot 8,11 + 22,14 \cdot 1,30 \cdot 10,66 + 1,2 \cdot 15 \cdot 20,72$$

$$q_d = 86,19 + 306,82 + 372,96 = 765,97 \text{ kN/m}^2$$

b - Semelle rectangulaire: $B = 1,20 \text{ m}$ et $L = 3,50 \text{ m}$.

$$q_d = \left(1 - 0,2 \cdot \frac{B}{L}\right) \cdot \gamma \cdot \frac{B}{2} \cdot N_\gamma + \gamma D N_q + \left(1 + 0,2 \cdot \frac{B}{L}\right) \cdot c \cdot N_c$$

$$q_d = \left(1 - 0,2 \cdot \frac{1,20}{3,50}\right) \cdot 22,14 \cdot \frac{1,20}{2} \cdot 8,11 + 22,14 \cdot 1,30 \cdot 10,66 + \left(1 + 0,2 \cdot \frac{1,20}{3,50}\right) \cdot 15 \cdot 20,72$$

$$q_d = 70,19 + 306,82 + 332,56 = 739,57 \text{ kN/m}^2$$

c - Semelle circulaire: $\phi = 1,10 \text{ m}$

$$q_d = 0,6 \cdot \gamma \cdot \frac{B}{2} \cdot N_\gamma + \gamma D N_q + 1,2 \cdot c \cdot N_c$$

$$q_d = 0,6 \cdot 22,14 \cdot \frac{1,10}{2} \cdot 8,11 + 22,14 \cdot 1,30 \cdot 10,66 + 1,2 \cdot 15 \cdot 20,72$$

$$q_d = 59,25 + 306,82 + 372,96 = 739,03 \text{ kN/m}^2$$

② La charge Q de chaque semelle:

- semelle carrée: $Q = q_d \cdot S = 765,97 \cdot (1,20)^2 = 1103 \text{ kN}$

- semelle rectangulaire: $Q = q_d \cdot S' = 739,57 \cdot (1,20 \cdot 3,50) = 3106,19 \text{ kN}$

- Semelle circulaire: $Q = q_d \cdot S' = 739,03 \cdot 3,14 \cdot \frac{(1,10)^2}{4} = 702 \text{ kN}$