

Chapitre 2 : Fondations superficielles et profondes

Introduction :

Dans le monde des bâtiments, il existe deux grands modes de transmission des charges des constructions aux couches de sols soit:

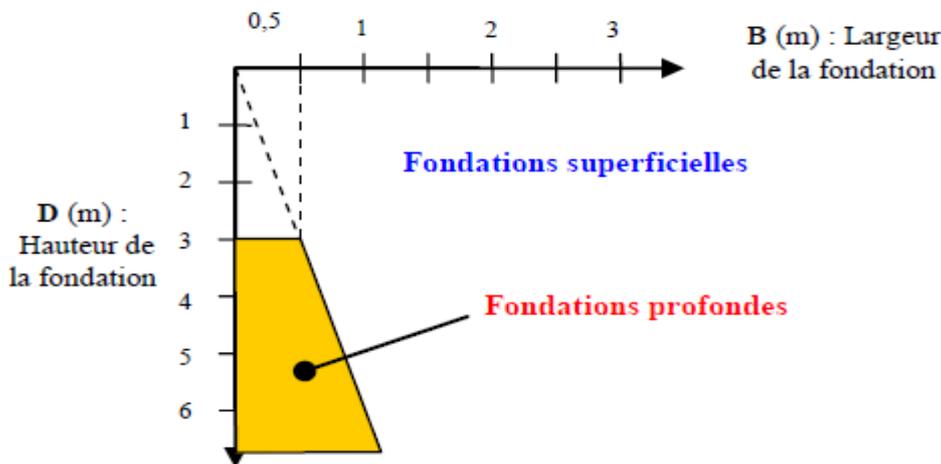
- Par fondations superficielles
 - Par fondations profondes.
- Les fondations superficielles sont des fondations faiblement encastées qui reportent les charges au niveau des couches superficielles de terrains.
- Les fondations profondes reportent les charges dans les couches profondes

1. Fondations superficielles

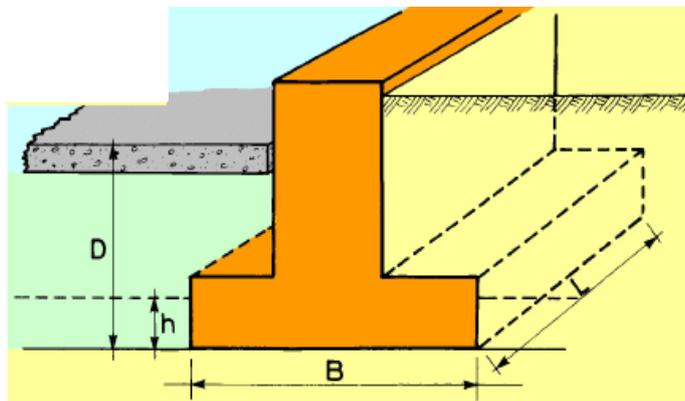
1.1. Définition :

Les fondations superficielles sont destinées à transmettre des charges provenant de la superstructure au sol.

- Une fondation est dite superficielle si :



- $D/B < 6$ et $D < 3$ m
selon le DTU 13.11
Fondations
superficielles

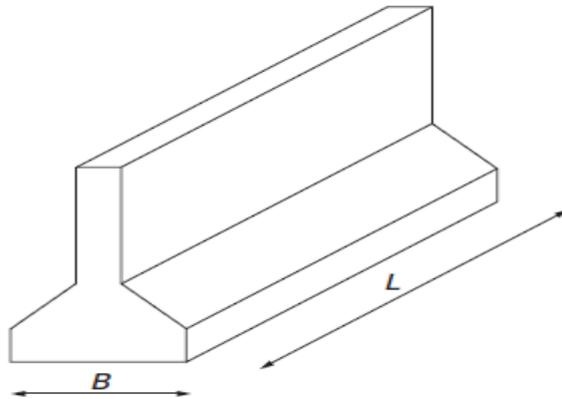


D : Profondeur d'encastrement de la semelle
 B : la largeur de la semelle
 L : la longueur de la semelle

1.2. Types de fondations superficielles :

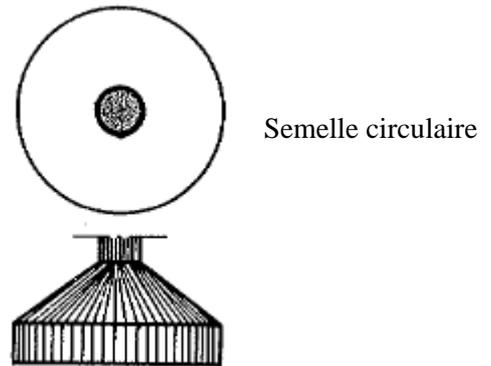
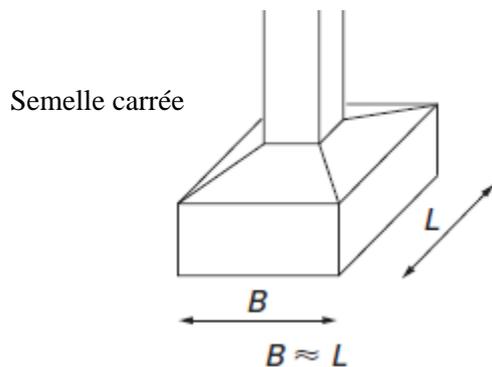
On distingue :

- Les **semelles filantes**, généralement de largeur B (au plus quelques mètres) et de grande longueur L ($L/B > 10$) ;

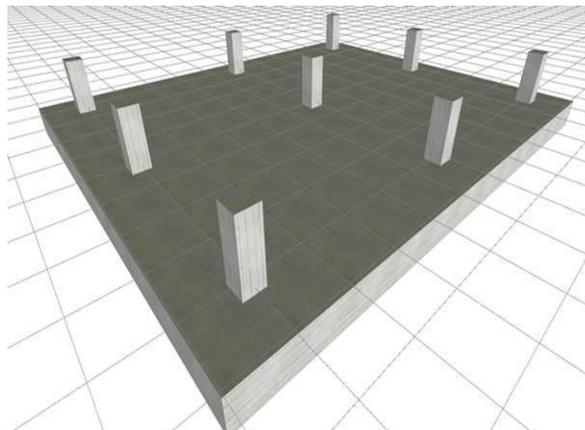


- Les **semelles isolées**, dont les dimensions en plan B et L sont toutes deux au plus de quelques mètres ; ($L/B < 5$)

Cette catégorie inclut les semelles **carrées** ($B/L = 1$) et les semelles circulaires (de diamètre B) ;



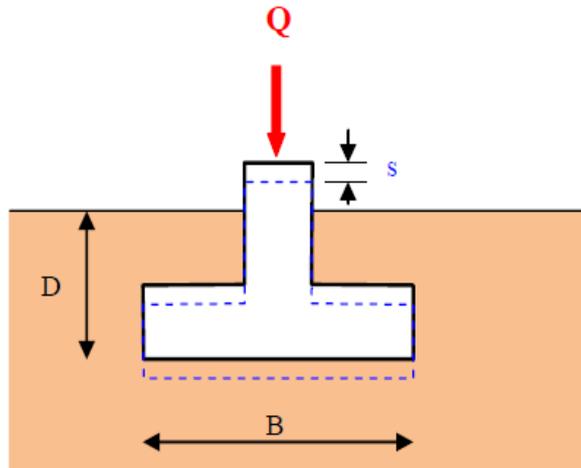
- les **radiers** ou **dallages**, de dimensions B et L importantes ; cette catégorie inclut les radiers généraux.



Radier dalle

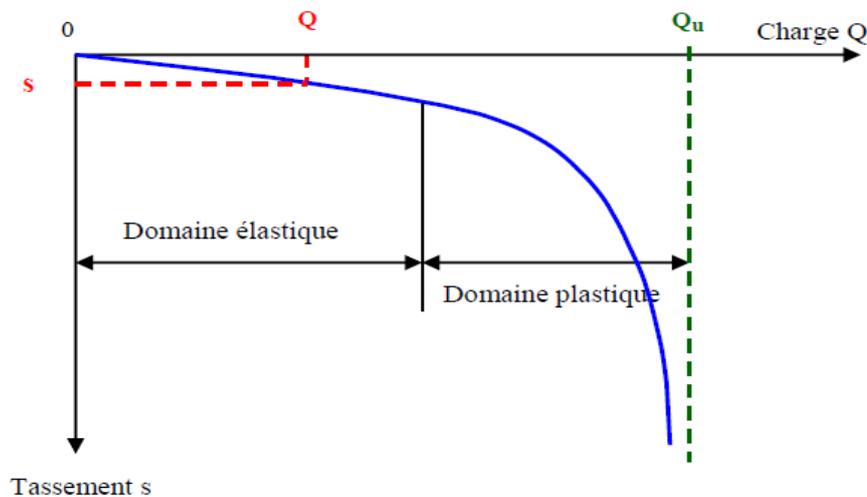
1.3. Comportement d'une semelle sous charge verticale centrée :

On a une fondation sur laquelle est appliquée une charge Q croissante : Après la mesure de tassement s au cours de chargement, on remarque la création de deux domaines : **élastique et plastique**



Au début, le comportement est sensiblement linéaire (s est proportionnel à Q) : **Domaine élastique**

- Après, on remarque une création et propagation de zones de sol **plastifiées (Domaine plastique)** sous la fondation. Et après une certaine charge Q_u , le sol n'est pas capable de supporter une charge supérieure (on peut dire que l'on a atteint la rupture).

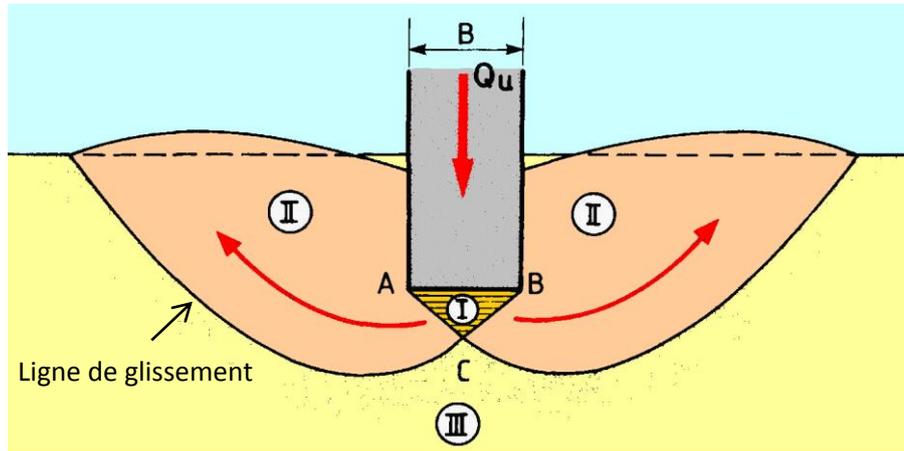


Cette charge Q_u est appelée charge ultime qui provoque la rupture du sol de fondation

➤ La contrainte de rupture de la semelle est: $q_u = Q_u/A$. (A : surface de la semelle)

1.4. Mécanisme de rupture d'une fondation superficielle :

Lorsque l'on exerce sur la fondation une charge verticale croissante jusqu'à une valeur Q_u : en remarque trois zones :



Zone I : Il se forme sous la base de la semelle un **coin rigide ABC** qui refoule (repousse) les terres de part et d'autre jusqu'à la surface.

Zone II : Le sol de ces parties est complètement plastifié, et il est refoulé latéralement selon les lignes de glissement

Zone III : une zone où les contraintes sont plus faibles qui ne le mettent pas en rupture.

1.5. Capacité portante des fondations superficielles :

La capacité portante ultime d'une fondation superficielle est définie comme la charge maximale que peut supporter le sol support :

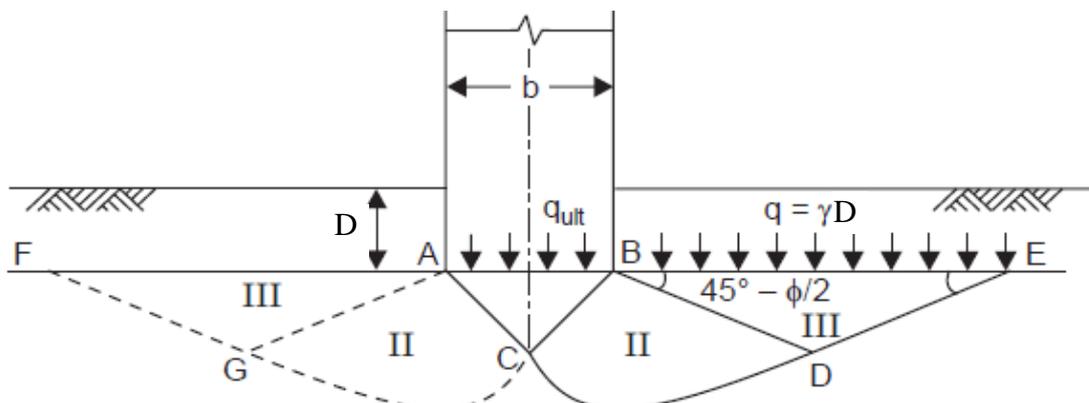
- La Portance : c'est l'aptitude d'un terrain à supporter des charges.

BUT : calculer est ce que le sol peut supporter les charges extérieures ou non

Les méthodes de calcul de la capacité portante ont été développées progressivement depuis le début du dix-neuvième siècle telle que celle de (Rankine, Pauker). Et les méthodes les plus utilisées sont de **Terzaghi, Meyerhof, Hansen, Vesic** ; qui ont établi un ensemble de règles validées par l'expérience et couvrant la plupart des situations courantes.

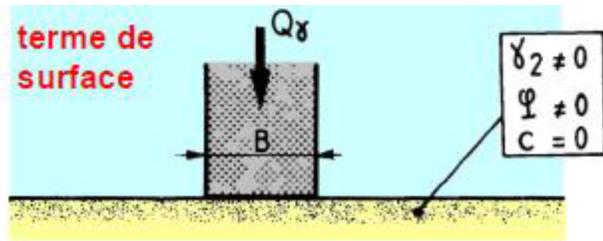
- **Remarque :** ces méthodes sont basées sur la mesure des propriétés de cisaillement de sol (c et ϕ)

A. Méthode de Terzaghi 1943 :

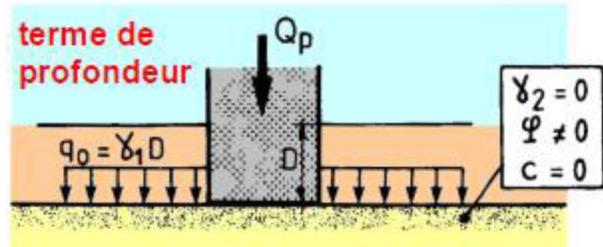


- Pour déterminer la charge limite q_{ult} ; il a appliqué le principe de superposition sur trois états :

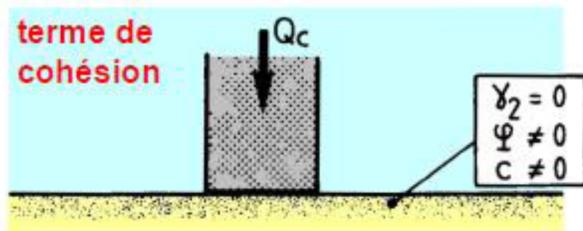
La portance augmente avec l'augmentation de la surface de semelle



La portance augmente avec l'augmentation de q



La portance augmente avec l'augmentation de la cohésion de sol



- Dans ce cas, la portance est la somme de ces trois termes

Dans le cas d'une **semelle filante**, la première expression générale de la capacité portante est :

$$q_{ult} = c N_c + q N_q + \frac{1}{2} \gamma' B N_\gamma$$

Terme de cohésion
Terme de profondeur
Terme de surface

A v e c :

q_{ult} : capacité portante ultime par unité de surface

$q = \gamma D$: γ : est le poids volumique du sol au-dessus la base de la fondation,

γ' : poids volumique du sol déjaugé sous la fondation,

c : cohésion du sol sous la base de la fondation,

N_c, N_q, N_γ : facteurs de portance ne dependent que de ϕ

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$$

$$N_q = \frac{a^2}{2 \cos^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)} \quad \text{avec} \quad a = e^{(0,75 \pi - \phi/2) \tan \phi}$$

$$N_\gamma = \frac{\tan \phi}{2} \left(\frac{K_{py}}{\cos^2 \phi} - 1 \right) \quad \text{avec} \quad K_{py} : \text{coefficient de poussée : Terzaghi n'a pas précisé comment calculer } K_{py}$$

ϕ , deg	N_c	N_q	N_γ	K_{py}
0	5.7*	1.0	0.0	10.8
5	7.3	1.6	0.5	12.2
10	9.6	2.7	1.2	14.7
15	12.9	4.4	2.5	18.6
20	17.7	7.4	5.0	25.0
25	25.1	12.7	9.7	35.0
30	37.2	22.5	19.7	52.0
34	52.6	36.5	36.0	
35	57.8	41.4	42.4	82.0
40	95.7	81.3	100.4	141.0

Tableau 1 : valeurs de N_c, N_q, N_γ selon Terzaghi 1943

Pour une fondation **carrée** :

$$q_{ult} = 1,3 c N_c + q N_q + 0,4 \gamma' B N_\gamma$$

Pour une fondation **circulaire** :

$$q_{ult} = 1,3 c N_c + q N_q + 0,3 \gamma' B N_\gamma$$

Dans l'application de la méthode de Terzaghi, on peut distinguer le calcul à **court terme** ou à **long terme**

- **À court terme** (conditions non drainée C_u et $\phi_u = 0$) :

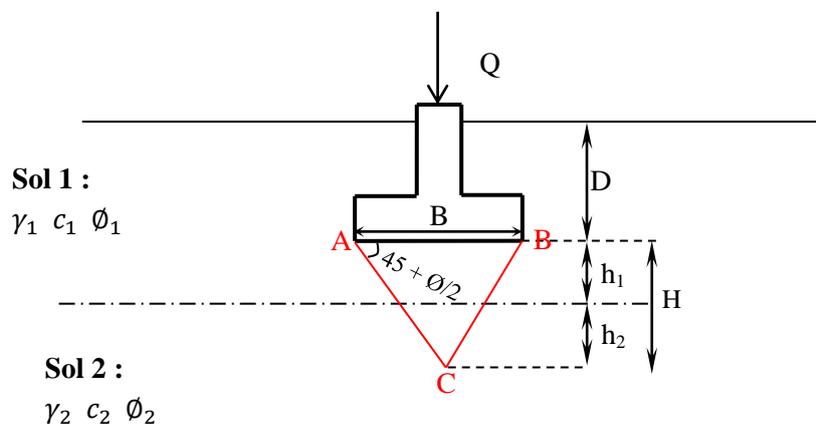
$$q_{ult} = c_u N_c + \gamma D$$

$$\text{Avec : } N_c = \pi + 2$$

- **À long terme** (conditions drainée C' et ϕ') : Les formules restent les mêmes

A.1. Fondations sur des sols bi-couches :

Dans le cas où on a de deux couches de sols, la portance de sol peut être calculer comme suit :



On a :

$$H = B/2 \tan\left(45 + \phi/2\right)$$

- Si la deuxième couche (sol 2) coupe le coin rigide **ABC** : on calcule une cohésion et un angle de frottement moyen, c'est dire :

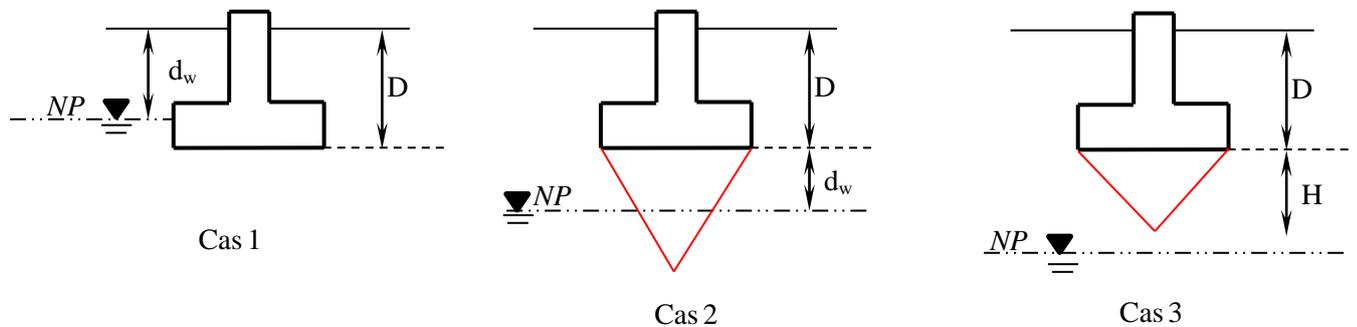
$$c_{moy} = \frac{c_1 h_1 + c_2 h_2}{H} \quad \text{et} \quad \phi_{moy} = \frac{\phi_1 h_1 + \phi_2 h_2}{H}$$

Donc on a :

$$q_{ult} = c_{moy} N_c + q N_q + \frac{1}{2} \gamma' B N_\gamma$$

A.2. Influence du niveau de la nappe d'eau :

On a trois cas :



- **Premier cas** : $d_w \leq D$

On doit modifier le terme de profondeur $q N_q$:

$q = \gamma d_w + \gamma'(D - d_w)$: le poids volumique du sol au-dessus la base de la fondation

- **Deuxième cas** : la nappe coupe le coin rigide

Dans le terme de surface ($\frac{1}{2} \gamma' B N_\gamma$), on remplace γ' par :

$$\gamma_e = (2H - d_w) \frac{d_w}{H^2} \gamma_h + \frac{\gamma'}{H^2} (H - d_w)^2$$

- **Troisième cas** : la nappe est au-dessous de coin rigide, les formules de la capacité portante restent les mêmes

B. Méthode de Meyerhof (1963) :

Meyerhof a développé la méthode de Terzaghi en introduisant des facteurs partiels tels que : la forme de la semelle, la profondeur de la semelle, excentricité et l'inclinaison de la charge. La formule générale de Meyerhof est :

$$q_{ult} = cN_c s_c d_c i_c + qN_q s_q d_q i_q + \frac{1}{2} \gamma' B N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma$$

Où :

$$\begin{cases} N_c = (N_q - 1) \cot \phi \\ N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \\ N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1,4 \phi) \end{cases}$$

Pour tenir compte de la **forme** de la fondation, que ce soit circulaire ou rectangulaire de cotés $B \times L$; il a introduit les facteurs s_c et s_q et s_γ

$$\begin{cases} s_c = 1 + 0,2 K_p \frac{B}{L} \\ s_q = s_\gamma = 1 + 0,1 K_p \frac{B}{L} \quad \text{si } \phi > 10^\circ \\ s_q = s_\gamma = 1 \quad \text{si } \phi = 0 \end{cases} \quad K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

Pour tenir compte de la **profondeur** de la fondation, que ce soit circulaire ou rectangulaire de cotés $B \times L$; il a introduit les facteurs d_c et d_q et d_γ

$$\begin{cases} d_c = 1 + 0,2 K_p \frac{D}{B} \\ d_q = d_\gamma = 1 + 0,1 K_p \frac{D}{B} \quad \text{si } \phi > 10^\circ \\ d_q = d_\gamma = 1 \quad \text{si } \phi = 0 \end{cases}$$

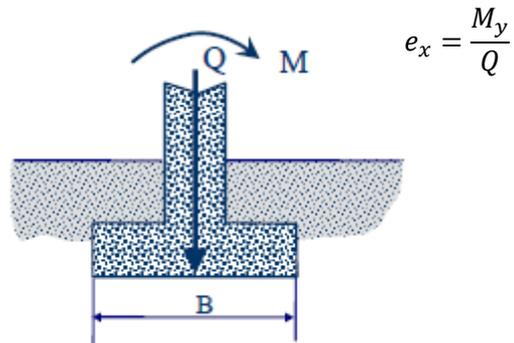
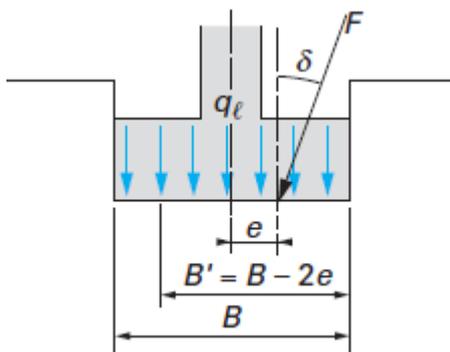
Pour les charges (F) excentrées et inclinées ; il a introduit les facteurs i_c et i_q et i_γ

$$\begin{cases} i_c = i_q = \left(1 - \frac{\delta}{90} \right)^2 \\ i_\gamma = \left(1 - \frac{\delta}{\phi} \right)^2 \end{cases}$$

Si la charge F est excentrée ; on remplace

➤ B et L par B' et L' dans les facteurs s_c et s_q ; et B par B' dans le terme de surface, on a :

$$B' = B - 2e_x \quad \text{et} \quad L' = L - 2e_y$$



Remarque :

- La méthode de Terzaghi donne des résultats satisfaisants par les sols cohérents (ϕ est très faible) où $D/B \leq 1$;
- La méthode de Meyerhof et Hansen sont utilisées dans n'importe quelle situation.

1.6. Tassement des fondations superficielles :

Au cours de la durée de service de l'ouvrage, il convient de vérifier que le tassement et la rotation de la semelle soient admissibles.

Le tassement final d'une fondation sur radier est la somme de :

- Tassement immédiat S_i
- Tassement de consolidation primaire S_c
- Tassement de consolidation secondaire S_s

$$S_t = S_i + S_c + S_s$$

On s'intéresse dans ce chapitre qu'au tassement immédiat ; (Le tassement S_c et S_s) sont déjà vus dans le module MDS 2.

1. Tassement immédiat S_i :

Lorsqu'on utilise la théorie d'élasticité linéaire, le tassement immédiat d'un radier posé sur un sol homogène peut être calculé par la formule suivante :

$$S_i = q \cdot \frac{1 - \nu^2}{E_s} m B I_p$$

q : charge appliquée sur la semelle en kn/m^2

ν : coefficient de poisson de sol

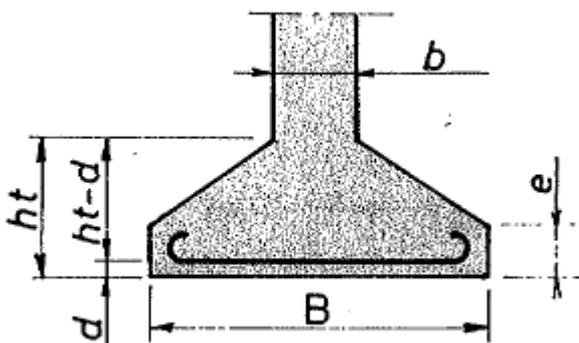
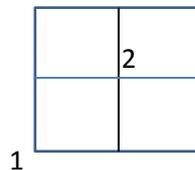
E_s : module de déformation de sol

I_p : facteur d'influence :

$$I_p = \frac{1}{\pi} \left[m_1 \ln \left(\frac{1 + \sqrt{m_1^2 + 1}}{m_1} \right) + \ln \left(m_1 + \sqrt{m_1^2 + 1} \right) \right] \quad \text{avec} \quad m_1 = \frac{L}{B}$$

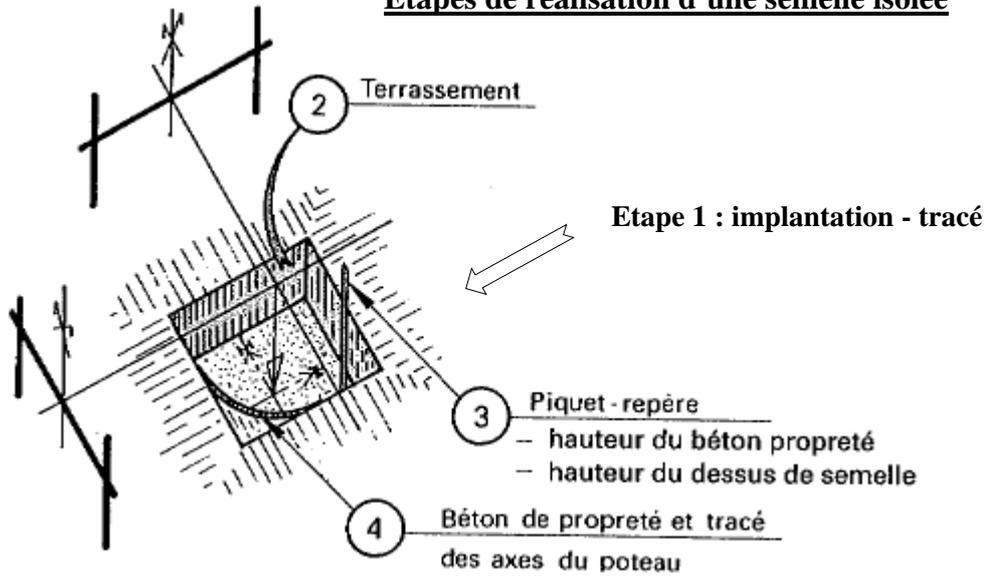
$m = 2$: tassement calculé au centre

$m = 1$: tassement calculé au coin

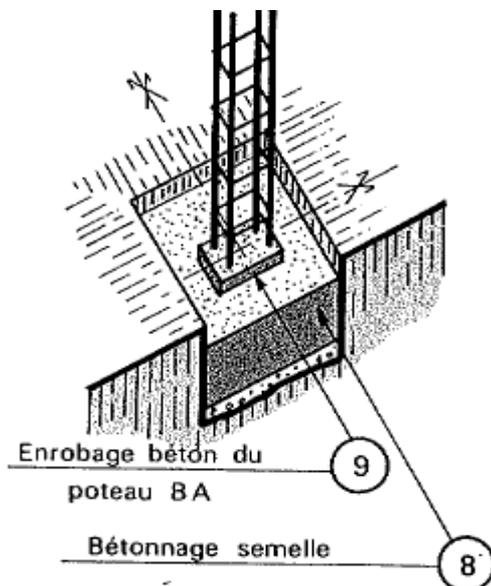
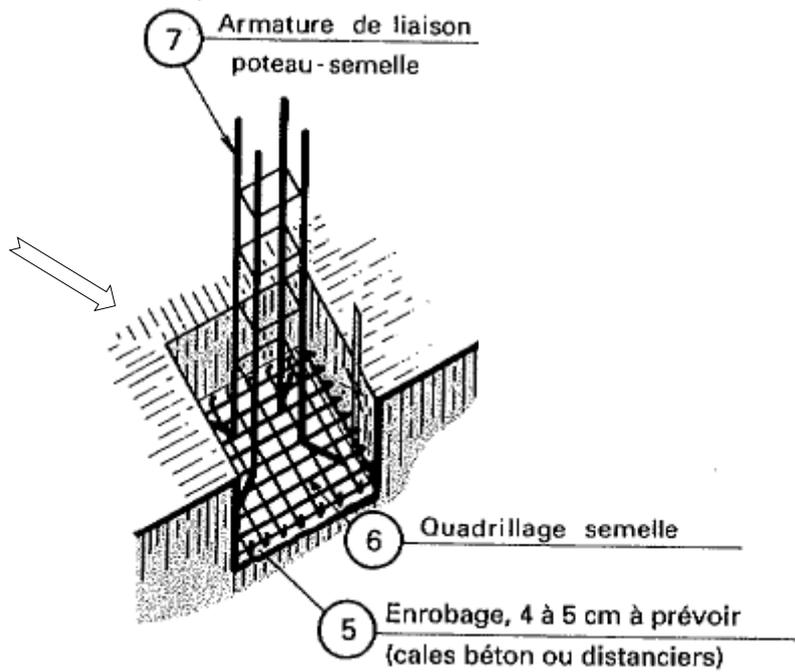


Semelle rigide si : $h_t > \frac{B-b}{4} + 5 \text{ cm}$

Etapes de réalisation d'une semelle isolée



Etape 2 : la mise en place de ferrailage

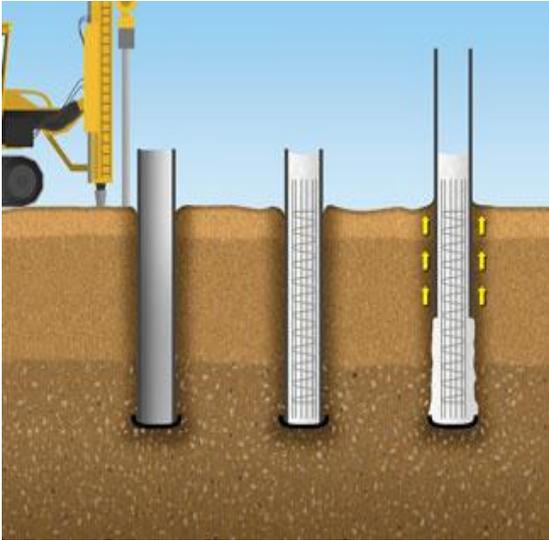


Etape 3 : coulage de béton

2. Les fondations profondes ; les Pieux

2.1.Introduction :

Très souvent, le sol en surface n'a pas une résistance suffisante pour supporter les charges transmises par la superstructure. Dans ce cas, il faut fonder la structure sur des pieux qui reportent les charges aux couches les plus résistantes.



Pieux en béton armé

2.2. Principaux types de pieux :

Les pieux peuvent être classés de différentes façons (voir tableau suivant) :

Classification selon	Type de pieu
Mode d'installation dans le sol	Battu, foré
Nature de matériau	Acier, béton, bois
Géométrie de forme	Vertical ou incliné
Type de structure	Tour, maison, ponts

Généralement, on distingue deux classes de fondations profondes :

- Pieux mis en place par refoulement dans le sol
- Pieux dont l'exécution se fait après l'excavation du sol

A. Pieux refoulant le sol à la mise en place (pas d'excavation) :

Ces pieux sont installés dans le sol par battage, on a par exemple :

- Pieu battu
- Pieu en métal battu (en forme de H, en forme d'anneau (tube))
- Pieu en béton foncé
- Pieu en métal foncé
- Pieu battu moulé

Exemple : pieu battu moulé :

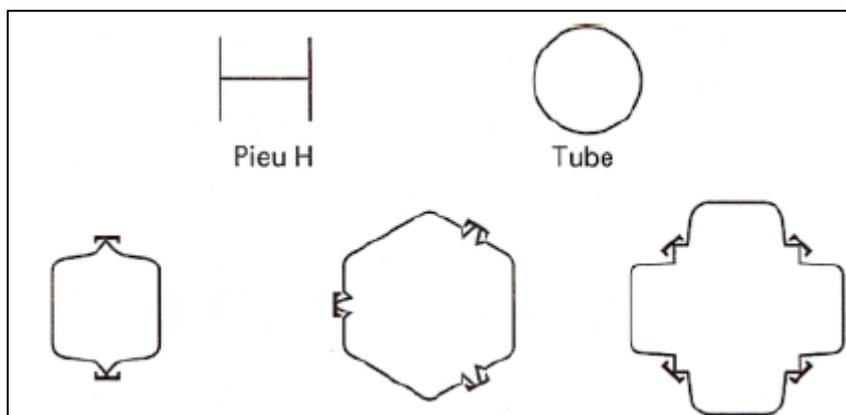
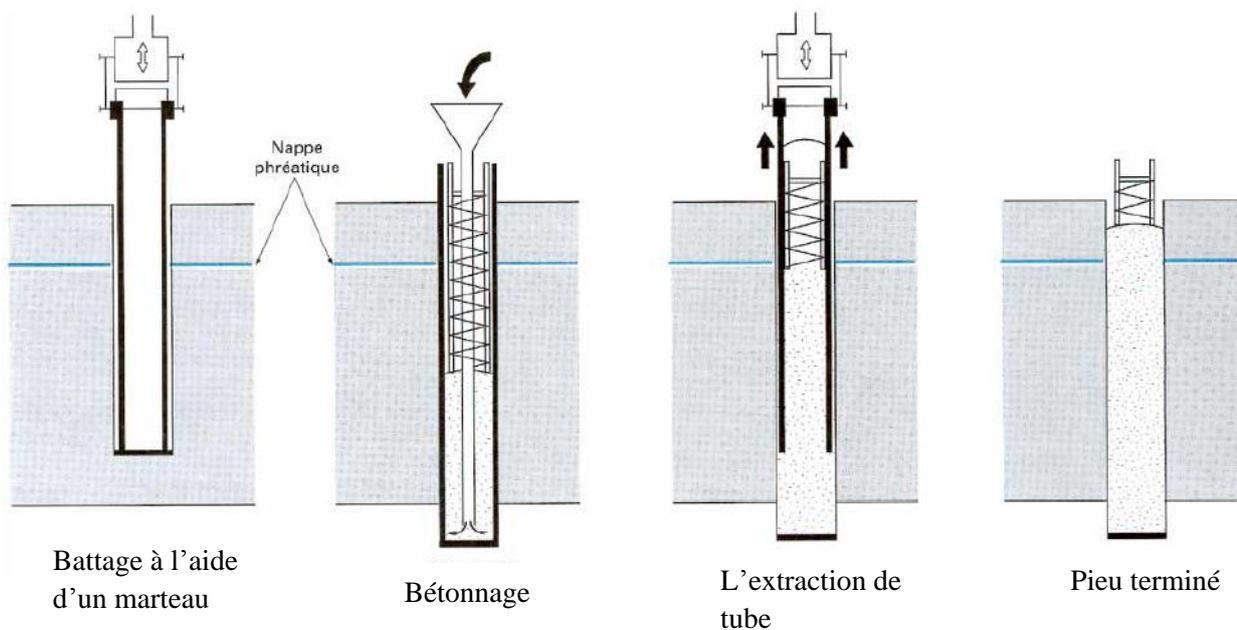


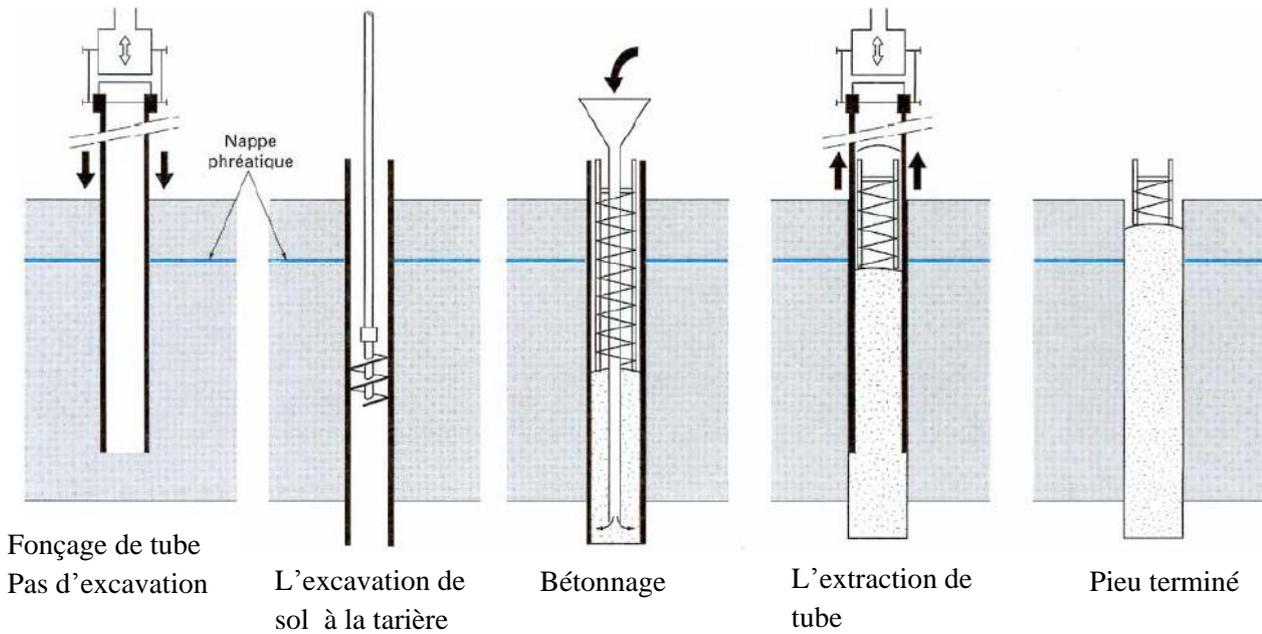
Figure 1 – Profilés métalliques battus

B. Pieux ne refoulant pas le sol à la mise en place :

Ils sont exécutés après l'excavation de sol, c'est-à-dire à partir d'un forage exécuté dans le sol par des moyens mécaniques tels que **tarière** ; on peut citer :

- Pieu foré simple
- Pieu foré à la boue
- Pieu foré tubé
- Pieu tarière creuse

Exemple : Pieu foré tubé



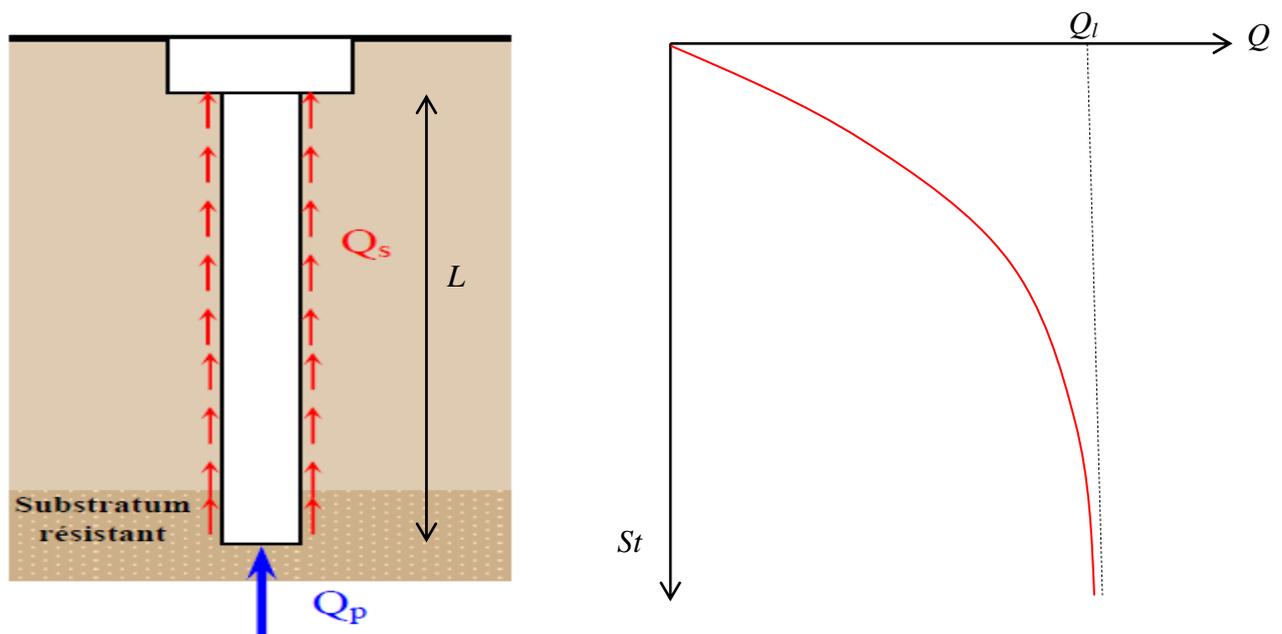
2.3. Capacité portante d'un pieu isolé sous charge axiale :

Il existe plusieurs méthodes pour calculer la capacité portante d'un pieu isolé que ce soit par l'utilisation de :

- L'équation statique de la capacité portante
- Les essais in-situ
- Chargement réel de pieu en vraie grandeur
- Les essais dynamiques

Méthode statique :

Soit un pieu encastré à une profondeur L est chargé axialement en tête par une charge Q



Courbe de chargement axial d'un pieu

Si l'on accroît progressivement Q à partir de 0, le pieu s'enfonce en tête, de St jusqu'à atteindre une charge limite Q_l correspondant à la rupture du sol.

Au moment de la rupture, la charge Q_l est équilibrée par deux réactions :

1. La charge limite de pointe Q_p
2. La charge limite par frottement latérale de pieu Q_s

La charge limite de pointe est :

$$Q_p = q_p \cdot A_p \quad \text{avec:} \quad A_p = \pi/4 D^2$$

$$q_p = c N_c + q_0 N_q$$

La charge limite de pointe est :

$$Q_s = q_s \cdot A_s \quad \text{avec} \quad A_s = \pi D L$$

$$q_s = K q_z \tan \delta$$

Donc, la capacité portante est :

$$Q_{ul} = Q_p + Q_s$$

$$Q_{ul} = (c N_c + q_0 N_q) \pi/4 D^2 + (K q_z \tan \delta) \pi D L$$

Avec :

$$q_0 = \gamma L$$

$$q_z = \gamma L/2$$

$$K \cong 0,5 K_p$$

δ : angle de frottement sol – pieu :

$$\delta = (0,67 \div 0,8)\emptyset \quad \text{pieu en métal lisse}$$

$$\delta = (0,7 \div 0,9)\emptyset \quad \text{pieu en métal rugueux}$$

$$\delta = (0,8 \div 1)\emptyset \quad \text{pieu en bois}$$

$$\delta = (0,8 \div 1)\emptyset \quad \text{béton – sable}$$

Le facteur de portance N_q : il dépend de \emptyset et L/D

\emptyset	28	30	32	34	36	38	40
$L/D = 20$	12	17	25	38	58	89	137
$L/D = 70$	9	14	22	36	56	87	136

Pour les sols frottant ($c = 0$) :

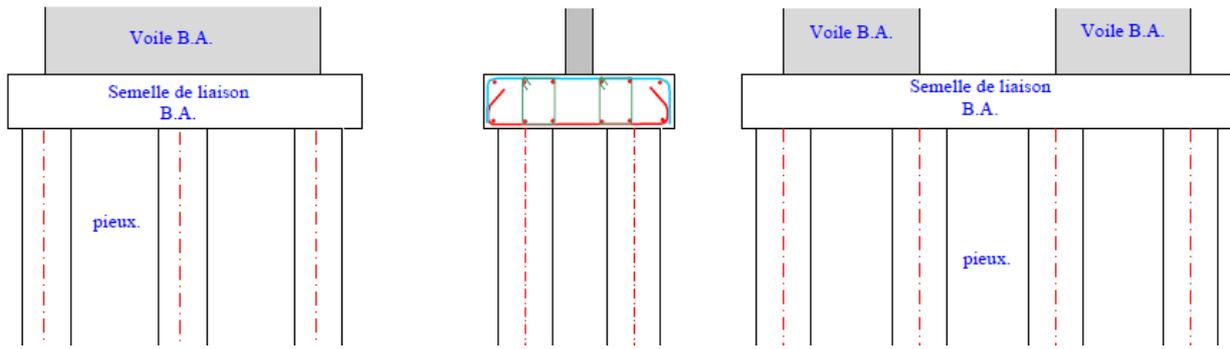
$$Q_{ul} = (q_0 N_q) \pi/4 D^2 + (K q_z \tan \delta) \pi D L$$

Pour les sols purement cohérents (C_u et $\emptyset_u = 0$) :

$$Q_{ul} = (9 c_u) \pi/4 D^2 + (\alpha c_u) \pi D L \quad \text{Avec } \alpha < 1$$

Réalisation des pieux :

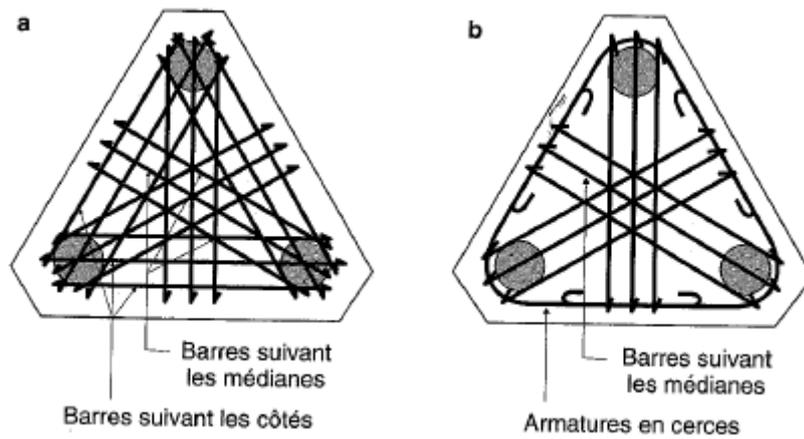
Exemple :



Vue en élévation



Vue en plan



Ferrailage de semelle sur trois pieux