

CHAPITRE 5

FONDATIONS SUPERFICIELLES

SEMELLE SOUS MUR ; SEMELLE ISOLÉE SOUS POTEAU
SEMELLE FILANTE SOUS POTEAUX ; RADIER.

5.1 GÉNÉRALITÉS :

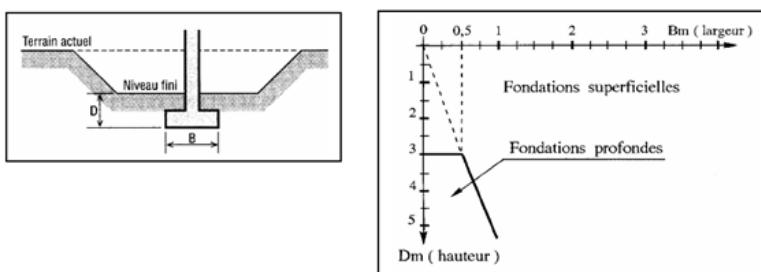
On appelle fondation la partie d'un ouvrage reposant sur un terrain d'assise auquel sont transmises toutes les charges permanentes et variables supportées par cet ouvrage. Les fondations d'une construction constituent la partie essentielle de l'ouvrage, puisque c'est de leur bonne conception et du respect des règles lors de leur réalisation que dépend la bonne tenue de l'ensemble. En effet, ce sont les éléments de fondation qui transmettent les charges de la structure au sol.

Il est donc nécessaire d'adapter le type et la structure des fondations de tout ouvrage à la nature du sol d'assise (topographie et géologie). Une étude géologique et géotechnique est essentielle pour préciser au concepteur le type, le nombre et la profondeur des fondations.

La connaissance de la superstructure (et de ses charges) ainsi que les caractéristiques mécaniques du sol de fondation (notamment le taux de travail du sol en profondeur) sont un préalable à toute étude de fondation.

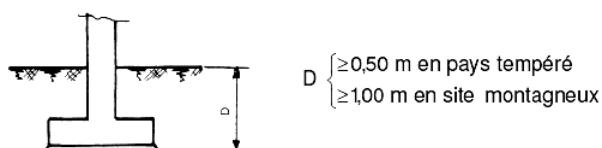
Les fondations reportent les charges permanentes G (poids propres et autres) et les charges d'exploitation Q à un niveau convenable et les répartissent sur une couche de terrain plus ou moins étendue et de résistance adéquate.

On distingue deux (ou trois selon les auteurs) principaux types de fondations selon leur profondeur.



D = la distance entre le dessous de la fondation et le niveau fini du sol.
 B = la largeur de la semelle.

La profondeur hors gel ou la cote hors gel : profondeur minimale à respecter pour l'enfouissement des semelles de fondations. Cette distance, variable suivant les zones climatiques, met le sol de fondation à l'abri du gel. Il en est ainsi en général lorsque :



5.1.1 FONCTIONS PRINCIPALES DES FONDATIONS :

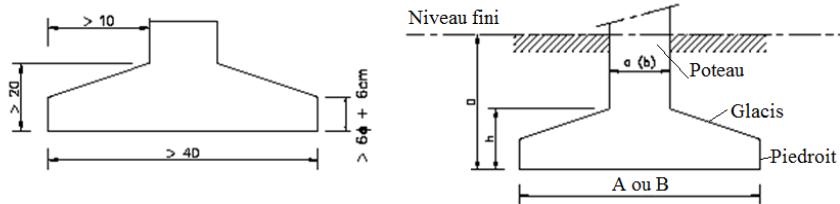
Fonctions	Conditions	Solutions
STABILITÉ de l'ouvrage et des fondations	<ul style="list-style-type: none"> Les tassements du terrain d'assise ne doivent pas autoriser de désordres graves des fondations et de l'ouvrage. Éviter ou, au pire, limiter les tassements différentiels. Tenir compte de la présence d'eau dans le sol (poussée d'Archimède) L'ouvrage ne doit pas se déplacer sous l'action des forces horizontales ou obliques appliquées à la structure (vent, 	<ul style="list-style-type: none"> Limitation des tassements compatibles avec l'utilisation de l'ouvrage (ordre de grandeur : quelques mm de 5 à 25 mm) Vérifier que les poussées d'Archimède soient inférieures au poids de l'ouvrage (rare) sinon prévoir un ancrage du bâtiment par tirants ou prévoir un lestage. Prendre les dispositions

	<p>séisme, poussées des terres, poussée hydrostatiques)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Éviter les glissements de l'ouvrage pour les constructions réalisées sur un terrain en pente. 	constructives adaptées à chaque cas (utilisation de bêches, frottements sol/béton suffisant, tirants ou clous,...)
RÉSISTANCE des massifs de fondations	<ul style="list-style-type: none"> • Les actions qui sollicitent les fondations ne doivent pas entraîner leur rupture 	<ul style="list-style-type: none"> • Respect des règles en vigueur. • Dimensionnement correct des fondations en fonction du type de l'ouvrage, des charges et surcharges supportées par la structure, de la nature du terrain, du type de fondations et des matériaux employés.
RÉSISTANCE du terrain de fondations	<ul style="list-style-type: none"> • Les actions qui sollicitent le sol de fondations ne doivent pas entraîner son poinçonnement ni des déformations incompatibles avec l'utilisation de l'ouvrage supporté. 	<ul style="list-style-type: none"> • Respect des règlements en vigueur. L'étude des comportements du sol fait l'objet de la mécanique des sols
DURABILITÉ des fondations	<ul style="list-style-type: none"> • La résistance des massifs de fondations doit être assurée pendant toute l'existence de l'ouvrage. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les massifs de fondation doivent être protégés de l'oxydation, de l'érosion, de la décomposition chimique, de l'action du gel. • S'assurer de la stabilité du sol à l'érosion, au glissement de terrain, à la dissolution de certaines particules dans l'eau (gypse,...), au gel.
ÉCONOMIE	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire les coûts de mise en œuvre 	<ul style="list-style-type: none"> • choisir avec prudence parmi les solutions compatibles avec l'ouvrage et le sol celle qui sera la plus économique.

5.1.2 LES FONDATIONS SUPERFICIELLES :

Lorsque la qualité du sol au niveau inférieur d'un ouvrage permet de transmettre les charges directement au bon sol, on parle de fondations superficielles (profondeur Max = 2m). Une fondation superficielle aura une largeur minimale de 40 cm et une hauteur minimale de 20cm. Son piédroit sera

au minimum de $6\phi + 6 \text{ cm}$, où ϕ est le diamètre des aciers (voir Figure suivante). De plus, si $D \geq 3,00m$, on doit vérifier $B \geq D/6$ (sinon, on parle de fondations profondes).

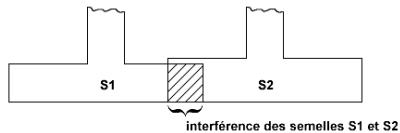


Elles se divisent en :

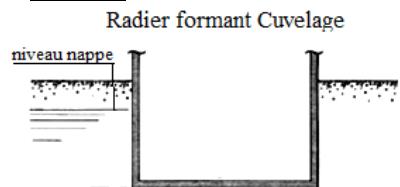
- Semelles isolées,
- Semelles continues, dites aussi filantes, la semelle filante est à différencier de la longrine. La longrine : poutre sur sol, elle sert à rigidifier le système de fondation (semelles isolées).
- Radiers. Un radier est une dalle pleine (épaisseur courante : 20 à 35 cm), éventuellement nervurée, constituant l'ensemble des fondations d'un bâtiment. Il s'étend sur toute la surface de l'ouvrage (radier général). Le radier se comporte comme un plancher renversé.

L'emploi d'un radier se justifie :

- ✓ Quand la contrainte admissible du sol d'assise est faible, la surface de semelles obtenue est supérieure à la moitié de la surface au sol du bâtiment. Le radier est alors conçu pour jouer un rôle répartiteur de charges.



- ✓ Quand le sol n'est pas homogène et risque de provoquer des tassements différentiels.
- ✓ Le radier devient obligatoire lorsque le dernier niveau du sous-sol se situe en dessous du niveau des plus hautes eaux. Si ce niveau ne peut être inondé (local d'archives), il faut le rendre étanche : on réalise un cuvelage.



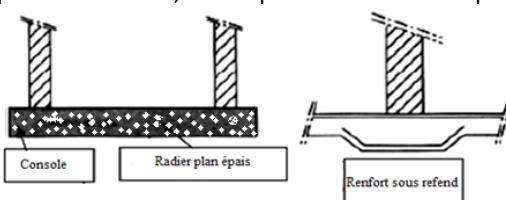
Lorsque le radier est soumis à des poussées d'Archimède, il faut vérifier que ces dernières ne dépassent pas le poids de l'ouvrage. Dans le cas contraire, il faudra ajouter des lestages pour équilibrer les forces.

Le ferraillage d'un radier est particulier : les aciers tendus se situent en partie haute de la dalle, les points d'appui sont les murs, les longrines de redressement (situées au droit des ouvertures) et les longrines.

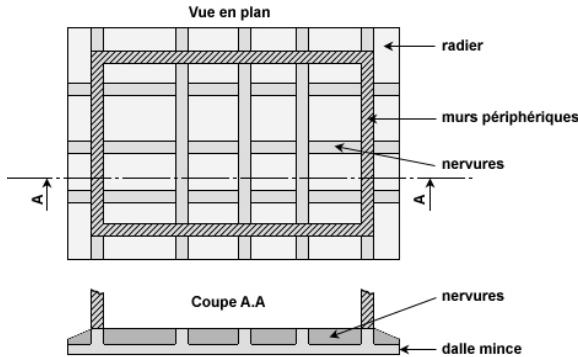
Il existe quatre types de radiers :

- Le radier plan épais : le radier dalle plate (le plus courant).

Il s'agit d'une dalle d'épaisseur constante inférieure à 0,30 m, coffrée sur son pourtour, fortement armée, mais réservée à de petits bâtiments, vu l'importance du béton qui surcharge la structure.



- Le radier plan nervuré : C'est une dalle mince renforcée par des nervures et des poutres. Son coffrage et son ferraillage sont compliqués, ce qui augmente et son coût, mais grâce sa faible masse (utilisation optimale des matériaux), on le réserve à des bâtiments plus importants.



- Le radier champignon sous poteaux ;
- Le radier voûte.

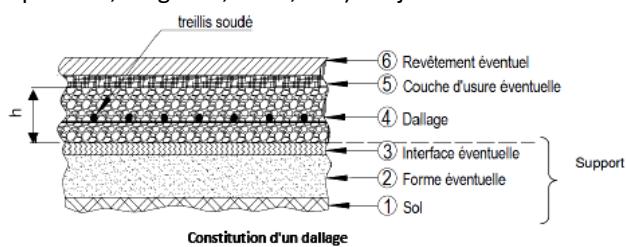
Le radier est à différencier du dallage.

Le dallage est un ouvrage horizontal qui repose sur le sol et constitue le plancher bas d'une habitation bâtie sur un **terre-plein**, c'est à dire sans sous-sol ni vide sanitaire.

Un dallage se compose :

- d'une forme (fondation) constituée d'une certaine épaisseur de matériaux (**blocage en pierres**), constitué de tout-venant de carrière compacté, d'une épaisseur moyenne de 20 à 30-cm, et souvent recouvert d'une fine couche de sable servant d'assise aux panneaux isolants. On appelle parfois le blocage **hérisson**. Il doit être stable et apte à recevoir le corps du dallage.
- D'un **film polyéthylène** (ou feuilles de plastique) qui protège le dallage des éventuelles remontées d'humidité en provenance du sol.
- du corps du dallage, proprement dit, constitué d'une dalle en béton 15 cm d'épaisseur moyenne armée le plus souvent d'un treillis soudé, et reposant sur la forme.
- d'un revêtement ou d'une finition donnant au dallage les qualités de surface désirée.

Le dallage est désolidarisé des parties de construction fondées sur une couche de sol différente de celle du dallage (cas de poteaux, longrines, murs, etc.). Ce joint traverse toute l'épaisseur du dallage.



Remarque :

La différence entre le radier et le dallage :

- ✓ Ouvrage de fondation contre simple ouvrage de surface de plancher,
- ✓ Lié aux murs (qui reposent dessus) contre indépendant des murs,
- ✓ Épaisseurs différentes (dallage 10 à 15 cm),
- ✓ Armatures importantes dans le radier, faibles dans le dallage.

5.1.3 LES FONDATIONS SEMI-PROFONDES ET PROFONDES

- Les fondations semi-profondes

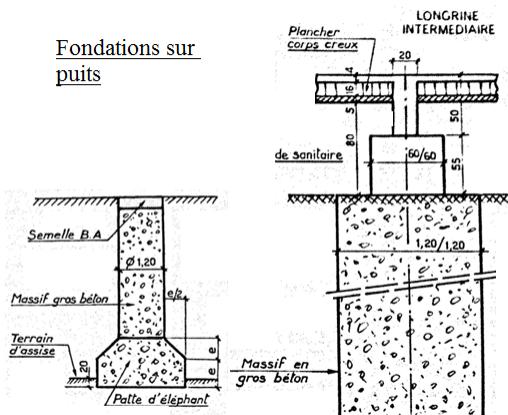
Le puits est une fondation semi-profonde de forme parallélépipédique ou cylindrique, d'environ 1 mètre de diamètre environ, généralement en gros béton, et employée lorsque le sol résistant est loin de la surface. Le puits est une fondation creusée à la main (pas forcément) sous la protection d'un blindage.

Les puits sont utilisés lorsque le bon sol se trouve à une profondeur comprise entre 2 et 10 m. Ils sont bétonnés pleine fouille et ne comportent en général pas d'armature.

Éléments techniques concernant les puits :

- Ils sont bien adaptés à des descentes de charges ponctuelles (poteaux, portiques etc.)
- Ils sont fréquemment reliés par un réseau de longrines en B-A.
- La technique du puits est fréquemment employée, notamment dans le cadre de chantiers de faible à moyenne envergure.
- En zone sismique, ils doivent être attachés dans les deux directions.

Compte tenu du mode de mise en œuvre et des profondeurs relativement faibles, le frottement latéral est généralement négligé. On ne considérera que le terme de pointe.



Les micro pieux :

Les micro pieux sont définis comme des pieux de diamètre inférieur à 250 mm.

Cette technique est particulièrement adaptée à la rénovation et à la réparation des constructions. Elle fournit également une bonne réponse aux problèmes de fondation en bordure de constructions existantes.

Du fait de leur petit diamètre, ils ne travaillent pas en pointe. Leur portance ne dépend que du frottement latéral.

- Les fondations profondes (les pieux) : systèmes de fondations employés quand le bon sol est situé à une profondeur supérieure à 10 m.

On désigne par pieu, une fondation profonde réalisée mécaniquement. Les 3 parties principales d'un pieu sont la **tête**, la **pointe** et le **fût** compris entre la tête et la pointe.

C'est est une **fondation élancée** qui reporte les charges de la structure sur des couches de terrain de caractéristiques mécaniques suffisantes pour éviter la rupture du sol et limiter les déplacements à des valeurs très faibles.

Dimensions des pieux :

- Diamètre : 0.40 à 1.50 m (valeurs courantes).
- Profondeur : 10 à 20 m (valeurs courantes).

On distingue deux grands groupes de pieux : les **pieux** mis en œuvre **avec refoulement** du sol (les pieux battus) et les **pieux** réalisés par **excavation** du sol (les pieux forés).

- **Les fondations spéciales : Colonnes ballastées**

Il s'agit de colonnes de pierres ou de graves ciments que l'on intègre dans le sol et sous des semelles isolées par exemple. La technique de colonnes ballastées se situe exactement sur la frontière entre traitement de sol et fondations profondes. Il s'agit d'obtenir une amélioration des caractéristiques du sol par une alliance entre des zones résistantes (les colonnes) et le terrain en place ayant subi une forte compression lors de la réalisation des colonnes. Cet effet est induit par le compactage intensif d'un matériau choisi (ballast) dans un forage.

5.1.4 CHOIX DU TYPE DE FONDATION :

Le choix du système de fondation est fonction du terrain et de la superstructure, il doit être adaptée au terrain et arrêté à une profondeur suffisante tout en étant compatible avec les ouvrages en élévation.

Les critères qui influent le choix d'une fondation sont :

- ✓ La qualité du sol, la présence d'eau.
- ✓ Les charges amenées par la construction.
- ✓ Les caractéristiques de la construction : dimensions en plan, type de superstructure, le nombre de sous sol.
- ✓ Le type d'entreprise : matériel disponible et compétences,...
- ✓ Le site : urbain, campagne, montagne, bord de mer,...
- ✓ Le coût d'exécution : facteur important mais non décisif.

TABLEAU DES TECHNIQUES EN FONCTION DES PROJETS

	Petit Projet	Projet Moyen	Grand Projet
Superficielles	+++	+++	+++
Semelles & Radier			
Puits courts	++	+++	+++
Grands puits	0	++	+++
Pieux	0	+	+++
Micropieux	++	++	0
Colonnes ballastées	0	+	+++
Traitement de sol			

5.2 DIMENSIONNEMENT DES SEMELLES

Les semelles de fondation appartiennent à deux grandes catégories :

- les semelles prenant appui sur le sol sur toute l'étendue de leur face inférieure, que nous appellerons, en abrégé, **semelles sur sol** ;
- les semelles de répartition des charges entre différents pieux de fondation, ou **semelles sur pieux**.

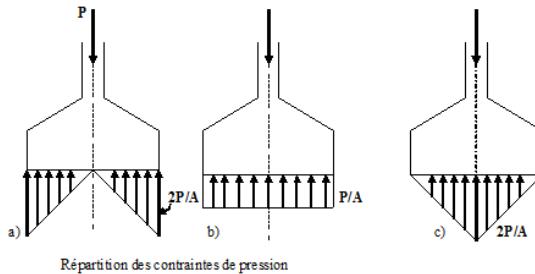
Semelles sur sol :

L'étude de toute fondation dépend de la répartition des contraintes de pression au contact sol-semelle.

Ce diagramme dépend à la fois de la rigidité de la semelle et de la nature du sol de fondation. On a :

- **Pour sols rocheux :**
 - Semelle rigide : diagramme bi-triangulaire avec $p = 2P/A$
 - Semelle flexible : diagramme rectangulaire avec $p = P/A$
- **Pour sols cohérents :**
Dans tous les cas on a un diagramme rectangulaire avec $p = P/A$
- **Pour sols pulvérulents :**
 - Semelle rigide : diagramme rectangulaire avec $p = P/A$

- Semelle flexible : diagramme triangulaire avec $p = 2P/A$



	Semelle	Sol pulvérulent	Sol cohérent	Sol rocheux ou Roche
Répartition réelle	Rigide			
	Flexible			
Répartition de calcul	Rigide			
	Flexible			

Dimensions : Elles sont définies en fonction:

- de la contrainte admissible du sol et des tassements différentiels sous la semelle.
- du non poinçonnement.
- de la transmission correcte des efforts par bielles obliques de compression du béton.
- du bon enrobage des armatures.

5.2.1 LES SEMELLES FILANTES :

Semelles souples (flexibles dans le sens de la largeur A) :

Le dimensionnement de ce type de semelles en plan est effectué en considérant la contrainte que peut supporter le sol de fondation. Sa hauteur peut être dimensionnée par la seule condition de résistance, la hauteur ainsi

obtenue est généralement faible et conduit à une semelle souple.

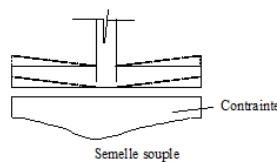
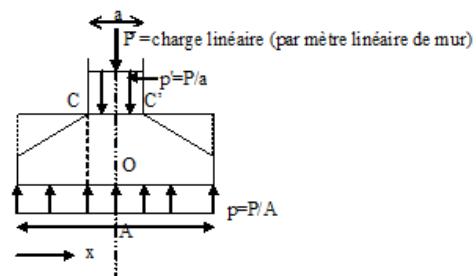


Diagramme de contraintes rectangulaire :



La semelle travaille en porte-à-faux le long des verticales passant par C et C', elle est sollicitée en flexion, le dimensionnement s'effectue comme pour une poutre.

Le moment est maximum au niveau du centre O et l'effort tranchant l'est sous l'arrête du mur (C et C'). On a :

- Sur le débord : $V = px ; M = px^2/2$
- Sous mur : $V = px - p'[x - (A-a)/2] ; M = (px^2/2) - p'[x - (A-a)/2]^2$

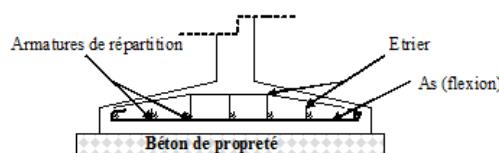
$$V_{\max} = \frac{P}{A} \left(\frac{A-a}{2} \right)$$

$$M_{\max} = \frac{P}{8} (A-a)$$

Diagramme triangulaire : De même on aura :

$$V_{\max} = \frac{P}{A} \left(\frac{A-a}{2} \right)$$

$$M_{\max} = \frac{P}{12} \left(1 - \frac{3a}{2A} \right)$$



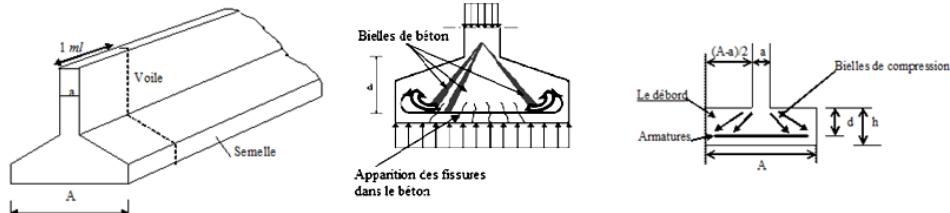
Semelles rigides

Si en revanche, la semelle est rigide c'est à dire que sa hauteur utile d est supérieure à la moitié de son débord (différence de la largeur de la semelle A et de la largeur de l'élément de structure a), dans ce cas on utilise au mieux toute la surface de contact de la semelle et on peut considérer que la transmission de la charge de l'élément de structure (poteau ou voile) se fait par une succession de bielles équilibrées par la réaction du sol et des armatures de traction situées en partie inférieure de la semelle.

Et conformément au **CBA 93**, on utilise la « **méthode des bielles** », basée sur l'équilibre statique d'une bieille de béton. La méthode des bielles permet de déterminer facilement la hauteur de la semelle et les armatures nécessaires.

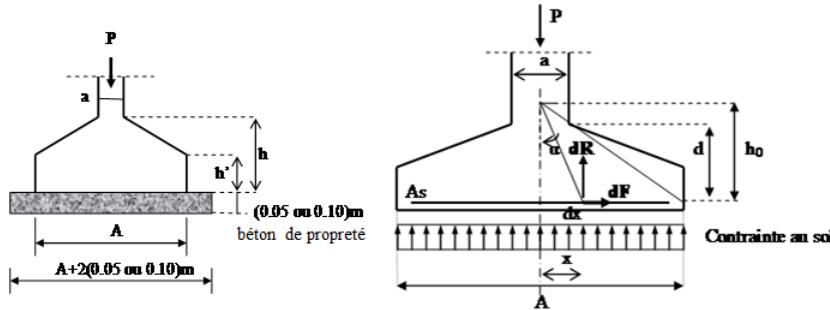
Elle est d'usage courant depuis de nombreuses années et permet de calculer la plupart des semelles de fondations sur sol (ou sur pieux) rencontrées dans les structures des bâtiments.

Elle consiste à supposer que les charges appliquées aux semelles par les points d'appui (murs ou poteaux) sont transmises au sol (ou aux pieux) par les bielles obliques ; l'obliquité de ces bielles détermine à la base des semelles des efforts de traction qui doivent être équilibrés par des armatures.



Semelle rigide : $(A - a) / 4 \leq d$.

Soit une semelle de largeur égale à A soumise à une charge par unité de longueur et supposons que la contrainte du sol est constante (cas de la figure suivante).



Les bielles de béton passent par le point défini par : $A/h_0 = (A-a)/d$

La réaction du sol sur une tranche dx 1m est égale à :

$dR = pdx = (P/A) dx$; dR se décompose en une compression de la bielle et une traction de l'armature $dF = dR x / h_0 = (P/A) (x/h_0) dx$. En intégrant, on trouve :

$$F_x = \int_x^{A/2} dF = (A^2/4 - x^2) \frac{P}{2Ah_0} .$$

En remplaçant h_0 par $Ad/(A-a)$, on aura F_{max} pour $x = 0$:

$$F_{max} = \frac{P(A-a)}{8d} .$$

Si on prend $d = \frac{A-a}{4}$ on aura $F_{max} = P/2$.

De même si la contrainte réelle n'est pas constante on démontre pour :

Le cas du diagramme bi-triangulaire :

$$F_{max} = \frac{P(A-a)}{6d}$$

Le cas du diagramme triangulaire :

$$F_{max} = \frac{P(A-a)}{12d}$$

Adhérence Acier-Béton :

Pour As égale à n barres de diamètre \emptyset on a :

$$dF = \tau n \pi \emptyset dx = (P/A) (x/h_0) dx \text{ ce qui donne : } \tau_{max} = \frac{P(A-a)}{2An\pi\emptyset}$$

Poinçonnement :

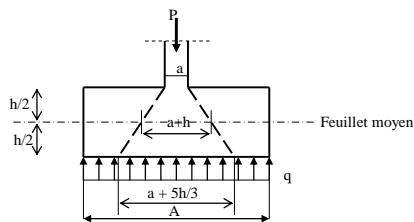
Lorsque la semelle est de faible hauteur et le sol soumis à des contraintes importantes, le voile peut poinçonner la semelle provoquant une rupture suivant une bielle de 45° (simplification).

On vérifie la contrainte de poinçonnement τ avec la charge suivante :

$$P_1 = P \left(1 - \frac{a+5\sqrt{3}}{A} \right)$$

La contrainte vaut : $\tau = P_1/2h$; puisque le périmètre est égal à $2h$ et P_1 est une charge par unité de longueur de semelle.

Si cette contrainte de cisaillement est inférieure au cisaillement limite de poinçonnement réglementaire, on peut se dispenser de mettre des verticales. Dans le cas contraire on placera des armatures transversales de section égale à : P_1/σ_s .

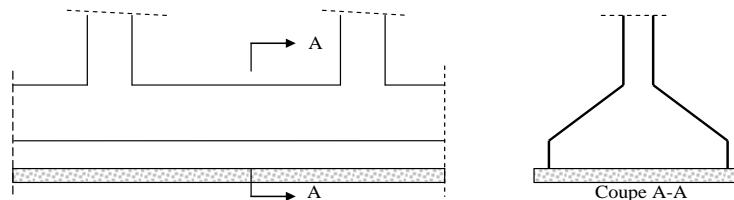
**Dispositions constructives :**

- o L'ancre des armatures, s'il ne peut être réalisé par des barres droites, il est nécessaire de prévoir des ancrages courbes qui pourront être des crochets éventuellement munis de ligatures. L'emploi d'ancre avec retour d'équerre est interdit.
- o Les armatures verticales, lorsqu'elles sont comprimées, doivent être prolongées jusqu'à la base de la semelle. Si elles sont tendues ; elles doivent être munies de retours.
- o Pour un mur très important, on peut le faire reposer sur la semelle par l'intermédiaire d'un libage (raidisseur) qui permet de répondre aux légers tassements différentiels (éventuels).
- o S'il existe une grande ouverture au-dessus du libage, il va travailler donc comme une poutre chargée de bas en haut et il doit être ferraillé en conséquence.

Remarque : Dans le cas d'une fondation rigide, il n'y a pas lieu de vérifier le béton comprimé, ni de prévoir des armatures transversales (d'effort tranchant).

Semelles filantes sous poteaux :

La semelle continue peut être plus ou moins rigide. Généralement, elle est surmontée par une poutre de rigidité qui répartit les efforts concentrés transmis par les poteaux.



La poutre peut être de hauteur constante ou munie de goussets. Cette disposition est plus rationnelle, puisque les moments de flexion maximaux se produisent sous les poteaux, mais de nombreux constructeurs préfèrent la première solution, qui est plus coûteuse en matériau mais plus simple à réaliser (du point de vue coffrage et ferraillage) donc plus économique en main d'œuvre.

Le problème principal de ce genre d'ouvrage est la détermination de la répartition de la réaction du sol sous la semelle ; la solution de ce problème n'est pas connue.

- Transversalement, ce qui a été présenté concernant les poutres continues sous voiles reste valable ;
- Longitudinalement, la répartition des contraintes dépend de la rigidité longitudinale de la fondation, de la distance entre poteaux et de la nature du sol. Cette répartition doit être telle que la déformée de la fondation et celle du sol coïncident sous l'action de l'ensemble des efforts ; ce problème ne peut se résoudre que par approximations successives.

Si la semelle-poutre a une très grande inertie, on peut la considérer comme peu déformable par rapport aux déformations du sol et la semelle sera calculée comme une poutre infiniment rigide en considérant les forces à gauche ou à droite, sinon elle est étudiée comme une poutre sur sol élastique.

En pratique, on peut classer les semelles continues en calculant leurs longueurs élastiques.

$$\text{Longueur élastique : } l_e = \sqrt[4]{\frac{4EI}{KA}}$$

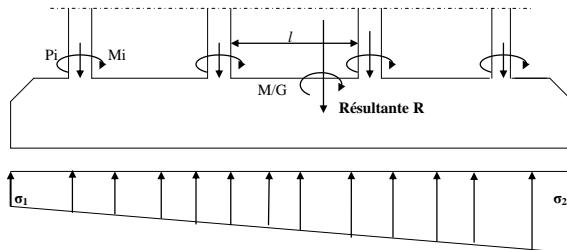
I = Moment d'inertie de la semelle, E = Module d'élasticité du béton.

A = Largeur de la semelle, K = coefficient de raideur du sol (module de réaction du sol) ou coefficient de Westergaard.

Caractéristiques du sol	Composition du sol	K (MPa ou MN/m ²)
faible densité	Vase, argile humidifiée, sable lâche.	1 à 5
densité moyenne	Sable tassé, gravier rapporté, argile humide	5 à 50
Dense	Sable et gravier fortement tassé, cailloux, argile peu humide, marne	50 à 100
très dense	Argile sablonneuse tassée artificiellement, argile dure.	100 à 200
Dur	Rocher fissuré calcaire, grès, sol gelé	200 à 1000
Rocheux	Roche dure	1000 à 15000
Artificiel	Fondations sur pieux	50 à 150

Tableau donné par H.THONIER [source A.GREKOW et al. 1964]

- Si la longueur entre poteaux l est $\leq (\pi/2) I_e$. on supposera alors une répartition trapézoïdale (ou triangulaire) des contraintes sur le sol, donc poutre rigide.



La largeur de la semelle de fondation :

$$A = \frac{\sum P_i}{qL}, \text{ (} L \text{ étant la longueur de la fondation)}$$

Dans le sens longitudinal, cette semelle continue est considérée comme une poutre renversée continue avec les poteaux comme appuis soumises aux contraintes du sol, d'où des armatures supérieures (moments positifs en travée) et des armatures inférieures (moments négatifs sur appuis).

Avec :

$$\sigma_{1,2} = \frac{R}{AL} \pm \frac{M_G}{I} \times \frac{L}{2}$$

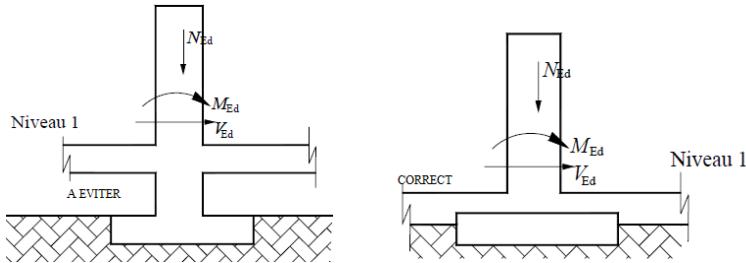
- Si $l > \frac{\pi}{2} \times l_e$ la fondation filante est étudiée comme une poutre sur sol élastique. Plusieurs méthodes sont proposées mais dont le principe est le même, nous citerons à titre d'exemple les méthodes : Simvouliki ; Flamant et westergaard ou des logiciels.

Pour le calcul dans le sens de la largeur de la fondation, les résultats de la semelle continue sous mur restent valables. Seulement il faut considérer que l'effort vertical (réaction du sol) intéressant une tranche de la semelle est variable (rigidité relative de la semelle, nature du sol).

5.2.2 SEMELLES ISOLÉES :

Semelles sous poteaux, rectangulaires (de dimensions A.B avec $A \leq B$) ou carrées ($A = B$), soumises soit à un effort normal centré, soit en plus de l'effort normal à des moments (efforts transmis par la superstructure de l'ouvrage).

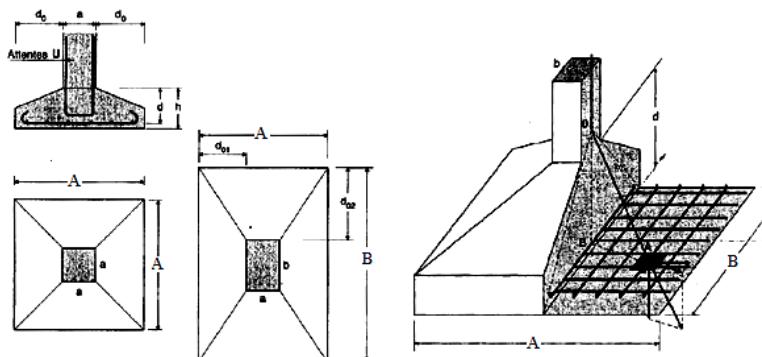
Dans tous les cas des semelles, il faut éviter l'utilisation de poteaux courts entre la face supérieure de la semelle et la face inférieure de la poutre de liaison ou chaînage. En effet, des poteaux courts auraient comme point faible leur résistance au cisaillement, à laquelle correspond une ruine fragile. On placera donc la face inférieure des poutres de liaison ou chaînages en dessous de la face supérieure de la semelle.



Semelles soumises à un effort centré :

La décomposition des forces transmises par les bielles donne des forces horizontales de traction équilibrées par des armatures disposées à la partie inférieure de la semelle, et des réactions du sol verticales et uniformes. L'hypothèse d'une distribution linéaire des réactions du sol suppose que la semelle est peu déformable vis-à-vis du sol d'assise. On admet que cette condition est pratiquement réalisée si :

$$\frac{A-a}{4} \leq d_y \leq A-a \quad \text{Ou} \quad \frac{B-b}{4} \leq d_x \leq B-b$$



Dans le cas général, on choisit les dimensions de la semelle de telle sorte qu'elle soit homothétique du poteau ($A/B = a/b$; a et b dimensions du poteau et $a \leq b$).

Avec le même débord on a : $A - a = B - b$

On doit avoir : $AB \geq P/q$ (P : force transmise par le poteau).

On traitera le cas de la semelle rigide. **Le calcul d'une semelle flexible est mené comme traité précédemment.**

On distingue deux hauteurs utiles d_x et d_y qui valent en satisfaisant la condition d'inclinaison de 45° de la bielle moyenne :

$$d_y \geq (A-a)/4 ; d_x \geq (B-b)/4 ; \text{ avec } |d_x - d_y| = (\phi_x + \phi_y)/2$$

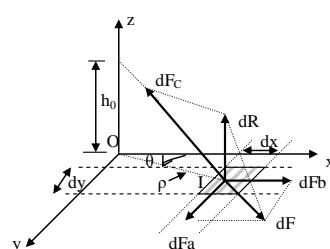
ϕ_x et ϕ_y étant les diamètres respectifs des aciers dans la direction x et y .

La hauteur totale de la fondation devant vérifier :

$$h \geq \text{Max}[d_x; d_y] + 0.05 \text{ m}$$

Si on opte pour une semelle rigide (méthode des bielles) et en admettant un calcul successif dans chacune des deux directions.

Considérons un élément de la semelle, de dimensions dx et dy et de centre $I(x, y)$.



Si σ est la contrainte du sol, $\sigma = \frac{P}{AB}$, la réaction du sol sur élément envisagé a pour valeur :

$$dR = \sigma dx \cdot dy = \frac{P}{AB} dx \cdot dy$$

Décomposons dR en dF_c suivant la bielle et dF dans le plan xoy .

Nous avons (triangles semblables) :

$$\frac{dF}{dR} = \frac{OI}{h_0} \rightarrow dF = \frac{P}{AB} \times \frac{OI}{h_0} dx \cdot dy$$

Décomposons dF parallèlement aux axes Ox et Oy .

$$dF_b = dF \cos \theta = dF \times \frac{x}{OI} = \frac{P}{AB} \times \frac{x}{h_0} dx \cdot dy$$

D'où:

$$F_b = \frac{P}{ABh_0} \int_{-A/2}^{+A/2} dy \int_0^{B/2} x \cdot dx = \frac{P}{ABh_0} \cdot A \cdot \frac{B^2}{8} = \frac{PB}{8h_0}$$

Comme $\frac{B}{h_0} = \frac{B-b}{d_x}$ on a :

$$F_b = \frac{P(B-b)}{8d_x}$$

On peut faire de même pour F_a

$$F_a = \frac{P(A-a)}{8d_y}$$

$$A_{sx} = \frac{P(B-b)}{8d_x \sigma_s} \text{ et } A_{sy} = \frac{P(A-a)}{8d_y \sigma_s} \text{ avec } \sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s}$$

Si la fissuration de la semelle est considérée comme **préjudiciable**, on ajoutera 10 % à la section d'acier calculée et 50 % si la fissuration est considérée comme **très préjudiciable**.

Dans tous les cas, les armatures ne comportent aucun arrêt sur toute la dimension correspondante de la semelle et sont réparties uniformément dans le sens parallèle à leur direction, ce qui conduit à des espacements de l'ordre de :

$\frac{A-(4 \text{ à } 5 \text{ cm})}{Nb_1-1}$ Avec A en cm, pour les armatures parallèles au sens B , Nb_1 étant le nombre de barres;

$\frac{B-(4 \text{ à } 5 \text{ cm})}{Nb_2-1}$ Avec B en cm, pour les armatures parallèles au sens A , Nb_2 étant le nombre de barres.

Elles sont toutes terminées par des crochets normaux ou des ancrages courbes équivalents.

Si l'on veut se dispenser des ancrages courbes ou si l'on veut arrêter des barres, il faut faire un calcul d'adhérence.

En aucun cas la section d'acières principaux ne devra être inférieure à la section minimum fixée à 2 cm². On prévoira des aciers de répartition min ($A_s/4$, 2 cm²).

Le poinçonnement :

Il est vérifié pour le périmètre à mi-feuillet égal à $u = 2a + 2b + 4h$ on doit avoir :

$$\tau = \frac{P}{uh} \leq \tau_{lim} = 0.045 f_{c28}/\gamma_b$$

$$P_1 = PA_{ext}/A_{tot}; A_{ext} = A_{tot} - (4h^2 + ab + 2bh + 2ah); A_{tot} = AB. \quad P_1 \leq 0,045 uh f_{c28}/\gamma_b$$

Semelles soumises à un effort excentré :

Flexion composée : $e_x = M_x / P$ et $M_y = 0$ (moment de service)

Les aciers sont déterminés à partir du moment calculé au nu du poteau dans la direction du moment.

Pour la direction où le moment est nul, les aciers sont calculés par la méthode des bielles.

$$\text{Si } A > 4e_x - a : M_{sx} = \frac{P(A-a)^2}{8(A-2e_x)}$$

$$\blacksquare \quad \text{Si } A < 4e_x - a : M_{sx} = P\left(e_x - \frac{b}{2}\right)$$

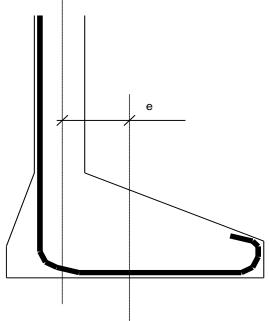
$$\begin{aligned} & -\text{si } 2e_0 < \frac{b'}{2} + 0,35 b : V_{u1} = P_u \frac{\frac{b'}{2} - 0,35 b}{b' - 2e_0} \text{ et } M_{us1} = V_{u1} \frac{\frac{b'}{2} - 0,35 b}{2} \\ & -\text{si } 2e_0 \geq \frac{b'}{2} + 0,35 b : V_{u1} = P_u \text{ et } M_{us1} = P_u (e_0 - 0,35 b) \end{aligned}$$

Flexion déviée : (M_x et M_y)

Le moment par unité de largeur au nu du poteau, suivant chacune des deux directions est variable, suivant la forme de la surface de contact sol-semelle. (Pour plus de détails : voir H THONIER tome1).

Par simplification, on peut considérer une direction à la fois.

Semelles excentrées: Divers cas peuvent être envisagés.



Le poteau est excentré par rapport au CDG de la semelle, cependant la résultante des charges verticales passe par ce CDG.

Les contraintes du sol sont réparties uniformément et le calcul se fait comme pour une semelle sous poteau centré. Seul, le poteau sera calculé en flexion composé. Les armatures du poteau devront être largement ancrées dans la semelle.

Le poteau est excentré par rapport au CDG de la semelle, la résultante des charges est confondue avec l'axe du poteau.

Si la résultante des réactions du sol passe par l'axe du poteau, le calcul peut se faire sans intervention de la flexion composée.

Dans le cas contraire, l'équilibre doit être recherché soit en calculant le poteau en flexion composé, soit en disposant une longrine de redressement.



Figure A

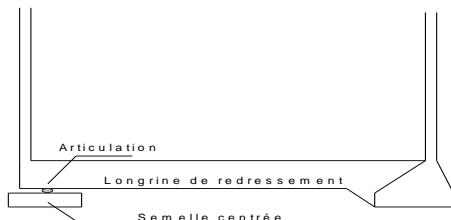


Figure B

Le cas de la figure B s'impose lorsque la structure des poteaux n'assure pas une rigidité suffisante. La semelle de gauche doit donc être désolidarisée du reste et on place une articulation qui ne transmet que la charge verticale, le moment étant repris par la longrine de redressement. La figure A reste la solution la plus simple dans le cas de flexion composée relativement faible et pour des structures considérées comme rigides. C'est le cas la plupart du temps pour les réalisations « tout béton ».

Donc, la poutre de redressement est un levier qui empêche le basculement de la semelle déportée en prenant appui sur la structure verticale centrale de l'ouvrage considéré.

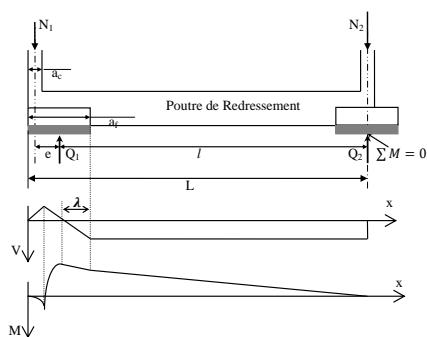
L'équilibre (voir figure suivante) :

$$N_1 + Q_1 + Q_2 + N_2 = 0 \text{ et } N_1(L - a_c/2) - l Q_1 = 0$$

$$Q_1 = \frac{N_1(L - a_c/2)}{l}$$

$$q_{réf} a_f b_f \text{ et } l = L - a_f/2.$$

$$\text{Et } Q_1 =$$



Rappel :

$q_{réf}$ = contrainte de référence. Pour q_u = la contrainte de rupture du sol.

Avec $q_{réf} = \frac{q_u}{2}$ à l'état limite de résistance.

Et $q_{réf} = \frac{q_u}{3}$ à l'état limite de service.

La largeur a_f est calculée comme si la charge était centrée sur la semelle.

$$\text{Et } b_f = \frac{\frac{N_1(L-a_c)}{2}}{(L-a_f/2)a_f q_{réf}}$$

La semelle déportée est calculée comme une semelle filante de longueur a_f , elle est soumise à l'action de la poutre et celle du sol.

Effort tranchant dans la poutre = $Q_1 - N_1$.

$$\text{Position du moment fléchissant max : } \lambda = \frac{Q_1 - N_1}{Q_1/a_f} = \frac{a_f(a_f - a_c)}{2L - a_c}$$

$$\text{Moment d'intensité maximale : } N_1 \left(a_f - \lambda - \frac{a_c}{2} \right) - \frac{Q_1}{2a_f} (a_f - \lambda)^2.$$

$$\text{Moment à la jonction poutre-semelle déportée : } N_1 \left(a_f - \frac{a_c}{2} \right) - Q_1 \frac{a_f}{2}$$

5.3 EXEMPLES DE CALCUL :

1. Soit à dimensionner à l'ELU la semelle filante sous mur suivante.

Données :

Poids volumique du béton armé : 25 kN/m³

Poids volumique du béton de propreté : 22 kN/m³

Poids volumique du sol : 18 kN/m³

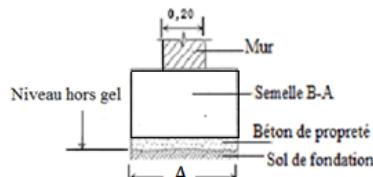
Charge permanente : $G = 0,3 \text{ MN/m}$

Charge d'exploitation : $Q = 0,2 \text{ MN/m}$

Contrainte ultime du sol : $q_u = 1 \text{ MPa}$

Épaisseur du béton de propreté : 10 cm

Niveau hors gel = -1 m.



Solution :

Estimation des dimensions de la fondation :

$$\text{Contrainte de calcul à l'ELU du sol : } q = \frac{q_u}{2} = \frac{1 \text{ MPa}}{2} = 0,5 \text{ MPa}$$

$$N_u = 1,35 G + 1,5 Q = 1,35 \times 0,3 + 1,5 \times 0,2 = 0,705 \text{ MN}$$

$$S = 1 \times a' = \frac{N_u}{q} = \frac{0,705}{0,5} = 1,41 \text{ m}^2$$

Soit $a' = 1,45 \text{ m}$

$$\text{Et } d \geq \frac{a' - a}{4} = \frac{1,45 - 0,2}{4} = 0,31 \text{ m soit } d = 0,35 \text{ m et } h = 0,40 \text{ m}$$

Poids propre de la fondation : $0,40 \times 1,45 \times 25 = 14,5 \text{ kN/m}$

Poids propre du béton de propreté : $0,10 \times 1,45 \times 22 = 3,19 \text{ kN/m}$

Poids propre de la terre sur la fondation :

$$\text{Hauteur} = 1,0 - 0,1 - 0,40 = 0,50 \text{ m}$$

$$\text{Largeur} = 1,45 - 0,2 = 1,25 \text{ m}$$

$$0,50 \times 1,25 \times 18 = 11,25 \text{ kN/m}$$

$$\text{Soit : } N_u = 1,35 \times (0,3 + 0,0145 + 0,00319 + 0,01125) + 1,5 \times 0,2 = 0,744 \text{ MN/m}$$

$$\frac{0,744}{1,45 \times 1} = 0,513 > 0,5 \text{ MPa} \text{ On augmente la largeur A = 1,50 m}$$

$$\text{Et } d \geq \frac{A - a}{4} = \frac{1,5 - 0,2}{4} = 0,325 \text{ m soit } d = 0,35 \text{ m et } h = 0,40 \text{ m}$$

Poids propre de la fondation : $0,40 \times 1,5 \times 25 = 15,0 \text{ kN/m}$

Poids propre du béton de propreté : $0,10 \times 1,5 \times 22 = 3,3 \text{ kN/m}$

Poids propre de la terre sur la fondation :

$$\text{Hauteur} = 1,0 - 0,1 - 0,40 = 0,50 \text{ m}$$

$$\text{Largeur} = 1,5 - 0,2 = 1,3 \text{ m}$$

$$0,50 \times 1,3 \times 18 = 11,7 \text{ kN/m}$$

$$\text{Soit : } N_u = 1,35 \times (0,3 + 0,015 + 0,0033 + 0,0117) + 1,5 \times 0,2 = 0,7455 \text{ MN/m}$$

$$\frac{0,7455}{1,5 \times 1} = 0,497 < 0,5 \text{ MPa ok}$$

Calcul des aciers :

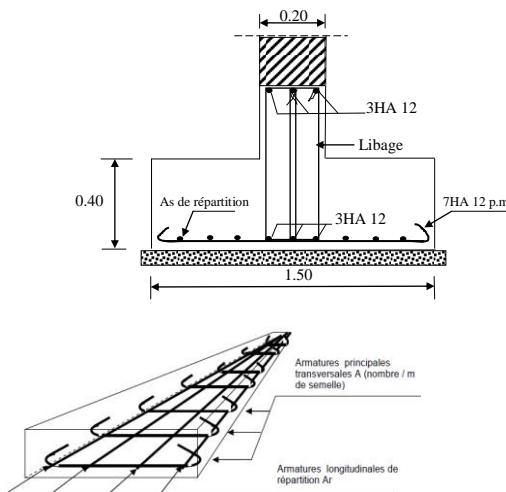
Enrobage de 3 cm.

$$\text{Hauteur utile} = 0,4 - 0,03 - 0,01 = 0,36 \text{ m.}$$

$$A_s = \frac{P_u(A - a)\gamma_s}{8 d f_e} = \frac{0,705(1,5 - 0,2)1,15}{8 \times 0,36 \times 500} 10^4 = 7.32 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

$$\text{Soit 7 HA 12} = 7.92 \text{ cm}^2/\text{mètre.}$$

Le libage sera ferraillé de 3HA 12 à la partie supérieure et à la partie inférieure, et un cadre et un étrier de Ø 6 à raison de 6 par mètre.



2. Exemple de dimensionnement des semelles isolées rigides

Soit à dimensionner à l'ELU la semelle isolée suivante :

Données :

Hauteur hors gel = 0,70 m

Poteau rectangulaire = 0,4 x 0,3 m²

Masse volumique du béton armé : 25 kN/m³ ; Masse volumique du béton de propreté : 22 kN/m³

Masse volumique du sol : 18 kN/m³

Charge permanente : G = 0,167 MN; Charge d'exploitation : Q = 0,383 MN

Contrainte ultime du sol : q_u = 0,9 MPa

Épaisseur du béton de propreté : 10 cm

Solution :

$$N_u = 1,35 \times 0,167 + 1,5 \times 0,383 = 0,8 \text{ MN}$$

$$q = \frac{q_u}{2} = \frac{0,9}{2} = 0,45 \text{ MPa} \rightarrow S = \frac{0,8}{0,45} = 1,78 \text{ m}^2$$

$$B = \sqrt{1,78 \frac{0,4}{0,3}} = 1,54 \text{ m et } A = \sqrt{1,78 \frac{0,3}{0,4}} = 1,155 \text{ m}$$

$$\text{Choix : } A = 1,20 \text{ m et } B = 1,60 \text{ m} \Rightarrow d \geq \frac{1,60 - 0,4}{4} = 0,3 \text{ m}$$

$$\text{Choix : } d = 0,35 \text{ m} \Rightarrow h = 0,35 + 0,05 = 0,40 \text{ m.}$$

$$\text{Poids propre de la fondation : } 1,6 \times 1,2 \times 0,4 \times 25 = 19,20 \text{ kN}$$

Poids propre du béton de propreté : $1,6 \times 1,2 \times 0,1 \times 22 = 4,224 \text{ kN}$

Poids propre de la terre sur la fondation :

$$(1,6 \times 1,2 - 0,3 \times 0,4) \times (0,7 - 0,1 - 0,4) \times 18 = 6,48 \text{ kN}$$

TOTAL = 29,904 kN

$$Nu = [1,35 \times (167 + 29,904) + 1,5 \times 383] \times 10^{-3} = 0,84032 \text{ MN}$$

$$\frac{0,84032}{1,6 \times 1,2} = 0,438 < 0,45 \text{ MPa. Condition vérifiée}$$

Calcul des aciers :

$$d_x = 0,35 \text{ m et } d_y = 0,33 \text{ m}$$

$$A_{sx} = \frac{P_u(B-b)\gamma_s}{8 d_x f_e} = \frac{0,8(1,6-0,4)1,15}{8 \times 0,35 \times 500} 10^4 = 7,888 \text{ cm}^2 \text{ soit } 10 \text{ HA } 10 = 7,85 \text{ cm}^2$$

$$A_{sy} = \frac{P_u(A-a)\gamma_s}{8 d_y f_e} = \frac{0,8(1,2-0,3)1,15}{8 \times 0,33 \times 500} 10^4 = 6,273 \text{ cm}^2 \text{ soit } 8 \text{ HA } 10 = 6,28 \text{ cm}^2$$

Poinçonnement : Pour $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$

$$u = 2(0,3+0,4+2,0,4) = 3,0 \text{ m périmètre.}$$

$$Pu = 0,84032 \text{ MN}$$

$$P_1 \leq 0,045 u h f_{c28} / \gamma_b = 0,045 \cdot 3,0 \cdot 4,25 / 1,5 = 0,9$$

MN OK

