

Chapitre 04 : Fondations profondes

4.1. Introduction

La fondation a pour objet de transmettre au sol les efforts apportés par les éléments de la structure (charges permanentes, charges d'exploitation, actions climatiques) et reçoit les actions ascendantes du sol. Toutes ces actions constituées un système de force en équilibre.

La transmission des efforts peut être directe sur fondations superficielles (semelles isolées, continues ou radiers) ou être assurée par fondations profondes (pieu battu ou pieu foré).

La fondation profonde (Figures 4.1, 4.2 et 4.3) est conçue pour transmettre des efforts au sol environnant sur une profondeur importante en général 10 fois le diamètre ($D/B > 10$). Il s'agit de fondations sur puits ou sur pieux. Ainsi, suivant la profondeur du bon sol D , ou la profondeur d'encastrement de la fondation dans le sol, et la largeur de fondation B , on procède à la mise en place des fondations suivante :

- $\frac{D}{B} \leq 4$ à 5 : Fondations superficielles qui regroupent les semelles sous mur, les semelles isolées, les semelles continues (filantes) et les radiers simples et généraux.

- $4 < \frac{D}{B} \leq 10$: Fondations semi-profondes (sur puits).

- $\frac{D}{B} > 10$: Fondations profondes (sur pieux).

Nous intéressons dans ce chapitre au deuxième et troisième type de fondations.



Figure 4.1. Tête du pieu après le coulage du béton. Figure 4.2. Pieux de piles de pont.



Figure 4.3. Fondation profonde.

4.2. Facteurs de choix du type de fondation

Le choix du type de fondation dépend de :

- *La nature de l'ouvrage à fonder* : pont, bâtiment d'habitation, bâtiment industriel, soutènement,.....
- *La nature du terrain* : connaissance du terrain par sondage et définition des caractéristiques.
- *Le site* : urbain, campagne, montagne, bord de mer,.....
- *La mise en œuvre des fondations* : terrain sec, présence d'eau,.....
- *Le type d'entreprise* : matériel disponible et compétences,.....
- *Le cout des fondations* : facteur important mais non décisif.

4.3. Conseils pour les fondations

Avant de réaliser les fondations, les conseils suivants doivent être prendre en considération :

- Ne jamais oublier que le séisme arrive par le sol puisque la terre tremble,
- Toujours rechercher le bon sol pour l'assise des semelles,
- Les poteaux sont à liasonner par un réseau bidirectionnel de longrines,
- Eviter les sols lâches et les remblais qui amplifiant l'effort sismique,
- Eviter les terrains gorgés d'eau et les sols formés de grains fins et de même diamètre,

4.4. Types de fondations profondes

4.4.1. Fondations sur puits

Un puits de fondation est un gros pilier armé ou non, prenant appui sur le sol résistant à une profondeur supérieure à 2 m. Il reçoit de forte charge.

4.4.1.1. Choix d'une fondation par puits

La fondation semi-profonde ou sur puits est choisie si :

- La couche superficielle présente une résistance insuffisante pour équilibrer les charges.

- Les charges sont importantes et concentrées.
- Les puits sont moins coûteux que le radier et les semelles massives.
- Les conditions particulières du chantier s'y prêtent.
- La rapidité d'exécution est un facteur déterminant.

4.4.1.2. Caractéristiques des puits

Les emplacements des puits sont ceux des éléments de construction les plus chargés :

- Angles extérieurs ou intérieurs ;
- Poteaux en béton armé ;
- Trumeau en béton armé.

Le nombre de puits résulte d'un compromis entre des exigences en conflit :

- Le terrassement et le remplissage en béton pour les puits ;
- La portée et la section des longrines dépendantes des puits.

Le choix de l'entreprise doit concilier à la fois l'aspect technique et l'aspect économique.

La base des puits :

- S'encastre de 20 à 50 cm dans le sol résistant,
- Augmente la surface portante par la disposition dite en « patte d'éléphant », à condition que la cohésion des terres soit satisfaisante.

La force portante dépend des charges et du terrain.

Les puits présentent des sections carrées, rectangulaires ou circulaires suivant le mode de forage (percussion ou rotation), le matériel utilisé et la nature du terrain.

Les dimensions des puits sont les suivantes :

- Les cotés varient de 1 m à 1.50 m ;
- Les diamètres également de 1 m à 1.50 m ;
- La profondeur ne dépasse pas 8 m ;
- La distance entre axe varie de 4 m à 8 m et dépend des efforts à supporter, de la section des puits et des sections des longrines qui filent sur la tête des puits.
- La base des puits s'encastre de 20 à 50 cm dans le sol résistant.

4.4.2. Fondations sur pieux

Un pieu 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. Les trois parties principales d'un pieu sont *la tête*, *la pointe* et *le fût* compris entre la tête et la pointe. La longueur d'ancrage est la longueur de pénétration du pieu dans les couches de terrain résistantes.

4.4.3. Différents types des pieux

On distingue deux grandes classes des pieux :

- Pieux préfabriqués en béton armé et en aciers
- Pieux moulés dans le sol (pieux forés et pieux à tube battu).

4.4.3.1. Pieux préfabriqués

a)- Pieux en béton armé

Ils sont destinés à reporter à grande profondeur (20 m, 40 m et plus) les charges d'une construction. Ils sont regroupés par 2, 3, 4, 5 et plus et réunis en tête par une semelle très épaisse afin de répartir la charge sur chacun des pieux (Figure 4.4).

Ils doivent résister généralement à l'effet des charges verticales et des poussées horizontales ou obliques.

Les pieux en béton armé sont fabriqués sur des aires proches du chantier.

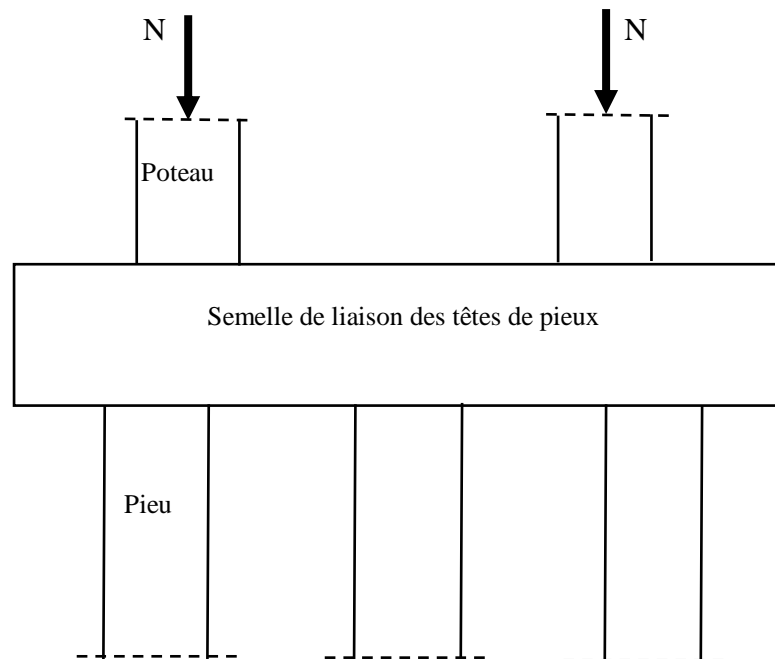


Figure 4.4. Pieux en béton armé.

b)- Pieux en aciers

Les pieux métalliques sont généralement sous forme de tube ou en forme H. les tubes peuvent être ouverts ou fermés à leur base.

4.4.3.2. Pieux moulés dans le sol

a)- Pieux forés

Ce sont des pieux mis en place à l'intérieur d'un trou réalisé préalablement par technique de forage. Les machines utilisables sont multiples et varient suivant le terrain à perforer. Les plus

employés sont soit des tarières (destinées aux sols relativement tendres), soit des machines à roto percussion (destinées aux terrains rocheux).

b)- Pieux à tube battu

Il s'agit d'éléments préfabriqués en acier ou en béton, et qui sont enfoncés dans le sol au moyen d'un dispositif de battage (de principe identique au système vu pour le pénétromètre dynamique). Le battage est poursuivi jusqu'à obtention d'un couple de valeurs (enfouissement-énergie) correspondant à la résistance recherchée. Des variantes plus complexes existent, notamment pour ce qui est des pieux métalliques battus pour lesquels, le tube métallique est battu en place puis remplis de béton. Le tube métallique est parfois arraché au moment du coulage du béton et ne demeure dans le sol que l'outil de pointe. Les capacités portantes de ces pieux sont de l'ordre de 100 tonnes pour des diamètres de 500 à 800 mm.

4.5. Calcul des fondations sur pieux

Le calcul des pieux se fait en tenant compte du frottement latéral qui est fonction de la nature des différents sols rencontrés et de la résistance de pointe qui dépend-elle, de la nature du sol dans lequel est encastré le pieu. Les pieux ne doivent pas être placés à un entraxe inférieur à trois fois leur diamètre. La méthode des bielles reste applicable pour le calcul de ferrailage des pieux.

4.5.1. Semelle de fondation sur deux pieux

La semelle de fondation se comporte comme une poutre reposant sur deux appuis (pieux). Chaque pieu supporte une charge verticale égale à la moitié de la charge totale.

Dans la semelle sur deux pieux, il y a deux bielles de transmission des charges dont l'axe part du collet en un point situé à $b/4$ et aboutit à l'intersection de l'axe du pieu avec le plan des armatures (Figure 4.5).

Pour dimensionner une semelle sur deux pieux on utilise les formules suivantes :

$$b' \geq 1.57 \phi \quad (4.1)$$

$$L \geq b' + \phi + 30 \text{ cm} \quad (4.2)$$

$$b_s \geq \phi + 30 \text{ cm} \quad (4.3)$$

$$h \geq b' / 2 \quad (4.4)$$

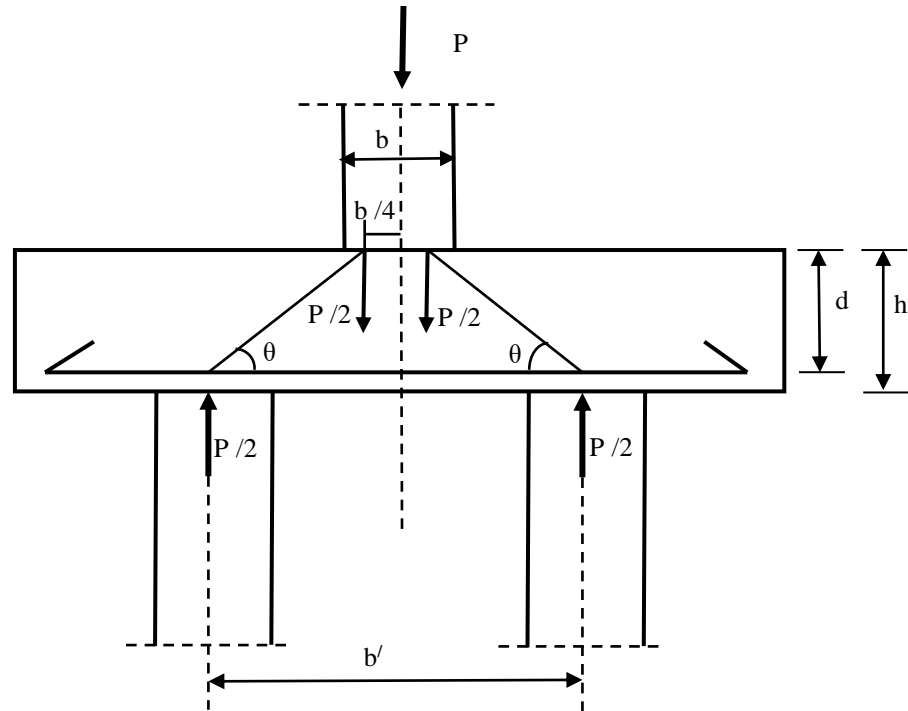


Figure 4.5. Semelle continue sur deux pieux.

L'inclinaison de l'axe des bielles à pour valeur :

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{d}{\frac{b'}{2} - \frac{b}{4}} = \frac{2d}{b' - \frac{b}{2}} \quad (4.5)$$

Pour un bon fonctionnement des bielles, l'angle θ doit être vérifié la condition suivante :

$$45^\circ \leq \theta \leq 55^\circ \quad (4.6)$$

$$\text{Donc : } 1 \leq \operatorname{tg}\theta \leq 1.4 \quad (4.7)$$

Cette condition permet de choisir la hauteur utile d , à partir de l'équation (4.5) comme suit :

$$0.5 \left(b' - \frac{b}{2} \right) \leq d \leq 0.7 \left(b' - \frac{b}{2} \right) \quad (4.8)$$

L'effort dans chaque pieu $P/2$ se décompose en une force de compression P_c dans le béton et une force de traction P_t reprise par les armatures calculées conformément aux relations suivantes :

$$P_c = \frac{P}{2 \cdot \sin\theta} \quad (4.9)$$

$$P_t = \frac{P}{2 \cdot \operatorname{tg}\theta} \quad (4.10)$$

L'équilibre de l'effort P_t nécessite une section d'armatures inférieures (A_i) de :

$$A_i = \frac{P_t}{\sigma_s} = \frac{P}{2\text{tg}\theta \cdot \sigma_s} \quad (4.11)$$

A partir de l'équation (4.1) :

$$2\text{tg}\theta = \frac{4d}{b' - \frac{b}{2}} \quad (4.12)$$

Toutefois, les essais effectués préconisent d'augmenter cette quantité d'acier de 10 %.

Finalement, on remplace (4.12) plus cette indication dans (4.11), on obtient la section d'armature inférieure finale :

$$A_i = \frac{1.10 P \left(b' - \frac{b}{2} \right)}{4. d. \sigma_s} \quad (4.13)$$

Les armatures supérieures sont placées à la partie supérieure de la semelle, de section égale à un dixième de la section des armatures inférieures, soit :

$$A_s = \frac{A_i}{10} \quad (4.14)$$

En plus de ces armatures, on ajoute des armatures horizontales et verticales sous forme des cadres et des épingles reliant les armatures des deux faces.

La section des armatures horizontales et verticales est fixée arbitrairement. Pratiquement le diamètre de ces armatures correspond à des barres égales à 10 ou 12 mm.

Ces armatures ont pour rôle de supporter les efforts de torsion.

Le nombre de ces barres est déduit à partir de leurs espacements, qu'ils sont liés aux conditions suivantes :

$$\text{- Si } b_s \leq \frac{h}{2} \Rightarrow S_v \leq \frac{A_v}{0.006h} \text{ et } S_h \leq \frac{A_h}{0.004h}$$

$$\text{- Si } b_s > \frac{h}{2} \Rightarrow S_v \leq \frac{A_v}{0.003h} \text{ et } S_h \leq \frac{A_h}{0.002h}$$

Avec :

S_v : espacement vertical.

S_h : espacement horizontal.

La Figure 4.6 présente un schéma de ferrailage d'une semelle de fondation sur deux pieux.

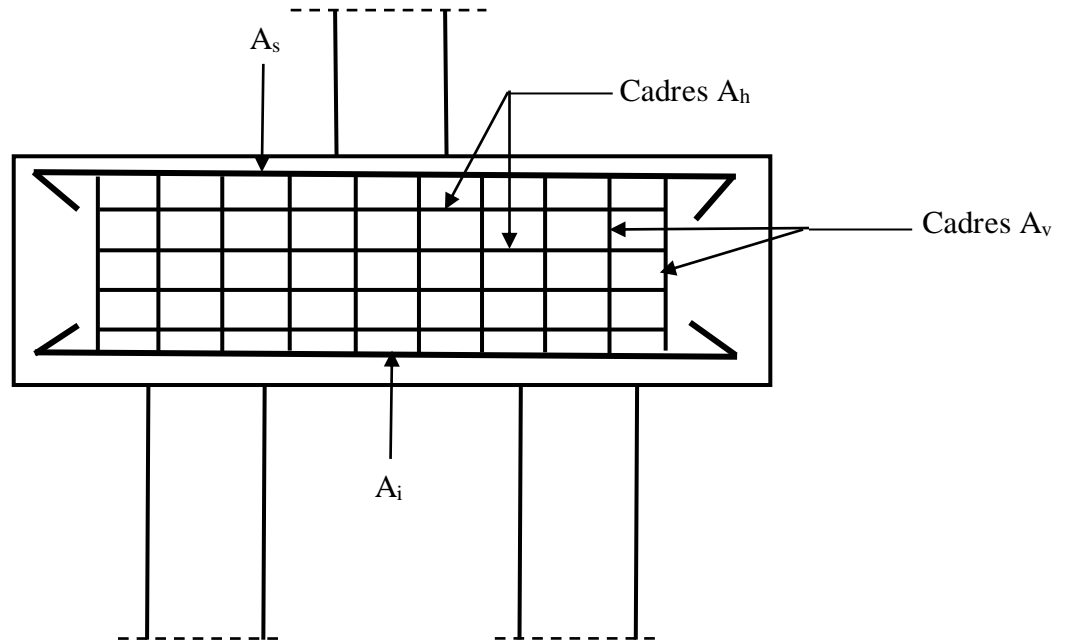


Figure 4.6. Ferrailage d'une semelle de fondation sur deux pieux.

La contrainte de compression dans la partie supérieure des bielles a pour valeur :

$$\sigma_b^s = \frac{P}{a \cdot b \cdot \sin^2 \theta} \quad (4.15)$$

La contrainte de compression dans la partie inférieure des bielles a pour valeur :

$$\sigma_b^i = \frac{P}{2 \cdot S_{\text{pieux}} \cdot \sin^2 \theta} \quad (4.16)$$

A l'état limite ultime, on admet qu'on doit vérifier :

$$\sigma_b^s \leq 0.9f_{c28} \quad (4.16) \quad \text{et} \quad \sigma_b^i \leq 0.9f_{c28} \quad (4.17)$$

On doit également vérifier la contrainte de cisaillement (τ_u) :

$$\tau_u = \frac{P}{2 \cdot b_s \cdot d} \leq 0.10f_{c28} \quad (4.18)$$

4.5.2. Semelle de fondation sur trois pieux

Pour établir le calcul du ferrailage, on admettra que la charge est appliquée au centre de gravité de la semelle. La Figure 4.7 présente une vue en plan d'une semelle sur trois pieux.

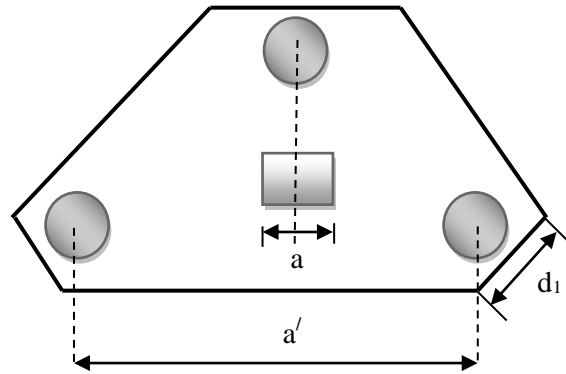


Figure 4.7. Semelle sur trois pieux.

En pratique, pour dimensionner une semelle sur trois pieux on utilise les règles empiriques suivantes :

$$a' \geq 3\phi \quad (4.19)$$

$$h \geq a' / 2 \quad (4.20)$$

$$d_1 \geq (\phi + 0.3) \frac{\sqrt{3}}{3} \quad (4.21)$$

Pour un bon fonctionnement des bielles, l'angle θ doit être vérifié la relation (4.6) ci-dessus.

Dans le cas où les poteaux sont régulièrement disposés, l'inclinaison des bielles a pour valeur :

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{2b'\sqrt{3} - b\sqrt{2}}{6 \cdot d} \quad (4.22)$$

Le ferrailage radial est donné par :

$$A_d = \frac{P \cdot b' \cdot \sqrt{3}}{36 \cdot d \cdot \sigma_s} \left(1 - \frac{b^2}{3 \cdot b'^2} \right) \quad (4.23)$$

Le ferrailage en cerces est déduit à partir du ferrailage radial selon l'expression suivante :

$$A_c = A \cdot \sqrt{3} \quad (4.24)$$

Vérification de la contrainte de compression dans les bielles :

- à la partie supérieure des bielles :

$$\sigma_b = \frac{P}{a \cdot b \cdot \sin^2\theta} \leq 0.9f_{c28} \quad (4.25)$$

- à la partie inférieure des bielles :

$$\frac{P}{3 \cdot S_{\text{pieux}} \cdot \sin^2\theta} \leq 0.9f_{c28} \quad (4.26)$$

4.5.3. Semelle de fondation sur quatre pieux

Nous examinerons le cas le plus courant d'une semelle carrée sous poteau carré de côté a .

La méthode donnée ci après pourrait être généralisée au cas d'un poteau rectangulaire reposant sur une semelle rectangulaire.

On considère que les charges sont transmises aux pieux par des bielles du béton, dont la partie inférieure est constituée par une section d'un pieu (S_{pieu}) et la partie supérieure par un carré de section égale au quart de la section du poteau ($b^2/4$) (Figure 4.8).

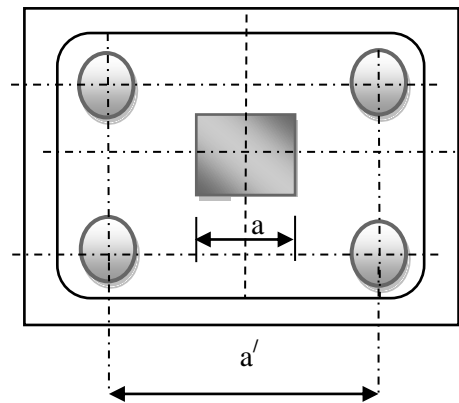


Figure 4.8. Semelle sur quatre pieux.

L'inclinaison des bielles est de :

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{d}{a' \frac{\sqrt{2}}{2} - a \frac{\sqrt{2}}{4}} = \frac{d\sqrt{2}}{a' - \frac{a}{2}} \quad (4.27)$$

Comme $45^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ et $1 \leq \operatorname{tg}\theta \leq 1.4$, alors la hauteur utile d est donnée par :

$$0.7 \left(a' - \frac{a}{2} \right) \leq d \leq a' - \frac{a}{2} \quad (4.28)$$

Chaque pieu supporte le quart de la charge $\left(\frac{P}{4}\right)$, ce qui donne une force de traction dirigée suivant la diagonale, d'intensité égale à :

$$P_t = \frac{P}{4 \cdot \operatorname{tg}\theta} \quad (4.29)$$

On remplace la formule de $\operatorname{tg}\theta$ (4.27) dans (4.29), on trouve :

$$P_t = \frac{\sqrt{2} \cdot P \cdot \left(a' - \frac{a}{2} \right)}{8 \cdot d} \quad (4.30)$$

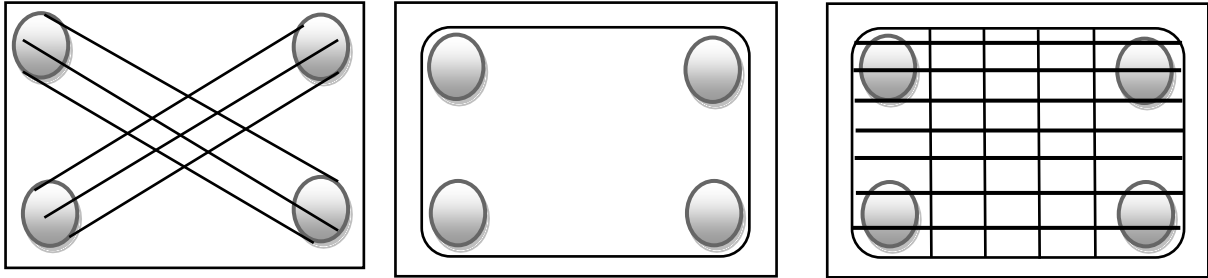
La force P_t peut être décomposée suivant les deux côtés du carré dans le plan horizontal.

$$P_{t1} = P_{t2} = \frac{P_t}{\sqrt{2}} = \frac{P \cdot \left(a' - \frac{a}{2} \right)}{8 \cdot d} \quad (4.31)$$

L'effort de traction dirigé suivant la diagonale sera équilibré par une section d'acier diagonale :

$$A_d = \frac{P_t}{\sigma_s} = \frac{\sqrt{2} \cdot P \cdot \left(a' - \frac{a}{2}\right)}{8 \cdot d \cdot \sigma_s} \quad (4.32)$$

Le ferrailage de la semelle sur quatre pieux pourra être disposé selon l'une des trois configurations présentées sur la Figure 4.9.



(a) : Ferrailage en diagonale.

(b) : Ferrailage en cerce.

(c) : Ferrailage en quadrillage.

Figure 4.9. Dispositions de ferrailage d'une semelle sur quatre pieux.

Les trois configurations présentées sur la Figure 4.9, sont équivalentes d'un point de vue consommation en aciers et aussi d'un point de vue charge ultime.

Dans la Figure 4.9(c), on peut équilibrer environ 80% de l'effort par des cerces et 20% par le quadrillage central.

On peut également utiliser un ferrailage mixte (Figure 4.10), composé de cerces de section A_c équilibrant une proportion α de l'effort et l'autre proportion soit $(1 - \alpha)$ étant équilibrée par des barres diagonales de section A_d , disposées suivant la diagonale et convenablement ancrées à leurs extrémités, avec α compris entre 40% et 60%.

Dans ce cas, on a :

$$A_c = \frac{\alpha \cdot P \cdot \left(a' - \frac{a}{2}\right)}{8 \cdot d \cdot \sigma_s} \quad (4.33)$$

$$A_d = \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha}\right) \cdot \sqrt{2} \cdot A_c \quad (4.34)$$

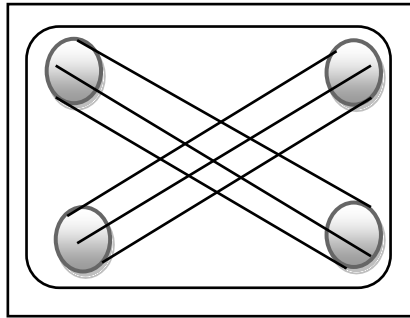


Figure 4.10. Ferrailage mixte d'une semelle sur quatre pieux.

Vérification de la contrainte de compression dans les bielles :

- à la partie supérieure des bielles :

$$\sigma_b = \frac{P}{a^2 \cdot \sin^2 \theta} \leq 0.9f_{c28} \quad (4.35)$$

- à la partie inférieure des bielles :

$$\frac{P}{4 \cdot S_{\text{pieux}} \cdot \sin^2 \theta} \leq 0.9f_{c28} \quad (4.36)$$