CHAPITRE 2 : FONDATIONS

Plan du chapitre

1. ROLES DES FONDATIONS
2. FONCTIONNEMENT DES FONDATIONS
3. TYPES DE FONDATIONS
4. FONDATIONS SUPERFICIELLES (isolés et continues)
5. RADIERS
6. FONDATIONS PROFONDES
7. PATHOLOGIE DES FONDATIONS

Références :

(
http://www.cours-genie-civil.com/IMG/pdf/cours_fondations-superficielles1_procedes-generaux-de-construction.pdf
http://www.cours-genie-civil.com/IMG/pdf/cours_fondations-profondes1_procedes-generaux-de-construction-2.pdf
http://www.cours-genie-civil.com/IMG/pdf/Murs_rideaux_procedes-generaux-de-construction.pdf
http://www.cours-genie-civil.com/IMG/pdf/cours_fondations-profondes3_procedes-generaux-de-construction.pdf
http://www.cours-genie-civil.com/IMG/pdf/cours_fondations-superficielles-radiers_procedes-generaux-de-construction.pdf
http://www.cours-genie-civil.com/IMG/pdf/Expose-etudiants_Planchers_Dallages_procedes-generaux-de-construction.pdf

www.cours-genie-civil.com

1. ROLES DES FONDATIONS

I - 1 Définition

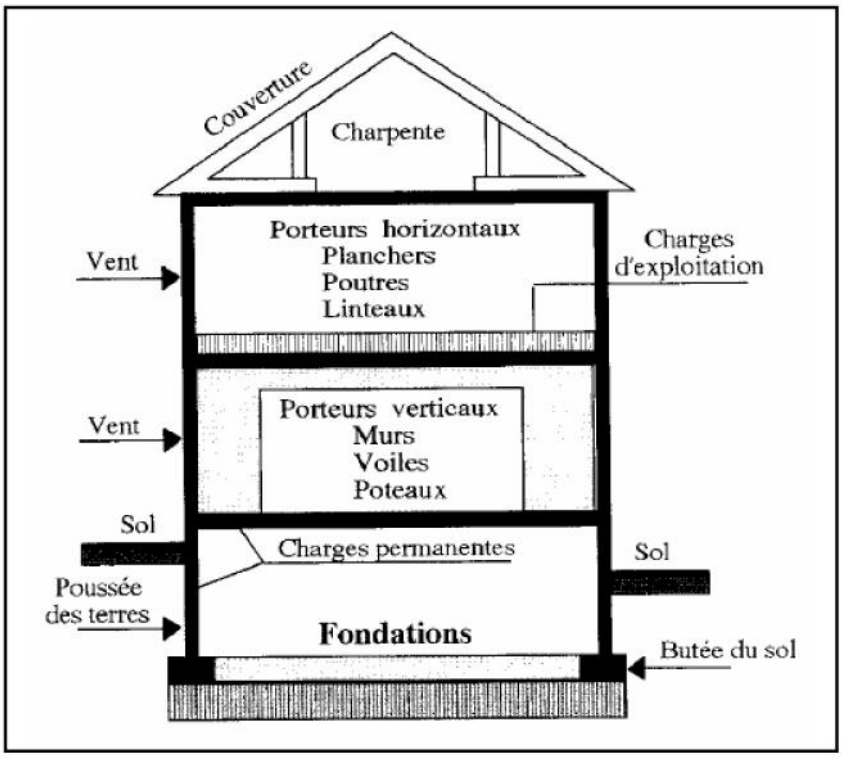
Un ouvrage quelle que soient sa forme et sa destination, prend toujours appui sur un sol d'assise. Les éléments qui jouent le rôle d'**interface entre l'ouvrage et le sol** s'appellent **fondations**. Ainsi, quelque soit le matériau utilisé, sous chaque porteur vertical, mur, voile ou poteau, il existe une fondation.

I – 2 Rôle principal

La structure porteuse d'un ouvrage (voir cours de mécanique chapitre 4) supporte différentes charges telles que :

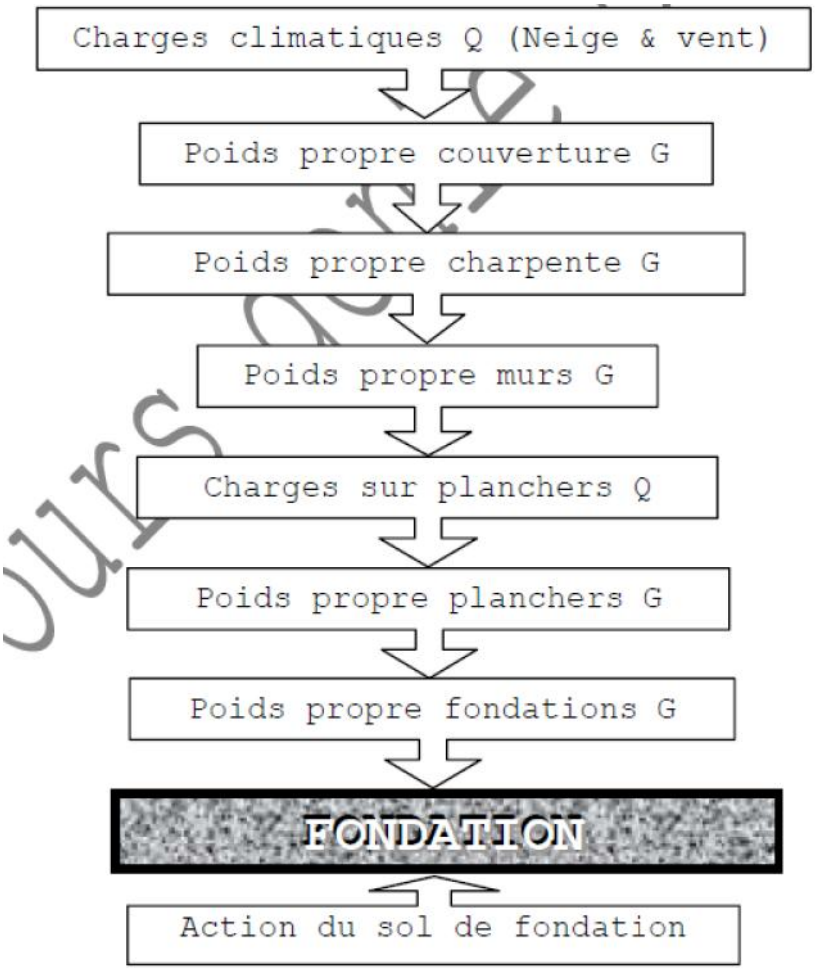
- des **charges verticales** :
  - comme les **charges permanentes** telles que le poids des éléments porteurs, le poids des éléments non porteurs,
  - comme les **charges variables** telles que le poids des meubles, le poids des personnes…, le poids de la neige,

- des **charges horizontales** (ou obliques) :
  - comme des **charges permanentes** telles que la poussée des terres,
  - comme les **charges variables** telles que la poussée de l'eau ou du vent.



La structure porteuse transmet toutes ces charges au sol par l'intermédiaire des fondations.

www.cours-genie-civil.com



Il ne s'agit pas de calculer la charge globale que reprend l'ouvrage mais la charge reprise par chaque fondation. En effet chaque fondation ne reçoit pas la même charge. Cela dépend des éléments porteurs repris. La charge reprise par une fondation se calcule au moyen d'une descente de charges.
Le rôle principal d'une fondation est donc d'assurer la transmission des charges appliquées sur l'ouvrage au sol.

Les critères influant le choix d'une fondation sont donc :
- La qualité du sol.
- Les charges amenées par la construction.
- Le coût d'exécution.

I - 3 Rôles secondaires

1°) La fondation doit **résister** elle-même aux charges et doit être calculée en conséquence.

2°) L'ensemble ouvrage – fondation - sol doit être en **équilibre** stable. Il ne doit pas y avoir possibilité de mouvement.

- **pas de glissement horizontal** : L'adhérence sol – fondation doit empêcher les forces horizontales (poussées du vent, des terres…) de pousser l'ouvrage horizontalement.
- **pas de basculement** : Les charges horizontales ont tendance à faire basculer l'ouvrage car elles créent un moment. Les forces verticales (poids) doivent les contrebalancer.
- **pas de déplacement vertical** : Le sol doit être suffisamment résistant pour éviter l'enfoncement du bâtiment de manière uniforme ou dissymétrique (tassements différentiels entre deux parties solidaires de l'ouvrage) et le bâtiment doit être suffisamment lourd pour éviter les soulèvements dus à l'action de l'eau contenue dans le sol (poussée d'Archimède).

3°) Une fondation doit être **durable.** Toutes les précautions devront être prises dans les dispositions constructives, le choix et l'emplacement des matériaux, ainsi que dans la mise en œuvre.

www.cours-genie-civil.com

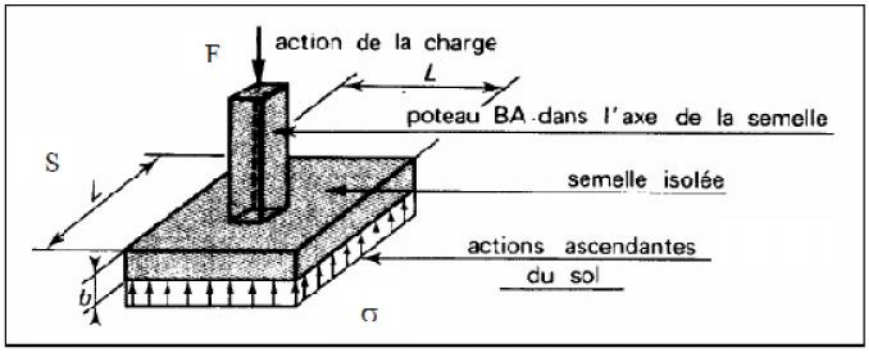
4°) Une fondation doit être **économique.** Le type de fondation, les matériaux employés et la mise en œuvre doivent être le moins coûteux possible.

2. FONCTIONNEMENT DES FONDATIONS

Un mur ou un poteau supporte une partie des charges de l'ouvrage et compte-tenu de ses faibles dimensions, risquent de poinçonner le sol. C'est pour cela que sous un mur et un poteau, on place une fondation qui permet de répartir la même charge mais sur une surface horizontale plus importante et donc de diminuer la pression exercée sur le sol, c'est à dire de diminuer la force exercée sur le sol par unité de surface.

Il faudra toujours s'assurer que la pression exercée par la fondation sur le sol est inférieure à la pression que peut supporter le sol. La pression que peut supporter le sol a été déterminée grâce aux essais de reconnaissance de sol.

La FONCTION d'une FONDATION est de TRANSMETTRE au SOL les CHARGES qui résultent des ACTIONS appliquées sur la STRUCTURE qu'elle supporte.
Cela suppose donc que le concepteur connaisse:
- la capacité portante de la semelle de fondation. Le sol ne doit pas rompre, ni tasser de façon inconsidérée sous la semelle.
- les actions amenées par la structure au niveau du sol de fondation. La semelle doit résister aux actions auxquelles elle est soumise.



Cette pression s'appelle contrainte et est notée σ.

$$\sigma = F/S \qquad \text{(Son unité est le MPa = MN/m}^2\text{)}$$

La pression exercée à la surface du sol entraîne des pressions dans les couches de sol situées en-dessous jusqu'à une certaine profondeur qui varie suivant le type de fondations et la charge appliquée.

3. TYPES DE FONDATIONS

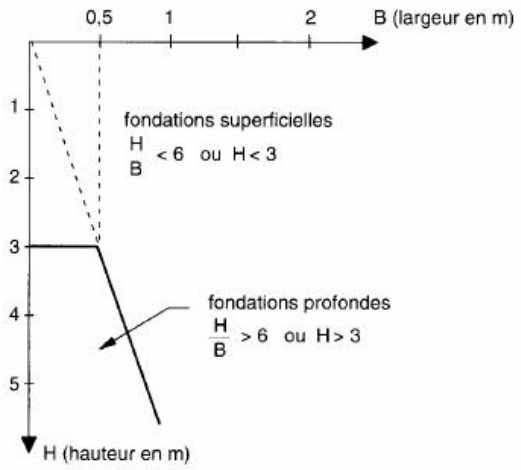
3.1 Types de fondations :

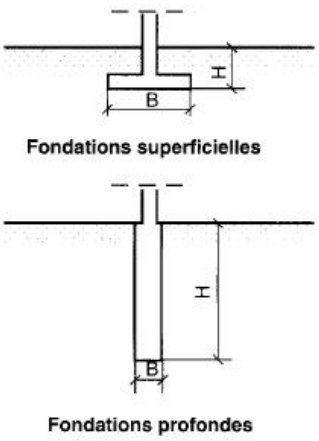
Les deux types de **fondations** sont :

- les fondations **superficielles**,
- les fondations **profondes et spéciales**.

Les fondations sont dites **superficielles** si une des deux conditions suivantes est respectée :
H/L < 6 ou **H < 3 m**
Avec H : profondeur de la fondation et L : largeur de la fondation.

www.cours-genie-civil.com





3.2 Choix des fondations

Le choix du type de fondation dépend :

- du **type d'ouvrage à fonder**, donc des charges appliquées à la fondation (charges différentes pour une maison individuelle et pour une tour),
- de la **résistance du sol**. Il est important de faire une bonne reconnaissance des sols.

. Si la couche superficielle est suffisamment résistante, il sera quand même nécessaire de faire une reconnaissance de sol sous le niveau de la fondation sur une profondeur de deux fois la largeur de la fondation et s'assurer que les couches du dessous sont assez résistantes.

. Si la couche superficielle n'est pas assez résistante, une reconnaissance des sols devra être faite sur une profondeur plus importante. On choisira toujours la fondation la plus économique.

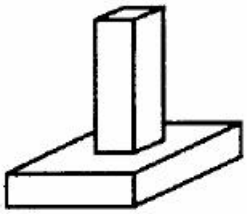
4. LES FONDATIONS SUPERFICIELLES

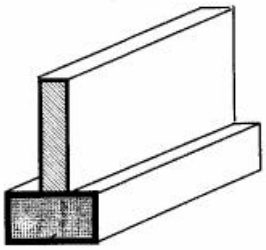
4.1. INTRODUCTION

Les fondations superficielles sont mises en œuvre lorsque la construction peut prendre appui sur une couche de résistance acceptable à faible profondeur par rapport au niveau le plus bas de la construction et non du terrain naturel.

Les fondations **superficielles** sont de trois types :

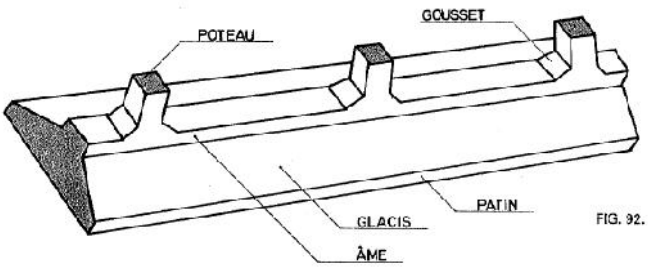
Semelle isolée, placée sous un poteau,





*

semelle filante, placée sous un mur ou plusieurs poteaux rapprochés



www.cours-genie-civil.com

4.2. Les semelles isolées

4.1.1. Définitions - Terminologie

Une fondation superficielle est définie par des caractéristiques géométriques.

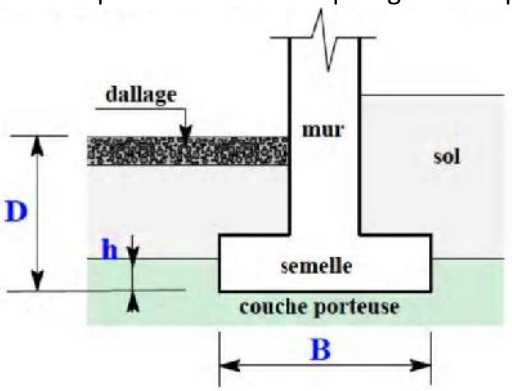


Figure : Coupe verticale sur semelle superficielle

- L: longueur de la semelle ou plus grand côté dune semelle.
- B : largeur de la semelle ou plus petit côté de la semelle.
- semelle circulaire B = 2 R
- semelle carrée B = L
- semelle rectangulaire B < L < 5R
- semelle continue ou filante **:...** L > 5B
- D : hauteur d'encastrement de la semelle. Hauteur minimum au dessus du niveau de la fondation. Si un dallage ou une chaussée surmonte la fondation ceux-ci sont pris en considération dans la hauteur d'encastrement.
- h : ancrage de la semelle. Il correspond à la hauteur de pénétration de la semelle dans la couche porteuse

Elle est aussi définie par le rapport *B/D.* Au delà d'un rapport de 1/6, nous sommes dans le domaine des fondations profondes.

4.1.2. Dimensionnement des fondations superficielles

La surface de la semelle doit être suffisante pour répartir sur le sol, les charges apportées par les porteurs verticaux.

Répartir une force sur une surface, c'est exercer une pression :

$$\text{pression [Pa]} = \frac{\text{Force [N]}}{\text{Surface [m}^2\text{]}}$$

La capacité portante du sol doit être supérieure à la pression exercée par les fondations.

La surface S d'une semelle s'exprime :

$$S\ [\text{mm}^2] \geq \frac{Nu \quad \text{en [N]}}{q \quad \text{en [MPa]}}$$

Nu représente l'effort ultime apporter par l'ouvrage,

q représente la contrainte (capacité portante) du sol.

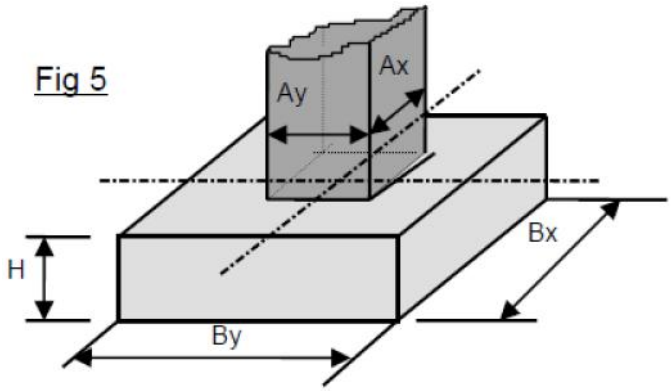
Nature du sol	q - Capacité portante du sol [MPa]
Argile, limons	0,15 à 0,30
Alluvions anciennes, sables, graviers	0,60 à 0,90
Craie	0,90 à 1,00
Calcaire grossier, roches	1,80 à 4,5

www.cours-genie-civil.com

La valeur de q est identifiée par une campagne de reconnaissance de sol (essais en laboratoire et/ou essais in situ).

4.1.2. Dimensions des semelles isolées

Les semelles isolées sont les fondations des poteaux. Leurs dimensions de surface sont homothétiques à celles du poteau que la fondation supporte :



- Semelles rectangulaires :

Homothétie : $\frac{Bx}{By} = \frac{Ax}{Ay}$

Hauteur H:

$$\frac{Bx - Ax}{4} \leq H - 100 \text{ mm} < Bx - Ax$$

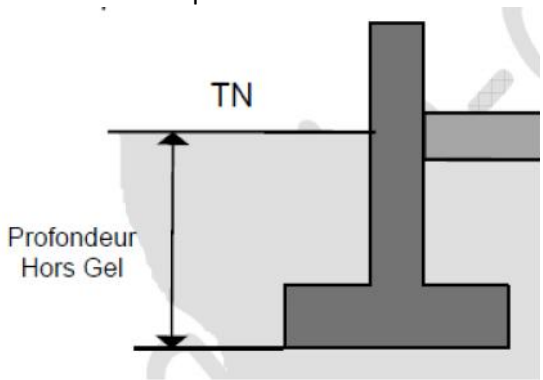
à vérifier dans le plan Y

- Semelles circulaires :

Les semelles sont axées sur le poteau, la hauteur H est définie pareillement, en fonction des diamètres du poteau et de la semelle.

c) Profondeur hors gel des semelles de fondation.

Pour éviter que le sol d'assise des semelles ne soit déstructuré par les cycles de gel et de dégel du sol, le niveau d'assise des fondations doit être descendu à un niveau suffisant : profondeur hors gel.
Cette profondeur varie selon la zone climatique et l'altitude :



www.cours-genie-civil.com

4.3. Formes de semelles isolées

2 Choix des formes des semelles isolées (fig. 47)

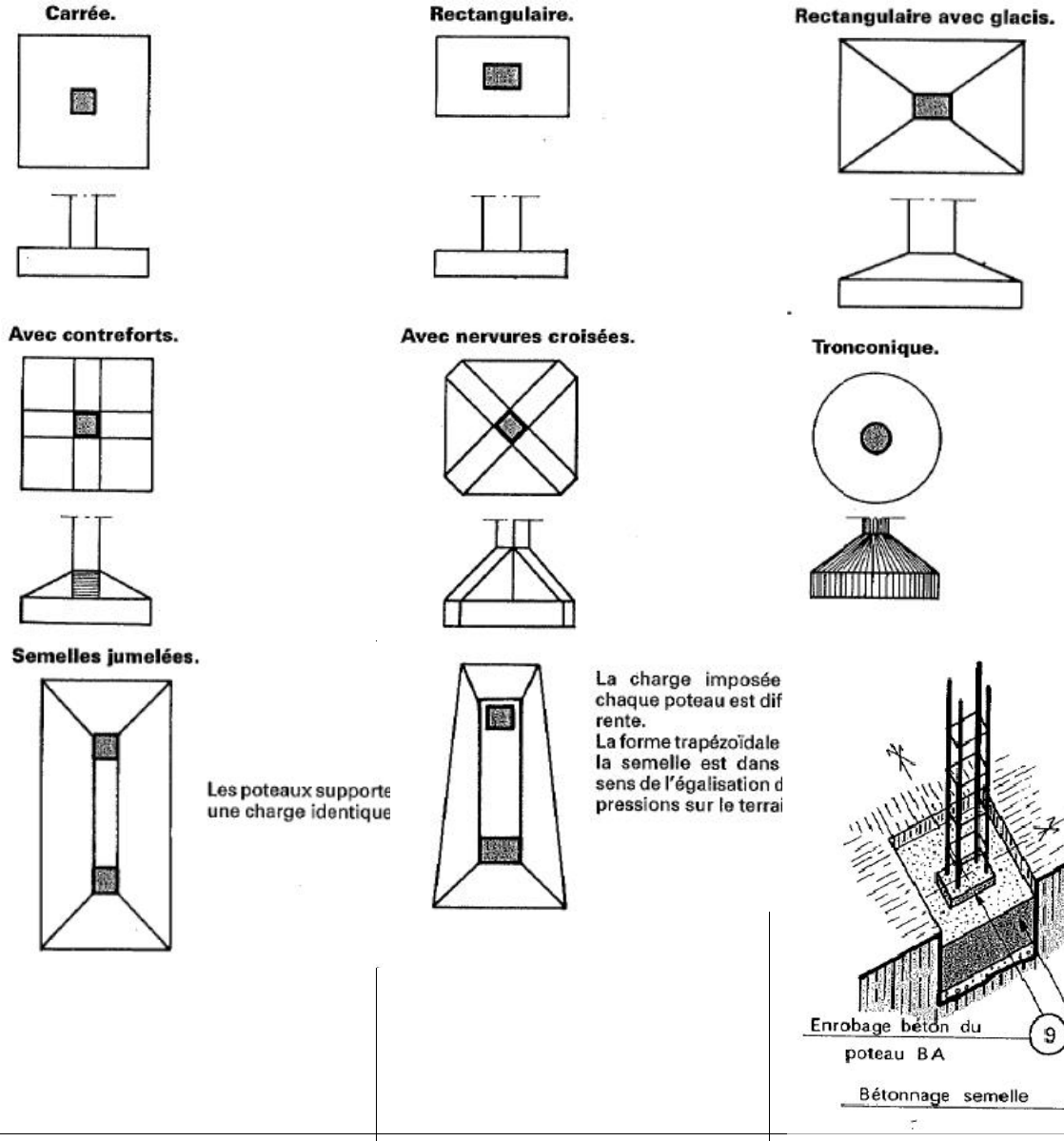
2.1 Les critères du choix sont d'ordres technique et économique et relatifs :

- à la charge et à l'emplacement de la semelle ;
- au terrassement et à la nature du terrain (argile ou rocher) ;
- à la réalisation ou non d'un coffrage ;
- au façonnage facile des aciers ;
- à la quantité et à la facilité de mise en place du béton.

2.2 Les formes les plus **simples** sont les **plus courantes :**

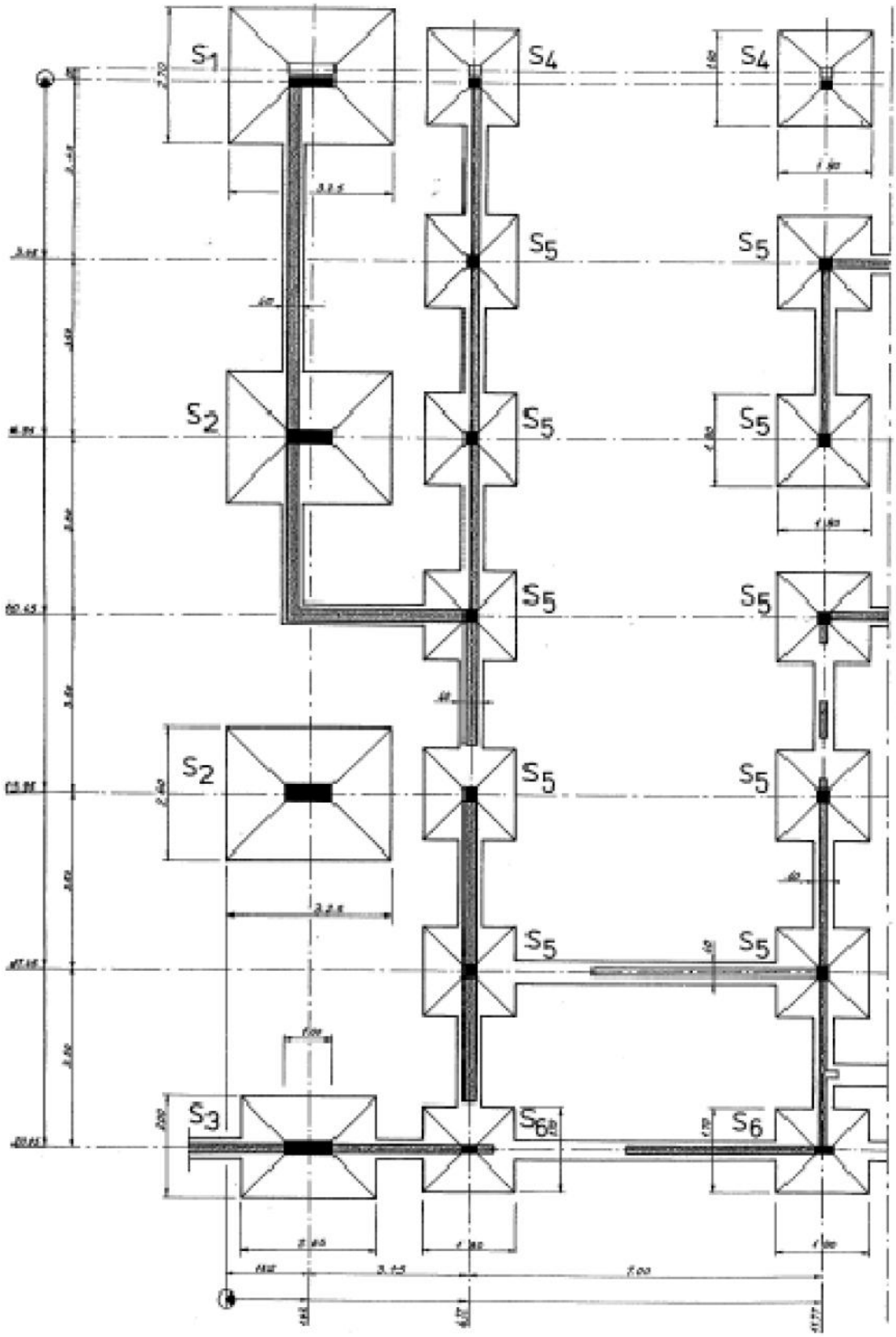
- semelles de forme carrée ou rectangulaire ;
- à section constante (sans glacis).

2.3 La hauteur des semelles est au moins égale à $h_r = 5\text{ cm} + \frac{B_x - b_x}{4}$ (voir *fig.* 48).



www.cours-genie-civil.com

VUE EN PLAN DES SEMELLES.



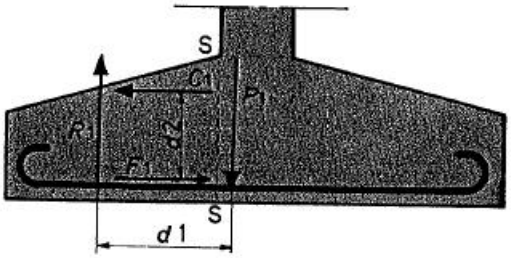
VUE EN PLAN DES SEMELLES.

www.cours-genie-civil.com

DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

FIG. 50.
Effet du poinçonnement.
Translation verticale.

Rotation provoquée par le couple de valeur $R_1 \times d_1$



Condition d'équilibre $R_1 \times d_1 = F_1 \times d_2$

Détermination de la section d'acier

On utilise :

- *la méthode des bielles* (voir formule p. 68).
  C'est la méthode la plus utilisée ;
- *la méthode des moments* : $A_S = \dfrac{Mu}{Z.\overline{\sigma}_s}$

A_s : *section d'acier*
Mu : *moment ultime par rapport à l'axe*
Z : *bras de levier*
$\overline{\sigma}_s$: contrainte de calcul des aciers

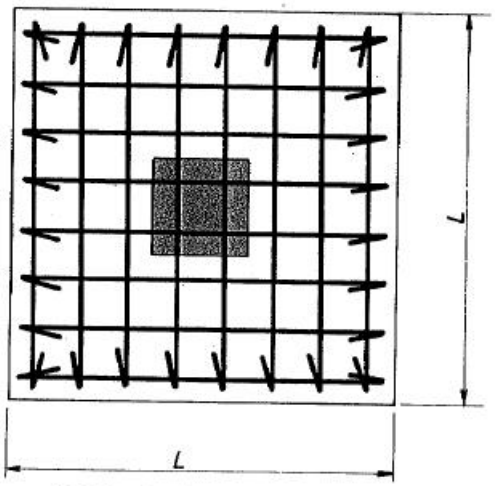


FIG. 58. – **Quadrillage régulier.**

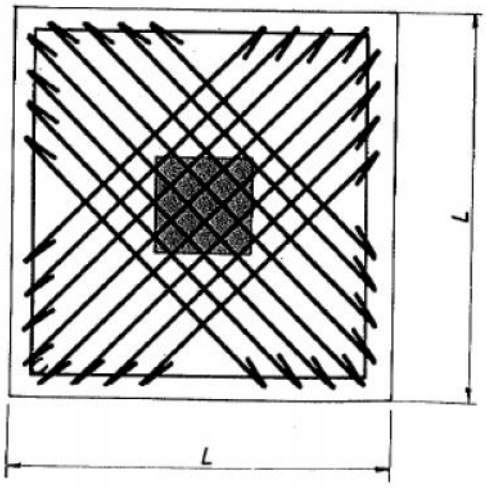
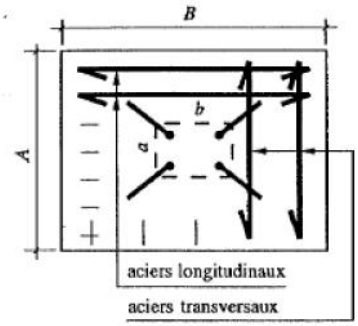


FIG. 59. – **Barres porteuses disposées en X.**

www.cours-genie-civil.com



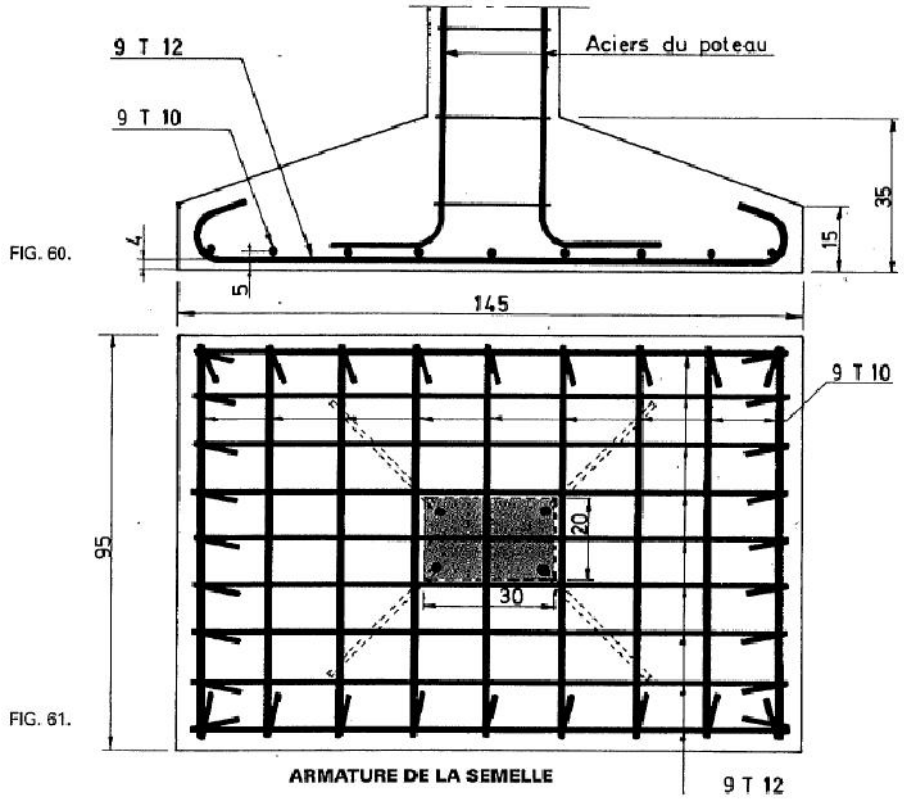


FIG. 60.

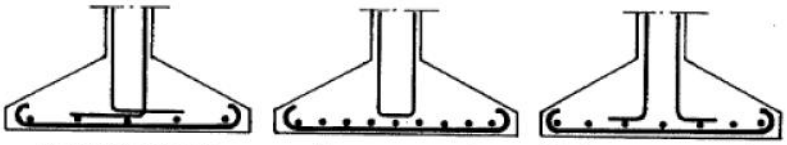
FIG. 61.

ARMATURE DE LA SEMELLE

4 Étude de cas rencontrés

Type de semelle	Problème posé	Moyens possibles
Semelle carrée ou rectangulaire	Assurer la liaisoon du poteau avec la semelle : ancrage – pour un poteau intérieur – pour un poteau de rive – pour un poteau d'angle	Aciers du poteau recourbés dans la masse du béton de la semelle. Retours de longueur 35 ∅ dans le cas avec moment (D.T.U. 13,12)
Semelle tronconique	Greffer un pilier sur une tête de puits cylindrique	– 1er sol : cerces frettant la semelle – 2e sol : quadrillage avec 2 nappes

www.cours-genie-civil.com



Cas avec moment ou avec traction — FIG. 62.

Cas sans moment charge centrée — FIG. 63.

Variante : sans moment sous charge centrée — FIG. 64.

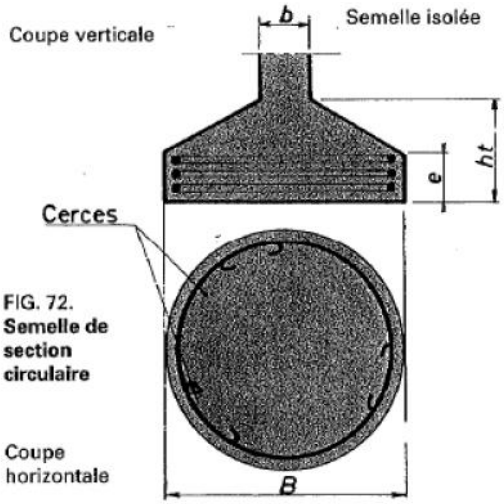
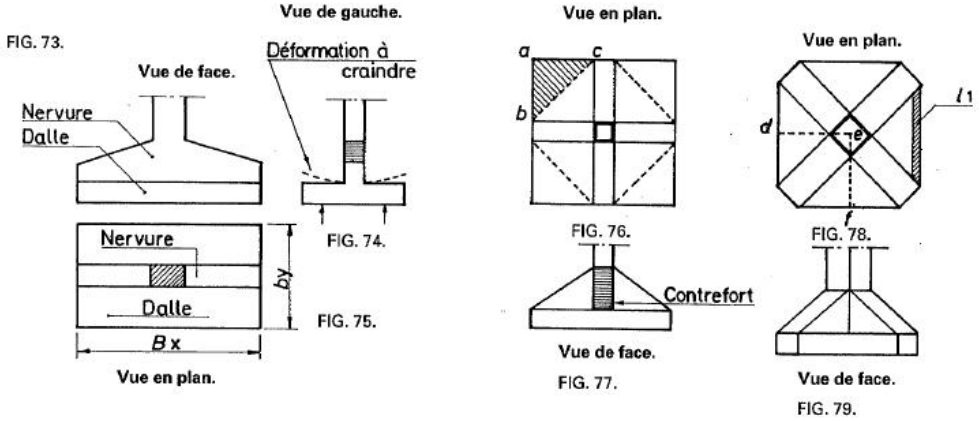
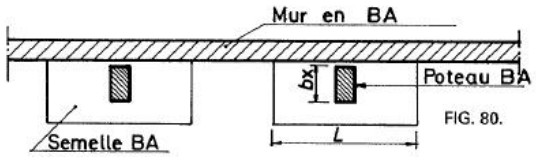


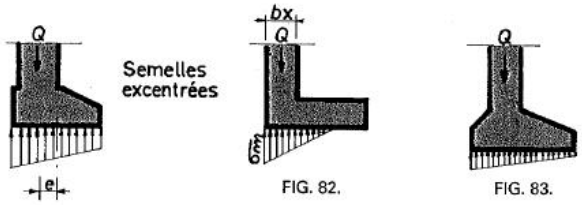
FIG. 72. **Semelle de section circulaire**

Type de semelle	Problème posé	Moyens possibles	Dispositions constructives
Semelle allongée	Raidir la semelle dans le sens longitudinal	Nervure de section : – constante – variable (Elle se calcule comme une console encastrée sur le poteau)	(*Fig.* 73 à 75)
Semelles avec nervures croisées	Raidir la semelle : – suivant les axes des côtés – ou suivant les diagonales	Nervure avec armatures croisées	(*Fig.* 76 à 79)
Semelles isolées excentrées (*fig.* 80 à 83)	Permettre de greffer un poteau en B.A. situé en rive en évitant : – l'instabilité – les trop fortes pressions sur le sol	1° Une poutre rigide appelée « poutre de redressement » relie la semelle à construire à la semelle la plus proche 2° Les actions horizontales sont équilibrées par un buton en B.A. 3° Le poteau est greffé sur la partie en console d'une longrine	(*Fig.* 84 et 85) (*Fig.* 86) (*Fig.* 87)

www.cours-genie-civil.com







DIFFÉRENTES TRANSMISSIONS DES EFFORTS

Q : charge transmise au poteau.
e : excentricité de la charge *Q* par rapport au centre de gravité de la semelle.

DIFFÉRENTES SOLUTIONS PRATIQUES POUR SEMELLES ISOLÉES EXCENTRÉES

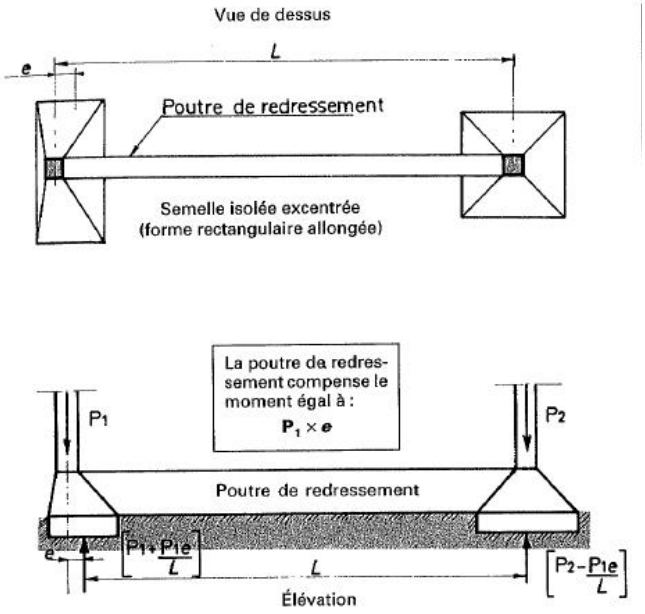
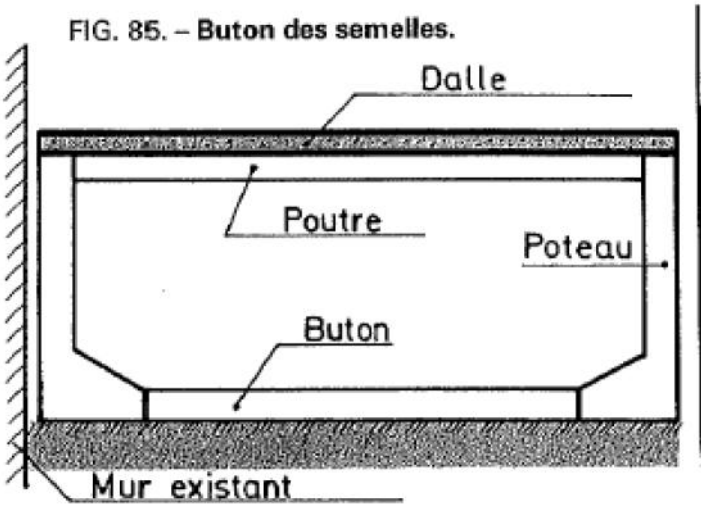


FIG. 84 . – **Poutre de redressement encastrée à ses extrémités aux semelles isolées.**

www.cours-genie-civil.com

FIG. 85. – **Buton des semelles.**

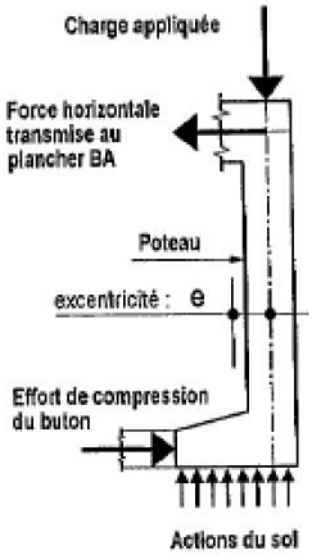


Données :

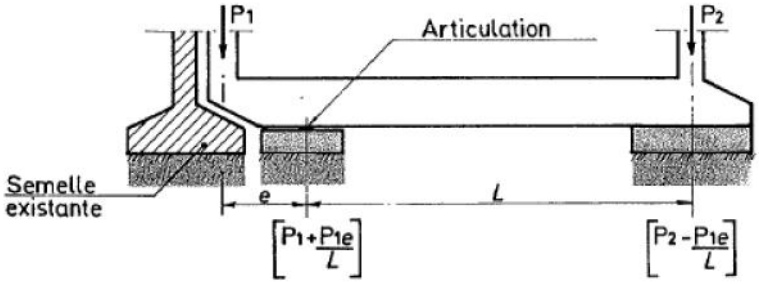
On admet l'hypothèse de répartition uniforme sous la semelle.
L'excentricité de la charge a pour valeur : e.
Le moment introduit est égal à :
charge (P_u) × excentricité(e).

Condition d'équilibre :

. butée en pied par le buton
. force horizontale en tête, transmise par le plancher au contreventement de la structure



L'effort normal P_2 doit être supérieur à la valeur $\{(P_1 \times e)/L\}$ pour éviter le risque de soulèvement par effet de levier.



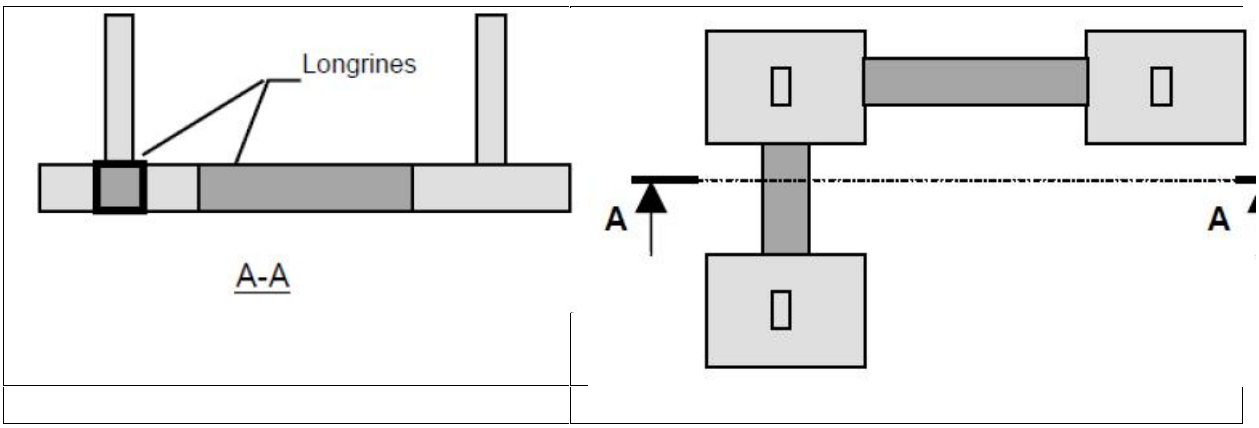
Cas d'une construction à réaliser en rive de bâtiment ancien avec semelle existante débordante.

FIG. 86. – **Longrine de redressement qui supporte un poteau ancré à son extrémité en porte-à-faux.**

4.4. Liaisons des fondations isolées.

Les massifs de fondations peuvent être isolés ou reliés entre eux pour rigidifier l'ensemble de l'infrastructure (ou pour des raisons mécaniques particulières - semelles excentrées).
Ces éléments de liaison sont des longrines. Ce sont des semelles filantes qui peuvent ou non supporter des voiles porteurs.

www.cours-genie-civil.com



5 Chaînage des semelles

5.1 But recherché

Réaliser un ensemble capable de mieux résister aux efforts horizontaux.

5.2 Quels sont ces efforts horizontaux ?

Justification (*fig.* 88 à 90) :

- chaque poteau est considéré comme encastré ou articulé à sa base ;
- la déformation sous l'effet des charges permet de se rendre compte du mode de sollicitation dans les poteaux et les poutres ;
- si on suppose chaque poteau libre de se déplacer à sa base, il est clair que, pour annuler le déplacement fictif, des forces horizontales sont nécessaires.

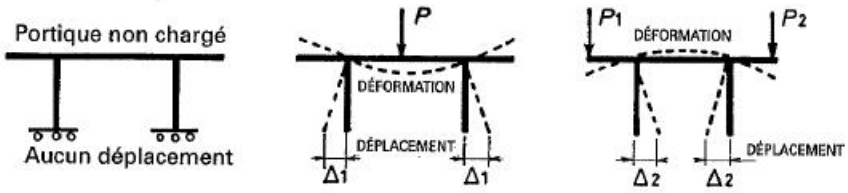


FIG. 88. FIG. 89. FIG. 90.

4.3. Les semelles filantes

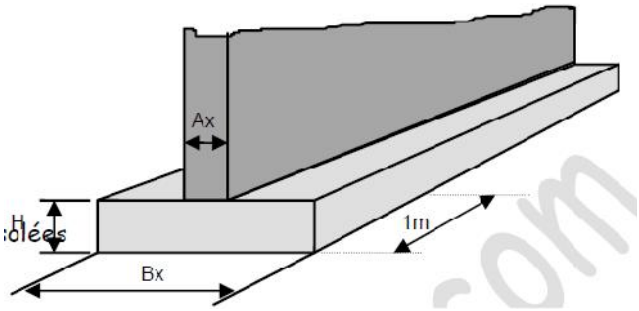
La semelle continue ou « filante » reçoit :

- un mur généralement continu ;
- des poteaux situés sur une même ligne.

La longueur de la semelle est grande par rapport à sa largeur (2 à 15 fois).

Les semelles filantes sont les fondations des voiles.
La hauteur H est définie comme pour les semelles isolées

www.cours-genie-civil.com

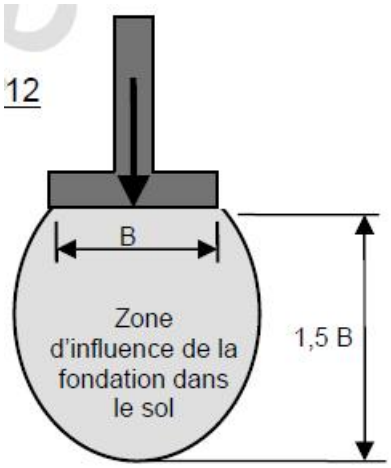


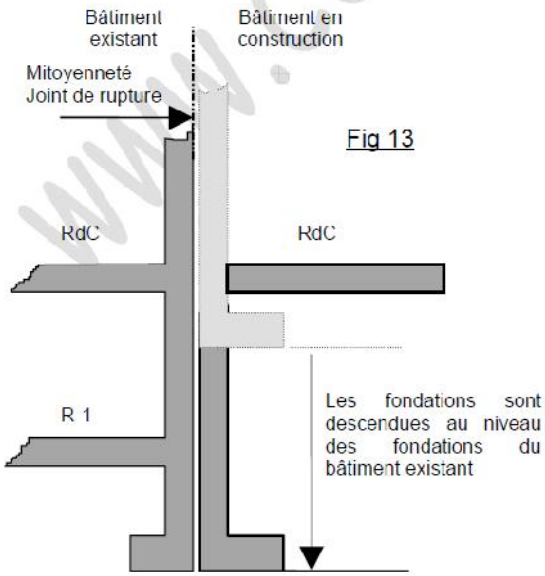
5- Reprise en sous-œuvre.

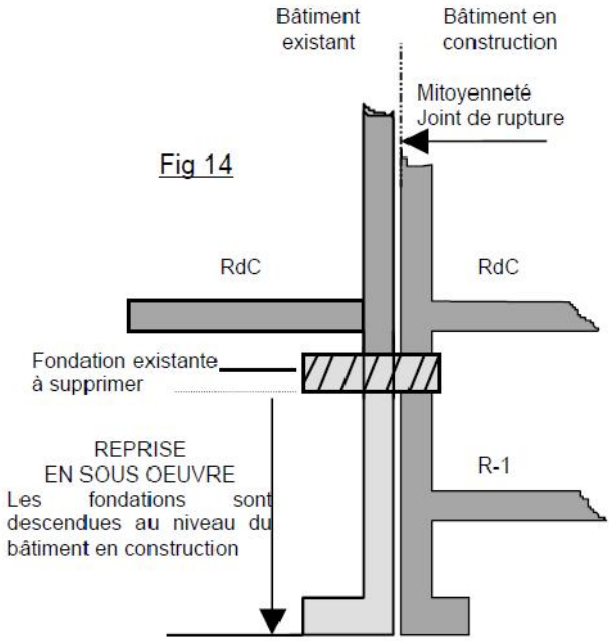
Dans le cas de mitoyenneté avec un bâtiment existant, les charges reportées d'une construction à l'autre peuvent être dommageables. Les fondations ne doivent pas se gêner mutuellement.

1 - Les fondations d'un bâtiment en construction doivent descendre au niveau de celles du bâtiment voisin existant.

2- Les fondations du bâtiment voisin doivent être descendues au niveau du bâtiment en construction. On parle alors de

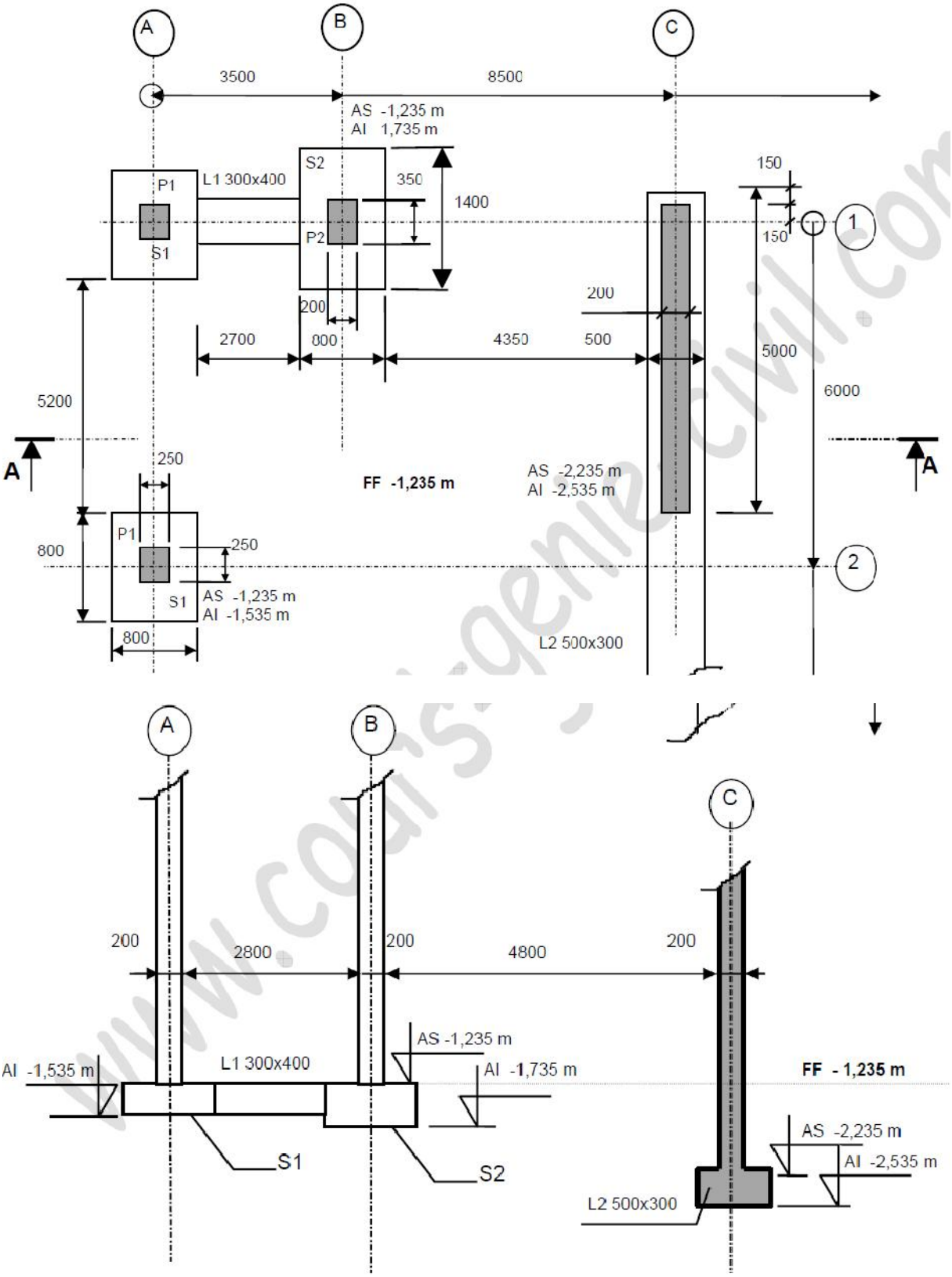






www.cours-genie-civil.com

6- Représentation graphique - Les fondations superficielles

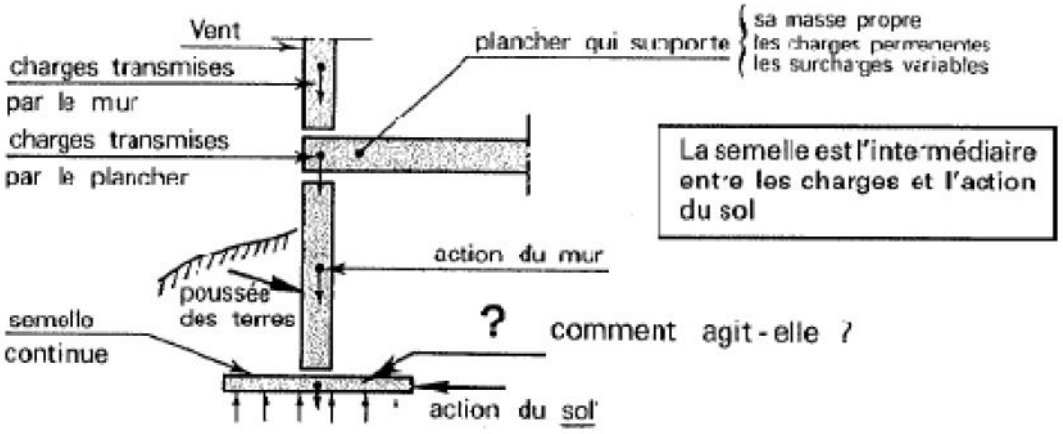


AI : Arase inférieure de la semelle.
AS : Arase supérieure de la semelle.

Les semelles, poteaux et longrines identiques sont cotés une seule fois et rappelés par S, un P ou un L suivit de leur numéro. Pour les longrines, on donne toujours dans l'ordre : base x hauteur.

www.cours-genie-civil.com

SEMELLE CONTINUE



Les charges sont : ↓	La semelle pourrait être : ↓	Le sol sollicité pour assurer l'équilibre est : ↓
– Verticales – Horizontales – Obliques	– Peu large et mince – Peu large et épaisse – Large et mince – Large et épaisse l : largeur de la semelle σ : contrainte exercée sur le sol	**flexibles** **rigides** cohérent (sol rocheux, sol compact) — pulvérulent (sables, graviers) sols intermédiaires — diagrammes intermédiaires

CAS DE LA SEMELLE FLEXIBLE

	Hypothèse	Constatation	Explication	Règle ou principe	Solution et schémas
Cas de la semelle flexible	Semelle non armée, actions du sol uniformes sous l'effet des charges $ht < \frac{B-b}{4} + 5$ cm **ht :** haut. totale **B :** largeur de la semelle en bas **b :** largeur de la semelle en haut. Les 5 cm correspondent à la distance du centre de gravité des aciers à la surface inférieure	Glissement dans le sens vertical et rotation des consoles (*fig.* 23) Les 2 sollicitations se produisent simultanément	Cisaillement de la section de béton Chaque console est sollicitée par une action du sol égale à **P/2** (*fig.* 24). Les aciers compenseront les défaillances du béton tendu	Présence de cadres et étriers pour « coudre » les fissures. Pose d'aciers transversaux porteurs dans la zone tendue (*fig.* 25). Pose d'aciers longitufinaux pour répartir les efforts	Aciers porteurs et de répartition formant quadrillage + poutre rigide étroitement associée à la semelle (*fig.* 26 à 30)

www.cours-genie-civil.com

Actions et sollicitations (visualisation fig. 23 et fig. 24)

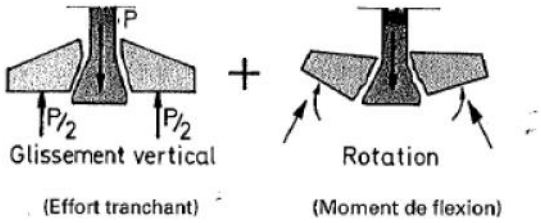


FIG. 23. – **Rupture par cisaillement et rotation.**

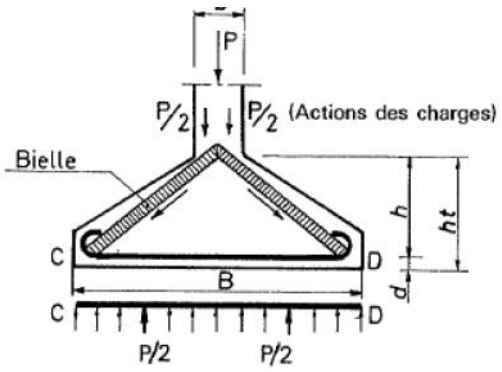


FIG. 24. – **Actions du sol.**

CAS DE LA SEMELLE RIGIDE

	Hypothèse	Constatation	Explication	Règle ou principe	Solution et schémas
Cas de la semelle rigide	Id. $\boxed{ht \geq \frac{B-b}{4} + 5\,cm}$ (voir *fig.* 25) Épaisseur de l'extrémité du patin : $e \geqslant 6\varnothing + 6$ **cm.** $6\varnothing$: diamètre du mandrin de cintrage. 6 cm : enrobage minimal à partir de l'axe des aciers (*fig.* 25)	Fissuration de la semelle en partie basse	Présence de multiples **bielles élémentaires de compresion** qui agissent et étirent le béton en partie basse. Par **analogie** avec une charpente, ces bielles constituent une série d'arbalétriers et les aciers fonctionnent à la manière d'un entrait (*fig.* 24, 32 et 33).	Les efforts de traction sont équilibrés par des aciers avec crochets. La section des aciers de répartition est de l'ordre du 1/3 de celle des aciers porteurs (*fig.* 34 et voir *fig.* 29 et 30)	Voir croquis Formule pour calculer l'effort de traction des aciers : $\boxed{N = \frac{Q}{8}\left(\frac{b-a}{ht-d}\right)}$ La section d'aciers porteurs est : $\boxed{As = \frac{N}{\bar{\sigma}_s} \quad \text{Avec } \bar{\sigma}_s = \frac{f_e}{\gamma_s}}$ *Voir thème n°5*

Nota : N est l'effort total de traction des aciers p.m.
Q est égal à la somme des actions permanentes et variables.
$\bar{\sigma}_s$ est la contrainte de calcul des aciers utilisés.

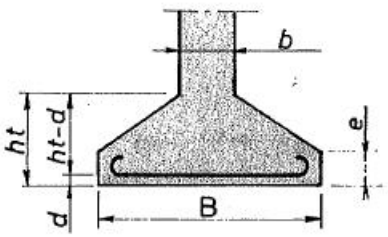


FIG. 31.

www.cours-genie-civil.com

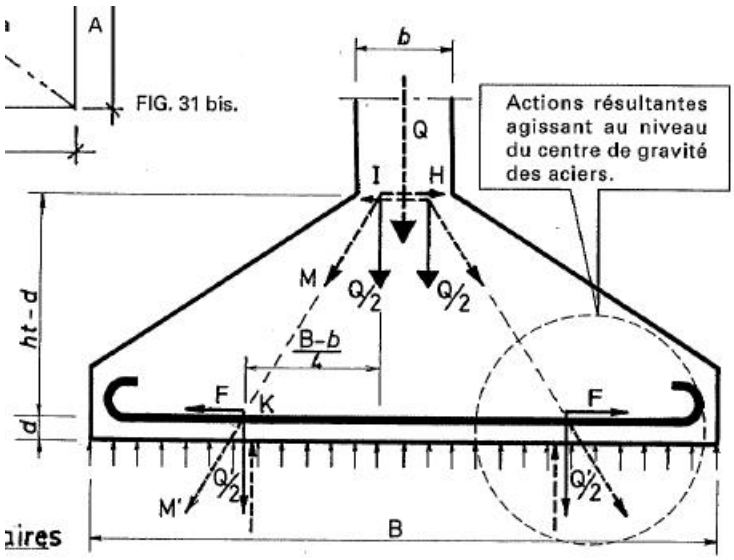


FIG. 32. – **Schéma de principe.**

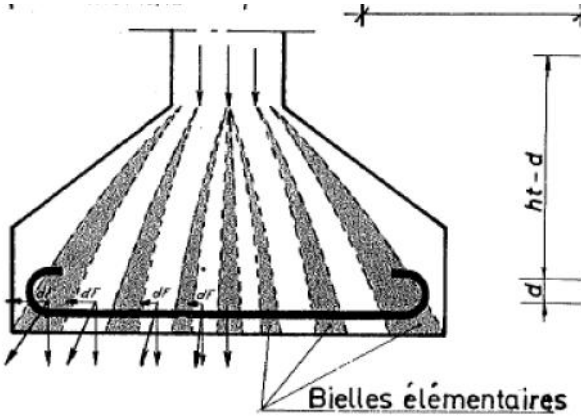
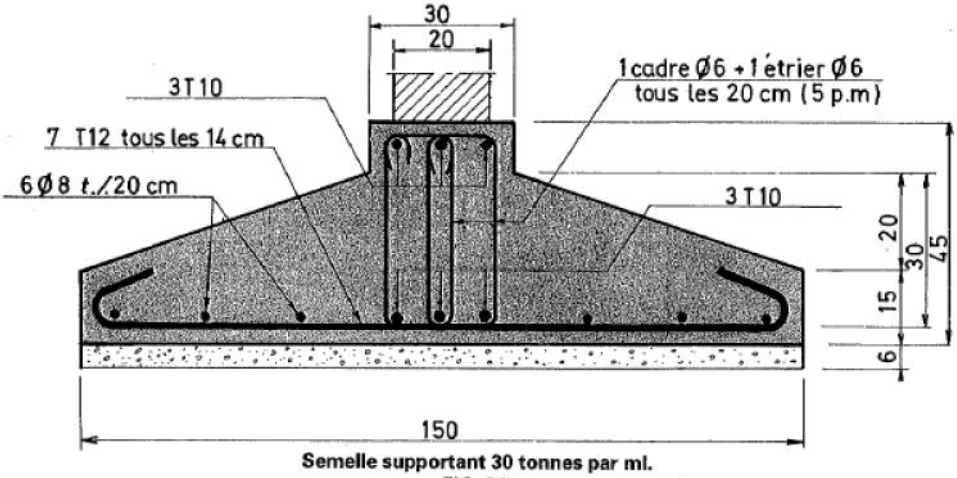


FIG. 33.



Semelle supportant 30 tonnes par ml.
FIG. 34.

www.cours-genie-civil.com

SEMELLES CONTINUES SOUS POTEAUX

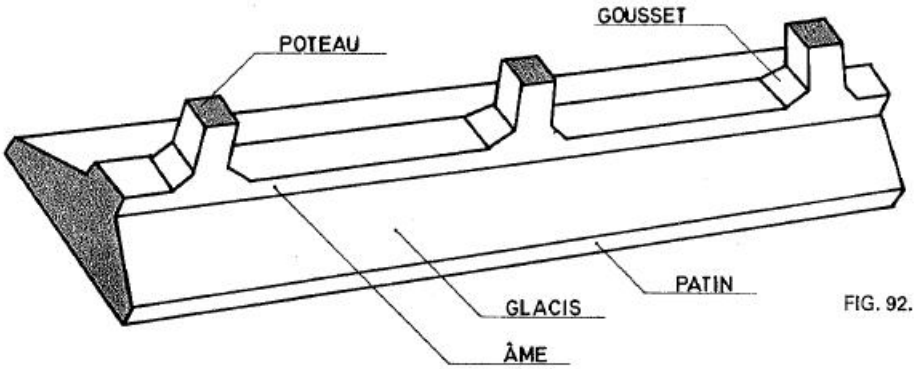
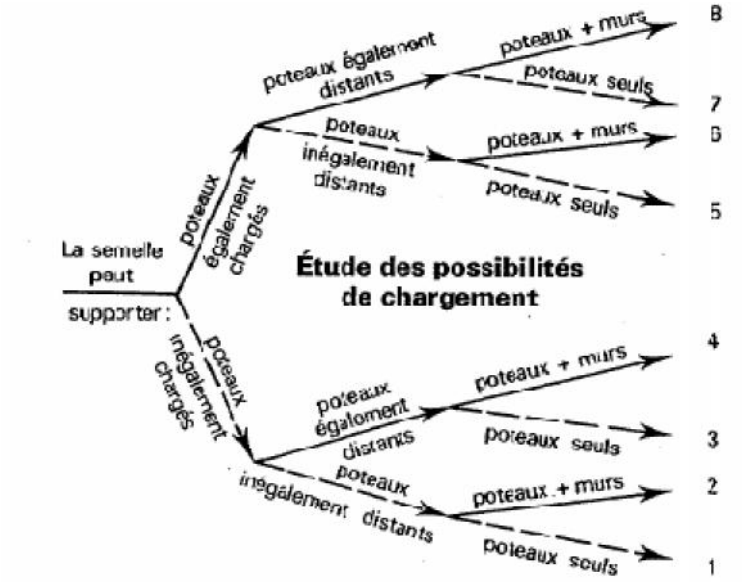


FIG. 92.

1 Quels sont les problèmes à résoudre ?

HYPOTHÈSES DE CHARGEMENT DES SEMELLES CONTINUES



2 Constatations immédiates (fig. 93 à 102)

Hypothèses de chargement des semelles continues

La répartition des charges :

- concentrées ;
- continues et concentrées ;

à la partie supérieure de la semelle n'est pas uniforme.

La répartition des **pressions sous** la semelle n'est pas uniforme.

Cette répartition peut varier dans le **sens longitudinal** et dans le **sens transversal** de la semelle.

L'appréciation de la répartition réelle est difficile et en pratique on est contraint de partir d'hypothèses simplifiées par l'expérience.

www.cours-genie-civil.com

3 Facteurs principaux à considérer (fig. 93 à 103)

La répartition des pressions dépend :

- du mode de chargement ;
- de la semelle plus ou moins rigide en fonction de la section du béton et des armatures ;
- de la hauteur constante ou variable (goussets) de la poutre de rigidité ;
- de la nature du sol et de ses caractéristiques.

En pratique les diagrammes théoriques sont presque toujours utilisés.

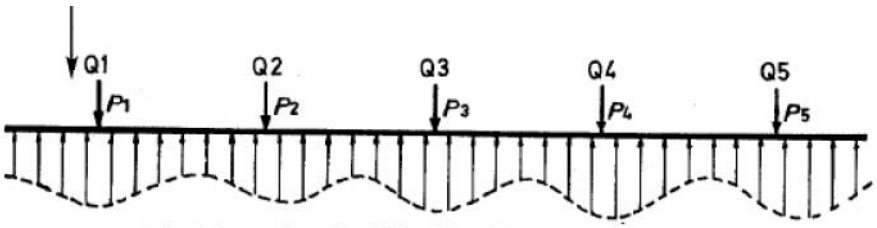


FIG. 93.

Sol cohérent – Semelle rigide – Répartition réelle
Les charges Q_1, Q_2, Q_n sont de valeur sensiblement égale.
Les poteaux P_1, P_2, P_3 sont également distants.

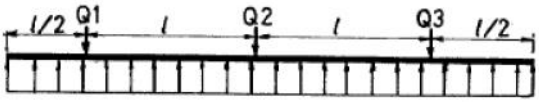


FIG. 94.
Répartition uniforme théorique.

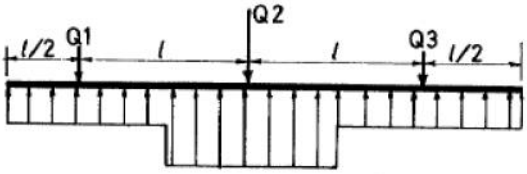


FIG. 95.
Répartition uniforme par plage. Semelle rigide. Sol cohérent. Poteaux également distants avec $Q_2 > Q_1$ et $Q_1 = Q_3$.

SENS LONGITUDINAL DE LA SEMELLE

FIG. 96.

Même sol, mais Q1 ≠ Q2 ≠ Q3. Poteaux inégalement distants. Semelle rigide. Sol cohérent.

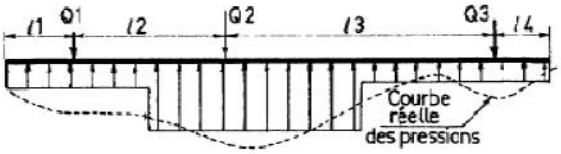


FIG. 97.

Sol peu compressible. Semelle flexible. Répartition réelle des pressions.

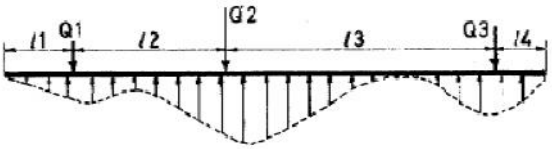
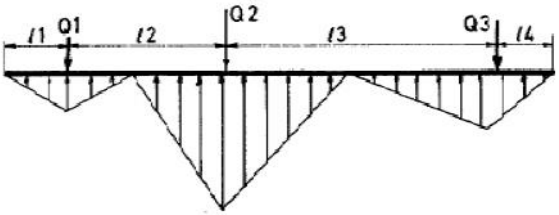


FIG. 98.

Sol peu compressible. Semelle flexible. Diagramme théorique.



www.cours-genie-civil.com

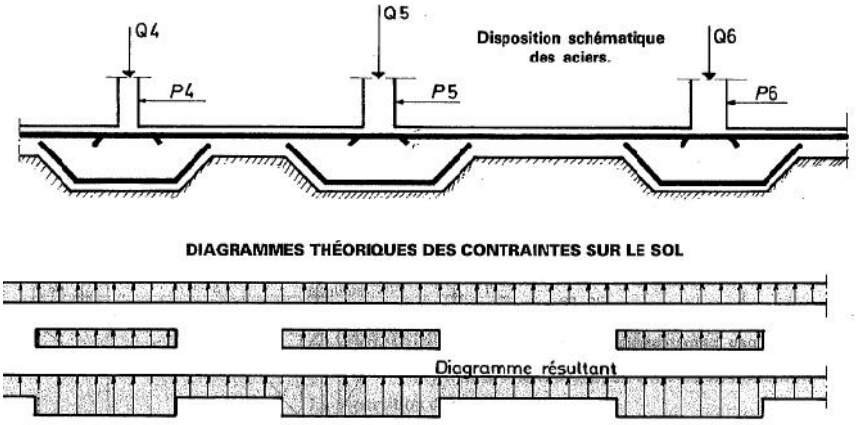
4 Dispositions pratiques

Elles sont basées sur :

- le mode d'application des charges ;
- le mode de fonctionnement de l'ensemble chargé ;
- la détermination des sollicitations et par suite des zones tendues et comprimées ;
- la réponse du sol de fondation, répartition des pressions avec diagramme :
  - uniforme,
  - triangulaire,
  - bi-triangulaire.

Les solutions théoriques et les détails d'exécution font l'objet des *figures* 104 à 110.

POTEAUX INÉGALEMENT CHARGÉS ET INÉGALEMENT DISTANTS



DIAGRAMMES THÉORIQUES DES CONTRAINTES SUR LE SOL

FIG. 104.

CAS DE LA RÉPARTITION UNIFORME

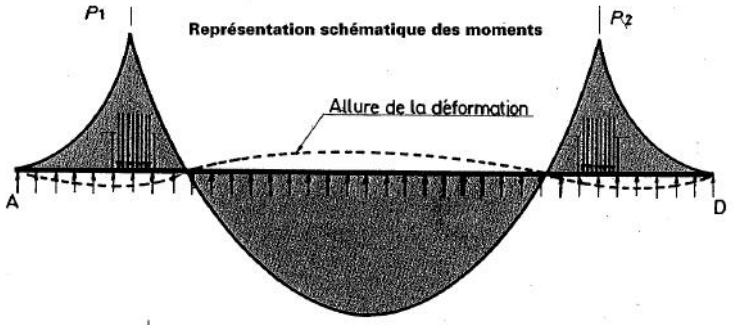


FIG. 105.

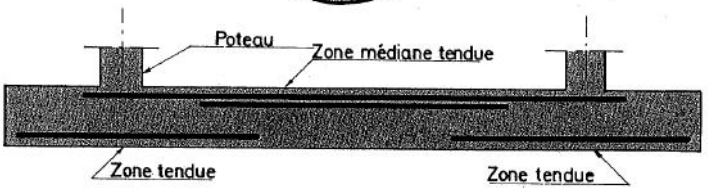


FIG. 106.

Schéma de principe

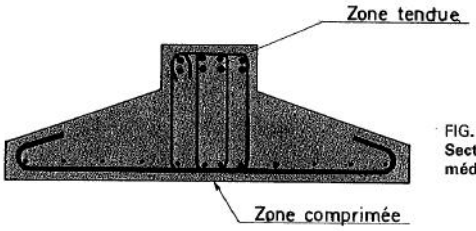


FIG. 107.
Section de la région médiane de la semelle.

SEMELLE SUPPORTANT DEUX POTEAUX ÉGALEMENT CHARGÉS

www.cours-genie-civil.com

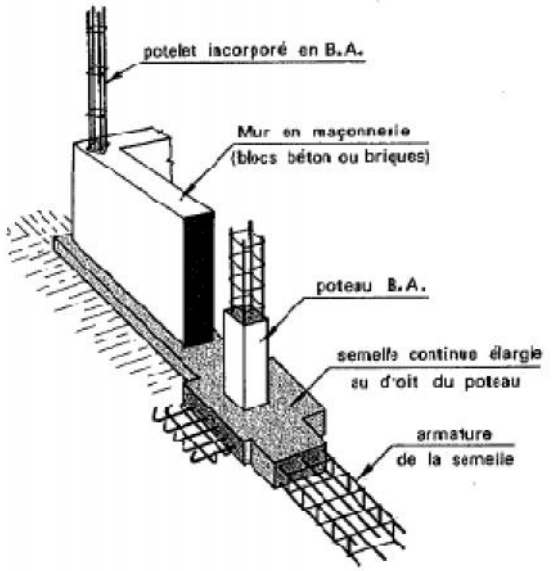
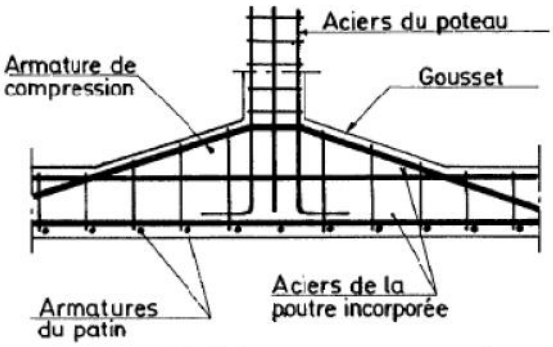
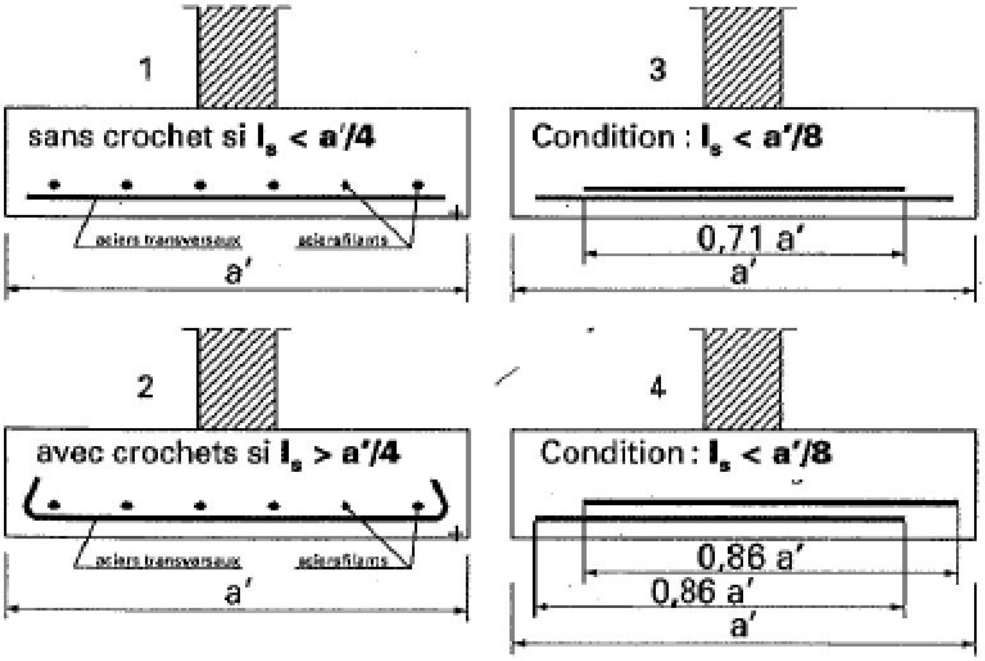


FIG. 108. – **Armature d'une semelle continue sous poteaux B.A.**



Détail d'armature d'un gousset.

Arrêt des aciers principaux (ou transversaux)
Longueur forfaitaire de scellement droit :
$l_s = 50\ \varnothing$ pour les aciers de nuance **Fe E 500**



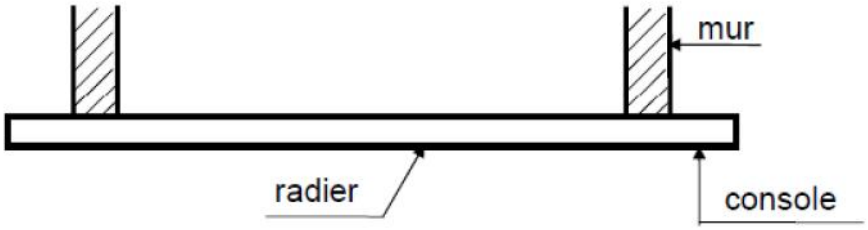
1 : sans crochet
2 : avec crochets
3 : arrêt à longueur 0,71 a'
4 : disposition en portefeuille

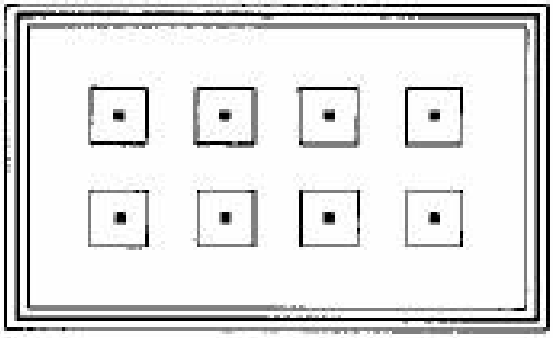
www.cours-genie-civil.com

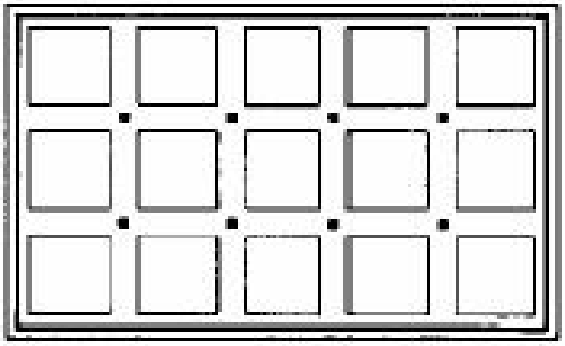
5. RADIERS

5.1. GÉNÉRALITÉS

Un radier est une dalle plane (Figure), éventuellement nervurée (Figure), constituant l'ensemble des fondations d'un bâtiment. Il s'étend sur toute la surface de l'ouvrage. Elle comporte parfois des débords (consoles extérieures)







Comme toute fondation, elle transmet les charges du bâtiment, sur l'ensemble de sa surface, au sol.
Avantages de la semelle unique :
- diminution des risques de tassement
- très bonne liaison donc rigidité de la base du bâtiment

Ce mode de fondation est utilisé dans deux cas :
– lorsque la capacité portante du sol est faible : le radier est alors conçu pour jouer un rôle répartisseur de charges. Son étude doit toujours s'accompagner d'une vérification du tassement général de la construction ;
– lorsque le sous-sol d'un bâtiment est inondable : le radier joue alors le rôle d'un cuvelage étanche pouvant résister aux sous-pressions (cf. [1.6]).

Ce type d'ouvrage ne doit pas être soumis à des charges pouvant provoquer des tassements différentiels trop élevés entre les différentes zones du radier.
Dans le cas de couches sous-jacentes très compressibles, le concepteur doit vérifier que le point de passage de la résultante générale coïncide sensiblement avec le centre de gravité du radier.

www.cours-genie-civil.com

Lorsque la compressibilité du sol varie de manière importante ou lorsque la structure présente des différences marquées de rigidité, il y a lieu de prévoir des joints de rupture.

5.1- CRITERES DE CHOIX

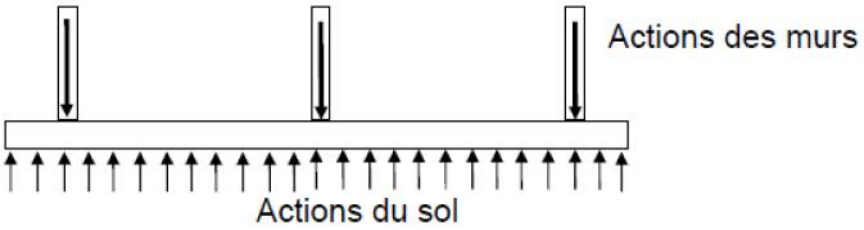
Le radier est justifié si la surface des semelles isolées ou continues est très importante (supérieure ou égale à 50 % de l'emprise du bâtiment) Ce qui est le cas lorsque :
- le sol a une faible capacité portante mais il est relativement homogène.
- les charges du bâtiment sont élevées (immeuble de grande hauteur).
- l'ossature a une trame serrée (poteaux rapprochés).
- la profondeur à atteindre pour fonder sur un sol résistant est importante.
- Il est difficile de réaliser des pieux (coût - vibrations nuisibles).
- Il existe des charges excentrées en rive de bâtiment.

Eventuellement, dans le cas de sous-sols utilisables (parking, garages, caves ...) ou en vue d'obtenir un sous-sol étanche (cuvelage)

5.2- MODE DE FONCTIONNEMENT

5.2.1 Actions mécaniques agissant sur le radier

- Les **actions descendantes** (poids propre, poids de la superstructure et actions extérieures) transmises par les murs et poteaux
- Les **actions ascendantes du sol** réparties sous toute sa surface



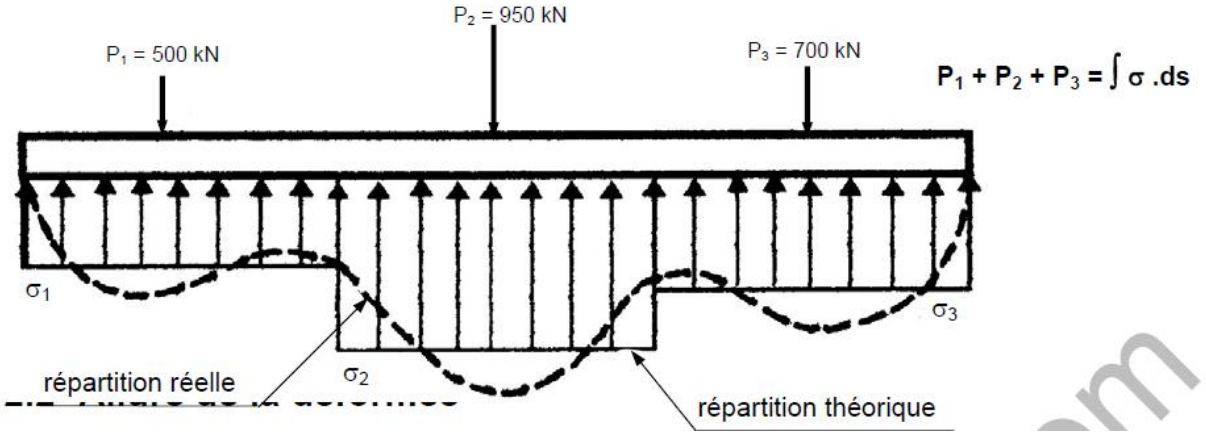
Hypothèse :

La répartition des pressions sur le sol est uniforme.

Cela nécessite un radier de **grande rigidité** (forte épaisseur de béton - forte densité d'armatures) et si possible des poteaux également distants et également chargés

Principes Généraux de Construction

Mais généralement les poteaux sont inégalement chargés, on admet la simplification ci dessous :



Les actions sur le radier engendrent la déformée suivante :

www.cours-genie-civil.com

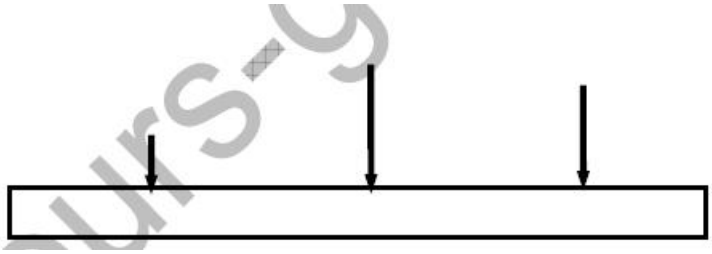
Le radier se comporte comme un plancher renversé

5.2.3- Conséquences

Il est nécessaire de renforcer le radier au droit des appuis des murs et des poteaux

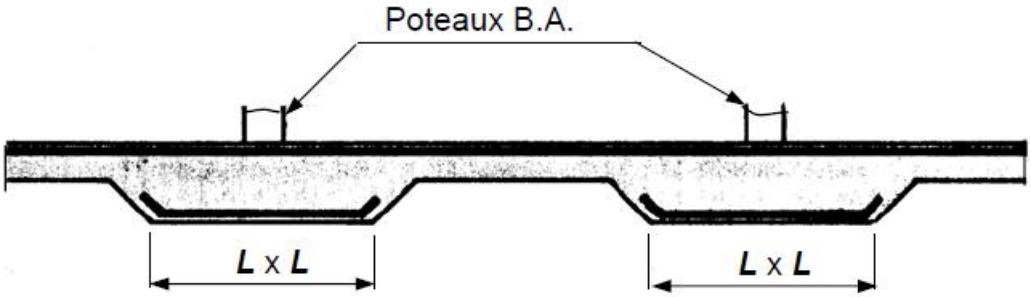
Le béton **résistant mal à la traction**, on placera des **armatures dans les zones tendues** : en partie haute en travée et en partie inférieure au droit des murs et des poteaux

Principe d'armature :

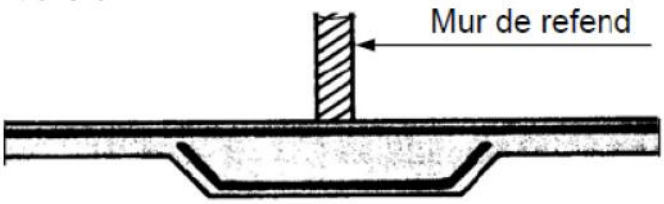


Renfort des radiers plats au droit des éléments porteurs :

Schémas de principe de renforcement du radier soumis à des charges ponctuelles



Charges linéaires transmises par un mur

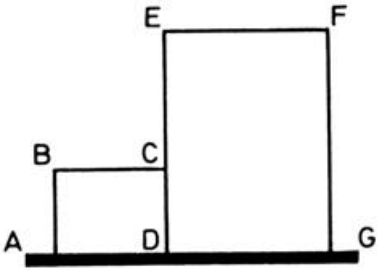


5.3- PRINCIPE DE CONSTRUCTION

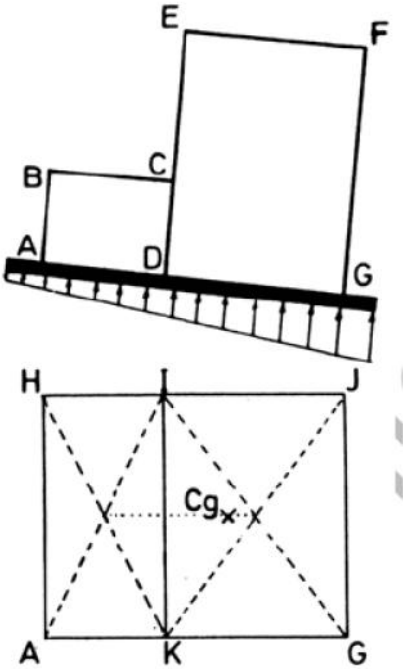
On ne peut envisager la réalisation du radier qu'à certaines conditions :

- les charges apportées par le bâtiment doivent être régulièrement réparties : pas de bâtiment avec une partie haute et une partie moins haute pour ne pas engendrer des tassements incompatibles.
- La répartition des contraintes sous le radier est uniforme
- Le terrain sous le radier n'est soumis qu'à des contraintes de compression en tout point.
- Le sol d'assise a une résistance régulière (pas de tassements différentiels, pas de points durs)
- La poussée d'Archimède due à une présence d'eau n'est pas trop forte (soulèvement de l'ensemble du bâtiment)

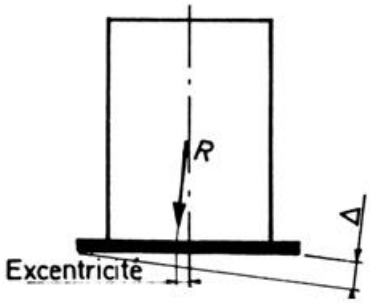
www.cours-genie-civil.com



Contraintes inégales imposées au sol et tassements inégaux



Vue en plan des bâtiments



Tassement différent sous le radier, dû au terrain de résistance inégale :
Déversement du bâtiment et excentricité de la résultante par rapport au centre de la semelle

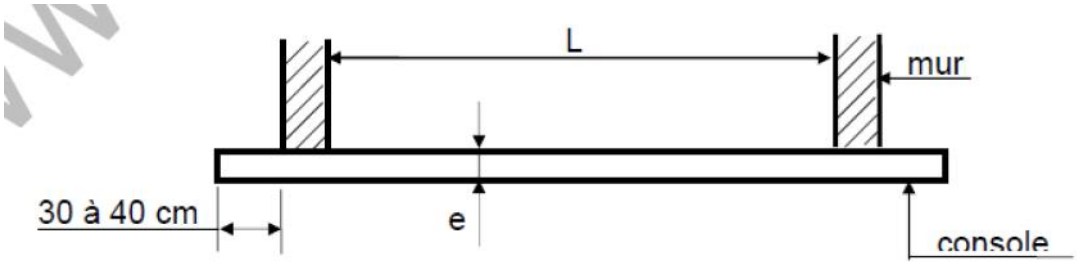
5.4- DIFFERENTS TYPES DE RADIERS

Tous les radiers sont mis en place sur un béton de propreté ou un lit de sable.

5.4.1- Radier plat d'épaisseur constante

Convient aux charges assez faibles et aux bâtiments de petite emprise
- facilité et rapidité d'exécution
- les murs ou les poteaux viennent s'appuyer directement sur la dalle avec possibilité de renforcer les sections de béton au droit des appuis

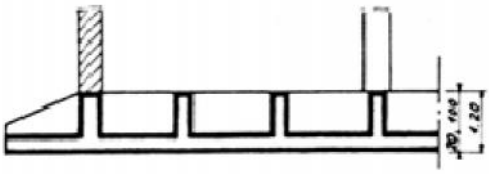
www.cours-genie-civil.com



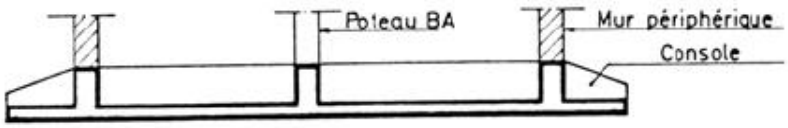
20 cm ≤ e ≤ 40 à 50 cm
e ≅ 1/20 L

5.4.2- Radier nervuré

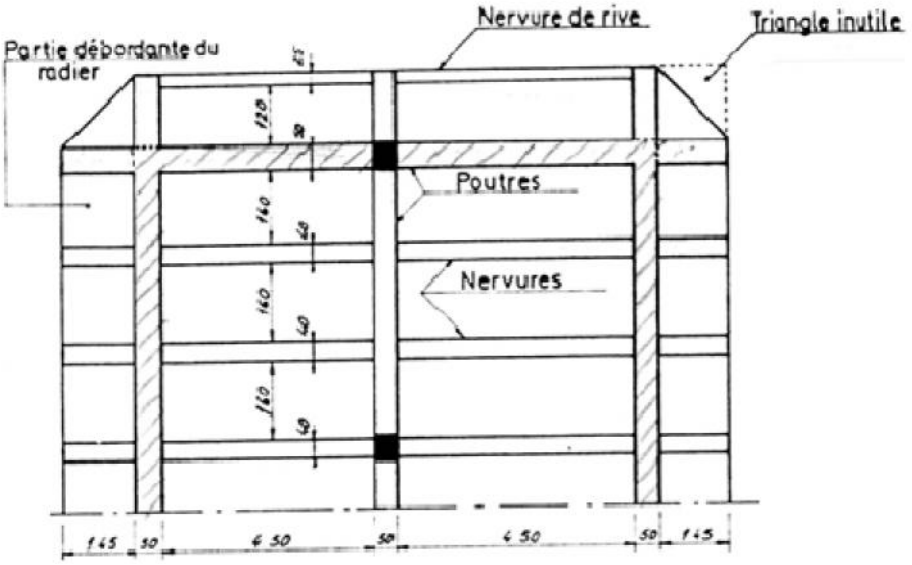
Lorsque les charges sont importantes, pour que l'épaisseur du radier ne devienne pas excessif, on dispose des travures de poutres (nervures) pour rigidifier la dalle ; elles peuvent être disposées dans un seul sens ou dans deux ; cela dépend de la portée, de la disposition des murs ou des poteaux l'ensemble donne des alvéoles qu'il est nécessaire de remblayer si on veut utiliser le sous-sol ou faire une deuxième dalle en partie haute les poteaux et les murs portent sur les poutres.



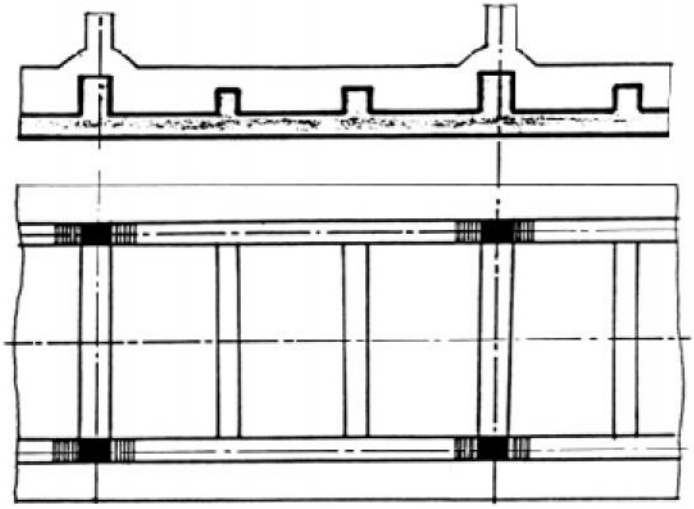
Coupe longitudinale partielle

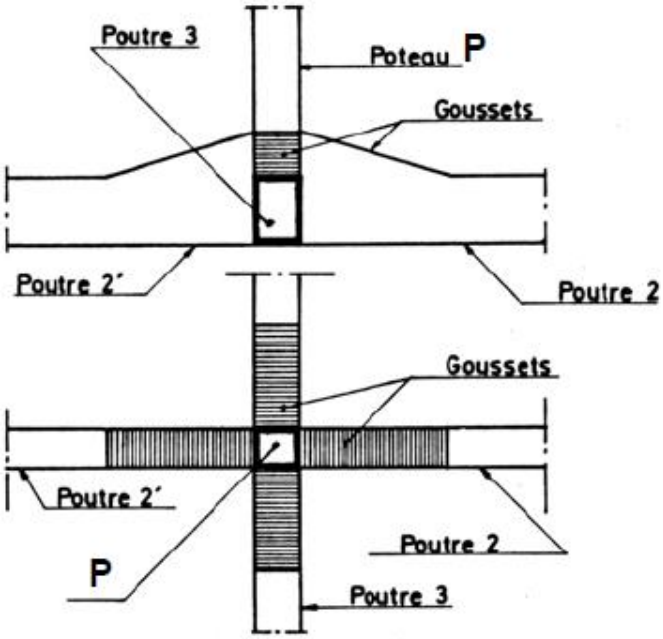


Coupe transversale



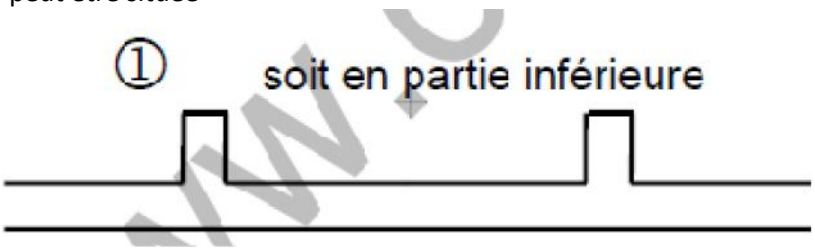
www.cours-genie-civil.com





Vue de dessus

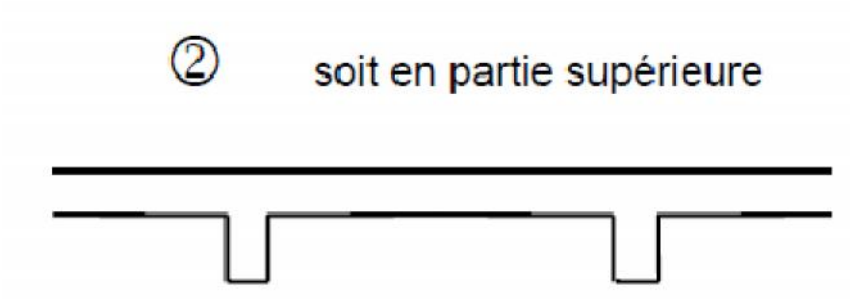
La dalle du radier peut être située



C'est la **solution rationnelle :**
La dalle, placée en zone comprimée, renforce la poutre qui, de ce fait, est en forme de T renversé grande rigidité

Inconvénients :
- fouille importante mais simple
- coffrage compliqué et important
- nécessité de remplir les creux entre les poutres et les nervures pour utiliser la surface
- risque de sous-pressions plus important

www.cours-genie-civil.com

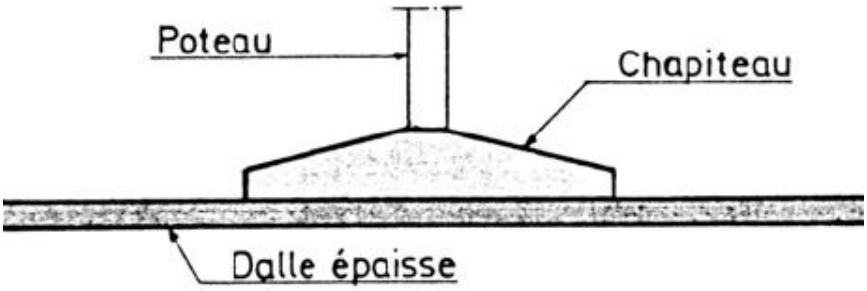


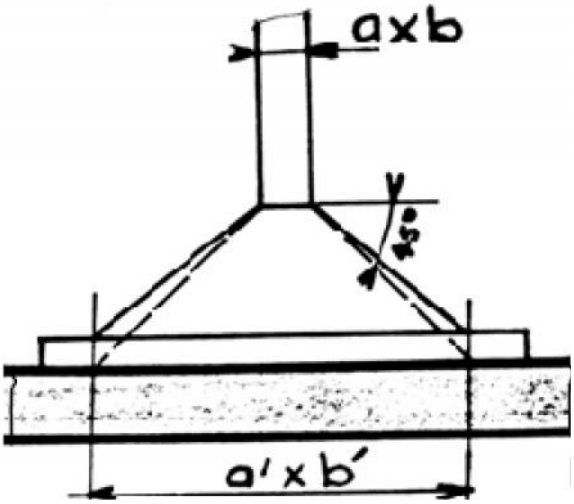
La dalle se trouve dans la zone tendue de la poutre, et ne participe pas à sa résistance

Inconvénients :
- terrassement complexe
- armatures plus compliquées : les armatures secondaires doivent reprendre les charges pour les reporter sur les zones comprimées
- épaisseur plus grande de la dalle, donc augmentation du poids

Avantage :
- surface supérieure de la dalle directement utilisable

4.3- radier champignon
Dans le cas d'une construction ossature on peut traiter le radier selon le principe des planchers champignons ; il ne comporte pas de nervure, ce qui permet d'avoir une surface plate et dégagée pour de grandes portées.





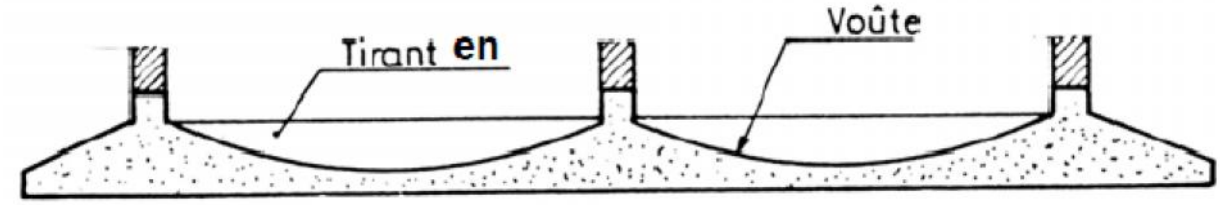
Les charges sont transmises des poteaux à la dalle épaisse (50 cm) par l'intermédiaire de chapiteaux ce qui permet de répartir progressivement la charge
- nécessité de répartir régulièrement les poteaux (la portée dans un sens ne peut dépasser 2 fois la portée dans l'autre sens)
- facilité d'exécution
- les chapiteaux "encombrent" au sol

www.cours-genie-civil.com

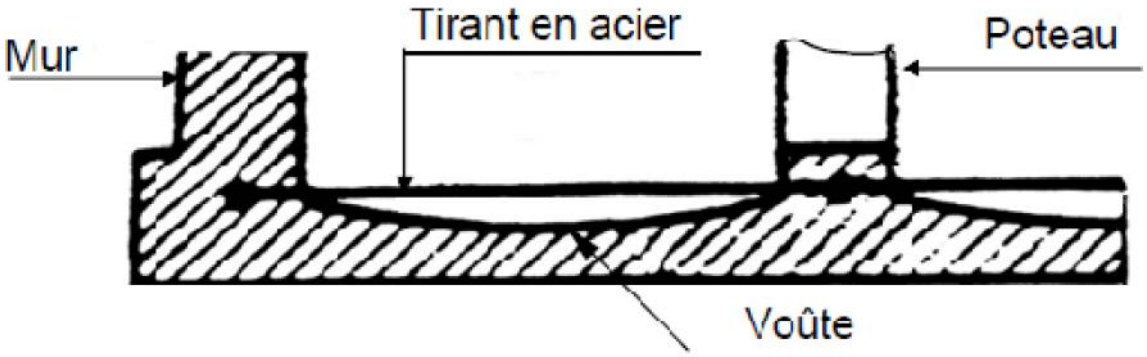
Remarque : le chapiteau peut être incorporé dans la dalle (béton fortement armé pour le chapiteau) ce qui permet d'avoir une surface totalement plane

4.4- radier voûté

L'axe des voûtes est perpendiculaire à la grande dimension du radier



Les voûtes permettent d'augmenter les portées (distance entre les éléments porteurs) sans augmenter sensiblement l'épaisseur du radier



La mise en œuvre est assez complexe mais les radiers voûtés sont minces (12 à 20 cm) car ils travaillent essentiellement en compression ; ils sont donc **économiques** en béton et en acier

- il est nécessaire de faire une répartition symétriques des charges ; les poussées des voûtes sont reprises par des culées (aux extrémités) ou par des tirants (tous les 4 m environ)
- les tirants peuvent être constitués : par des barres en acier par des poutres en BA placées perpendiculairement à l'axe des voûtes
- ils peuvent être lestés de sable si nécessaire (en cas de sous-pressions)
- des poutres sont placées au droit des murs et sous les alignements de poteaux

Inconvénients :

- difficulté de mise en forme du béton de la voûte
- coffrages des tirants
- remplissage des creux pour rendre la surface utilisable

www.cours-genie-civil.com

La pression sur le sol est variable et la répartition uniforme admise diffère d'un poteau à l'autre.

4 Étude comparative

Type de radier	Constitution	Schémas	Avantages	Inconvénients
Radier plan épais	**Béton de propreté :** dosage 200 kg CPJ 32,5/ m³. **Dalle** d'épaisseur uniforme avec ou sans consoles : – épaisseur : e ≤ 30 avec e ≈ 1/20 l ; – largeur en fonction des charges et des contraintes admises sur le sol. **Béton :** 300 kg CPJ 42,5/m³. **Armature :** quadrillage serré. Les parties AB et EF travaillent en consoles. Nécessité de chapeaux sur appuis. La zone médiane de CD est tendue à la partie supérieure (*fig.* 10).	(Revoir *fig.* 1, 8 et 10) (*Fig.* 12 à 14)	Aucune difficulté de coffrage, seul le pourtour est à coffrer. Facilité de mise en œuvre des bétons. Rapidité d'exécution. Possibilité de renforcer les sections de béton au droit des appuis.	Ne convient qu'aux petites emprises de bâtiment (masse importante de béton). Surcharge sur le sol. Le sous-sol n'est pas protégé contre les inondations.
Radier plan nervuré	**Béton de propreté.** **Dalles ou hourdis,** des nervures, des poutres transversales : – espacement des poutres transversales : 2,50 m à 3,50 m ; – les nervures sont disposées de façon à former des carrés ou des rectangles peu allongés. **La dalle est située :** – soit en partie inférieure du radier ; – soit en partie supérieure. **Armatures :** poutres croisées, nœuds, travail important de façonnage	(Revoir *fig.* 2) (*Fig.* 15 à 18)	Solution rationnelle car la dalle renforce la poutre qui, de ce fait, est en forme de T renversé. Grande rigidité.	Dalle en partie inférieure : – fouille plus importante ; – coffrage important ; – nécessité de remplissage entre poutre et nervure ; – risque de sous-pression plus important ; – moments de continuité sur appuis souvent plus importants que ceux en travée.
NB : Ciments préconisés pour leur faible chaleur d'hydratation. **Ciment portland composé : CPJ** **CEM-II/A ou B 42,5 ou 42,5 R**	Bétons courants de construction de bâtiments Préfabrication Bétons de grande masse avec la propriété CP2 (Se reporter au tableau, page 38.)		La dalle se trouve dans la zone tendue de la poutre dans sa partie médiane et ne participe pas à sa résistance.	Dalle en partie supérieure : – coffrage très compliqué ; – main-d'œuvre onéreuse ; – les armatures secondaires doivent reprendre les charges pour les reporter sur les zones comprimées. La dalle se trouve « accrochée ».
Ciment portland composé : CPJ **CEM II/A ou B 32,5 ou 32,5 R**	Bétons prêts à l'emploi Travaux de masse ***Contre indication :*** *Réalisation d'éléments précontraints*			

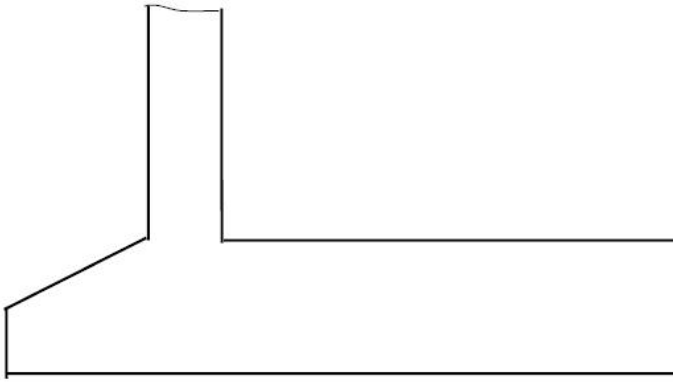
4 Étude comparative (suite)

Type de radier	Constitution	Schéma	Avantages	Inconvénients
Radier voûté	Béton de propreté. Radier voûté mince (12 à 20 cm) de fibre moyenne circulaire ou parabolique. Tirants noyés à intervalles réguliers (tous les 4 m ≈). Poutres horizontales au droit des murs qui transmettent au tirant les poussées des voûtes. Poutres verticales sous files de poteaux.	(*Fig.* 19)	La voûte ne subit pas de moment de flexion mais seulement un effort de compression. Solution économique.	Mise en forme du béton de la voûte. Coffrage des tirants. Remplissage.
Plancher champignon renversé	Dalles avec chapiteaux recevant les poteaux. Nécessité de répartir régulièrement les poteaux.	(*Fig.* 20)	Solution élégante. Facilité d'exécution.	Les chapiteaux forment saillie sur la dalle.
Radier soumis aux sous-pressions : *figure* 21.				

www.cours-genie-civil.com

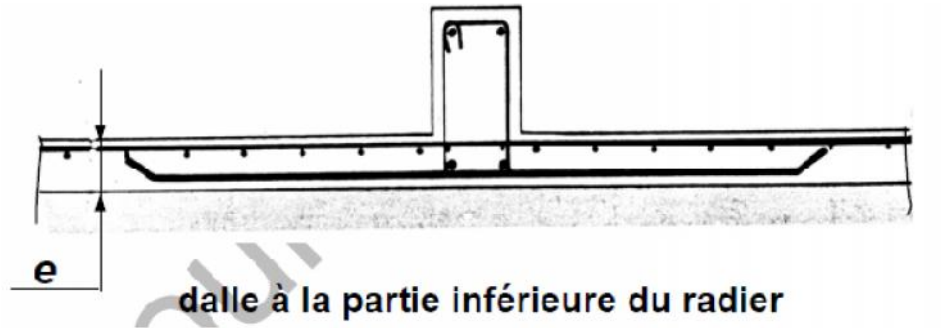
5- ARMATURES :

5.1- armature d'un radier plat avec console

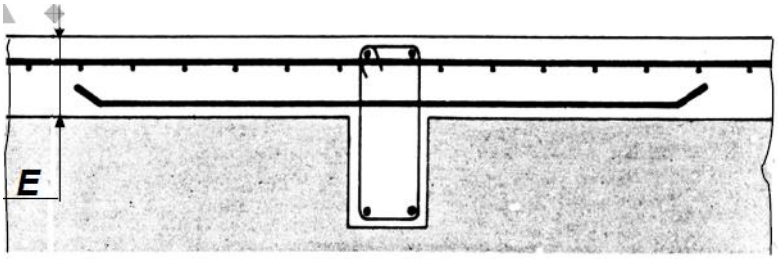


5.2- radier nervuré

Solution rationnelle



Solution moins rationnelle : *E* > *e*



dalle à la partie supérieure du radier

6.2. RADIER RÉPARTISSEUR DE CHARGES

D'une manière générale, il est impossible de connaître la répartition exacte des réactions s'exerçant sous un radier. En effet, celles-ci dépendent de la nature du sol et des coefficients d'élasticité respectifs sol-radier et radier-structure.

Le calcul d'un radier nécessite donc le choix d'hypothèses simplificatrices sur les diagrammes de réaction du sol.

Toutefois il est impératif de vérifier les conditions de la Statique, c'est-à-dire l'équilibre global entre les réactions du sol et l'ensemble des charges apportées par la superstructure.

Le radier, par simplification, est toujours considéré comme infiniment raide par rapport à sa superstructure. En d'autres termes, les poteaux et les voiles s'appuyant sur le radier sont considérés comme articulés à leur base.

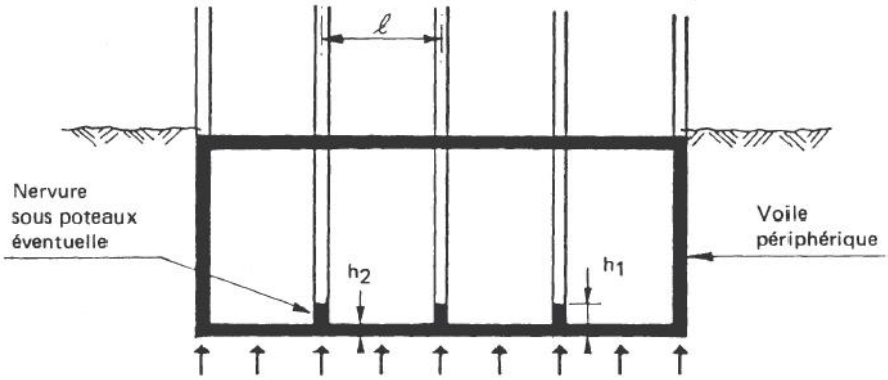
En revanche, le radier est plus ou moins déformable par rapport au sol de fondation.

6.2.1. Radiers rigides

Si le radier peut être considéré comme rigide, le calcul est mené en considérant une répartition linéaire des réactions du sol. Le dimensionnement du radier doit être tel que le cheminement des

www.cours-genie-civil.com

efforts de la superstructure soit assuré, les efforts internes du radier étant déterminés par l'équilibre des forces de gauche (ou de droite) d'une section quelconque.
Le calcul en plancher renversé n'est valable que sous réserve de vérifier sensiblement l'équilibre entre la descente des charges apportées par la superstructure et les réactions du sol sous chaque poteau.



En première approximation l'épaisseur des éléments constitutifs du radier est déterminée par les relations :
– nervures :

$$h_1 \geq \frac{\ell'}{10}$$

Avec l'entre axes des poteaux parallèlement aux nervures.
– dalle :

$$h_2 \geq \frac{\ell}{20}$$

avec *l* entre axes des poteaux perpendiculairement aux nervures (fig. 3.55).

De plus l'épaisseur de la dalle doit être telle que la vérification à l'effort tranchant soit assurée sans qu'on ait besoin d'armatures d'effort tranchant.

a) Cas d'un mauvais terrain.
On considère que le radier fonctionne soit en plancher nervuré renversé soit en plancher-dalle renversé.

6.2.2. Radiers souples
Cette méthode ne tient pas compte de la continuité. Elle consiste à vérifier les conditions de la Statique et de non-poinçonnement du sol sous la surface correspondant à chaque poteau ou voile pris isolément. Ces surfaces peuvent être discontinues si la résistance du sol le permet. La forme du diagramme choisi peut être soit rectangulaire soit triangulaire (terrain pulvérulent).

www.cours-genie-civil.com

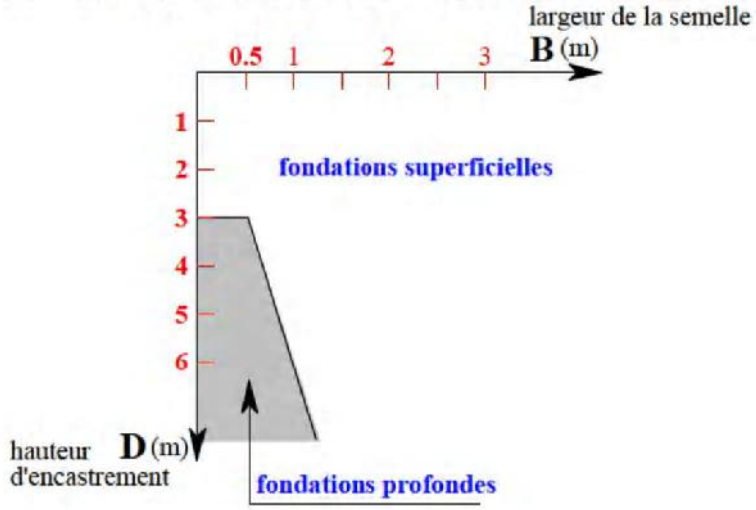
6. FONDATIONS PROFONDES, PAROIS DE SOUTENEMENT

6.1 DEFINITON — TERMINOLOGIE

Une fondation profonde est caractérisée par la manière dont le sol est sollicité pour résister aux charges appliquées.
- résistance en pointe
- par frottement latéral
- résistance de pointe et frottement latéral (cas courant)

Ses dimensions sont définies par:
- D : Longueur de fondation enterrée dans le sol
- B : largeur de la fondation ou diamètre

Au-delà de D/B **>** 6, et D **>** 3, nous sommes dans le domaine des fondations profondes.



D'une manière générale, les fondations profondes sont souvent désignées par le terme de «**pieu»**

6.2 PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

6.2.1 Cas d'un pieu isolé

Un pieu transmet au sol les charges qu'il supporte:
- par l'appui de sa base sur le sol résistant (effort de pointe noté Q)
- par le frottement latéral entre le sol et le pieu (effort de frottement latéral noté Q)

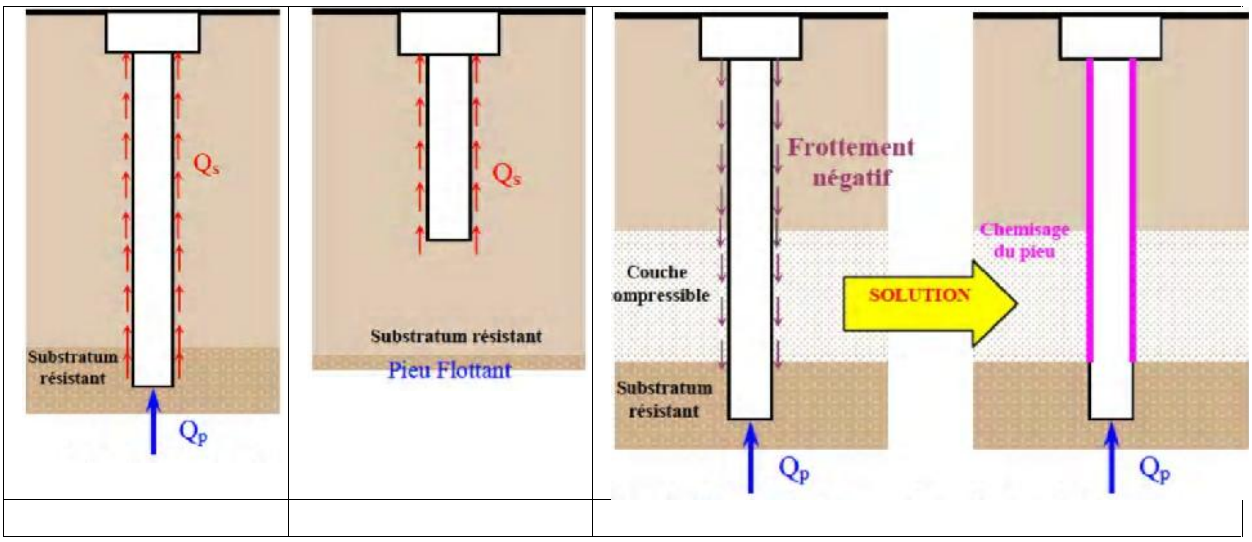
L'effort de pointe est proportionnel à:
- section de la base du pieu
- à la résistance du substratum

L'effort de frottement latéral est proportionnel à:
- la surface de contact entre le pieu et le sol
- au coefficient de frottement pieu-sol (rugosité du pieu, pression latérale, coefficient de frottement interne du sol)

Le frottement latéral du pieu n'est mobilisable que s'il y a déplacement relatif entre le pieu et le sol.

Si le pieu a tendance à s'enfoncer dans un sol stable, le frottement sol-pieu génère un effort vertical ascendant (frottement positif).
Si au contraire, le pieu étant immobile, le sol à tendance à tasser, le frottement sol-pieu est négatif. Cela à pour conséquence de surcharger le pieu. Pour remédier à ce problème (couches compressibles, remblais récents non stabilisés), on chemisera le pieu par un tubage afin de diminuer l'effet du frottement négatif.

www.cours-genie-civil.com

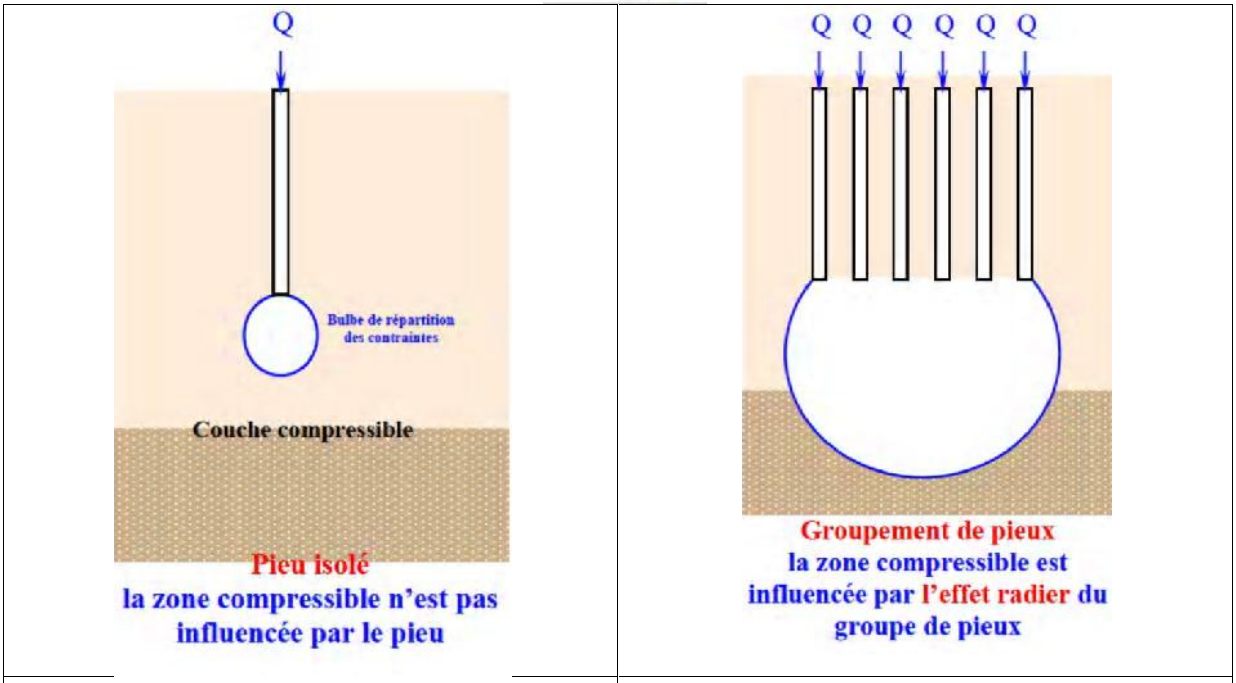


Attention, si le pieu travaille à l'arrachement, Q = O. Il est admis que le frottement latéral mobilisable est identique selon que le pieu travaille en compression ou en traction.

6.2.2 Cas de groupes de pieux

D'une part, lorsque les pieux sont suffisamment rapprochés, il ne suffit pas de vérifier la résistance d'un pieu isolé. En effet, il arrive que la charge limite d'un groupe de pieux Q_{gu} soit inférieure à la somme des charges limites de chaque pieu isolé Q_{ui}.
Le coefficient d'efficacité du groupe de pieu se définit comme suit:

$$C_e = \frac{Q_{gu}}{\sum Q_{ui}}$$



la zone compressible n'est pas influencée par le pieu	Groupement de pieux la zone compressible est influencée par l'effet radier du groupe de pieux

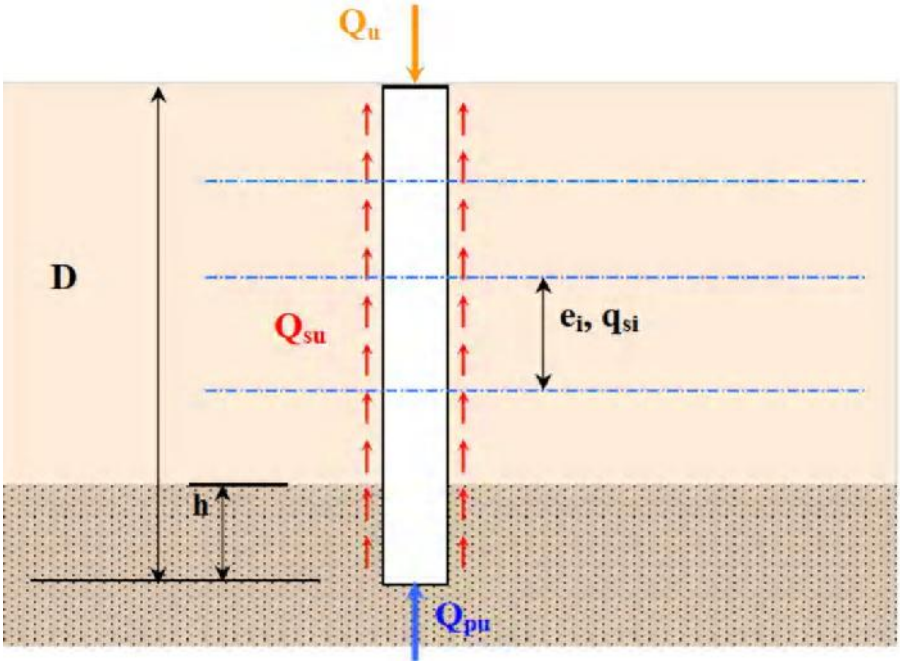
D'autre part la diffusion de contraintes en profondeur sous un groupe de pieux est différente de celle sous un pieu isolé. Il se produit un effet radier.

www.cours-genie-civil.com

Cela a pour conséquence de transmettre les contraintes en profondeur bien au delà de celles générées par un pieu isolé.

6.3 DETERMINATION DE LA CHARGE LIMITE D'UN PIEU ISOLE

Considérons **un pieu isolé soumis à une charge verticale.** Le pieu traverse différentes couches de sol de qualité plus ou moins bonnes pour s'ancrer dans une couche de sol aux caractéristiques mécaniques favorables. Cette couche s'appelle couche d'ancrage ou substratum **résistant.**



La charge limite du pieu Q_u est obtenue en additionnant la charge limite de pointe Q_{pu} qui correspond au poinçonnement du sol sous la base du pieu et la charge limite Q_{su} mobilisable par le frottement latéral entre le sol et le pieu.

$$Q_u = Q_{pu} + Q_{su}$$

La charge limite de pointe est donnée par :

$$Q_{pu} = \rho_p \cdot A \cdot q_{pu}$$

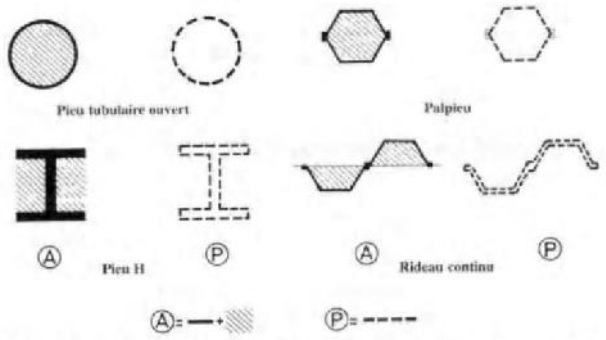
La charge limite de frottement est donnée par:

$$Q_{su} = \rho_s \cdot P \cdot \rho q_{si} \cdot e_i$$

Avec:
- pp: coefficient réducteur de section de l'effort de pointe
- Ps: coefficient réducteur de section de l'effort de frottement latéral
- A: aire de la section droite
- P: périmètre de la section du pieu
- q_{pu}: résistance limite de pointe
- qj : frottement latéral unitaire limite dans couche i
- e : épaisseur de la couche i
- h : hauteur d'ancrage

Nota : La détermination de A et de P ne pose pas de problème particulier pour les pieux à section pleine ou pour les pieux tubulaires fermés. Pour les autres sections, on se référera au tableau ci-dessous

www.cours-genie-civil.com



Définition de A et P pour les pieux tubulaire ouverts, les palplanches et profilés H

Définition **de A** et **P** pour les pieux tubulaire ouverts, les palplanches et profilés H

Les valeurs de pp et ps sont données dans le tableau ci-contre.

Type de pieu	Argiles		Sables	
	p_p	p_s	p_p	p_s
Section pleine Tubulaire fermé	1,00	1,00	1,00	1,00
Tubulaire ouvert Palpieux	0,50	1,00	0,50	1,00
Pieu H	0,50	1,00	0,75	1,00
Palplanches	0,50	1,00	0,30	0,50

6.4 DIMENSIONNEMENT DES PIEUX

Comme pour les fondations superficielles, le dimensionnement des pieux se réalise à partir des essais de laboratoires, de l'essai pénétrométrique ou de l'essai pressiométrique. Actuellement la méthode pressiométrique donne de bons résultats quel que soit le type de sol. Elle est présentée ci-après.
Les valeurs des charges admissibles sont données dans le tableau ci-dessous:

04.01.01 Détermination de la contrainte limite de pointe q_{pu}

Le fascicule 62 titre V définit une hauteur d'encastrement équivalente D_e selon la formule suivante :

$$D_e = \frac{1}{p_{le}^*} \int_d^D p_l^*(z) \, . \, dz$$

avec :

- p_{le}^* : pression limite nette équivalente
- $p_l^*(z)$: pression limite nette à la profondeur z
- d : pris en général égal à 0
- D : hauteur d'encastrement réelle du pieu

La valeur de la pression limite nette équivalente est donnée par la formule $p_{le}^* = \frac{1}{b+3a} \int_{D-b}^{D+3a} p_l^*(z) \, . \, dz$

Avec :

a : $\max\left(\frac{B}{2}; 0.50m\right)$

b : min(a, h)

h: ancrage dans la couche où se situe la pointe du pieu

La contrainte limite de pointe q_{pu} est donnée par la formule :

$$q_{pu} = k_p \, . \, p_{le}^*$$

www.cours-genie-civil.com

k_p est appelé coefficient de portance. Il traduit la proportionnalité entre la **contrainte limite de pointe** et la **pression limite nette équivalente** mesurée au pressiomètre.

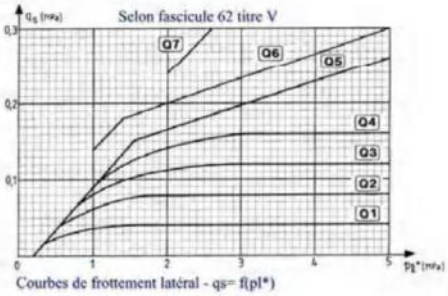
Nature des terrains		Eléments mis en oeuvre sans refoulement du sol	Eléments mis en oeuvre avec refoulement du sol
ARGILES – LIMONS	A	1,1	1,4
	B	1,2	1,5
	C	1,3	1,6
SABLES – GRAVES	A	1,0	4,2
	B	1,1	3,7
	C	1,2	3,2
CRAIES	A	1,1	1,6
	B	1,4	2,2
	C	1,8	2,6
MARNES , MARNO–CALCAIRES		1,8	2,6
ROCHES ALTEREES (1)		1,1 à 1,8	1,8 à 3,2

(1) La valeur de k_p pour ces formations est prise égale à celle de la formation meuble du tableau à laquelle le matériau concerné s'apparente le plus.

valeurs de K_p selon le fascicule 62 titre V

04.01.02 Détermination du frottement latéral q_s

Selon le fascicule 62 titre V, les valeurs de $q_s = f(pl^*)$ sont données par le tableau suivant



Courbes de frottement latéral - qs= f(pl*)

Le choix de la courbe (Q1 à Q7) à considérer est

	ARGILES – LIMONS			SABLES – GRAVES			CRAIES			MARNES		ROCHES
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	
Foré simple	Q_1	Q_1 ou Q_2 [1]	Q_2 ou Q_3 [1]	–			Q_1	Q_3	Q_4 ou Q_5 [1]	Q_3	Q_4 ou Q_5 [1]	Q_6
Foré boue	Q_1	Q_1 ou Q_2 [1]		Q_1	Q_1 ou Q_2 [2]	Q_1 ou Q_2 [2]	Q_1	Q_3	Q_4 ou Q_5 [1]	Q_3	Q_4 ou Q_5 [1]	Q_6
Foré tubé (tube récupéré)	Q_1	Q_1 ou Q_2 [3]		Q_1	Q_1 ou Q_2 [2]	Q_1 ou Q_2 [2]	Q_1	Q_2	Q_1 ou Q_4 [3]	Q_3	Q_4	–
Foré tubé (tube perdu)		Q_1			Q_1	Q_2		(4)		Q_2	Q_3	–
Puits [5]	Q_1	Q_2	Q_3	–			Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
Métal battu fermé	Q_1	Q_2		Q_2		Q_3		(4)		Q_3	Q_4	Q_4
Battu préfabriqué béton	Q_1	Q_2		Q_3				(4)		Q_3	Q_4	Q_4
Battu moulé	Q_1	Q_2		Q_2		Q_3	Q_1	Q_2	Q_3	Q_3	Q_4	–
Battu enrobé	Q_1	Q_2		Q_3		Q_4		(4)		Q_3	Q_4	–
Injecté basse pression	Q_1	Q_2		Q_3			Q_2	Q_3	Q_4	Q_5		–
Injecté haute pression [6]	–	Q_4	Q_5	Q_5		Q_6	–	Q_5	Q_6	Q_6		Q_7 [7]

(1) Reprise et rainurage en fin de forage.
(2) Pieux de grande longueur (supérieure à 30 m).
(3) Forage à sec : tube non foncé.
(4) Dans le cas des craies, le frottement latéral peut être très faible pour certains types de pieux.
Il convient d'effectuer une étude spécifique dans chaque cas.
(5) Sans tubage ni virole foncée perdue (parois rugueuses).
(6) Injection sélective et répétitive à faible débit.
(7) Injection sélective et répétitive à faible débit et traitement préalable des massifs fissurés ou fracturés avec obturation des cavités.

Choix de la courbe de frottement latéral

04 02 Détermination des charges admissibles sous différentes sollicitations

A l'**E.L.S.**, selon le fascicule 62, il est fait référence à la **charge de fluage notée Q_c** .

	Charge de fluage en compression	Charge de fluage en traction
Pieux forés	$Q_c = 0.5\ Q_{pu} + 0.7\ Q_{su}$	$Q_{tc} = 0.7\ Q_{su}$
Pieux battus	$Q_c = 0.7\ Q_{pu} + 0.7\ Q_{su}$	

www.cours-genie-civil.com

Les valeurs des **charges admissibles** sont données dans le tableau ci-dessous :

Etats limites	Combinaisons	Traction Q_{min}	Compression Q_{max}
E.L.U.	Fondamentales	$-\frac{Q_{tu}}{1.40}$	$\frac{Q_u}{1.40}$
	Accidentelles	$-\frac{Q_{tu}}{1.30}$	$\frac{Q_u}{1.20}$
E.L.S.	Rares	$-\frac{Q_{tc}}{1.40}$	$\frac{Q_c}{1.10}$
	Quasi-permamentes	$0^{(1)}$	$\frac{Q_c}{1.40}$
(1) D'après le fascicule 62, les pieux ne sont pas conçus pour travailler en traction de façon permanente. Cependant, ce type de fonctionnement est admis pour les micros pieux			

6.5 CLASSIFICATION DES FONDATIONS PROFONDES

Comme nous venons de le voir **la charge limite d'un pieu** est fonction de son mode **d'exécution.**

On distingue **3 grandes classes de fondations profondes:**

• Les pieux mis en place **par refoulement du sol**

Ils concernent les pieux battus (catégories 1 et 2) et les pieux foncés (catégorie 5). Leur mise en place se fait par vérinage battage ou vibro-fonçage. Ils repoussent le sol et le compriment; ce qui génère un bon frottement latéral.

• Les pieux mis en place **sans refoulement du sol**

Ils concernent les pieux forés et les puits (catégories 3 et 4). Leur mise en place se fait par substitution. Ce qui à pour effet de remanier le sol et de le décomprimer. Le frottement latéral est donc diminué, sauf pour certains types de mise en oeuvre (pieux exécutés à la tarière creuse, ou vissés moulés)

• Les fondations injectées

Elles concernent les parois moulées, les **barrettes.** D'autres types de fondations existent ,mais ils sont plutôt classés comme renforcement de sol:

• les colonnes de Col-mix (mélange de sol en place et de liant à l'aide de deux tarières creuses)

• les colonnes de jet-grouting (forage puis injection de liant haute pression en remontant)

• les colonnes ballastées (fonçage d'un vibreur puis injection à l'air comprimé de ballast (40/80 mm) en remontant)

• les picots de sable (fonçage d'un tube de petit diamètre, puis introduction de sable vibrocompacté

• les plots pilonnés (excavation à la pelle mécanique, puis introduction de matériaux granulaires sains subissant un pilonnage intensif)

6.5.1 Différentes catégories de pieux

Les documents réglementaires classent les pieux selon es catégories ci-dessous:

1 - Pieux façonnés à l'avance

• battu préfabriqué

• métal battu

• tubulaire précontraint

• battu enrobé

• battu ou vibrofoncé, injecté haute pression

2 - Pieux à tube battu exécuté en place

• battu pilonné

• battu moulé

3 - Pieux forés

• foré simple

• foré tubé

• foré boue

www.cours-genie-civil.com

• tarière creuse (type 1 à type3 selon la technologie utilisée)
• vissé moulé
• injecté haute pression
4 — Puits
5 - Pieux foncés
• béton foncé
• métal foncé
6 - Micro-pieux de diamètre inférieur à 250 mm
• type I
• type II
• type III
• type IV

Fondations profondes, parois de soutènement, amélioration des sols

1 Pieux en B. A. (fig. 1 à 5)

Ils sont destinés à reporter à grande profondeur (20 m, 40 m et plus) les charges d'une construction.

Ils sont groupés 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.

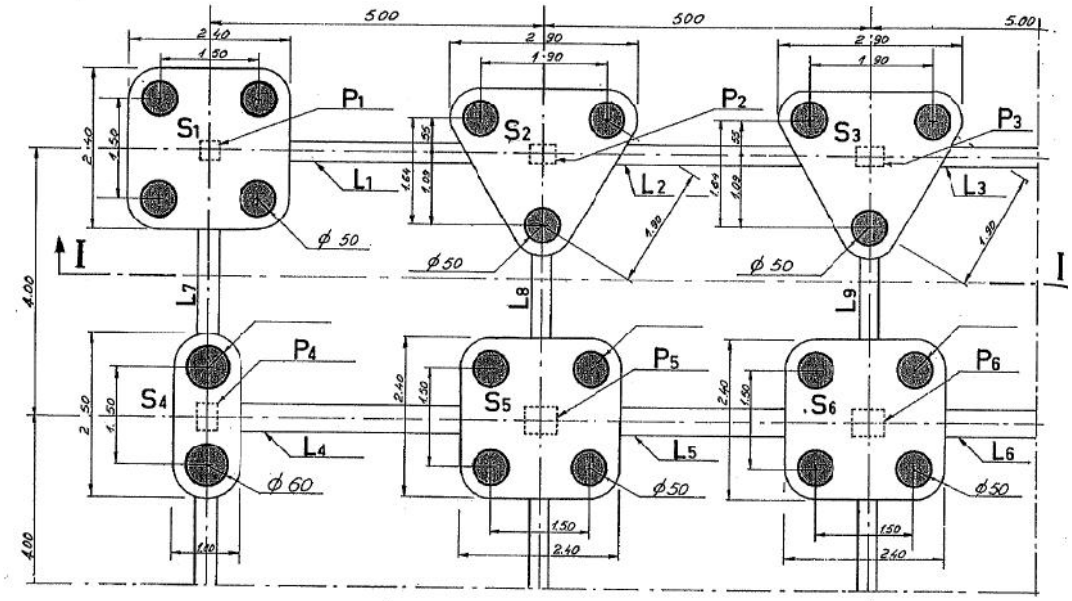
Ils agissent sur le sol soit :

– par frottement latéral ;
– par effet de pointe ;
– par frottement latéral et effet de pointe.

} voir ci-après fig. 32, 33, 35

Ils doivent résister généralement à l'effet :

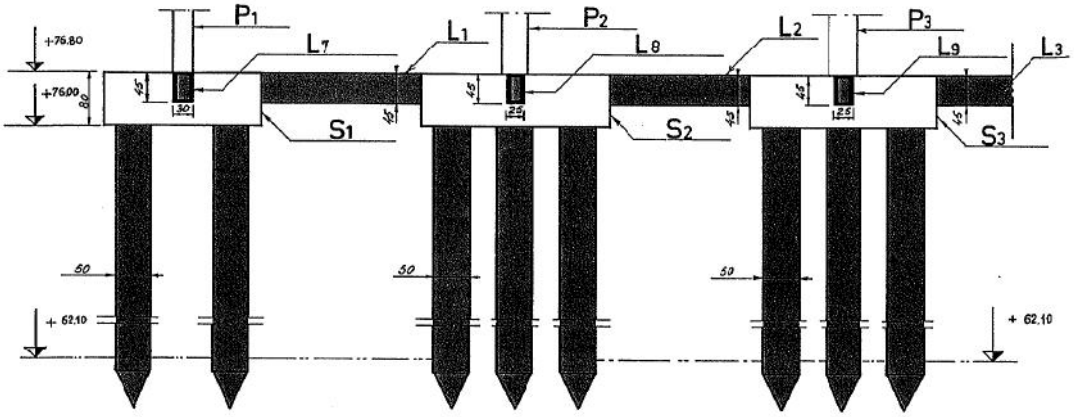
– des charges verticales ;
– des poussées horizontales ou obliques.



VUE EN PLAN D'UN ANGLE DE BÂTIMENT

FIG. 1.

www.cours-genie-civil.com



COUPE I-I

FIG. 2.

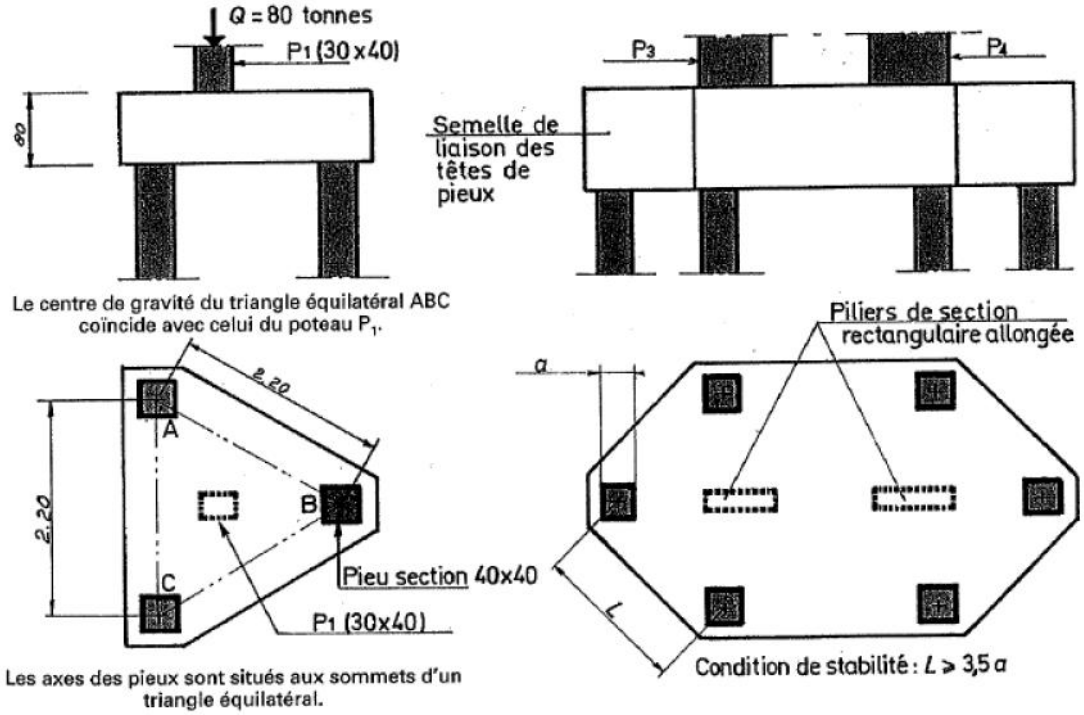


FIG. 3.

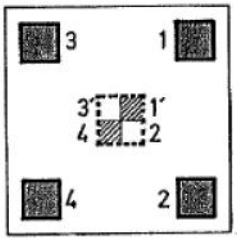


FIG. 4.

Semelle de liaison de quatre pieux de section carrée 40 × 40. Chaque pieu porte une part de la charge transmise

Conditions de stabilité :
$L \geqslant 2.5\,\varnothing$
$nL \geqslant n\,\Pi\,\varnothing$
(n est le nombre de côtés du polygone.)

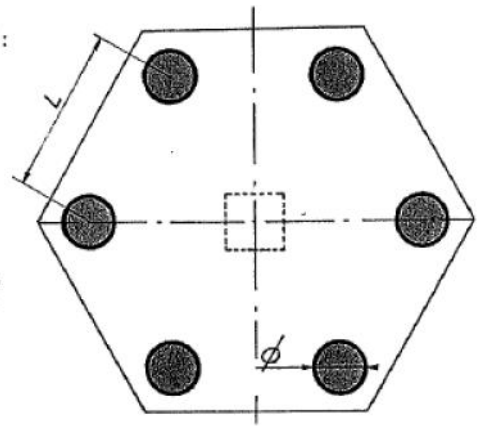


FIG. 5. – **Semelle hexagonale.**

www.cours-genie-civil.com

2 Influence des charges verticales

2.2 2e cas : un seul poteau reposant sur 2 pieux

Par l'intermédiaire d'une semelle.

La semelle se comporte théoriquement comme une poutre sur deux appuis (*fig.* 10).

Chaque pieu supporte une charge verticale égale à la moitié de la charge totale (*fig.* 11).

La transmission des efforts s'effectue par les bielles de compression (*fig.* 12 et 13).

La partie inférieure de la semelle est tendue (*fig.* 14).

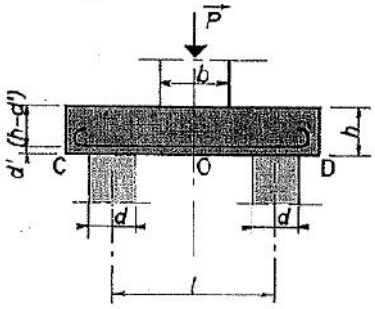


FIG. 10.

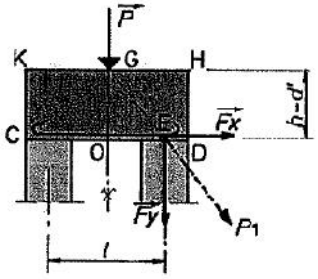


FIG. 11.

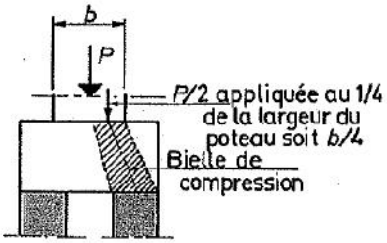


FIG. 12.

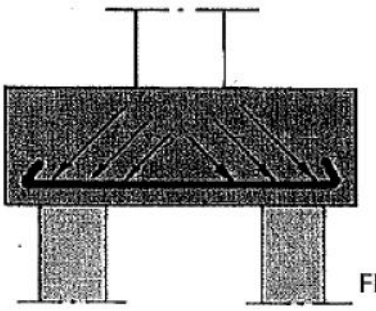


FIG. 13.

– Aciers inférieurs mis en traction par les bielles de compression inclinées.
– Nécessité de crochets à l'extrémité des barres.

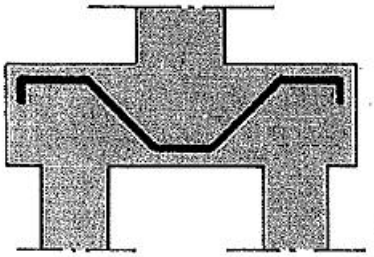


FIG. 14.

– Barre reprenant les efforts amenés par les bielles pour les reporter sur les têtes de pieux.

2.3 3e cas : charge reposant sur 3 pieux par l'intermédiaire d'une semelle triangulaire

La charge « **P** » doit s'appliquer au centre de gravité du triangle équilatéral.

La composante verticale Fy agissant sur chacun des pieux est égale à P/3.

La composante horizontale Fx est équilibrée par les aciers (*fig.* 15).

www.cours-genie-civil.com

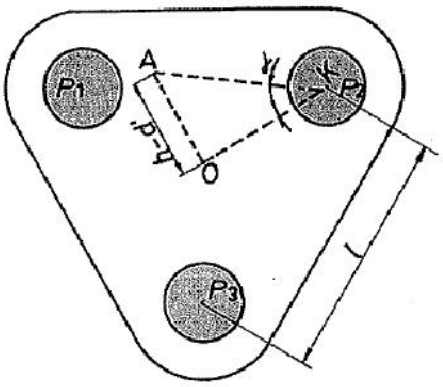


FIG. 15. – **Action d'une charge P sur chacun des pieux.**

2.4 Généralisation

La même méthode s'applique à un groupe de 4 à 5 pieux sous les deux conditions signalées :

- la charge doit passer par le centre de gravité de la semelle (voir *fig.* 3, 4 et 5) ;
- la semelle doit être rigide pour que chaque pieu reçoive une charge identique.

2.5 Disposition des armatures

Semelles triangulaires sur 3 pieux (*fig.* 16 à 20) :

- les armatures peuvent être placées suivant :
  - les médianes (*fig.* 16) ;
  - les côtés, en ajoutant un quadrillage (*fig.* 17).

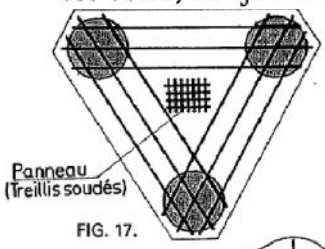


FIG. 17.

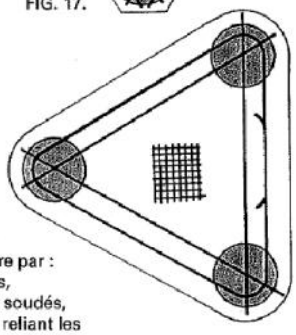


FIG. 19.
Armature par :
- cercles,
- treillis soudés,
- aciers reliant les têtes de pieux.

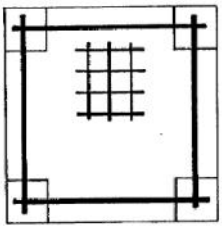


FIG. 21.

www.cours-genie-civil.com

3 Influence des sols traversés

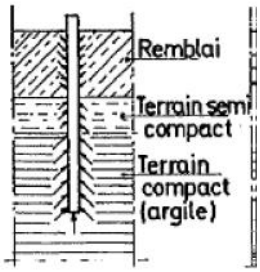
3.1 Terrains argileux

L'argile est plastique ; elle épouse les formes avec facilité si la teneur en eau est suffisante. Il s'ensuit que l'argile est « adhérente ».

Dans le cas des pieux, le terrain est en contact avec la surface présentée sur toute la hauteur et en raison :

- de la plasticité de l'argile ;
- des charges supérieures du terrain (pression) ;
- de la circulation souterraine de l'eau ;
- des vibrations lors du battage ;
- le pieu se trouve « fretté » sur toute la hauteur.

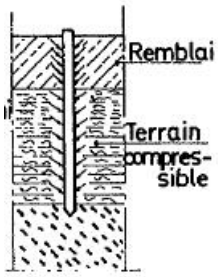
Conclusion pratique : utilisation des pieux « flottants » qui n'atteignent pas le sol résistant, mais résistent sous l'influence de la cohésion de l'argile et de l'adhérence (*fig.* 32).



Frottement latéral important.
Pieu flottant.
FIG. 32.

3.2 Frottement positif, frottement négatif

Le frottement positif est recherché dans les terrains compacts car il favorise la force portante. Le frottement négatif, au contraire, est nuisible car le tassement du terrain entraîne celui du pieu (*fig.* 33).



Frottement négatif.
Effet de pointe prédominant.
FIG. 33.

www.cours-genie-civil.com

3.3 Conclusions pratiques

1° L'écartement entre axes de pieux est tel que le périmètre d'un groupe de pieux soit au moins égal à la somme des périmètres des pieux.

Exemple : semelle supportée par 3 pieux (*fig.* 34), la somme des périmètres des pieux de diamètre $\varnothing$ est :

$$S_p = 3 \,.\, \pi \,.\, \varnothing$$

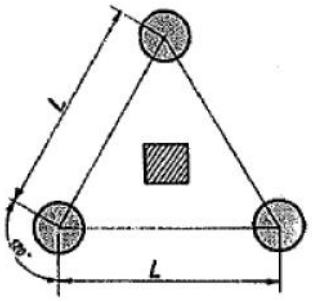
Périmètre du groupe : $3\,L + \pi \,.\, \varnothing$.

Condition :

$$3\,L + \pi\,\varnothing > 3\,\pi\,\varnothing$$

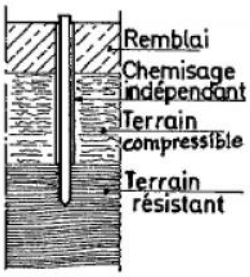
$$\text{ou } 3\,L > 2\,\pi\,\varnothing$$

d'où : $$L \geqslant \frac{2\,\pi\,\varnothing\,L}{3} \Rightarrow > 2{,}10\,\varnothing$$



Condition de stabilité :
$3\,L + \pi\,\varnothing > 3\,\pi\,\varnothing$
FIG. 34.

2° Le frottement négatif est réduit en utilisant des pieux chemisés (*fig.* 35).



Pieu chemisé.
FIG. 35.

3° La rencontre du sol résistant est souvent le meilleur gage de non-tassement ; le pieu travaille alors surtout par sa base.

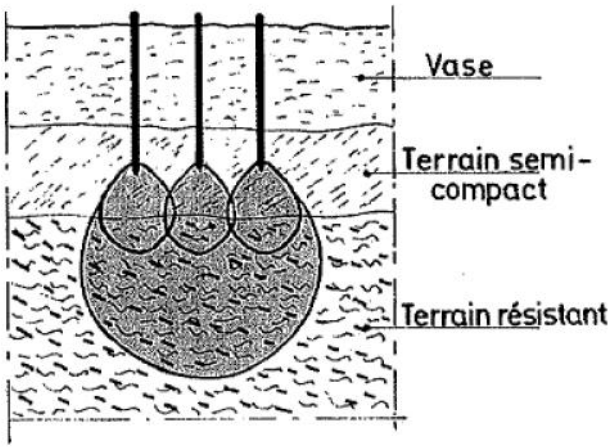
4° L'estimation de la *forte portante* fait intervenir 2 termes pour les pieux moulés dans le sol :

– le terme de pointe ;

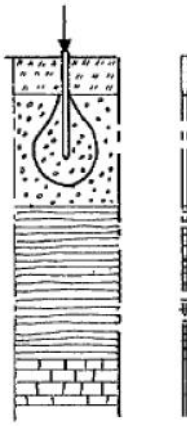
– le terme de frottement latéral.

5° Il faut veiller à ce que les couches sous-jacentes soient capables de supporter les pressions transmises (*fig.* 37 à 39).

www.cours-genie-civil.com

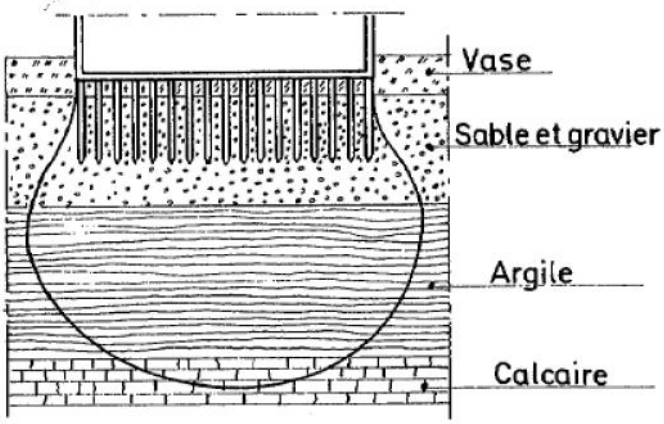


Zone d'influence d'un pieu et d'un groupe de trois pieux.
FIG. 37.



Bulbe de pression d'un seul pieu.
FIG. 38.

Répartition des pressions



Ouvrage fondé sur pieux.
Bulbe des pressions correspondant.
FIG. 39.

www.cours-genie-civil.com

5 Les parois moulées dans le sol

Ce sont des parois verticales (murs épais : 0,5 à 1,5 m) en béton ou béton armé, rectilignes ou courbes, effectuées sur une grande profondeur (jusqu'à 40 m à 50 m), pour la réalisation des fondations et sous-sols ou parkings en milieu urbain.

Elles assurent :

- **le soutènement des terres** sans rabattement de nappes ;
- **le rôle porteur** pour les constructions (fondations et murs) ;
- **l'écran d'étanchéité** pour les sous-sols.

Elles permettent de résoudre les fondations profondes en milieu urbain lorsqu'il s'agit d'utiliser les sous-sols.

La technique opérationnelle est résumée sur le document « Différentes phases d'exécution d'un mur moulé dans le sol » (*fig.* 82).

5 Les parois moulées dans le sol

Ce sont des parois verticales (murs épais : 0,5 à 1,5 m) en béton ou béton armé, rectilignes ou courbes, effectuées sur une grande profondeur (jusqu'à 40 m à 50 m), pour la réalisation des fondations et sous-sols ou parkings en milieu urbain.

Elles assurent :

- **le soutènement des terres** sans rabattement de nappes ;
- **le rôle porteur** pour les constructions (fondations et murs) ;
- **l'écran d'étanchéité** pour les sous-sols.

Elles permettent de résoudre les fondations profondes en milieu urbain lorsqu'il s'agit d'utiliser les sous-sols.

La technique opérationnelle est résumée sur le document « Différentes phases d'exécution d'un mur moulé dans le sol » (*fig.* 82).

5.1 Principes de réalisation d'une paroi moulée

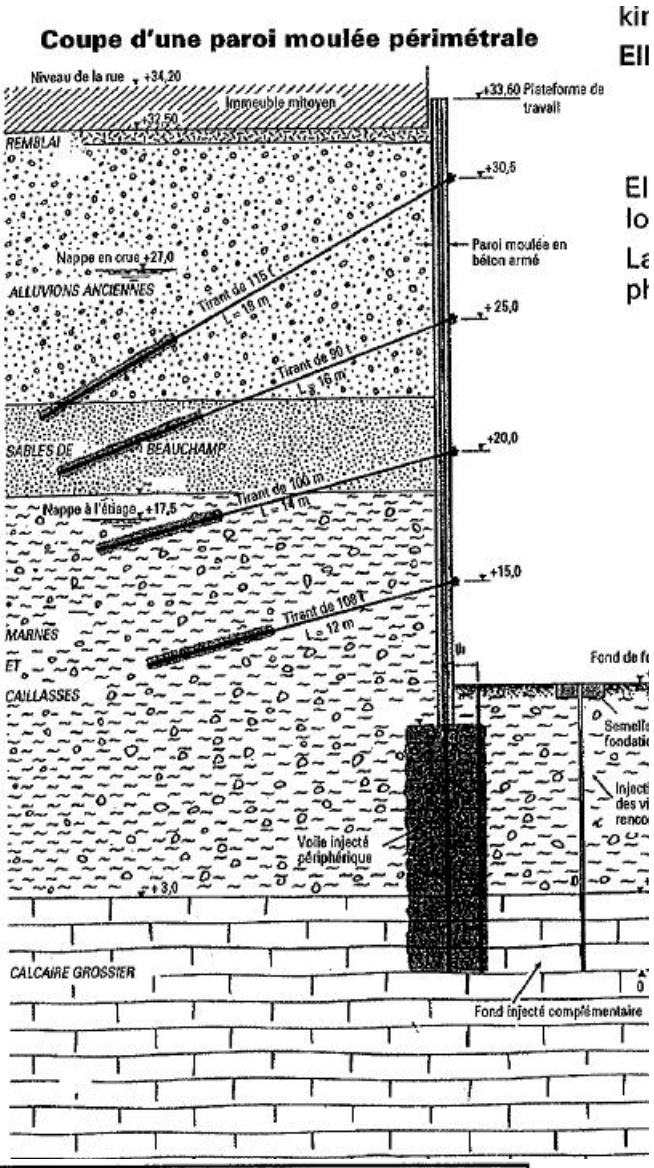
5.1.1 - Excavation d'une tranchée verticale étroite et profonde à partir du niveau du sol **sans blindage ou étaiement.**

5.1.2 - Équilibre des parois (soutènement) par la boue thixotropique qui remplit la tranchée au fur et à mesure de l'excavation.

5.1.3 - Incorporation éventuelle d'une cage d'armatures.

5.1.4 - Remplissage de la tranchée par du béton qui se substitue à la boue à partir du fond de la tranchée.

www.cours-genie-civil.com



Les tirants précontraints sont destinés à stabiliser la paroi moulée. Ils sont placés au fur et à mesure des travaux d'excavation.

www.cours-genie-civil.com

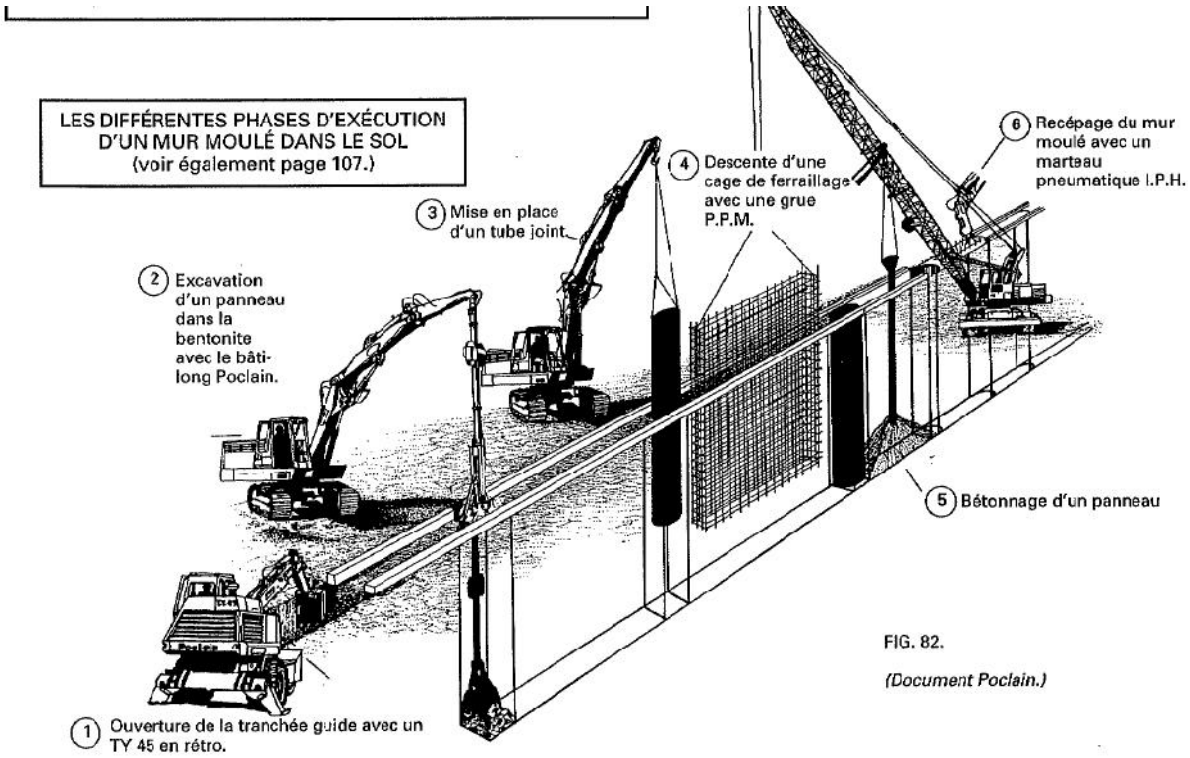


FIG. 82.

(Document Poclain.)

6.2 Paroi moulée et méthode de construction

▶ **Principe :**

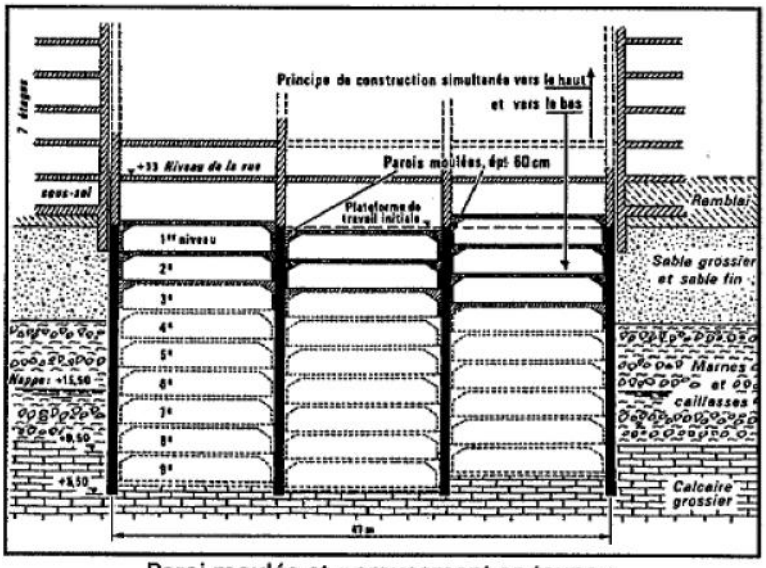
La construction du bâtiment peut s'effectuer à la fois vers le bas et vers le haut.

▶ **Mode opératoire :**

- réalisation de la paroi périmétrale ;
- coulage de la 1re dalle en surface qui vient buter les parois moulées ;
- terrassement sous la dalle sur la hauteur du 1er sous-sol ;
- coulage de la 2e dalle et le cycle recommence.

▶ **Remarque :** Seules les poutres ou les nervures sont coulées pour faciliter le terrassement mécanique et le dégagement des déblais.

www.cours-genie-civil.com



Paroi moulée et « creusement en taupe »
(doc. Solétanche)

6.3 Fondations avec poteaux pré-fondés

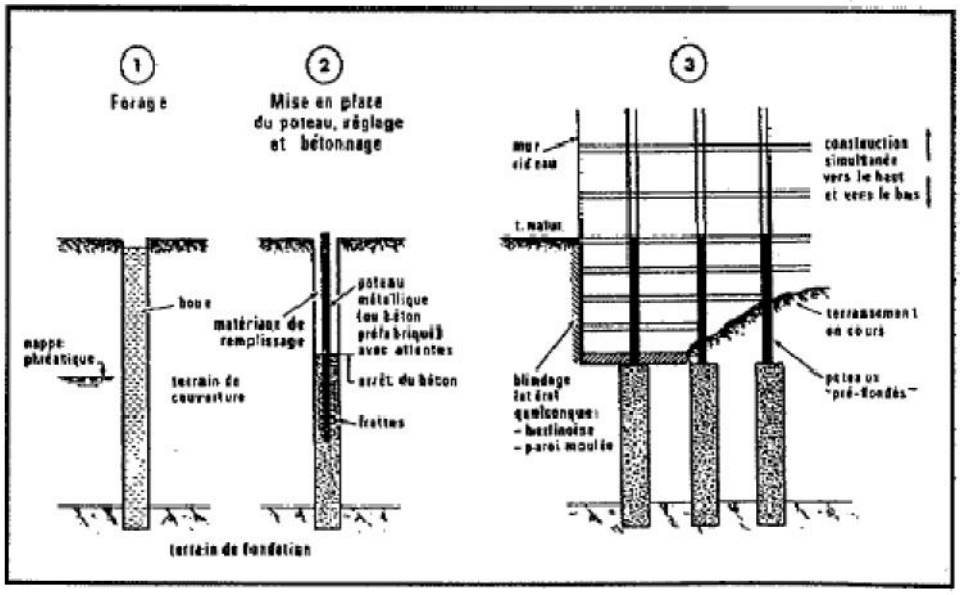
▶ **Méthode :**

① Forage et boue thixotropique.

② Mise en place du poteau métal ou en béton armé ou précontraint et réglage en position.

③ Bétonnage jusqu'au niveau du dernier sous-sol.

▶ **Remarque :** Possibilité de construction vers le bas et vers le haut. (Travaux d'infrastructure et de superstructure.)



Mode de réalisation avec « poteaux préfondés »
(doc. Solétanche)

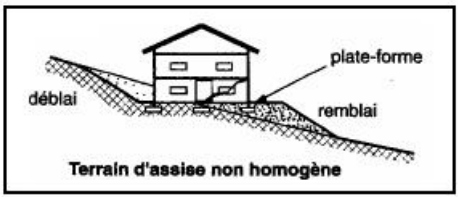
www.cours-genie-civil.com

7 – PATHOLOGIE DES FONDATIONS

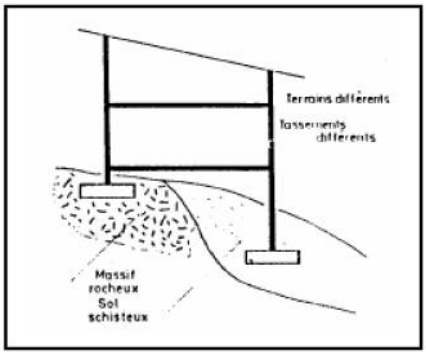
En général, les désordres dus à des problèmes de fondation entraînent des frais importants. Ils sont très variés et d'origines diverses. Leurs effets peuvent aller de la fissuration de la structure du bâtiment jusqu'à sa mise en péril, c'est à dire son abandon pur et simple, la construction devenant impropre à sa destination initiale.

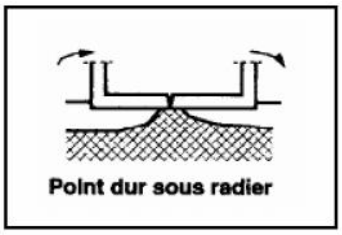
Les désordres peuvent être dus à :

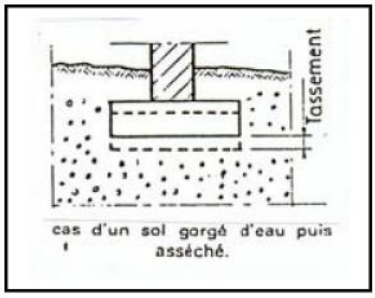
- une **reconnaissance de sol incomplète** et donc souvent un sol mal adapté :
  - profondeur insuffisante des sondages,
  - présence de cavités non détectées,
  - nappe d'eau insoupçonnée,
  - agressivité de l'eau,
  - point dur sous un radier,
  - terrain d'assise non homogène ou peu résistant et très compressible,
  - sol compressible d'épaisseur variable sous radier,
  - sols différents sous un même bâtiment,



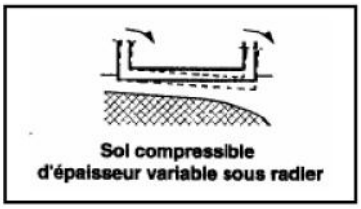
Terrain d'assise non homogène



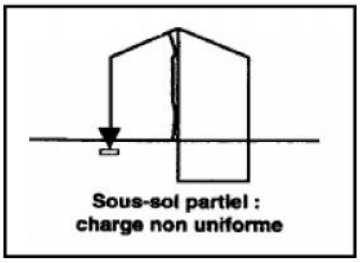

Point dur sous radier

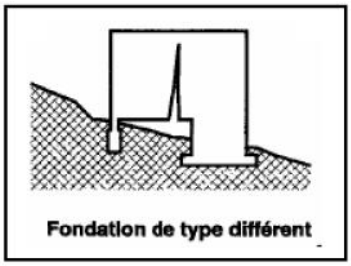


cas d'un sol gorgé d'eau puis asséché.

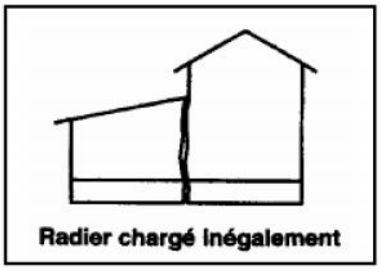

Sol compressible d'épaisseur variable sous radier

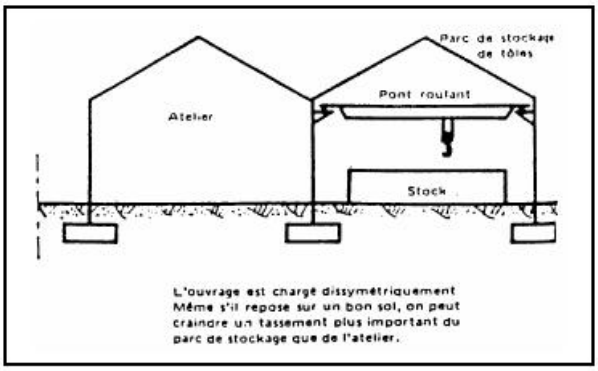
- **une erreur de calcul** ou **de conception** :
  - fondations inadaptées ou mal calculées,
  - fondations différentes sous un même ouvrage,
  - radier chargé inégalement,
  - fondations sur un remblai récent non stabilisé,
  - chargement dissymétrique de l'ouvrage,

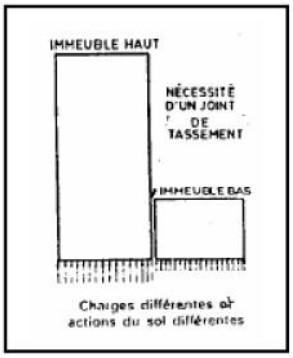

Sous-sol partiel : charge non uniforme

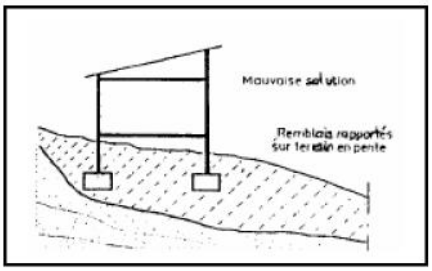

Fondation de type différent

www.cours-genie-civil.com

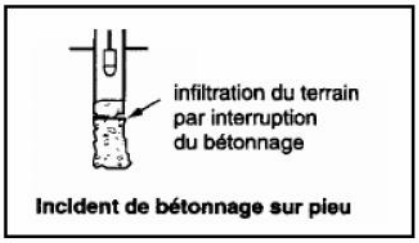






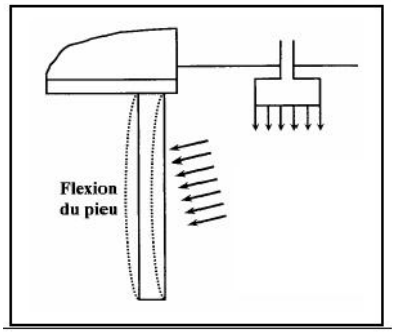


- une **mauvaise exécution** :
  - fondation non mise hors gel car profondeur trop faible,
  - ferraillage de la fondation mal positionné,
  - bétonnage des pieux mal surveillé,
  - oubli du drainage,
  - présence de terre dans le béton des fondations,
- une **cause extérieure** :
  - vibrations importantes lors du battage des pieux d'une construction voisine,
  - pieux pouvant être endommagés par les charges apportées par une fondation superficielle à proximité,



- une **modification des conditions existantes** : reprises en sous-œuvre mal exécutées.

Il en résulte un tassement plus ou moins uniforme de la construction, des tassements différentiels occasionnant des désordres dans la structure et dans le second œuvre ou des désordres dans les constructions existantes voisines.



www.cours-genie-civil.com