

Procédés généraux
des ouvrages géotechniques

9. FONDATIONS PROFONDES

1 Pieux en B. A. (fig. 1 à 5)

Pourquoi ?

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.

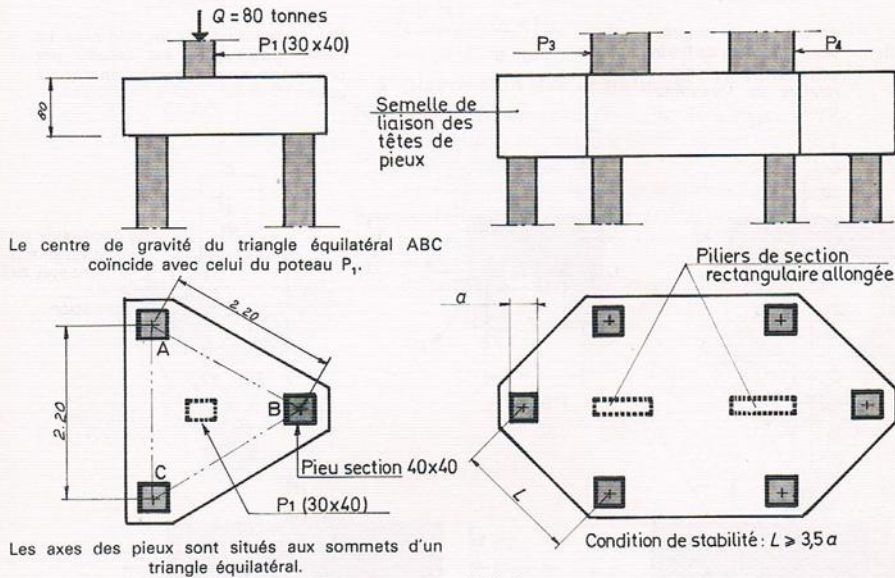


FIG. 3

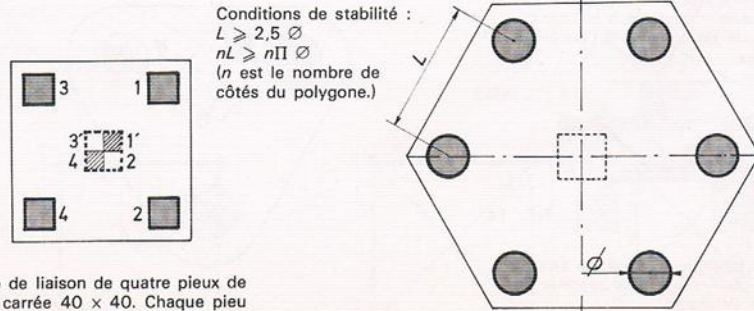


FIG. 4
Semelle de liaison de quatre pieux de section carrée 40×40 . Chaque pieu porte une part de la charge transmise par le poteau et la semelle.

FIG. 5. - Semelle hexagonale.

2 Influence des charges verticales

Comment les efforts sont-ils transmis ?

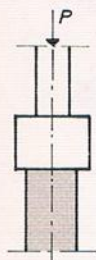
2.1 1^{er} cas : un seul pieu supporte un seul poteau

En théorie, la charge verticale est centrée (fig. 6).

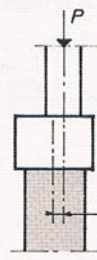
En pratique, la charge verticale est excentrée (fig. 7).

Le pieu est à la fois comprimé et fléchi (fig. 8 et 9).

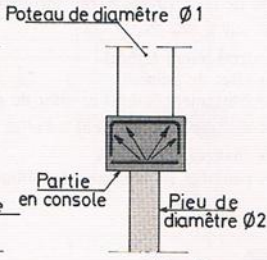
Cette solution n'est pas recommandée.



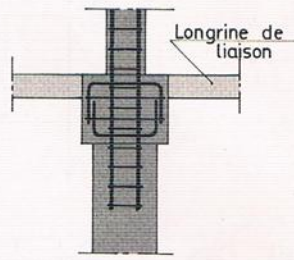
En théorie :
compression.
FIG. 6



En pratique : compression + moment de flexion en raison de la précision relative de l'implantation.
FIG. 7



$\text{Ø}1 > \text{Ø}2$
FIG. 8



Poteau reposant sur un seul pieu. La liaison poteau-pieu est assurée par un massif avec armature en double palier.
FIG. 9

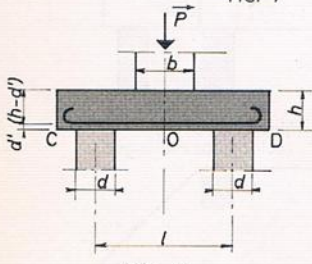


FIG. 10

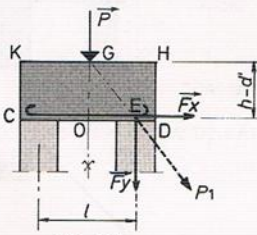


FIG. 11

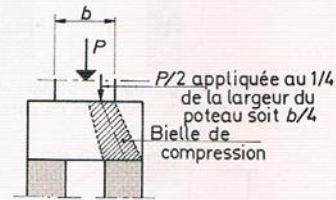


FIG. 12

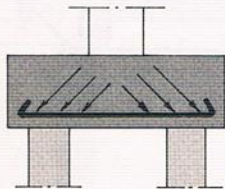


FIG. 13

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

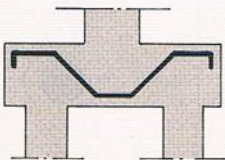


FIG. 14

- Barre reprenant les efforts amenés par les bielles pour les reporter sur les têtes de pieu.

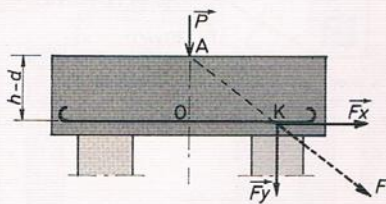


FIG. 15

2.2 2° 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).

2.3 3° 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 F_y agissant sur chacun des pieux est égale à $P/3$.

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

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.

Comment placer les aciers ?

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).

Semelles carrées sur 4 pieux (fig. 21 à 23) :

- les armatures sont placées suivant les côtés (fig. 21) ou suivant les diagonales (fig. 22) ;
- un quadrillage complète l'armature (fig. 23).

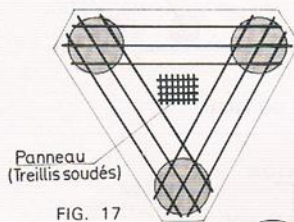


FIG. 17

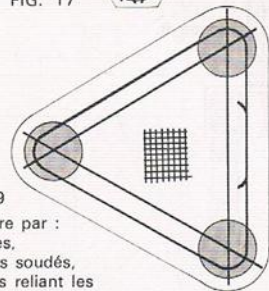


FIG. 19

Armature par :
- cerces,
- treillis soudés,
- aciers reliant les têtes de pieux.

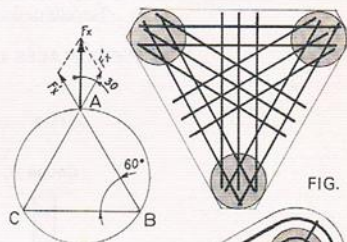


FIG. 16

FIG. 18

L'axe de chaque pieu est en A, B, C, sommets du triangle équilatéral.

FIG. 20

Cerces

Poteau

Pieu

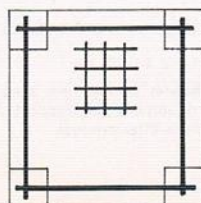


FIG. 21

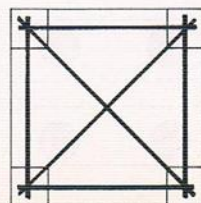


FIG. 22

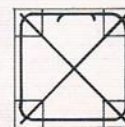


FIG. 23

Comment supporter les murs par des pieux ?

2.6 Cas des murs

Ils peuvent prendre appui sur :

- une série de pieux alignés dans l'axe du mur (fig. 24 A) ;
- une série de pieux placés de chaque côté de l'axe (fig. 24 B et 25).

Le schéma de l'armature est présenté sur les coupes A et B de la figure 24.

Quelle est l'action du vent sur les pieux ?

Quand utiliser des pieux inclinés ?

L'influence du vent en particulier n'est pas négligeable (100 daN/m²) soit, H la résultante des **poussées horizontales** (fig. 26).

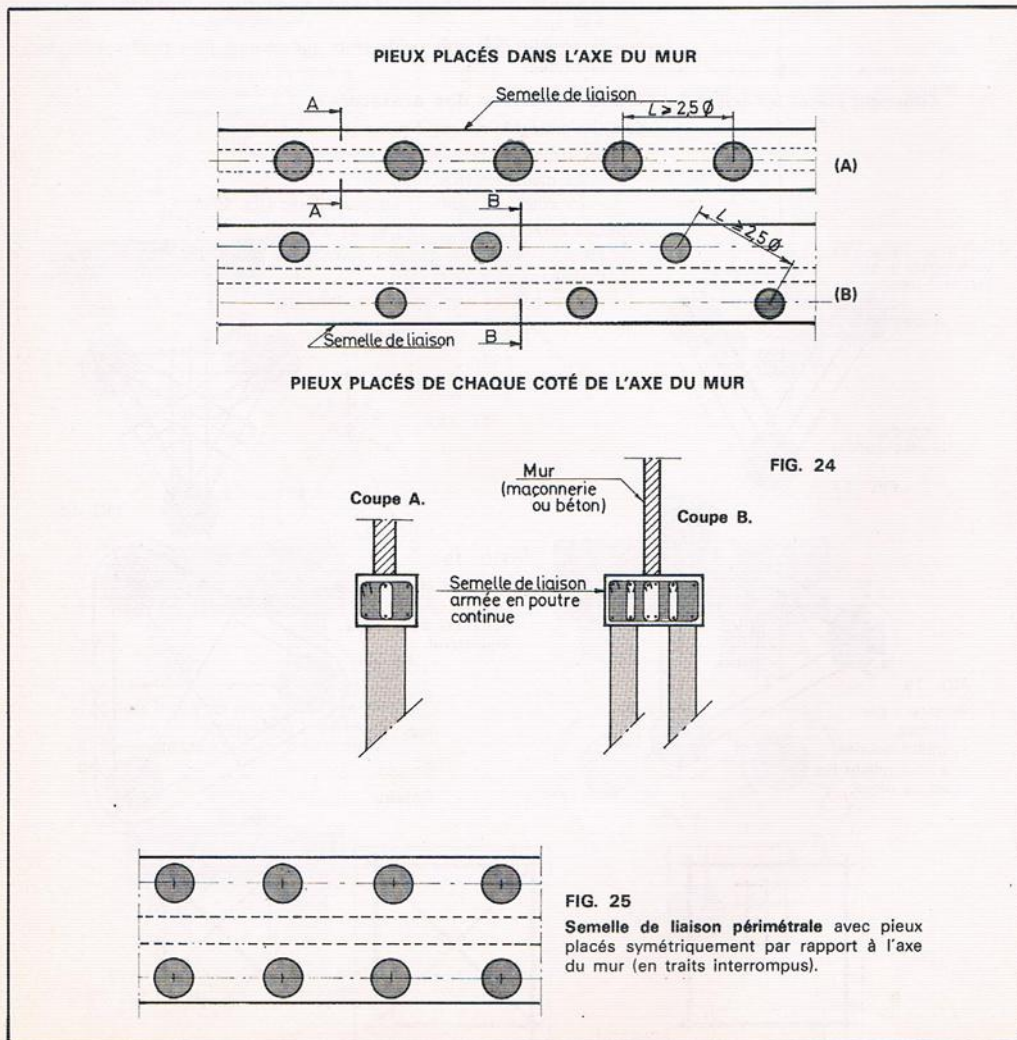
L'équilibre de la construction est obtenu par les actions des pieux P₁, P₂.

De ce fait, le pieu P₁ est soumis à un effort d'arrachement vertical et le pieu P₂ à un effort de compression (fig. 27).

Dans le cas de **poussées obliques**, nous retrouvons entre autres (fig. 28) :

- l'action du vent, des remblais ;
- l'action des charges verticales.

La solution consiste à utiliser des pieux verticaux et des pieux inclinés armés (fig. 29 à 31).



CONSÉQUENCES DES POUSSÉES HORIZONTALES SUR LES PIEUX

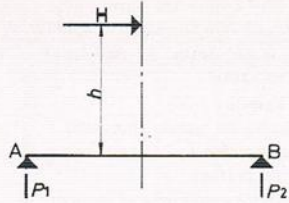


FIG. 26

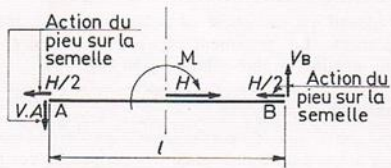


FIG. 27

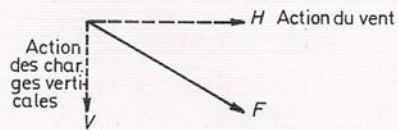


FIG. 28

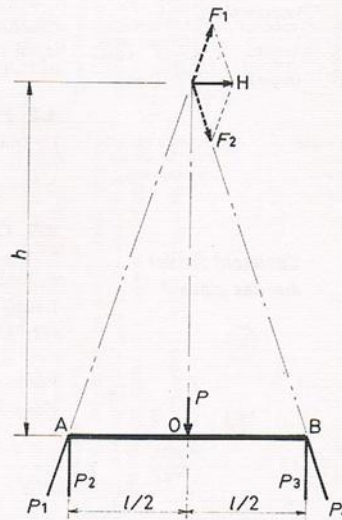


FIG. 29

ACTIONS DES REMBLAIS SUR LES PIEUX

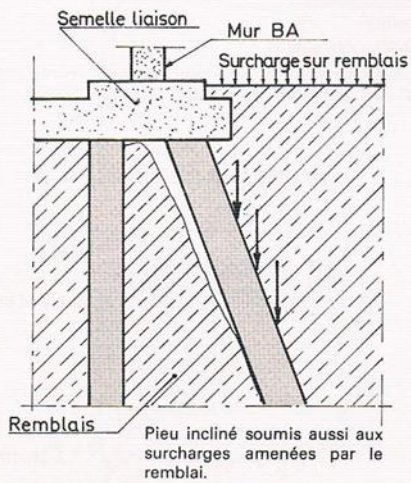
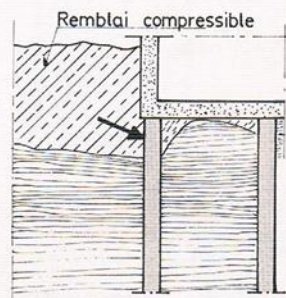


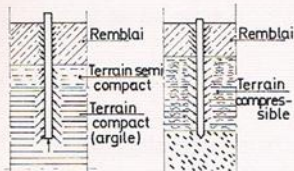
FIG. 30



Poussée oblique engendrée par la surcharge des remblais.

FIG. 31

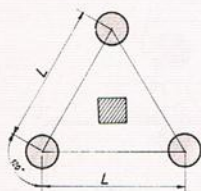
**Des pieux dits « flottants »
Quand ?
Pourquoi ?**



Frottement latéral important.
Pieu flottant.
FIG. 32

Frottement négatif.
Effet de pointe prédominant.
FIG. 33

Comment fonder sur des pieux ?



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



Pieu chemisé.
FIG. 35

4 Influence des sols traversés

4.1 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).

4.2 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).

4.3 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 :

$$S_p = 3 \cdot \pi \cdot \varnothing$$

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

Condition :

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

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

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

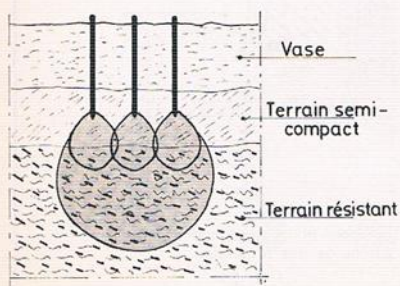
2° Le frottement négatif est réduit en utilisant des pieux chemisés (fig. 35).

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

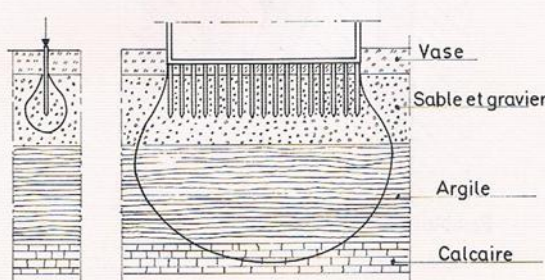
4° L'estimation de la *forte portante* fait intervenir 2 termes pour les pieux moulés dans le sol :

- 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).



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



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

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

PIEUX MOULÉS DANS LE SOL

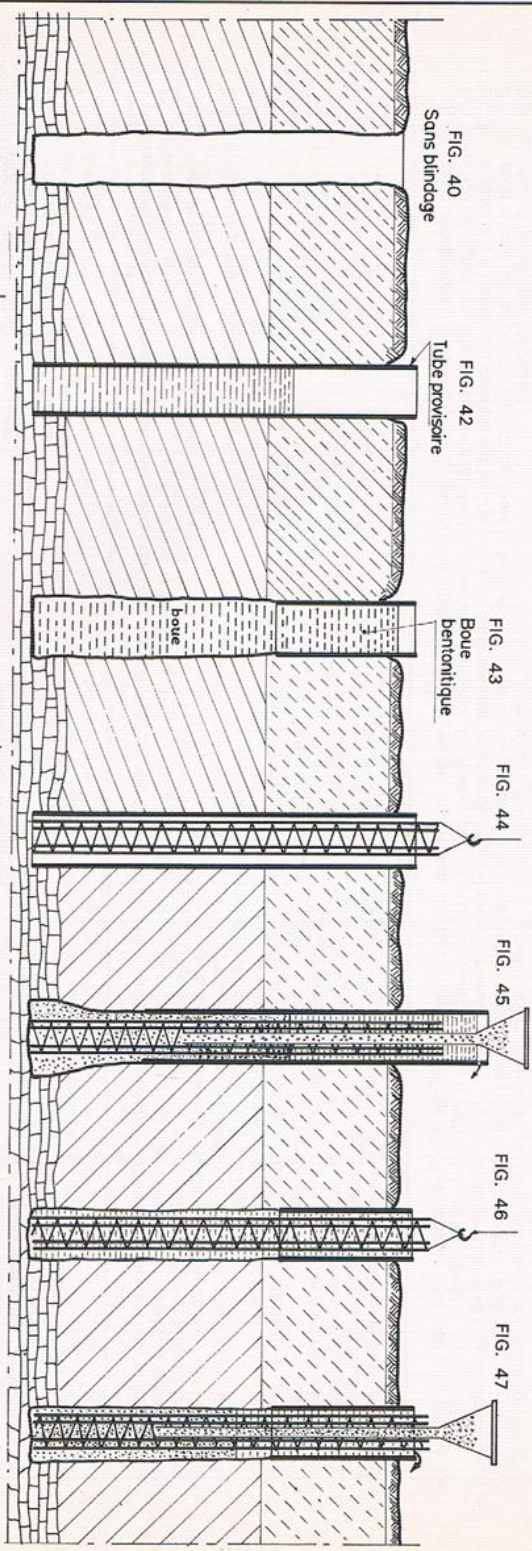


FIG. 40
Sans blindage

FIG. 42
Tube provisoire

FIG. 43
Boue bentonitique

FIG. 44

FIG. 45

FIG. 46

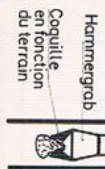
FIG. 47

FORAGE SANS BLINDAGE

Terrains cohérents sans eau, la tenue du terrain n'est due qu'à sa cohésion.
Outillage : Hammergrab, tré-pans, tarières rotatives.

FIG. 41

Le hammergrab tombe en chute libre, les coquilles pénétrant dans le sol, puis se referment par un dispositif spécial et les déblais sont remontés.



FORAGE AVEC BLINDAGE

Métallique (tube provisoire).
 Terrains cohérents ou pulvérulents avec eau.

— Fourreau provisoire pour maintenir le terrain.
 — Vibrofonçage du tube.
Outillage : Hammergrab, tré-pans, tarières, lan-cage.

Hydraulique (boue).
 Le terrain est maintenu par la pression hydraulique croissante avec la profondeur. L'liquide utilisé : boue bentonitique.

Outillage : outils de forage à circulation directe ou inverse.

ARMATURE

Pieux travaillant en compression simple : aciers seulement en tête de pieux pour assurer la reprise.
 — Pieux travaillant en compression accompagnée de flexion, ou pieux soumis à des efforts de traction : aciers longitudinaux avec spirés.
 — Pieux supportant une ossature métal : tête de pieu treillée.

BÉTONNAGE

— Dosage : 200 à 400 kg/m³ de béton.
 — Mise en place au tube plongeur pour éviter la ségrégation.
 — Vibration pour obtenir des caractéristiques mécaniques constantes sur la hauteur du pieu.
 — Garde suffisante pour le relevage du tube provisoire, pour éviter le délavage du béton et assurer sa continuité.

5 Pieux moulés dans le sol

Procédé	Armature	Bétonnage	Avantages Inconvénients	Observations ou renseignements techniques
Sans tubage	Sans acier si le pieu travaille en compression. Aciers plantés en tête pour reprise. Armature complète si le pieu travaille en compression et en flexion.	Béton à tendance sèche. Pilonnage serré.	Terrain comprimé latéralement, base élargie. Grande force portante.	Ce procédé ne peut être effectué dans tous les terrains et il y a un risque d'incorporation de terrain dans la masse du béton et de discontinuité du pieu due à des éboullements.
Avec tubage non obturé + vibration	Armature sur toute la hauteur du pieu.	Avec tubage provisoire pour éviter la ségrégation (goulotte + tube introduit à l'intérieur de l'armature). L'eau chassée par le béton est expulsée à la partie supérieure.	Chaque pieu constitue un sondage. Souplesse d'utilisation. Possibilité de retrait du tube pieu arasé à un niveau quelconque ; pas de recépage.	Vibrofonçage : vibreur et tube sont associés. Le tube pénètre dans le terrain par vibration. Lorsque 2 à 3 m sont foncés on vérifie la verticalité. Le tube se trouvant rempli des matériaux constitués du sol est vidé au hammergrab. Le vibrofonçage permet un compactage du béton permettant une contrainte admissible de 65 bars.
Sans tubage mais avec bentonite	Armature classique, barres longitudinales et frettes.	Avec tubage. Id.	La boue de forage permet : - de refroidir les outils de perforation ; - de remonter les sédiments ; - de maintenir les parois du coffrage. Le système de perforation n'ébranle pas les constructions voisines et ne désorganise pas les terrains traversés.	Circulation directe : une pompe injecte la boue par un canal et la boue remonte les débris de perforation par courant ascendant dans l'espace annulaire compris entre les tiges et les parois du forage. Circulation inverse : on injecte la boue dans l'espace annulaire et la boue remonte dans le canal des tiges actionnant l'outil, c'est-à-dire qu'on inverse le sens de circulation pour procéder au prélèvement en vue de l'analyse du terrain au fur et à mesure de la perforation.
Avec tubage et bouchon béton	Fonçage avec blindage hydraulique (boue bentonitique) (Fig. 43). Tubage provisoire seulement en partie haute du pieu. Outils à circulation directe ou inverse.	Par couches successives, dans le tube de 20 à 50 cm grâce à des repères pour avoir une garde suffisante.	Base élargie compactée formant ancrage dans le terrain comprimé. Bétonnage sans eau d'infiltration grâce au tube et au bouchon de béton. Rapidité d'exécution.	Épaisseur du tube : 20 à 35 mm pour le tube de travail. Dosage : 200 à 400 Kg de ciment par m ³ rapport C/E élevé. Forte compacité du béton due au pilonnage intensif. Type Franki.

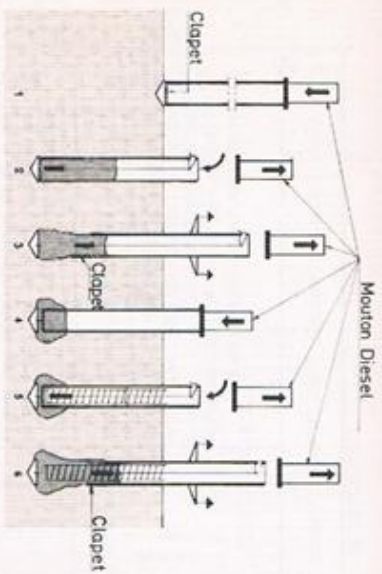


FIG. 48. - PIEUX MOULÉ DANS LE SOL A TUBE BATTU.

1^{re} phase : Poser le mouton Diesel sur le tube-chemise et le battre à la profondeur requise.
 2^e phase : Monter le mouton, pendre un vibreur aiguille au centre du tube et couler une certaine quantité de béton.
 3^e phase : Remonter le tube-chemise d'une certaine hauteur, la plaque clapet s'ouvre et le béton est vibré.
 4^e phase : Enlever le vibreur aiguille et reposer le mouton sur le tube avec son casque de battage, le clapet se referme. Batre à nouveau pour former une base élargie.
 5^e phase : Descendre l'armature et remplir partiellement le tube.
 6^e phase : Extraire le tube et vibrer le béton en même temps. Le cycle recommence pour le remplissage.

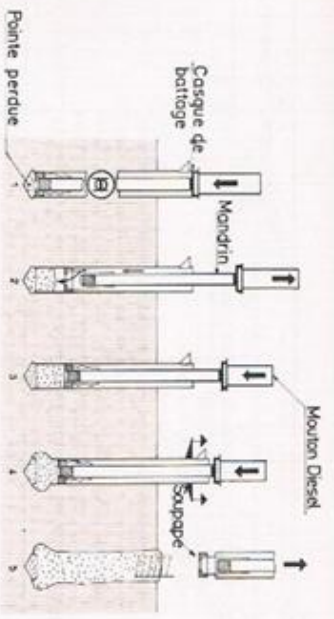


FIG. 49. - PIEU MOULÉ A TUBE BATTU, A BASE OBTURÉE.

1^{re} phase : Fonçage du tube obturé par une pointe perdue. A l'intérieur du tube-chemise, un mandrin est fixé en haut au casque de battage et repose en bas sur la pointe perdue.
 2^e phase : Soulèvement du mandrin libérant le passage pour introduire le béton.
 3^e phase : Descente du mouton Diesel et du mandrin : l'ouverture de la soupape est fermée.
 4^e phase : Formation d'une base élargie par battage du mandrin.
 5^e phase : Bêtonnage du tut du pieu : lever le mandrin, couler une certaine quantité de béton, redescendre le mandrin et le mouton Diesel et arracher le tube-chemise.

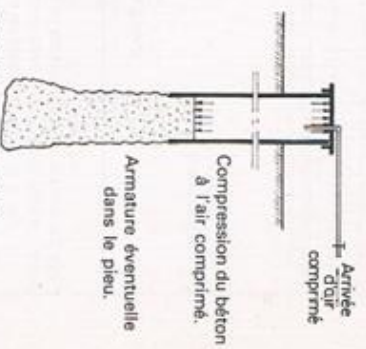


FIG. 55. - Pieu Froté.

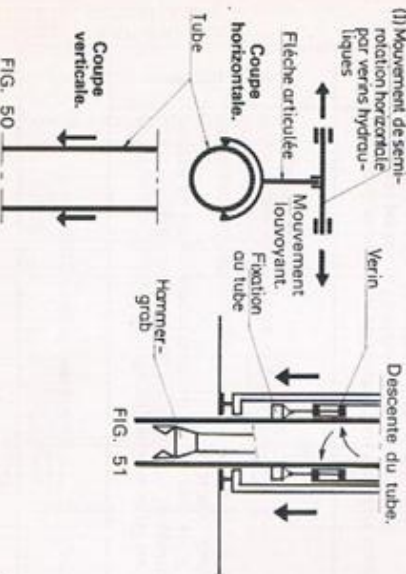


FIG. 50. (I) Mouvement vertical par verins. (II) et (III) sont simultanés.

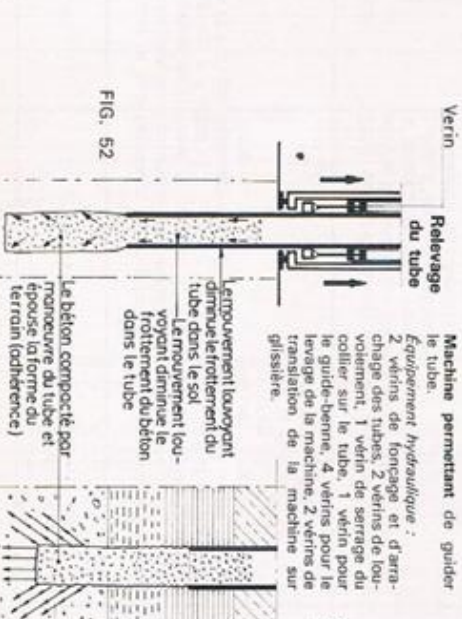


FIG. 52

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE TYPE « BENOTO »

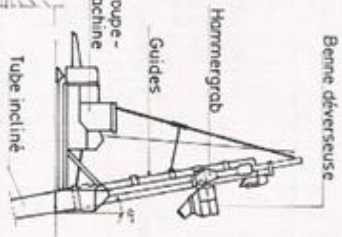


FIG. 54

FIG. 53

Pression élevée exercée sur le terrain due à la grande hauteur de béton frais

Pieux moulés dans le sol (suite)

Caractéristiques du procédé	Armature	Bétonnage	Avantages Inconvénients	Observations ou renseignements techniques
<p>A l'abri d'un tubage récupérable, le pieu n'est pas réalisé par battage et compression du sol mais par extraction des terres.</p> <p>Outils : matériel classique : culiers, tarières, trépan, etc.</p> <p>Tubes mis en place au fur et à mesure de l'enfoncement.</p>	<p>Pieu armé sur toute sa hauteur, 5 à 6 barres longitudinales avec un \varnothing variant de 12 à 20 mm, freinage en \varnothing 6 à 8 mm au pas de 15 à 20 cm.</p>	<p>Bétonnage à sec : béton à consistance terre humide, puis au mouton de 500 à 800 kg.</p> <p>Bétonnage sans eau avec tube plongeur.</p> <p>*</p>	<p>Ceux des pieux moulés dans le sol, ils peuvent être exécutés avec une inclinaison allant jusqu'à 25°.</p> <p>En terrain aquifère on utilise des pieux chemisés (chemises en métal en tôle mince permettant le moulage du fil en couches fluides).</p>	<p>Pieux Forum. Tubes de \varnothing 40, 50, 60 cm. Éléments de 1,50 m de long.</p> <p>Pieux à tube battu et pointe perdue. (Fig. 48.)</p>
<p>Tube battu dont la base est bouchée par une pointe perdue. A l'intérieur du tube chemisé se trouve un mandrin fixé en haut au casque de battage et s'appuyant en bas sur le bord supérieur de la pointe.</p>	<p>Armature classique.</p>	<p>Par le casque de battage, on soulève le mandrin qui libère le passage du béton vers la pointe. C'est alors que s'opère la descente du mandrin et du mouton et le béton se trouve pilonné.</p>	<p>Ceux des pieux moulés avec champignon en pied.</p>	<p>Équipements de battage Delmag. (Fig. 49 et voir fig. 64.)</p>
<p>Tube de coffrage enfoncé ou retiré grâce au mouvement loutroyant obtenu par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - un mouvement horizontal; - un mouvement vertical; <p>obtenus par vérins hydrauliques.</p> <p>Bat : diminution du frottement latéral ou fongage. Forage au hammergrab (benne preneuse spéciale).</p>	<p>Id.</p>	<p>Le compactage du béton s'effectue par manœuvre du tube et par pression des couches supérieures. Vibration en tête de pieu non exclue.</p>	<p>Guidage précis du forage grâce à la machine spéciale se déplaçant sur patins hydrauliques. Inclinaison possible jusqu'à 12°.</p>	<p>Procédé Bemoto. Poids de la machine : 32 tonnes. Longueur : 8,70 m. Hauteur : 13,50 m.</p> <p>Trousse coupantes pour terrains durs fixées à l'extrémité du tube (voir Fig. 80). (Fig. 50 à 54.)</p>
<p>Par air comprimé</p> <p>Trou foré à l'intérieur d'éléments vissés dont l'ouverture supérieure comporte une culasse traversée par des tubulures servant à l'arrivée du béton et à l'arrivée de l'air comprimé.</p> <p>Principe : utilisation de l'air comprimé pour éviter toute vibration du sol.</p>	<p>Armature en tête du poteau.</p>	<p>A chaque adduction de béton la culasse est remplacée, l'air comprimé est admis et la pression (ainsi que les mouvements du tube) comprime le béton.</p>	<p>Possibilité de fonder sans ébranler le terrain. Appareillage peu encombrant. Possibilité de travailler en espace réduit. Le type de pieu n'est pas utilisable pour les gros diamètres.</p>	<p>Pieux Proté. (Fig. 55.)</p>

Autres procédés : Paumelle, West, DB Loire, Western Foundation, Simplex, etc.