

Fondations profondes, parois de soutènement, Amélioration des sols

01 DEFINITION – TERMINOLOGIE

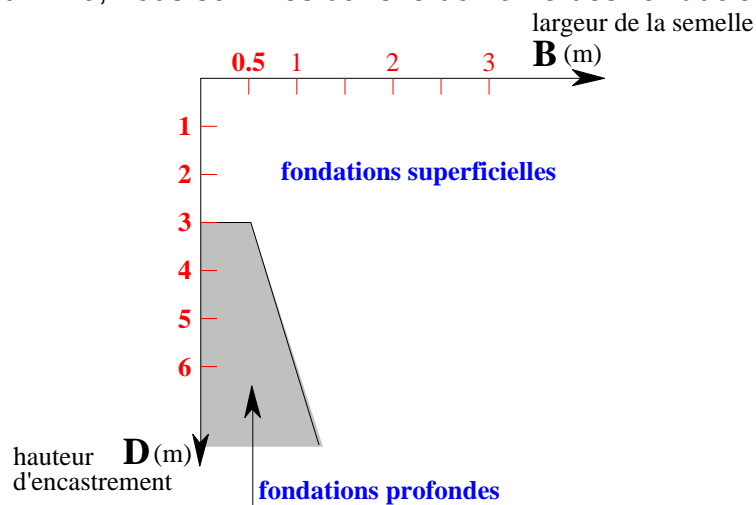
Une **fondation profonde** est caractérisée par la manière dont le sol est sollicité pour résister aux charges appliquées.

- 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** »

Dans ce qui suit les notations sont conformes au fascicule 62 titre V.

02 PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

02.01 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_p)
- par le frottement latéral entre le sol et le pieu (effort de frottement latéral noté Q_s)

L'effort de pointe est proportionnel à :

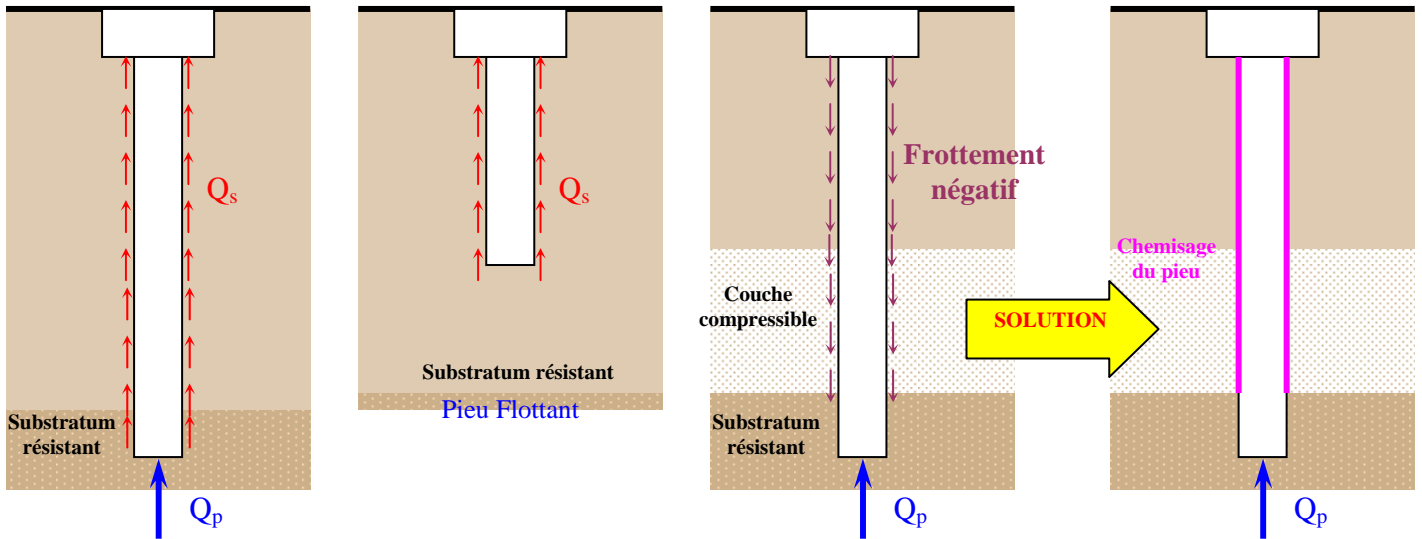
- section de la base du pieu
- à la résistance du substratum

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 un 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.



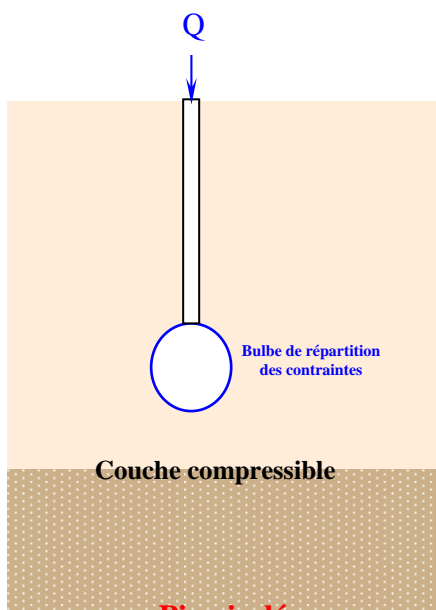
Attention, si le pieu travaille à l'arrachement, $Q_p = 0$. Il est admis que le frottement latéral mobilisable est identique selon que le pieu travaille en compression ou en traction.

02.02 Cas de groupes de pieux :

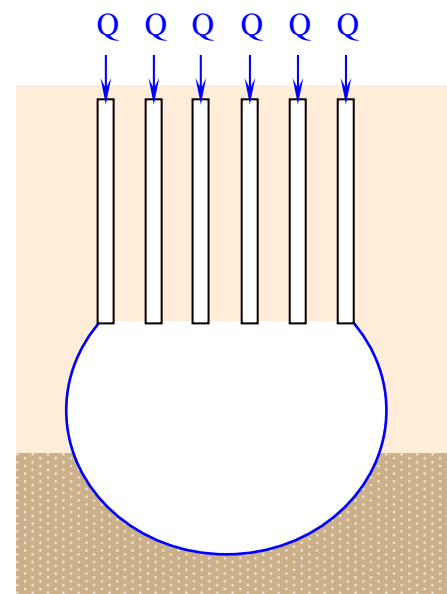
D'une part, lorsque les pieux sont suffisamment rapprochés, il ne suffit pas de vérifier la résistance d'un pieu isolé. En effet, il arrive que la charge limite d'un groupe de pieux Q_{gu} soit **inférieure à la somme** des charges limites de chaque pieu isolé Q_{ui} .

Le coefficient d'efficacité du groupe de pieu se définit comme suit :

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



Pieu isolé
 la zone compressible n'est pas influencée par le pieu



Groupement de pieux
 la zone compressible est influencée par l'effet radial 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**.

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

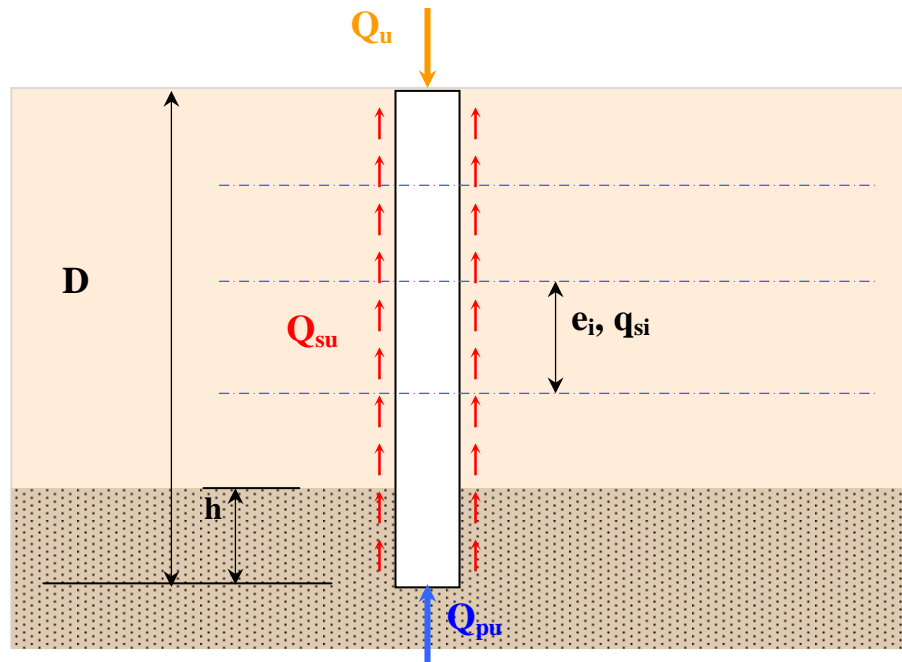
03 DETERMINATION DE LA CHARGE LIMITE D'UN PIEU ISOLE

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 **stratum 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 : $Q_{pu} = \rho_p \cdot A \cdot q_{pu}$

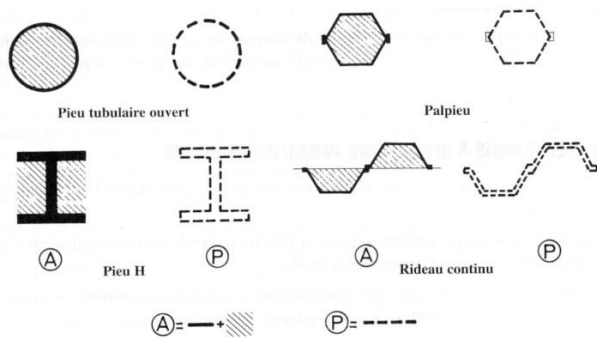
La charge limite de frottement est donnée par :

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

Avec :

- ρ_p : coefficient réducteur de section de l'effort de pointe
- ρ_s : 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
- q_{si} : frottement latéral unitaire limite dans couche i
- e_i : 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



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

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

Les valeurs de p_p et p_s sont données dans le tableau ci-contre.

04 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.

04.01 Dimensionnement par la méthode pressiométrique

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 :

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

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 $p_{le}^* = \frac{1}{b+3a} \int_{D-b}^{D+3a} p_l^*(z) \cdot dz$

Avec :

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

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

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.

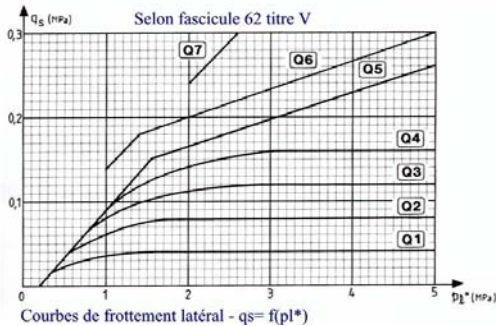
Nature des terrains		Eléments mis en oeuvre sans refoulement du sol	Eléments mis en oeuvre avec refoulement du sol
ARGILES – LIMONS	A	1,1	1,4
	B	1,2	1,5
	C	1,3	1,6
SABLES – GRAVES	A	1,0	4,2
	B	1,1	3,7
	C	1,2	3,2
CRAIES	A	1,1	1,6
	B	1,4	2,2
	C	1,8	2,6
MARNES , MARNO – CALCAIRES		1,8	2,6
ROCHES ALTEREES (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 $q_s = f(p^*)$ sont données par le tableau suivant



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'} Q ₂ ⁽¹⁾	Q _{2'} Q ₃ ⁽¹⁾	-			Q ₁	Q ₃	Q _{4'} Q ₅ ⁽²⁾	Q ₃	Q _{4'} Q ₅ ⁽²⁾	Q ₆
Foré boue	Q ₁	Q _{1'} Q ₂ ⁽¹⁾	Q ₁	Q _{2'} Q ₁ ⁽²⁾	Q _{3'} Q ₂ ⁽²⁾	Q ₁	Q ₃	Q _{4'} Q ₅ ⁽²⁾	Q ₃	Q _{4'} Q ₅ ⁽²⁾	Q ₆	
Foré tubé (tube récupéré)	Q ₁	Q _{1'} Q ₂ ⁽³⁾	Q ₁	Q _{2'} Q ₁ ⁽²⁾	Q _{3'} Q ₂ ⁽²⁾	Q ₁	Q ₂	Q _{3'} Q ₄ ⁽³⁾	Q ₃	Q ₄		
Foré tubé (tube perdu)				Q ₁	Q ₂					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					Q ₃	Q ₄	Q ₄
Battu préfabriqué béton	Q ₁	Q ₂		Q ₃						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					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 ₅	Q ₆		Q ₆		Q ₇ ⁽⁷⁾

(1) Réajustage et rainurage en fin de forage.
(2) Pieux de grande longueur (supérieure à 30 m).
(3) Forage à sec - tube non louvoyé.
(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 virule foncée perdus (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	$Q_c = 0.7 Q_{pu} + 0.7 Q_{su}$	

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-permanentes	$0^{(1)}$	$\frac{Q_c}{1.40}$
⁽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			

05 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. Il 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 a pour effet de remanier le sol et de le décompresser. Le frottement latéral est donc diminué, sauf pour certains types de mise en œuvre (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 vibro-compacté)
- les plots pilonnés (excavation à la pelle mécanique, puis introduction de matériaux granulaires sains subissant un pilonnage intensif)

05.01 Différentes catégories de pieux

Les documents réglementaires classent les pieux selon les 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
- 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

05 MODES OPERATOIRES

Il s'agit de techniques mises en œuvres par des entreprises spécialisées dans le domaine des fondations spéciales .

Les documents suivants sont extraits des sites Internet de

Solétanche-Bachy <http://www.soletanche-bachy.com>

Franki http://w4-web188.nordnet.fr/fs_accueil.html

Les pieux *Pieux forés simples*

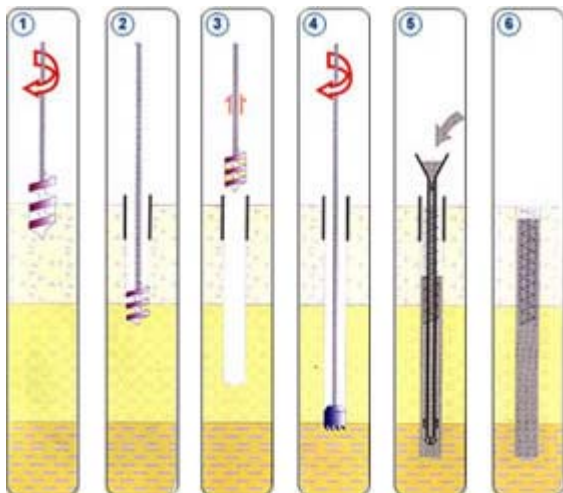
Procédé sans nuisance sonore, sans vibration.

Ancrage dans les terrains durs, à grande profondeur.

Tubage partiel, provisoire ou définitif, selon besoin.

Outils de forage :

Tarière, bucket, carottier, trépan.

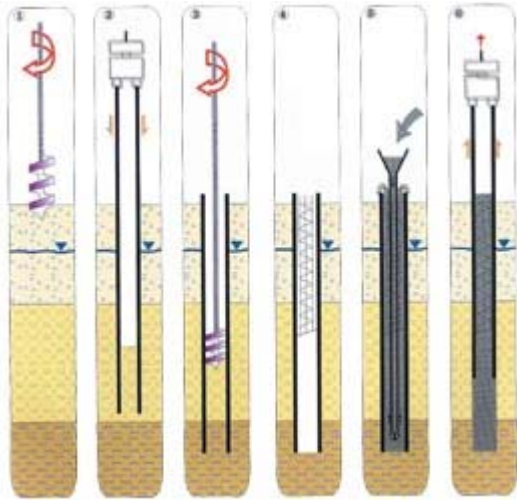


- 1) Mise en fiche, réglage, pré forage.
- 2) Mise en place de la virole.
- 3) Forage à la tarière.
- 4) Ancrage au carottier (selon terrains).
- 5) Mise en place d'armatures partielles ou totales
bétonnage à la colonne.
- 6) Contrôle de l'arase béton.





Pieux forés tubés vibrofonçés



Procédé qui permet de bonnes cadences dans les terrains médiocres.
Tubage sur la hauteur des terrains instables.
Ancrage dans les terrains durs, à grande profondeur.

Outils de forage : Tarière, bucket, carottier, trépan.

- 1) Mise en fiche, réglage, pré forage.
- 2) Vibro-fonçage du tubage de travail.
- 3) Forage et extraction des terres.
- 4) Mise en place d'armatures partielles ou totales.
- 5) Bétonnage au tube plongeur.
- 6) Extraction du tube de travail.

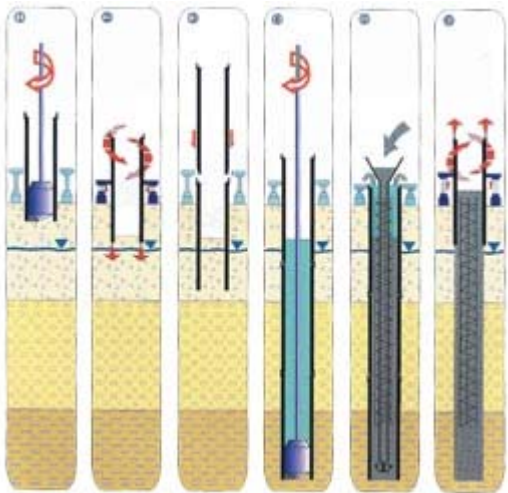




Pieux forés tubés avec tubage louvoyé

Procédé sans nuisance sonore, sans vibration.
S'adapte facilement à des profondeurs d'ancrage variables.
Tubage provisoire sur la hauteur des terrains instables.
Ancrage dans les terrains durs, à grande profondeur.

Outils : Tarière, bucket, carottier, benne circulaire, trépan.



- 1) Mise en fiche, réglage, pré forage à l'abri du premier élément de tubage.
- 2) Fonçage du tubage par la louvoyeuse, forage dans le tube au fur et à mesure.
- 3) Clavetage des éléments de tubage à l'avancement.
- 4) Ancrage.
- 5) Mise en place d'armatures partielles ou totales, bétonnage au tube plongeur.
- 6) Extraction des tubages par la louvoyeuse.





Pieux et barrettes forés à la boue

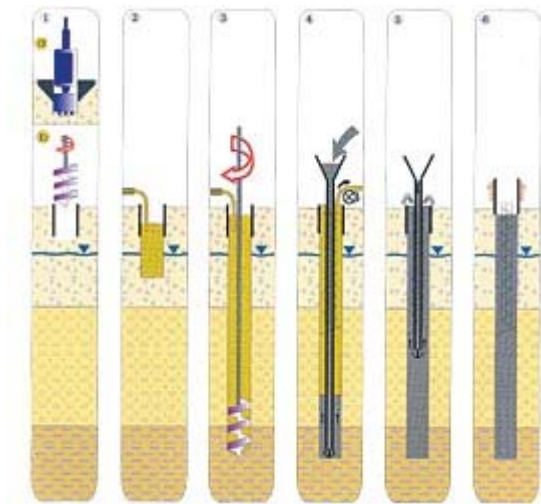
Grande profondeur, terrains de toutes natures.
Stabilité des parois de forage assurée par une boue thixotropique.

a) Forage rectangulaire : Barrette

Outils : benne, trépan, fraise hydraulique.

b) Forage circulaire : Pieu

Outils : bucket, carottier, trépan.



- 1) Implantation des murettes guides (a) ou pré forage et mise en place de la virole (b).
- 2) Mise en oeuvre de la boue.
- 3) Forage sous charge de boue.
- 4) Recyclage de la boue, mise en place des armatures partielles ou totales, bétonnage au tube plongeur.
- 5) Tube plongeur relevé par éléments, fin du bétonnage.
- 6) Extraction de la virole (b), contrôle de l'arase béton.





Pieux à la tarière creuse

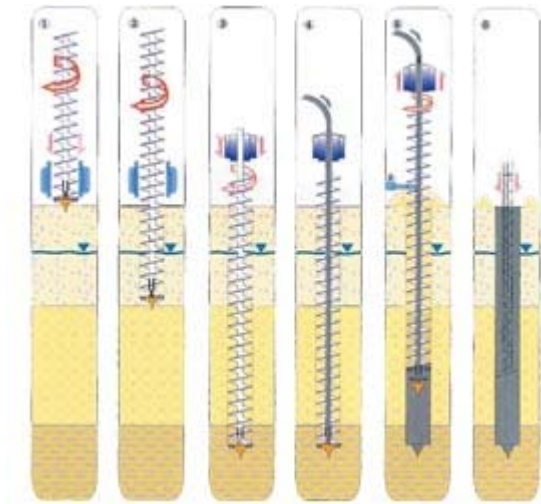
Procédé sans nuisance sonore, sans vibration.

Exécution rapide, environnement sensible.

Béton injecté à la pompe.

Enregistrement des paramètres d'exécution.

Outils spéciaux : Rockbit télescopique, pointe carbure.



1) Mise en fiche, réglage des guides de forage.

2) Forage.

3) Ancrage par rotation et avec poussée sur l'outil.

4) Injection de béton dans l'axe creux de la tarière.

5) Remontée de la tarière en rotation lente
(dans le sens du vissage).

Nettoyage de la tarière, bétonnage contrôlé en continu.

6) Mise en place d'armatures.

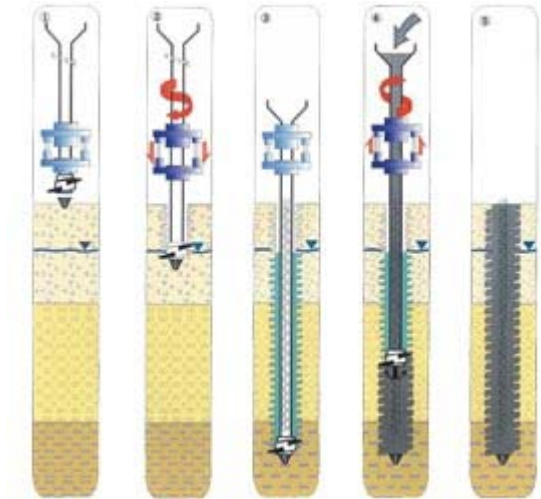




Pieux vissé moulé (pieux Atlas)

Pieu vissé moulé dans le sol, exécuté sans extraction de terre et sans vibration.
Technique rapide, environnement sensible, chantier propre.
Machine compacte.

Système breveté, cahier des charges spécifique



- 1) Mise en fiche, réglage et pose d'une pointe perdue.
- 2) L'outil est foncé par combinaison du vissage et du vérinage dans le sol refoulé.
- 3) Mise en place d'armatures toute hauteur (si nécessaire).
- 4) En dévissant, le vérinage augmente par refoulement du sol
l'épaisseur de l'empreinte laissée par l'outil,
la charge de béton garantissant un parfait moulage de celle-ci.
- 5) Mise en place d'armatures de hauteur limitée.





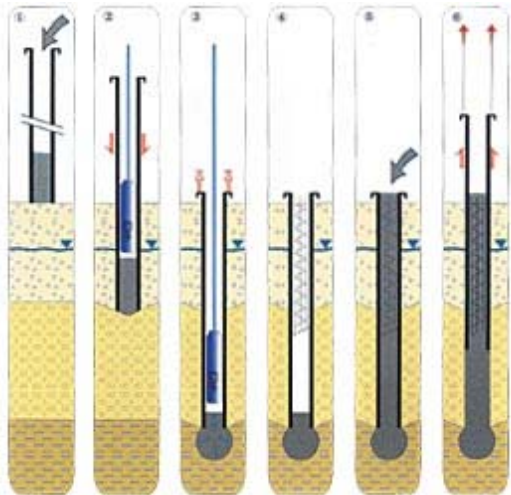
Pieux Franki

Procédé sans extraction de terre, sans nuisance sonore.

Adaptation de l'énergie de battage à l'environnement.

Refoulement du sol.

Possibilité de réaliser une base élargie.



- 1) Mise en fiche, réglage, confection d'un bouchon
- 2) Pilonnage en fond de tube du bouchon, entraînement du tube qui refoule le sol.
- 3) Réalisation de la base élargie dans la couche d'ancrage.
- 4) Mise en place d'armatures partielles ou toute hauteur.
- 5) Bétonnage à sec.
- 6) Extraction du tube.

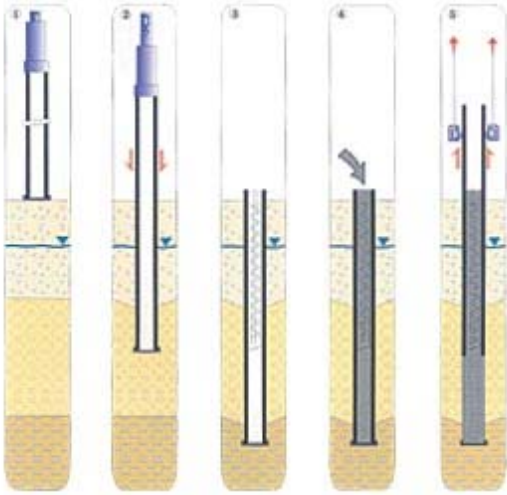




Pieux à tube battu moulés dans le sol

Refoulement du sol, plate-forme de travail propre.
Cadences d'exécution rapide.

Mini-pieux : Ø 244 à 356 mm.



- 1) Mise en fiche, réglage, pose d'une plaque métallique perdue.
- 2) Fonçage par battage au mouton en tête du tube.
- 3) Mise en place d'armatures partielles ou toute hauteur.
- 4) Bétonnage à sec.
- 5) Extraction du tube (vibré si nécessaire).





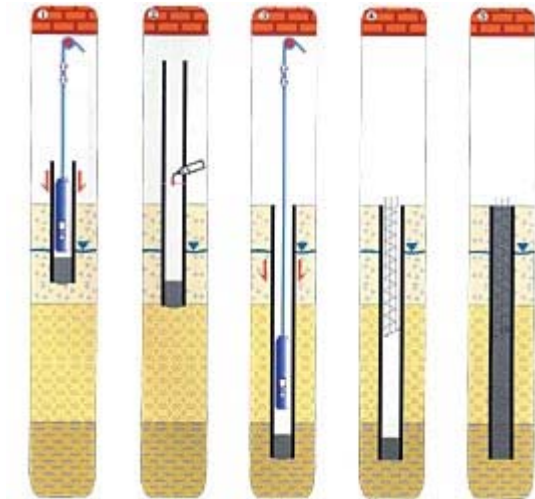
Pieux pilonnés de petit diamètre

Travail sous hauteur réduite, espace exigü.

Travail propre, sans nuisance sonore.

Adaptation de l'énergie de battage à l'environnement.

Tube définitif.



- 1) Mise en fiche, réglage, confection du bouchon entraînant le tube par pilonnage.
- 2) Soudure d'éléments de tube de longueur variable (suivant hauteur disponible) à l'avancement.
- 3) Ancrage contrôlé par mesure des refus.
- 4) Mise en place d'armatures partielles ou toute hauteur.
- 5) Bétonnage à sec.

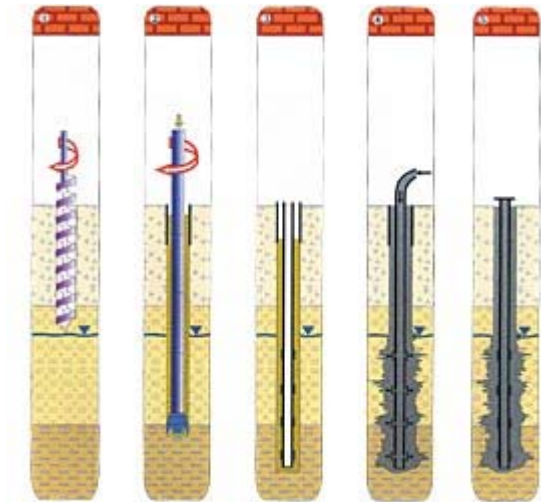




Micropieux

Travail sous hauteur réduite, espace exigu.
Reprise d'efforts de soulèvement.
Reprise en sous oeuvre.
Frettage de talus.

Outils : Tarière, taillant, tricône, marteau fond de trou.



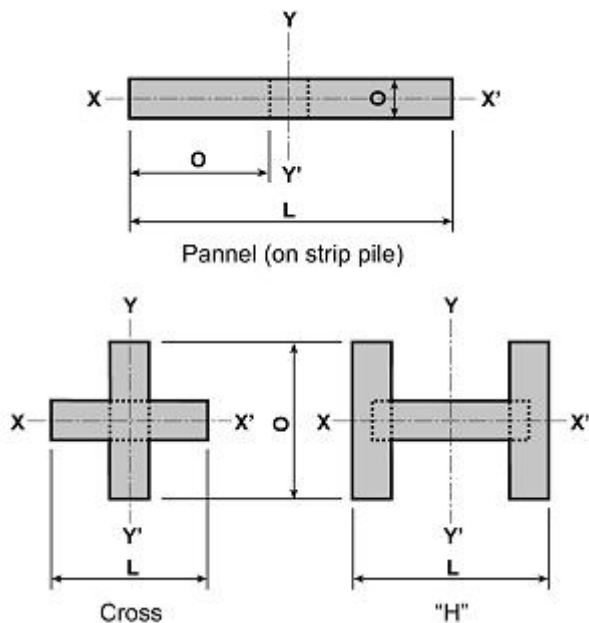
- 1) Mise en fiche, réglage et forage.
- 2) Forage sous tubage, boue, coulis ou mortier, ou à l'air.
- 3) Mise en place d'une armature pouvant être équipée de manchettes pour l'injection sous pression, par éléments vissés ou soudés de longueur adaptée à la hauteur disponible.
- 4) Scellement au coulis ou au mortier de l'armature, injection adaptée.
- 5) Recépage et soudage d'une plaque.







Barrettes



Il s'agit d'un type de pieux forés et moulés dont les caractères distinctifs concernent la forme et le mode de forage.

On utilise des outillages de forage à benne ou de type Hydrofraise dont les dimensions constituent la base de celles des appuis.

Les appuis les plus simples sont réalisés avec un seul coup de benne (ou Hydrofraise) "standard".

Les dimensions sont alors :

largeur : 0.52, 0.62, 1.02, 1.22, 1.52 m

ouverture : 1.80, 2.20, 2.70, 3.00 m

A partir de ces bases, on peut concevoir des

appuis plus grands ou plus rigides : barres, croix, H, T, etc...

Les méthodes de calcul et de dimensionnement sont celles des pieux forés et moulés.

Appuis multiformes usuels

MODE D'EXECUTION

Il comprend classiquement trois étapes :

- forage,
- mise en place des armatures,
- bétonnage.

Le forage est généralement fait sous boue bentonitique, comme pour les parois classiques.

Souvent, selon la nature de la plate-forme de travail, il est utile de prévoir un dispositif analogue à la pré saignée.

Après dessablage de la boue de forage, la cage d'armatures est descendue dans la saignée. Le bétonnage est effectué de façon normale, au tube plongeur. Si les dimensions l'exigent, on met en œuvre plusieurs tubes de bétonnage.

AVANTAGES DES APPUIS MOULES



Les appuis ont divers avantages inhérents à leur forme :

- résistance aux efforts horizontaux supérieure à celle des pieux circulaires de même section,
- adaptation aisée aux structures, de façon à mettre un seul appui sous chaque poteau ou organe porteur,
- meilleure mobilisation du frottement latéral qu'avec un pieu de même section, car le périmètre est plus grand.

Le domaine d'application préférentiel est celui des hautes capacités portantes : à partir de 5 000 kN.

La faculté d'élargir leur surface à volonté rend leurs possibilités quasi

illimitées.

LES CONTRÔLES

Au cours de la réalisation, on contrôle successivement :

- la qualité de la boue, la verticalité et la profondeur du forage,
- la position des armatures,
- le volume de béton à chaque niveau.

Après prise de béton, un contrôle de qualité souvent pratiqué consiste à vérifier la continuité du bétonnage au moyen d'un contrôle sonique. A cette fin, 4 tubes (ou plus) sont incorporés aux armatures. Non destructif, ce type de contrôle se révèle généralement très rigoureux et fiable.

LES ESSAIS DE CHARGEMENT

Le développement des tirants précontraints a permis de réaliser des essais de chargement de haute capacité avec des coûts relativement acceptables.

IMAGE

L'exemple ci-dessus concerne une des 113 barrettes 2.20 x 1.33 m chargées à 1 340 t destinées à porter un réservoir du terminal méthanier Gaz de France à St NAZAIRE.

L'essai a lieu sur une demi-barrette, soit 2.20 x 0.62 m. La charge est mobilisée par 4 tirants précontraints 18 T 15 capables de 1 764 t à la rupture.

La charge maximale appliquée correspond à 1.5 fois la charge de service et à un taux de travail du béton de 7 MPa.

Les témoins sonores permettant de suivre la répartition des efforts le long du fût de l'appui montrent que l'essentiel de la charge est repris par la pointe.

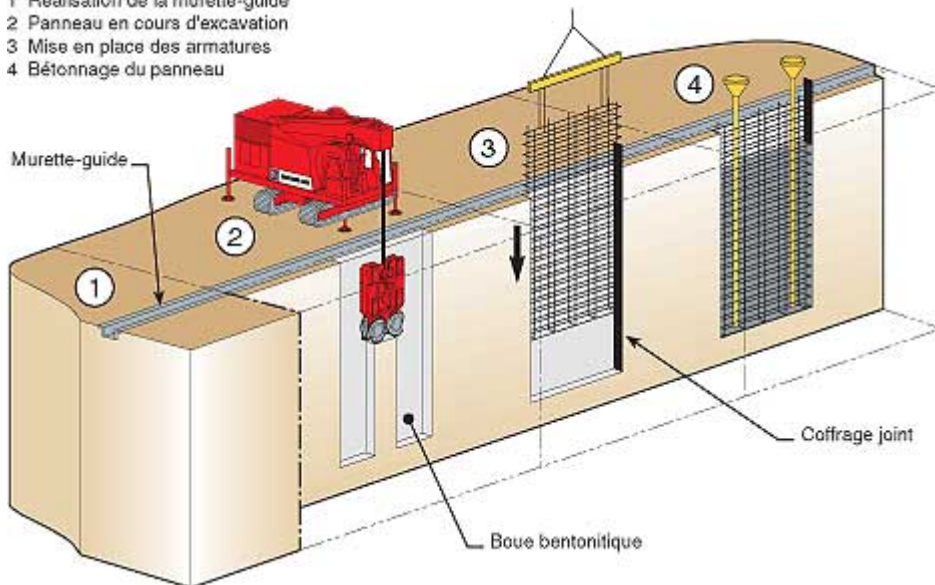
Parois, soutènement

Parois moulées

Enceinte étanche.

Forage sans vibration, grande profondeur.

- 1 Réalisation de la murette-guide
- 2 Panneau en cours d'excavation
- 3 Mise en place des armatures
- 4 Bétonnage du panneau

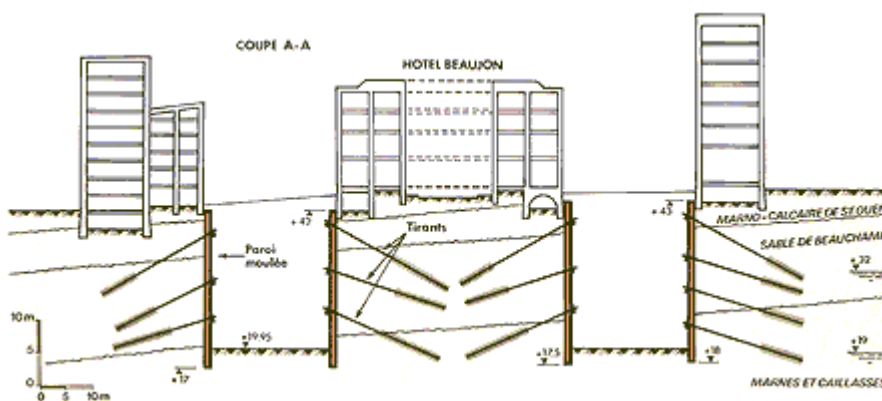


Divers outillages sont utilisés selon les terrains et les projets : benne à câbles, Kelly, Hydrofraise, KS 3000. Les largeurs varient de 0.52m à 1.52m : les plus usuelles sont 0.62m et 0.82m. Les profondeurs de 35 à 50m sont courantes. Un Kelly descend à 65 m maximum, l'Hydrofraise à 150m. On opère généralement par panneaux juxtaposés : primaires un sur deux, secondaires en intermédiaire. Les dimensions des panneaux peuvent varier de 3 à 20 m. les ouvertures usuelles sont voisines de 5 à 6m. En tracé en plan, les formes les plus simples sont les meilleures pour la qualité du travail fini.

LES JOINTS : On utilise le plus souvent le tube-joint, le joint plat STOPSOL qui est retiré dès que le béton a fait prise ou le joint CWS à décoffrage latéral. Avec l'Hydrofraise, on peut mordre le béton des panneaux primaires lors de la perforation des secondaires, ce qui supprime le système de joint classique.

LES CONTROLES : Il s'agit d'assurer divers contrôles au cours des opérations successives :

- forage : qualité de la boue, verticalité et épaisseur de la saignée
- mise en place des armatures : qualité du béton, volume à chaque niveau
- joints : verticalité et position des éléments joints
- continuité : emboîtement des panneaux primaires et secondaires

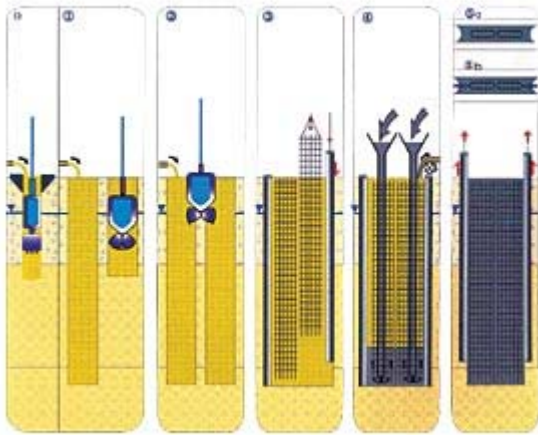


Exemple de soutènement complexe en site urbain au moyen de paroi moulée et ancrages précontraints

Enceinte étanche.(Franki)

Forage sans vibration, grande profondeur.

Outils : Benne preneuse, trépan, fraise hydraulique pour terrain dur.



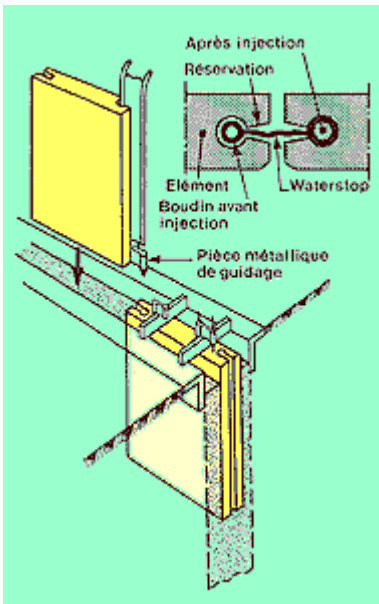
Réalisation de joints entre panneaux par :
Tubes-joints (a) ou Water-stops (b)

- 1) Implantation et réalisation des murettes guides.
- 2) Forage par passes à la benne sous charge de boue.
- 3) Excavation du merlon central. Le panneau représenté comprend deux passes de forage plus un merlon (d'autres configurations existent).
- 4) Recyclage de la boue, mise en place des tubes joints ou de planches équipées de Water-stops.
Mise en place de cages d'armatures.
- 5) Mise en place des tubes plongeurs, bétonnage du panneau,
pompage, recyclage et stockage de la boue bentonitique
au fur et à mesure.
- 6) Extraction des tubes joints (a) ou des planches (b)
après
de la prise de béton.





Paroi préfabriquée (Soletanche)



LA PRESAINÉE

Prétranchée, murette-guide ou pré saignée, elle est haute de 1.0 à 1,50 m. Elle est généralement en béton armé.

Elle remplit plusieurs fonctions :

- matérialise l'implantation, permet repérages et nivellements
- sert d'appui pour les suspentes des éléments préfabriqués
- assure la stabilité des terres en surface

LA PERFORATION

Selon les terrains et les spécifications, divers outillages de paroi classique sont employés : benne à câble, benne sur Kelly. Les largeurs usuelles varient de 0.50 à 1 m, soit 20 cm de plus que celles des éléments préfabriqués. La perforation est généralement faite en continu.

LA FORME DES ELEMENTS

L'économie d'un projet justifie la simplicité des formes, les séries de panneaux identiques. Il est toutefois possible de réaliser des formes complexes - goussets, niche -, ou des panneaux mixte béton-métal et de prévoir des attentes en lit horizontal ou des platines pour des scellements.

LE COULIS DE PERFORATION

La boue de forage est le plus souvent un coulis à base de ciment et bentonite, dont la prise est retardée et réglée par divers adjuvants. Fluide en phase de perforation et pose des éléments, le coulis fait prise, durcit et scelle les éléments au terrain encaissant. Un réglage des dosages permet l'obtention des caractéristiques finales adaptées au projet (résistance, module, étanchéité). Quelquefois, on fore sous boue bentonitique simple et on fait une opération de substitution avec du coulis juste avant la pose des éléments.

LA PREFABRICATION

Les éléments - ou panneaux - sont en béton vibré armé ou précontraint.

La préfabrication revêt le plus souvent possible un caractère industriel. Il s'agit d'une préfabrication "lourde", le poids des éléments pouvant atteindre 40 tonnes.

Selon les possibilités, on fera la préfabrication sur place (avec séchage accéléré pour produire des panneaux chaque jour), ou on fera appel à une installation extérieure industrielle qui alimentera le chantier de pose en fonction de l'avancement.

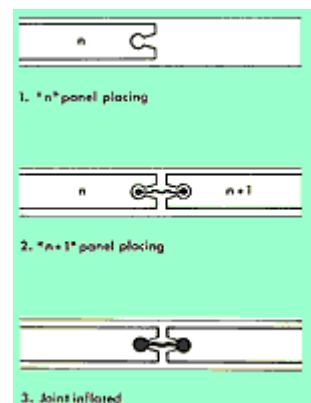


LA POSE DES ELEMENTS

Les éléments sont manipulés à la grue.

Des suspentes multiples assurent la sécurité des opérations de descente et de réglage en position. Une cire appliquée sur le panneau, côté fouille, évite l'adhérence du coulis au béton lors du terrassement ultérieur.

Le chantier de pose suit la perforation au plus près. Les suspentes restent en place jusqu'à ce que le coulis ait durci et scellé les panneaux au terrain.



LES JOINTS

Le joint le plus souvent employé est du type "water-stop" gonflable.

Chaque élément est moulé avec une réservation en continue en forme de "trou de serrure" ménagée sur les deux extrémités latérales. Cette réservation permet le passage d'une pièce métallique inférieure pour le guidage, suivie du water-stop.

Les 2 boudins du water-stop sont creux. Ils peuvent être gonflés après coup avec un coulis de ciment, de sorte qu'il y ait un contact étroit entre le béton et le joint.

L'ÉTANCHEITE

L'étanchéité résulte de plusieurs facteurs :

- la couche continue de coulis subsistant côté terre assure une protection ; dans les terrains perméables (sables et graviers) le coulis pénètre dans le sol sur une épaisseur notable et renforce ainsi la protection
- le béton des panneaux est vibré, un produit hydrofuge peut être incorporé
- le joint type water-stop gonflable assure une bonne continuité de l'étanchéité entre éléments
- des techniques particulières permettent de satisfaire des exigences plus sévères (revêtement incorporé face interne lors de la préfabrication, bande rapportée au droit du joint, etc...)

L'ARASE BASSE

Des astuces de suspentes dévissables et de guidage par profilé amovible permettent de pratiquer l'arase basse de la paroi - plusieurs mètres en dessous de la plate-forme de travail si nécessaire.

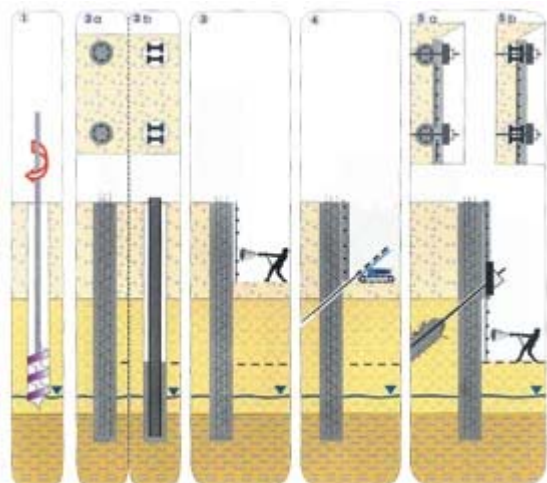
Paroi berlinoise , paroi parisienne

L'idée de base consiste à faire, depuis la surface, avant tout creusement, une partie du soutènement : pieu, poteau moulé ou préfabriqué, qui assurera l'équilibre des efforts de butée (en pied) et de poussée (tirants ou butons multiples).

Ensuite, on creuse par tranches horizontales (un à quelques mètres selon la tenue des terres) et on complète le soutènement : pose des butons ou des tirants sur les appuis verticaux déjà en place, blindage des talus dégagés entre les appuis verticaux.

Les tranches horizontales peuvent être multiples (des exemples existent de six lignes de tirants successives). Le blindage, entre appuis, peut être fait de différentes façons: dalles minces de béton coulées en place ou préfabriquées, planches ou madriers bois, planches métalliques, béton projeté.

Le soutènement type est la "paroi berlinoise", ainsi dénommée car elle a été largement employée à Berlin. Dans ce cas, l'appui est un profilé métallique généralement mis en place dans un forage. L'espacement des profilés est de quelques mètres. Il s'agit, le plus souvent, d'un soutènement à caractère provisoire.



a : Pieux de paroi parisienne ou lutécienne :
pieux en béton moulés dans le sol, armés de cages d'armatures.

b : Pieux de paroi berlinoise :
profilés métalliques mis en place dans un forage, scellés en partie basse.

(Parisienne : poteau béton armé mis en place dans un forage, scellé en partie basse).

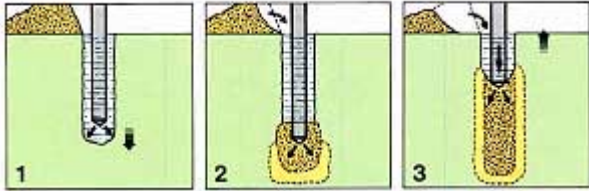
- 1) Forage (voir les différents procédés de pieux).
- 2) a : Mise en place de la cage d'armature et du béton (selon procédés de pieux).
b : Mise en place du béton de scellement.
Mise en place et réglage des profilés, remplissage de l'espace annulaire.
- 3) Première passe de terrassement, blindage par béton projeté avec ferrailage par treillis soudés, d'autres blindages sont possibles : bois, éléments préfabriqués, ...
- 4) Forage des tirants puis injection, (ou pose de butons), si nécessaire.
- 5) Après séchage et mise en tension des tirants, seconde passe de terrassement puis second blindage...





Renforcement des sols

Colonnes ballastées



Cette technique est utilisée dans les sols cohérents tels limons et argiles. Soletanche Bachy a récemment mis au point la machine SolVibro®, spécialement conçue pour les colonnes ballastées. Le dispositif de forage est composé d'un tube prolongé en partie basse par un vibreur électrique ou hydraulique. Ce

dispositif est foncé dans le sol à l'aide du vibreur et crée ainsi une empreinte en refoulant le terrain jusqu'à la base du massif à consolider. L'introduction latérale du ballast à la base du vibreur est réalisée soit gravitairement soit à l'aide d'une pompe à graviers.

Ce remplissage est effectué par couches successives tout en maintenant la vibration afin de compacter le ballast et de continuer à refouler le sol. Dans certains cas particuliers, il est possible de procéder à un remplissage complémentaire de coulis bentonite-ciment simultanément à la mise en place du ballast à l'aide d'un tube latéral.

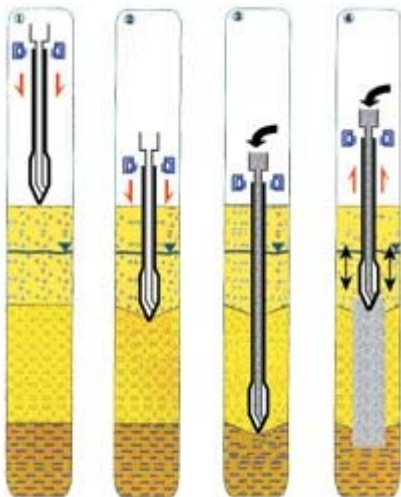
L'ensemble de ces opérations est réalisé par passes remontantes sur la totalité de la hauteur de terrain à consolider.

Réalisées à l'aide d'un vibreur à sas (représenté ici) ou pilonnage à l'intérieur d'un tube.

Amélioration des sols, drainage.

Contrôle continu des volumes mis en place.

Grandes cadences d'exécution.



- 1) Mise en place.
- 2) Fonçage du vibreur à l'air ou à l'eau (+ pré forage dans les terrains très durs).
- 3) Mise en place à travers le sas d'une grave adaptée.
- 4) Compactage du matériau d'apport par va et vient du vibreur et refoulement du sol en place.
Adaptation du volume introduit à la compacité du terrain en place.
- 5) Extraction de l'outil.

Travail par passes successives de 30 à 50 cm.





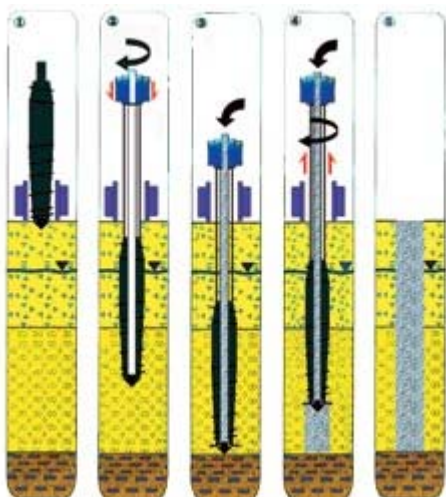
Colonnes semi rigides

Grandes cadences d'exécution.

Procédé de renforcement de sol par inclusions cimentées améliorant le principe des colonnes ballastées.

Insensible à la présence de sols organiques.

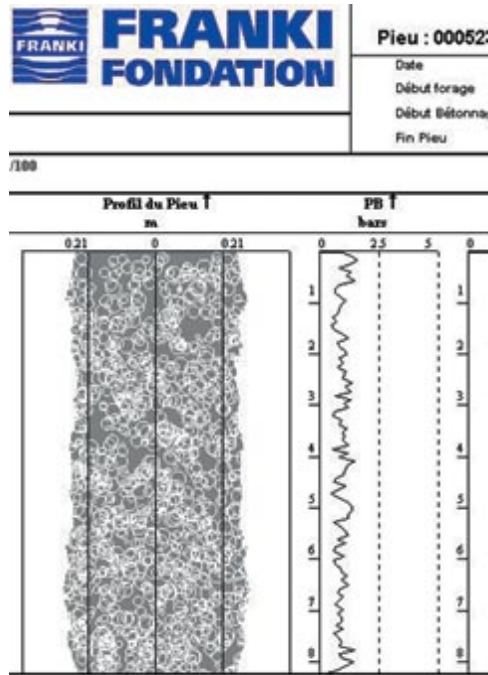
Tassements faibles.



- 1) Mise en fiche, réglage des guides de forage.
- 2) Vissage (refoulement latéral du sol).
- 3) Injection du coulis dans l'axe creux de l'outil.
- 4) Remontée de l'outil en rotation lente (dans le sens du vissage), refoulement latéral du sol.
Bétonnage contrôlé en continu.
- 5) Colonne terminée.

Colonnes réalisées par refoulement (outil Spire)
 Marque déposée, cahier des charges spécifique.





Jet grouting



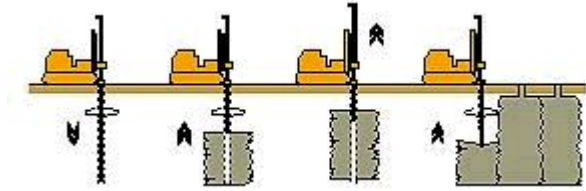
On désigne par jet grouting un procédé de construction utilisant un jet de fluide à haute énergie cinétique pour déstructurer un terrain et le mélanger avec un coulis liquide.

Il ne s'agit donc pas exactement d'une technique d'injection, mais plutôt d'un procédé de mélange hydrodynamique terrain-coulis visant à former un « béton de sol » in situ dans la masse du terrain.

L'idée du jet grouting est née au Royaume-Uni à la fin des années 50. Différentes méthodes de jet grouting (jet simple, jet double, jet triple) sont utilisées en fonction de l'énergie hydrodynamique nécessaire pour détruire et mélanger le terrain avec un coulis liquide. Elles s'appliquent aussi bien à des traitements de masse que des traitements linéaires ou des inclusions, dans des sols meubles facilement ou difficilement injectables.

Le jet grouting fait appel, séparément ou en combinaison, à trois phénomènes physiques : déstructuration du terrain par un jet à très grande vitesse, extraction d'une partie du terrain jusqu'à la surface par les fluides de jetting, incorporation d'un liant apporté par le coulis.

Le traitement se déroule généralement ainsi : réalisation d'un forage de petit diamètre (100 à 200 mm) sur la hauteur à traiter, dans ce forage, mise en vitesse d'un jet de fluide envoyé par une pompe à haute pression (plusieurs dizaines de MPa) à travers une ou plusieurs buses de petit diamètre (1 à 10 mm) placées sur un « moniteur » au pied d'un train de tiges de diamètre 70 à 100 mm, remontée lente des tiges, avec mise en rotation pour former une colonne de béton de sol.



Pendant la phase jet, les volumes en excès du mélange sol-ciment (appelés « rejets ») doivent ressortir librement en tête de forage (sinon, l'excès de matériaux risque de « claquer » le terrain et de créer des désordres au voisinage) et être évacués du chantier au fur et à mesure.

Le résultat (diamètre, composition, résistance des colonnes) dépend des paramètres du traitement (vitesses de translation et de rotation des tiges, pressions et débit des fluides utilisés, dosage du coulis), des caractéristiques du terrain en place (nature, granulométrie, composition, compacité) et de la méthode employée (simple, double ou triple).

LES PRINCIPALES MÉTHODES

Jet simple

Dans ce procédé, le fluide du jet est le coulis lui-même, qui assure les trois fonctions de déstructuration, extraction et incorporation.

Une partie importante de l'énergie cinétique du jet est dissipée par frottement dans le terrain mis en suspension et les rejets formés deviennent parfois trop visqueux pour remonter librement jusqu'en tête de forage.

Jet double

Si on protège le jet de coulis à très grande vitesse par un jet d'air annulaire, le rayon d'action du jet en face du même terrain se trouve considérablement augmenté par le cône d'air enveloppant. Dans le procédé jet double, le rôle de l'air est d'améliorer les possibilités d'extraction du terrain place par phénomène d'air lift.

Jet triple

Dans le jet triple, les fonctions déstructuration et extraction du terrain sont obtenues par un jet double d'eau et d'air séparément de la fonction d'incorporation du liant assurée par un jet de coulis envoyé simultanément à basse pression (quelques MPa) par une buse inférieure.

La pompe et le circuit haute pression utilisés en jet triple ne supportent que de l'eau, avec en contre partie la nécessité d'une pompe supplémentaire à basse pression pour le coulis et d'une ligne d'outils à triple tube.

Le compactage dynamique et les plots ballastés



Il s'agit d'un procédé (1965-L. Ménard) qui consiste à pilonner le sol en surface avec une masse. L'énergie transmise par chaque impact pénètre dans le sol et produit une déstructuration. Au bout de quelques jours (ou semaines), une restructuration s'opère qui aboutit à des caractéristiques de portance améliorées.

Le matériel est constitué d'un pilon de 8 à 50 t (coque d'acier cubique ou cylindrique pleine de béton armé) manipulé par un engin de levage (jusqu'à 40 m de hauteur de chute).

L'énergie unitaire nécessaire augmente linéairement avec le carré de la hauteur de couches à compacter (de 200tm à 2 000tm). La hauteur courante est de 10/15m, elle peut atteindre

25/30m.

Souvent, plusieurs opérations de compactage sont nécessaires, séparées par un laps de temps de quelques semaines (2 à 6).

Le procédé s'applique aux sols sablo-graveleux, et aux matériaux argilo-calcaire saturés à condition qu'il y ait présence d'air occlus (1 à 4%) (cas des tourbes ou des remblais récents avec matières organiques). Son emploi peut être intéressant pour consolider des couches sous l'eau.

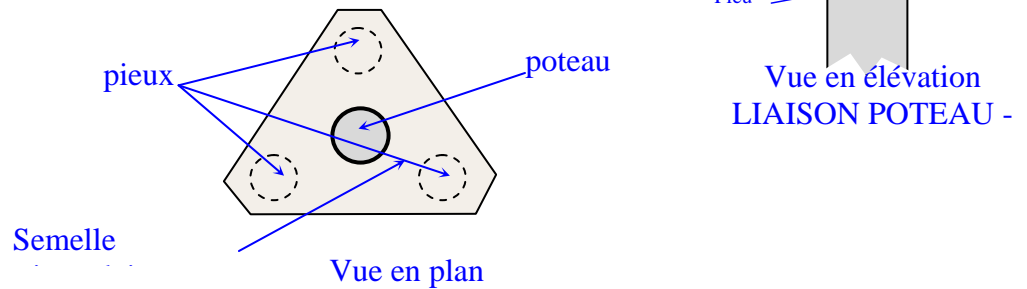
Cette méthode permet de traiter en profondeur par des actions de surface des terrains industriels et commerciaux à viabiliser. La consolidation dynamique permet de compacter les sols granulaires de 5 à 10 m de profondeur tandis que la réalisation de plots ballastés permet d'étendre cette technique à des terrains plus cohérents.

06 REALISATION DES PIEUX

06.01 Principes de conception

06.01.01 Cas des pieux isolés

La jonction entre un pieu isolé et un poteau est **toujours** assuré par une **semelle de liaison en béton armé**.



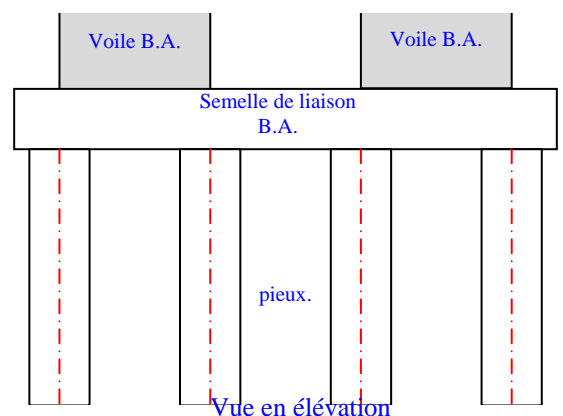
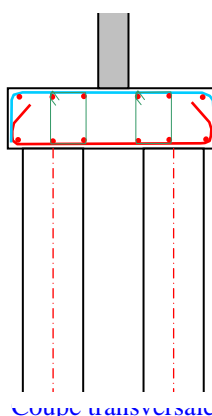
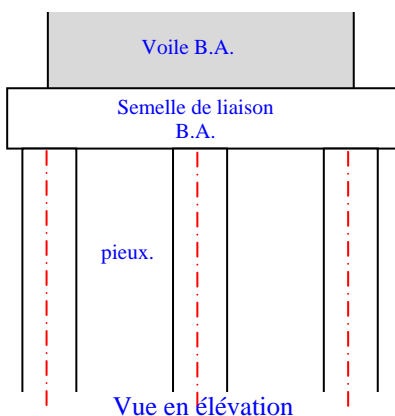
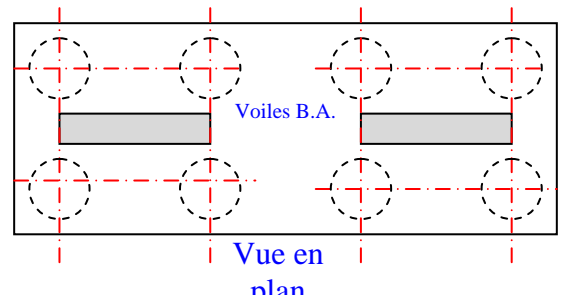
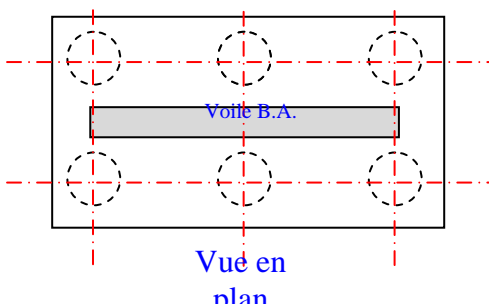
06.01.02 Cas des groupes de pieux:

Le choix de la composition du groupe de pieu est lié au **type d'effort** (moment, effort horizontal ou incliné) et à la **géométrie de la structure** à reprendre.

Dans la plupart des cas, on respectera **les symétries dans les structures**, et on fera en sorte que **les charges** soit transmises **le plus directement possible entre la structure et les pieux**.

Cela qui conduit à :

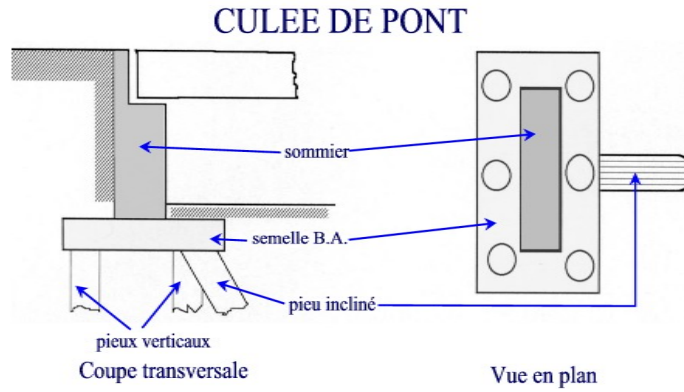
- Prévoir une répartition uniforme des pieux le long de la structure à reprendre
- respecter les symétries par rapport aux point d'application des charges
- prévoir des files de pieux en nombre pair



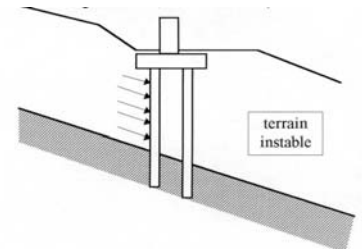
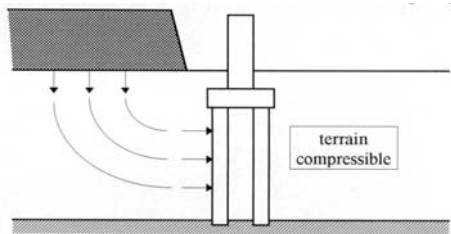
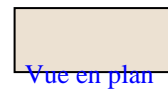
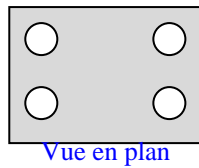
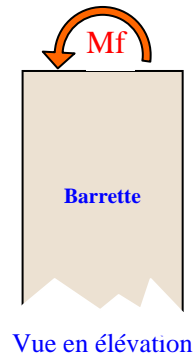
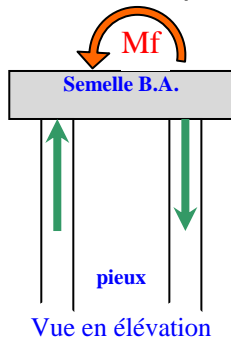
06.01.03 Cas des pieux soumis à des sollicitations non verticales en tête:

Les **efforts verticaux** ne peuvent être repris par des **pieux verticaux** que s'il ne sont **pas trop longs**, ou s'ils sont de **fort diamètre**. (risques de flambement)

Dans les autres cas, on aura recours à la mise en œuvre de **pieux inclinés**.



Les moments sont repris soit par un groupe de pieux verticaux, soit par la mise en place de barrettes (pieux de **section rectangulaire**) exécutées selon le même principe que les parois moulées dont l'inertie élevée permet de reprendre de moments de flexion.



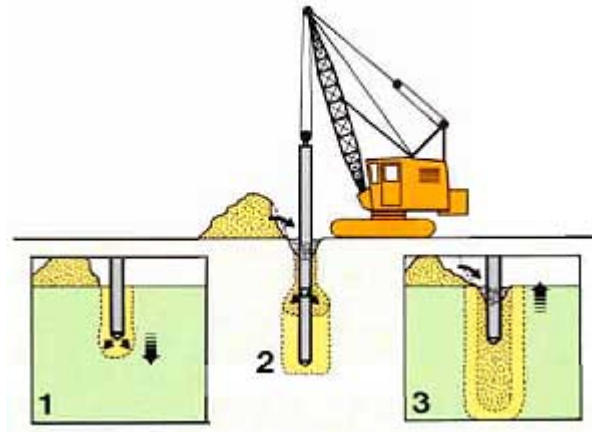
La conception des pieux doit tenir compte d'éventuels efforts parasites dus aux déformations de sols (terrains compressibles, terrains instables). Dans la mesure du possible, on prévoira de réduire ces risques par des techniques de **pré chargement** de sol, ou de **renforcement de sol**.

06.02 Principe de dimensionnement

Les pieux en béton armé sont calculés en prenant une contrainte admissible du béton de 5 MPa. Pour les pieux métalliques la contrainte admissible est limitée à $0.75.f_e$. Pour les micro pieux, **seule la section d'acier est prise en compte**.

NOTES PERSONNELLES

Vibroflottation



PRINCIPE : Cette technique s'applique aux sols granulaires non-cohérents tels que sables et graviers. Les vibrations engendrent un phénomène localisé de liquéfaction sous l'effet des surpressions interstitielles, qui met les grains du sol dans un état liquéfié. Les grains se réarrangent en un état plus dense. Le maillage des points de compactage dépend des caractéristiques initiales et des objectifs à atteindre. La maille retenue doit conduire à un traitement le plus uniforme possible.

MODE OPERATOIRE : Le vibreur, manipulé par une grue, est mis en station au-dessus du point de compactage.

Phase 1 : Sous l'influence de son propre poids, du lançage et des vibrations, le vibreur atteint rapidement la profondeur désirée. Les jets d'eau à la pointe sont alors coupés.

Phase 2 : L'eau arrive désormais uniquement par les orifices du haut du vibreur. Le cône obtenu facilite la mise en place de matériau d'apport -sable ou gravier -dans la cavité créée. Le flux d'eau le long du vibreur aide au transport du sable jusqu'à la zone de compactage à la base du vibreur.

Phase 3 : Le vibreur est retiré par étapes et produit de cette manière un cylindre de terrain densifié de 2 à 4 mètres de diamètre.

[SIF-Groutbor S.A. - Parois de soutènement](#)

Parois armées au coulis · **Parois** berlinoises · **Paroi** moulée béton · **Paroi** préfabriquée · **Parois** de pieux sécants ou jointifs ...

www.sif-groutbor.ch/site/article.php?id_article=5 - 7k - [En cache](#) - [Pages similaires](#)