

SOMMAIRE

01 DEFINITION - TERMINOLOGIE	3
02 PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT	3
02.01 CAS D'UN PIEU ISOLE	3
02.02 CAS DE GROUPES DE PIEUX :.....	4
03 DETERMINATION DE LA CHARGE LIMITE D'UN PIEU ISOLE	5
04 DIMENSIONNEMENT DES PIEUX	6
04.01 DIMENSIONNEMENT PAR LA METHODE PRESSIOMETRIQUE	6
04.01.01 Détermination de la contrainte limite de pointe q_{pu}	6
04.01.02 Détermination du frottement latéral q_s	7
04.02 DETERMINATION DES CHARGES ADMISSIBLES SOUS DIFFERENTES SOLLICITATIONS	7
05 CLASSIFICATION DES FONDATIONS PROFONDES	8
05.01 DIFFERENTES CATEGORIES DE PIEUX.....	8
05.02 MODES OPERATOIRES DE REALISATION DE QUELQUES PIEUX	9
06 REALISATION DES PIEUX	11
06.01 PRINCIPES DE CONCEPTION	11
06.01.01 Cas des pieux isolés	11
06.01.02 Cas des groupes de pieux:	11
06.01.03 Cas des pieux soumis à des sollicitations non verticales en tête:	12
06.02 PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT	12

01 DEFINITION - TERMINOLOGIE

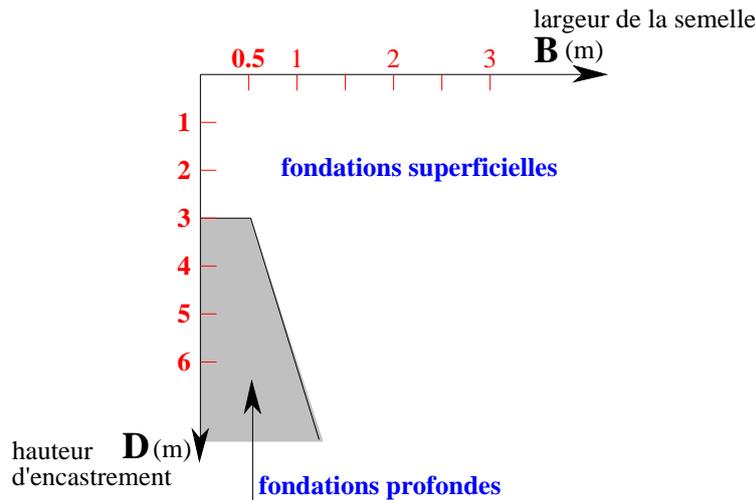
Une **fondation profonde** est caractérisée par **la manière dont le sol est sollicité** pour résister aux charges appliquées.

- 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

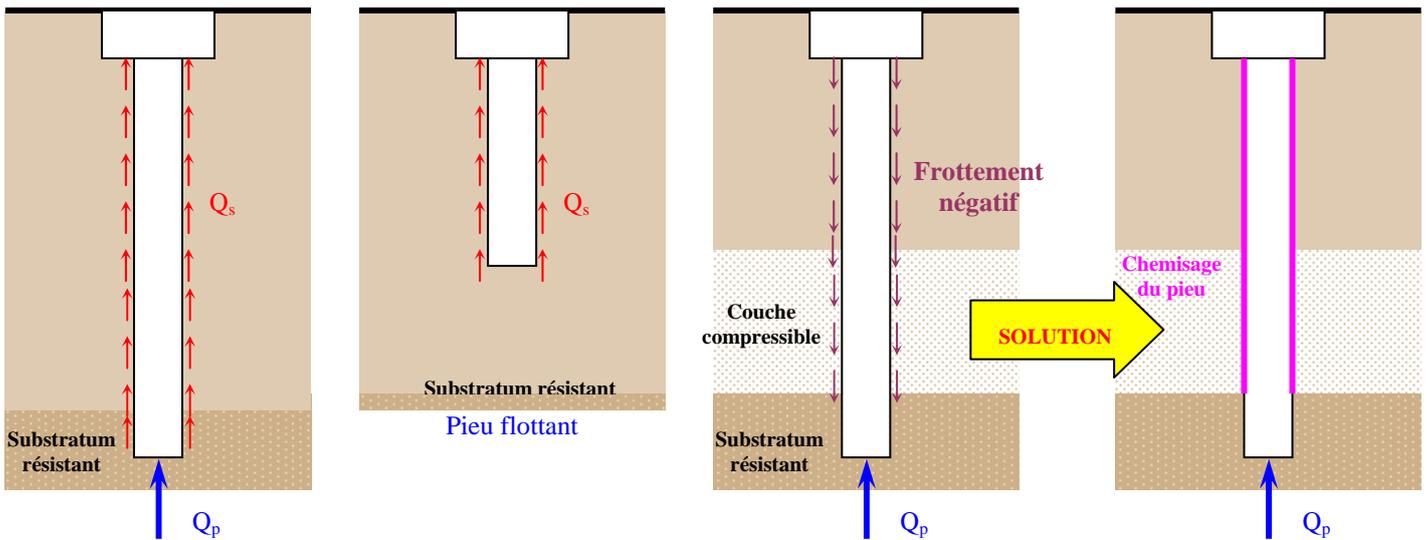
L'effort de frottement latéral est proportionnel à :

- 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 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 a tendance à tasser, **le frottement sol-pieu est négatif**. Cela a 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.

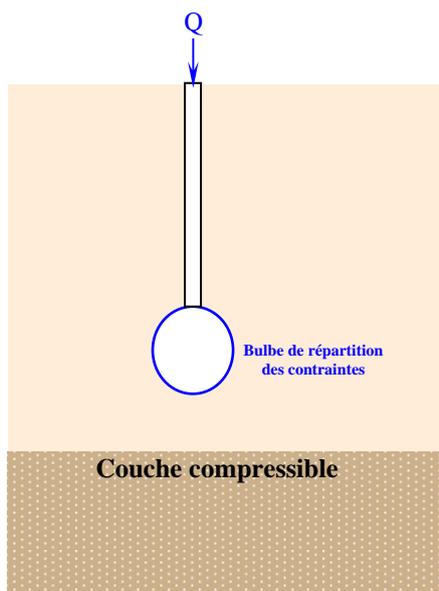
02.02 Cas de groupes de pieux :

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} .

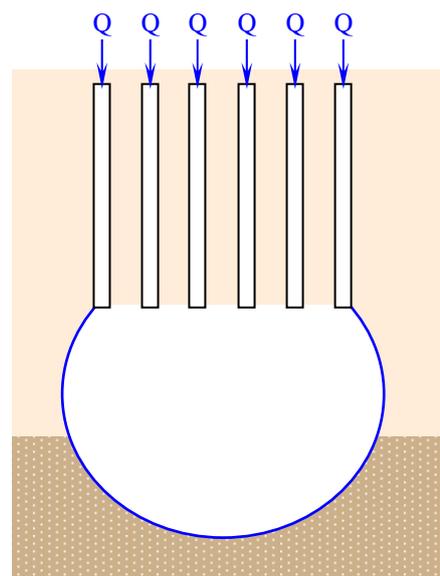
Le coefficient d'efficacité du groupe de pieu se définit comme suit :

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

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



Pieu isolé
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

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 :

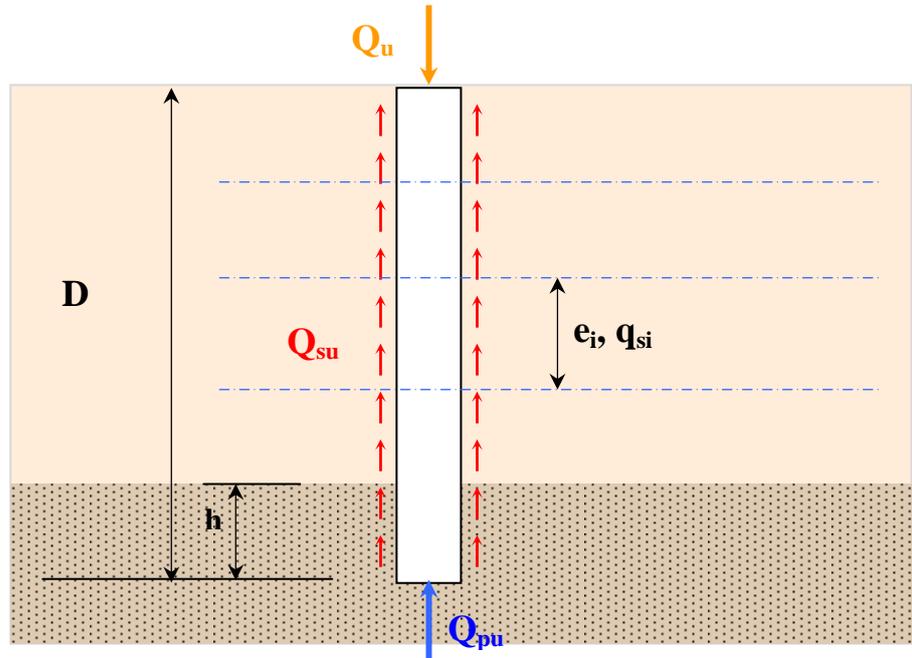
$$Q_{pu} = \rho_p \cdot A \cdot q_{pu}$$

La charge limite de frottement est donnée par :

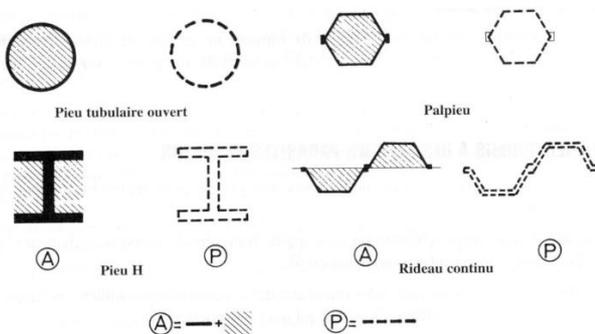
$$Q_{su} = \rho_s \cdot P \cdot \sum q_{si} \cdot e_i$$

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 :



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

Les valeurs de ρ_p et ρ_s sont données dans le tableau ci-contre.

Type de pieu	Argiles		Sables	
	ρ_p	ρ_s	ρ_p	ρ_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

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

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

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.

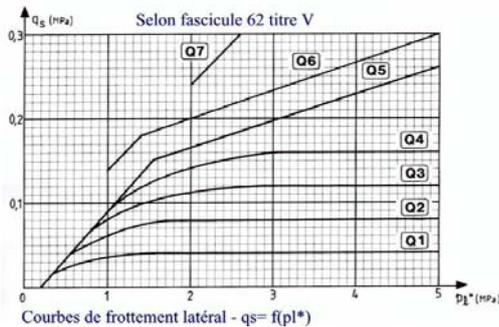
Nature des terrains	Eléments mis en oeuvre		
	sans refoulement du sol	avec refoulement du sol	
ARGILES – LIMONS	A	1,1	1,4
	B	1,2	1,5
	C	1,3	1,6
SABLES – GRAVES	A	1,0	4,2
	B	1,1	3,7
	C	1,2	3,2
CRAIES	A	1,1	1,6
	B	1,4	2,2
	C	1,8	2,6
MARNES , MARNO – CALCAIRES	1,8	2,6	
ROCHES ALTEREES (1)	1,1 à 1,8	1,8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



Le choix de la courbe (Q1 à Q7) à considérer est donnée par le tableau suivant :

	ARGILES - LIMONS			SABLES - GRAVES			CRAIES			MARNES			ROCHES
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Foré simple	Q ₁	Q _{1'} Q ₂ ⁽¹⁾	Q _{2'} Q ₃ ⁽¹⁾	-			Q ₁	Q ₃	Q ₄ Q ₅ ⁽⁴⁾	Q ₃	Q ₄ Q ₅ ⁽⁴⁾	Q ₆	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 ⁽⁴⁾	Q ₃	Q ₄ Q ₅ ⁽⁴⁾	Q ₃	Q ₄ Q ₅ ⁽⁴⁾	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 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	Q ₆
Métal battu fermé	Q ₁	Q ₂	Q ₂			Q ₃	(4)			Q ₃	Q ₄	Q ₄	Q ₄
Battu préfabriqué béton	Q ₁	Q ₂	Q ₃			(4)			Q ₃	Q ₄	Q ₄	Q ₄	Q ₄
Battu moulé	Q ₁	Q ₂	Q ₂	Q ₃	Q ₃	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₃	Q ₄	Q ₄	Q ₄	-
Battu enrobé	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	(4)			Q ₃	Q ₄	Q ₄	Q ₄	-	-
Injecté basse pression	Q ₁	Q ₂	Q ₃			Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₅	Q ₆	Q ₆	-
Injecté haute pression ⁽⁶⁾	-	Q ₄	Q ₅	Q ₅	Q ₆	-	Q ₅	Q ₆	Q ₆	Q ₆	Q ₆	Q ₇ ⁽⁷⁾	Q ₇ ⁽⁷⁾

(1) Réalisages et ramurage en fin de forage.
 (2) Pieux de grande longueur (supérieure à 30 m).
 (3) Forage à sec - tube non loutoyé.
 (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	$Q_c = 0.7 Q_{pu} + 0.7 Q_{su}$	

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

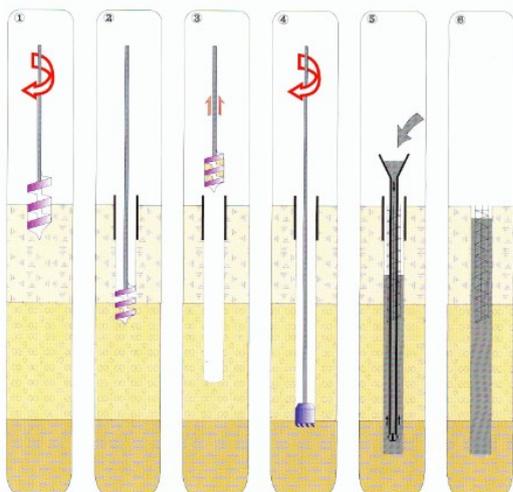
6 - Micro-pieux de diamètre inférieur à 250 mm

- type I
- type II
- type III
- type IV

05.02 Modes opératoires de réalisation de quelques pieux

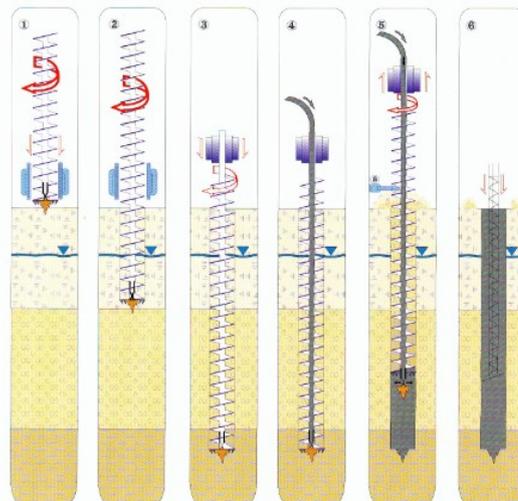
Les pieux forés simples

Tubage provisoire partiel
 Pieu exécuté sans nuisances sonores, sans vibration, dans les terrains durs, à grande profondeur
 Ø minimum 300 mm.
 Outils : tarière, bucket, carottier, trépan
 ① Mise en fiche, réglage, préforage
 ② Mise en place de la virole
 ③ Forage à la tarière
 ④ Ancrage au carottier
 ⑤ Mise en place d'armatures partielles ou totales et bétonnage à la colonne
 ⑥ Contrôle de l'arasement



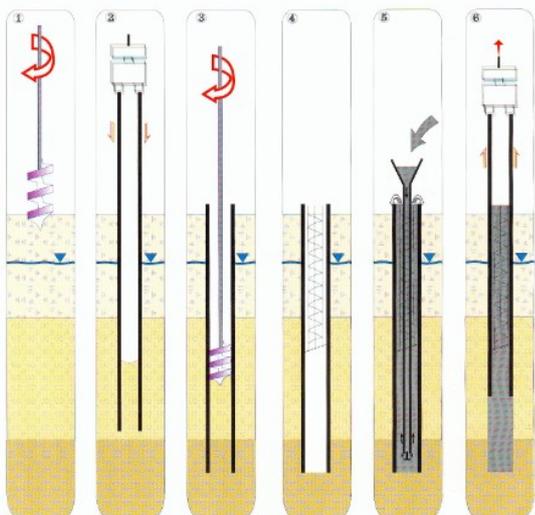
tarière creuse

Exécution rapide, environnement sensible
 Pieu injecté faible pression avec tube plongeur télescopique
 Enregistrement des paramètres de forage et de bétonnage
 Outils spéciaux : pointes carbure, nettoyeur de tarière
 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 Descente du tube plongeur, remontée de la tarière en rotation lente (dans le sens du vissage), nettoyage de la tarière (a), bétonnage contrôlé en continu
 ⑥ Mise en place d'armatures



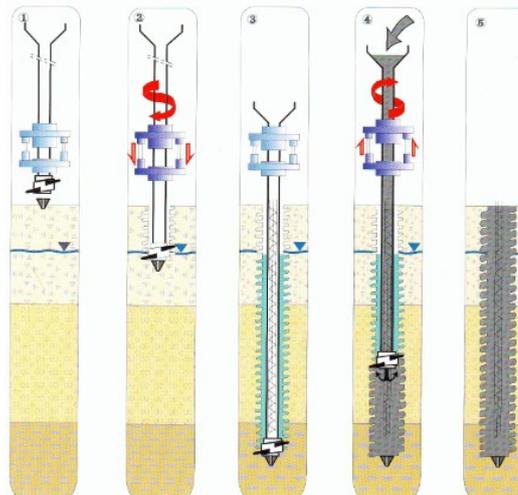
les pieux forés tubés

Tubage vibro-foncé
 Grandes profondeurs, terrains durs,
 Ø minimum 600 mm
 Outils de forage : tarière, bucket, carottier, trépan
 ① Mise en fiche, réglage, préforage
 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 tubage de travail



pieu vissé moulé (atlas)

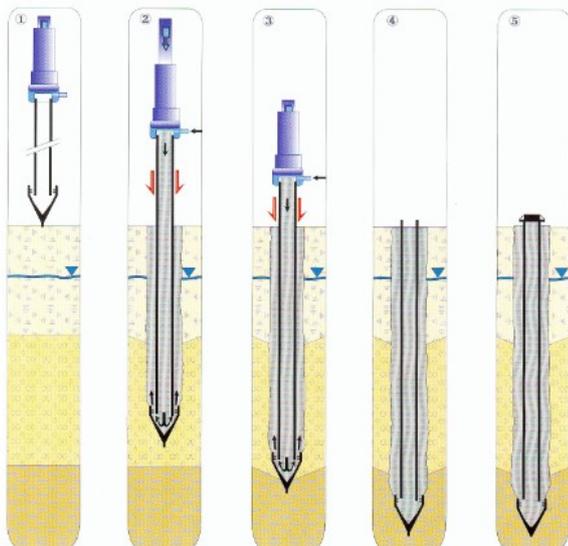
Pieu exécuté sans extraction de terre et sans vibration, chantier propre
 Technique rapide, environnement sensible
 Pieu vissé dans le sol : amélioration des caractéristiques des sols par compression latérale et en pointe
 Couple de forage : 40 tcm
 Vérités de poussée : 80 t
 ① Mise en fiche, réglage 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
 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 Pieu Atlas exécuté



pieux métalliques battus injectés

Grande profondeur, chantier propre, exécution rapide
Amélioration du frottement latéral, injection par la pointe
Reprise d'efforts de traction et de sollicitations horizontales importantes

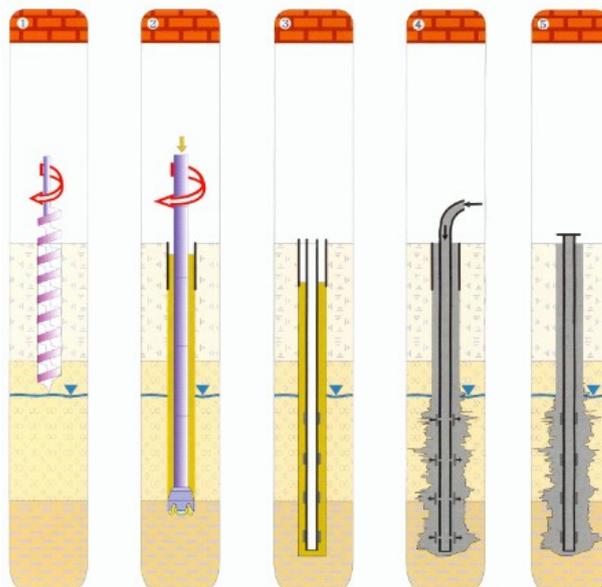
- ① Mise en fiche, réglage
- ② Battage du tube par moulin hydraulique ou diesel et injection simultanée de mortier
- ③ Refoulement (par le sabot) des sols, maintenus et expansés par l'injection de mortier
- ④ Pieu terminé
- ⑤ Recépage et soudage d'une plaque



micro-pieu

Travail sous hauteur réduite, espace exigü, reprise en sous œuvre
Ø maximum : 250 mm
Outils : tarière, taillant, tricoëne, marteau fond de trou

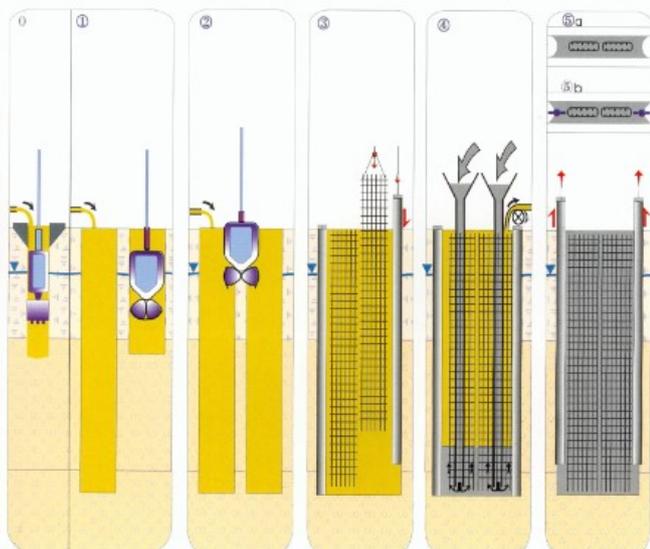
- ① Mise en fiche, réglage et forage
- ② Forage sous tubage, boue, coulis ou mortier
- ③ Mise en place d'une armature pouvant être équipée de manchettes pour l'injection sous pression
- ④ Scellement au coulis, ou au mortier de l'armature
- ⑤ Recépage et soudage d'une plaque



paroi moulée

Enceinte étanche
Forage sans vibration, grandes profondeurs
Outils : benne preneuse (larg : 2,80 m, ép. : 0,52-1,22 m), trépan, fraise hydraulique pour terrain dur
Réalisation de joints entre panneaux par : Tubes-joints (a) ou Water-stops (b)

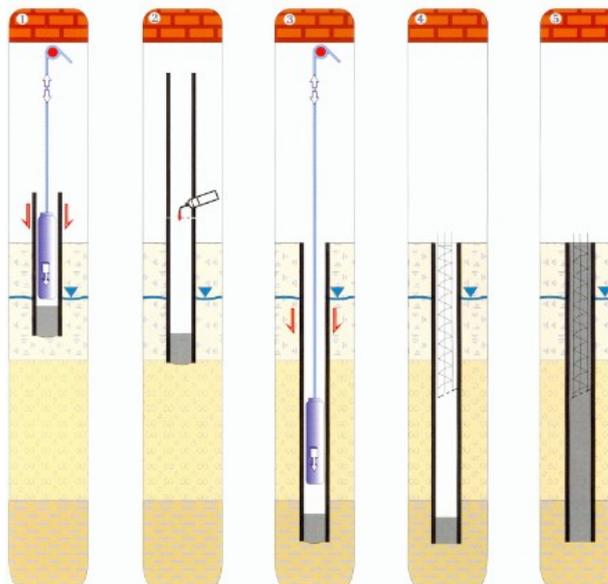
- Implantation et réalisation des murettes guides
- Forage par passes à la benne sous charge de boue
- ② Excavation du merlon central. Le panneau comprend deux passes de forage plus un merlon
- ③ Recyclage de la boue, mise en place des tubes joints ou de planches équipées de Water-stops
- Mise en place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



pieu pilonné 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 : Ø maximum 406 mm

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

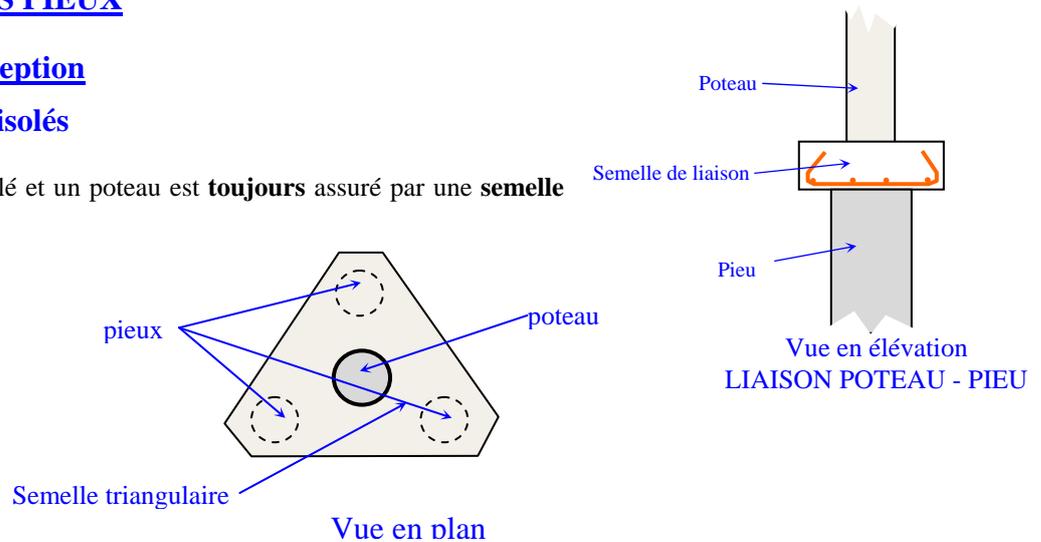


06 REALISATION DES PIEUX

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**.

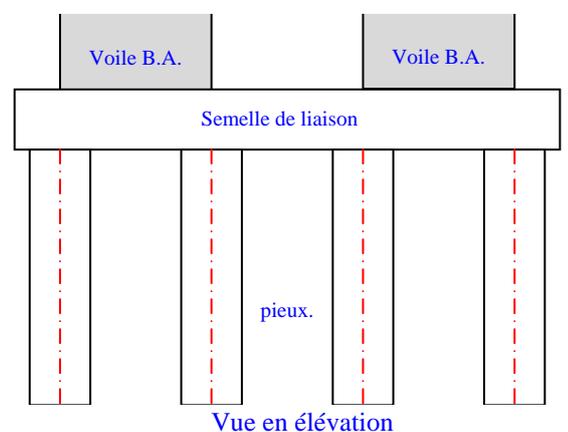
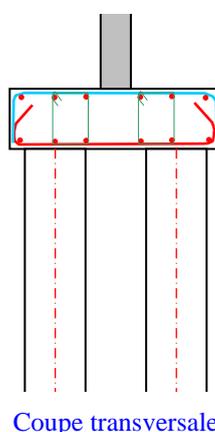
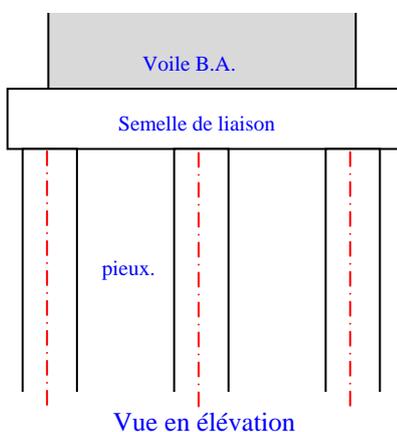
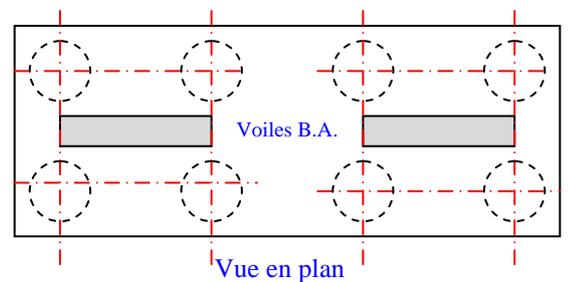
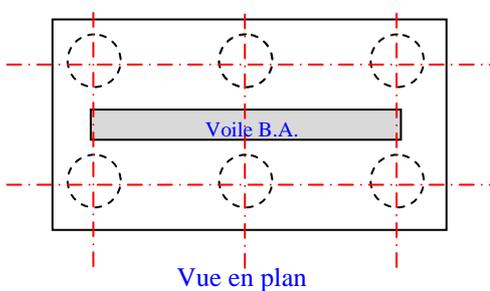


06.01.02 Cas des groupes de pieux:

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 :

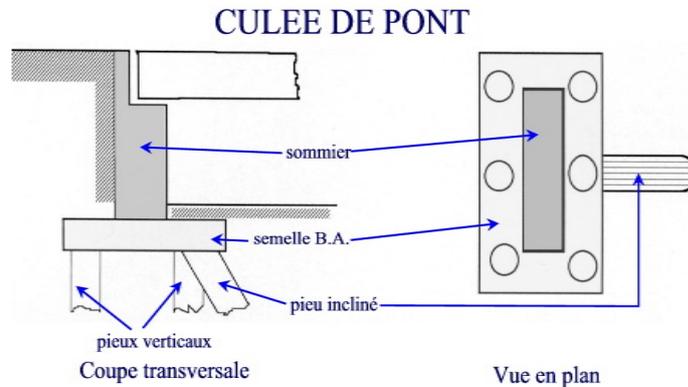
- Prévoir une répartition uniforme des pieux le long de la structure à reprendre
- respecter les symétries par rapport aux point d'application des charges
- prévoir des files de pieux en nombre pair



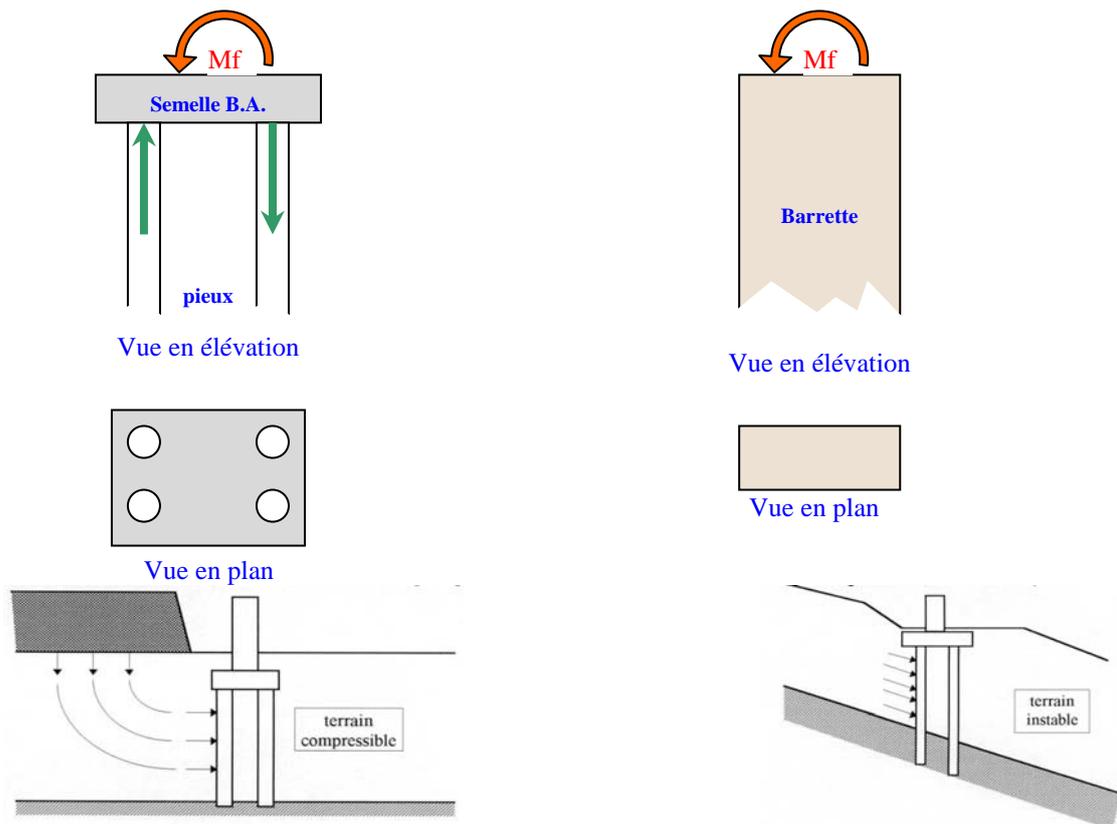
06.01.03 Cas des pieux soumis à des sollicitations non verticales en tête:

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 $0.75.f_c$.

Pour les micro pieux, **seule la section d'acier est prise en compte.**

TRAVAUX PRATIQUES SUR LES FONDATIONS PROFONDES

Le travail qui vous demandé répond à un double objectif. D'une part, il vous permet de synthétiser une exploitation de documents traitant du thème sur les ponts, et d'autre part il vous prépare à l'épreuve professionnelle de synthèse (recherche de documents, oral).

SUJETS D'ETUDE SUR LES FONDATIONS PROFONDES

N° groupe	Désignation du sujet	DATE DE L'EXPOSE ORAL	nom des candidats
01			
02			
03			
04			
05			
06			
07			
08			
09			
10			
11			
12			
13			
14			
15			

Chaque groupe préparera, pour **la date indiquée**, un exposé sur le sujet choisi. La durée de l'exposé est fixée à 15 minutes; il sera suivi d'un questionnement de 5 minutes.

Pour chaque groupe, la personne qui assurera la prestation orale sera désignée A L'AVANCE, sachant qu'en cas d'absence la personne prévue, elle sera remplacée par son binôme. Cette prestation devra être particulièrement soignée et préparée (plan, documents écrits, transparents, etc.). Elle sera minutée, ce qui suppose qu'elle aura été testée au moins une fois entre les personnes du groupe.

Votre travail préparatoire à la prestation orale (documents écrits, transparents, etc.) sera remis au professeur à la fin de l'exposé et fera l'objet d'une notation.

Vous pouvez compléter vos recherches par tous les moyens à votre convenance (C.D.I., documents personnels, vidéo, etc.).

Surtout n'écrivez pas sur les documents qui vous sont prêtés. Merci !