



Fondations superficielles et profondes

Fondations profondes

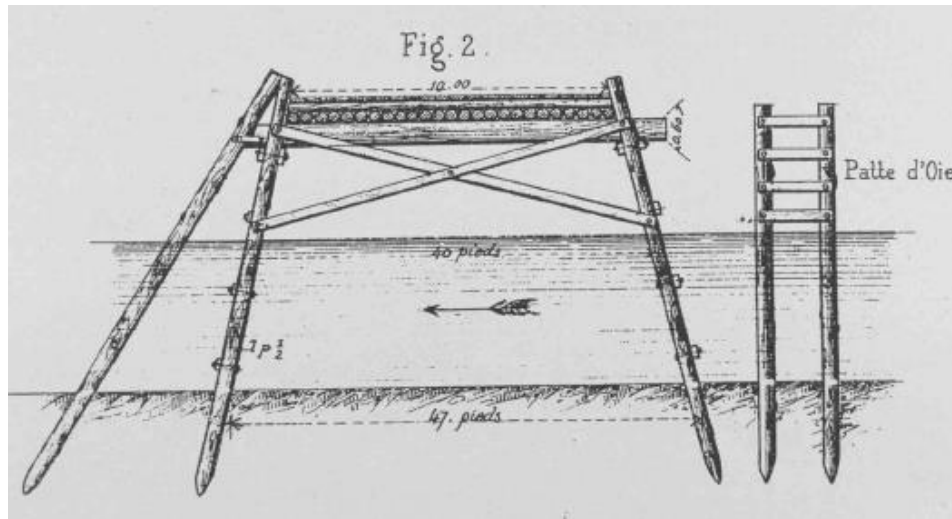
Anne DUCHEZ, Nathalie DUFOUR

Cerema Méditerranée – Aix-en-Provence

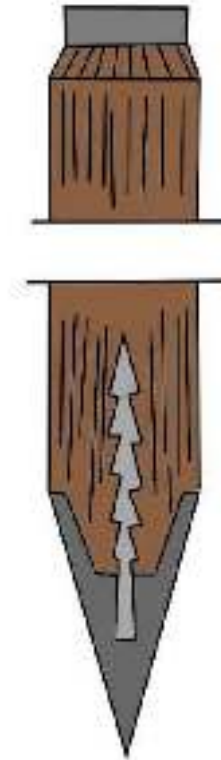
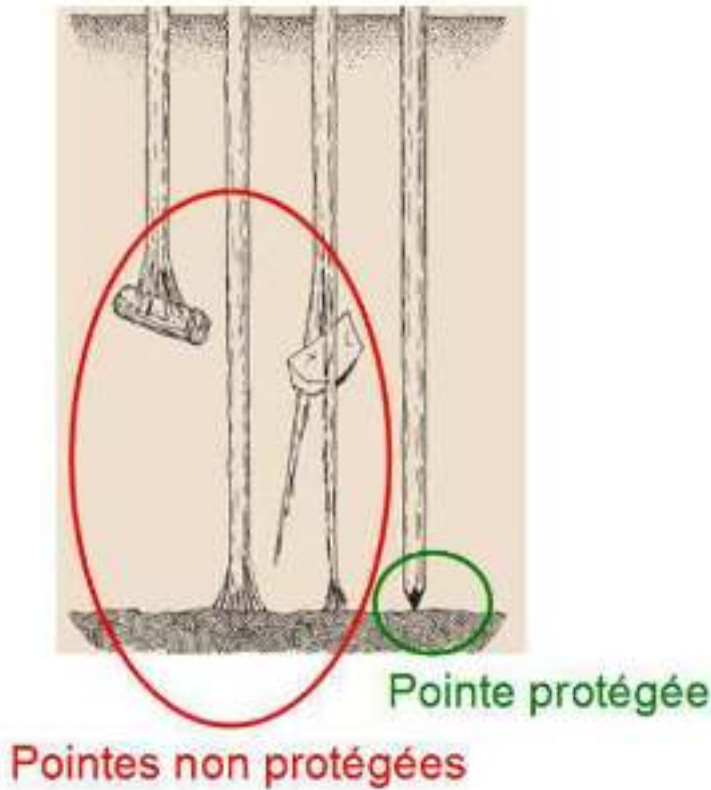
Historique fondations profondes

Epoque romaine

Fondations sur pieux du pont sur le Rhin – 55 av. JC

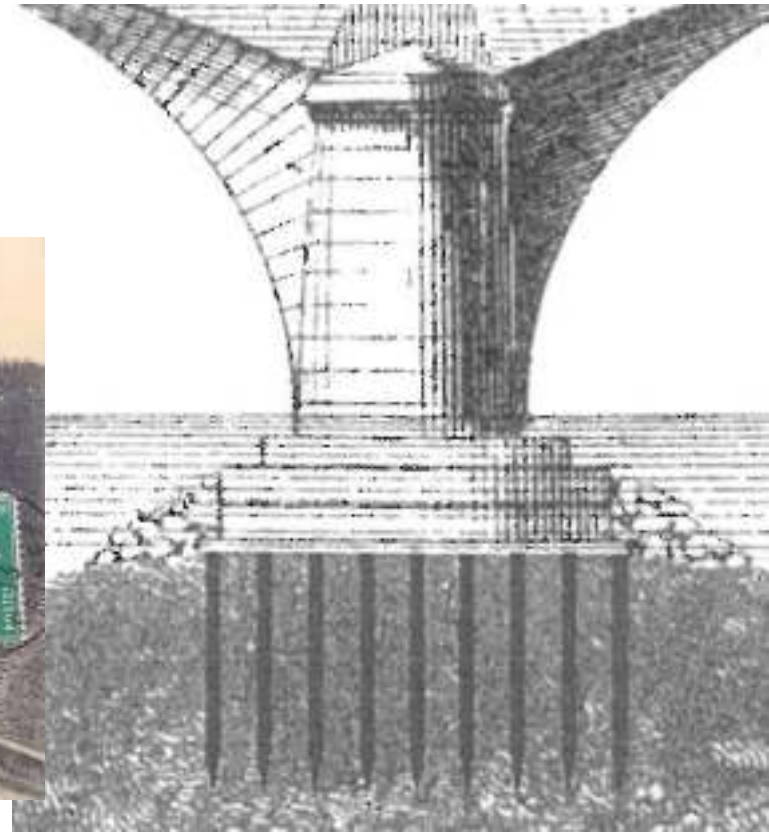


Historique fondations profondes



Historique fondations profondes

XVIIIème siècle : fondations de ponts à Paris, sur la Loire...



Fondation d'une pile du pont de Neuilly à Paris sur la Seine (1768-1774)

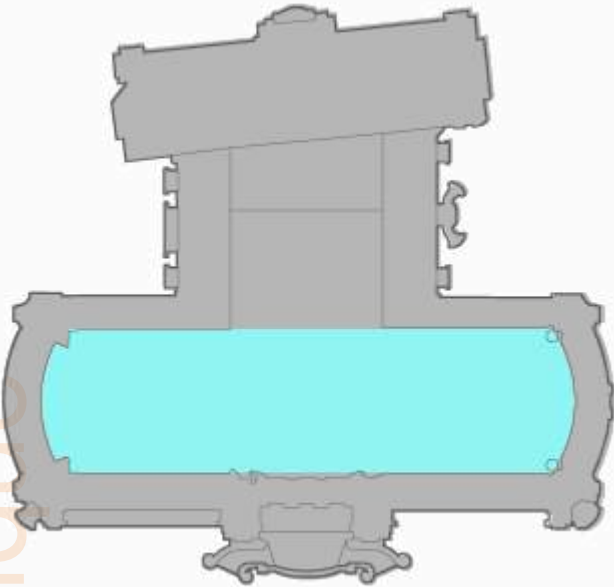
Historique fondations profondes

XVIIIème siècle : fondations de ponts à Paris, sur la Loire...



Historique

Historique fondations profondes

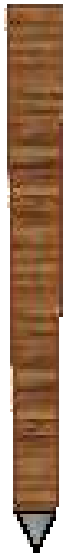


Pieux en chêne du Grand Palais

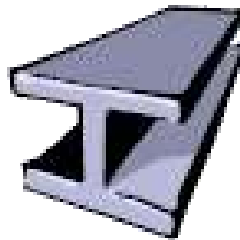
- Modification du niveau de la nappe phréatique (travaux du métro, des voies sur berge et du RER)
- Exposition à l'air libre des sommets des pieux en bois qui pourrissent => tassement jusqu'à 15cm

Pieux battus

Bois



- Acier



- Béton armé ou précontraint



Pieux forés – béton armé



Foreuse

Outils de forage

tarière



Outils de forage

Outils de forage



Outils de forage

bucket



Outils de forage

trépan



Outils de forage

benne



Outils de forage

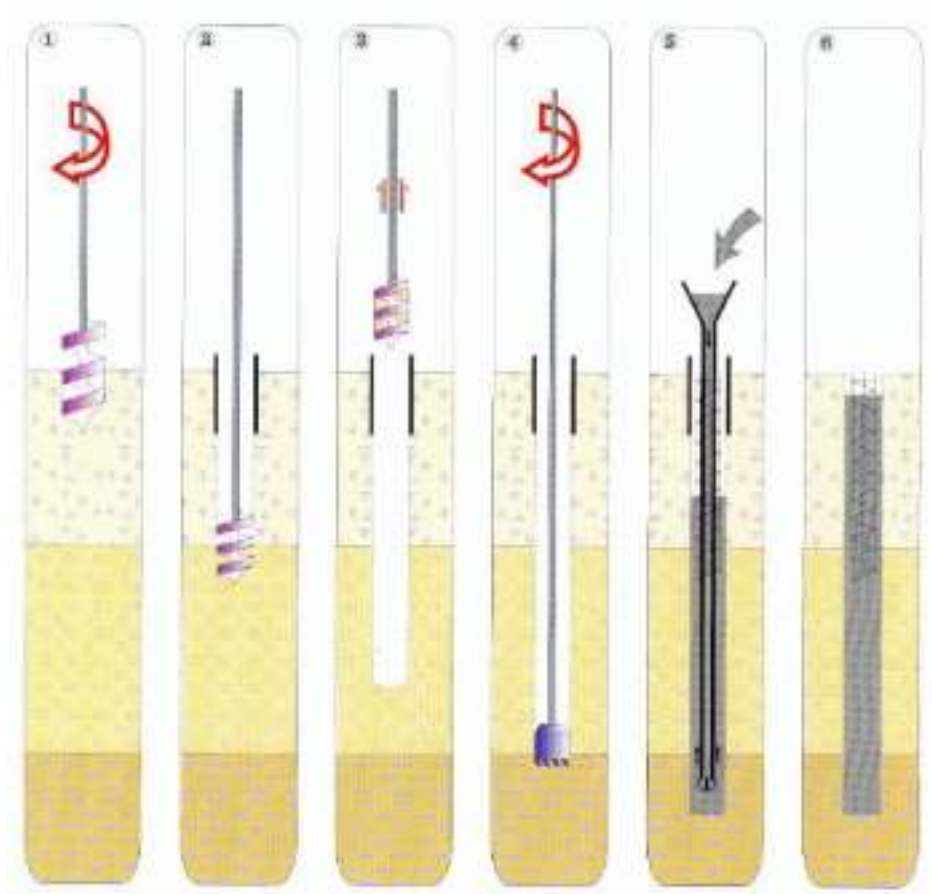
grappin



Les différents types de fondations profondes

Types de fondations

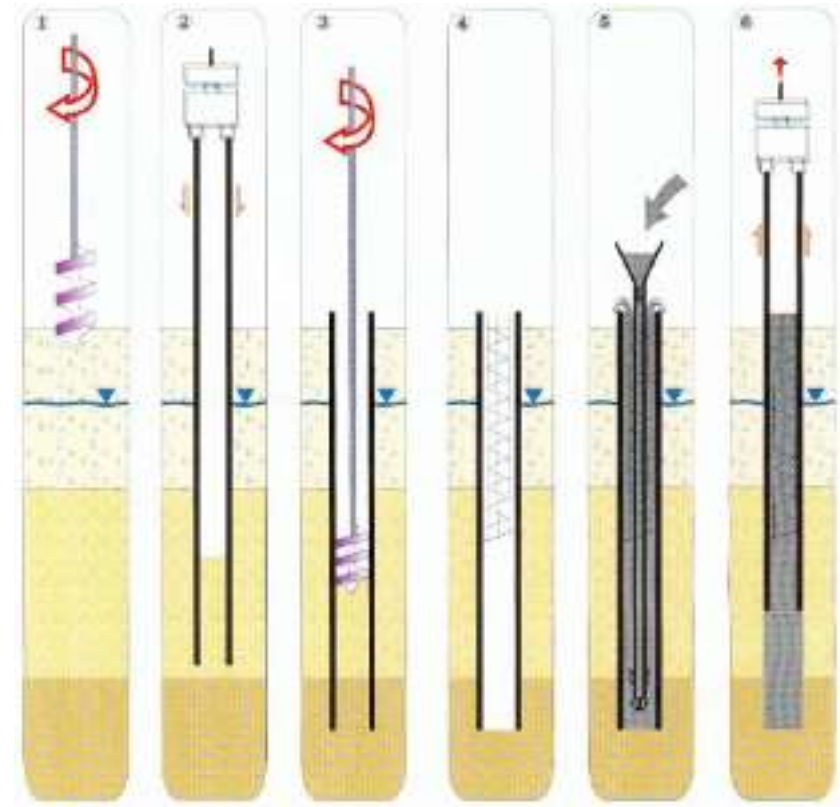
Pieux forés simples



 Vidéo

Les différents types de fondations profondes

Pieux forés tubés



Les différents types de fondations profondes

Types de fondations

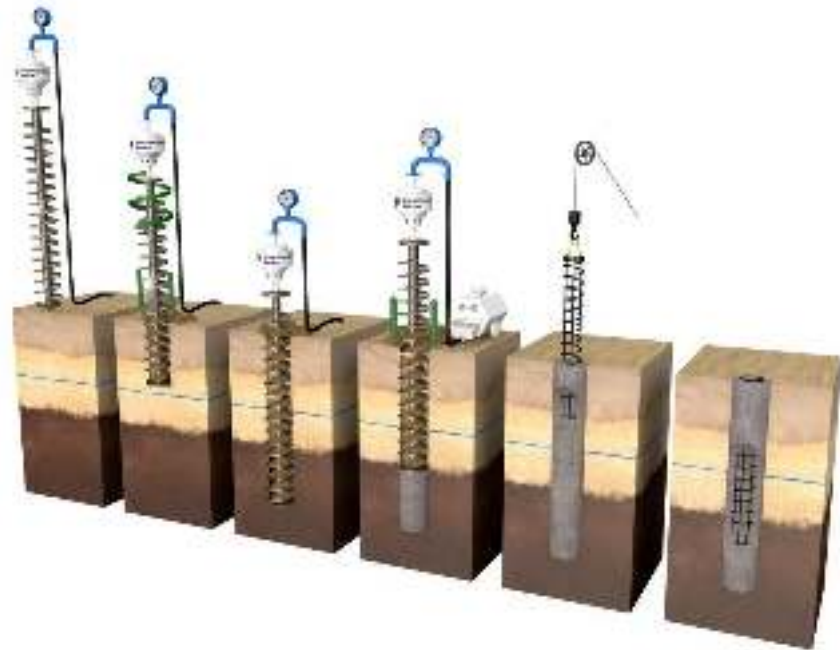
Pieux forés tubés vibrofoncé



Les différents types de fondations profondes

Types de fondations

Pieux forés tarière creuse

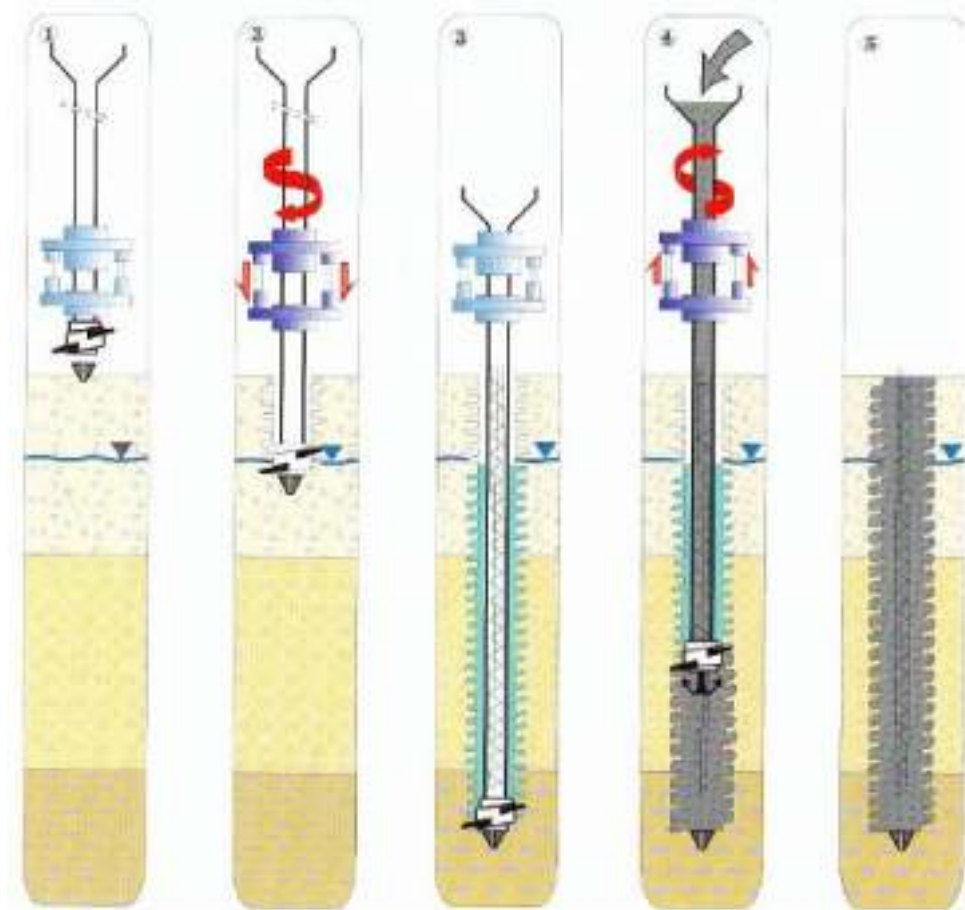


 Vidéo

Les différents types de fondations profondes

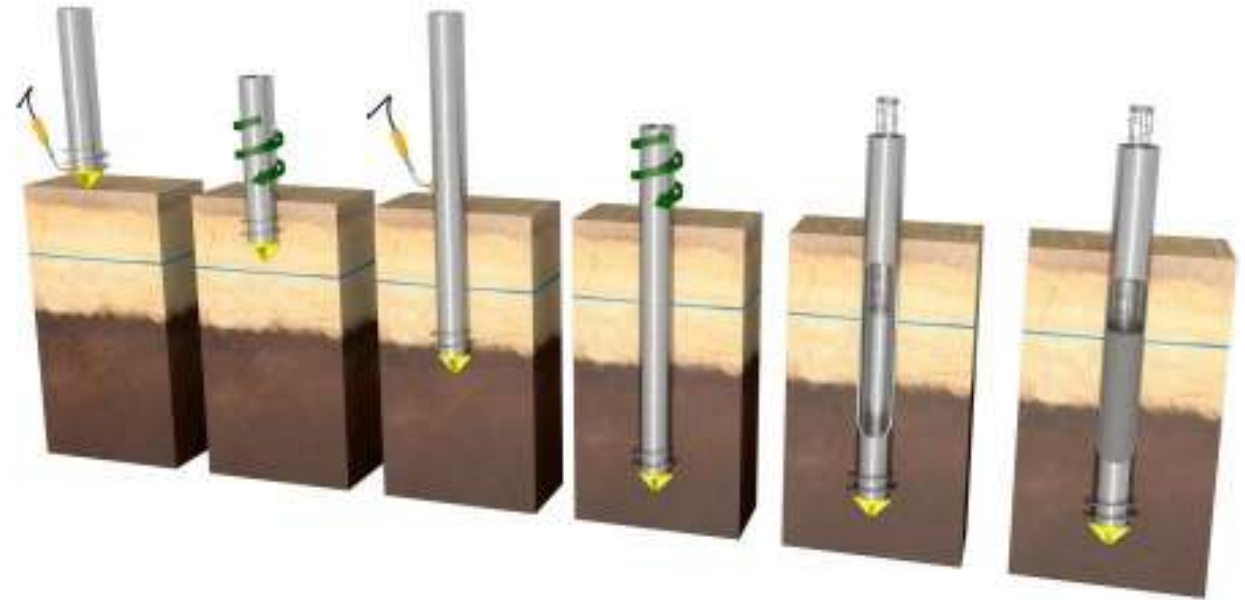
Types de fondations

Pieux vissés moulés



Les différents types de fondations profondes

Pieux vissés tubés



Les différents types de fondations profondes

Types de fondations

Pieux battus en béton armé ou précontraint

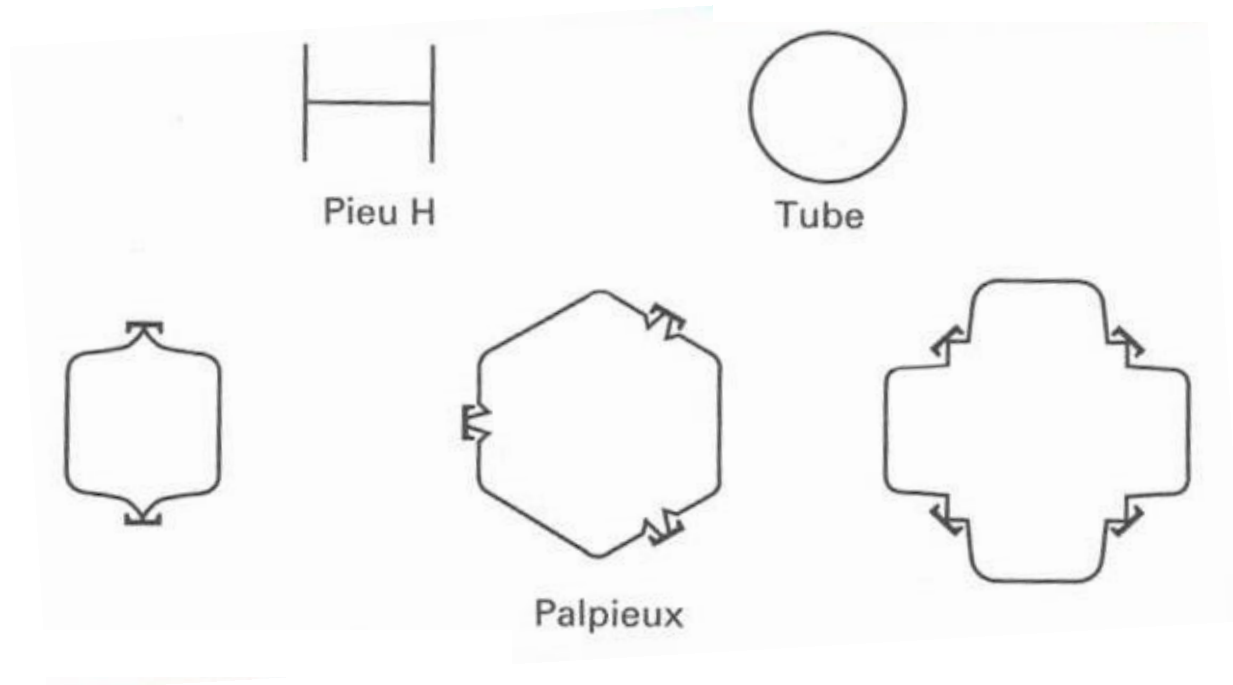


 Vidéo

Les différents types de fondations profondes

Types de fondations

Pieux battus en acier
fermé, ouvert



Les différents types de fondations profondes

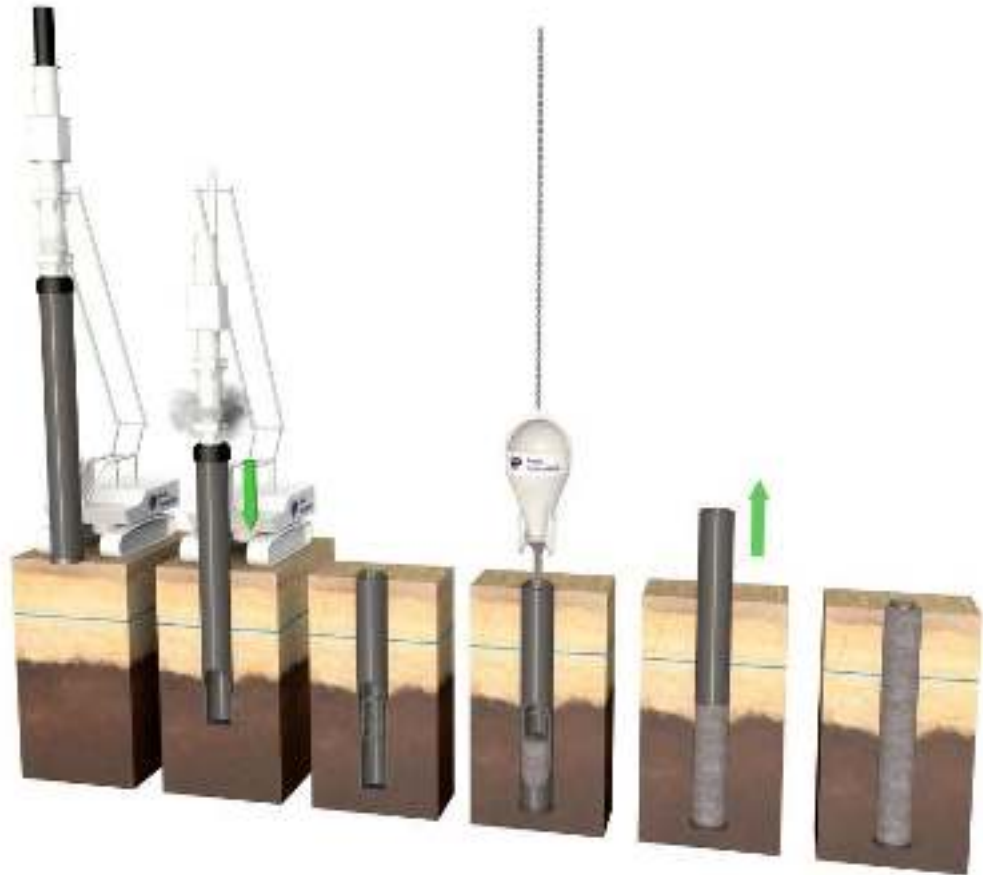
Pieux battus H



Les différents types de fondations profondes

Types de fondations

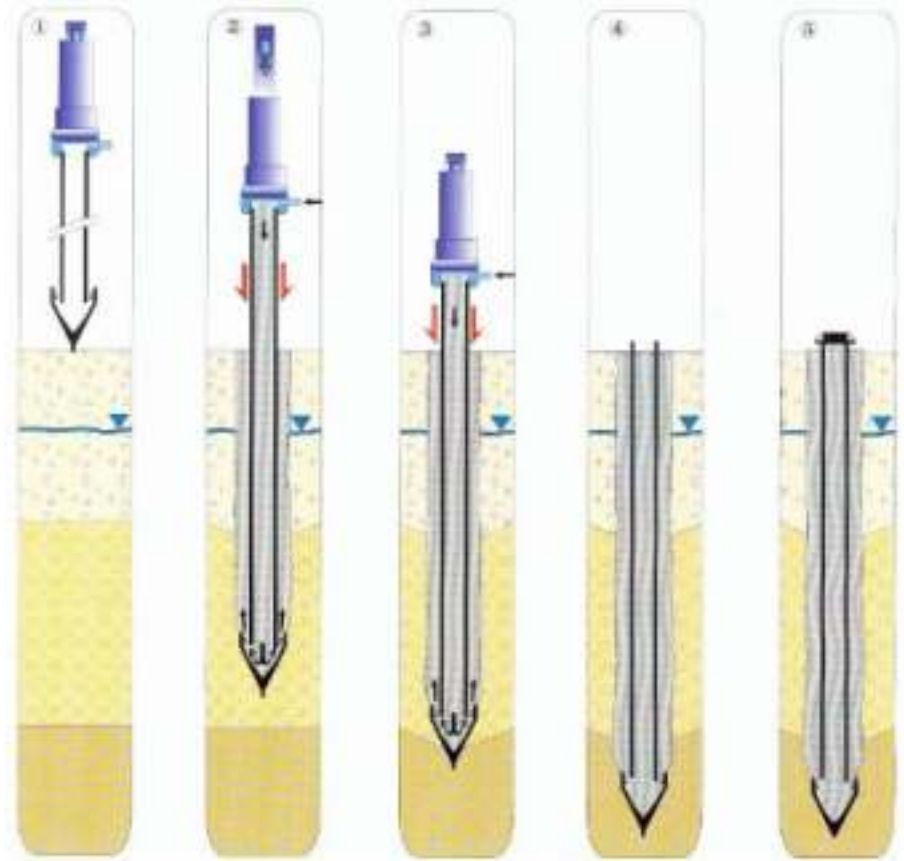
Pieux battus moulés



Les différents types de fondations profondes

Types de fondations

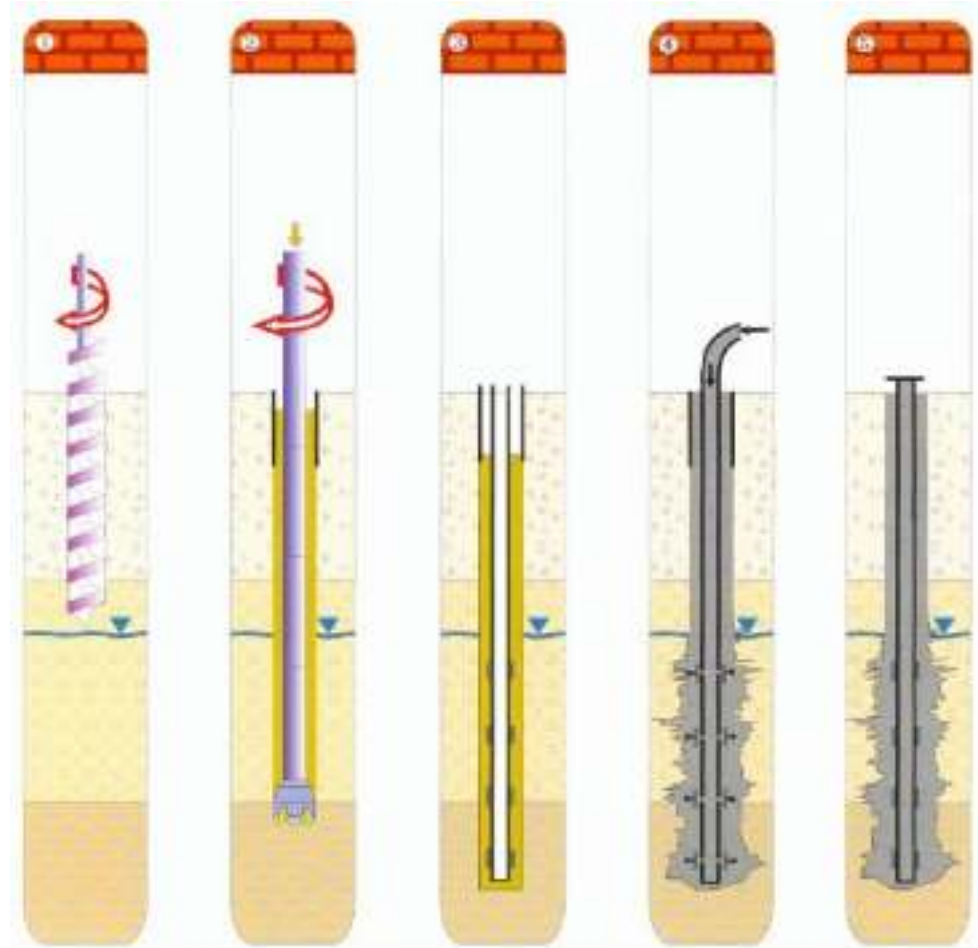
Pieux métallique battus injectés



Les différents types de fondations profondes

Types de fondations

Micro-pieu



Les différents types de fondations

profondes

Classe	Catégorie	Technique de mise en œuvre	Abréviation	Norme de référence
1	1	Foré simple (pieux et barrettes)	FS	NF EN 1536
	2	Foré boue (pieux et barrettes)	FB	
	3	Foré tubé (virole perdue)	FTP	
	4	Foré tubé (virole récupérée)	FTR	
	5	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	FSR, FBR, PU	
2	6	Foré tarière creuse simple rotation, ou double rotation	FTC, FTCD	NF EN 1536
3	7	Vissé moulé	VM	NF EN 12699
	8	Vissé tubé	VT	
4	9	Battu béton préfabriqué ou précontraint	BPF, BPR	NF EN 12699
	10	Battu enrobé (béton – mortier – coulis)	BE	
	11	Battu moulé	BM	
	12	Battu acier fermé	BAF	
5	13	Battu acier ouvert	BAO	NF EN 12699
6	14	Profilé H battu	HB	NF EN 12699
	15	Profilé H battu injecté	HBi	
7	16	Palplanches battues	PP	NF EN 12699
1 bis	17	Micropieu type I	M1	NF EN 1536/14199/12699
	18	Micropieu type II	M2	
8	19	Pieu ou micropieu injecté mode IGU (type III)	PIGU, MIGU	
	20	Pieu ou micropieu injecté mode IRS (type IV)	PIRS, MIRS	

Les différents types de fondations profondes

profondes

Pieu mis en place sans
refoulement du sol

Pieu mis en place avec
refoulement du sol

Classe	Catégorie	Technique de mise en œuvre	Abréviation	Norme de référence
1	1	Foré simple (pieux et barrettes)	FS	NF EN 1536
	2	Foré boue (pieux et barrettes)	FB	
	3	Foré tubé (virole perdue)	FTP	
	4	Foré tubé (virole récupérée)	FTR	
	5	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	FSR, FBR, PU	
2	6	Foré tarière creuse simple rotation, ou double rotation	FTC, FTCD	NF EN 1536
3	7	Vissé moulé	VM	NF EN 12699
	8	Vissé tubé	VT	
4	9	Battu béton préfabriqué ou précontraint	BPF, BPR	NF EN 12699
	10	Battu enrobé (béton – mortier – coulis)	BE	
	11	Battu moulé	BM	
	12	Battu acier fermé	BAF	
5	13	Battu acier ouvert	BAO	NF EN 12699
6	14	Profilé H battu	HB	NF EN 12699
	15	Profilé H battu injecté	HBi	
7	16	Palplanches battues	PP	NF EN 12699
1 bis	17	Micropieu type I	M1	NF EN 1536/14199/12699
	18	Micropieu type II	M2	
8	19	Pieu ou micropieu injecté mode IGU (type III)	PIGU, MIGU	
	20	Pieu ou micropieu injecté mode IRS (type IV)	PIRS, MIRS	

Quelques chiffres

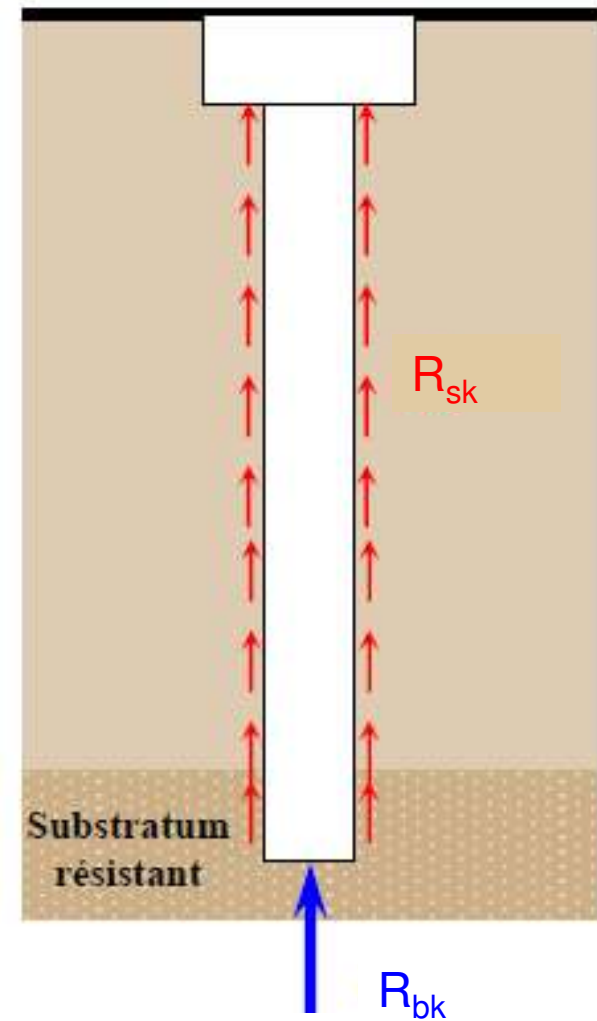
Marché français :

- pieux forés: 75%
 - tarière creuse 35%
 - pieux forés simples 15%
 - pieux forés boue et tubés 15%
 - pieux petit diam. (micropieux) 10%
- pieux avec refoulement de sol : 25%
 - pieux vissés 15%
 - pieux métal battus 10%
 - pieux battus moulés 5%
 - pieux préfabriqués battus 5%

Capacité portante

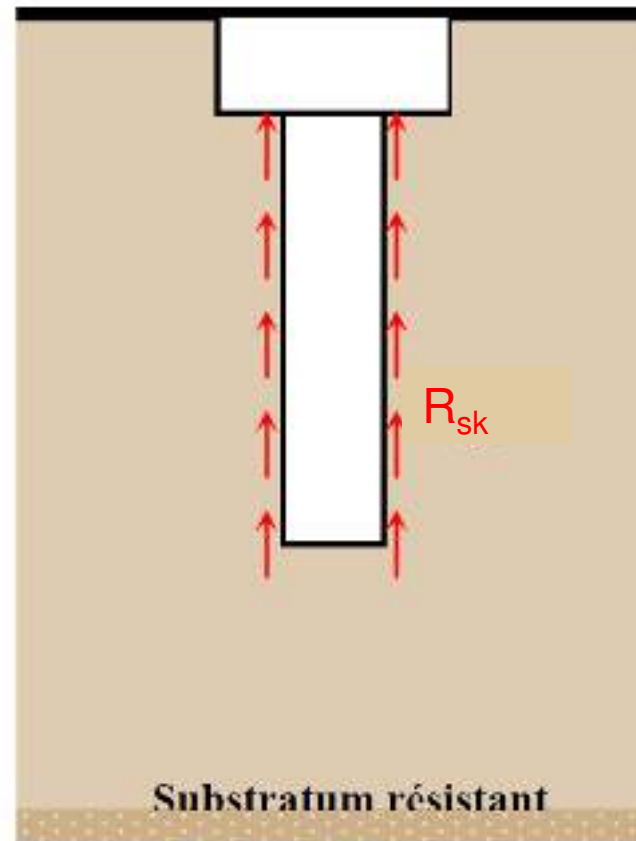
R_{bk} Résistance de pointe

R_{sk} Résistance au frottement latéral



Capacité portante

Capacité portante



Pieu flottant

Capacité portante

Evaluation de la capacité portante

- Méthode analytique basée sur les résultats des essais de laboratoire (c' , φ' , c_u)
- Méthode semi-empirique basée sur les résultats des essais :
Pressiométriques,
Pénétrométriques.

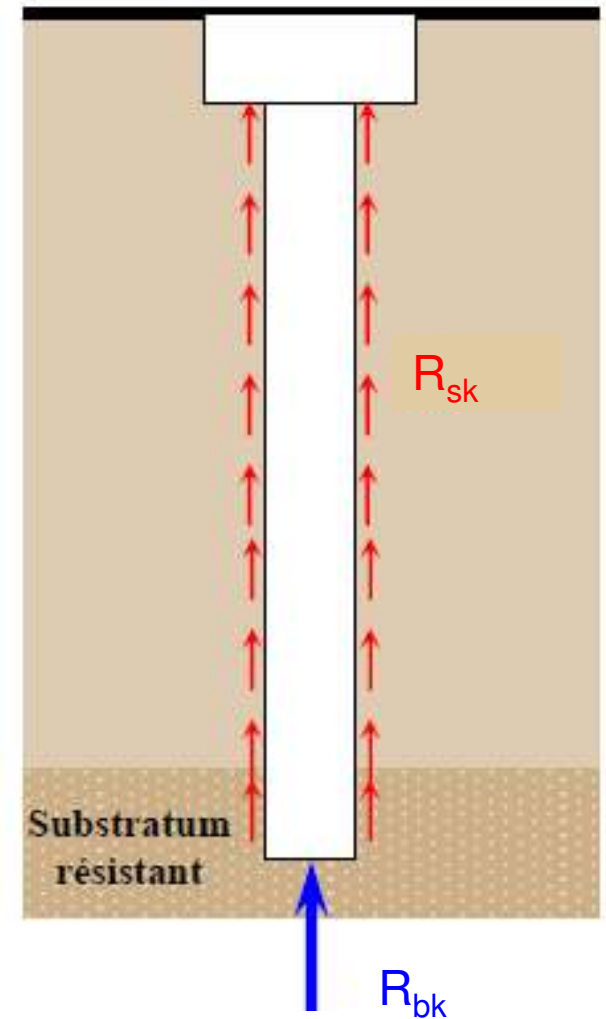
Capacité portante

R_{bk} Résistance de pointe

$$R_{bk} = A_b q_{bk}$$

R_{sk} Résistance au frottement latéral

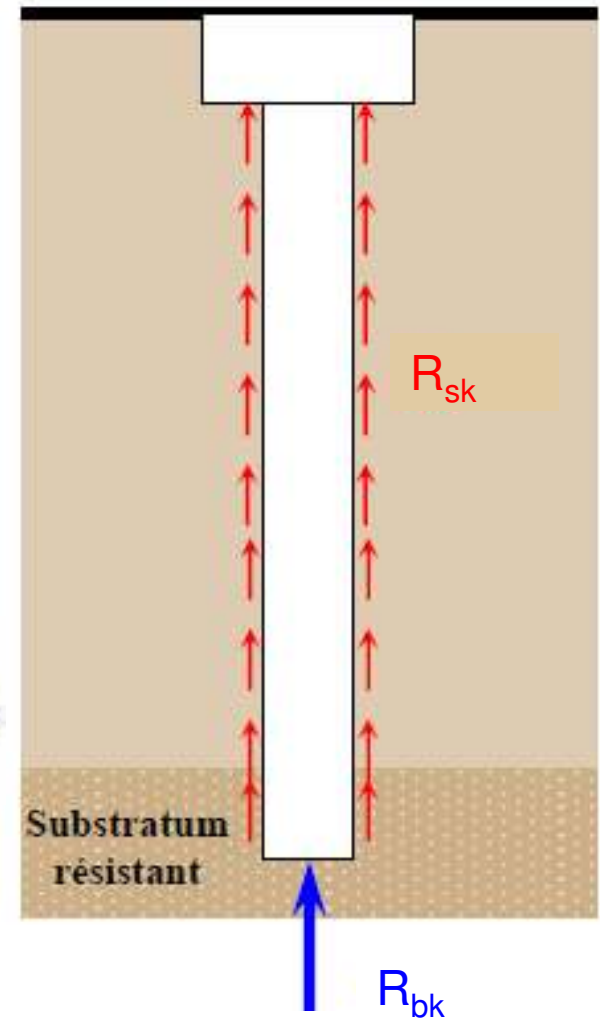
$$R_{sk} = \sum_i A_{si} q_{ski}$$



Principe de la fondation profonde

R_{bk} Résistance de pointe

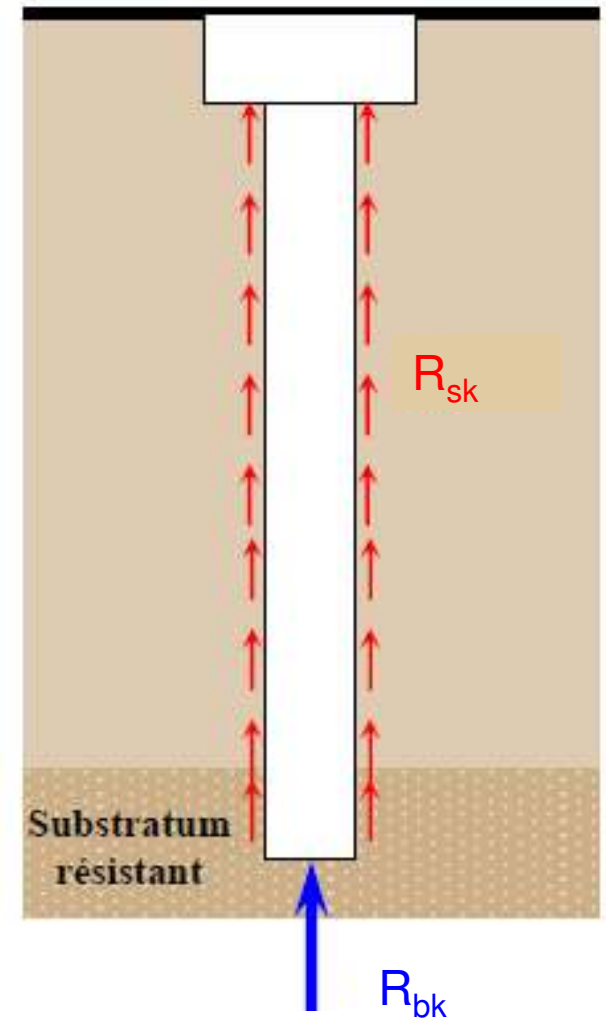
$$R_{bk} = A_b q_{bk}$$



Principe de la fondation profonde

R_{sk} Résistance au frottement latéral

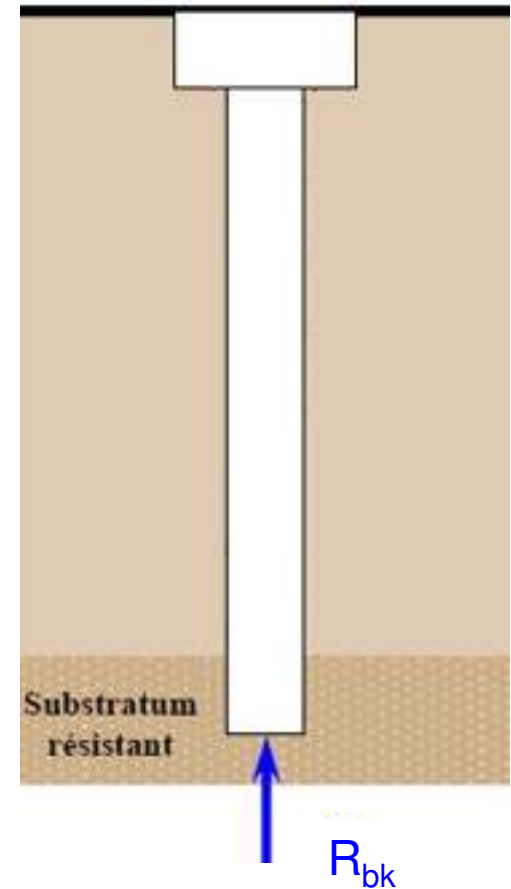
$$R_{sk} = \sum_i A_{si} q_{ski}$$



Pieu isolé sous charge axiale

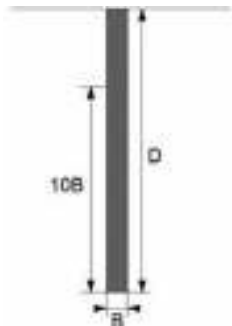
Résistance de pointe $R_{bk} = A_b q_{bk}$

1. Méthode pressiométrique
2. Méthode pénétrométrique



Résistance de pointe – méthode pressiométrique

Hauteur d'encastrement effective D_{ef}



$$D_{ef} = \frac{1}{p_{le}^*} \int_{D-h_D}^D p^*_l(z) dz$$

$$h_D = \min(10B; D)$$

Facteur de portance pressiométrique K_p

$$\text{Si } \frac{D_{ef}}{B} > 5$$

$$K_p = K_{pmax}$$

$$\text{Si } \frac{D_{ef}}{B} < 5$$

$$K_p = 1 + (K_{pmax} - 1) \left(\frac{D_{ef}}{B} \right)$$

Catégorie de terrain <i>(Annexe B)</i>					
Terrain	Argile % CaCO ₃ < 30 % Limon Sols Intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grève	Grave	Marne et calcaire -meux	Roche altérée et fragmentée (a)
1	1,15 (b)	1,1 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)
2	1,3	1,85	1,6	1,6	2,0
3	1,55	3,2	2,35	2,10	2,10
4	1,95	3,1	2,90	2,30	2,30
5#	1,0	1,9	1,4	1,4	1,2
6#	1,20	3,10	1,7	2,2	1,5
7#	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2
8	1,15 (b)	1,1 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)

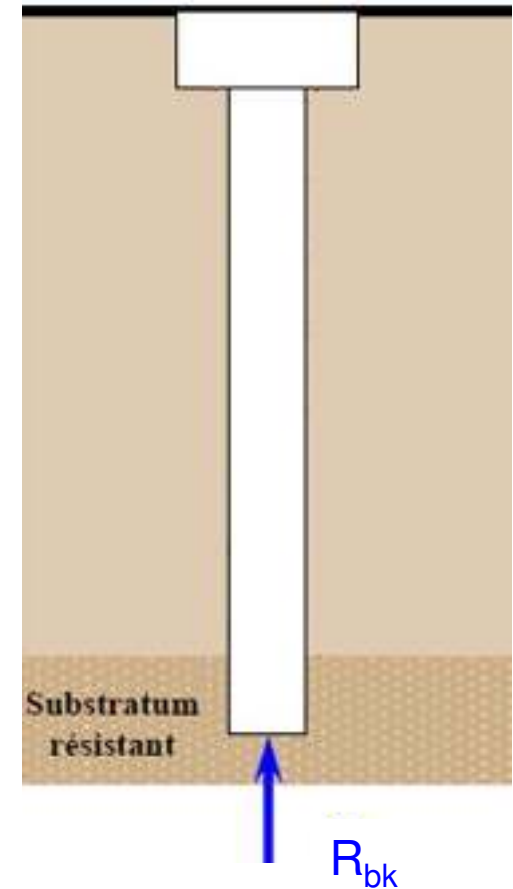
Classe de pieu
(Annexe A)

Valeur K_{pmax}

Pieu isolé sous charge axiale

Résistance de pointe $R_{bk} = A_b q_{bk}$

1. Méthode pressiométrique
2. Méthode pénétrométrique



Résistance de pointe – méthode pénétrométrique

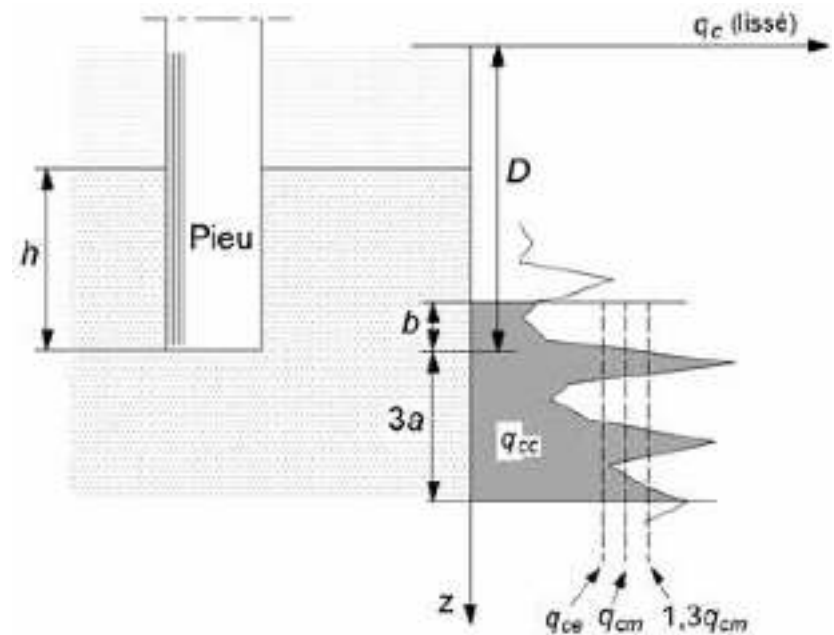
Contrainte limite de pointe

$$q_b = k_c q_{ce}$$

Résistance de pointe équivalente

$$q_{ce} = \frac{1}{b + 3a} \int_{D-b}^{D+3a} q_{cc}(z) dz$$

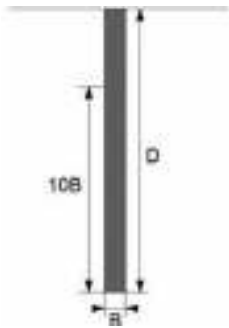
$$a = \max\left(\frac{B}{2}; 0,5\right) \quad b = \min(a; h)$$



Avec h la hauteur de la fondation comprise dans la formation porteuse et B le diamètre du pieu

Résistance de pointe – méthode pénétrométrique

Hauteur d'encastrement effective D_{ef}



$$D_{ef} = \frac{1}{q_{ce}} \int_{D-hD}^D q_c(z) dz$$

$$h_D = \min(10B; D)$$

Facteur de portance pénétrométrique K_c

Si $\frac{D_{ef}}{B} > 5 : K_c = K_{cmax}$

Si $\frac{D_{ef}}{B} < 5 : K_c = K_{cmin} + (K_{cmax} - K_{cmin}) \left(\frac{D_{ef}}{5B} \right)$

Catégorie de terrain [Annexe II]						
Terrain	Argile % CaCO3 < 30 % Limon	Sols intermédiaires	Sable Grave	Craie	Marne et calcaire marneux	Roche altérée et fragmentée (a)
1	0,4 (b)	0,3 (b)	0,2 (b)	0,3 (b)	0,3 (b)	0,3 (b)
2	0,45	0,3	0,25	0,3	0,3	0,3
3	0,5	0,5	0,5	0,4	0,25	0,35
4	0,45	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
5#	0,35	0,3	0,25	0,15	0,15	0,15
6#	0,4	0,4	0,4	0,35	0,2	0,2
7#	0,35	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
8	0,45 (b)	0,3 (b)	0,2 (b)	0,3 (b)	0,3 (b)	0,25 (b)

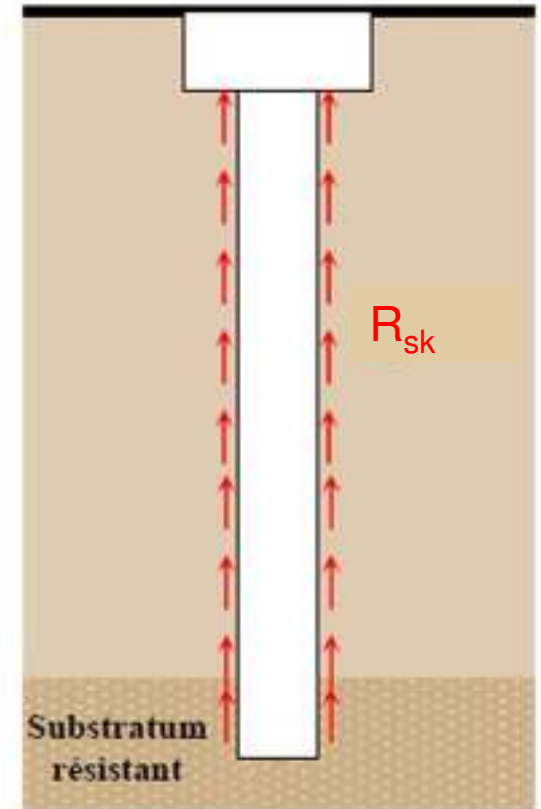
	coefficient K_{cmin}
Argiles et limons	0,3
Sols intermédiaires	0,2
Sables et graves	0,1
Craie et calcaires marneux, marnes et roches altérées et fragmentées	0,15

Pieu isolé sous charge axiale

Résistance de frottement axial $R_{sk} = \sum_i A_{si} q_{ski}$

1. Méthode pressiométrique

2. Méthode pénétrométrique



Résistance de frottement axial - méthode pressiométrique

Contrainte limite de frottement axial

$$q_s(z) = \min(\alpha_{\text{pieu} - \text{sol}} f_{\text{sol}}(p^*_l(z)); q_{s\text{max}})$$

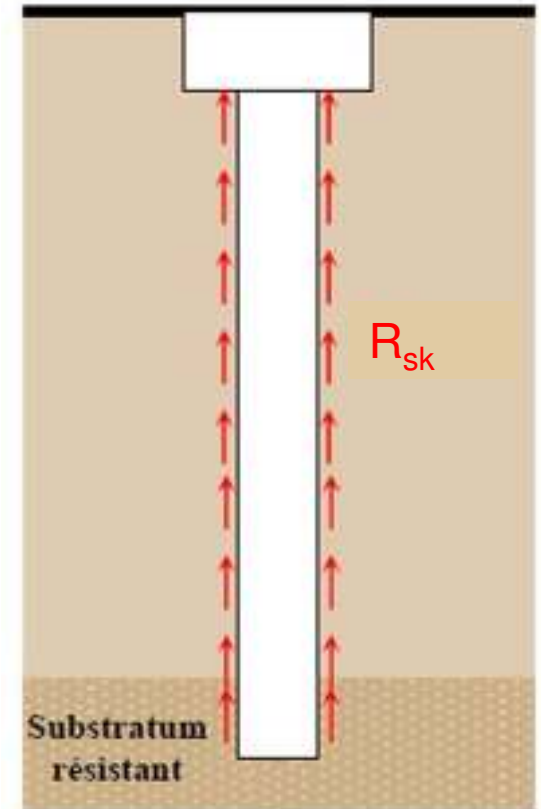
$q_{s\text{max}}$

Catégorie de pieu	Abrév.	Technique de mise en œuvre	Valeurs en kPa				
			Argile % CaCO ₃ < 30 % Limon Sols Intermédiaires	Sols Intermédiaires Sable Grava	Craie	Marne et calcaire marneux	Roche altérée et fragmentée
1 ##	FS	Foré simple (pieux et barrettes)	90	90	200	170	200
2 ##	FB	Foré boue (pieux et barrettes)	90	90	200	170	200
3	FTP	Foré tubé (virole perdue)	50	50	50	90	---
4	FTR	Foré tubé (virole récupérée)	90	90	170	170	---
5 ##	FSR, FBR, PU	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	90	---	---	---	---
6	FTC, FTCD	Foré tarière creuse simple rotation, ou double rotation	90	170	200	200	200
7	VM	Vissé moulé	130	200	170	170	---
8	VT	Vissé tubé	50	90	90	90	---
9	BPF, BPR	Battu béton préfabriqué ou précontraint	130	130	90	90	---
...	...	Battu enrobé /bâton -

Pieu isolé sous charge axiale

Résistance de frottement axial $R_{sk} = \sum_i A_{si} q_{ski}$

1. Méthode pressiométrique
2. Méthode pénétrométrique



Résistance de frottement axial - méthode pénétrométrique

Contrainte limite de frottement axial

$$q_s(z) = \min(\alpha_{pieu_sol} f_{sol}(q_c(z)); q_{smax})$$

$$f_{sol}(q_c(z)) = (a q_c + b)(1 - e^{-c q_c})$$

I. Charge axiale

Catégorie de terrain
(Annexe B)

Catégorie de sol	Argile % CaCO ₃ < 30 % Limon Sols Intermédiaires	Sols intermédiaires	Sable Grave	Craie	Marne et calcaire -mameux	Roche altérée et fragmentée
a	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
b	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
c	0,4	0,25	0,15	0,25	0,25	0,25

α_{pieu_sol}

Catégorie de terrain	Sol	Description de terrain	Type de sol		Type de sol	Type de sol	Type de sol	Type de sol
			Argile	Sols intermédiaires				
1	10	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
2	15	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
3	20	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
4	25	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
5	30	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
6	35	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
7	40	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
8	45	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
9	50	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
10	55	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
11	60	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
12	65	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
13	70	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
14	75	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
15	80	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
16	85	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
17	90	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
18	95	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
19	100	Argile	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015

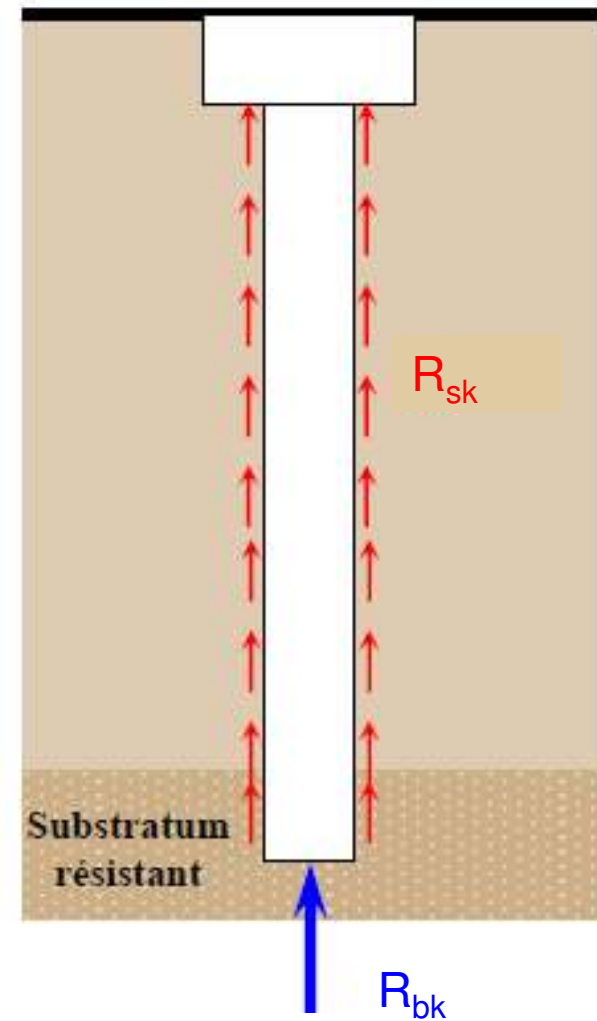
q_{smax}

Catégorie de terrain	Sol	Description de terrain	Type de sol		Type de sol	Type de sol	Type de sol	Type de sol
			Argile	Sols intermédiaires				
1	10	Argile	90	90	90	90	90	90
2	15	Argile	90	90	90	90	90	90
3	20	Argile	90	90	90	90	90	90
4	25	Argile	90	90	90	90	90	90
5	30	Argile	90	90	90	90	90	90
6	35	Argile	90	90	90	90	90	90
7	40	Argile	90	90	90	90	90	90
8	45	Argile	90	90	90	90	90	90
9	50	Argile	90	90	90	90	90	90
10	55	Argile	90	90	90	90	90	90
11	60	Argile	90	90	90	90	90	90
12	65	Argile	90	90	90	90	90	90
13	70	Argile	90	90	90	90	90	90
14	75	Argile	90	90	90	90	90	90
15	80	Argile	90	90	90	90	90	90
16	85	Argile	90	90	90	90	90	90
17	90	Argile	90	90	90	90	90	90
18	95	Argile	90	90	90	90	90	90
19	100	Argile	90	90	90	90	90	90

Principe de la fondation profonde

R_{bk} Résistance de pointe

R_{sk} Résistance au frottement latéral



Pieu isolé sous charge axiale

Résistance de pointe

$$R_{bk} = A_b q_{bk}$$

$$q_{bk} = \frac{q_b}{\gamma_{Rd1} \gamma_{Rd2}}$$

Résistance de frottement axial

$$R_{sk} = \sum_i A_{si} q_{sik}$$

$$q_{sik} = \frac{q_{si}}{\gamma_{Rd1} \gamma_{Rd2}}$$

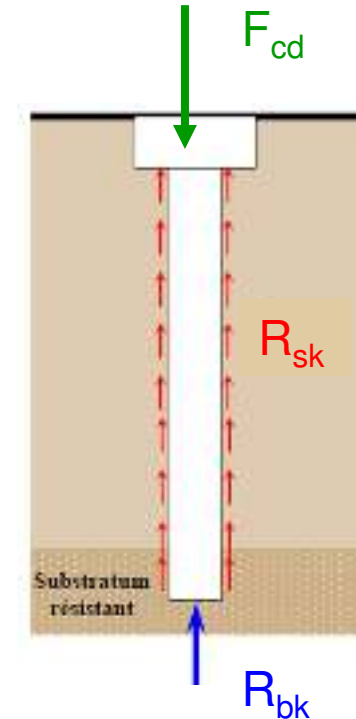
			γ_{Rd1} compression	γ_{Rd1} traction	γ_{Rd2} compression	γ_{Rd2} traction
pressiométrique	Pieu de classe 1 à 7 hors pieux de catégorie 10 et 15	Non ancrés dans la craie	1,15	1,4	1,1	1,1
		Ancrés dans la craie	1,4	1,7	1,1	1,1
	Pieux de catégorie 10,15, 17, 18, 19 et 20		2,0	2,0	1,1	1,1
Pénétrométrique	Pieu de classe 1 à 7 hors pieux de catégorie 10 et 15	Non ancrés dans la craie	1,18	1,45	1,1	1,1
		Ancrés dans la craie	1,45	1,75	1,1	1,1
	Pieux de catégorie 10,15, 17, 18, 19 et 20		2,0	2,0	1,1	1,1

Pieu isolé sous charge axiale

Effort de compression

Vérification à l'ELU $F_{cd} \leq R_{cd} = \frac{R_{bk}}{\gamma_b} + \frac{R_{sk}}{\gamma_s}$

ELU	Situations durables et transitoires	Situations accidentelles
γ_b	1,1	1,0
γ_s	1,1	1,0



Pieu isolé sous charge axiale

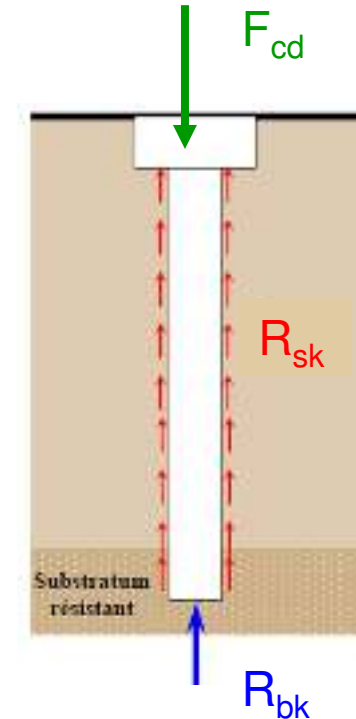
Effort de compression

Vérification à l'ELU $F_{cd} \leq R_{cd} = \frac{R_{bk}}{\gamma_b} + \frac{R_{sk}}{\gamma_s}$

ELU	Situations durables et transitoires	Situations accidentelles
γ_b	1,1	1,0
γ_s	1,1	1,0

Vérification à l'ELS $F_{cd} \leq R_{c cr d} = \frac{\alpha R_{bk} + \beta R_{sk}}{\gamma_{cr}}$

ELS	Combinaisons caractéristiques	Combinaisons QP
γ_{cr}	0,9	1,1



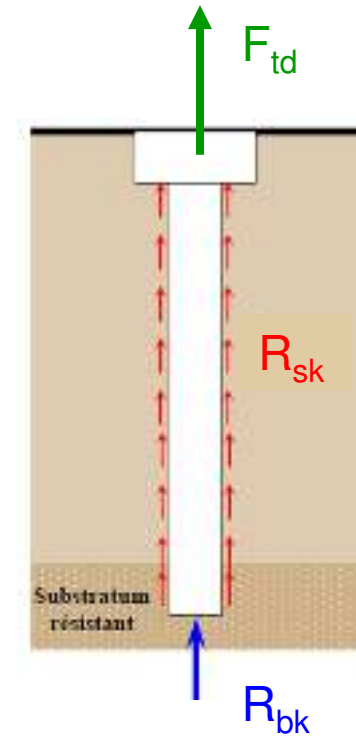
	α	β
Sans refoulement du sol	0,5	0,7
Avec refoulement du sol	0,7	0,7

Pieu isolé sous charge axiale

Effort de traction

Vérification à l'ELU $F_{td} \leq R_{td} = \frac{R_{sk}}{\gamma_{st}}$

ELU	Situations durables et transitoires	Situations accidentelles
γ_{st}	1,15	1,05



Pieu isolé sous charge axiale

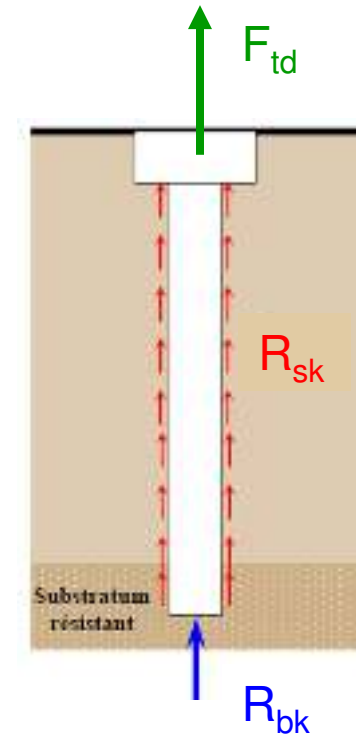
Effort de traction

Vérification à l'ELU $F_{td} \leq R_{td} = \frac{R_{tk}}{\gamma_{st}}$

ELU	Situations durables et transitoires	Situations accidentelles
γ_{st}	1,15	1,05

Vérification à l'ELS $F_{td} \leq R_{tcrd} = \frac{0,7 R_{sk}}{\gamma_{scr}}$

ELS	Combinaisons caractéristiques	Combinaisons QP
γ_{cr}	0,9	1,1



Pieu isolé sous charge axiale

Vérification à l'ELU

- Compression : $F_{cd} \leq R_{cd} = \frac{R_{bk}}{\gamma_b} + \frac{R_{sk}}{\gamma_s}$
- Traction $F_{td} \leq R_{td} = \frac{R_{sk}}{\gamma_{st}}$

ELU	Situations durables et transitoires	Situations accidentelles
γ_b	1,1	1,0
γ_s	1,1	1,0
γ_{st}	1,15	1,05

Vérification à l'ELS

- Compression $F_{cd} \leq R_{c cr d} = \frac{\alpha R_{bk} + \beta R_{sk}}{\gamma_{cr}}$
- Traction $F_{td} \leq R_{t cr d} = \frac{0,7 R_{sk}}{\gamma_{s cr}}$

ELS	Combinaisons caractéristiques	Combinaisons QP
γ_{cr}	0,9	1,1
$\gamma_{s cr}$	1,1	1,5

	α	β
Sans refoulement du sol	0,5	0,7
Avec refoulement du sol	0,7	0,7

Vérifications supplémentaires

- Prise en compte de l'effet de groupe → réduction de la portance
- Évaluation du frottement négatif
 - Pour un pieu isolé
 - Pour un groupe de pieux
- Estimation des tassements et compatibilité avec la structure
- Comportement vis-à-vis des sollicitations latérales

Tassement

Essais de chargement en vraie grandeur par les laboratoires des Ponts et Chaussées :

- longueur de fiche entre 6 et 45m,
- diamètre entre 0,3 et 1,5m

-> tassement en tête des pieux n'excède que très rarement le centimètre

Pour des projets courants, la vérification du tassement n'est en général pas exigé

Évaluation forfaitaire :

pour les pieux forés : 0,006 B

pour les pieux battus : 0,009 B

Portance des groupes de pieux

On considère une modification de la capacité portante pour les groupes de pieux

Le coefficient d'efficacité C_e

$$R_c = N(R_{b,is} + C_e R_{s,is})$$

On définit l'entre-axes d

$$C_e = 1 \text{ lorsque } d \geq 3B$$

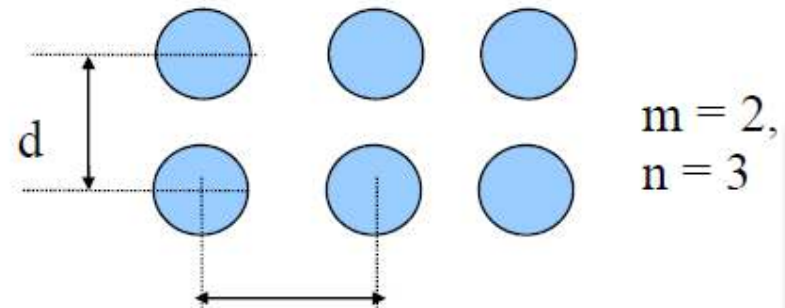
$$C_e = \left(1 - C_d \left(2 - \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n} \right) \right) \right) \text{ avec : } C_d = 1 - \frac{1}{4} \left(1 + \frac{d}{B} \right) \text{ lorsque } 1 \leq \frac{d}{B} \leq 3$$

d est l'entraxe des pieux ;

B est le diamètre des pieux ;

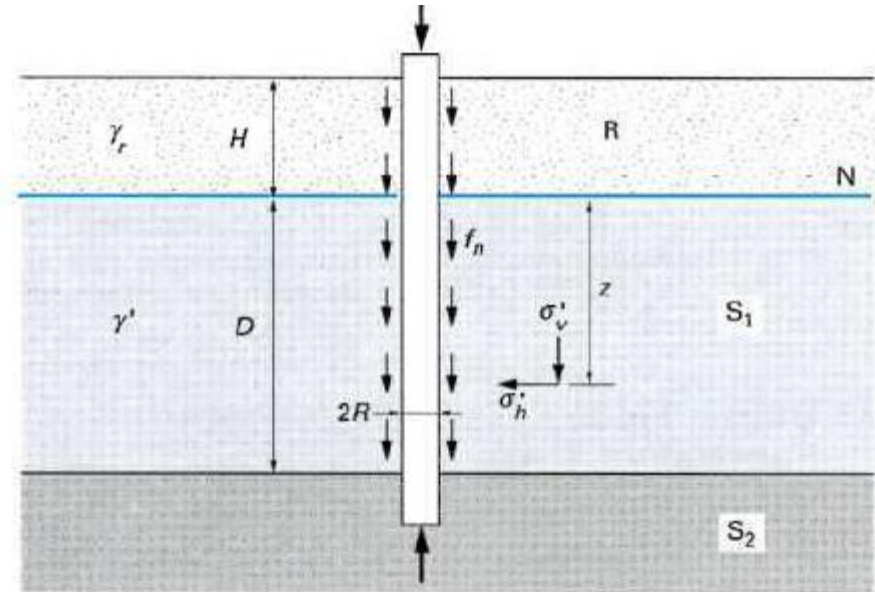
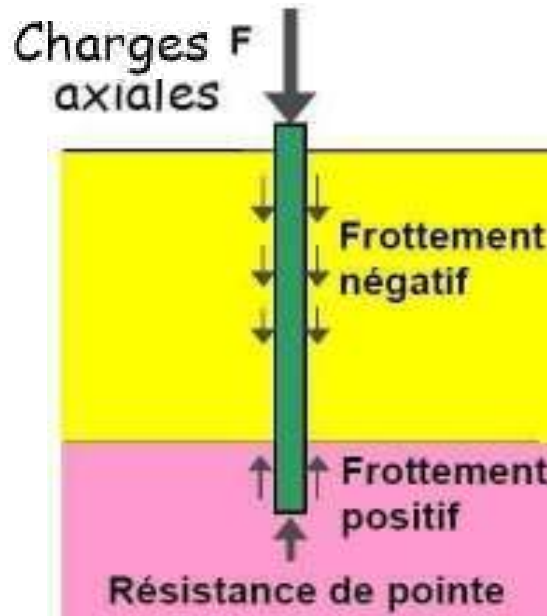
m est le nombre de lignes de pieux ;

n est le nombre de pieux par lignes.



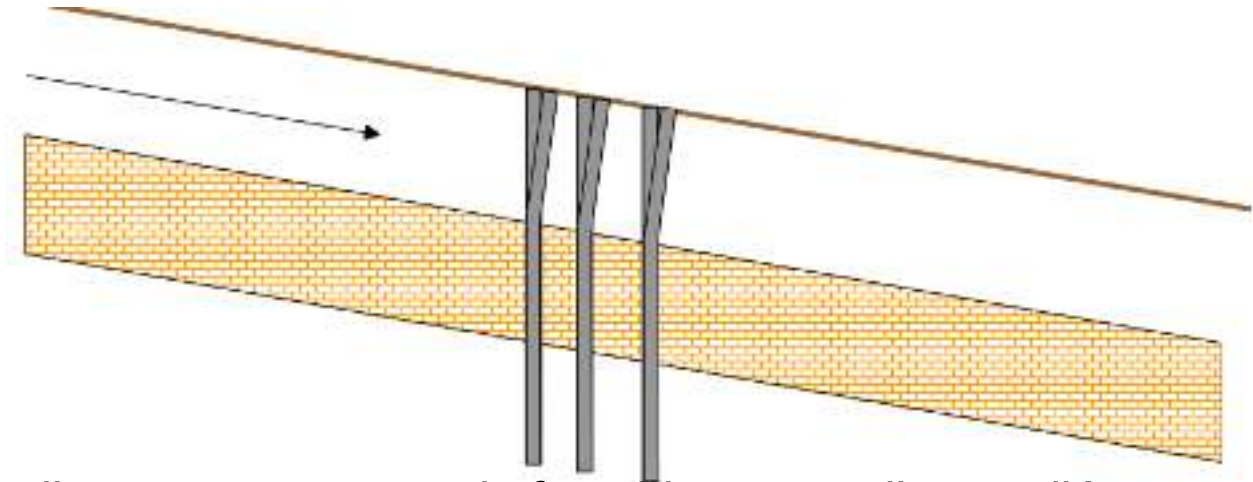
Frottement négatif

- Configuration : remblai d'accès à un ouvrage
- Les tassements du sol en place font tasser plus que le pieu si bien que :
Il n'y a pas de frottement positif
Le sol applique une charge supplémentaire G_{sf} aux fondations
- Frottement négatif différent pour un pieu isolé et pour un groupe de pieux

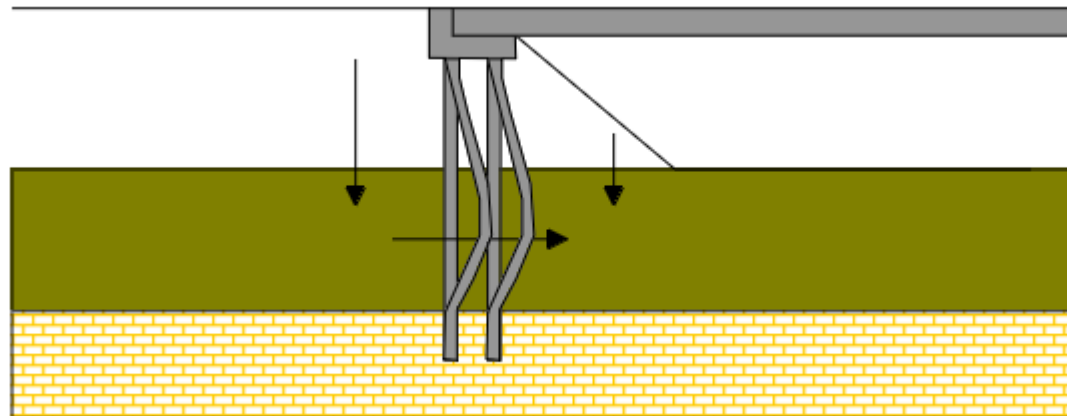


Poussées latérales

- Renforcement d'un glissement de terrain

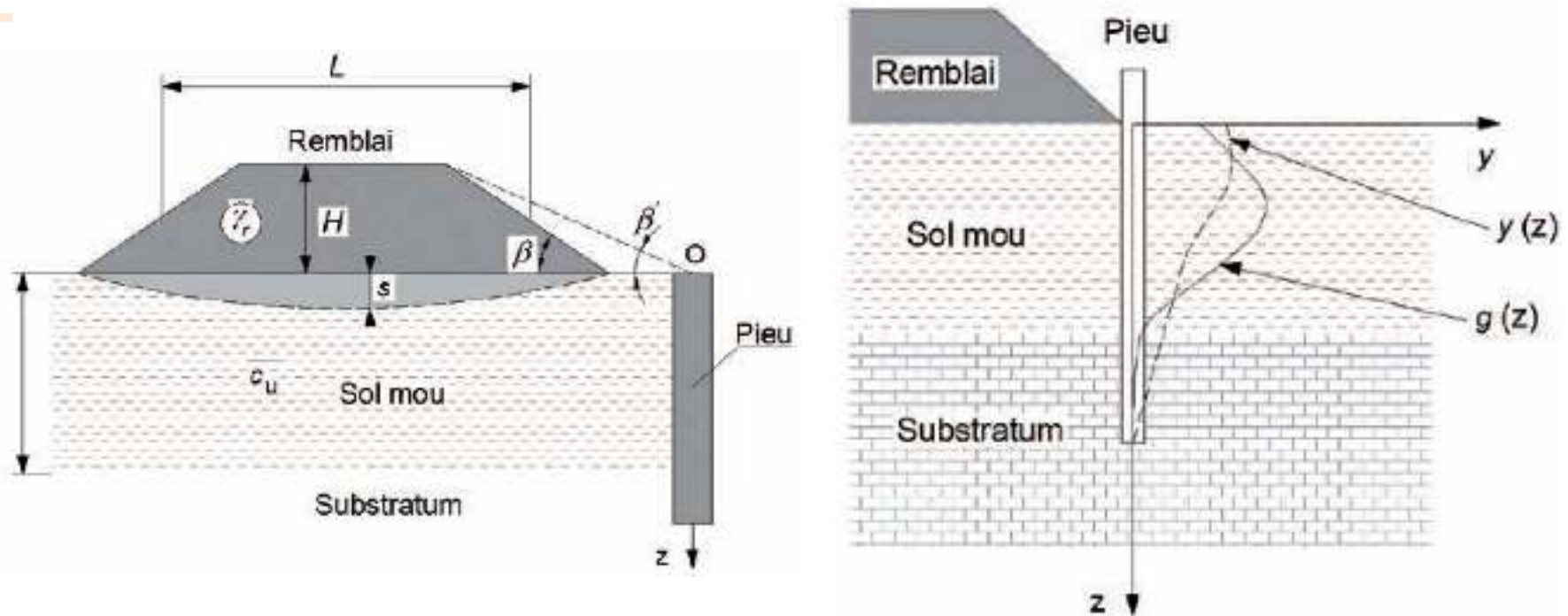


- Fondations d'un pont permettant le franchissement d'une vallée compressible



Poussées latérales

- Lorsque l'on a un tassement dissymétrique du sol, il entraîne un déplacement horizontal du sol au niveau des pieux
- Exemple typique d'une culée d'ouvrage en remblai sur sol compressible



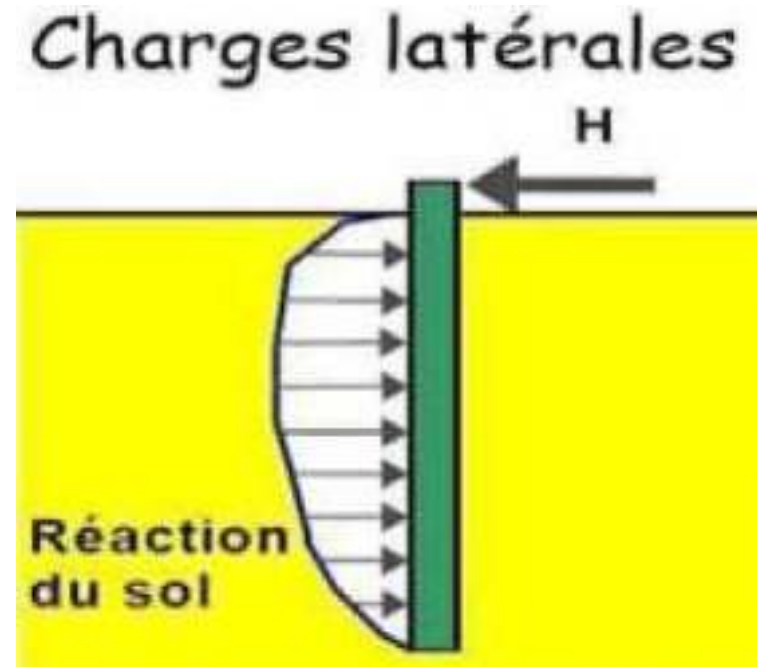
Poussées latérales

Les grandeurs déduites du calcul sont :

- Les moments fléchissants
- Les efforts tranchants

Il est alors possible de prévoir le dimensionnement des pieux en conséquence :

- Ferrailage pour des pieux BA
- Section, inertie et nuance d'acier pour des pieux métalliques



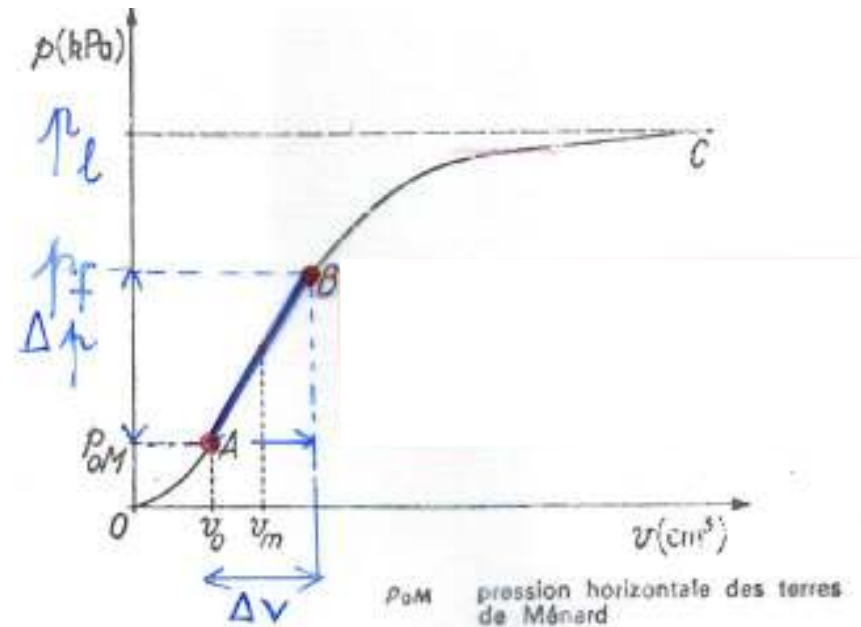
Rappel - Essais in-situ

Pressiomètre de Ménard :

Dilatation radiale d'une cellule cylindrique placée dans un forage préalable

Mesure de :

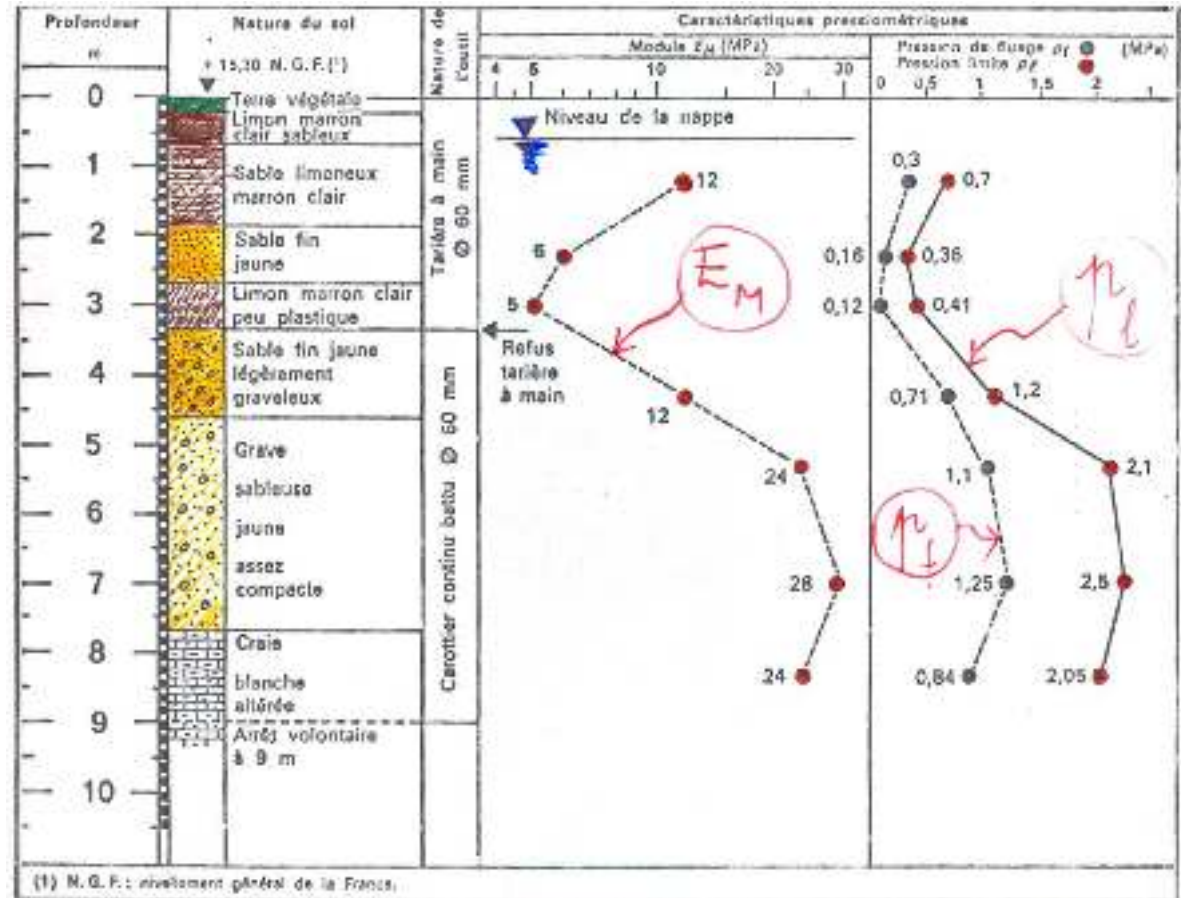
- la pression p dans la cellule de mesure
- la variation de volume v à la fin du palier de pression



Rappel - Essais in-situ

Module
pressiométrique
 E_M

Pression limite p_l





Affouillement (passerelle sur l'Allier)

Calculer R_c et R_{c0} pour un pieu foré tubé (virole récupérée) de 0,8m de diamètre et de 15m de longueur à partir des caractéristiques pressiométriques données dans la figure suivante.

TD

