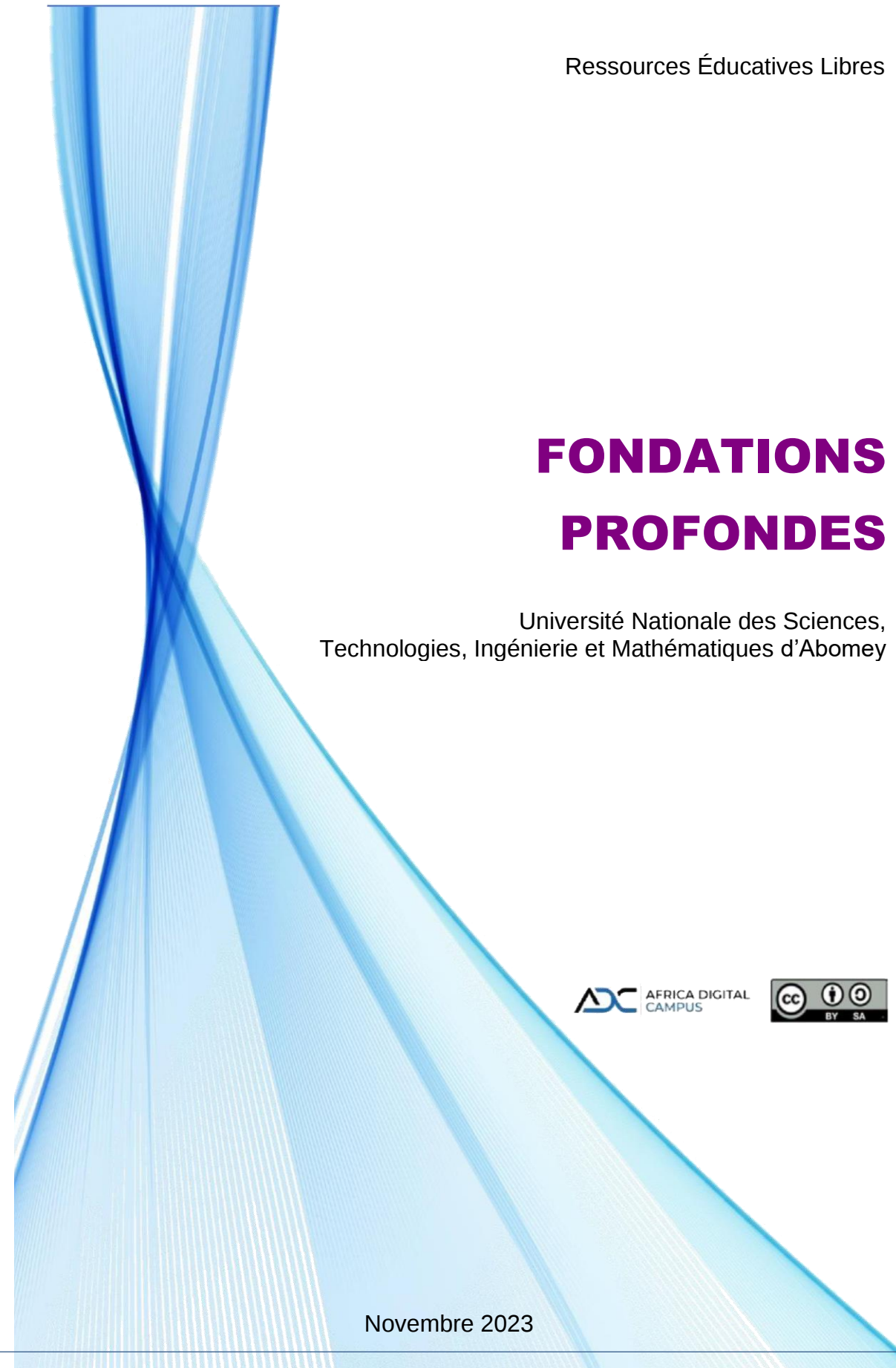




Ressources Éducatives Libres

FONDATIONS PROFONDES

Université Nationale des Sciences,
Technologies, Ingénierie et Mathématiques d'Abomey



Novembre 2023

1- Définitions

Les fondations profondes permettent de reporter les charges de la structure sur des couches de terrain de caractéristiques mécaniques suffisantes pour éviter la rupture du sol et limiter les déplacements à des valeurs très faibles. Elles traversent alors une ou plusieurs couches de qualité plus ou moins bonne pour s'ancrer dans un horizon présentant des caractéristiques mécaniques plus favorables.

Les 3 parties principales d'un pieu sont la **tête**, la **pointe**, et le **fût** compris entre la tête et la pointe.

Couche d'ancrage

On appelle couche d'ancrage la couche dans laquelle est arrêtée la base de la fondation. Dans ce qui suit, on admettra que la couche d'ancrage règne sur une profondeur d'au moins $4B$ sous la base de la fondation (B = diamètre du pieu ou largeur de la fondation).

Monocouche

Une fondation est fichée dans un monocouche lorsque le sol peut être considéré comme homogène depuis sa surface jusqu'à au moins $4B$ sous la base de la fondation.

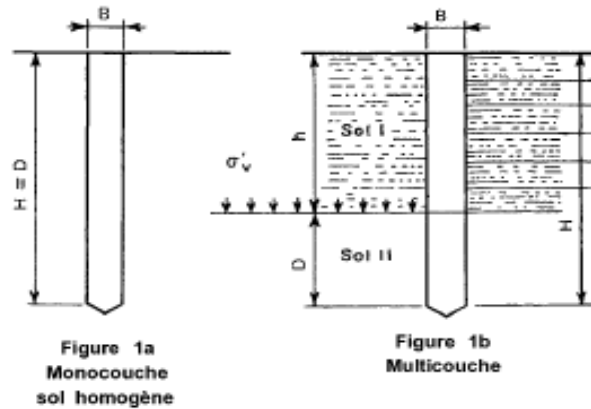
Multicouche

Une fondation est fichée dans un multicouche lorsqu'elle traverse au moins deux couches de caractéristiques mécaniques ou pondérales différentes.

Un multicouche « vrai » est un multicouche pour lequel la contrainte effective σ' due au poids des terres sus-jacentes au toit de la couche d'ancrage répond à la condition : $\sigma' > 0,1 \text{ MPa}$.

Longueur et ancrage

La longueur H de la fondation est la distance entre la surface du sol et la base de la fondation.



Si une fondation profonde est ancrée dans un multicouche, l'ancrage D est la distance entre le toit de la couche d'ancrage et la base de la fondation (figure 1b).

Si une fondation profonde est ancrée dans une monocouche, la longueur H est égale à l'ancrage D (figure 1a).

Fondation profonde

Une fondation est considérée comme profonde lorsque son élancement H/B est supérieur ou égal à 6 et sa longueur H au moins égale à 3 m : $\frac{H}{B} \geq 6$ et $H > 3\text{m}$.

Ancrage critique D_c

L'ancrage critique D_c est la valeur de l'ancrage D à partir de laquelle la contrainte à la rupture sous la pointe de la fondation profonde q_{pr} n'augmente plus et atteint une valeur constante appelée **contrainte limite de pointe q_{pl}** , qui est fonction de la nature et de la compacité du sol. L'ancrage critique est fonction de B et de q_{pl} .

Dans la plupart des cas courants, on peut adopter les valeurs ci-après de D_c :

- dans un monocouche : $D_c = 6B$ avec un minimum de 3 m. (si la fondation est profonde l'ancrage critique est atteint par définition);
- dans un multicouche vrai, l'ancrage critique sera pris égal à 3 B.

2- Différents types de fondations profondes

Le groupe des fondations profondes recouvre une grande variété de techniques. Elles peuvent être massives (puits) ou élancées (pieux).

2-1- Les puits

Les puits se placent en limite des deux domaines de fondations (superficielles et profondes). Ils se rattachent, par le principe de réalisation, aux fondations profondes, mais sont généralement calculés suivants les règles des fondations superficielles. Il s'agit de la technique la plus ancienne de fondation profondes.

2-2- Les pieux

Le pieu est la réponse technique à l'éloignement en profondeur du sol porteur. Au-delà d'une certaine profondeur, les moyens mécaniques classiques ne sont plus opérants et il faut utiliser du matériel spécifique. La mise en œuvre est plus facilement adaptable à des conditions variées, et, enfin, la technique de pieux autorise, dans de nombreux cas, l'utilisation des forces de frottement latéral.

Le principe est de concentrer les charges sur des points singuliers, où l'on met en œuvre des ouvrages spéciaux, et de les transmettre vers le sol d'assise de bonne résistance. Les murs chargés et les poteaux doivent reposer directement sur une infrastructure capable de transmettre les charges aux fondations.

3- Mode de fonctionnement des pieux

3-1- Différents types de pieux

La force portante des pieux peut provenir de deux domaines différents; le frottement sur le fût (ou frottement latéral) et l'appui direct par la section du pieu sur le fond du forage (terme de pointe).

On distingue :

- Les pieux flottant ou résistant par frottement latéral

Ces pieux transmettent la plus grande partie des charges par l'intermédiaire du frottement latéral

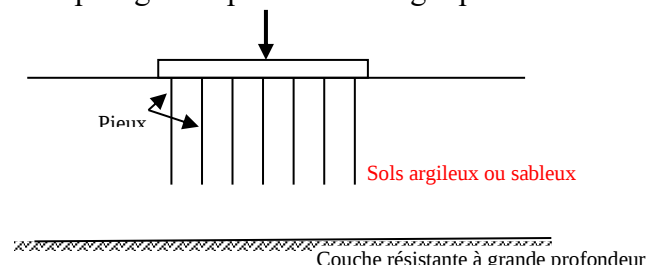


Figure 1 : Pieux flottants

- Les pieux chargés en pointe

Ils reportent pratiquement toutes les charges sur une couche résistante profonde.

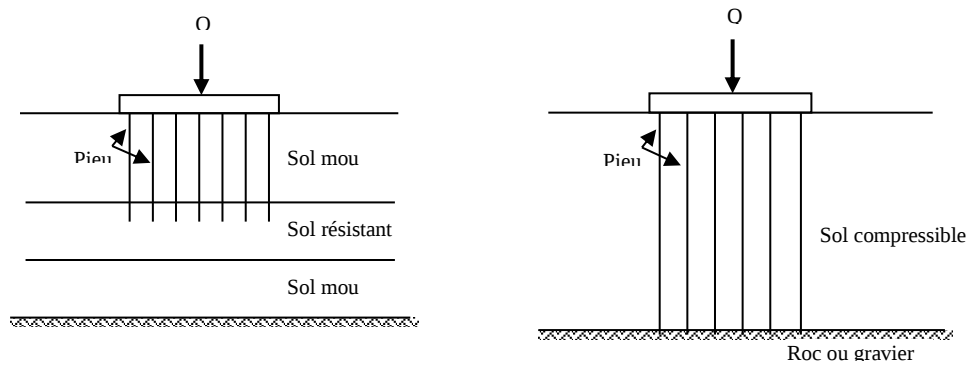


Figure 2 : Pieux chargés en pointe

- Les pieux résistant à la fois en pointe et par frottement latéral.

Ce sont des pieux flottant dans leur partie supérieure et transférant la charge restante à un sol plus résistant à leur base.

3-2- Définitions et mécanismes du frottement latéral positif et négatif

Pour qu'il y ait frottement latéral il faut qu'il y ait un déplacement relatif entre le pieu et le sol. Si le pieu se déplace plus vite que le sol, le sol par réaction en s'opposant au déplacement exercera un frottement latéral positif f_p , vers le haut (Figure 3). Si le sol se déplace plus vite que le pieu (terrain médiocre qui tasse (s_s) sous des surcharges appliquées au niveau de la surface du sol), le sol en tassant entraîne le pieu vers le bas et lui applique un frottement négatif f_n qui le surcharge (Figure 3). Pour un même pieu on pourra avoir la partie supérieure soumise à un frottement négatif et la partie inférieure à un frottement positif. Le point neutre est le point pour lequel le déplacement du pieu est égal à celui du sol.

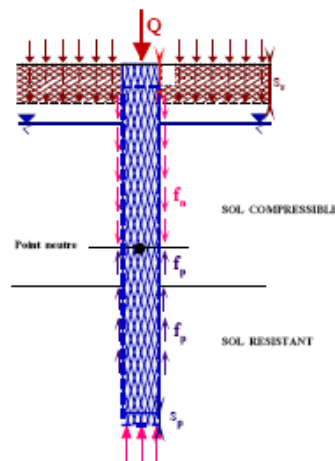


Figure 3 : Mécanismes du frottement latéral positif et négatif

Le frottement négatif se produit généralement dans des sols fins saturés qui se consolident avec le temps. Il augmente donc avec la consolidation du sol et devient maximal à long terme (généralement plusieurs années).

Le frottement négatif maximal dépend :

- de la compressibilité du sol,
- des surcharges de longue durée appliquées sur le terre-plein,
- de l'interface entre le sol et le pieu.

Il pourra être évalué conformément à la méthode de **COMBARIEU** préconisée par le fascicule 62-titre V.

3-3- Groupe de pieux

Lorsque plusieurs pieux sont proches les uns des autres, la capacité portante globale du groupe n'est pas la somme des forces portantes des pieux isolés. D'une façon générale, on définit un coefficient d'efficacité C_e tel que : $C_e = \frac{\text{Charge limitée du groupe}}{N \times \text{Charge limitée du pieu isolé}}$ avec N nombre de pieux.

On considère ici essentiellement les pieux flottants, c'est-à-dire ceux pour lesquels la résistance en frottement latéral est prépondérante vis-à-vis de la résistance en pointe. Pour les pieux travaillant surtout en pointe, l'effet de groupe ne semble pas jouer.

Sol cohérent

Le coefficient d'efficacité est donné par :

la formule de Converse-Labarre :
$$C_e = 1 - \frac{2 \arctan \frac{B}{L}}{\pi} \left(2 - \frac{1}{m} - \frac{1}{n} \right)$$

avec B diamètre d'un pieu ; L entre-axes ; m et n nombre de lignes et de colonnes du groupe
ou par la formule de Los Angeles :

$$C_e = 1 - \frac{B}{L} \cdot \frac{1}{\pi \cdot m \cdot n} \left[m(n-1) + n(m-1) + \sqrt{2}(m-1)(n-1) \right].$$

Sol sans cohésion

Pour une charge centrée appliquée sur un groupe de pieux verticaux, les différentes études qui ont été faites ont abouti aux conclusions suivantes, qui s'appliquent essentiellement pour des pieux refoulant le sol lors de la mise en place.

■ Sables lâches

Pour un petit groupe de pieux courts, on adopte un **coefficient d'efficacité variant de 1,5** pour un entre-axes de 2 diamètres, à **1** pour un entre-axes de 4 diamètres.

Pour un groupe important de pieux longs, le coefficient d'efficacité varie de 2 pour un entre-axes de 2 diamètres à 1 pour un entre-axes de 6 diamètres.

■ Sables denses

Le coefficient d'efficacité varie de 0,7 pour un entre-axes de 3 à 6 diamètres à 1 pour un entre-axes de l'ordre de 8 diamètres.

4- Initiation au calcul de fondations profondes : Calcul de la charge limite d'un pieu isolé sous charges axiales à partir des essais de laboratoire

La charge limite Q_{lim} du pieu est obtenue en additionnant la charge limite de pointe Q_p correspondant au poinçonnement du sol sous la base du pieu et la charge limite Q_s mobilisable par frottement entre le fût du pieu et le sol, c'est-à-dire : $Q_{lim} = Q_s + Q_p$

La résistance nominale qui sert au dimensionnement a pour expression $Q_{nom} = \frac{Q_s}{3} + \frac{Q_p}{2}$

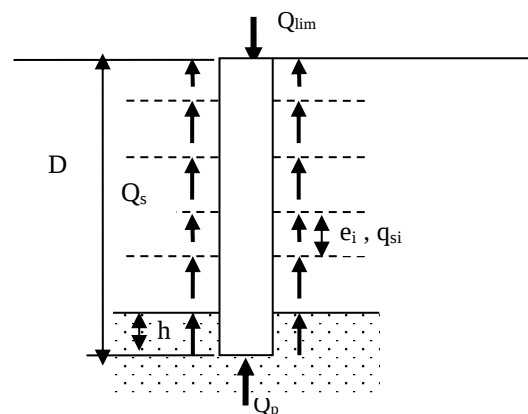


Figure 4: Comportement général d'un pieu isolé soumis à une charge verticale

4-1- Caractéristiques mécaniques du sol (Rappel)

Les méthodes de calcul à partir des essais de laboratoire reposent sur la détermination des caractéristiques de cisaillement :

- caractéristiques effectives : C' et φ' pour les sols pulvérulents
- caractéristiques apparentes :
 - C_{uu} (associé à $\varphi_{uu} = 0$) pour les argiles saturées
 - C_u et φ_u pour les sols intermédiaires.

N.B. : Ces caractéristiques sont cependant parfois difficilement mesurables et les facteurs de portance nécessaires à la détermination de la résistance de pointe varient dans de très fortes proportions avec l'angle de frottement interne.

4-2- Résistance de pointe

La charge de pointe est donnée par la formule : $Q_p = S.q_p$

Lorsque l'ancrage D d'un pieu est supérieur ou égal à D_c , la contrainte limite de pointe q_{pl} est calculée de la manière suivante :

Cas des sols pulvérulents et sols cohérents

$$q_p = a N_{q_{\max}} + \lambda C_c N_{c_{\max}} \quad (1)$$

a = terme constant ayant les dimensions d'une pression : a = 0,05 MPa

Cas des sols purement cohérents ($\phi_{uu} = 0$)

$$q_p = 7 \lambda C_{uu} \quad (2)$$

λ = coefficient de forme

$\lambda = 1,3$ pour les pieux à section circulaire ou carrée

$\lambda = 1 + 0,3 (B/L)$ pour les barrettes et parois de forme allongée (L = plus grande dimension de la section horizontale de la fondation)

C et C_{uu} = cohésion du sol de la couche d'ancrage

$N_{q_{\max}}$ et $N_{c_{\max}}$ = facteurs de force portante sans dimension pour fondation profonde, fonctions de l'angle de frottement interne.

Le tableau 1 ci-après reproduit les valeurs proposées par Caquot et Kérisel :

ϕ (°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
$N_{q_{\max}}$	1	1,8	3,4	6,5	13	26	57	134	355
$N_{c_{\max}}$	7	9,6	13,8	20,6	32	54	97	190	421
Ces valeurs ne sont valables que si $D_c < D$									

Tableau 1 : Valeurs de $N_{q_{\max}}$ et $N_{c_{\max}}$ (Caquot et Kérisel)

Lorsque $D < D_c$, la résistance de pointe est déterminée par la formule :

$$q_{pr} = a \frac{D}{D_c} N_{q_{\max}} + \lambda C \left[N_{c_{\min}} + \frac{D}{D_c} (N_{c_{\max}} - N_{c_{\min}}) \right] \quad (3)$$

avec $N_{c_{\min}}$ = facteur de cohésion minimal.

ϕ en degré	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$N_{c_{\min}}$	5,14	6,5	8,5	11	15	21	30	46	75	135

Tableau 2 : Valeurs de $N_{c_{\min}}$

4-3 Frottement latéral

Le frottement latéral total mobilisable à la rupture est donné par la formule :

$$Q_s = p \cdot \sum_1^n h_i q_{si} \quad (4)$$

avec : p = périmètre du pieu

h_i = épaisseur de la couche i ($h_1 = D$ pour la couche d'ancrage)

q_{si} = frottement latéral unitaire de la couche i

n = nombre de couches traversées ou atteintes par le pieu.

Toute la question revient donc à estimer le frottement latéral unitaire dans chacune de ces couches.

Sols purement cohérents

Le frottement latéral unitaire à la rupture q_s est, pour les sols purement cohérents, évalué à partir de la cohésion non drainée C_{uu} par la formule : $q_s = \beta C_{uu}$ (5)

avec β = coefficient ≤ 1 ; β dépend de la cohésion, du type de pieu et du délai de repos.

Le tableau 3 ci-après donne quelques valeurs maximales de β pour certains types de pieux.

Type de pieu	Nature du fût	β
Puits et pieux forés de gros diamètre	Fût en béton	0,6
Pieux forés	Fût en béton	0,7
	Fût métal	0,5
Pieux battus	Fût en béton	0,7
	Fût métal	0,5
Pieux injectés	Faible pression	1
	Forte pression	1,5

Tableau 3 : Valeurs maximales du coefficient β pour quelques pieux types

Les valeurs données par la formule (5) doivent être bornées supérieurement par les limites fixées par le tableau 4.

Sols pulvérulents : En l'absence de résultats expérimentaux sur le site même, il y a lieu de retenir pour les calculs préliminaires les valeurs maximales de q_s données dans les tableaux 4 ci-après.

Sols intermédiaires (sols cohérents $C \neq 0$ et $\varphi \neq 0$)

Le sol doit être assimilé soit à un sol pulvérulent (tableau 4), soit à un sol purement cohérent (tableau 3), selon son caractère prédominant. En effet, il est déconseillé d'additionner le frottement dû à la cohésion à celui dû à l'angle de frottement interne, les résultats risquant d'être trop optimistes.

Nature du sol	Valeurs maximales* de q_s (kPa)					
	Pieu foré		Pieu battu		Pieu injecté	
	Fût béton	Tubé	Fût béton	Fût métal	Faible pression	Haute pression
Argile molle** et vase	15	15	15	15	35	
Argile moyennement consistante	(80)*** 35	(80) 35	(80) 35	35	80	≥ 120
Argile raide à très raide	(80) 35	(80) 35	(80) 35	35	80	≥ 200
Limon ou sable lâche	35	35	35	35	80	
Sable moyennement compact	(120) 80	(80) 35	(120) 80	80	120	≥ 200
Sable compact à très compact	(150) 120	(120) 80	(150) 120	120	150	≥ 200
Craie molle	35	35	35	35	80	
Craie altérée fragmentée	(150) 120	(120) 80	(150) 120	120	150	≥ 200

* Pour les pieux forés $\Phi \geq 1,50\text{m}$, les puits coulés à pleine fouille, il y a lieu de faire un abattement de 15% sur les valeurs en l'absence de résultats expérimentaux.

**Il faut être extrêmement prudent pour la prise en compte du frottement latéral des argiles molles et des vases. En effet, le moindre tassement du sol, même sous son poids propre, peut entraîner une inversion du frottement qui se transforme en frottement négatif.

*** Les valeurs entre parenthèses correspondent, pour les pieux forés, à une exécution soignée du pieu et une technologie de mise en œuvre susceptible de remanier au minimum le sol au contact du fût. Pour les pieux battus par contre, elles correspondent à un resserrement du sol sur le pieu après battage.

Tableau 4 : Valeurs maximales du frottement latéral q_s