

Chapitre 8

FONDATEMENTS PROFONDES

8.1 - INTRODUCTION

On appelle ainsi des fondations telles que la profondeur d'encastrement (D) est supérieure à 5 ou 6 fois la largeur de la fondation (B). En fonction de leur mode de réalisation, sont distingués plusieurs types de pieux, qui sont différents également dans leur comportement :

- les pieux battus ou vibro-foncés sont des pieux préfabriqués en béton armé ou en acier ; ils sont mis en place par battage avec un mouton ou par vibrofonçage, ce qui remanie profondément le sol environnant ;
- les pieux moulés sont réalisés par forage préalable d'un trou dans lequel on coule du béton ; le sol environnant est donc très peu remanié ;
- entre ces deux types extrêmes, il existe toute une série de réalisations intermédiaires.

Le comportement d'un pieu isolé est complexe dans la mesure où il peut être soumis à différents modes de sollicitations :

- chargement axial ;
- traction ;
- sollicitations transversales.

De plus, l'interaction entre le sol et le pieu est à prendre en compte aussi bien sous la pointe que le long du fût. Enfin, pour le calcul d'une fondation sur pieux, il faut tenir compte de l'interaction d'un pieu avec les pieux voisins. Les règles complètes de dimensionnement des fondations sur pieux sont données dans le fascicule 62, titre V. Nous nous limiterons ci-après au cas d'un pieu isolé soumis à un chargement axial.

8.2 - CAS D'UN PIEU ISOLÉ SOUMIS A UN CHARGEMENT AXIAL

La loi de comportement d'un pieu isolé soumis à un chargement axial définit deux paramètres :

- la charge de fluage Q_c ;¹
- la charge limite Q_u .

Q_u se décompose en un terme représentant l'effort mobilisable sous la pointe du pieu (Q_{pu}) et un terme représentant l'effort mobilisable par frottement latéral sur le fût du pieu (Q_{su}), et Q_c s'en déduit par des relations expérimentales :

$$Q_u = Q_{pu} + Q_{su}$$

$$Q_c = 0,5. Q_{pu} + 0,7. Q_{su} \text{ (pieux forés)}$$

$$Q_c = 0,7. Q_{pu} + 0,7. Q_{su} \text{ (pieux battus).}$$

$Q_{pu} = A. q_u$ où A est la section du pieu et q_u est la contrainte de rupture sous la pointe, calculée ci-après au § 8.2.1.

¹ Convention : Q désigne une force et q la contrainte correspondante.

$Q_{su} = P \int_0^D q_s(z).dz$ où P est le périmètre du pieu et q_s est la contrainte limite de frottement latéral, dont le calcul est abordé au § 8.2.2.

8.2.1 - Calcul de la contrainte de rupture sous la pointe q_u

8.2.1.1 - A partir de l'essai pressiométrique (cf. paragraphe 2.9.3)

$$q_u = k_p \cdot P_{le}^*$$

De même que pour les fondations superficielles (cf. paragraphe 7.2.3.1), P_{le}^* est la pression limite nette équivalente (ici, la pression limite moyenne dans la zone située autour de la base du pieu).

k_p est appelé facteur de portance lié à l'essai pressiométrique. Sa valeur est fixée en fonction de la nature du sol de fondation et du mode de mise en œuvre du pieu (tableau 11 ci-après).

Nature des terrains		Éléments mis en œuvre sans refoulement du sol	Éléments mis en œuvre 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 ALTÉRÉES (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. Les classifications A, B, C sont celles du fascicule 62. Leur définition est donnée dans le tableau 8.

Tableau 11 - valeur du facteur de portance k_p (d'après fascicule 62, titre V)

8.2.1.2 - A partir de l'essai au pénétromètre statique

$$q_u = k_c \cdot q_{le}$$

q_{le} est la résistance de pointe lissée équivalente (moyenne des valeurs écrêtées de q_c dans la zone autour de la pointe du pieu).

k_c est un facteur de portance pour l'essai pénétrométrique ; il dépend de la nature du sol de fondation et du mode de mise en œuvre du pieu (tableau 12 ci-après).

Nature des terrains		Eléments mis en œuvre sans refoulement du sol	Eléments mis en œuvre avec refoulement du sol
ARGILES, LIMONS	A	0,40	0,55
	B		
	C		
SABLES, GRAVES	A	0,15	0,50
	B		
	C		
CRAIES	A	0,20	0,30
	B	0,30	0,45

Les classifications A, B, C sont celles du fascicule 62. Leur définition est donnée dans le tableau 8.

Tableau 12 - valeur du facteur de portance k_c (d'après fascicule 62, titre V)

8.2.2 - Calcul de l'effort limite de frottement latéral q_s

8.2.2.1 - A partir de l'essai pressiométrique

$q_s(z)$ est fonction de la pression limite nette, du type de pieu et de la nature des sols traversés par le pieu (voir fascicule 62, p. 85-86) ; dans la plupart des cas, il ne dépasse pas 150 kPa.

8.2.2.2 - A partir de l'essai au pénétromètre statique

$q_s(z)$ est fonction de la résistance de pointe, du type de pieu et de la nature des sols (voir fascicule 62, p. 89) ; dans le meilleur des cas, il ne dépasse pas 120 kPa.

8.3 - FROTTEMENT NEGATIF

Lorsqu'un pieu traverse une couche de sol compressible et a sa pointe fondée dans un sol résistant, le tassement, lié à une surcharge sur la couche compressible ou à un rabattement de nappe, provoque un frottement négatif F_n sur le fût du pieu, qui accroît l'effort sur la pointe.

$F_n = P \int_0^D K.tan\delta.\sigma_v(z).dz$, où $\sigma_v(z)$ est la contrainte effective verticale à la cote z et P le périmètre du pieu.

$K.tan\delta$ dépend de la nature du sol traversé par le pieu et du mode de mise en œuvre du pieu. Voir tableau 13 ci-après.

		Pieux forés tubés	Pieux forés	Pieux battus
TOURBES	sols organiques	0,10	0,15	0,20
ARGILES LIMONS	Mous	0,10	0,15	0,20
	fermes à durs	0,15	0,20	0,30
SABLES Et GRAVES	très lâches	0,35		
	Lâches	0,45		
	Autres	1,00		

Tableau 13 - valeur du coefficient $K.tan\delta$ (d'après fascicule 62, titre V)

Le frottement négatif peut rapidement devenir très pénalisant vis-à-vis de la charge limite en pointe. On cherche à le limiter par exemple en préchargeant le sol de fondation afin d'obtenir la majeure partie du tassement avant réalisation des pieux ou en minimisant le terme $K.tan\delta$ par un choix judicieux du type de pieu.

8.4 - JUSTIFICATION DE LA STABILITÉ AU POINÇONNEMENT D'UN PIEU ISOLÉ ²

Les justifications requises consistent à vérifier que la charge axiale de calcul en tête du pieu, majorée le cas échéant de la force de frottement négatif déterminée en 8.3, reste inférieure à une valeur maximale notée Q_{max} .

Pour les états limites ultimes (rupture) :

- $Q_{max} = Q_u / 1,4$ pour les combinaisons fondamentales ;
- $Q_{max} = Q_u / 1,2$ pour les combinaisons accidentelles.

Pour les états limites de service (limitation des déformations) :

- $Q_{max} = Q_c / 1,4$ pour les combinaisons fréquentes.

Les charges limites (Q_u) et de fluage (Q_c) ont été définies au paragraphe 8.2.

² Remarque : pour le cas de pieux résistant en traction ou pour dimensionner des groupes de pieux, se reporter au fascicule 62, Titre V.

BIBLIOGRAPHIE PRATIQUE SUCCINCTE

Pour la mécanique des sols

COSTET J. et SANGLERAT G. - Cours pratique de mécanique des sols DUNOD éditeur.

PELTIER R., 1969 - Manuel du Laboratoire Routier – LCPC – Dunod éditeur.

SCHLOSSER F., 1989 - Eléments de mécanique des sols - Presses de l'ENPC, 280 p.

HEAD, 1992 - Manuel of Soil Laboratory Testing – Vol. 1, 2 et 3 ; Second Edition ; Pentech Press.

Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports, 1993 - Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil (CCTG applicables aux marchés publics de travaux), Fascicule n° 62 - Titre V, imprimerie des journaux officiels, 182 p.

CASSAN M., 1994 - Aide-mémoire d'hydraulique souterraine, Presses des Ponts et Chaussées.

BIAREZ J. et al., 1995 - Du matériau discontinu granulaire au milieu continu fictif. Localisation des grandes déformations. Cinématique de suivi des ouvrages. Disques compacts et Vidéo cassette VHS. Ecole Centrale de Paris.

Collectif, 1995 - Fondations et soutènements. Techniques de l'ingénieur, Paris.

HABIB P., 1997 - Génie géotechnique - Applications de la mécanique des sols et des roches, ELLIPSES, 222 p.

Pour les barrages neufs

BUREAU of RECLAMATION, 1987 - Design of small dams, third edition - U.S. Department of the Interior, Denver Colorado, 860 p.

Groupe de travail du Ministère de l'Agriculture, 1989 - Techniques des barrages en aménagement rural, 2^{ème} édition, 325 p. ;

DEGOUTTE G. coordinateur, 1997 - Recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi des petits barrages, Comité Français des Grands Barrages, ENGREF-Cemagref coéditeurs, 175 p. Version bilingue français anglais, CD Rom, ENGREF-Cemagref coéditeurs en 2002.

Pour les barrages en service

DEGOUTTE G. coordinateur, 1992 - Guide pour le diagnostic rapide des barrages anciens, Cemagref, 99 p.

DEGOUTTE G., ROYET P., 2003 - Sécurité des barrages en service, édition ENGREF, Ministère de l'écologie et du développement durable, 323 p.

ROYET P., 1994 - La surveillance et l'entretien des petits barrages - Guide pratique, Cemagref, Ministère de l'environnement, 88 p.

Pour les digues

LINO M., MERIAUX P., ROYET P., 2000 – Méthodologie de diagnostic des digues appliquée aux levées de la Loire moyenne, Cemagref éditions, 224 p.

MERIAUX P., ROYET P., FOLTON C., 2000 – Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations, Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires, Cemagref éditions, 199 p.