

Groupe de Travail "Fondations d'éoliennes"

Fondation sur pieux et fondation mixte

Journée du 20 octobre 2009

Sommaire « Fondation sur pieux et fondation mixte »



- 1/. Fondation sur pieux
 - 11/. Description
 - 12/. Données géotechniques
 - 13/. Justifications
 - 14/. Dispositions constructives
 - 15/. Vérifications et contrôle
- 2/. Fondation mixte
 - 21/. Description
 - 22/. Principes de fonctionnement
 - 23/. Données géotechniques
 - 24/. Justifications
 - 25/. Dispositions constructives
 - 26/. Vérifications et contrôle

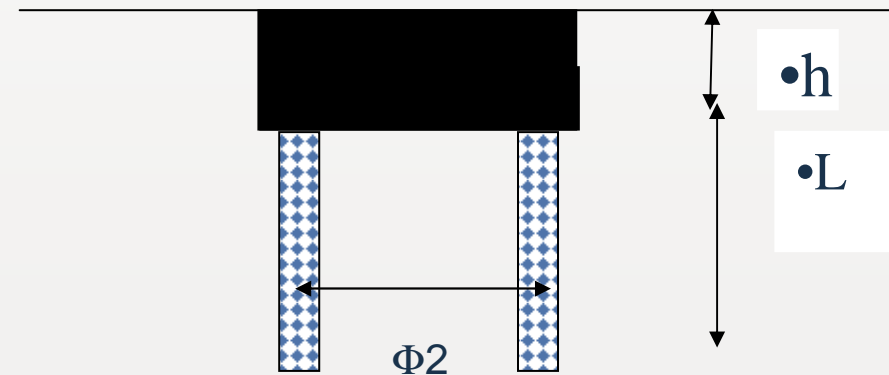
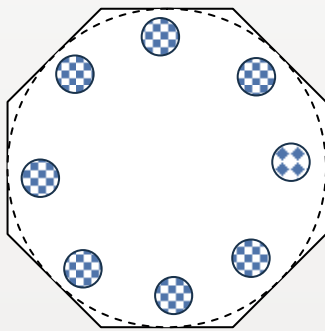
« Fondation sur pieux »



- 1/. Fondations sur pieux
 - 11/. Domaine d'application
 - 12/. Description
 - 13/. Données géotechniques
 - 14/. Justifications
 - 141/. Portance
 - 142/. Tassement et allongement
 - 143/. Reprise des efforts horizontaux
 - 144/. Rotation
 - 145/. Conclusions
 - 15/. Dispositions constructives
 - 16/. Vérifications et contrôle

« Fondation sur pieux - Description »

- 1/. On assimile le massif de forme polygonale à un massif circulaire de même section, de diamètre Φ , dont la base est à une profondeur h
- 2/. Il repose sur n pieux de diamètre Φ_1 et de longueur L , situés sur un cercle de diamètre Φ_2 ,
- 3/. En principe, il n'y a qu'une « ligne » de pieux



« Fondation sur pieux - Domaine d'application »

➤ Domaine n°1 : $E_{yst} < 15 \text{ MPa}$

Types de sols déduits selon le fascicule 62 Titre V		E_{mEq}	q_{ceq}	$E_{yst} \text{ à } 10^{-2}$	$E_y \text{ à } 10^{-4}$ (Valeur min de calcul à retenir)	Domaines
Argiles Limons	A	< 10	< 3	< 15	—	1
Sables Graves	A	< 10	< 10	< 15	—	1
Craies	A et B ⁻	< 8	< 5	< 15	—	1
Marnes	A ⁻	< 8	< 5	< 15	—	1

Tableau n° 10 : Synthèse des domaines d'études pour un sol équivalent sur une épaisseur de $1,5 \Phi$, valeurs en MPa

« Fondation sur pieux - Domaine d'application »



➤ Domaine n°1 : $E_{yst} < 15 \text{ MPa}$

- ▶ Dans ce domaine, a priori, il n'est pas possible d'envisager des fondations superficielles sans aménagement particulier, par exemple
 - si la couche directement au contact du massif se trouve dans le domaine n°1, les caractéristiques de sol de cette couche ne permettent pas la réalisation de fondations superficielles compatibles avec les critères de déformation et de rotation usuels en fonction de géométries prédéfinies, critères et géométries imposés par les constructeurs dans leur cahier des charges particulier ;
 - on s'orientera alors vers une adaptation du système de fondation du type : substitution, renforcement de sol ou **fondations profondes**,

« Fondation sur pieux - Domaine d'application »

➤ Domaine n°2 : $15 \text{ MPa} < E_{yst} < 50 \text{ MPa}$

Types de sols déduits selon le fascicule 62 Titre V		E_{mEq}	q_{ceq}	E_{yst} à 10^{-2}	E_y à 10^{-4} (Valeur min de calcul à retenir)	Domaines
Argile/limons	B et C	≥ 10 et ≤ 30	≥ 3 et ≤ 10	≥ 15 et ≤ 50	(****)	2
Sables/graves	B	≥ 10 et ≤ 25	≥ 10 et ≤ 20	≥ 15 et ≤ 50	(****)	2 (**)
craie	B	≥ 8 et ≤ 30	≥ 5 et ≤ 20	≥ 15 et ≤ 50	(****)	2
marnes	A et A	≥ 8 et ≤ 25	≥ 5 et ≤ 15	≥ 15 et ≤ 50	(****)	2
Roches	A	≤ 25	-	≤ 50	(****)	2

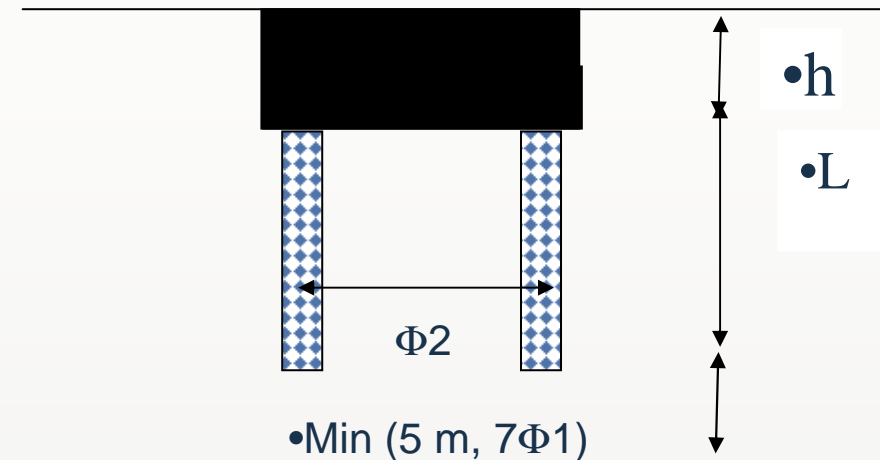
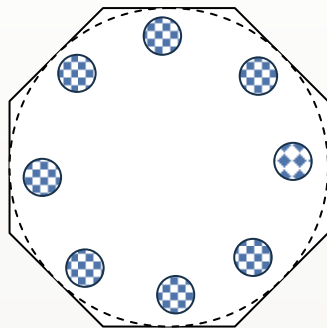
(**) Plus étude de liquéfaction sous sollicitations cycliques à réaliser si D10 (diamètre du passant à 10%) < 2 mm [Norme NF P 06-013-PS 92 Article 9.122]

« Fondation sur pieux - Domaine d'application »



- Domaine n°2 : $15 \text{ MPa} < E_{yst} < 50 \text{ MPa}$
- ▶ La seule définition du module de déformation « statique habituel » E_{yst} ne permet pas de retenir en l'état un système de fondation superficielle.
 - Toutefois, un principe de fondation superficielle n'est pas exclu.
 - pour cela, la reconnaissance de sol à partir des essais in situ traditionnels doit être complétée par une campagne plus détaillée (cf. § 4.6.2) permettant de mesurer les paramètres à très faible déformation du sol et ainsi d'estimer la courbe complète E/E_{max} et/ou G/G_{max} en fonction de ε et de γ ;
 - sinon il faut s'orienter vers un renforcement de sol. ou une solution sur pieux

« Fondation sur pieux - Données géotechniques »



- Conformément aux usages pour justifier la portance et pour calculer les tassements des pieux de diamètre Φ_1 , et la rotation de ce massif, il faut reconnaître au droit de l'ouvrage le sol sur une profondeur égale à $h + L + \max(5 \text{ m}, 7 \Phi_1)$

« Fondation sur pieux - Données géotechniques »



- Le géotechnicien doit donner une coupe type, avec par couche :
 - la nature des terrains ;
 - la pression limite moyenne ou la valeur au pénétromètre statique caractéristique permettant de calculer le frottement ;
 - une valeur maximum de la pression limite équivalente (p_{le}^*) ou de la valeur au pénétromètre statique (q_{ce}) permettant de calculer la pointe ;
 - la valeur moyenne du module pressiométrique pour calculer la mobilisation du frottement ;
 - la valeur du coefficient rhéologique α , pour calculer les raideurs horizontales du sol ;
 - la valeur du module pressiométrique moyen sous la pointe pour calculer la mobilisation de la pointe .

« Fondation sur pieux / Justifications »



- 14/. Justifications
 - 141/. Portance
 - 142/. Tassement et allongement
 - 143/. Reprise des efforts horizontaux
 - 144/. Rotation
 - 145/. Conclusions

« Fondation sur pieux / Justifications portance »



- Les calculs de portance sont menés conformément aux règles en vigueur.
- Il n'est pas admis de traction dans les fondations profondes sous ELS quasi permanent (obtenu à partir du cas de charge DLC_{QP}).

« Fondation sur pieux / Justifications tassement »



- Les calculs de tassement sont menés conformément à la méthode des courbes t-z (Frank/Zhao, cf. fascicule 62 Titre V) dans le domaine de déformation comprise du massif entre 10^{-2} et 10^{-3}
- On ne s'est pas prononcé sur les méthodes de calculs dans le domaine de déformation entre 10^{-4} et 10^{-5}

- Pour le calcul de l'allongement, on ne retient comme produit ES du pieu que celui des aciers tant que la contrainte moyenne de traction du béton sur la section tendue du pieu est supérieure à f_{ct} / γ_s . (en général valeur proche de 1,5 MPa)
- Néanmoins pour le calcul de la rotation du massif, pour se prémunir de l'effet des cycles traction/compression, le frottement ultime sera divisé par un facteur supplémentaire de sécurité de 1,5 en traction et 1,25 en compression.

« Fondation sur pieux / Efforts horizontaux »



- Les calculs vis-à-vis des efforts horizontaux sont menés conformément aux règles en vigueur (annexe E du fascicule 62) dans le domaine de déformation comprise du massif entre 10^{-2} et 10^{-3}
- Néanmoins, pour tenir compte des cycles et des variations de direction des efforts, les valeurs de module pressiométrique tout comme les paliers définis dans cette annexe sont divisés par un facteur de sécurité supplémentaire de 2 sur une hauteur de 3 diamètres Φ_1 .

« Fondation sur pieux / Efforts horizontaux »



- *Commentaire : Lorsque le massif n'est pas coulé en pleine fouille, la butée du sol sur le massif est négligée et les efforts horizontaux sous la sous-face de la semelle sont égaux à ceux appliqués en tête de semelle.*
 - *néanmoins, dans le cas où le massif est coulé en pleine fouille*
 - *et sous réserve de la compatibilité des déformations basées sur la raideur en butée de la semelle d'une part et sur la raideur horizontale des pieux d'autre part,*
 - *on pourra faire participer la butée de la semelle jusqu'à une valeur validée par le géotechnicien, qu'on limitera cependant à 30% de la valeur maximale de la poussée passive.*

« Fondation sur pieux / Rotation »



- La rotation sera calculée en fonction de la valeur du moment, des raideurs verticales et horizontales des pieux.
- Le moment M se traduit en traction compression dans les pieux en fonction de l/v de l'ensemble de ces pieux
- Il ne faut pas oublier de prendre en compte les raideurs différentes selon que le pieu est en traction ou en compression
- Il ne faut pas oublier de prendre en compte l'interaction horizontale.
 - En effet, si les pieux sont encastrés, la rotation de l'ensemble induit des moments M_i en tête de pieux
 - Le moment total est donc réduit de M à $M - n * M_i$

« Fondation sur pieux / Ferrailage »



- A l'ELU, le dimensionnement géotechnique des pieux en traction sera calculé sans prendre en compte cette mobilisation des M_i .
- En revanche, pour le ferrailage du pieu en flexion composée, et pour le ferrailage de la semelle, on prendra en compte l'effet de la réaction horizontale et donc la valeur des M_i .

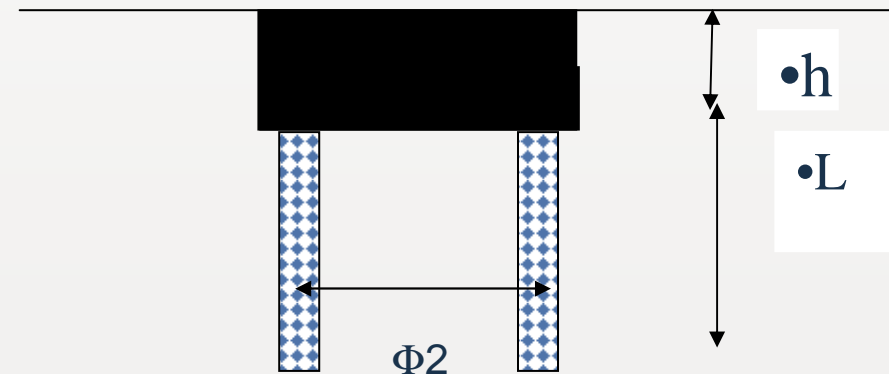
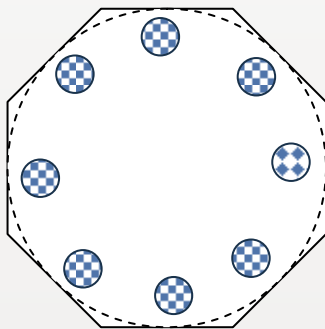
Sommaire « fondation mixte »



- 2/. Fondation Mixte
 - 21/. Domaine d'application
 - 22/. Description
 - 23/. Principes de fonctionnement
 - 24/. Données géotechniques
 - 25/. Justifications
 - 251/. Portance
 - 252/. Reprise des efforts horizontaux
 - 253/. Tassement et rotation
 - 254/. Conclusions
 - 26/. Dispositions constructives
 - 27/. Vérifications et contrôle

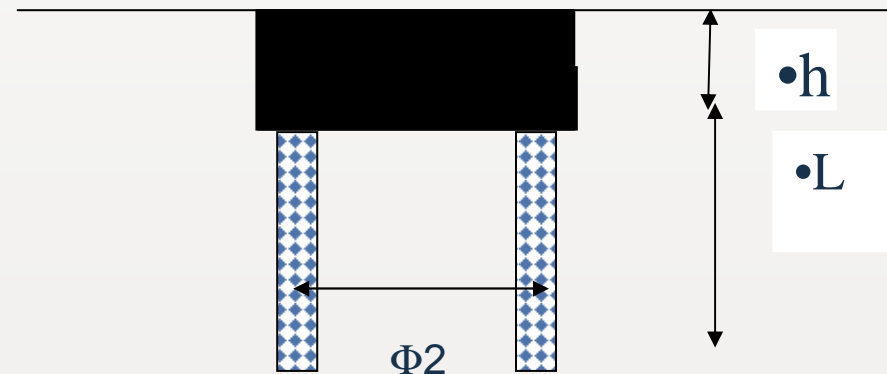
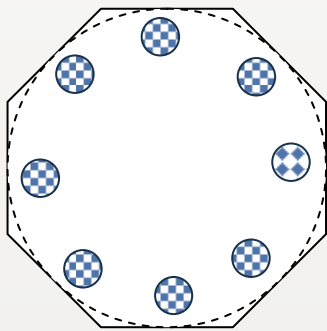
« Fondation mixte - Description »

- 1/. On assimile le massif de forme polygonale à un massif circulaire de même section, de diamètre Φ , dont la base est à une profondeur h
- 2/. Il repose sur n pieux de diamètre Φ_1 et de longueur L , situés sur un cercle de diamètre Φ_2 ,
- 3/. En principe, il n'y a qu'une « ligne » de pieux



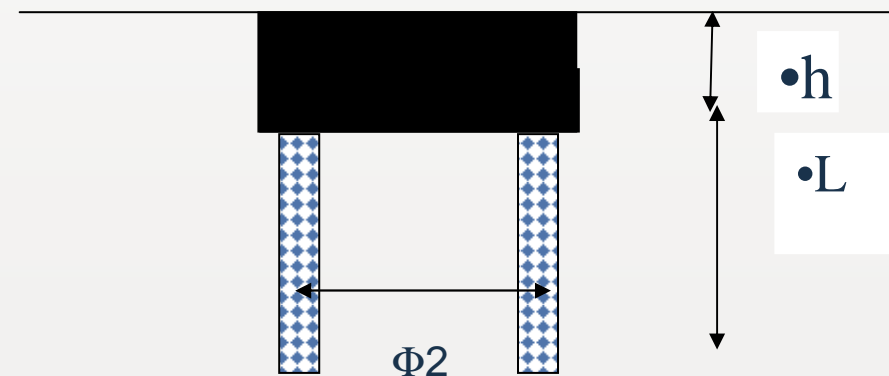
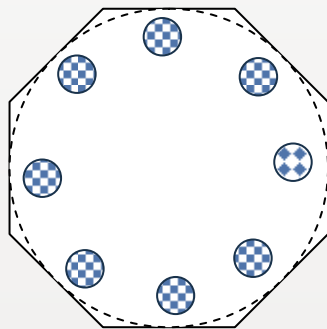
« Fondation mixte - Principe de fonctionnement »

- 1/. On se réfère à l'article d'O Combarieu
- 2/. On fait participer simultanément
 - n pieux de diamètre Φ_1 et de longueur L, situés sur un cercle de diamètre Φ_2 ,
 - le sol directement sous le massif



« Fondation mixte - Principe de fonctionnement »

- Dans le cas d'une solution « Fondations sur pieux », lorsque les critères de rotation du constructeur ne sont pas respectés, la prise en compte de la mobilisation du sol sous la semelle peut permettre de satisfaire ces critères.
- La portance globale est améliorée par la mobilisation du sol sous la semelle, et la rotation est calculée en prenant en compte cette mobilisation.



« Fondation mixte - Principe de fonctionnement »



- Cette solution s'inscrit en continuité entre
 - la solution « embase poids § 5.2 »,
 - la solution « embase poids sur inclusion rigides § 5.4 »,
 - et la solution « fondations profondes § 5.5 ».
- Elle se différencie fondamentalement de la solution « embase poids sur inclusions rigides » par l'absence de matelas,
 - mais fonctionne de la même façon par la mobilisation combinée du sol sous la semelle et de celle des pieux.

Φ2

« Fondation mixte - Principe de fonctionnement »



- ▶ Conformément à l'article de O. Combarieu, on peut mobiliser ainsi à la fois les pieux et le sol sous la semelle :
 - d'une part, en mobilisant les pieux en compression, pour augmenter la portance, la raideur verticale en compression et augmenter ainsi K_v et K_Φ ;
 - d'autre part, en mobilisant les pieux en traction si ils sont ancrés dans le massif pour reprendre cette traction, diminuer le soulèvement maximum, diminuer la rotation et donc augmenter K_Φ ;
 - et enfin, en mobilisant le sol sous la semelle en fonction de la raideur K_v du sol et en fonction du déplacement d'ensemble.

Φ_2

« Fondation mixte - Domaine d'application »

➤ Domaine n°1 : $E_{yst} < 15 \text{ MPa}$

Types de sols déduits selon le fascicule 62 Titre V		E_{mEq}	q_{ceq}	$E_{yst} \text{ à } 10^{-2}$	$E_y \text{ à } 10^{-4}$ (Valeur min de calcul à retenir)	Domaines
Argiles Limos	A	< 10	< 3	< 15	—	1
Sables Graves	A	< 10	< 10	< 15	—	1
Craies	A et B ⁻	< 8	< 5	< 15	—	1
Marnes	A ⁻	< 8	< 5	< 15	—	1

Tableau n° 10 : Synthèse des domaines d'études pour un sol équivalent sur une épaisseur de $1,5 \Phi$, valeurs en MPa

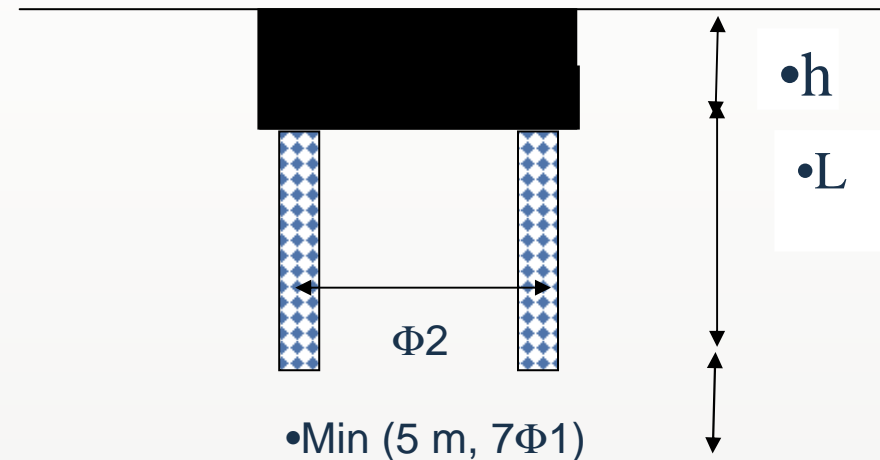
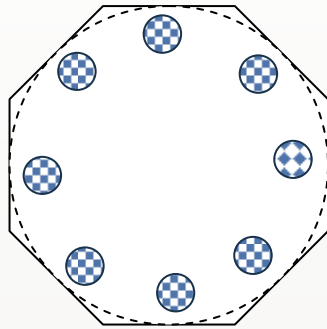
« Fondation mixte - Domaine d'application »

➤ Domaine n°2 : $15 \text{ MPa} < E_{yst} < 50 \text{ MPa}$

Types de sols déduits selon le fascicule 62 Titre V		E_{mEq}	q_{ceq}	E_{yst} à 10^{-2}	E_y à 10^{-4} (Valeur min de calcul à retenir)	Domaines
Argile/limons	B et C	≥ 10 et ≤ 30	≥ 3 et ≤ 10	≥ 15 et ≤ 50	(****)	2
Sables/graves	B	≥ 10 et ≤ 25	≥ 10 et ≤ 20	≥ 15 et ≤ 50	(****)	2 (**)
craie	B	≥ 8 et ≤ 30	≥ 5 et ≤ 20	≥ 15 et ≤ 50	(****)	2
marnes	A et A	≥ 8 et ≤ 25	≥ 5 et ≤ 15	≥ 15 et ≤ 50	(****)	2
Roches	A	≤ 25	-	≤ 50	(****)	2

(**) Plus étude de liquéfaction sous sollicitations cycliques à réaliser si D10 (diamètre du passant à 10%) < 2 mm [Norme NF P 06-013-PS 92 Article 9.122]

« Fondation mixtes - données géotechniques »



► Pour justifier la portance et pour calculer les tassements et la rotation de cette fondation mixte, les données géotechniques doivent combiner :

- les exigences du chapitre 5.1.2 sur les embases poids d'une part, à savoir une connaissance du sol sur une hauteur égale à $1,5 \Phi$ pour le calcul de la portance et sur une hauteur égale à $h + 8 \Phi$ pour le calcul des déformations ;
- les exigences propres au calcul de la portance des pieux d'autre part, à savoir une connaissance du sol sur une hauteur égale à $L + \max(5 \text{ m}, 7 \Phi_1)$

« Fondation mixte - données géotechniques »



- ▶ Le géotechnicien doit donner une coupe type, avec par couche sensiblement homogène, l'ensemble des paramètres de sol listés au §4.6.1 et 4.6.2
- ▶ Le géotechnicien doit aussi donner la valeur de p_{le}^* et de q_{ce} sous la semelle, la raideur K_{vs} ($= q/w$ statique) du sol à CT et à LT sous cette semelle et les valeurs de G à prendre en compte pour le calcul en très petite déformation.

« Fondation mixte / Portance globale »

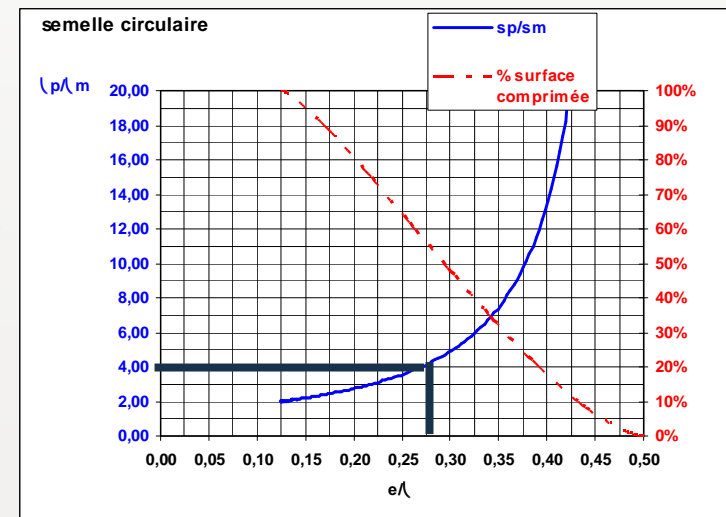
➤ On calcule la contrainte de référence de calcul

$$\sigma_{\text{moy}} = Q/S,$$

$$\sigma_{\text{max}} = \sigma_{\text{moy}} * \text{le coefficient du tableau}$$

$$\alpha_2 = \sigma_{\text{max}}/\sigma_{\text{moy}} \text{ (cf. courbe bleue de la figure n°5)}$$

- $e/\Phi = M/Q$ $q_{\text{ref}} = 3 \cdot \alpha_2 * \sigma_{\text{moy}} / 4$ si $\sigma_{\text{min}} = 0$
- exemple : $e/\Phi = 0.275$
- ➔ % surface comprimée : 57%
- ➔ $\alpha_2 = \sigma_{\text{max}}/\sigma_{\text{moy}} = 4$ et $\sigma_{\text{min}} = 0$ ➔ $q_{\text{ref}} = 3 \cdot \sigma_{\text{moy}}$



« Fondation mixte / Portance globale »



➤ On vérifie (étape 0)

- $\{nA_p q_a + (S_s - n A_p) q'_{uELS}\} > q_{refELS} S_s$ à l'ELS,
- $\{nA_p q_{aELU} + (S_s - n A_p) q'_{uELU}\} > q_{refELU} S_s$ à l'ELU,
- q_a calculé selon les règlements en vigueur
- $q_u = k_p p_{le}/\gamma_s + q'_o$ ou $q_u = k_c q_{ce}/\gamma_s + q'_o$
- où $\gamma_s = 3$ à l'ELS et 2 à l'ELU

➤ On admet que certains de ces paramètres ($q_{P;l}$, q_s , $q_{S;l}$) sont saturés pour tout ou partie des pieux ou du sol directement sous la semelle

« Fondation mixte / Efforts horizontaux »



- Les calculs vis-à-vis des efforts horizontaux seront menés conformément aux règles en vigueur, au prorata des charges transmises en compression.
- La mobilisation des efforts maximum dans les pieux et en frottement sous la semelle ne se fait pas, en général, pour les mêmes niveaux de déformation, et on ne peut donc pas mobiliser en même temps la réaction horizontale maximale des pieux et le frottement maximal sous la semelle. Il convient de faire une étude en déformation (type éléments finis ou calcul itératif ...) de manière à pouvoir combiner les réactions respectives du sol et des pieux.

« Fondation mixte / Efforts horizontaux »



- On peut prendre en compte la réaction du sol sous la semelle $Q_{\min} \operatorname{tg} \phi / \gamma_s$, où ϕ est l'angle de frottement entre la semelle et le sol, et où γ_s est un coefficient de sécurité valant 1,2 sous combinaisons fondamentales et 1,1 sous combinaisons accidentelle, et où Q_{\min} est le minimum transmis au sol par la semelle.
- **Le géotechnicien donnera la valeur de ϕ à prendre en compte**
 - *Commentaire : Lorsque le massif n'est pas coulé en pleine fouille, la butée du sol sur le massif est négligée et les efforts horizontaux sous la sous-face de la semelle sont égaux à ceux appliqués en tête de semelle.*
 - *néanmoins, dans le cas où le massif est coulé en pleine fouille et sous réserve de la compatibilité des déformations basées sur la raideur en butée de la semelle d'une part et sur la raideur horizontale des pieux d'autre part,*
 - *on pourra faire participer la butée de la semelle jusqu'à une valeur validée par le géotechnicien, qu'on limitera cependant à 30% de la valeur maximale de la poussée passive.*

« Fondation mixte / Efforts horizontaux »



- On peut prendre en compte la réaction du sol sous la semelle $Q_{\min} \operatorname{tg} \phi / \gamma_s$, où ϕ est l'angle de frottement entre la semelle et le sol, et où γ_s est un coefficient de sécurité valant 1,2 sous combinaisons fondamentales et 1,1 sous combinaisons accidentelle, et où Q_{\min} est le minimum transmis au sol par la semelle.
- **Le géotechnicien donnera la valeur de ϕ à prendre en compte**
 - *Commentaire : Lorsque le massif n'est pas coulé en pleine fouille, la butée du sol sur le massif est négligée et les efforts horizontaux sous la sous-face de la semelle sont égaux à ceux appliqués en tête de semelle.*
 - *néanmoins, dans le cas où le massif est coulé en pleine fouille et sous réserve de la compatibilité des déformations basées sur la raideur en butée de la semelle d'une part et sur la raideur horizontale des pieux d'autre part,*
 - *on pourra faire participer la butée de la semelle jusqu'à une valeur validée par le géotechnicien, qu'on limitera cependant à 30% de la valeur maximale de la poussée passive.*

« Fondation mixte / Tassement et rotation »



- On négligera dans le calcul du tassement le frottement des pieux sur $0,5 \Phi$
- Néanmoins pour le calcul de la rotation du massif, pour se prémunir de l'effet des cycles traction/compression, le frottement ultime sera divisé par un facteur supplémentaire de sécurité de 1,5 en traction et 1,25 en compression.
- Les calculs de tassement de pieux seront menés conformément aux règles en vigueur.
- Pour le calcul de l'allongement, on ne retient comme produit ES du pieu que celui des aciers tant que la contrainte moyenne de traction du béton sur la section tendue du pieu est supérieure à f_{ct} / γ_s . (en général valeur proche de 1,5 MPa).

« Fondation mixte / Tassement et rotation »



- Prendre en compte les raideurs croisées des deux composants (sol sous semelle et pieux) ainsi que l'interaction horizontale nécessite des calculs itératifs qui ne font pas l'objet de ces recommandations, mais qui doivent mettre en exergue :
 - le frottement négatif mobilisé éventuellement ;
 - la rotation ;
 - le taux de travail max du sol sous la semelle ;
 - la charge maxi et mini en compression (traction éventuelle) des pieux ;
 - les moments maxi en tête des pieux à reprendre dans le radier.

« Dispositions constructives »

- Les dispositions des règlements en vigueur (fasc. 62) et celles du chapitre 5.1.2 s'appliquent et sont complétées dans les chapitres suivants.
- Armature des pieux en béton
 - Dans le cas de pieux en béton, ces pieux sont armés :
 - longitudinalement sur la hauteur nécessaire au calcul ;
 - toute hauteur en cas de traction-flexion ;
 - et transversalement conformément aux règlements en vigueur.

« Vérifications et contrôle »



- *Continuité des pieux*
 - *On vérifiera la continuité des pieux réalisés à raison de 1 pieu sur 8 :*
 - *soit par essai d'impédance,*
 - *soit par essai de réflexion.*
 - *et sur tous les pieux par enregistrements des paramètres de forages et d'injection en cas de pieux type tarière creuse, vissés moulés ou micro-pieux.*

« Vérifications et contrôle »



- Armatures du radier
 - Le radier sera dimensionné pour reprendre :
 - les moments d'encastrement M_i ;
 - les moments et efforts tranchants générés par la transmission des efforts de compression ou de traction éventuelle dans les pieux ;