

« Guide pour la conception et le dimensionnement des fondations
profondes sous actions sismiques des bâtiments à risque normal »
Cahier technique n° 38 - Publication AVRIL 2017



REUNION DU 4 mai 2017

PRÉSENTATION

P. BERTHELOT Président du Groupe de travail
M. GLANDY Animateur et Secrétaire



« Guide pour la conception et le dimensionnement des fondations
profondes sous actions sismiques des bâtiments à risque normal »
Cahier technique n° 38 - Publication AVRIL 2017



PRESENTATION du GUIDE et de ses points forts

P. Berthelot



Mail reçu : "**bravo pour votre Ténacité**".

[caractère d'une personne qui manifeste de l'opiniâtreté, de la constance dans ses idées, ses projets, ses actions; synonyme. persévérance, entêtement]

Ténacité pour vouloir absolument faire ce Guide.

Ténacité pour vouloir mener ce Guide à son terme.

Ténacité (surtout du Président !!) de vouloir expliciter complètement un **Exemple d'application**.

Manque de Ténacité (sûrement du Président !!) de ne pas avoir pu rédiger un chapitre sur des **Dispositions forfaitaires**.



LA LETTRE DE MISSION

AFPS

Lettre de mission pour le GT AFPS

« GUIDE POUR LE DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS PROFONDES SOUS ACTIONS SISMQUES POUR LES BÂTIMENTS À RISQUE NORMAL »

Préambule

A la différence des règles PS 92 qui comportaient des dispositions constructives adaptées aux fondations profondes, l'EC8 met plutôt en avant le calcul et ne comporte pas de dispositions constructives dédiées aux fondations profondes.

La question que l'on doit donc se poser aujourd'hui est de proposer des solutions rapidement accessibles au moins aux cas courants dans le cadre des bâtiments à risque normal.

Le Conseil Scientifique et Technique de l'AFPS a validé le lancement d'un groupe de travail lors de la réunion du 04/12/2012 pour répondre à cette question.

Lettre de mission

Dans le cadre du dimensionnement des fondations profondes il conviendra de clarifier pour les bâtiments à risque normal le contenu de ces études en particulier, les descentes de charges à fournir aux entreprises de fondations profondes, un coefficient de comportement adapté entre autres aux conditions de prise en compte des effets de l'interaction sol-structure, le domaine de sollicitation acceptable pour l'intégrité structurelle des fondations profondes (domaine élastique, rotule en tête ...), ainsi que les zones critiques où des dispositions particulières doivent être prises en compte (zones de transition élevée de module de cisaillement, ancrage en pied, zone d'affaiblissement de caractéristiques mécaniques ...)

Pour certains ouvrages où des modélisations spécifiques sont envisagées, il sera nécessaire de préciser les lois de comportement des pieux qui pourraient être utilisées.

A cette fin, il est constitué au sein de l'AFPS un Groupe de Travail spécifique pour « le dimensionnement des fondations profondes sous actions sismiques » qui aura notamment les objectifs suivants :

❶ Faire une synthèse des normes et règlements qui concernent plus particulièrement les fondations profondes (Eurocodes et Normes d'Application Nationales...), en soulignant les évolutions avec les textes antérieurs et les nouveaux besoins qui en découlent.

❷ Définir le périmètre et le contenu attendu d'un guide de recommandations en la matière.

AFPS

❸ Définir les mécanismes liés aux actions inertielles et aux actions cinématiques.

❹ Proposer des prescriptions générales et/ou forfaitaires pour les bâtiments courants et exposer les méthodes de calcul disponibles, en conformité avec les Eurocodes.

L'ensemble de ces éléments sera rassemblé dans un guide AFPS.

Organisation

La composition et l'animation du Groupe de Travail sont confiées à Patrick BERTHELOT. Il rapportera de l'avancement des travaux du Groupe auprès du CST à la demande de celui-ci.

Comme chaque responsable de GT, il valide la constitution de son GT, assure la planification des réunions et des besoins budgétaires nécessaires à son fonctionnement.

Il remonte les informations afférentes à la présidence du CST notamment pour les questions de planning et d'avancement des études et au secrétaire général notamment pour les questions budgétaires.

Tenant compte des spécifications particulières de mise en œuvre des fondations profondes, il est proposé de faire appel au SOFFONS (Syndicat des Entrepreneurs de Fondations Spéciales) dont le responsable désigné pour participer au Groupe de Travail est Michel GLANDY.

Echéances

Le guide de recommandations est attendu par l'AFPS fin 2014.
Un rapport préliminaire sera remis fin 2013.

Le 12 février 2013,

Le Président du CST
Pierre-Alain Nazé

L'animateur du GT
Patrick Berthelot



LES INTERVENANTS

- SOFFONS (Syndicats des entreprises de fondations spéciales) :
Botte Fondations-Franki Fondations-Keller Fondations-Menard-Soletanche-Spie Fondations
- ENTREPRISES : Eiffage - Vinci
- BET Géotechnique : Antea - Fondasol - Fugro - IMSM -
Structures Geotechnics - Terrasol -
- BET : A-I-A Ingenierie - Arcadis - Geodynamique et structure - Oxand -
Tractebel Engie
- INSTITUTIONNELS : Ecole Centrale de Nantes - Edf
- CONSULTANTS : Y.Guillon - A.Pecker
- BUREAUX de CONTRÔLE TECHNIQUE : Antilles Contrôle (ANCO) - Apave -
Bureau Veritas - Socotec -



LE DOCUMENT



CAHIER TECHNIQUE N°38

Guide pour la conception et le dimensionnement
des fondations profondes sous actions sismiques
des bâtiments à risque normal



Association Française du Génie Parasismique
French Association for Earthquake Engineering

Publication AVRIL 2017



AFPS Guide pieux

-

Journée du 4 mai 2017

PLAN DU GUIDE - TEXTE

- **AVANT PROPOS**
- **CHAPITRE 1 : PREAMBULE (10 pages)**
- **CHAPITRE 2 : RETOUR D'EXPERIENCE (16 pages)**
- **CHAPITRE 3 : EFFETS A CONSIDERER POUR LE DIMENSIONNEMENT (9 pages)**
- **CHAPITRE 4 : PRINCIPES DE CONCEPTION DES PIEUX (17 pages)**
- **CHAPITRE 5 : LIQUEFACTION ET DEGRADATION CYCLIQUE (6 pages)**
- **CHAPITRE 6 : DETERMINATION DES EFFETS INERTIELS (15 pages)**
- **CHAPITRE 7 : CALCULS DES EFFETS CINEMATIQUES (15 pages)**
- **CHAPITRE 8 : CUMULS DES EFFETS CINEMATIQUES ET DES EFFETS INERTIELS (2 pages)**



PLAN DU GUIDE - TEXTE

- **CHAPITRE 9** : DIMENSIONNEMENT ET CRITERE DE JUSTIFICATION (2 pages)
- **CHAPITRE 10** : DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES DES PIEUX EN BETON ARME (10 pages)
- **CHAPITRE 11** : ECRAN A BASE DE PIEUX OU PAROI MOULEE (3 pages)
- **CHAPITRE 12** : EXEMPLE D'APPLICATION (33 pages)
- **CHAPITRE 13** : SYNTHESE (7 pages)
- **ANNEXES A à I** (61 pages)



PLAN DU GUIDE - ANNEXES

- **ANNEXE A** : REFERENCES NORMATIVES ET REGLEMENTAIRES
- **ANNEXE B** : DOCUMENTS DE REFERENCE
- **ANNEXE C** : CARACTERISTIQUES DES BATIMENTS DCL
- **ANNEXE D** : LESSLOSS
- **ANNEXE E** : SYNTHESE DES DIFFERENTES METHODES DE $g(z)$
- **ANNEXE F** : METHODES AVEC DEGRADATION
- **ANNEXE G** : METHODE US ARMY
- **ANNEXE H** : CALCUL D'INTERACTION SOL STRUCTURES (ISS)
- **ANNEXE I** : EXEMPLE (33 pages)



LES PRINCIPES DU GUIDE

- Permet aux BET Géotechnique / BET de l'Entreprises de Fondations Profondes / BET Structures de se comprendre/d'avoir un langage commun;
- Fait la synthèse et ne déroge *ni aux EC8 ni aux normes d'exécution et de dimensionnement des fondations profondes (pieux, µpieux, barrettes, parois)*
- Pour le *contexte français* et dans le cadre de *Bâtiments et à Risque normal* le Guide propose des méthodes de dimensionnement adaptées. D'autres plus élaborées restent possibles et certaines comme les calculs d'Interaction Sol Structures (ISS) ont été placés en Annexe H
- Un calcul est toujours nécessaire (**pas de Dispositions forfaitaires**) et des **Dispositions constructives** sont proposées
- Un exemple d'application complet d'un bâtiment R+6 a été traité dans le Guide (cf Chapitre 12 et tous les détails des calculs mis en Annexe I)



LES POINTS FORTS DU GUIDE

- Ce n'est pas qu'un "simple" manuel permettant de calculer une fondation profonde soumis soit à des efforts en tête (inertiel) soit globalement (cinématique)
- C'est un Guide qui permet de comprendre, expliciter et prendre en compte l'interaction entre *sol-fondations profondes-bâtiment*
- Toute l'importance réside dans le dialogue entre "représentants de la structure" et "représentants des sols et fondations".
- Et c'est pourquoi nous avons jugé bon de revenir dans ce Guide sur certaines explications ou considérations liées au domaine de calcul de structures pour dimensionner au mieux les fondations profondes.



LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 1 : Préambule

1.3 Synoptique du dimensionnement

Les principales étapes sont les suivantes :

- 1/. Le BET Géotechnique définit au stade de la conception le modèle géotechnique (V_s , G , $V_{s,30}$, potentialité de liquéfaction), propose la classe de sols et donc le « spectre de calcul en surface ».
- 2/. Le BET Structures définit la structure, propose la classe de ductilité, explicite le coefficient de comportement retenu « q », et calcule une première descente de charges (statique et sismique) en considérant cette structure globalement encastree [Cf. § 1.6.a de ce Guide].
- 3/. Le BET de l'Entreprise de Fondations Profondes ou le BET Géotechnique propose des pieux (type et diamètre) en regard de la descente de charges statiques. En adéquation avec la descente de charges dynamiques (essentiellement les efforts horizontaux qu'il répartit en première approche au prorata des diamètres), il fournit, par diamètre de pieu, une première matrice de rigidité au BET Structures.

Commentaire : Le choix du diamètre du pieu est fondamental pour la suite du calcul. Ce choix dépend de la faisabilité d'exécution, de la portance GEO vis-à-vis du sol et de la résistance STR en termes de résistance de matériaux. Vis-à-vis du calcul STR, on peut soit augmenter le ferraillage longitudinal jusqu'à un pourcentage acceptable (sans dépasser 3 %) soit augmenter le diamètre. Dans le dernier cas, cela revient à augmenter la raideur du pieu, réduire la période et in fine augmenter les efforts.



LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 1 : Préambule

1.3 Synoptique du dimensionnement

Les principales étapes sont les suivantes :

- 4/. Le BET Structures finalise son modèle [itération(s)] et donne une nouvelle descente de charges, avec une répartition des efforts inertiels.
 - *Commentaire : En fonction du projet et du BET Structures, les étapes 2, 3 et 4 peuvent être regroupées.*
 - *Commentaire : Le BET Structures détermine si, pour le bâtiment et non pour les fondations, il est nécessaire d'établir un calcul en fourchette des valeurs des raideurs des appuis que constituent les têtes de pieux. Ce calcul en fourchette permet d'une part de couvrir la dispersion « naturelle » des paramètres géotechniques (par exemple les modules pressiométriques, les épaisseurs des couches, etc.), d'autre part les incertitudes liées aux essais de non linéarité du sol en interaction avec les pieux. Il est d'usage de mener un tel calcul avec des valeurs de raideurs de 2/3 à 3/2 autour de la valeur moyenne.*
- 5/. A partir des efforts inertiels, le BET de l'Entreprise de Fondations [ou le BET Géotechnique en mission de conception de projet (par exemple mission G2 PRO selon la norme NF P 94 500)] redimensionne les fondations. A ce stade, et selon les cas, il faut prendre en compte les effets cinématiques qui, le plus souvent, influencent le ferrailage (nature et longueur) pour les pieux en béton armé.
- 6/. En cas de changement de diamètre des fondations profondes, il y a nécessité de prévenir le BET Structures et de revenir à l'étape 4.

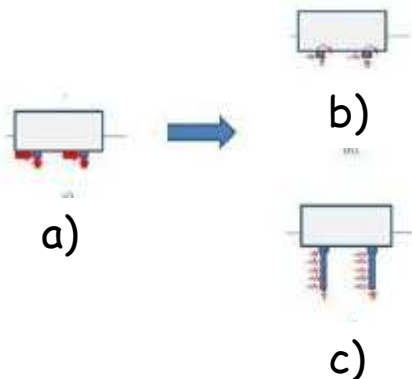


LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 1 : Préambule

1.6 Modélisation de l'interaction « bâtiment-fondations »

3 modélisations (encastrée/méthode 1/méthode 2)



a) Modélisation sans interaction avec les fondations : avec structure encastrée et/ou appuis rotulés localement bloqués en translations horizontale et verticale.

Elle ne constitue qu'une première étape de calcul et doit donc se poursuivre par des modélisations de type b) et c).

b) Modélisation avec interaction avec les fondations en prenant en compte les flexibilités globales de l'ensemble des pieux.

C'est cette modélisation qui a été développée dans le Guide

c) Modélisation avec interaction avec les fondations et interaction Sol-Structure prenant en compte la raideur des liaisons sol/pieux sur toute la longueur de chaque pieu.

Cette modélisation ISS est développée en Annexe H. Elle permet, entre autre, de prendre en compte l'interaction cinématique (modification du mouvement sismique due à la présence des fondations profondes dans le sol et à l'effet de clouage du sol).



LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 2 : Retour d'expérience

Le retour d'expérience montre que l'interaction "sol-fondation-superstructure" joue un rôle primordial dans les dommages subis par les pieux et les structures.

Bien que le retour d'expérience concerne plus principalement les ponts (et les gammes de périodes propres associées), les dommages constatés permettent toutefois d'analyser leurs causes et de mieux les prendre en compte dans les constructions futures.



LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 3 : Effets à considérer pour le dimensionnement

3.5 Les effets du séisme

3.5.1 Combinaisons d'actions apportées en pied de structure

Comme proposé au § 6.4.3.4 de l'EC0, les combinaisons d'actions pour les situations de projets sismiques sont les suivantes, où E_d est l'état limite ultime sismique :

$$E_d = E\{G_{k,j} ; P ; A_{Ed} ; \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}\} \quad j \geq 1 ; i \geq 1$$

La combinaison des actions entre parenthèses { } peut s'exprimer par :

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + "A_{Ed}" + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

- « G_{kj} » désigne les actions permanentes.
- « $\Psi_{2,i}$ » désigne le pourcentage des valeurs quasi permanentes des actions variables présentes lors du séisme. Les valeurs représentatives des « $\Psi_{2,i}$ » sont données dans le Tableau n° 9.2 et A1.1 de l'EC0.

Commentaire : Le Guide propose d'associer le risque sismique avec un niveau de nappe phréatique quasi permanent donc de prendre la valeur EB comme niveau quasi permanent de référence.



LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 3 : Effets à considérer pour le dimensionnement

3.5.2 Combinaisons d'actions en tête de fondations

On doit tenir compte du § 5.3.1 de l'EC8-5 (incidence du dimensionnement de la structure) concernant la clause (1)P « Structure dissipatives » et la clause (2)P « Structure non dissipatives ».

Finalement, le torseur des efforts à retenir pour le calcul des fondations est le suivant :

$$E_{Fd} = E_{F,G} + \gamma_{r,d} \Omega E_{F,E}$$

- Effet dû aux actions non sismiques :

$$\triangleright E_{FG} = \sum G_{k,j} + \ll P \gg + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

$$\triangleright E_{FG} = \sum G_{k,j} + \ll P \gg$$

- Effet dû aux actions sismiques (égal à l'action sismique) :

$$\triangleright E_{FE} = A_{ED}$$

Pour une classe de ductilité DCM, il y a lieu de retenir un coefficient de surcapacité « $\gamma_{Rd} \cdot \Omega$ », calculé par le BET Structures ou forfaitaire tel que défini au § 4.2.2 de ce Guide.



LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 4 : Principes de conception des pieux

4.2.2 Dimensionnement usuel des fondations en capacité (DCM)

4.2.2.1 Principe

Au sens de la clause (1)P du § 5.3.1 de l'EC8-5, les effets de l'action sur les éléments des fondations doivent être déduits de considérations de dimensionnement en capacité en tenant compte d'éventuelles sur-résistances. A défaut d'un calcul en capacité exact (nécessitant de connaître la résistance de l'élément porté par la fondation), on applique le Tableau n° 8 pour estimer « $\gamma_{Rd} \cdot \Omega$ ».

Tableau n° 8 : Coefficients « Ω » et « γ_{Rd} » pour le calcul de la composante sismique

	Effort vertical		Effort horizontal	
	Ω	γ_{Rd}	Ω	γ_{Rd}
DCM avec diaphragme et $q > 1,5$	1	1,4	1	1,4
DCM sans diaphragme avec $q > 1,5$	$\gamma_{Rd} \cdot \Omega = \text{Max}(1,4 ; q/1,5)$			

Commentaire : La surcapacité ne s'applique que si $q > 1,5$



LES POINTS FORTS DU GUIDE

4.4 Principes de modélisation de l'interaction de la structure avec les fondations

Conformément au § 1.6 de ce Guide, la modélisation sans interaction avec les fondations ne peut être utilisée qu'au titre d'un prédimensionnement (première étape), et doit être poursuivie par l'une ou l'autre des méthodes « 1 » et « 2 » suivantes. Dans cette première étape, on considère que le bâtiment est bloqué à sa base (appuis fixes en X, Y et Z). Cette modélisation tient compte des fréquences propres du bâtiment considéré sans influence de ses fondations.

Il y a deux méthodes pour prendre en compte les effets de l'interaction avec les fondations :

- La méthode 1 consiste à modéliser chaque pieu par une matrice de rigidité en tête de pieu, en n'oubliant pas de prendre en compte les effets de groupe conformément à ce que préconise la norme NF P 94-262.

Ces matrices de rigidité sont développées au chapitre 6. Il existe deux méthodes pour calculer ces matrices, qu'on appelle « méthode complète » et « méthode simplifiée » développées au § 6.4 de ce Guide.

- La méthode 2 consiste à modéliser les pieux toute hauteur avec des ressorts le long du pieu, en n'oubliant pas de prendre en compte les effets de groupe conformément à ce que préconise la norme NF P 94-262.



LES POINTS FORTS DU GUIDE

4.5 Echanges de données entre le BET Structures, le Géotechnicien et l'Entreprise de Fondations Profondes

4.5.1 Données à fournir par le BET Structures

4.5.2 Données à fournir par le Géotechnicien

4.5.2.1 Phase avant-projet

À raccorder à la Mission de type G2 phase AVP

4.5.2.2 Phase projet

À raccorder à la Mission de type G2 phase PRO et DCE/ACT

4.5.3 Données à fournir par l'Entreprise de Fondations Profondes



LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 5 : Liquéfaction et dégradation cyclique

Pour la prise en compte des problématiques liées à la liquéfaction et/ou à un écoulement latéral, il y a lieu de se préoccuper, comme le demande l'EC8-5 dans le § 4.1.4 et dans l'annexe B, de la continuité ou non de la couche à l'échelle du projet, de son épaisseur par rapport aux dimensions des éléments de fondations et du niveau d'eau.

Commentaire : Le Guide propose d'associer le risque de liquéfaction avec un niveau de nappe phréatique quasi permanent donc de prendre la valeur EB comme niveau quasi permanent de référence.

Le paragraphe 5.1 expose les cas où on propose de traiter le sol, ce qui permet à la fois de redéfinir une classe de sols (de A à E) avec le paramètre du sol « S » associé, de définir son spectre et les efforts inertiels qui en découlent, et de définir la déformation en champ libre et les efforts cinématiques associés.

Le paragraphe 5.2 expose des cas où on peut s'affranchir du traitement de sol, notamment dans le cas de lentilles ou de couches liquéfiables de faible épaisseur (≤ 2 m).

Si d'autres possibilités que celles décrites au § 5.1 et 5.2 sont envisagées, des études spécifiques doivent être menées pour la définition de l'action sismique, en particulier le spectre de calcul, la déformation en champ libre, la réaction du sol, etc. Ces études sont le préalable nécessaire au dimensionnement des pieux.

La dégradation cyclique est abordée au § 5.3 de ce Guide.



LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 5 : Liquéfaction et dégradation cyclique

5.1 Cas du traitement de sol "anti-liquéfaction"

La liquéfaction peut se rencontrer dans un des cas suivants :

- Sol de classe S2.
- Epaisseur de sol liquéfiable plurimétrique ; cela correspond aux couches d'épaisseur supérieure à 2 m.
- Mouvements de terrain de grande amplitude : « flow failure » (mouvements de plusieurs dizaines de mètres) ou « lateral spreading » (mouvement de plusieurs décimètres).

Avant réalisation des pieux, un traitement de sol « anti-liquéfaction » est mis en œuvre : le Guide AFPS/CFMS [1] décrit diverses solutions.

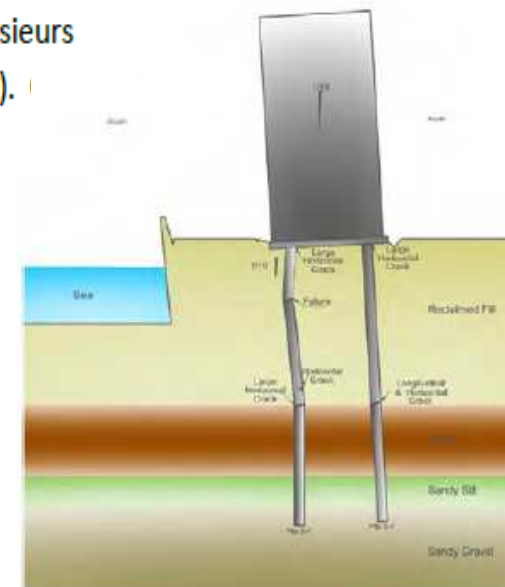


Figure n° 20 : Illustration du mode de rupture des pieux dans un sol multicouche avec remblais en tête selon Tokimatsu (1997) [11]. Mécanisme de rupture suite au déplacement latéral induit par la liquéfaction des sols.



LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 5 : Liquéfaction et dégradation cyclique

5.2 Cas sans traitement systématique de sol "anti-liquéfaction"

5.2.1 Présence de lentilles discontinues et aléatoires

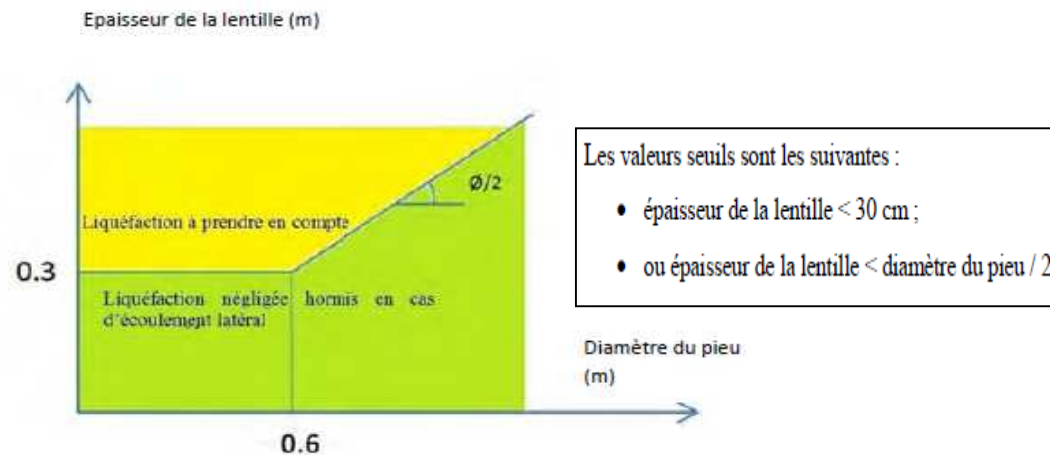


Figure n° 29 : Critères de liquéfaction liés à l'épaisseur de la lentille

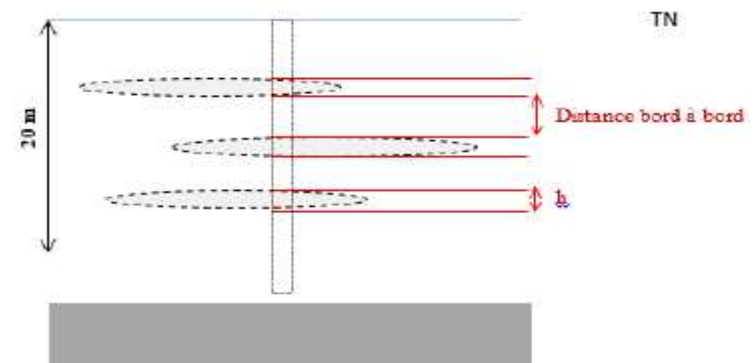


Figure n° 30 : Critères de liquéfaction liés à la répartition des lentilles

Tableau n° 9 : Synthèse sur les lentilles liquéfiables

Epaisseur max « h » des lentilles	$\leq 0,3$ m ou $\leq \Phi / 2$		$> 0,3$ m ou $\Phi / 2$		
	Distance de bord à bord		> 1 m		≤ 1 m
Epaisseur cumulée	> 3 m	≤ 3 m	> 3 m	≤ 3 m	
Traitement	oui	non	oui	non	oui
k_h	Sol traité	réduit *	Sol traité	réduit *	Sol traité

* « k réduit » défini au § 6.2.3 de ce Guide.



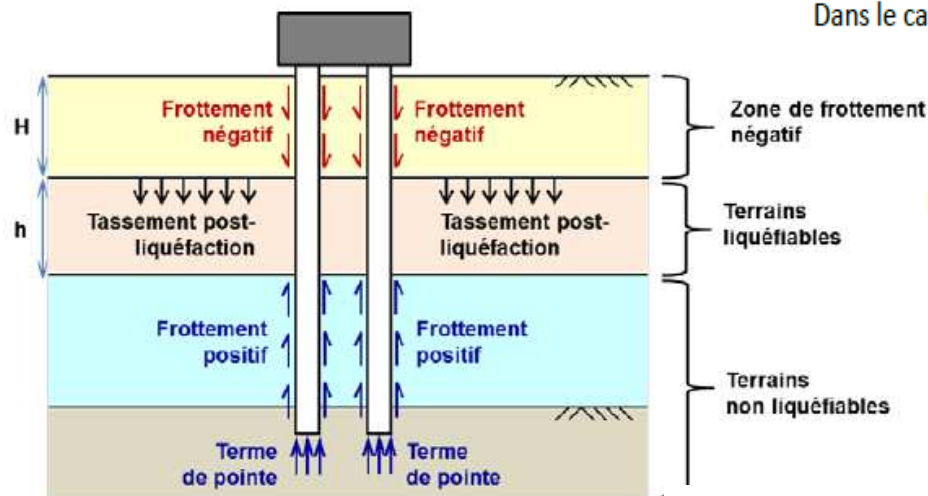
LES POINTS FORTS DU GUIDE

5.2.2 Présence de couches de faibles épaisseurs et continues à l'échelle du projet

Cela correspond aux couches d'épaisseur inférieure à 2 m :

5.3 Dégradation cyclique

5.4 Frottement négatif



Dans le cas de liquéfaction des sols, on se situe plutôt dans un domaine de grande déformation

$$F_{nsismique} = \pi \cdot B \cdot \sum_{i=0}^H q_{si} \cdot H_i$$

Les valeurs de « f_{soli} » et « $\alpha_{pieu-soli}$ » sont extraites de la norme NF P 94-262,

Commentaire : Les valeurs de « q_{si} » sont, dans tous les cas, limitées à 50 kPa.

Commentaire : Sur la hauteur « h », dans le cas de terrain non traité subissant de la dégradation cyclique, il peut être pris en compte une part de frottement négatif. Dans ce cas, la valeur de frottement est calculée selon la formule suivante :

$$F_{nsismique} = \pi \cdot B \cdot \sum_{i=0}^{H+h} (q_{si} \cdot H_i + q_{si} \cdot h_i)$$

Ce frottement négatif se développe post actions sismiques ; par conséquent il ne se cumule pas avec l'action sismique. Cependant, une nouvelle sollicitation de calcul sismique (ELU) est à considérer :

$$E_{F,D} = E_{F,G} + F_{nsismique}$$



LES POINTS FORTS DU GUIDE

5.5 Synthèse

	Entrants			Actions	
	Classe de sol	Caractérisation	Catégorie de bâtiment	Traitement préalable	Autre action
§ 5.1	S2	Présence d'une instabilité générale : Flow failure, latéral Spreading	II à IV	Sur l'ensemble du site.	
		Epaisseur de sol liquéfiable plurimétrique	II à IV	Sous bâtiment avec débords.	
§ 5.2	D ou E éventuellement A ou C	Lentilles liquéfiables	II à IV	Cf. Tableau n° 9	
		Couche continue liquéfiable de faible épaisseur	III et IV	Pour permettre le calcul du $g(z)$ et des calculs cinématiques.	Le frottement négatif induit sur la totalité des horizons situés au-dessus de la couche liquéfiable en absence de traitement.
			II	Pas obligatoire	
§ 5.3	S1	En présence de dégradation cyclique	II à IV	A étudier au cas par cas	
Autres cas	Des études spécifiques doivent être menées pour la définition de l'action sismique, en particulier le spectre de calcul, la déformation en champ libre, la réaction du sol, etc. Ces études sont le préalable nécessaire au dimensionnement des pieux.				



LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 6 : Détermination des effets inertiels

6.1 Préambule

L'objectif de ce chapitre est de présenter toutes les méthodes (Cf. § 6.2 à 6.5 de ce Guide) permettant de calculer les raideurs « K », verticales et horizontales, pour construire les matrices de rigidité, par diamètre de pieu, proposées au § 4.1.3.2.1 de ce Guide, afin de calculer les effets inertiels qui s'appliquent sur les fondations profondes (Cf. § 6.5 de ce Guide) :

- K_{VV} : raideur verticale ;
- K_{MM} : raideur en rotation ;
- K_{HH} : raideur horizontale ;
- K_{HM} : raideur couplée (rotation/translation horizontale).

Dans l'approche de ce Guide, on considère que les raideurs ne dépendent pas des fréquences, mais seulement de la distorsion. Si on tient compte de la fréquence, on se reporte à l'annexe H. Cette simplification est acceptable dans les cas couramment rencontrés (pour les gammes de fréquence comprise entre 1 et 5 Hz) pris en compte dans ce Guide.

[Voir la présentation de Fahd Cuira](#)



LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 7 Calcul des effets cinématiques

Sous actions sismiques, le sol se déplace horizontalement. En absence de pieu, ce déplacement latéral « $g(z)$ », fonction de la profondeur « z », est appelé « déplacement du sol en champ libre ».

En conséquence pour définir les effets cinématiques sur un pieu, il faut définir :

- La déformation du sol en champ libre « $g(z)$ ».
- Les valeurs du coefficient de réaction surfacique « k_c ».

On pourra modéliser l'action induite sur le pieu par la loi suivante :

- $p = k_c \cdot [y(z) - g(z)]$.
- $y(z)$: déformation (obtenue par itération) du pieu soumis à « $g(z)$ » et aux conditions aux limites.
- k_c : coefficient de réaction surfacique pour les sollicitations cinématiques.
- Les conditions en tête de pieu limitées aux deux cas suivants : rotulées ou encastrees **dans les mêmes conditions que pour le calcul inertiel.**

Chapitre 8 Cumul des effets cinématiques et des effets inertiels

[Voir la présentation de Damien Folliard](#)



LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 9 Dimensionnement et critère de justification

En préliminaire, il convient de rappeler que la justification des fondations profondes sous situations de calculs statiques (provisoire et en service, ELS et ELU, GEO et STR) doit précéder la justification des calculs sismiques (Cf. NF P 94-262).

9.2 Vérification de type GEO sous sollicitations sismiques

Conformément à la clause 11 du chapitre 1 de la norme NF P 94-262, on applique aux sollicitations sismiques les mêmes coefficients partiels qu'à l'ELU sous combinaisons fondamentales à savoir :

- $\gamma_t = 1,10$ pour des efforts de compression.
- $\gamma_t = 1,15$ pour des efforts de traction.

9.3 Vérification de type STR sous sollicitations sismiques

9.3.1 Taux de travail de l'acier de béton armé

En accord avec l'EC2-1-1 : $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$ où f_{yk} = limite caractéristique d'élasticité de l'acier.

Pour des sollicitations de type ELU sismique, comme pour les sollicitations de type ELU accidentel, $\gamma_s = 1,00$.



LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 9 Dimensionnement et critère de justification

9.3 Vérification de type STR sous sollicitations sismiques

9.3.2 Taux de travail du béton

En accord avec la norme NF P 94-262, on pose, pour la contrainte du béton à l'ELU :

$$f_{cd} = \text{Min} \left(\alpha_{cc} k_3 \frac{f_{ck}^*}{\gamma_c}; \alpha_{cc} \frac{f_{ck}(t)}{\gamma_c}; \alpha_{cc} \frac{C_{\text{max}}}{\gamma_c} \right) \quad f_{ck}^* = \inf (f_{ck}(t); C_{\text{max}}; f_{ck}) \frac{1}{k_1 k_2}$$

- k_1, k_2, k_3 et C_{max} définis dans la norme NF P 94-262.
- $\alpha_{cc} = 1,00$ pour un pieu armé et $\alpha_{cc} = 0,80$ pour un pieu non armé (dans ce cas on notera $f_{cd, pl}$).
- $\gamma_c = 1,30$ d'après la Note 2 de la clause (3) du § 5.2.4 de l'EC8-1/NA.

On vérifie donc à l'ELU sismique :

$$\sigma_{c\text{max}, d} \leq f_{cd} \text{ pour un pieu armé ou } \sigma_{c\text{max}, d} \leq f_{cd, pl} \text{ pour un pieu non armé.}$$

Le calcul des sections à l'ELU est la procédure normale pour le niveau de séisme réglementaire.

9.3.3 Acier de frettage

Pour garantir le comportement élastique du pieu sur toute sa longueur (c'est-à-dire l'absence de rotule plastique), on limite la déformation du béton à 0,0035. Dans ce cas, aucun acier de frettage n'est nécessaire et il n'y a pas lieu d'appliquer la formule 5.15 des clauses 7 et 8 du § 5.4.3.2.2 de l'EC8-1.



LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 10 : Dispositions constructives pour pieux BA

10.1 Principes généraux

Pour le dimensionnement des bâtiments sur fondations profondes nous avons utilisé :

- EC8-5 : Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques et si besoin les articles rappelés de l'EC8-1 et complété par le Fascicule de documentation FD P 06-031
- Les normes d'exécution NF EN 1536; NF EN 12699; NF EN 14199
- Les normes de dimensionnement NF P94-262; NF P94-282
- L'Arrêté du 22/10/2010 et les décrets 2010-1254 et 1255
- CCH et article R 111-38



LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 10 : Disposition constructives

En conséquence :

- a/. Le présent Guide précise les dispositions constructives minimales d'armatures non formulées dans l'EC8.
- b/. La prescription « de comportement élastique » d'un pieu est une façon de formuler l'exigence qu'il n'y a pas de rotules plastiques le long du pieu.

Commentaire : Dans certaines conditions, qui nécessiteront une étude spécifique, et comme le prévoit la clause (7) du § 5.4.2 de l'EC8-5, la formation d'une rotule plastique en tête de fondation peut être autorisée. Il convient alors de dimensionner les zones de formation potentielle de rotules plastiques conformément au § 5.8.4 de l'EC8-1.

Dans le présent Guide, qui concerne uniquement les bâtiments à risque normal, nous n'avons ni retenu ni étudié ce cas de rotule plastique. De ce fait, c'est la prescription b) qui est retenue et développée dans ce Guide.

Pas de dispositions forfaitaires

On doit donc toujours faire les calculs définis au chapitre 9 pour dimensionner le pieu vis-à-vis de la résistance des matériaux (STR) en fonction des efforts inertiels et cinématiques.

En plus, on propose de définir des armatures minimales à mettre en œuvre dans des zones particulières quels que soient les résultats des calculs, cela en termes de longueur de la cage et en termes de composition.

Voir la présentation de Michel Glandy



LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 12 Exemple d'application

L'exemple que nous développons ci-dessous a pour but de mettre en exergue les différentes étapes de calcul que nous avons détaillées dans le texte.

12.1 : Description de l'ouvrage

12.2 : Contexte géotechnique

12.3 : Contexte sismique

12.4 : Définition des hypothèses de calcul

12.5 : Première étape de calcul ou prédimensionnement

12.6 : Deuxième étape de calculs (méthode complète ou simplifiée)

12.7 : Analyse de l'exercice

12.8 : Conclusions de l'exercice

Voir la présentation de Dominique Nibel et Frédéric Durand



LES POINTS FORTS DU GUIDE

Chapitre 13 Synthèse

En tout premier lieu, le Guide a eu pour but de définir les attendus des différents intervenants à l'acte de construire, que sont en particulier les Maîtres d'œuvre, les BET Structures et Géotechniques et les Entreprises de Fondations Profondes.

Le Guide s'est attaché à proposer des méthodes de calcul pour le dimensionnement des fondations profondes en respectant les Eurocodes, les Normes d'exécution et les Normes d'Application Nationale de dimensionnement. Rappelons toutefois que ce Guide n'a pas pour objectif le dimensionnement du bâtiment porté par les Fondations.

Le Guide propose des dispositions constructives permettant ainsi de garantir une ductilité minimale aux fondations profondes.

Pour éclairer les lecteurs du Guide, un exemple d'application d'un bâtiment R+6 sans sous-sol et fondé sur pieux a été entièrement développé au Chapitre 12 et en Annexe I en suivant les différentes recommandations exposées tout au long des chapitres du Guide.

13.1 Rôle du BET Structures

13.2 Rôle du BET Géotechnique

13.3 Rôle de l'Entreprise de Fondations Profondes

13.4 Dispositions constructives

13.5 Modélisation



REMERCIEMENTS

- ✓ À l'**AFPS** d'avoir accepté la création de ce Groupe de travail
- ✓ À tous les membres du Groupe du travail
- ✓ Aux membres relecteurs du **CST** sous la direction de
Pierre-Olivier MARTIN
- ✓ Aux Entreprises, Sociétés, Bureau d'études, Organismes et à leurs dirigeants de nous avoir permis de passer beaucoup de temps dans nos nombreuses réunions (environ 60).
- ✓ Au Secrétaire **Michel Glandy** d'avoir tenu la barre jusqu'au bout



REMERCIEMENTS

- ✓ À **Michel Glandy** et à **Soletanche-Bachy Pieux** de nous avoir accueillis et nous permettre de faire des journées continues grâce aux plateaux repas (ah les œufs cocottes !! et la viande rouge !!)
- ✓ À **Dominique N.**, **Nicolas N.**, **Jean-Robert G.**, **Fahd C.** pour les croissants, pains aux chocolat, pains aux raisins, framboisier....
- ✓ À **Franki** et au **Groupe Fayat** et **Nicolas Nayrand** pour quelques bouteilles permettant d'arroser (avec modération !!) la fin de rédaction de certains chapitres
 - ✓ A tous et à toutes de m'avoir supporter même pendant les moments "d'échauffement".
 - ✓ A vous tous et toutes d'être venus(es) nombreux(ses)



LE DOCUMENT

Un grand merci

