

RISQUE SISMIQUE ET MISSIONS D'INGENIERIE GEOTECHNIQUE



Sous la Présidence de Jean-Claude GRESS, HYDROGEOTECHNIQUE

Ont participé à l'élaboration de ce guide :

- | | |
|----------------------|------------|
| • Jean-Michel ALBA | Sol Essais |
| • Patrick BERTHELOT | Véritas |
| • Luis CARPINTERO | Socotec |
| • Anne CHASSAING | Fondouest |
| • Fabien EVRARD | Alios |
| • Eric JANDEL | Fondasol |
| • Christophe RONDEAU | ERG SA |
| • Zora ZERFA | Arcadis |

Ainsi que Jacques ROBERT, Président du Comité Géotechnique de Syntec Ingénierie.

SOMMAIRE

Avant-Propos

Préambule

1. Contexte général des décrets relatifs à la prévention du risque sismique et à la délimitation des zones de séismicité, des arrêtés fixant les règles de construction parasismique et de l'Eurocode 8 pour la Métropole et les DOM / TOM.	9
2. Mission Etude géotechnique préalable G1	16
2.1 Phase "Etude de site" ES	16
2.2 Phase "Principes Généraux de Construction" PGC.....	17
3. Mission Etude géotechnique de conception G2	18
3.1 Phase Avant-Projet (AVP)	18
3.2 Phase Projet (PRO)	19
4. Mission Etude et suivi géotechniques d'exécution G3	23
4.1 Phase Etude géotechnique d'exécution	23
4.2 Phase Suivi géotechnique d'exécution	23
5. Mission Supervision géotechnique d'exécution (G4).....	23
6. Mission G5 de Diagnostic géotechnique	24
Annexe 1. Tableaux synthétiques de la maîtrise progressive du risque géotechnique et géodynamique.	
Annexe 2. Notion de classe de sol.	
Annexe 3. Coefficient d'importance γ_I . Bâtiments et ouvrages d'art à risque normal.	
Annexe 4. Coefficients multiplicateur S.	
Annexe 5. Coefficient d'amplification topographique S_T .	
Annexe 6. Spectres de calcul.	
Annexe 7. Références.	

Avant-propos

A l'occasion de la révision en novembre 2013 de la norme NF P 94-500 sur la classification et les spécifications des missions d'ingénierie géotechnique, il est apparu important pour les ingénieries de préciser les données géotechniques et géodynamiques à fournir à chaque étape de conception, puis de réalisation d'un ouvrage (bâtiment ou infrastructure) pour une bonne appréhension et maîtrise du risque sismique, en conformité avec la réglementation en vigueur (Eurocode 8, décrets relatifs à la prévention du risque sismique et à la délimitation des zones de sismicité, arrêtés fixant les règles de construction parasismique).

Le risque sismique concerne en premier lieu le sol, véritable matériau de construction, avant de solliciter l'ouvrage, bien qu'il y ait toujours une forte interaction sol – ouvrage. Une bonne adaptation de l'ouvrage au contexte géotechnique et sismique du site est un enjeu majeur pour la maîtrise du risque sismique.

Ce guide précise, dans l'approche graduée et progressive du contexte géotechnique du site qui est l'objet de l'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique, les données d'entrée à fournir à chaque étape de la conception pour assurer une maîtrise pertinente et progressive du risque sismique pouvant affecter un ouvrage.

Puisse ce guide contribuer efficacement à la sécurité des personnes utilisatrices de ces futurs ouvrages, face au risque sismique.

Jacques ROBERT, président du comité Géotechnique de SYNTEC INGENIERIE

Préambule

La norme NF P94-500 sur les missions d'ingénierie géotechnique a été révisée en novembre 2013, afin de faciliter son application par un enchaînement clarifié des différentes missions. Le nombre de ces missions a été réduit et l'ensemble est conçu pour se synchroniser avec l'enchaînement des phases de la maîtrise d'œuvre générale de conception, puis de réalisation des ouvrages géotechniques, fondations de l'ouvrage global.

Dans ce cadre, il était important de compléter la norme NF P 94.500 par ce guide professionnel. Il a pour objet de préciser pour chaque mission d'ingénierie géotechnique, le détail des données géotechniques et géodynamiques pertinentes nécessaires, que le géotechnicien se doit de rechercher, pour une bonne maîtrise des risques géodynamiques, tout en conservant le caractère toujours nécessaire de la progressivité de la recherche d'information.

Le tableau n° 1 de l'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique et le tableau n° 2 de la classification des missions d'ingénierie géotechnique de la norme NF P94-500 sont présentés ci-après (page 5 à 7).

L'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique pour la conception d'un projet se structure en deux étapes :

- une première étape d'étude géotechnique préalable (G1) comportant une phase Etude de Site (ES) et une phase Principes Généraux de Construction (PGC),
- une seconde étape d'étude géotechnique de Conception (G2) comportant la succession des phases AVP (Avant-Projet), PRO (Projet) et DCE/ACT (Dossier de consultation des entreprises et Assistance aux Contrats de Travaux).

Ces deux étapes sont réalisées par le géotechnicien du Maître de l'ouvrage.

Au stade de la réalisation, l'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique reste conforme à la version précédente de l'ancienne norme 94.500 :

- la mission des études et suivi géotechniques d'exécution (G3) à réaliser par le géotechnicien de l'entreprise,
- et, en parallèle, la mission de supervision géotechnique d'exécution (G4) réalisée par le géotechnicien du maître de l'ouvrage.

Hors l'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique, il existe toujours la mission de diagnostic géotechnique (G5), réalisée à toute étape d'un projet ou sur un ouvrage existant et consistant à étudier un élément géotechnique spécifique, à la demande du maître d'ouvrage ou de l'entreprise.

Concernant la consultation de l'ingénierie géotechnique par le maître d'ouvrage, ce dernier doit nécessairement faire réaliser une étude géotechnique préalable (G1) avant de consulter pour l'étude géotechnique de conception (G2), le rapport de l'étape (G1) devant alors nécessairement faire partie du dossier de consultation (donnée d'entrée).

Un maître d'ouvrage ne peut pas non plus consulter pour une mission de supervision géotechnique d'exécution (G4), sans faire figurer dans son dossier de consultation le rapport de l'étude géotechnique de conception (G2).

(NF P94-500) Tableau 1 — Schéma d'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique

Enchaînement des missions G1 à G4	Phases de la maîtrise d'œuvre	Mission d'ingénierie géotechnique (GN) et Phase de la mission		Objectifs à atteindre pour les ouvrages géotechniques	Niveau de management des risques géotechniques attendu	Prestations d'investigations géotechniques à réaliser
Étape 1 : Étude géotechnique préalable (G1)		Étude géotechnique préalable (G1) Phase Étude de Site (ES)		Spécificités géotechniques du site	Première identification des risques présentés par le site	Fonction des données existantes et de la complexité géotechnique
	Étude préliminaire, esquisse, APS	Étude géotechnique préalable (G1) Phase Principes Généraux de Construction (PGC)		Première adaptation des futurs ouvrages aux spécificités du site	Première identification des risques pour les futurs ouvrages	Fonction des données existantes et de la complexité géotechnique
Étape 2 : Étude géotechnique de conception (G2)	APD/AVP	Étude géotechnique de conception (G2) Phase Avant-projet (AVP)		Définition et comparaison des solutions envisageables pour le projet	Mesures préventives pour la réduction des risques identifiés, mesures correctives pour les risques résiduels avec détection au plus tôt de leur survenance	Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	PRO	Étude géotechnique de conception (G2) Phase Projet (PRO)		Conception et justifications du projet		Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	DCE/ACT	Étude géotechnique de conception (G2) Phase DCE / ACT		Consultation sur le projet de base / Choix de l'entreprise et mise au point du contrat de travaux		
Étape 3 : Études géotechniques de réalisation (G3/G4)		À la charge de l'entreprise	À la charge du maître d'ouvrage			
	EXE/VISA	Étude et suivi géotechniques d'exécution (G3) Phase Étude (en interaction avec la phase Suivi)	Supervision géotechnique d'exécution (G4) Phase Supervision de l'étude d'exécution (en interaction avec la phase Supervision du suivi)	Étude d'exécution conforme aux exigences du projet, avec maîtrise de la qualité, du délai et du coût	Identification des risques résiduels, mesures correctives, contrôle du management des risques résiduels (réalité des actions, vigilance, mémorisation, capitalisation des retours d'expérience)	Fonction des méthodes de construction et des adaptations proposées si des risques identifiés surviennent
DET/AOR	Étude et suivi géotechniques d'exécution (G3) Phase Suivi (en interaction avec la phase Étude)	Supervision géotechnique d'exécution (G4) Phase Supervision du suivi d'exécution	Exécution des travaux en toute sécurité et en conformité avec les attentes du maître d'ouvrage	Fonction du contexte géotechnique observé et du comportement de		

			(en interaction avec la phase Supervision de l'étude)			l'ouvrage et des avoisinants en cours de travaux
À toute étape d'un projet ou sur un ouvrage existant	Diagnostic	Diagnostic géotechnique (G5)		Influence d'un élément géotechnique spécifique sur le projet ou sur l'ouvrage existant	Influence de cet élément géotechnique sur les risques géotechniques identifiés	Fonction de l'élément géotechnique étudié

Tableau 2 — Classification des missions d'ingénierie géotechnique

<p>L'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique (étapes 1 à 3) doit suivre les étapes de conception et de réalisation de tout projet pour contribuer à la maîtrise des risques géotechniques. Le maître d'ouvrage ou son mandataire doit faire réaliser successivement chacune de ces missions par une ingénierie géotechnique. Chaque mission s'appuie sur des données géotechniques adaptées issues d'investigations géotechniques appropriées.</p>
<p>ÉTAPE 1 : ÉTUDE GÉOTECHNIQUE PRÉALABLE (G1)</p> <p>Cette mission exclut toute approche des quantités, délais et coûts d'exécution des ouvrages géotechniques qui entre dans le cadre de la mission d'étude géotechnique de conception (étape 2). Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire. Elle comprend deux phases :</p> <p><u>Phase Étude de Site (ES)</u></p> <p>Elle est réalisée en amont d'une étude préliminaire, d'esquisse ou d'APS pour une première identification des risques géotechniques d'un site.</p> <ul style="list-style-type: none"> — Faire une enquête documentaire sur le cadre géotechnique du site et l'existence d'avoisinants avec visite du site et des alentours. — Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats. — Fournir un rapport donnant pour le site étudié un modèle géologique préliminaire, les principales caractéristiques géotechniques et une première identification des risques géotechniques majeurs. <p><u>Phase Principes Généraux de Construction (PGC)</u></p> <p>Elle est réalisée au stade d'une étude préliminaire, d'esquisse ou d'APS pour réduire les conséquences des risques géotechniques majeurs identifiés. Elle s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées.</p> <ul style="list-style-type: none"> — Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
<p>ÉTAPE 2 : ÉTUDE GÉOTECHNIQUE DE CONCEPTION (G2)</p> <p>Cette mission permet l'élaboration du projet des ouvrages géotechniques et réduit les conséquences des risques géotechniques importants identifiés. Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire et est réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre ou intégrée à cette dernière. Elle comprend trois phases :</p> <p><u>Phase Avant-projet (AVP)</u></p> <p>Elle est réalisée au stade de l'avant-projet de la maîtrise d'œuvre et s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées.</p> <ul style="list-style-type: none"> — Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats. — Fournir un rapport donnant les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade de l'avant-projet, les principes de construction envisageables (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, assises des dallages et voiries, améliorations de sols, dispositions générales vis-à-vis des nappes et des avoisinants), une ébauche dimensionnelle par type d'ouvrage géotechnique et la pertinence d'application de la méthode observationnelle pour une meilleure maîtrise des risques géotechniques. <p><u>Phase Projet (PRO)</u></p> <p>Elle est réalisée au stade du projet de la maîtrise d'œuvre et s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées suffisamment représentatives pour le site.</p> <ul style="list-style-type: none"> — Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats. — Fournir un dossier de synthèse des hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade du projet (valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques en particulier), des notes techniques donnant les choix constructifs des ouvrages géotechniques (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, assises des dallages et voiries, améliorations de sols, dispositions vis-à-vis des nappes et des avoisinants), des notes de calcul de dimensionnement, un avis sur les valeurs seuils et une approche des quantités. <p><u>Phase DCE / ACT</u></p> <p>Elle est réalisée pour finaliser le Dossier de Consultation des Entreprises et assister le maître d'ouvrage pour l'établissement des Contrats de Travaux avec le ou les entrepreneurs retenus pour les ouvrages géotechniques.</p> <ul style="list-style-type: none"> — Établir ou participer à la rédaction des documents techniques nécessaires et suffisants à la consultation des entreprises pour leurs études de réalisation des ouvrages géotechniques (dossier de la phase Projet avec plans, notices techniques, cahier des charges particulières, cadre de bordereau des prix et d'estimatif, planning prévisionnel). — Assister éventuellement le maître d'ouvrage pour la sélection des entreprises, analyser les offres techniques, participer à la finalisation des pièces techniques des contrats de travaux.

ÉTAPE 3 : ÉTUDES GÉOTECHNIQUES DE RÉALISATION (G3 et G 4, distinctes et simultanées)

ÉTUDE ET SUIVI GÉOTECHNIQUES D'EXECUTION (G3)

Cette mission permet de réduire les risques géotechniques résiduels par la mise en œuvre à temps de mesures correctives d'adaptation ou d'optimisation. Elle est confiée à l'entrepreneur sauf disposition contractuelle contraire, sur la base de la phase G2 DCE/ACT. Elle comprend deux phases interactives :

Phase Étude

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Étudier dans le détail les ouvrages géotechniques : notamment établissement d'une note d'hypothèses géotechniques sur la base des données fournies par le contrat de travaux ainsi que des résultats des éventuelles investigations complémentaires, définition et dimensionnement (calculs justificatifs) des ouvrages géotechniques, méthodes et conditions d'exécution (phasages généraux, suivis, auscultations et contrôles à prévoir, valeurs seuils, dispositions constructives complémentaires éventuelles).
- Élaborer le dossier géotechnique d'exécution des ouvrages géotechniques provisoires et définitifs : plans d'exécution, de phasage et de suivi.

Phase Suivi

- Suivre en continu les auscultations et l'exécution des ouvrages géotechniques, appliquer si nécessaire des dispositions constructives prédéfinies en phase Étude.
- Vérifier les données géotechniques par relevés lors des travaux et par un programme d'investigations géotechniques complémentaire si nécessaire (le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats).
- Établir la prestation géotechnique du dossier des ouvrages exécutés (DOE) et fournir les documents nécessaires à l'établissement du dossier d'interventions ultérieures sur l'ouvrage (DIUO)

SUPERVISION GÉOTECHNIQUE D'EXECUTION (G4)

Cette mission permet de vérifier la conformité des hypothèses géotechniques prises en compte dans la mission d'étude et suivi géotechniques d'exécution. Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire et est réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre ou intégrée à cette dernière. Elle comprend deux phases interactives :

Phase Supervision de l'étude d'exécution

- Donner un avis sur la pertinence des hypothèses géotechniques de l'étude géotechnique d'exécution, des dimensionnements et méthodes d'exécution, des adaptations ou optimisations des ouvrages géotechniques proposées par l'entrepreneur, du plan de contrôle, du programme d'auscultation et des valeurs seuils.

Phase Supervision du suivi d'exécution

- Par interventions ponctuelles sur le chantier, donner un avis sur la pertinence du contexte géotechnique tel qu'observé par l'entrepreneur (G3), du comportement tel qu'observé par l'entrepreneur de l'ouvrage et des avoisinants concernés (G3), de l'adaptation ou de l'optimisation de l'ouvrage géotechnique proposée par l'entrepreneur (G3).
- donner un avis sur la prestation géotechnique du DOE et sur les documents fournis pour le DIUO, précise l'influence de cet ou ces éléments géotechniques sur les risques géotechniques identifiés ainsi que leurs conséquences possibles pour le projet ou l'ouvrage existant.
- Définir, après enquête documentaire, un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Étudier un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques (par exemple soutènement, causes géotechniques d'un désordre) dans le cadre de ce diagnostic, mais sans aucune implication dans la globalité du projet ou dans l'étude de l'état général de l'ouvrage existant.
- Si ce diagnostic conduit à modifier une partie du projet ou à réaliser des travaux sur l'ouvrage existant, des études géotechniques de conception et/ou d'exécution ainsi qu'un suivi et une supervision géotechniques seront réalisés ultérieurement, conformément à l'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique (étape 2 et/ou 3).

1. Contexte général des décrets relatifs à la prévention du risque sismique et à la délimitation des zones de sismicité, des arrêtés fixant les règles de construction parasismique et de l'Eurocode 8 pour la Métropole et les DOM / TOM.

La norme NF EN 1998-1 de Septembre 2005, Eurocode 8, s'applique à la conception, au dimensionnement et à la construction de bâtiments et d'ouvrages de génie civil en zone sismique, le but étant que les vies humaines soient protégées, les dommages limités et que les structures importantes pour la protection civile restent opérationnelles en cas de séisme.

L'Eurocode 8 présente une partie 5, NF EN 1998-5 de septembre 2005, laquelle concerne les fondations, les ouvrages de soutènements et les aspects géotechniques (Indice de classement P 06-035-1).

Elle établit les prescriptions, critères et règles relatifs au choix du site et au sol de fondation, en relation avec la résistance sismique des structures.

Elle traite du dimensionnement de différents systèmes de fondation, du dimensionnement d'ouvrages de soutènement des terres, ainsi que de l'interaction sol structure sous l'effet des actions sismiques. Elle complète l'Eurocode 7 qui ne traite pas du dimensionnement parasismique.

La partie 1 de l'Eurocode 8, concerne les règles générales, les actions sismiques et les règles pour les bâtiments ; la partie 2, les ouvrages d'art ; la partie 3, l'évaluation et le renforcement des bâtiments ; la partie 4, les silos, réservoirs et canalisations et la partie 6, les tours, mats et cheminées. On notera que la norme d'application de l'Eurocode 7 aborde pour les fondations profondes (NF P 94262) des points précis du dimensionnement parasismique, points non développés par l'Eurocode 8.

Lorsque des prescriptions de dimensionnement sont particulières aux fondations de certains types de structures, il y a lieu de se reporter aux parties qui les concernent.

L'Eurocode 8 partie 5 ne présente pas les données attendues à chaque mission géotechnique pour la gestion progressive du risque sismique, au fur et à mesure de l'élaboration du projet. C'est l'objet du présent guide.

L'application des normes parasismiques nécessite de définir des mouvements sismiques de référence.

La France, Métropole et DOM-TOM, dispose d'une nouvelle réglementation parasismique, principalement définie par les textes suivants :

- Articles R563-1 à R563-8 du code de l'environnement modifiés par les décrets n° 2010-1254 et n° 2010-1255, établissant le zonage sismique, sur la base de 5 zones et la liste du niveau de sismicité des communes.
- Article D563-8-1 du Code de l'Environnement, créé par le décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010 portant sur la délimitation des zones de sismicité du territoire français et modifié par le décret n° 2015-5 du 6 janvier 2015.

La carte du zonage sismique est présentée ci-après. Elle est entrée en vigueur le 1^{er} mai 2011.

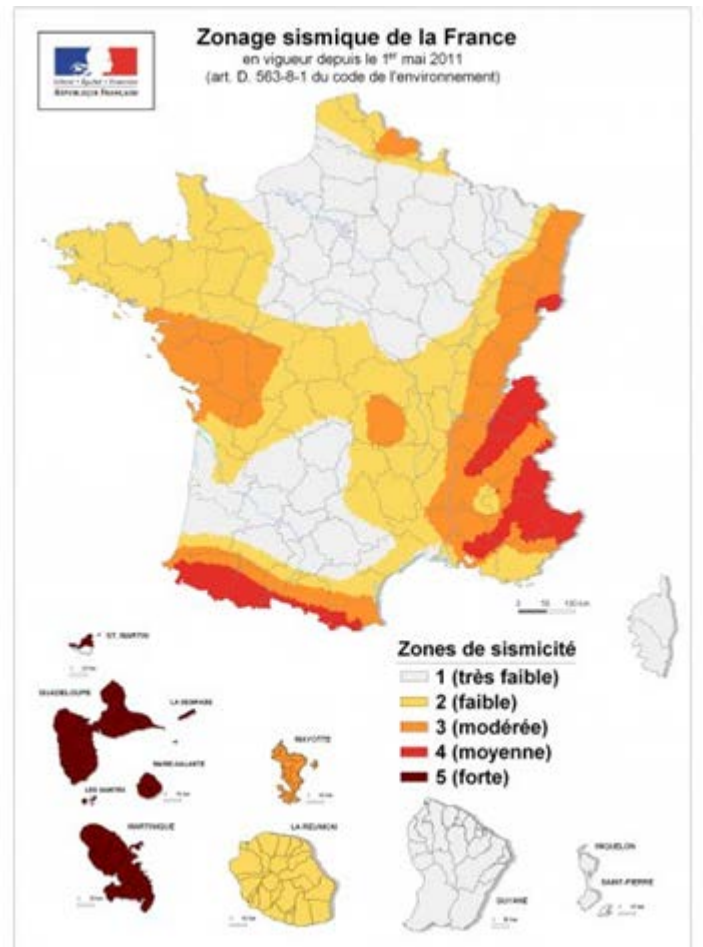


Figure 1 : Zonage sismique de la France d'après l'annexe des articles R563-1 à R563-8 du Code de l'Environnement modifiés par les Décret n° 2010-1254 et n° 2010-1255 du 22 octobre 2010 ainsi que par l'Arrêté du 22 octobre 2010

Le décret n° 2015-5 du 6 janvier 2015 a apporté les rectifications suivantes :

- la commune de VEYNES (Hautes Alpes), initialement classée en zone 4 est reclassée en zone 3,
- celle des Saintes Maries de la Mer (Bouches du Rhône) initialement classée en zone 2 est reclassée en zone 1.

Pour connaître la zone de sismicité d'une commune, il faut soit consulter l'article D563-8-1 du Code de l'Environnement, soit utiliser l'outil : "ma commune face aux risques" sur le portail prim.net.

La réglementation est également définie par un certain nombre d'arrêtés :

- arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismiques applicables aux bâtiments de la classe "à risque normal",

- arrêté du 26 octobre 2011 relatif à la classification et aux règles de construction parasismiques applicables aux ponts de la classe dite "à risque normal",
- arrêté du 24 janvier 2011 fixant les règles parasismiques applicables à certaines installations classées, dites "à risque spécial" et arrêté du 13 septembre 2013, les deux arrêtés modifiant celui du 4 octobre 2010, qui avait trait à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement et soumises à autorisation,
- arrêté du 15 septembre 2014, modifiant l'arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite à risque normal.

A noter que dans certaines communes, existe des PPR sismiques qui changent l'accélération à prendre en compte modifiant la forme des spectres de dimensionnement. Ces PPR sismiques peuvent proposer des micros zonages à l'échelle de la commune avec une pré-identification des classes de sol, de la liquéfaction et des failles.

Dans la zone 1, il n'y a pas de prescription particulière pour les ouvrages à risque normal. Dans les zones 2 à 5, les règles de construction parasismique sont applicables aux bâtiments et aux ponts à "risque normal".

Les valeurs des accélérations maximales de référence au niveau d'un sol de type rocheux sont données en mètres par seconde au carré dans le tableau n° 3.

Zone	a_{gr} (m/s²)
1	0,4
2	0,7
3	1,1
4	1,6
5	3

Tableau n° 3
Accélérations de référence au rocher.

En complément des modifications du Code de l'Environnement, le Code de la Construction et de l'Habitation (CCH) dans son article R111-38 a complété en zone sismique les articles 1, 2 et 3 par les articles 4 et 5, rendant la mission d'un contrôleur technique obligatoire :

- alinéa 4 : pour les bâtiments situés en zone sismique 4 ou 5, et dont le dernier plancher est situé à plus de 8m de hauteur (décret n° 2005-1005 du 23 août 2005),
- alinéa 5 : pour les bâtiments de catégories III ou IV, en zone de sismicités 2, 3, 4, ou 5 (décret n° 2007-1727 du 7 décembre 2007).

Les alinéas 1, 2 et 3 précisait que le contrôle technique était de toute façon obligatoire :

- alinéa 1 : pour les ERP de 1^{er}, 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} catégorie,

- alinéa 2 : pour les immeubles avec dernier plancher à plus de 28 mètres du sol (échelle de pompier),
- alinéa 3 : pour les bâtiments autres qu'à usage industriel :
 - éléments en porte à faux de portée > 20 mètres,
 - poutre ou arc de portée > 40 mètres,
 - fondations profondes de plus de 30 mètres,
 - parties enterrées sur une profondeur > 15 mètres,
 - reprises-en sous-œuvre sur plus de 5 mètres,
 - soutènement d'ouvrage voisin sur plus de 5 mètres

L'article R111.39 précise que le contrôle porte sur la solidité des ouvrages de viabilité, de fondation, d'ossature, de clos, de couvert et des équipements et sur les conditions de sécurité.

L'article R111.40 précise :

- qu'en phase de conception, le contrôleur technique procède à un examen critique de l'ensemble des dispositions techniques du projet,
- qu'en phase d'exécution des travaux, il s'assure que les vérifications techniques qui incombent à chaque constructeur s'effectuent de manière satisfaisante.

Les alinéas 4 et 5 du R111.38 entraînent la nécessité pour le maître de l'ouvrage de disposer d'attestations spécifiques du contrôleur technique (Arrêté du 10.09.2007 relatif aux attestations parasismiques).

Si le contrôle technique est obligatoire, le Code de l'Urbanisme, Article R431.16, alinéa b, spécifie que le contrôleur technique doit établir une première attestation à joindre au permis de construire attestant qu'il a fait connaître au maître de l'ouvrage son avis sur la prise en compte au stade de la conception des règles parasismiques et paracycloniques prévues par l'article L563-1 du Code de l'Environnement.

Ceci est rappelé par l'arrêté du 10.09.2007 du Code de l'Urbanisme, Article A.431.10.

A l'article A.431.11 du même arrêté, le maître d'ouvrage doit remettre au contrôleur :

- a) le projet de construction en phase de dépôt,
- b) les éléments géotechniques faisant apparaître :
 - la ou les classes de sols,
 - le site sismique,
- c) les informations permettant le classement de l'ouvrage en catégorie d'importance,
- d) une notice explicative portant sur le cheminement des charges verticales et horizontales, et sur le principe de fondation et de soutènement,

éléments devant être disponibles **avant le dépôt du permis de construire**.

L'attestation préalable s'appuie sur l'analyse préalable PS du géotechnicien du maître de l'ouvrage. Cette analyse présente :

- les éléments géotechniques faisant apparaître la ou les classes de sol et le site

sismique à partir de :

- l'étude géotechnique préliminaire de site G1, Etape 1,
 - la phase AVP de l'étude géotechnique de conception G2, Etape 2.
- les classes de sol EC8- 1 chap. 3.1 et 3.2 et EC8- 5 chap.4.2.2,
 - les spectres de dimensionnement.

Le géotechnicien par rapport au choix du site (EC8-5 chap.4.1.1. Généralités) doit s'assurer que les dangers potentiels de rupture, d'instabilités de pente, de liquéfaction, de forte susceptibilité à la liquéfaction, ont été minimisés en cas d'agression sismique.

La possibilité d'apparition de ces phénomènes doit être étudiée. L'étude doit permettre le choix des principes de fondation et de soutènement.

Une notice explicative sur le principe de fondation et de soutènement doit comporter :

- à ce stade pas de note de dimensionnement des fondations ou des soutènements,
- la présentation des principes retenus,
- la preuve qu'une réflexion pertinente a eu lieu dans l'équipe de conception.

Le contrôleur ne donnera pas d'avis en l'absence de cette note.

La notice explicative sur le cheminement des charges est à la charge du maître d'œuvre et de son bureau d'études préalablement au dépôt du permis de construire.

L'attestation préalable PS en phase permis de construire :

- vérifie que les paramètres sismiques du projet ont été correctement intégrés,
- identifie les faiblesses potentielles de l'ouvrage,
- définit les critères de justification de l'ouvrage et les méthodes acceptables pour son analyse. Lors de cette analyse, le contrôleur PS s'assure de la faisabilité du projet du point de vue des règles PS et fixe les règles du jeu par la suite,
- s'assure que les missions confiées sont adaptées aux enjeux et aléas.

Enfin, le contrôleur technique doit établir une attestation finale PS attestant que le maître d'ouvrage a tenu compte de ses avis sur le respect des règles parasismiques et para cycloniques, le contrôleur technique ayant vérifié que le projet s'est déroulé comme prévu et que les points évoqués dans l'analyse préalable ont bien été étudiés.

Nous rappelons ci-après la classification des bâtiments et des ponts définie par l'article R563-3 du Code de l'Environnement, le niveau de protection parasismique étant modulé en fonction de l'enjeu : risques pour la sécurité des personnes et risques socio-économiques, en relation avec leur défaillance.

Les bâtiments de la classe dite "à risque normal" sont répartis en quatre catégories d'importance :

- **catégorie d'importance I :** risque minime pour les personnes ou l'activité socio-économique,
- **catégorie d'importance II :** risque dit moyen pour les personnes,
- **catégorie d'importance III :** risque élevé pour les personnes et/ou en raison de leur

importance socio-économique,

- **catégorie d'importance IV** : fonctionnement primordial pour la sécurité civile, pour la défense ou pour le maintien de l'ordre public :

Elles s'appliquent aussi bien au bâti nouveau qu'au bâti existant. Dans le cas de travaux sur un bâtiment existant, la catégorie d'importance à considérer est celle du bâtiment après travaux ou changement de destination. Pour les bâtiments constitués de diverses parties relevant de catégories d'importance différentes, c'est le classement le plus contraignant qui s'applique à leur ensemble.

Dans ces catégories, sont classées les ICPE à "risque normal".

Les ouvrages à "risque spécial" regroupent certains équipements et installations, les barrages, les installations classées pour la protection de l'environnement et les installations nucléaires de base.

Concernant les ICPE à risque spécial, ce sont les usines, les ateliers, les dépôts, chantiers et, d'une manière générale, les installations exploitées ou détenues par toute personne physique ou morale, publique ou privée, qui peuvent présenter des dangers ou des inconvénients soit pour la commodité du voisinage, soit pour la santé, la sécurité, la salubrité publiques, soit pour l'agriculture, soit pour la protection de la nature, de l'environnement et des paysages, soit pour l'utilisation rationnelle de l'énergie, soit pour la conservation des sites et des monuments ainsi que des éléments du patrimoine archéologique (article L.511-1 du Code de l'Environnement).

Parmi les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), les installations classées dites "à risque spécial", sont les équipements, au sein des établissements Seveso seuil haut et seuil bas, susceptibles, en cas de séismes, de produire des effets létaux à l'extérieur des sites.

Les installations nucléaires de base sont l'objet de recommandations et de règles de sûreté spécifiques, dites règles fondamentales de sûreté (RFS), établies par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN).

Par ailleurs, un [guide « Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques »](#) a été établi pour la vérification de la sécurité vis-à-vis du [risque sismique](#) des ouvrages hydrauliques, barrages et digues.

Les ponts de la classe dite à risque normal sont classés comme suit :

- **catégorie d'importance I** : n'appartiennent pas au domaine public et ne desservent pas d'établissement recevant du public et ne sont rangés ni en catégorie d'importance III ni en catégorie d'importance IV,
- **catégorie d'importance II** : n'appartiennent pas au domaine public mais desservent un établissement recevant du public ainsi que ceux qui appartiennent au domaine public et ne sont rangés ni en catégorie d'importance III ni en catégorie d'importance IV,
- **catégorie d'importance III** :
 - les ponts qui appartiennent au domaine public et qui portent, franchissent ou longent au moins une des voies terrestres ci-après :

- autoroutes mentionnées à l'[article L. 122-1 du code de la voirie routière](#),
- routes express mentionnées à l'[article L. 151-1 du code de la voirie routière](#),
- voies à grande circulation définies à l'[article L. 110-3 du code de la route](#),
- liaisons ferroviaires à grande vitesse mentionnées au [décret du 1er avril 1992 susvisé](#),

- les ponts-canaux qui n'appartiendraient pas à la classe à risque spécial ;
- les ponts situés dans les emprises des ports maritimes et fluviaux, à l'exclusion des ports de plaisance ;
- les ponts des pistes d'aérodrome et les ponts de voies de circulation d'aéronefs situés aux abords des pistes d'aérodrome qui ne sont pas rangés en catégorie d'importance IV.

- **catégorie d'importance IV :**

- les ponts des pistes d'aérodrome ayant un code lettre C, D, E ou F au sens de l'arrêté du 10 juillet 2006 relatif aux caractéristiques techniques de certains aérodromes terrestres utilisés par les aéronefs à voilure fixe,
- les ponts des voies de circulation d'aéronefs et situés aux abords d'une piste, ayant un code lettre C, D, E ou F au sens de l'arrêté du 10 juillet 2006 cité ci-dessus,
- les ponts dont l'utilisation est primordiale pour les besoins de la sécurité civile, de la défense nationale ainsi que pour le maintien de l'ordre public. Le classement en catégorie d'importance IV est prononcé par le préfet chaque fois que l'ouvrage constitue un point essentiel pour l'organisation des secours.

Nota : tout pont nouveau définitif de catégorie d'importance II ou III dont l'endommagement pourrait provoquer des dommages à un bâtiment, un équipement ou une installation de catégorie d'importance IV reçoit le classement de pont de catégorie d'importance IV.

C'est au Maître de l'Ouvrage de définir la classe de son ouvrage et pour le maître de l'ouvrage, son ouvrage est toujours justifié terminé. Par contre, en situation intermédiaire de phase de chantier et des zones de forte sismicité, c'est au constructeur de veiller à caractériser les situations rencontrées pour ses justifications, sous le contrôle du maître d'œuvre et du géotechnicien du maître de l'ouvrage.

Les développements du corps de ce guide concernent les bâtiments, équipements et installations dits à risque normal, pour lesquels les conséquences du séisme demeurent circonscrites à leurs occupants et à leur voisinage immédiat ainsi que les ponts de la classe à risque normal.

2. Mission Etude géotechnique préalable G1

2.1 Phase "Etude de site" ES

Réalisée en amont des études préliminaires, d'esquisse ou d'APS, elle s'appuie sur une visite de site et de son environnement et une recherche documentaire : cartes géologiques, banque des données du sous-sol du BRGM, carte des carrières ou des cavités, sols gonflants, carte du zonage sismique de la France, toutes autres cartes ou études bibliographiques (ZERMOS, facultés, archives départementales,...) permettant de caractériser les risques géotechniques majeurs, sur la base d'un modèle géologique et géotechnique préliminaire.

Vis à vis du risque sismique, cette phase :

- détermine, par la localisation du projet et la carte du zonage sismique, la zone de sismicité conformément au décret n° 2010-1255 du 22/10/2010,
- vérifie la présence d'un PPR sismique communal et dans l'affirmative, introduit l'éventuelle nouvelle accélération de référence, la classe de sol sur un micro zonage, et prend en compte les informations sur la liquéfaction et les failles actives,
- caractérise le risque de présence de failles, le caractère éventuellement actif de ces failles devant être apprécié (mouvement reconnu pendant le quaternaire récent) par une recherche sur le site NEOPAL,
- appréhende les risques d'effet de site à partir des cartes topographiques,
- étudie les zones à risques d'instabilité de pente en s'appuyant sur les cartes géologiques, les PPR, les cartes ZERMOS, et les risques d'instabilités rocheuses (chutes de blocs et éboulements rocheux),
- analyse le risque de présence à faible profondeur de matériaux lâches, non saturés, sans cohésion ou d'argiles très molles présentant une possibilité de dégradation de leurs résistances au cisaillement sous l'effet de sollicitations de longue durée,
- analyse le risque de présence dans les 15 premiers mètres comptés à partir de la surface du sol de sols pulvérulents, lâches saturés susceptibles de liquéfaction, en intégrant dans la réflexion la frange capillaire à quasi-saturation ; l'approche restera très générale.

Il n'est pas possible à ce stade de donner la classe de sol (voir annexe A), laquelle permet de définir les spectres de calcul.

Si l'ouvrage n'est pas encore défini en implantation et en géométrie, même si les informations du modèle esquissé à partir de la recherche documentaire et la visite de terrain apparaissent insuffisantes, il n'est pas réalisé d'investigations.

Si l'ouvrage est par contre défini, la mission doit comporter quelques investigations géotechniques, leur suivi, leur interprétation afin de proposer un modèle permettant de réduire les risques géotechniques majeurs, au stade de cette phase ES de l'étude géotechnique préalable G1.

Les investigations peuvent alors comporter à minima des investigations géophysiques, des reconnaissances géologiques (sondages à la pelle, forages de reconnaissance géologique semi destructifs à destructifs), des essais de pénétration statique ou

dynamique, des poses de piézomètres.

Le rapport de cette phase ES doit se terminer par une proposition de programme d'investigations à réaliser au stade de la phase suivante PGC, en fonction des aléas recensés et des caractéristiques des ouvrages, définies par le maître de l'ouvrage.

La phase ES aura permis au maître de l'ouvrage de vérifier que la localisation de son projet ne pose pas de problèmes majeurs.

Si une faille est caractérisée, il est rappelé que (voir notion de catégorie d'importance à l'annexe 3) :

- pour les bâtiments de catégorie II, III et IV, il n'est pas possible de construire à moins de 10 km d'une faille active,
- que pour les bâtiments de type IV, il est nécessaire de vérifier pour des failles non actives qu'il n'y a pas eu de mouvement pendant le quaternaire récent, en se référant au site NEOPAL ou autres (facultés de géologie, bureaux spécialisés).

Il faut observer qu'une faille ne peut être réputée active que dans une zone de sismicité 5.

2.2 Phase "Principes Généraux de Construction" PGC

Après la phase Etude de Site ES, la phase définition des Principes Généraux de Construction PGC a pour objectif d'aboutir à un modèle géologique et géotechnique permettant de réaliser les études préliminaires, d'esquisse ou d'APS, en sériant au mieux, à ce stade, les risques géotechniques afin de réduire les conséquences des risques géotechniques majeurs éventuels.

Elle permet une approche de la zone d'influence géotechnique (ZIG), de caractériser des niveaux porteurs envisageables, en précisant les types de fondations correspondants, d'envisager des techniques éventuelles d'amélioration de sol.

Elle ne développe pas l'ébauche dimensionnelle des fondations envisageables.

Cette étape comporte la réalisation des investigations proposées à la phase ES, leur suivi et l'interprétation des résultats.

Le modèle géologique et géotechnique affiné doit permettre :

- d'appréhender une classe de sol probable (voir Annexe 2) par interprétation directe de profils géophysiques de type MASW ou inversion de mesures de vibrations ambiantes en réseau AVA (Ambiant Vibration Array) en gardant à l'esprit que l'interprétation de ces derniers n'est fiable que dans des situations simples de lithologie. Attention, la notion de classe de sols suppose les sols connus sur 30 m d'épaisseur. La classe ainsi proposée devra de toute façon être confirmée au stade de la mission de conception G2, à partir d'investigations spécifiques en fonction des caractéristiques du projet. Les valeurs de V_s peuvent être approchées par des corrélations avec les essais in situ.
- doit permettre de préciser certains niveaux de risques, en relation avec l'Eurocode 8 :
 - les effets de site (coefficient d'amplitude topographique),

- la stabilité des pentes (sols et roches),
- la liquéfaction,
- la susceptibilité aux tassements sous sollicitations cycliques, quand des couches étendues ou des lentilles épaisses de matériaux lâches, sans cohésion, même non saturés ou des argiles molles, sensible à la dégradation de leurs caractéristiques sous des sollicitations de longue durée, existent à faible profondeur.

Les investigations réalisées pour cette phase PGC :

- doivent être suffisamment profondes pour envisager une possibilité de fondation dans un horizon porteur recensé,
- doivent panacher forages avec essais pressiométriques, essais de pénétration de préférence statiques, piézomètres à ce stade ouverts toute hauteur en gardant à l'esprit les limites de ce type d'ouvrage, identifications sur échantillons représentatifs.

Enfin le rapport de cette phase PGC doit proposer les investigations qui s'avèrent nécessaires à l'étape d'étude géotechnique de conception G2, phase AVP.

3. Mission Etude géotechnique de conception G2

3.1 Phase Avant-Projet (AVP)

Le géotechnicien du maître d'ouvrage, à la phase AVP de la mission G2 a pour objectifs, à la charge du maître de l'ouvrage ou de son représentant, en collaboration avec la maîtrise d'œuvre ou intégré à elle :

- de rappeler les éléments caractérisés par la mission G1,
- d'affiner le modèle géologique et géotechnique et de définir les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade de l'avant-projet,
- définir les principes de construction envisageables pour les ouvrages géotechniques,
- analyser les contraintes géotechniques spécifiques aux phases transitoires de travaux,
- proposer des solutions de fondations envisageables et à ce stade plusieurs solutions peuvent être envisagées,
- développer pour chaque solution une ébauche dimensionnelle statique,
- présenter une première approche des quantités.

Le rapport permettra au maître d'ouvrage de faire le choix d'une solution constructive géotechnique pour chaque ouvrage géotechnique et servira à bâtir la note d'hypothèses de la phase suivante PRO.

La classe d'importance de l'ouvrage est une donnée du maître d'ouvrage, lequel s'appuie

sur le décret n° 2010-1254 du 22 octobre 2010.

Cette phase AVP sur le plan Eurocode 8 :

- doit permettre d'appréhender la ou les classes de sols car en fonction de l'importance en plan du projet, la classe de sol peut ne pas être unique,
- précise les niveaux de risques en relation avec l'Eurocode 8 :
 - les effets de site (coefficient d'amplitude topographique) pour chaque ouvrage géotechnique en fonction de sa localisation,
 - le risque d'instabilité de pente,
 - les risques de liquéfaction et de tassement sous sollicitations cycliques,

et définit les dispositions constructives à envisager pour garantir la stabilité et éventuellement proposer des techniques de traitement des sols en relation avec les risques caractérisés.

En fonction de l'importance de l'ouvrage, il pourra être envisagé la réalisation d'un ou plusieurs essais Cross Hole de 30 m de profondeur si le modèle bâti uniquement à partir des investigations géophysiques (MASW et AVA) et géotechniques et de corrélations n'est pas assez fiable.

Les investigations de cette phase AVP doivent permettre en cas de risque de tassements de niveaux lâches, sans cohésion, sous sollicitations cycliques, de préciser ce risque et de proposer une ébauche dimensionnelle des solutions d'amélioration de sols permettant de l'écarter.

Le nombre d'emplacements d'essais est proportionné à ce stade de proposition de plusieurs solutions de traitement pour permettre un choix concerté avec le maître d'œuvre.

Le rapport de cette phase AVP présente le programme des investigations complémentaires à envisager à la phase suivante PRO.

3.2 Phase Projet (PRO)

La phase Projet contribue à la mise au point du projet de l'ouvrage pour la part des ouvrages géotechniques.

A l'issue de la phase AVP précédente, il a été fait un choix concerté avec le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage, d'une solution constructive pour chacun des ouvrages géotechniques et un enchaînement de leur réalisation a été conçu, avec une réflexion approfondie sur les risques associés aux phases provisoires de chantier. Ces choix font l'objet d'une note d'hypothèses validée par le maître d'œuvre. En cas de modifications, il est procédé à une nouvelle phase PRO.

Le bureau d'étude de structures doit avoir transmis une descente de charges, le torseur des charges en tout point et les différents cas de charges.

Le rapport de la Phase PRO :

- présente la synthèse des hypothèses géologiques, géotechniques, hydrogéologiques et géodynamiques,
- développe pour chaque ouvrage géotechnique le choix constructif de l'ouvrage et les raisons de ce choix,
- fournit les notes de calcul statiques et géodynamiques spécifiques de dimensionnement, en considérant toutes les phases intermédiaires de construction et l'ouvrage en situation définitive,
- développe les actions à mettre en œuvre vis à vis de la ou des nappes, les dispositions adoptées pour gérer les arrivées d'eau et détaille leurs incidences sur l'environnement,
- prend en compte l'ensemble des interactions entre les ouvrages géotechniques,
- développe les études d'instabilités de pente de sols ou rocheuses, les risques de liquéfaction, les risques de tassements sous sollicitations cycliques et dimensionne les solutions de traitement,
- précise si nécessaire les dispositions de maintenance à envisager.

Sur le plan des investigations nécessaires selon l'Eurocode 7 est envisagée ici la réalisation d'investigations complémentaires éventuelles permettant de densifier la campagne, si l'importance du projet et les spécificités géologiques et géotechniques du site en font sentir le besoin : recherches d'hétérogénéités, présence de risque de cavités, comportements particuliers d'un niveau aquifère etc...

Concernant l'Eurocode 8, c'est à cette phase PRO qu'est souvent envisagée la réalisation d'un ou plusieurs essais Cross Hole, en fonction de l'importance du projet, dans la mesure où le modèle caractérisé à la phase AVP est insuffisant.

Concernant les risques de liquéfaction et de tassements sous sollicitations cycliques, ils sont précisés en extension par une densification des investigations. Dans des cas très particuliers, les risques de tassements sous sollicitations cycliques peuvent être approchés par des essais en laboratoire à l'essai triaxial cyclique. Il faut noter que ces essais demandent un temps significatif pour leur réalisation. C'est au géotechnicien de caractériser la représentativité de l'essai, eu égard à la fraction granulométrique testée et la qualité de l'échantillon souvent reconstitué.

En cas d'interactions avec la nappe sont développées les dispositions à mettre en œuvre et précisées les incidences sur l'environnement, avec des actions éventuelles de compensation.

En cas d'instabilités de pente de sols ou rocheuses (chutes de blocs ou de masses rocheuses), sont définies dans le détail les dispositions de stabilisation :

- gestion du ruissellement superficiel,
- techniques de drainage (types, implantation, profondeurs, dispositions d'entretien),
- renforcements des sols ou des structures (types, implantations, justifications, suivis si nécessaire).

Les effets de l'interaction dynamique sol – structure doivent être pris en compte pour :

- des structures, pour lesquelles les effets **P- δ** (2^{ème} ordre) jouent un rôle significatif,
- des fondations massives ou profondes, des piles de pont, des caissons offshore et des silos,
- de structures hautes et élancées, comme les tours et les cheminées,
- de structures supportées par des sols très mous, tels que les sols de la classe S1 avec V_s moyen < 100 m/s,
- des structures fondées sur pieux.

Concernant l'interaction sol – structure :

1. la classe de sol (Annexe 2), la classe d'importance de l'ouvrage (Annexe 3), la sismicité locale, permettent la définition des spectres de calcul,
2. les valeurs de G , module de cisaillement et ξ amortissement sont déterminées :
 - pour G à partir de la mesure de G_{max} par essais Cross Hole, valeurs corrigées à partir des indications du tableau ci-dessous,
 - pour ξ à partir des valeurs données dans ce même tableau,
 - pour ν coefficient de poisson par les valeurs mesurées par essais Cross Hole.

Les essais Cross Hole sont donc obligatoires pour l'interaction sol – structure. Ils peuvent être complétés par des essais en laboratoire, des essais CPT^u, des essais pressiométriques et des jeux de corrélations.

Concernant les corrections à apporter à G_{max} et les valeurs du coefficient d'amortissement ξ pour les sols de classe C ou D ($V_s < 360$ m/s), avec la nappe à faible profondeur, l'absence de sols plastiques à $I_p > 40\%$, I_p indice de plasticité, le tableau ci-dessous peut être utilisé jusqu'à 20 m de profondeur, en fonction des valeurs de αS (voir Annexe 4 pour S), α étant le rapport a_g / g :

αS	ξ	G/Gmax
0,1	0,03	0,80 +/- 0,10
0,2	0,06	0,50 +/- 0,20
0,3	0,1	0,36 +/- 0,20

Tableau n° 4

Si $a_g S$ est $< 0,1$ g l'amortissement reste égal à 0,03 ($\alpha S < 0,1$).

Pour des sols de $V_s > 360$ m/s et un niveau de nappe plus profond, l'importance de la réduction G/Gmax et de celle de la plage de variation doivent être proportionnellement plus faibles.

Concernant les justifications aux séismes, elles sont en général réalisées en situation de projet finalisé.

Il faut prendre garde aux situations intermédiaires, dans les zones à forte sismicité, en fonction de la durée du chantier.

En Phase PRO, il est nécessaire d'avoir recours à des études particulières dans des conditions de classes de sols S1 et S2 :

- pour la classe S2 la possibilité de défaillance du sol sous une action sismique doit être prise en compte,
- pour la classe S1 l'interaction dynamique sol structure doit être prise en compte (amortissement interne faible et domaine étendu du comportement linéaire induisant une amplification anormale du comportement sismique).

La Phase PRO :

- alerte les entrepreneurs sur les principaux risques mis en évidence,
- précise ceux qui demandent une vigilance particulière,
- détaille les contrôles et suivis à mettre en œuvre, compte tenu des spécificités du projet,
- peut proposer des investigations complémentaires, ciblées sur des aspects géodynamiques et géotechniques comportant encore des incertitudes, par exemple par des planches d'essais.

4. Mission Etude et suivi géotechniques d'exécution G3

4.1 Phase Etude géotechnique d'exécution

L'entreprise s'approprie la phase PRO de la mission Etude géotechnique de conception G2. Elle valide les hypothèses géotechniques et géodynamiques ou argumente sa proposition de prise en compte d'autres valeurs.

En fonction de ses moyens, elle construit le scénario de construction du projet, étape par étape et procède aux vérifications nécessaires, statiques et sous séismes, de chaque ouvrage géotechnique en phase provisoire et définitive.

Les solutions de traitement sont proposées et justifiées.

Si nécessaire, elle procède à des investigations complémentaires en vue de réduire par exemple une incertitude géotechnique. Des investigations complémentaires peuvent également être nécessaires en cas de variante. Elles sont adaptées aux problèmes géotechniques rencontrés.

Concernant les justifications aux séismes, elles sont en général faites en situation de projet achevé, sauf dans les zones à forte sismicité, et pour des chantiers de longue durée, cas où les situations intermédiaires sont analysées, en intégrant la possibilité d'occurrence d'un séisme.

4.2 Phase Suivi géotechnique d'exécution

Le géotechnicien de l'entreprise, attaché au chantier assure un suivi continu de la réalisation des ouvrages géotechniques afin de vérifier la conformité de la géologie, de la géotechnique et des situations de chantier rencontrées avec celles prévues en phase "Etude géotechnique d'exécution".

En cas d'anomalies par rapport à la géologie et la géotechnique attendues et d'anomalies par rapport aux situations prévues, l'entreprise informe le maître d'œuvre et le géotechnicien du maître de l'ouvrage de ce constat, afin que des solutions constructives adaptées soient proposées, étudiées et validées ; il peut également être amené à proposer des investigations complémentaires nécessaires à leurs justifications géotechniques.

Dans les cas à risques élevés, les solutions ont déjà été envisagées dans un plan préalable de gestion des risques.

Le géotechnicien de l'entreprise met en œuvre tous les moyens nécessaires aux suivis et contrôles, à l'avancement du chantier.

5. Mission Supervision géotechnique d'exécution (G4)

Le géotechnicien du maître de l'ouvrage :

- valide la mission G2, si ce n'est pas lui qui l'a réalisée, ce qui peut être préjudiciable, car la réalisation de la mission G2 à l'amont permet une forte implication du géotechnicien du maître de l'ouvrage dans le projet et ses orientations. En cas de désaccord, il propose de la refaire,

- contrôle la mission G3 de l'entreprise.

Il donne son avis (phase Supervision de l'étude d'exécution) :

- sur les hypothèses géotechniques et géodynamiques de justification des ouvrages pris en compte par le géotechnicien de l'entreprise. En cas de désaccord, il argumente sa position et peut demander des investigations complémentaires,
- sur les notes de calcul de chacun des ouvrages, y compris dans les phases provisoires.

Après démarrage du chantier, le géotechnicien du maître d'ouvrage supervise le chantier par interventions ponctuelles, en concertation avec le maître d'œuvre, sur la base d'un séquençement de ses interventions convenu avec celui-ci.

Il peut demander des points d'arrêts :

- si les conditions de réalisation du chantier sont différentes de celles prévues par l' "Etude géotechnique d'exécution" G3,
- si les conditions géologiques, géotechniques et hydrogéologiques se révèlent différentes de celles définies lors de l' "Etude géotechnique de conception" G2 et validées par l' "Etude géotechnique d'exécution" G3.

Il analyse et donne un avis sur les essais de contrôle produits par l'entreprise, et peut faire procéder à des contrôles spécifiques en cas de doute sur les résultats.

6. Mission G5 de Diagnostic géotechnique

Toutes missions G2, G3 ou G4 partielles n'existent pas au sens de la norme 94 500.

C'est alors une mission de diagnostic géotechnique, dont l'objet est strictement limitatif.

Un problème géotechnique ou géodynamique, bien défini, limité en volume et dans le temps est soumis à un géotechnicien, lequel s'attache à lui apporter une réponse spécifique.

ANNEXES 1

Tableaux caractérisant les objectifs, les moyens et les données à fournir à chaque étape dans les rapports des missions d'ingénierie géotechnique

ANNEXE 1.1

Mission Etude géotechnique préalable G1

Volet 1 (Tableau n° 5)

Maîtrise progressive de l'aléa géotechnique et géodynamique

ETAPE 1		Mission	Etude géotechnique préalable G1	Etude géotechnique préalable G1
		Phase	Phase étude de site ES	Phase principes généraux de construction PGC
Objectifs			Détermination de la zone de sismicité. Risque de présence de faille active. Risque d'effet de site. Risque d'instabilités de pentes. Risque d'instabilités rocheuses. Risque de présence de sols tassant sous sollicitations cycliques. Risques sur 15m de liquéfaction.	Réduire les conséquences des risques géotechniques majeurs. Aboutir à un modèle géologique et géotechnique permettant les études préliminaires d'esquisse ou d'APS, caractériser les niveaux porteurs préciser les types de fondations envisageables. Envisager d'éventuelles techniques d'amélioration de sol.
Moyens	Prestations humaines et analyses		Visite du site et son environnement. Recherche documentaire. Carte topographique, relevés d'affleurement sommaires.	Relevés d'affleurements détaillés s'ils existent.
	Essai pénétrométrique		Statique CPT ou dynamique.	Oui CPT
	Essai pressiométrique		/	Oui
	SPT		/	/
	Carottage		/	/
	Piézomètre		Oui, ouverts tout hauteur.	Oui, ouverts toute hauteur.
	Géophysique		Oui.	Oui à adapter.
	Laboratoire		/	Identification des sols.
	Sondages mécaniques		Pelles, tarières, destructifs.	Pelles mécaniques, tarières, destructifs.
	Maillage		Pas de sondages si ouvrage non défini sinon membre limité.	A adapter au projet.
Données à fournir dans le rapport			Vérifier que la localisation du projet ne pose pas de problèmes majeurs. Proposer des investigations de niveau G1, PGC.	Appréhender une classe de sol probable. Préciser certains niveaux de risque : - effet de site - stabilité des pentes : sols et roches - liquéfaction, - tassement sous sollicitations cycliques. Propositions d'investigations de niveau G2.

ANNEXE 1.2
Mission Etude géotechnique de conception G2
Volet 2 (Tableau n° 6)
Maîtrise progressive de l'aléa géotechnique et géodynamique

ETAPE 2		Mission	Etude géotechnique de conception G2	Etude géotechnique de conception G2
		Phase	Phase Avant-Projet AVP	Phase Projet PRO
Objectifs			<p>Affiner le modèle géologique. Définir les hypothèses géotechniques. Définir les principes de constructions envisageables pour les ouvrages géotechniques. Analyser les contraintes géotechniques des phases transitoires. Proposer des solutions de fondations. Développer leur ébauche dimensionnelle. Présenter une première approche des quantités.</p>	<p>A partir d'une note d'hypothèses convenues avec le maître d'oeuvre: Développer pour chaque ouvrage le choix constructif. Fournir les notes de justifications géotechniques. Développer les actions à mettre en oeuvre vis à vis des nappes. Prendre en compte les phases provisoires. Préciser les dispositions de maintenance.</p>
Moyens	Prestations humaines et analyses		Examen spécifique du site : relevés de des affleurements à la boussole de géologue. Suivi piézométrique.	Suivi piézométrique.
	Essai pénétrométrique		Oui CPT.	CPTu
	Essai pressiométrique		Oui	Oui
	SPT		/	Oui
	Carottage		Oui	Oui
	Piézomètre		Oui avec lanternes spécifiques.	Oui avec lanternes spécifiques.
	Géophysique		/	Cross Hole, MASW, méthode H/V, autres.
	Laboratoire		Identification.	Triaxial cyclique, colonne résonante éventuellement.
	Sondages mécaniques		Pelles mécaniques pour points spécifiques.	
	Maillage		Suivant recommandations USG.	Suivant recommandations USG. A adapter aux difficultés soulevées.
Données à fournir dans le rapport			<p>Proposer un éventail de choix de solutions constructives pour les ouvrages géotechniques avec ébauches dimensionnelles. Appréhender la ou les classes de sol. Préciser les effets de site, les risques d'instabilités de pente, les risques de tassements sous sollicitations cycliques et de liquéfaction. Proposer les solutions de traitement des sols à envisager. Proposer une campagne de niveau G2 PRO.</p>	<p>Etude de détail de dimensionnement des ouvrages géotechniques. Préconisation des systèmes de gestion de la ou des nappes. Etude du risque de liquéfaction. Evaluation du risque de densification des sols. En cas d'instabilités de pente ou rocheuses, définition des dispositions de confortation. Fourniture des paramètres sismiques. Alerter les entrepreneurs sur les risques demandant une vigilance particulière. Détailler les contrôles et suivis à mettre en oeuvre.</p>

ANNEXE 1.3
Missions G3 et G4
Volet 3 (Tableau n° 7)
Maîtrise progressive de l'aléa géotechnique et géodynamique

ETAPE 3		Mission	Etude et suivi géotechniques d'exécution G3	Supervision géotechnique d'exécution G4
Objectifs			<p>Compléter les données disponibles par des investigations géotechniques adaptées à la ZIG des ouvrages projetés.</p> <p>Valider les hypothèses géotechniques statiques et dynamiques de la mission G2 ou en justifier d'autres.</p> <p>Justifier et dimensionner les ouvrages géotechniques.</p> <p>Vérifier les données géotechniques en phase d'exécution.</p> <p>Assurer un suivi continu de réalisation géotechnique et de contrôle.</p>	<p>Avis sur l'étude de projet géotechnique G2 si ce n'est pas lui qui le réaliser.</p> <p>Avis sur l'étude géotechnique d'exécution.</p> <p>Avis sur le suivi d'exécution.</p>
Moyens	Prestations humaines et analyses	<p>Oui, en fonction du besoin et des compléments à apporter aux investigations réalisées lors des missions antérieures G1 et G2.</p> <p>Essais spécifiques pour la stabilité des pentes.</p> <p>Relevé de détail des affleurements rocheux à l'avancement des terrassements.</p> <p>Essais spécifiques pour la liquéfaction, les tassements sous sollicitations cycliques.</p>	En fonction des besoins éventuels.	
	Essai pénétrométrique			
	Essai pressiométrique			
	SPT			
	Carottage			
	Piézomètre			
	Géophysique			
	Laboratoire			
	Sondages mécaniques			
	Maillage			
Données à fournir dans le rapport		<p>Validation des hypothèses géotechniques.</p> <p>Notes justificatives de définition et de dimensionnement des ouvrages géotechniques.</p> <p>Notes justificatives de dimensionnement des dispositions de gestion de la ou des nappes.</p> <p>Notes justificatives de traitement ou de confortement des sols.</p> <p>Rapports de suivi géotechnique.</p>	Notes d'observations.	

ANNEXE 2

NOTION DE CLASSE DE SOL

L'Eurocode 8, à partir de la description du profil stratigraphique, sur 30 m d'épaisseur, et à partir de la vitesse V_{s30} , moyenne harmonique des vitesses des ondes de cisaillement sur 30 m d'épaisseur

$$\frac{H}{V_{s30}} = \sum_i \frac{h_i}{V_{si}}$$

(H_i épaisseur de la i ème couche de vitesse V_{si}), définit 7 classes de sol, conformément au tableau ci-dessous. L'épaisseur est comptabilisée à partir de l'arase inférieure des fondations sauf pour les pieux où c'est l'arase supérieure. Pour les soutènements, c'est le profil des terres soutenues qui définit l'origine des profondeurs.

Classe de sol	V_{s30} (m/s)	Description type du profil stratigraphique
A	> 800	Au plus 5 mètres de sols compacts sur rocher ou sol induré ou roche tendre
B	360 – 800	Dépôts raides de sables, de graviers ou d'argile sur-consolidée, de plus de 5 mètres d'épaisseur, sur rocher ou sol induré ou roche tendre
C	180 – 360	Dépôts profonds de sable de densité moyenne, de graviers ou d'argile moyennement raide, de plus de 20 mètres d'épaisseur
D	< 180	Dépôts de sol sans cohésion de densité faible à moyenne (avec ou sans couches cohérentes molles) ou comprenant une majorité de sols cohérents mous à fermes (de plus de 20 mètres d'épaisseur)
E	180 – 650	Profil de sol comprenant une couche superficielles d'alluvions avec des valeurs de V_s de classe C ou D et une épaisseur comprise entre 5 m et 20 m, reposant sur un matériau plus raide avec $V_s > 800$ m/s
S_1	/	Dépôts composés, ou contenant, une couche d'au moins 10 m d'épaisseur d'argiles molles / vases avec un indice de plasticité élevé ($I_p > 40$ %) et une teneur en eau importante
S_2	/	Dépôts de sols liquéfiables d'argiles sensibles ou tout autre profil de sol non compris dans les classes A à E ou S_1

Tableau n° 8

La V_{s30} peut être estimée par corrélations avec les essais in situ ou les essais en laboratoire et peut être mesurée par des essais de type CROSS HOLE, MASW ou par inversion de mesures de vibrations ambiantes en réseau.

Concernant les essais in situ, les valeurs des paramètres étant fonction du niveau de saturation des sols, les valeurs significatives des paramètres doivent être mesurées à l'état saturé, pour que les corrélations proposées soient pertinentes.

Concernant V_s , il est rappelé que : $V = \sqrt{\frac{g}{\rho_h} G_m a}$

V_s (m/s), g (m/s^2) accélération de la pesanteur, ρ_h poids spécifique humide, à la teneur en eau de rétention (kN/m^3), G_{max} (en kN/m^2).

La connaissance de l'évolution de la valeur de G_{max} , avec la profondeur, sur 30 mètres permet d'estimer la variation de V_s et donc la V_{s30} .

ANNEXE 3
Bâtiments et ouvrages d'art à risque normal
Coefficients d'importance γ_I
Accélération de calcul a_g

L'accélération horizontale de calcul a_g au rocher doit prendre en compte la catégorie d'importance de l'ouvrage :

$$a_g = \gamma_I a_{gr}$$

Les catégories d'importance et les valeurs de γ_I sont rappelées ci-après :

Catégorie d'importance	Bâtiments	γ_I
I	Bâtiments d'importance mineure pour la sécurité des personnes, par exemple, bâtiments agricoles, etc.	0,8
II	Bâtiments courants n'appartenant pas aux autres catégories.	1
III	Bâtiments dont la résistance aux séismes est importante compte tenu des conséquences d'un effondrement, par exemple : écoles, salles de réunion, institutions culturelles, etc.	1,2
IV	Bâtiments dont l'intégrité en cas de séisme est d'importance vitale pour la protection civile, par exemple : hôpitaux, casernes de pompiers, centrales électriques, etc.	1,4

Tableau n° 11

Catégorie d'importance	Ouvrages d'art à "risque normal" Zone de sismicité 2 à 5	γ_I
I	N'appartient pas au domaine public et ne desservent pas d'établissement recevant du public et ne sont rangés ni en III ni en IV.	Pas d'application des règles sismiques
II	Soit n'appartiennent pas au domaine public mais desservent un établissement recevant du public. Soit ponts du domaine public mais ni en III ni en IV.	1
III	Pont du domaine public qui portent franchissement ou longent une autoroute, route express, voie à grande circulation, LGV, pont canaux, pont dans port, dans pistes d'aérodromes sauf rangé en catégorie IV.	1,2
IV	Ponts des pistes d'aérodromes ayant un code C, D, E, ou F. Pont classés IV par le préfet, tout pont II ou III pouvant endommager un bâtiment de classe IV.	1,4

Tableau n° 12

En zone de sismicité 1, il n'est pas fait application des règles sismiques.

L'accélération verticale de calcul au niveau d'un sol de type rocheux, a_{vg} , peut être estimée à partir des suggestions du tableau suivant :

Zone de sismicité	a_{vg} / a_g
1 à 4	0,9
5	0,8

Tableau n° 13

Les valeurs de calcul des forces sismiques d'inertie, F_H et F_V , agissant sur la masse des sols, dans les directions horizontales et verticales respectivement, dans les analyses pseudo-statiques sont données par les relations :

$$F_H = 0,5 \times \alpha \times S \times W$$

$$F_V = + 0,5 F_H \text{ si } a_{vg} / a_g \text{ est supérieur à } 0,6$$

$$F_V = + 0,33 F_H \text{ s'il est inférieur}$$

Où W : poids de la masse en mouvement

S : coefficient multiplicateur précisé par l'Annexe 4

α : rapport de la valeur de calcul de a_g et de g accélération de la pesanteur, a_g étant corrigé par un coefficient d'amplification topographique S_r , donné par l'annexe D.

αS est appelé le coefficient d'accélération du sol.

ANNEXE 4
Coefficient multiplicateur S
lié à la classe du sol

L'Eurocode 8 a décidé de se baser sur la valeur maximale notée a_{gr} et de définir les spectres comme les spectres enveloppes des deux directions horizontales. Cette approche est cohérente avec la plupart des lois d'atténuation développées récemment pour le contexte européen. a_{gr} est calé sur les sols très raides, de type rocheux (classe A). Pour tenir compte de l'effet de site lié à la nature des sols, a_{gr} est amplifiée par un coefficient multiplicateur S dépendant du type de site, appliqué au spectre normalisé de la classe A.

Classe de sol	S (pour les zones de sismicité 1 à 4)	S (pour la zones de sismicité 5)
A	1	1
B	1.35	1.2
C	1.5	1.15
D	1.6	1.35
E	1.8	1.4

Tableau n° 14

Accélération spectrale S suivant la classe de sol (selon l'arrêté du 22/10/2010)

ANNEXE 5

Coefficient d'amplification topographique S_T

Pour les structures importantes ($\gamma_I > 1$), il y a lieu de tenir compte des effets d'amplification topographique.

Le nouveau règlement introduit des coefficients multiplicateurs S_T dit d'amplification topographique qui tiennent compte du fait que certains bâtiments se situent en bord de crête. Ces coefficients varient de 1 à 1,68 et peuvent donc majorer les efforts sismiques jusqu'à 68 %.

Ils sont considérés, en première approximation, comme indépendants de la période fondamentale de vibration et, par là même, multiplient par un facteur constant les ordonnées du spectre de réponse élastique de calcul donné dans l'EN 1998-1:2004. Il convient d'appliquer ces coefficients d'amplification de préférence lorsque les pentes font partie d'irrégularités topographiques bidimensionnelles comme les buttes et versants longs, de hauteur supérieure à environ 30 m.

Pour des inclinaisons moyennes des terrains en pente, inférieures à environ 15°, les effets topographiques peuvent être négligés. Pour des inclinaisons plus importantes, les indications suivantes sont applicables :

- a) Versants et pentes isolés : il convient d'utiliser une valeur $S_T \geq 1,2$ pour les sites situés à proximité de la crête,
- b) Buttes dont la largeur de la crête est notablement inférieure à la largeur à la base : il convient d'utiliser une valeur $S_T \geq 1,4$ à proximité de la crête des pentes dont l'angle d'inclinaison moyen est supérieur à 30°, et une valeur $S_T \geq 1,2$ pour les angles inférieurs,
- c) Présence d'une couche lâche en surface : il convient d'augmenter la valeur de S_T , donnée en (a) et (b), d'au moins 20 %,
- d) Variation spatiale du coefficient d'amplification. On peut admettre que la valeur de S_T décroît linéairement, en fonction de la hauteur au-dessus de la base du versant ou de la butte, jusqu'à valoir un à la base.

En général, l'amplification sismique décroît rapidement à l'intérieur de la butte. C'est pourquoi les effets topographiques à considérer pour les analyses de stabilité sont plus importants et restent pour la plupart superficiels le long des crêtes de buttes ; ils sont beaucoup plus faibles dans le cas de glissements de terrain profonds pour lesquels les surfaces de rupture passent à proximité de la base du versant. Si dans ce dernier cas la méthode d'analyse pseudo-statique est utilisée, les effets topographiques peuvent être négligés. »

ANNEXE 6

Spectres de calcul définissant l'action sismique pour une analyse élastique

L'action sismique peut être représentée par des spectres en accélération horizontale et verticale ou par des spectres en déplacement.

a. Représentation de l'action sismique par des spectres de réponse élastique en accélération

Le mouvement dû au séisme, à la surface du sol, est schématisé par trois spectres de réponse élastique en accélération.

L'action sismique horizontale est caractérisée par deux composantes orthogonales réputées indépendantes et représentées par le même spectre.

Pour les trois composantes, plusieurs formes de spectre peuvent être envisagées en fonction de la distance des sources sismiques et de leurs magnitudes.

Pour les spectres, en situation d'être en limite de classes, il sera pris le spectre enveloppe.

1.1 Spectre de réponse élastique horizontale en accélération $S_e(T)$

Le spectre de réponse élastique horizontal $S_e(T)$ est formulé mathématiquement de façon unique pour l'Europe, à l'aide des paramètres suivants :

- T_B : limite inférieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante,
- T_C : limite supérieure des périodes correspondant à ce palier,
- T_D : valeur définissant le début de la branche à déplacement spectral constant,
- S : paramètre du sol,
- η : coefficient de correction de l'amortissement ($\eta = 1$ pour 5 % d'amortissement visqueux),

$\eta = \sqrt{10 / (5 + \xi)}$ où ξ est le coefficient d'amortissement visqueux en %,

$a_g = \gamma_1 \cdot a_{gr}$, où a_{gr} est l'accélération maximale de référence au niveau d'un sol de classe A.

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right]$$

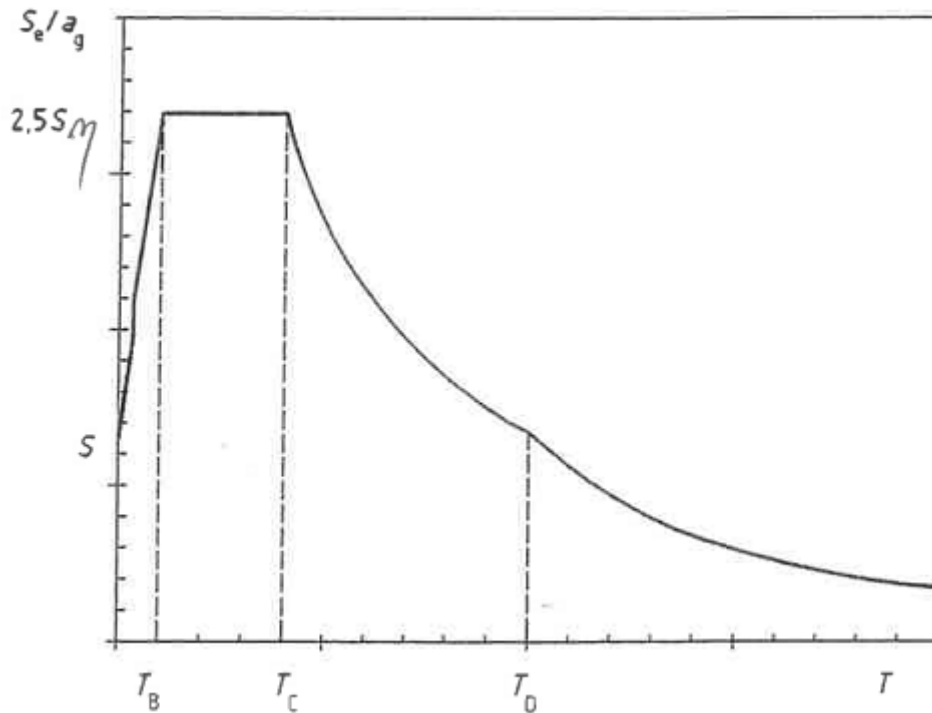


Figure n° 2

Forme du spectre de réponse élastique

Les valeurs des paramètres décrivant les spectres de réponse élastique horizontale en accélération sont données par le tableau ci-dessous (arrêté du 22.10.2010).

CLASSES DE SOL	Pour les zones de sismicité 1 à 4			Pour les zones de sismicité 5		
	T_B	T_C	T_D	T_B	T_C	T_D
A	0,03	0,2	2,5	0,15	0,4	2
B	0,05	0,25	2,5	0,15	0,5	2
C	0,06	0,4	2	0,2	0,6	2
D	0,1	0,6	1,5	0,2	0,8	2
E	0,08	0,45	1,25	0,15	0,5	2

Tableau n° 15

Ainsi, on constate que :

- plus les couches sont meubles, plus l'amplification est élevée à période égale,
- l'amplification relative du site D par rapport au site A atteint pratiquement 3 pour des oscillateurs (bâtiments, château d'eau, etc.) de période égale à 1 s,
- la période T_C de « coin » du spectre se déplace vers la droite quand on passe de sol rocheux à sol meuble.

Il apparaît clairement qu'ignorer les conditions de sol et site peut conduire à de grandes sous-estimations de l'action sismique.

1.2 . Spectre de réponse en accélération élastique verticale

La composante verticale de l'action sismique est représentée par un spectre de réponse élastique $S_{ve}(T)$.

Cette valeur est donnée par les formules suivantes :

$$0 \leq T \leq T_B : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 3,0 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_{ve}(T) = a_{vg} \cdot \eta \cdot 3,0 \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right]$$

L'accélération verticale a_{vg} est une fraction de l'action horizontale, définie au tableau ci-dessous ainsi que les valeurs recommandées des paramètres décrivant le spectre de réponse élastique vertical.

Zone de sismicité	a_{vg} / a_g	T_B	T_C	T_D
1 (très faible) à 4 (moyenne)	0,9	0,03	0,20	2,5
5 (forte)	0,8	0,15	0,40	2

Tableau n° 16

Conformément à l'arrêté du 19 juillet 2011 pour les bâtiments de la classe dite à risque normal.

Le spectre de réponse vertical de calcul est donné par les expressions du spectre horizontal de calcul avec :

- l'accélération de calcul du sol dans la direction verticale a_{vg} à la place de a_g ,
- $S = 1,0$

1.3 . Ductilité de la structure, modification des spectres

On dit "ductile" une structure qui peut subir sans perte de résistance des déformations plastiques alternées. La ductilité peut avoir une influence positive sur l'économie d'un projet, car :

- la structure ductile est capable de subir avec succès le même déplacement qu'une structure qui répondrait de façon purement élastique, mais elle atteint ce résultat avec des éléments structuraux de section moindre,
- les sollicitations à la fondation sont réduites.

Cette capacité à se déformer plastiquement sans perte de résistance est traduite par l'attribution d'un "coefficient de comportement", q dans l'Eurocode 8, dont la valeur dépend du type de structure résistante. Le coefficient q intervient comme réducteur du spectre élastique $S_e(T)$ lors de la définition du spectre de calcul $S_d(T)$. La réduction est comprise entre 1,5 pour les structures peu dissipatives et 6 pour les structures très dissipatives. Le facteur q permet de tenir compte de la capacité de déformation plastique d'une structure (plus une structure dissipe de l'énergie d'oscillation, meilleur sera son comportement) tout en effectuant une analyse purement élastique sous un spectre $S_d(T)$.

Le spectre de calcul horizontal $S_d(T)$ est la représentation de l'action sismique la plus couramment utilisée dans l'analyse des ossatures de bâtiments. Il est basé sur le spectre élastique $S_e(T)$, mais il intègre aussi l'influence de certains aspects de la réponse des structures, en particulier, la capacité de dissipation d'énergie de la structure dans des déformations plastiques, via le « coefficient de comportement q ».

Le spectre de calcul $S_d(T)$ horizontal de réponse en accélération est formulé de façon unique pour l'Europe, à l'aide des paramètres suivants :

S, T_B, T_C, T_D et a_g ,

β qui est un coefficient fixant la limite inférieure des ordonnées du spectre (valeur recommandée $\beta = 0,2$).

On obtient ainsi :

$$0 \leq T \leq T_B : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

$$T_D \leq T : S_d(T) \begin{cases} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

Concernant le spectre de réponse verticale en accélération :

- on substitue a_{vg} à a_g
- S est pris égal à 1
- q est $\leq 1,5$ pour tous les matériaux et tous les systèmes structuraux.

1.4 . Spectre de réponse élastique en déplacement

La diminution du déplacement spectral pour des valeurs élevées de la période n'est pas représentée sur le spectre en pseudo-accélération. Cependant est introduit en annexe à l'Eurocode 8 un spectre de réponse élastique exprimé en déplacement qui définit une période limite T_E à la zone à déplacement spectral constant. Au-delà de T_E , le déplacement spectral décroît jusqu'à une période T_F à partir de laquelle il devient égal au déplacement maximal du sol. En principe, des périodes aussi élevées (supérieures à T_E) ne peuvent correspondre qu'à des structures exceptionnelles, extrêmement souples (par exemple des ponts suspendus de grande longueur) et les valeurs spectrales correspondantes ne sont donc pas d'usage courant.

Jusqu'à la période de contrôle T_E , les ordonnées du spectre de réponse élastique en déplacement $S_{De}(T)$ sont obtenues à partir des expressions du spectre de réponse élastique en accélération $S_e(T)$:

$$S_{De}(T) = S_e(T) \left[\frac{T}{2\pi} \right]^2$$

Pour des périodes de vibration au-delà de T_E , les ordonnées du spectre de réponse élastique en déplacement sont données par :

$$T_E \leq T \leq T_F : S_{De}(T) = 0,025 a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D \left[2,5\eta + \left(\frac{T - T_E}{T_F - T_E} \right) (1 - 2,5\eta) \right]$$

$$T \geq T_F : S_{De}(T) = d_g$$

Avec :

d_g : déplacement de calcul,

(le déplacement d_g calcul au niveau du sol d_g peut être estimé par : $d_g = 0,025 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C \cdot T_D$).

Les valeurs des périodes T_E et T_F sont données dans le tableau ci-dessous.

Type de sol	T_E (s)	T_F (s)
A	4,5	10,0
B	5,0	10,0
C	6,0	10,0
D	6,0	10,0
E	6,0	10,0

Tableau n° 17

périodes T_E et T_F du spectre de déplacement (séisme de type 1, lointain de MS $\geq 5,5$)

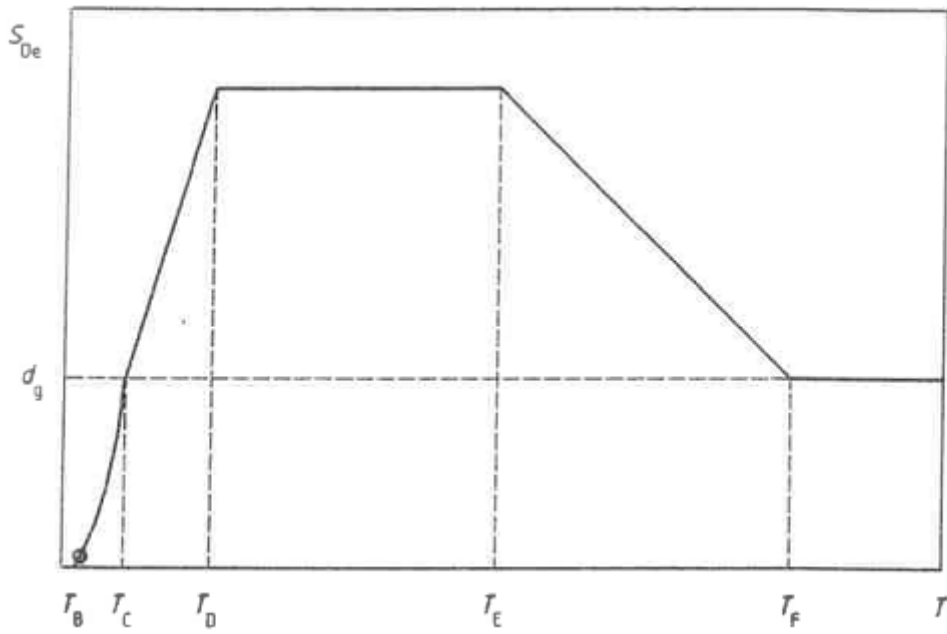


Figure n° 3

Spectre de réponse élastique en déplacement

ANNEXE 7

Références :

- Code de l'Environnement, Articles R563-1 à R563-8
- Décret n° 91-461 du 14 mai 1991 modifié relatif à la prévention du risque sismique codifié aux articles R563-1 à R563-8 du Code de l'Environnement,
- Site LEGIFRANCE : www.legifrance.gouv.fr
- Site BRGM : www.planseisme.fr, didacticiel de la réglementation parasismique,
- Guide du METL-MEDDE explicitant le champ d'application et les principes de l'Eurocode 8 dans sa partie dédiée aux éléments non structuraux du cadre bâti,
- Eurocode 8, norme NF EN 1998-1 de Septembre 2005,
- Eurocode 7, norme NF P94-262,
- Norme NF P94-500, missions d'ingénierie révisée en Novembre 2013,
- Règles simplifiées PS-MI 89, révisées 1992 en zones de sismicité 3 et 4,
- Règles CP-MI Antilles en zone 5,
- Règles parasismiques PS 92 (jusqu'au 1^{er} janvier 2014).

Principaux textes législatifs :

Textes généraux et bâtiments à risque normal.

- [Article R123-2 du code de la construction et de l'habitat](#)
- [Article R123-19 du code de la construction et de l'habitat](#)
- [Articles R563-1 à R563-8 du Code de l'Environnement](#) relatifs à la prévention du [risque sismique](#)
- [Arrêté du 29 mai 1997 \(abrogé\)](#) relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicable aux bâtiments de la catégorie dite « à risque normal »
- [Arrêté du 22 octobre 2010 modifié](#) relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal »
- [Décret no 2010-1254 du 22 octobre 2010](#) relatif à la prévention du [risque sismique](#)
- [Décret no 2010-1255 du 22 octobre 2010](#) portant délimitation des zones de [sismicité](#) du territoire français
- [Arrêté du 19 juillet 2011](#) modifiant l'arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal »

- [Arrêté du 25 octobre 2012](#)
modifiant l'arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal »
- [Arrêté du 15 septembre 2014](#)
modifiant l'arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal »

Installations classées :

- [Article L511-1 du code de l'environnement](#)
- [Arrêté du 4 octobre 2010](#)
relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation
- [Arrêté du 24 janvier 2011](#)
fixant les règles parasismiques applicables à certaines installations classées
- [Arrêté du 13 septembre 2013](#)
modifiant l'arrêté du 4 octobre 2010 relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation
- [Arrêté du 19 mai 2015](#)
modifiant l'arrêté du 4 octobre 2010 relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation