



Direction Départementale de
l'Équipement de la
Guadeloupe



Direction Régionale de l'Environnement
GUADELOUPE

Document d'information à l'usage du constructeur - **VOLUME 2**
Conçu par Mme Patricia BALANDIER

LE SEISME, LES SOLS ET LES FONDATIONS

TRAITEMENTS ET PRINCIPES DE MISE EN ŒUVRE
(OUVRAGES À RISQUE NORMAL)

**Comment répondre aux problèmes spécifiques des
fondations en zone sismique.**



La fondation d'un bâtiment en zone sismique demande la maîtrise du comportement du sol et des fondations à proprement parler. Ici les semelles isolées et le sol instable sont un exemple de double facteur aggravant la vulnérabilité des superstructures en zone sismique (Document P. Balandier).

Doit-on avoir une approche spécifique des fondations en zone sismique?

Oui. Elles sont l'interface entre le sol avec lequel elles se déplacent et la superstructure qui subit les forces d'inertie. Outre les charges verticales qu'elles transmettent ordinairement s'ajoute l'action horizontale du séisme. Le sol lui-même est susceptible de se déformer, voire de perdre sa cohésion.

Quelle approche spécifique des fondations en zone sismique?

Les géotechniciens décrivent le comportement prévisible des sols en cas de secousses (déformations, tassements, glissements, amplification des ondes de certaines fréquences).

Les architectes et les ingénieurs en tiennent compte pour le projet en général et les fondations en particulier.

La puissance publique en tient compte pour les règlements d'urbanisme qui peuvent interdire certains sites à la construction ou prescrire des fondations spéciales !

Ce 2ème volume du cours de construction parasismique porte sur les traitements des sols susceptibles de tasser et les spécificités des fondations propres aux zones sismiques. On y trouvera également un glossaire général au § 9.

Il doit être abordé en ayant pris connaissance des fascicules précédents, notamment le premier fascicule qui décrit les éventuels problèmes de déformation des sols en cas de séisme. Mais également en sachant comment se comportent les structures dont elles assurent la transmission des charges dynamiques aux sols (autres fascicules).

Les règles de construction parasismique se substituent ou complètent les règles générales qui ne seront pas rappelées ici.

PREVOIR EN S'APPUYANT SUR LES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES

C'est possible aujourd'hui. Ca ne l'était pas il y a cinquante ans :

- Prévoir les déformations permanentes des sols.
- Identifier les mises en œuvres appropriées à chaque type de sol en fonction de son comportement dynamique.

Ce Fascicule nous donne, sous la forme de 8 « questions – réponses », des explications sur les phénomènes et nous permettra de comprendre que la réglementation s'appuie sur des connaissances objectives.

LES REGLES SONT LA POUR NOUS PROTEGER.

ELLES EVOLUENT AVEC L'AVANCEMENT DES CONNAISSANCES.

COMPRENONS-LES. RESPECTONS-LES.

1. Quels sont les problèmes de sol à vérifier avant de construire en zone sismique ?

Zones de failles (PS-92, § 4.11)

"Sauf nécessité absolue, aucun ouvrage ne doit être édifié au voisinage immédiat d'une zone faillée reconnue active". La présence et l'activité d'une faille doivent être estimée par des études spécifiques (géotechnique, géophysique...). Toutefois aux Antilles, la configuration physique des failles intraplaques (superficielles) et surtout leurs faibles longueurs ne devrait engendrer que des magnitudes limitées (<6,5) et des déplacements maximum de 20 à 30 cm. L'interdiction de construction de bâtiments au voisinage des failles reconnues comme actives ne concernera que les classes C et D, mais pas les classes B, d'enjeu plus limité.

Sols susceptibles de tasser

Les sols reconnus comme pouvant tasser sous l'effet des séismes doivent faire l'objet d'attentions particulières : étude préalable, évaluation des phénomènes possibles, traitement éventuel ou si nécessaire éviction du site.

Quel que soit le mode de fondations envisagé, les sols susceptibles de tasser devraient être traités en zone sismique.

Cas des sols potentiellement liquéfiables

Les règles PS 92 définissent formellement les critères à déterminer pour établir un diagnostic de sol susceptible de liquéfaction. A ce titre les études géotechniques finales avant réalisation doivent proposer un diagnostic sans équivoque.

Les PPR (Plans de Prévention des Risques) ou cartes de microzonages mentionnent les zones potentiellement liquéfiables étendues. Ces documents sont conservatifs en l'absence d'études précises site par site sur tous les secteurs urbanisés ou équipés en zone sismique. L'étendue réelle des sites vraiment concernés sera réduite après études.

Dans l'état actuel des choses, les essais réalisés pour chaque projet peuvent permettre l'économie des fondations spéciales dans bien des cas en révélant la non-susceptibilité des sols à la liquéfaction. Dans le cas contraire, elles permettent de préciser les caractéristiques de fondations.



A gauche - Tassement du sol sous l'effet d'un phénomène de liquéfaction. La présence de fondations descendues au bon sol a permis d'éviter à la citerne de basculer. Néanmoins, le type de liaison entre les têtes de

pieux et l'ouvrage les rend vulnérables à l'action horizontale d'une réplique violente. Séisme de Kobé, 1995 (Document EERI)

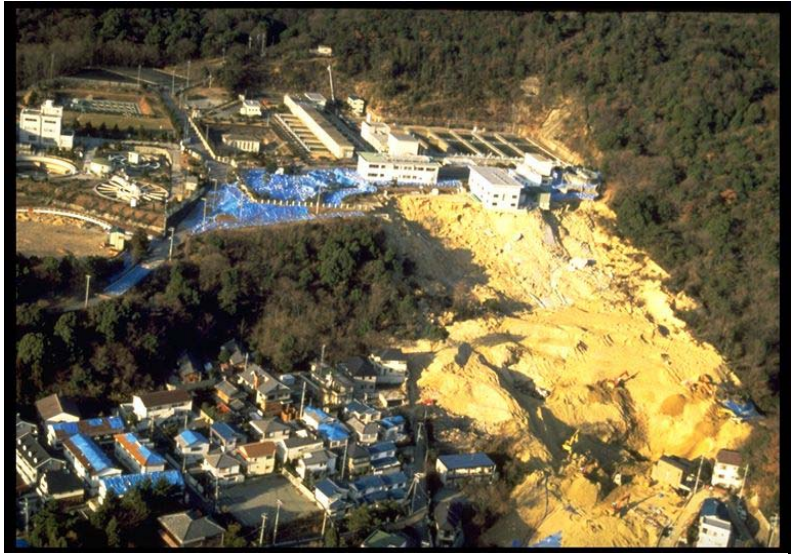
A droite - Photo d'un immeuble sur radier ayant basculé sous l'effet du tassement de sol consécutif à un phénomène de liquéfaction. Dans ce cas, les fondations ne descendaient pas au delà de la zone liquéfiable. Une couche supérieure d'argile de résistance mécanique apparemment suffisante pour un radier peut dissimuler une couche liquéfiable plus profonde. Séisme de Taiwan (Document EQIIS)



Instabilité des pentes :

"Il doit être vérifié que les talus et versants naturels restent stables sous l'action du mouvement de calcul compte tenu des charges apportées par les constructions, et dans leur configuration définitive"(PS-92, § 9.2)

Topographie, nature des sols, accélérations possibles retenues pour l'aléa régional de la zone, régimes hydrauliques, sont les éléments retenus pour les études géotechniques visant à déterminer le possible effet induit qu'est le glissement de terrain.



Il existe des solutions techniques pour le soutènement des talus potentiellement instables (PS-92 - § 10), mais il faut éviter de construire sur toutes les zones concernées par les mouvements de terrain de grande amplitude (proche amont, pente et aval).

Les grands mouvements de terrain peuvent en général être identifiés avant la catastrophe. Il ne faut plus aménager ce type de zones. (Séisme de Kobé, 1995, Document EQIIS)

Zones de karst et cavités (terrains rocheux fracturés) :

Les sols rocheux fracturés, les sols rocheux présentant des karsts et des cavités doivent faire l'objet d'attentions particulières afin de rendre au terrain un monolithisme compatible avec l'action sismique.

Les zones karstiques sont bien identifiées par la cartographie géologique, mais la localisation des accidents du sol est totalement aléatoire et nécessite une identification précise sous chaque élément de fondation, la rupture du plafond d'une cavité ou la modification d'une faille pouvant entraîner des déplacements relatifs du plan de fondation inacceptables.

La détection des cavités et autres anomalies karstiques est délicate, le coût et les conséquences éventuelles peuvent être limités si, la position des fondations étant connue, il est possible de réaliser des forages systématiques sous chaque appui avant démarrage des travaux.

Identification des caractéristiques dynamiques des sols :

En plus des phénomènes induits destructeurs, failles actives, liquéfaction, instabilité des pentes, l'aléa local est modifié (souvent aggravé) par certaines caractéristiques topographiques et géologiques du site. Les effets de site qui sont susceptibles d'augmenter la réponse spectrale de certains ouvrages :

- bord de falaise
- rupture de pente
- vallée encaissée
- hétérogénéité géologique
- sols meubles de grande épaisseur

2. Quelles reconnaissances géotechniques des sols en zone sismique ?

Généralités :

Les reconnaissances et études géotechniques effectuées normalement pour les sites non sismiques sont complétées en situations sismiques pour :

- détecter les formations *à priori* suspectes de liquéfier
- détecter les zones susceptibles de tasser
- détecter les zones faillées susceptibles de se désarticuler
- définir le classement du site S_0 , S_1 , S_2 ou S_3 pour le choix du spectre de réponse par identification des types de sols et de leurs épaisseurs.

Groupes de sols définis par les règles PS-92 :

4 types de sols :

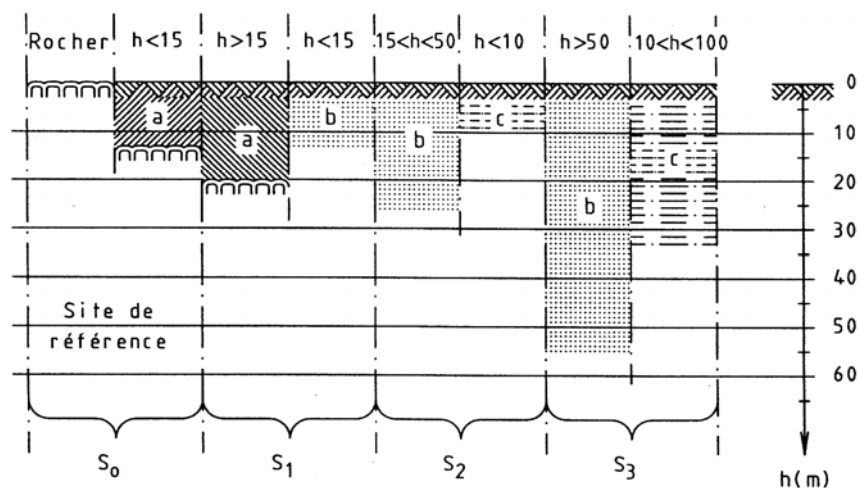
TYPE DE SOL		Pénétrô- mètre Statique : résis- tance (Mpa)	SPT Nombre de coups	Pressiomètre		Résis- tance Compres- sion simple (Mpa)	Densité relative (%)	Indice de compres- sion Cc	Vitesse des ondes de cisail- lement (m/s)	Vitesse des ondes longitudinales	
				Module (Mpa)	Pression limite (Mpa)					Sous la nappe (m/s)	Hors nappe (m/s)
ROCHERS	Rochers sains et craies dures			> 100	> 5	> 10			> 800		> 2 500
GROUPE a	Sols granulaires compacts	> 15	> 30	> 20	> 2		> 60		> 400	> 1 800	> 800
	Sols cohérents (argiles ou marnes dures)	> 5		> 25	> 2	> 0,4		< 0,02			> 1 800
GROUPE b	Rocher altéré ou fracturé			50 à 100	2,5 à 5	1 à 10			300 à 800		400 à 2 500
	Sols granulaires moyennement compacts	5 à 15	10 à 30	6 à 20	1 à 2		40 à 60		150 à 400	1 500 à 1 800	500 à 800
	Sols cohérents moyennement consistants et craies tendres	1,5 à 5		5 à 25	0,5 à 2	0,1 à 0,4		0,02 à 0,10			1 000 à 1 800
GROUPE c	Sols granulaires lâches	< 5	< 10	< 6	< 1		< 40		< 150	< 1 500	< 500
	Sols cohérents mous (argiles molles ou vases) et craies altérées	< 1,5	< 2	< 5	< 0,5	< 0,1		> 0,10			

- **Rocher sain**
- **Sols de bonne résistance** (Sables et graviers compacts, marnes et argiles raides)
- **Sols de résistance moyenne** (Rochers altérés, sables et gravier de compacité moyenne, marnes et argiles de raideur moyenne)
- **Sols de faible résistance** (Sables et graviers lâches, argiles molles, craies altérées, vases)

Détermination des sites S_0 , S_1 , S_2 et S_3 pour le choix des spectres de réponse :

Les profils de sol sont représentés sur le schéma ci-dessus. Un spectre peut être plus défavorable qu'un autre dans une certaine bande de périodes et plus favorable dans une autre bande.

Classification PS-92 des sites selon le groupe de sol et son épaisseur au dessus du rocher



Niveaux d'investigation en fonction de l'avancement du projet :

Au moment des études de faisabilité et de l'avant-projet

Dégrossir les problèmes rencontrés, en tirer les conséquences techniques et financières induites par les traitements éventuels des sols et les techniques de travaux de terrassement, de soutènement et de fondations.

Programme léger permettant de déterminer la configuration générale de la zone à étudier (présence d'eau, zone liquéfiable, tassements, instabilité des pentes, karsts, etc.)

- Etudes de documents existants (pour les éventuels chantiers voisins)
- Cartes et documents spécialisés
- Sondages complémentaires

Au moment du Projet et du Dossier de Consultation des Entreprises

Définir parfaitement les caractéristiques de toutes les couches de sol concernées avant d'arrêter le mode de fondations, les techniques de travaux, les traitements éventuels.

Au moment de l'exécution des travaux

Des reconnaissances complémentaires éventuelles doivent confirmer les hypothèses des études préalables.

- Reconnaissances approfondies si des doutes subsistent sur les couches sous-jacentes surtout en cas de contraintes élevées
- Sondages destructifs systématiques sous appuis isolés sur sol rocheux.

Moyens de reconnaissance :

Les campagnes de reconnaissance doivent être soigneusement préparées et évolutives.

Elles ne doivent pas faire l'objet de concessions. Les reconnaissances et les conclusions sont affaires de spécialistes. Les conseils de spécialistes locaux qui ont une connaissance expérimentale de la région sont souvent appréciés et souhaitables.

Les procédés de reconnaissance sont nombreux, le choix est fonction de l'ouvrage projeté (type, utilisation, importance, sous-sol, etc), des conditions géologiques et géotechniques, du voisinage (modes de fondations des ouvrages voisins ou mitoyens, nature et profondeur, etc.), et également du degré d'avancement du projet :

Les essais in situ permettent de déterminer les caractéristiques des sols en place (cohésion, cisaillement, indices de vides, résistivité, etc.).

Des prélèvements d'échantillons sont réalisés pour des essais en laboratoire.

Les essais dynamiques permettent d'identifier :

- Modules d'élasticité et de cisaillement dynamique
- Taux d'amortissement critique
- Pressions interstitielles
- Mesure in situ de la vitesse de propagation des ondes de volume à partir de forages (crosshole, downhole, uphole)

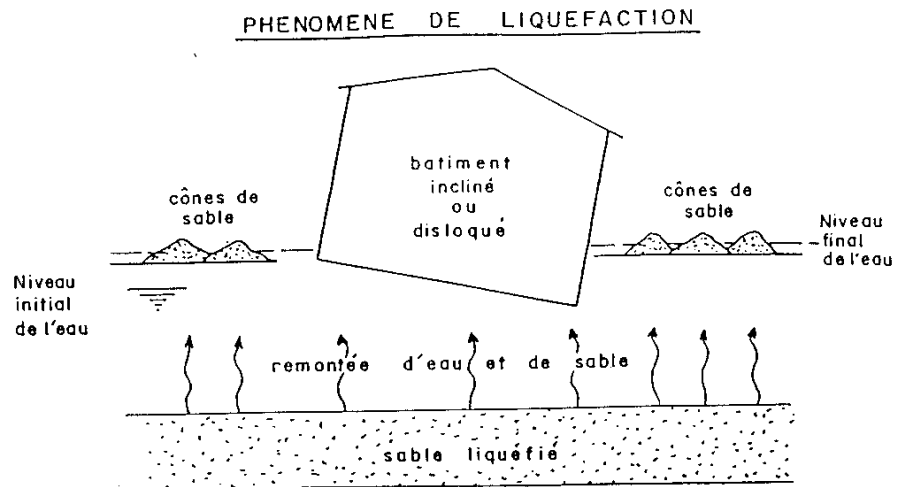
Chaque type d'essai a son propre domaine d'application et n'a de valeur que s'il est correctement exécuté et interprété :

- Reconnaissances superficielles par sondages manuels ou à la pelle mécanique
- Carottages avec prise d'échantillons pour des reconnaissances plus profondes
- Prospection électrique, sismique réfraction
- Sondages destructifs avec enregistrements des paramètres (avec sondage carotté de corrélation)
- Pressiomètre
- SPT (Standard Penetration Test), pénétromètre dynamique
- Pénétromètre statique, etc.

3. Cas des sols liquéfiables ?

Comment savoir ?

Les Atlas communaux des risques et les PPR indiquent les sites suspects de liquéfaction. Dans ce cas des études confirment ou non cette suspicion. Rappelons que les règles PS-92 développent de façon détaillée (article 9.1) les paramètres de la liquéfaction des sols, l'identification des zones liquéfiables et les méthodes d'essais. Ce problème est une affaire de spécialiste.



Peut-on traiter ?

Avant d'opter pour un type de fondations il est parfois nécessaire de procéder à une amélioration des caractéristiques du sol.

Liquéfaction d'une parcelle de sol non traité (Séisme de Kobé, 1995) (Document EQIIS – USA)

Le bâtiment n'a pas souffert car les fondations sur puits traversaient la couche liquéfiée, mais son environnement, dont les VRD doivent être repris



Tassement modeste d'une parcelle de sol traité dans le même quartier (Séisme de Kobé, 1995) (Document EQIIS – USA)

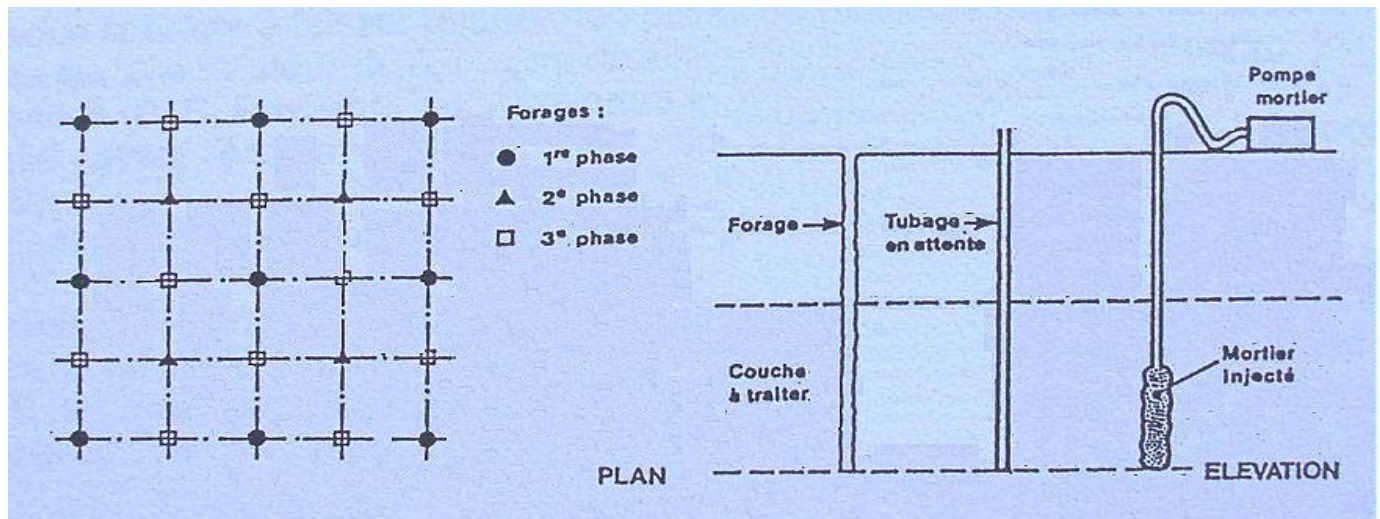
Le tassement est minime. Le traitement préventif a permis de limiter le tassement et de protéger la zone des dommages graves.

4. Quelques procédés de consolidation des sols (liquéfiables ou seulement médiocres)

Dans le cas de la liquéfaction, le but est d'éliminer un des paramètres de la liquéfaction (il les faut tous pour provoquer le phénomène). Les méthodes seront présentées très sommairement ici.

Consolidation statique : injection :

Méthode souvent utilisée dans les terrains sableux, limoneux, ou argileux, humides ou saturés. La technique consiste à introduire, sous pression dans le sol à partir de forages répartis selon des mailles primaires et secondaires, un « mortier » visqueux à base de ciment. But : **augmenter le niveau de contrainte entre les grains du sol** jusqu'à sortir le sol des critères rendant possible le phénomène. La nature du mortier injecté (plus ou moins "fluide", à base de ciment avec adjuvants éventuels, dépend de l'état préalable du terrain,) assure la pérennité du traitement effectué.



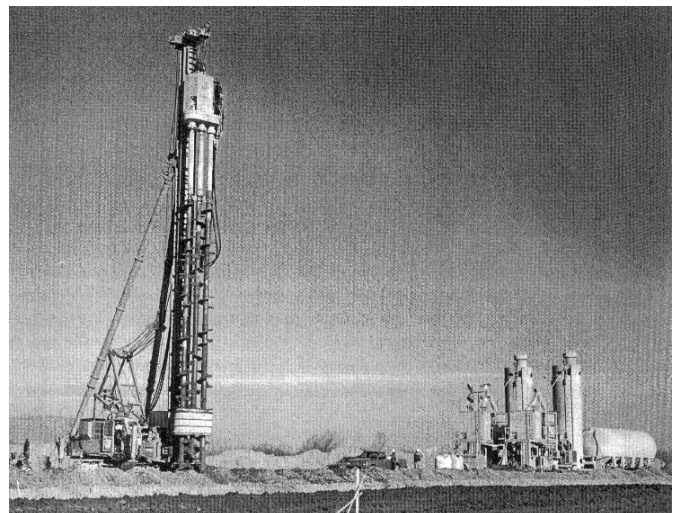
Maillage d'injections en trois phases :

1- **Forage** de la première phase (permet une reconnaissance supplémentaire du sol)

2- **Injection** (au moyen de tubes à manchettes) de la première phase en étudiant la réaction du terrain. Cette méthode d'injection permettant de contrôler parfaitement le volume injecté pour une tranche de profondeur déterminée

3- **Poursuite des injections** avec surveillance géotechnique continue en évaluant le rapport d'amélioration des caractéristiques (module de déformation, pression limite, etc.) en veillant à ce que les paramètres d'injection restent toujours inférieur au seuil de rupture.

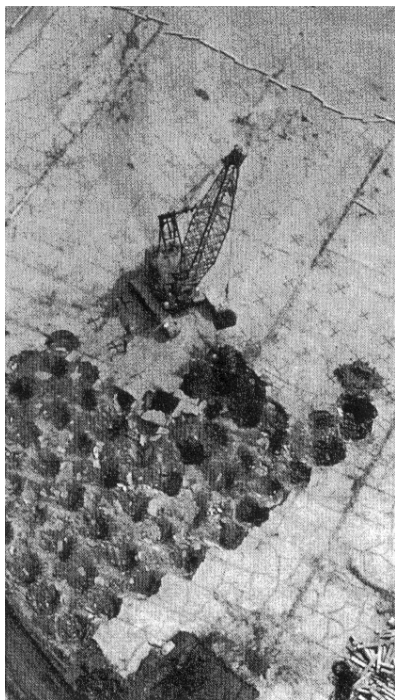
Foreuse pour injections



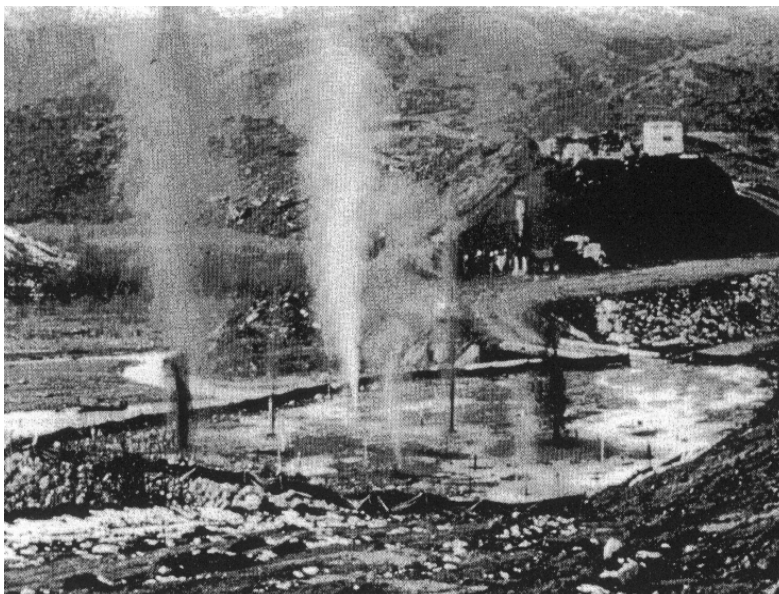
Consolidation dynamique :

Méthode applicable à une grande variété de sols, mais pas pour tous les sites.

La technique consiste à laisser tomber des pilons de plusieurs dizaines de tonnes, en chute libre sur une hauteur de plusieurs dizaines de mètres. Le choc engendre des trains d'ondes qui améliorent le sol. But : **provoquer le tassement sans attendre le séisme**. Le traitement améliore la cohésion des sols et élimine aussi un facteur de liquéfaction (densification du sol). L'inconvénient de cette technique est que les trains d'ondes peuvent agir sur plusieurs centaines de mètres à la ronde, ce qui ne permet l'utilisation de cette méthode que comme traitement préventif d'espaces vastes et libres d'occupation avant aménagement ou urbanisation. En outre elle nécessite l'intervention d'engins lourds.



*Consolidation dynamique : Pilonnage
(compactage SOLETANCHE)*



Consolidation dynamique Explosifs : autre possibilité qui ne peut pas être utilisée n'importe où pour provoquer le tassement des sols avant aménagement de la zone.

Substitution en surface :

Lorsque la profondeur de terrain à traiter est faible, inférieure à 3 ou 4 mètres, on peut envisager de réaliser la substitution par un autre matériau.

La méthode consiste à terrasser par phases à la pelle mécanique jusqu'à la profondeur voulue et à mettre en place par gravité du matériau de substitution (ballast, gros béton). Dans ce cas, le critère de liquéfaction éliminé est la granulométrie défavorable du sol.

Les règles PS 92 §9.6 précisent le domaine d'application et les dispositions générales concernant les traitements par sols substitués compactés pour les remblais artificiels sur site terrestre et les remblais maritimes de hauteur inférieure à 10 m :

- Choix et confinement des matériaux
- justificatifs, contrôles

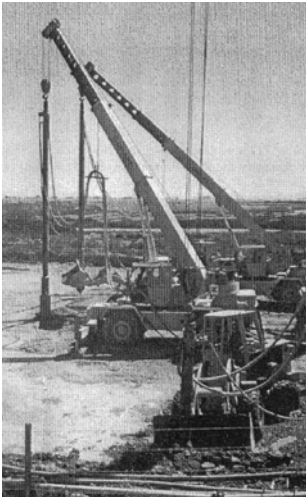
Fondations sur sols substitués compactés :

Les règles PS-92 précisent les exigences de mise en place et vérification (§ 9.6).

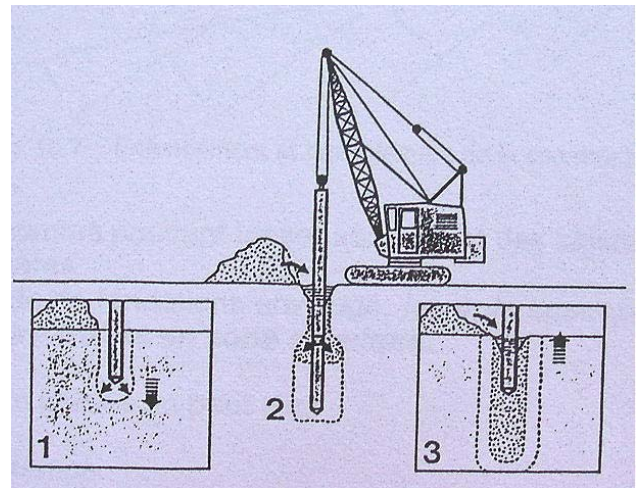
Compactage par vibroflotation :

Méthode applicable aux **sols granulaires non cohérents** tels que sables et graviers.

Principe de l'injection de matériaux par vibroflotation



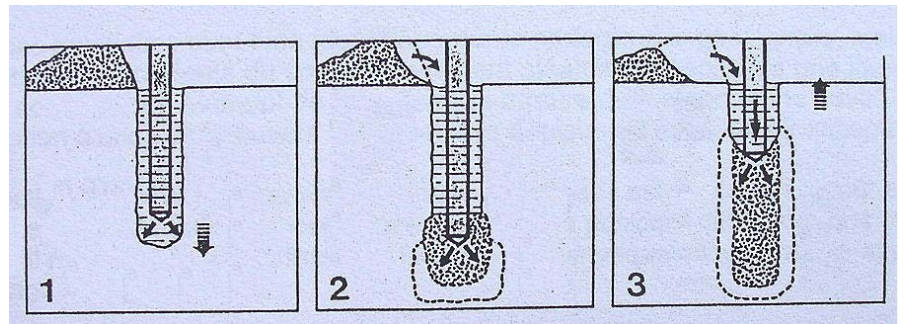
La technique consiste à descendre dans le sol un vibreur manipulé par une grue, qui sous son propre poids, et sous l'influence d'un lançage d'eau et des vibrations, atteint les profondeurs souhaitées. Ensuite, **dans la cavité ainsi créée dans le sol incohérent, mise en place de matériau d'apport sable ou gravier, sans retrait de sol.** L'opération est répétée selon un maillage prédéfini



(maillage plus large que pour les injections). L'inconvénient de cette méthode est également l'intervention d'engins lourds (incompatible avec la plupart des zones urbaines). Elle ne permet pas le contrôle "pas à pas" comme pour les injections. En outre elle ne permet pas de traiter les mauvais sols profonds (plafond de l'ordre de 20m). Dans ce cas, le maillage créé sur le site par les colonnes de matériaux de granulométrie incompatible avec la liquéfaction, suffit à drainer le sol de la zone qui est protégée.

Substitution par vibrosubstitution : colonnes ballastées :

Cette méthode est applicable aux **terrains cohérents tels que limons et argiles** lorsque la profondeur de terrain à traiter est trop importante, supérieure à 4 mètres, pour une substitution en surface.



La technique consiste à descendre dans le sol un vibreur manipulé par une grue, qui sous son propre poids, et sous l'influence du lançage d'eau et des vibrations, atteint les profondeurs souhaitées. On élimine au fur et à mesure les boues qui remontent en surface pour la substitution du sol. Puis, le vibreur retiré, il y a mise en place de matériau d'apport à gros grains et compactage à nouveau avec le vibreur. L'opération est répétée selon un maillage prédéfini. Le maillage créé sur le site par les colonnes de matériaux de granulométrie incompatible avec la liquéfaction, suffit à drainer le sol de la zone qui est protégée.

Préchargement :

Si les délais le permettent, pour limiter le coût des interventions précédentes (injection, vibroflotation), les terrains à traiter peuvent être au préalable préchargés.

Préchargement d'un sol à Pointe-à-Pitre (photo P. Balandier)



5. Généralités sur les systèmes de fondations en zone sismique

Les sollicitations :

En plus des charges verticales de pesanteur, des actions du vent, des poussées des terres, et des poussées hydrostatiques, l'action sismique engendre sur les fondations des efforts :

- horizontaux directs (efforts tranchants, composante horizontale)
- verticaux directs (composantes verticales)
- verticaux induits (moments de renversement)
- des déplacements imposés (tassements différentiels, mouvements de sol)

Les principes constructifs selon les règles PS-92 :

Le problème des fondations en zone sismique est caractérisé par le fait que l'action dynamique venant du sol, il est fondamental de liasonner entre eux les éléments de fondations de la structure porteuse.

- ***Choix du système de fondations :***

Le choix du système de fondation, moyennant quelques précautions (limitation de pente), est effectué dans les mêmes conditions qu'en situation non sismique (PS 92 §4.32).

- ***Homogénéité du système de fondations :***

La fondation d'un ouvrage doit constituer un système homogène pour une même unité (PS 92 §4.31). L'action du séisme ne doit pas être aggravée par un comportement non homogène au niveau des fondations. La problématique est rendue plus complexe par les fortes pentes et les sols non homogènes.

- ***Solidarisation des points d'appui :***

Les points d'appui d'un même bloc de construction, sauf prise en compte dans les calculs des déplacements, sauf encastrement dans sol rocheux, doivent être solidarisés par un réseau bidimensionnel de longrines tendant à s'opposer à leur déplacement relatif dans le plan horizontal. (PS 92 §4.33)

- ***Liaisonnement avec la structure :***

Dans le cas de fondations profondes, sauf cas particuliers, il doit être établi entre la structure et ses fondations une liaison tendant à s'opposer à leur déplacement relatif. (PS-92, § 4.34)

6. Quelles particularités pour les fondations superficielles ?

Dispositions générales :

Les fondations superficielles sont employées lorsque le "bon sol", sol compact et homogène, se trouve à faible profondeur par rapport au plancher le plus bas.

Elles sont réalisées en béton armé selon le DTU 13.1 qui fixe les différentes modalités de calculs, d'exécution et de contrôle.

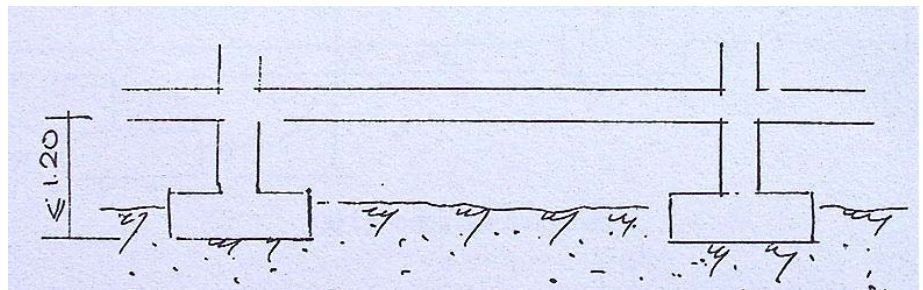
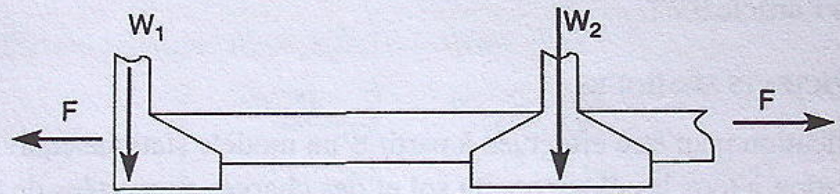
Semelles isolées - semelles filantes - radiers partiels :

Lorsque les dimensions des fondations sont sensiblement moins importantes que les distances séparant les éléments porteurs (descentes de charges modestes sur sol moyen, descentes de charges élevées sur sol rocheux, etc.), on utilise généralement des semelles isolées sous les poteaux et des semelles filantes sous les murs.

Les semelles sont alors reliées par un système de liaisons parasismiques (longrines, dallage renforcé) situé à moins de 1.20 m au dessus de la sous-face des semelles.

Par exemple : la fonction de longrine de redressement.

Liaisons entre les semelles (PS-92). Le réseau de liaisons PS s'oppose aux déplacements différentiels des points d'appui.



Radier général porteur :

Lorsque les dimensions des fondations calculées sont relativement importantes par rapport aux distances séparant les éléments porteurs, on utilise généralement un système de radier général sous poteaux et murs. Le radier fait fonction également de système de liaisons parasismiques en éliminant les déplacements différentiels horizontaux au niveau des fondations. Le calcul d'un radier en zone sismique est délicat :

- rigidité
- charges différentes sur les éléments porteurs
- calcul des tassements,
- attention aux sols hétérogènes

Précautions vis à vis des constructions avoisinantes :

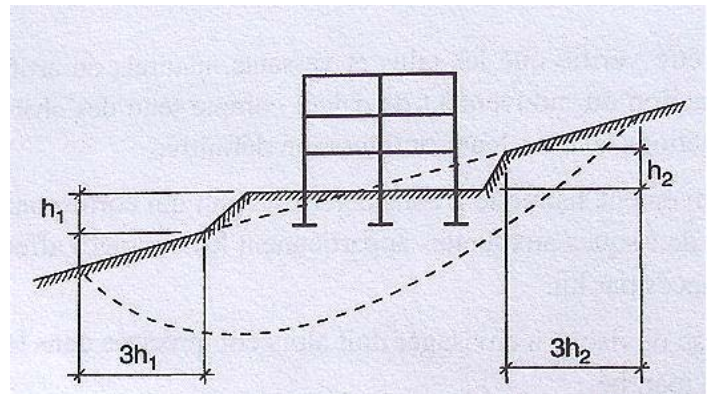
Attention, le système de fondations projeté ne doit pas apporter des contraintes supplémentaires aux ouvrages avoisinants existants (murs d'infrastructure, fondations)

7. Quelles précautions pour les constructions sur terrain en pente (stable) ?

Vérification de la stabilité du talus et des zones sollicitées :

Les fondations en amont ne doivent pas solliciter les fondations en aval (dépendant de l'angle de pente et de la nature du sol).

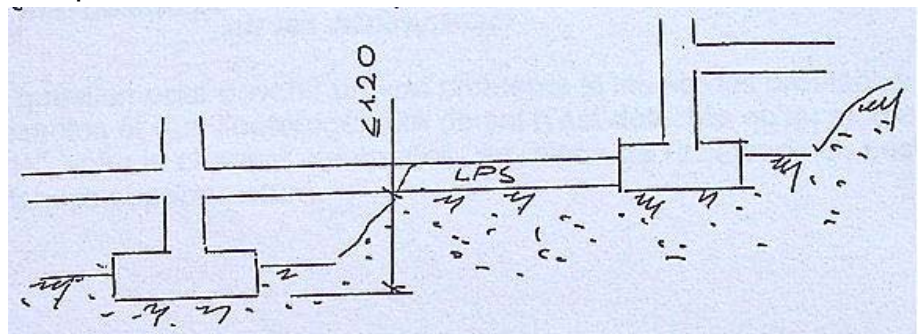
Stabilité des pentes - Détermination des zones d'influence pour les surfaces de glissement les plus critiques (PS-92)



Liaison des semelles isolées en cas de pente :

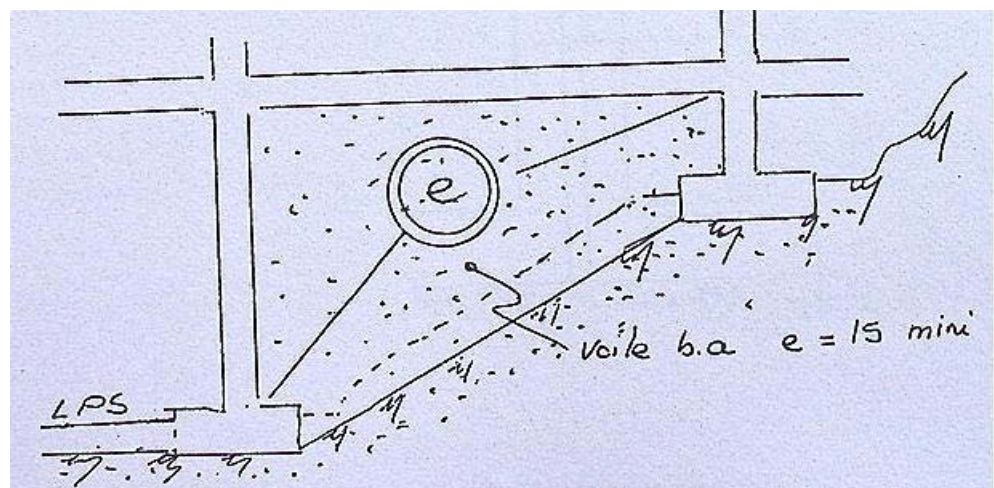
Les semelles situées à des niveaux différents doivent être liaisonnées ce qui est plus délicat à réaliser que sur sol plat ou à faible pente.

Liaison des semelles situées sur des niveaux différents par des longrines si la différence de hauteur d'implantation est inférieure à 1,20m



Liaison des semelles isolées en cas de niveaux différents :

Liaison des semelles situées sur des niveaux différents par des voiles si la différence de hauteur d'implantation est inférieure à 1,20m. Dans ce cas, seul un voile peut garantir la cohésion nécessaire entre les différentes semelles.



5. Quelles spécificités pour les fondations profondes ?

Dispositions générales :

Les fondations profondes sont employées lorsque les couches superficielles de terrain sont de qualité médiocre.

Elles sont réalisées selon le DTU 13.2 qui fixe les différentes modalités de calculs, d'exécution et de contrôle.

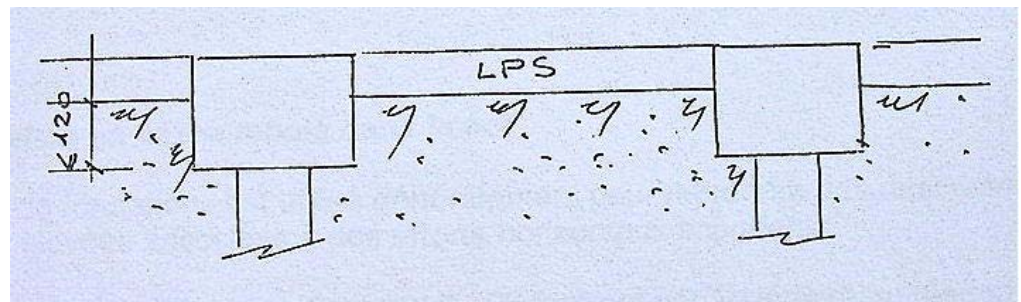
Suivant la géométrie de la construction, l'environnement, les descentes de charge et les caractéristiques et la profondeur du sol d'assise on utilise les types de fondations profondes suivantes :

- Puits
- Pieux et barrettes
- Micro-pieux

Liaisons entre les fondations :

Les massifs isolés des éléments de fondations profondes doivent être reliés par un système de liaisons parasismiques (longrines, dallage renforcé) situé à moins de 1.20 m au dessus de la sous-face des massifs.

Liaison parasismique des massifs isolés en tête de fondations profondes par des longrines



Puits :

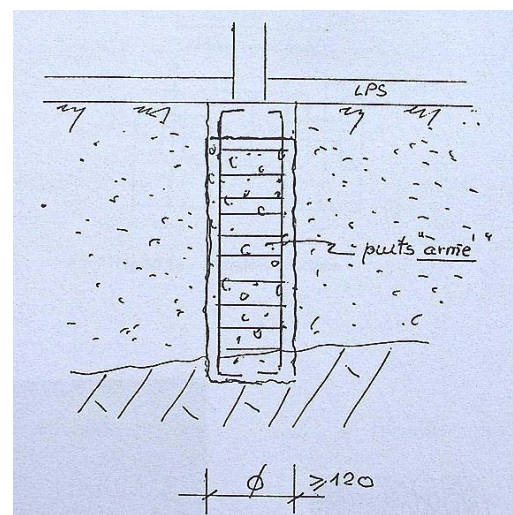
Solution qui ne nécessite pas de matériel spécialisé, peu coûteuse si profondeur modeste.

Ce type de fondations n'est utilisé généralement que lorsque le sol d'assise n'est qu'à quelques mètres de profondeur. Les puits sont creusés "à la main" et nécessitent la présence d'hommes au fond du forage. Les parois du forage sont blindées. Le forage est bétonné à sec. Contrairement à leur emploi en zone non sismique, les **puits sont obligatoirement armés en zone sismique**.

L'article 9.324 des règles PS fixe les modalités de réalisation des puits (définition forfaitaire des armatures).

N-B : Les puits d'élançement inférieur à 6 (longueur / diamètre) sont des fondations semi-profondes. Ils ne peuvent pas fléchir contrairement aux pieux

En zone sismique les puits profonds sont obligatoirement armés



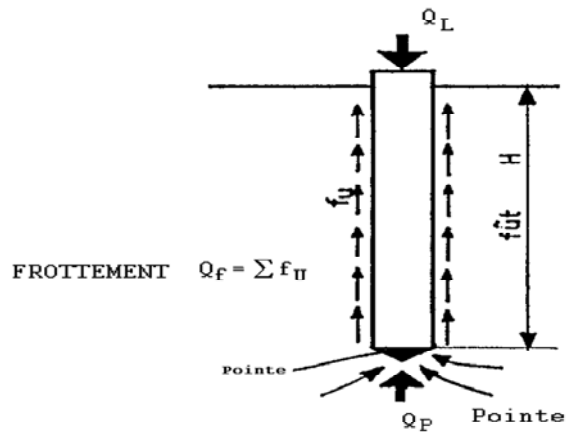
Généralités sur les pieux :

Lorsque le sol de fondation ne peut être atteint en profondeur que par des moyens spécialisés on utilise des pieux. Ils peuvent reprendre des charges verticales élevées, mais des charges horizontales au cisaillement en tête de pieux modestes.

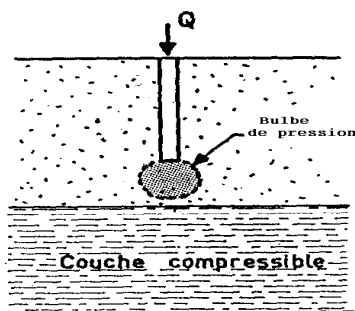
A ce titre, il est préférable d'encaster la superstructure dans le sol, les déformations des pieux en flexion suivent celles du sol. Il est également important d'identifier le tassement potentiel du sol, surtout s'il n'est pas traité, afin d'en tenir compte dans les hypothèses d'encastrement par des bèches périphériques avant et après séisme afin d'éviter le cisaillement des têtes de pieux.

Comportement des pieux (statique) : frottement latéral et résistance en pointe :

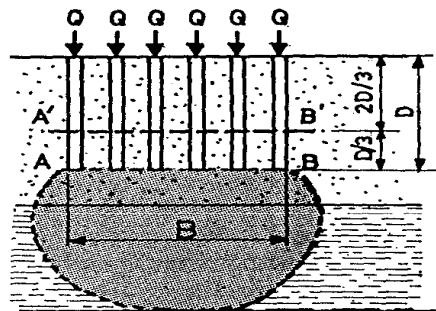
La portance du pieu comprend le frottement latéral et de l'encastrement de pointe



Comportement d'un groupe de pieux : Mobilisation globale du sol type radier :



Ⓐ pieu isolé



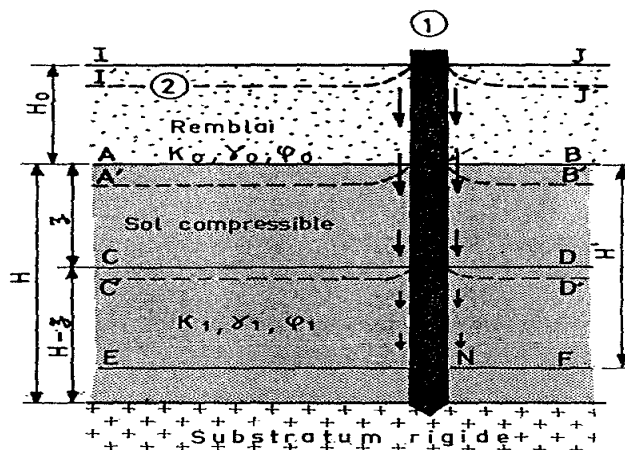
A - B . Radier fictif pour pieux travaillant en pointe.

A' - B' . Radier fictif pour pieux flottants

Ⓑ groupe de pieux

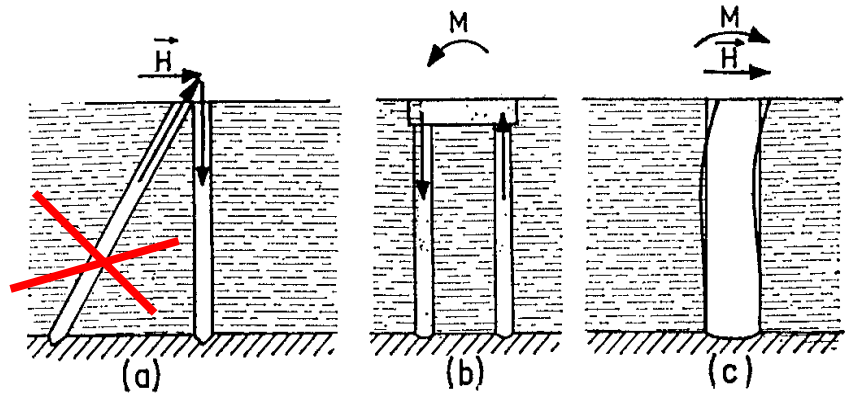
Problème du frottement négatif en cas de tassement de sol (par exemple si liquéfaction) :

Le pieu se trouve plus chargé qu'à l'état initial par le sol qui a tassé. C'est appelé ce phénomène le frottement négatif. Si le sol n'est pas traité il faut en tenir compte au dimensionnement



Déformation des pieux :

Les pieux doivent pouvoir avoir un comportement flexible pour se déformer avec le sol. En zone sismique les pieux inclinés sont interdits.



Sollicitations au cisaillement et en compression en tête de pieux :



Pieu dénudé sous l'effet d'un phénomène de liquéfaction. A hauteur du niveau d'eau on voit qu'en outre les aciers longitudinaux ont flambé sous l'effet d'un effort en compression (Séisme de Kobé, 1995) (Document EQIIS – USA)

Cisaillement de pieux découverts suite à un phénomène de liquéfaction. (Séisme de Kobé, 1995) (Document EQIIS – USA)

Il est nécessaire que les bèches périphériques mobilisent le sol pour éviter le cisaillement des têtes de pieux. En cas de sol potentiellement liquéfiable, il faut tenir compte de la hauteur possible du tassement.



Types de pieux :

Différentes techniques sont utilisées suivant :

- **le mode de fonctionnement** : appuyés en pointe ou flottants
- **les matériaux** : béton armé ou métallique
- **les procédés de forage, de mise en œuvre, de scellement, etc.** : Pieux moulés, préfabriqués, battus, injectés.

Les PS-92 considèrent que la partie supérieure de tous les types de pieux et micro-pieux est une zone critique qui doit être traitée comme telle.

6. Glossaire général

Accélération de la structure (ou pseudo accélération)

Les accélérations, « en réponse » au séisme, de la structure conditionnent les *forces d'inertie* qui vont s'appliquer à la structure et auxquelles elle devra résister. La mise en résonance de la structure avec le sol provoque l'amplification du mouvement sismique par la structure, donc des accélérations qu'elle reçoit sur le sol. Le spectre de réponse d'un site est un outil qui permet d'évaluer cette possible amplification avant le séisme.

Accélération nominale (a_N)

Valeur de l'accélération du sol réglementaire, pour une zone sismique donnée et une classe de bâtiment définie par arrêté, pour application des règles PS-92.

Action sismique pour les Règles PS-92 (§ 5.2)

Le mouvement sismique de calcul des règles PS-92 est défini par les paramètres suivants :

- L'accélération nominale a_N (valeur forfaitaire pour l'accélération de référence). Elle dépend de la zone de sismicité et de la catégorie du bâtiment),
- L'ordonnée du spectre de réponse pour le dimensionnement normalisé, appelée $R_D(T)$: coefficient forfaitaire indiquant un niveau d'amplification ou de dé-amplification de a_N par la structure en fonction des caractéristiques dynamiques du sol et des périodes propres d'oscillation de la structure.
- Un coefficient forfaitaire lié à la topographie τ , indiquant un niveau d'amplification possible de a_N sur le site
- Un coefficient correctif d'amortissement ρ , (coefficient forfaitaire dépendant du type de structure pour évaluer l'énergie dissipée sous forme de chaleur par les déformations internes à la matière)

On désigne par la suite le produit de ces paramètres par $R(T) = a_N \cdot R_D(T) \cdot \rho \cdot \tau$

Aléa sismique régional

Probabilité pour une région de subir des secousses sismiques d'une *intensité* ou d'un niveau d'accélération donnés, pour un site rocheux horizontal (secousses non modifiées par les conditions locales). Evaluer l'aléa sismique régional nécessite l'identification et la caractérisation des *sources sismiques*, de leurs *lois de fréquence-magnitude*, et des *lois d'atténuation* de l'énergie sismique par la distance.

Aléa sismique local

Evaluation des effets locaux des séismes sous l'effet d'un séisme de référence retenu comme hypothèse compatible avec l'aléa sismique régional. Le *microzonage* sismique localise chacun des effets possibles du séisme : effets d'un jeu de faille en surface, *effets de site* amplifiant les secousses caractérisés par leurs domaines fréquentiels à l'aide de *spectres de réponse* spécifiques, *effets induits* comme les glissements de terrain, les liquéfactions de sol, les tsunamis, etc.

Amortissement (d'une structure en oscillation)

Phénomène de dissipation de l'énergie dynamique sous forme de chaleur, ayant pour conséquence un décroissement de l'*amplitude* d'oscillation.

Atlas communaux des risques naturels de la Guadeloupe et de la Martinique

Cartographie de la vulnérabilité de l'ensemble des territoires de la Guadeloupe et de la Martinique aux différents aléas (séisme, cyclone, glissement de terrain, inondation). Ce sont des documents d'information à l'échelle du 1/25000 établis par le *BRGM* sur la base de connaissances géologiques. Ils pré-identifient les sites où des études géotechniques complémentaires (particulières ou générales comme un *microzonage sismique*) sont nécessaires avant de construire. Consultables sur le site Internet du BRGM.

Bielle (de compression)

Dans un panneau (voile de béton armé, mur,...) sollicité dans son plan de manière à le déformer en parallélogramme, on désigne par bielle une bande diagonale du panneau qui, comprimée, s'oppose au rapprochement des deux angles opposés du panneau dans la déformation, donc à la déformation.

Catastrophe naturelle (système d'indemnisation des biens assurés)

La catastrophe naturelle se définit comme la survenance d'un événement imprévisible et irrésistible (tel que tempête, cyclone, inondation ou séisme...) indépendant de la volonté de l'assuré. Les contrats d'assurance de dommages doivent prévoir une garantie pour les catastrophes naturelles.

L'état de catastrophe naturelle est constaté par arrêté interministériel publié au Journal Officiel qui détermine les zones et les périodes où s'est située la catastrophe. Depuis la réforme de la loi du 16 juillet 1992, les effets des catastrophes naturelles sont "*les dommages matériels directs non assurables, ayant eu pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel, lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir ces dommages n'ont pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises*".

Certaines conditions sont exigées pour la couverture des risques : les biens et activités doivent être situés en France, l'état de catastrophe naturelle doit être constaté par arrêté ministériel, la garantie incluse dans le contrat d'assurance doit être conforme à celle définie par les clauses types et enfin, les biens et activités doivent être garantis contre les effets des catastrophes naturelles.

Chaînage

Élément linéaire de structure reliant deux ou plusieurs parties d'un bâtiment pour les empêcher leur dislocation. On distingue les chaînages horizontaux réalisés à chaque niveau dans les volumes communs d'intersection entre les murs et les planchers, et les chaînages verticaux réalisés dans les volumes communs d'intersection entre les murs entre eux.

Coefficient q

Coefficient de comportement des règles PS-92. Il traduit l'aptitude d'un type de structure donnée à s'endommager sans s'effondrer, ce qui produit une dissipation de l'énergie sismique.

Contreventement

Ensemble d'éléments de construction assurant la rigidité et la stabilité d'un bâtiment vis-à-vis des forces horizontales engendrées par le vent, les secousses sismiques ou autres causes. Il comporte des éléments verticaux longitudinaux et transversaux (palées de stabilité ou pans de contreventement) et horizontaux (diaphragmes). Les contreventements verticaux peuvent être des panneaux (murs, voiles) ou des éléments linéaires assurant la triangulation des ossatures. Les contreventements horizontaux peuvent être des panneaux (dalles, planchers) ou triangulés (réseaux, poutres au vent,...)

DDRM

Dossier départemental des risques majeurs

Le DDRM est un document d'information réglementaire visé par la loi de juillet 1987. C'est un document de sensibilisation, illustré par des cartes d'aléas, regroupant les principales informations sur les risques naturels et technologiques du département et fixant les priorités communales.

Établi par les services du préfet à destination des acteurs départementaux du risque, son objectif est triple :

- mobiliser les élus et partenaires sur les enjeux des risques dans leur département et leurs communes, afin de les inciter à développer l'information.

- être le document de référence pour la réalisation du document communal synthétique (*DCS*)

- nourrir et enrichir toutes les actions d'information dans le département.

La loi du 22 juillet 1987, d'organisation de la sécurité civile et de prévention des risques majeurs, a créé un nouveau droit, celui des citoyens à l'information sur les risques auxquels ils sont exposés ; sur le plan de l'information préventive, les documents prévus à l'article 3 du décret du 11/10/1990, sont le dossier d'information sur les risques majeurs établi par le préfet et le dossier d'information des citoyens, établi par le maire, sur les mesures de prévention à mettre en oeuvre. Une circulaire de 1992 a précisé le nom et l'échelle de ces documents : DDRM à l'échelle départementale pour le premier et DICRIM à l'échelle communale pour le second ; elle y a ajouté le *DCS*, à l'échelle de la collectivité locale, établi par le préfet.

Déformation élastique

Déformation réversible par exemple sous l'action d'un séisme. Lorsque les secousses s'arrêtent le bâtiment est intact.

Déformation plastique

Déformation irréversible des éléments réalisés en matériaux « ductiles ». Après le séisme on constate des dommages, mais il n'y a pas « rupture fragile ». La déformation plastique (rotule plastique pour les éléments linéaires : poteaux et poutres) peut donner lieu à une importante dissipation d'énergie, ce qui contribue à protéger le bâtiment de l'effondrement.

Diaphragme : élément de la construction plan horizontal (plancher) ou incliné (versant de toiture) conçu pour résister aux forces qui agissent dans le même plan. Le diaphragme contribue au bon contreventement en transmettant et en répartissant les charges horizontales du séisme sur les éléments de contreventement vertical.

DICRIM

Dossier d'information communal des risques majeurs

Le DICRIM est un document d'information réglementaire établi par le maire qui réunit les informations nécessaires à la mise en oeuvre de l'information préventive de la commune, conjointement au Dossier Communal Synthétique (*DCS*). Afin de l'aider dans l'élaboration du DICRIM, le maire peut constituer une Cellule Municipale des Risques Majeurs et de la protection de l'Environnement (*CMRME*), équivalent de la *CARIP* au niveau départemental.

Le DICRIM est réalisé à partir du *DCS*, il s'accompagne de fiches ou de plaquettes d'informations destinées à la population. La véritable vocation du DICRIM est l'information des principaux acteurs des risques dans la commune.

Dimensionnement en capacité

Stratégie de conception parasismique visant l'endommagement prioritaire des éléments ou parties d'éléments constructifs ne nuisant pas à la stabilité des constructions.

Dommages légers selon la définition (1992) des Nations Unies

Bris de vitres, faibles dégâts aux parois et toitures, renversements de cloisons intérieures, fissurations des murs; endommagement n'empêchant pas l'utilisation de l'installation aux fins pour lesquelles elle a été conçue.

Dommages modérés selon la définition (1992) des Nations Unies

Degré d'endommagement qui exclut l'utilisation efficace de la structure, de l'installation conforme à sa destination initiale, sauf réparations majeures n'atteignant pas toutefois la reconstruction totale.

Dommages sévères selon la définition (1992) des Nations Unies

Degré d'endommagement qui proscrit toute utilisation ultérieure de la structure, de l'installation conforme à sa destination initiale.

Ductilité

Capacité d'un matériau, et par extension d'un élément ou d'une structure, de subir avant la rupture des déformations plastiques (irréversibles) sans perte significative de résistance. Ces matériaux "préviennent" donc de l'approche de leur rupture.

EC8 - Eurocode n°8

Code de construction européen, consacré à la résistance des structures aux séismes.

Effets de site

Amplification (cas général) ou atténuation du mouvement du sol en surface, causée par les caractéristiques locales du site : topographie, géologie, etc.

Effets directs d'un séisme

Effets dus aux seuls mouvements vibratoires du sol (oscillations) ou au jeu de la faille en surface.

Effets induits par un séisme (Effets secondaires)

Aléa survenant comme une conséquence des secousses. Le séisme ne joue qu'un rôle déclencheur (glissement, éboulement, effondrement de terrains, etc.) ou il est déterminant dans leur genèse (liquéfaction des sols, seiches, tsunamis, etc.).

Éléments non structuraux

Éléments d'une construction (par exemple: cloisons, plafonds, etc.) qui ne contribuent pas à supporter les charges.

Flambement

Déformation plastique courbe d'un élément trop élancé soumis à une compression longitudinale excessive. Peut conduire à une rupture de la structure par instabilité.

GEMITIS

Programme pluriannuel d'évaluation du *risque sismique* lancé conjointement par le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement et celui de l'éducation nationale de la recherche et de la technologie à la fin des années 90 pour les agglomérations de Nice, Fort de France et Pointe-à-Pitre. La gestion de ce programme a été confiée par convention au *BRGM*. Il concernait à l'origine les bâtiments stratégiques, les ouvrages d'art et certains immeubles d'habitation. Des développements ont été apportés dans un deuxième temps pour certains ouvrages d'art et viabilités et les maisons individuelles.

Isolation parasismique

Stratégie de protection des ouvrages contre les secousses sismiques qui consiste à les implanter sur des isolateurs parasismiques.

Ossature

Structure dont les éléments verticaux sont constitués de poteaux par opposition aux murs ou voiles.

Ouvrage à risque normal

Ouvrage dont la ruine ou les dommages n'ont pas de conséquences sur l'environnement (hormis les abords immédiats).

Ouvrage à risque spécial

Ouvrage dont la ruine ou même des dommages mineurs peuvent avoir des conséquences catastrophiques pour la population ou pour l'environnement (bâtiment de stockage de produits toxiques, bâtiment abritant un réacteur nucléaire, barrage, etc.).

Palée de stabilité

Élément vertical de *contreventement* destiné à transmettre les charges latérales dans les fondations. Peut être constituée par un mur, par un portique ou par une travée triangulée.

Particulier construisant pour lui-même

La personne physique, qui construit son logement pour l'occuper elle-même ou le faire occuper par son conjoint, ses ascendants, ses descendants ou ceux de son conjoint est obligée de souscrire une assurance dommages-ouvrage, sauf à engager sa responsabilité pour faute à l'égard d'un tiers acquéreur qui serait lésé par le défaut d'assurance. Aussi, dans la pratique, la revente d'une construction non couverte par une assurance dommages-ouvrage sera aléatoire.

Permis de construire (PC)

Le permis de construire est une autorisation administrative préalable à l'édification ou à la modification des constructions. Cette autorisation a pour but de vérifier la conformité des constructions avec la réglementation en vigueur pour l'utilisation des sols. Pas pour le respect des règles de construction.

Depuis 1983 et les lois de décentralisation et de transfert des compétences, le permis de construire est délivré au nom de la commune si celle-ci possède un POS (ou un PLU) approuvé. Dans le cas contraire, le maire délivre le PC au nom de l'Etat.

PLU

Plan local d'urbanisme

Documents d'urbanisme opposables aux tiers. La *Loi SRU* les a substitués aux *POS* (plans d'occupation des sols). Ils comprennent un rapport de présentation, des notices techniques et des plans de zonage qui renvoient aux règlements de zones précisant les conditions d'usage des sols.

Portique ou cadre rigide

Structure composée de poteaux et de poutres rigidement liés ensemble par des encastresments. L'angle formé à la jonction du poteau et de la poutre est donc conservé même lorsqu'ils sont déformés sous l'action de charges. Par opposition, les poteaux et les poutres articulés, à angles variables, forment des cadres non rigides.

PPR

Le Plan de Prévention des Risques naturels est un document réalisé par l'Etat qui régleme l'utilisation des sols en fonction des risques naturels auxquels ils sont soumis. Cette réglementation va de l'interdiction de construire à la possibilité de construire sous certaines conditions et ne s'applique que pour l'urbanisation à venir. Les PPR se sont substitués en 1995 aux PER (Plan d'Exposition aux Risques), aux PSS (Plan de Surface Submersible) et aux périmètres de risques tels que définis par l'article R111-3 du Code de l'Urbanisme.

Programme de prévention du risque sismique aux Antilles

Lancé en réunion interministérielle à Matignon le 2 juillet 1998, il est piloté par un « groupe central de projet ». C'est une structure interministérielle placée sous l'égide du secrétariat d'Etat à l'Outre-Mer, et qui comprend notamment les Ministères de l'Equipement du Logement et des Transports, et de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (actuellement Ministère de l'Environnement et du Développement Durable).

Au plan local deux groupes locaux de projet, en Guadeloupe et en Martinique, placés sous l'autorité des Préfets assistés de la DDE relaient le groupe central.

Réception des travaux

La réception est l'acte par lequel le maître d'ouvrage déclare accepter l'ouvrage avec ou sans réserves. Cet acte marque le point de départ de la responsabilité civile décennale et des garanties (parfait achèvement, bon fonctionnement). Au jour de la réception, le maître de l'ouvrage devient gardien de l'ouvrage.

Rupture ductile

Rupture précédée de déformations plastiques notables.

Rupture fragile

Rupture soudaine et quasi instantanée.

Structure dissipative

Structure capable de dissiper l'énergie grâce à des déformations inélastiques lors des sollicitations répétées.

Structure hyperstatique

Structure possédant des appuis et/ou des liaisons en nombre supérieur à ce qui est nécessaire à sa stabilité.

Structure isostatique

Structure ne comportant que les appuis et les liaisons strictement nécessaires à sa stabilité.

Zonage sismique

Cartographie de l'aléa sismique régional. On distingue le zonage physique de l'aléa du *zonage sismique réglementaire* qui en est une traduction selon les entités administratives

Zonage sismique réglementaire

Cartographie administrative précisant pour chaque entité administrative (en France, le canton) les niveaux d'*accélération nominale* à prendre en compte pour l'application des règles de construction.

Zone critique

Les « zones critiques » sont les endroits de la structure qui subissent les contraintes les plus élevées. Il faut donc veiller d'une part à les renforcer, d'autre part à ce qu'elles puissent se dégrader de façon « ductile » et non fragile. Les règles de construction nous disent comment obtenir ce résultat.