

# LE RISQUE SISMIQUE

## Les séismes et leurs effets – La construction parasismique

Jacky Mazars – Professeur Emérite Institut Polytechnique de Grenoble

*Préambule : Cette présentation résulte de l'assemblage de documents extraits de « Le Risque Sismique » (2008), de notes de cours (J. Mazars 2008) et de la thèse de doctorat de Cédric Desprez(2010), ces références sont précisées en fin de document.*

### 1- LES SEISMES : ORIGINE ET EFFETS

#### 1.1- Origine des séismes

Un séisme correspond au glissement très brutal de deux parts de l'écorce terrestre appelés compartiments tectoniques, soit au sein de la couverture sédimentaire, soit dans la lithosphère elle-même<sup>1</sup> (les 100 premiers kilomètres de la Terre). Ces compartiments, situés à plus ou moins grande profondeur, se trouvent séparés par une faille. Lorsque le jeu de la faille se produit, des ondes sismiques sont émises : elles se propagent jusqu'à la surface de la Terre où elles peuvent alors être détectées par des capteurs appelés sismomètres et enregistrées par des appareils appelés sismographes.

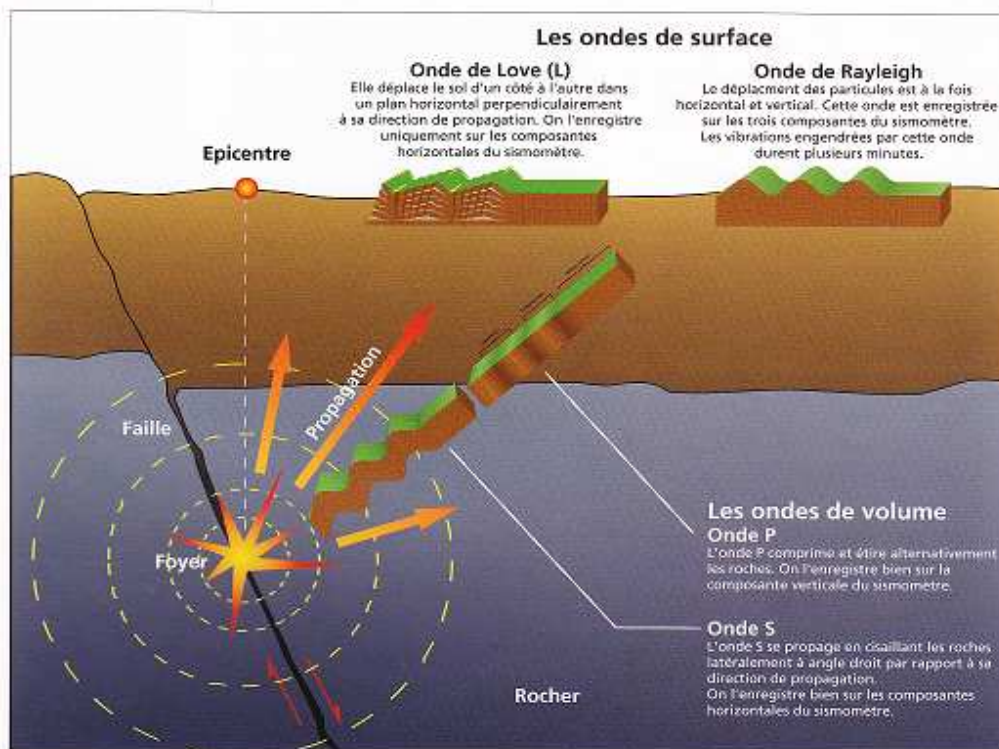


Figure 1 : Mécanisme de rupture entraînant la propagation d'ondes génératrices de tremblement de terre.

C'est grâce à ces enregistrements dénommés sismogrammes que l'on peut localiser le séisme avec précision et en déterminer sa puissance (la magnitude telle que présentée § 1.2). Si le séisme est suffisamment fort et si la région est habitée, ces ondes peuvent aussi être ressenties par l'homme et provoquer des dégâts. L'analyse des dégâts et des modifications apportées à l'environnement en un endroit donné permet d'attribuer à cet endroit une intensité (cf. §1.2). Celle-ci varie donc d'un endroit à l'autre.

Au sein de la faille, la surface de rupture est liée à la magnitude du séisme selon une relation qui n'est pas linéaire. Le tableau 1 ci-dessous donne des ordres de grandeur, ainsi que ceux relatifs au glissement moyen observé sur la surface de rupture.

<sup>1</sup> La lithosphère est constituée de grandes plaques en mouvement, aux limites desquelles l'activité sismique est la plus intense. Il y a 12 grandes plaques qui s'éloignent (cas de la « dorsale Atlantique ») ou se rapprochent, générant compression et/ou cisaillements, tous deux sources de ruptures et donc de séismes (cas des plaques Pacifique et Amérique du nord, responsables des grands séismes en Californie).

Magnitude	Surface de rupture (km <sup>2</sup> )	Glissement (m)
3	0,1	0,002
6	100	0,2
9	20000	15

Tableau 1 : relation magnitude, surface de rupture et glissement moyen observé en surface

L'endroit de la surface de rupture où débute la rupture est appelé **foyer** du séisme. Sa profondeur peut varier de 0 à 700 km environ, puisque, en certains endroits du globe où se produisent des phénomènes dits de subduction : la « lithosphère » cassante, au sein de laquelle se produisent les séismes, plonge jusqu'à grande profondeur dans « l'asthénosphère » plus déformable. L'**épicentre** est le point de la surface de la Terre situé à la verticale du foyer (cf. figure 1).

Au sein des roches sédimentaires ou encore plus en profondeur dans la croûte s'exercent des forces tectoniques — on parle plutôt de « contraintes tectoniques ». Ces contraintes résultent de phénomènes qui peuvent se produire à grande distance. Ainsi, dans les Alpes du Nord, cette contrainte, orientée grosso modo E — W, est liée à la collision entre la microplaque Adriatique (qui porte la péninsule italienne et la mer Adriatique) et la plaque Eurasie (cf. figure 2). Le déplacement de la microplaque Adriatique est lui-même dû au mouvement relatif existant entre la plaque Eurasie et la plaque Afrique... Se sont les contraintes tectoniques qui, en s'exerçant sur les failles, provoquent de temps à autres leur glissement saccadé, et par là-même sont à l'origine des séismes.

Les spécialistes des sciences de la Terre sont actuellement capables d'identifier des zones faillées propices aux séismes ; ils sont aussi capables de mettre en évidence des déformations importantes qui peuvent être l'indice que des contraintes tectoniques s'exercent de façon dangereuse. En revanche, les sismologues ne peuvent prévoir ni l'instant ni le lieu précis de la rupture.

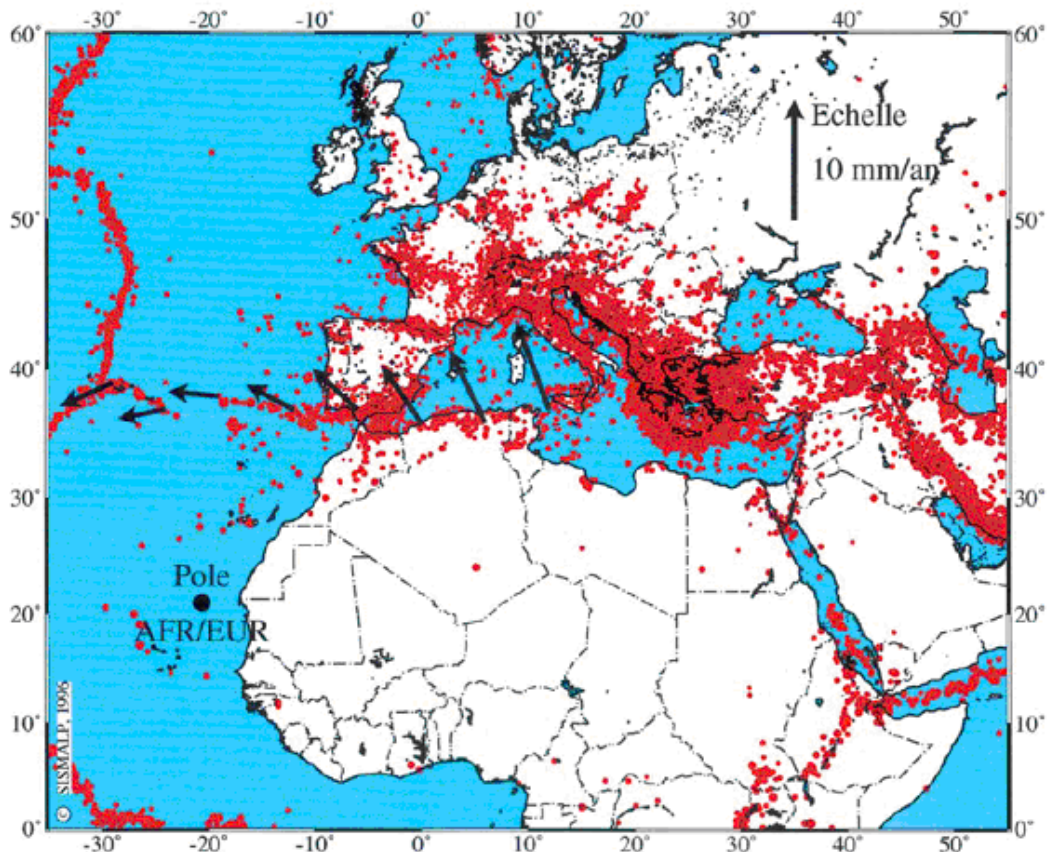


Figure 2 : Sismicité superficielle en Europe (document LGIT)

### 1.2 - Magnitude et Intensité sismique

C'est en 1935 que Charles Richter, un sismologue américain qui étudiait les séismes de Californie, se rendant compte qu'il lui fallait classer ces séismes autrement que par les dénominations « gros séisme » ou « petit séisme », a établi l'**échelle de magnitude** qui porte son nom et traduit la puissance d'un séisme.

Avec le sismographe qu'il utilisait alors, et qui détectait les vibrations horizontales du sol, Charles Richter a décidé d'attribuer la magnitude 3 à un séisme survenant à 100km de distance qui produisait sur son enregistreur une amplitude maximale d'un millimètre. Charles Richter a défini la magnitude en prenant le logarithme décimal de l'amplitude observée sur le sismogramme, celle-ci étant exprimée en micromètres. Cette échelle logarithmique conduit à constater que l'énergie d'un séisme de magnitude 6 est respectivement 10 fois, 100 fois et 1000 fois plus importante que celles liées à des séismes de magnitude respectivement 5, 4 et 3. Le tableau 1 propose une relation entre magnitude, surface de rupture et glissement moyen observé en surface, on y retrouve cette non proportionnalité par rapport à l'échelle des magnitudes. La magnitude du séisme destructeur qui s'est produit à Annecy en 1996 était voisine de 5 ; le séisme meurtrier de Lambesc (Bouches-du-Rhône) en 1909 avait une magnitude de l'ordre de 6. (On ne la connaît pas avec précision car il n'y avait à l'époque que très peu de sismographes en fonctionnement.)

**L'intensité d'un séisme** est une échelle construite à partir des effets observés (sur le terrain ou sur les constructions). En Europe, on utilise l'échelle dite EMS-98 (European Macroseismic Scale 1998). L'échelle EMS comporte douze degrés qui sont définis de façon très condensée dans le tableau ci-après :

<b>I</b>	<b>Imperceptible</b>	
<b>II</b>	<b>À peine ressenti</b>	Ressenti seulement par quelques rares personnes au repos dans leurs habitations.
<b>III</b>	<b>Faible</b>	Ressenti par quelques personnes à l'intérieur des bâtiments. Les personnes au repos ressentent une oscillation ou un léger tremblement.
<b>IV</b>	<b>Largement ressenti</b>	Ressenti par de nombreuses personnes à l'intérieur des bâtiments, par quelques rares personnes à l'extérieur. Quelques personnes endormies sont réveillées. Les fenêtres, les portes et la vaisselle font un bruit de tremblement.
<b>V</b>	<b>Fort</b>	Ressenti par la plupart des personnes à l'intérieur des bâtiments, par quelques personnes à l'extérieur. De nombreux dormeurs sont réveillés. Quelques personnes sont effrayées. Les bâtiments tremblent dans toute leur structure. Les objets suspendus oscillent nettement. Les petits objets sont déplacés. Les portes et les fenêtres s'ouvrent ou se ferment.
<b>VI</b>	<b>Dégâts légers</b>	De nombreuses personnes sont effrayées et se précipitent à l'extérieur des bâtiments. Quelques objets tombent. Quelques maisons subissent de légers dégâts non structuraux (légères fissures, chute de petits morceaux de plâtre).
<b>VII</b>	<b>Dégâts</b>	La plupart des personnes sont effrayées et se précipitent à l'extérieur des bâtiments. Le mobilier est déplacé et les objets tombent des étagères en grand nombre. De nombreux bâtiments bien construits subissent des dégâts modérés (petits fissures dans les murs, chutes de plâtre, chutes partielles de cheminées). Des bâtiments plus anciens présentent des fissures dans les murs et des désordres au niveau des cloisons.
<b>VIII</b>	<b>Dégâts importants</b>	De nombreuses personnes éprouvent des difficultés à se tenir debout. De nombreuses maisons présentent des crevasses dans les murs. Quelques bâtiments bien construits présentent des désordres au niveau des murs, tandis que d'autres bâtiments plus anciens s'effondrent partiellement.
<b>IX</b>	<b>Destructeur</b>	Panique générale. De nombreuses constructions s'effondrent. Même les bâtiments bien construits présentent des dégâts très importants (désordres au niveau des murs et effondrement partiel des structures).
<b>X</b>	<b>Très destructeur</b>	De nombreux bâtiments pourtant bien construits s'effondrent.
<b>XI</b>	<b>Catastrophe</b>	La plupart des bâtiments bien construits s'effondrent. Quelques bâtiments construits selon les règles parasismiques sont détruits.
<b>XII</b>	<b>Catastrophe complète</b>	Presque tous les bâtiments sont détruits.

Tableau 2 : Les douze intensités sismiques de l'échelle EMS 98

Pour un séisme donné, l'intensité varie principalement avec la distance épiscoptrale (la distance entre l'endroit considéré et l'épicentre). Elle varie également avec la profondeur focale (la profondeur du foyer) : pour une magnitude identique et pour une même distance épiscoptrale, un séisme situé à 1km de profondeur sera plus destructeur qu'un séisme situé à 10km de profondeur. Sur une carte, on peut relier entre eux les lieux d'égale intensité par une courbe appelée isoséiste (cf. figure 3 les isoséistes du séisme de Lambesc). Le centre de la courbe de plus forte intensité est appelé épicentre macrosismique. Il est en général proche de l'épicentre calculé grâce aux stations sismologiques. Mais, si la région est peu habitée ou s'il existe des effets de site, il peut y avoir des différences importantes.

Pour les séismes dits historiques (ceux qui se sont produits avant 1960 environ), les observations macrosismiques (descriptions des dégâts) sont les seules informations disponibles pour déterminer l'épicentre du séisme.

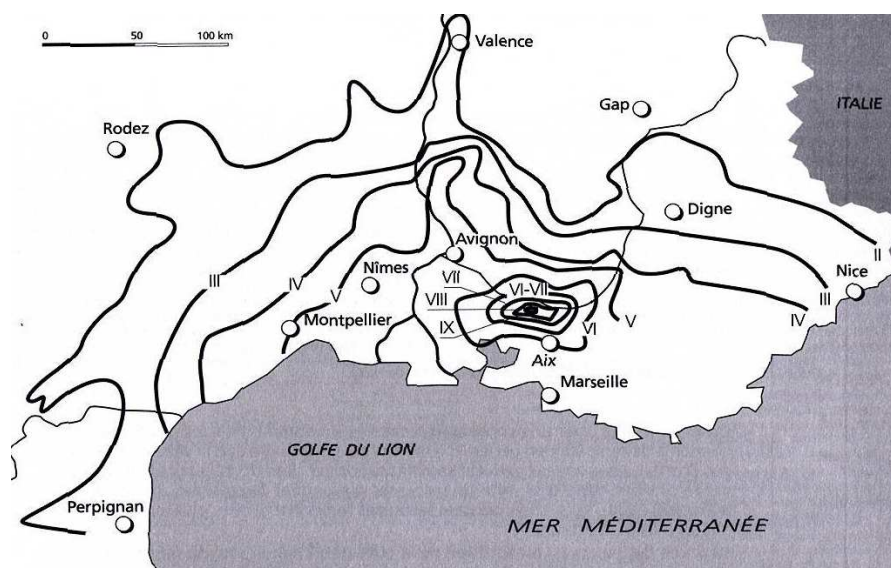


Figure 3 : Carte d'intensités du séisme de Lambesc du 11 juin 1909 (magnitude 6,2)

### 1.3 - Les ondes sismiques, les effets de site

Comme un caillou choquant la surface d'un lac, le choc sismique entraîne la propagation d'ondes dans le sol. La figure 1 en donne une image. Ces ondes se propagent à une certaine vitesse. Il en existe de deux types. L'onde P (onde de compression) comprime et dilate le milieu lors de son passage. (Une onde sonore est un type particulier d'onde de compression qui se propage dans l'air en comprimant et dilatant les tranches d'air qui se trouvent sur son passage.) L'onde S (onde de cisaillement) cisaille le milieu lors de son passage. Elle est plus lente que l'onde P (le rapport des deux vitesses est voisin de 1,7). L'ordre de grandeur des vitesses des ondes sismiques dans la Terre est de l'ordre de quelques kilomètres par seconde (pour l'onde P : 6 km/s dans la croûte, avec un maximum de 14 km/s dans le manteau inférieur). Les ondes P et S se propagent à l'intérieur de la Terre (on les appelle « **ondes de volume** »). Il existe aussi des ondes dites « **de surface** » qui se propagent à la surface du globe, mais plus lentement que les ondes P et S, à des vitesses de l'ordre de 4 km/s. Ces ondes peuvent faire plusieurs fois le tour de la Terre. (On peut facilement calculer combien de temps elles mettent pour faire un tour...) Lors de très gros séismes, on a ainsi pu identifier sur des sismogrammes de telles ondes qui avaient fait jusqu'à près de dix fois le tour de la Terre ! (au bout de combien de temps arrivent-elles ?)<sup>2</sup>. Ce sont les ondes de surface et plus particulièrement les ondes de Love (cf. figure 1) qui provoquent les dégradations dans les constructions.

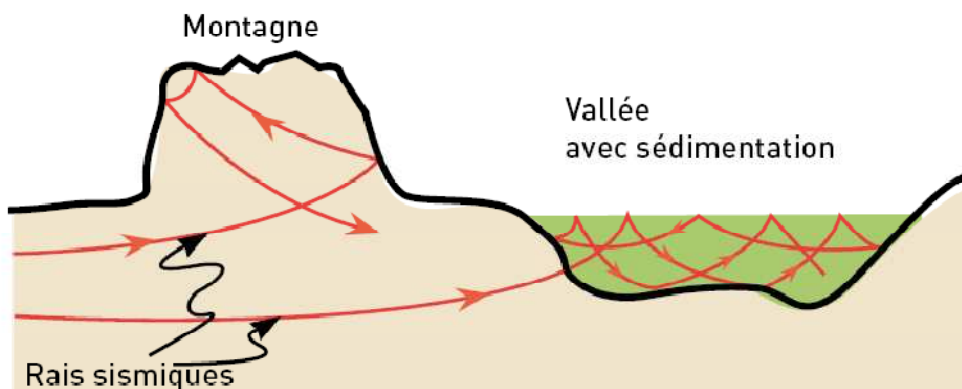


Figure 4 : Effets de sites dus à la réflexion des ondes sur les parois d'une montagne ou dans une vallée sédimentaire (document LGIT)

<sup>2</sup> Pour faire un tour de Terre, une onde de surface met environ 40 000/4 secondes, soit 2.8 heures. Pour faire 10 fois le tour de la Terre, il faudra 28 heures.

On appelle **effets de site** les effets d'amplification des ondes sismiques qui se produisent principalement dans deux cas : au sommet des collines et des montagnes, et lorsqu'une vallée a été l'objet d'une importante sédimentation peu consolidée (par exemple vallée remplie par des alluvions récentes, des marais ou des tourbières). Dans les deux cas, les ondes sismiques se trouvent piégées dans la structure (dans la montagne, elles se réfléchissent d'un flanc à un autre ; dans la vallée, une fois qu'elles ont pénétré dans la zone d'alluvions meubles, elles ne peuvent s'en échapper et se réfléchissent sur les flancs et sur le fond de la vallée). Les études théoriques montrent que l'amplitude des ondes peut être amplifiée d'un facteur 10 ou 20 par de tels effets (cf. figure 4).

Contrairement à ce que l'on pourrait donc croire, il vaut mieux, dans une zone sismique, construire sur le rocher qu'en plein milieu d'une plaine alluviale si l'on veut éviter les effets de site. Mais il ne faut bien sûr pas monter trop haut sur le flanc de la vallée, car on se rapprocherait alors de l'autre cas de figure (sommet de montagne) qui donne lui aussi des amplifications du mouvement du sol. Sur le flanc de la vallée, si l'on minimise les effets de site, on s'expose aussi davantage à des éboulements ou des glissements de terrain... Rien n'est parfait dans la nature.

#### 1.4 - Le risque sismique en France

La France est concernée par le risque sismique. La possibilité qu'un séisme fort se produise et engendre des victimes et des dégâts importants est avérée. Des séismes récents nous l'ont rappelé : Le 21 novembre 2004, les îles des Saintes au large de la Guadeloupe ; le 29 Novembre 2007, les îles de la Martinique et de Sainte-Lucie. Des séismes se sont également produits en 1909 à Lambesc, près de Salon-de-Provence ou en 1839 à Fort-de-France. Ils ont fait de nombreuses victimes. On n'empêchera jamais un séisme de se produire, on peut cependant s'y préparer pour mieux l'appréhender et c'est pour cela que le gouvernement a décidé d'engager sur six ans (2005 à 2010), un « plan séisme ». L'objectif est de réduire la vulnérabilité de la France au risque sismique ([www.planseisme.fr](http://www.planseisme.fr)).

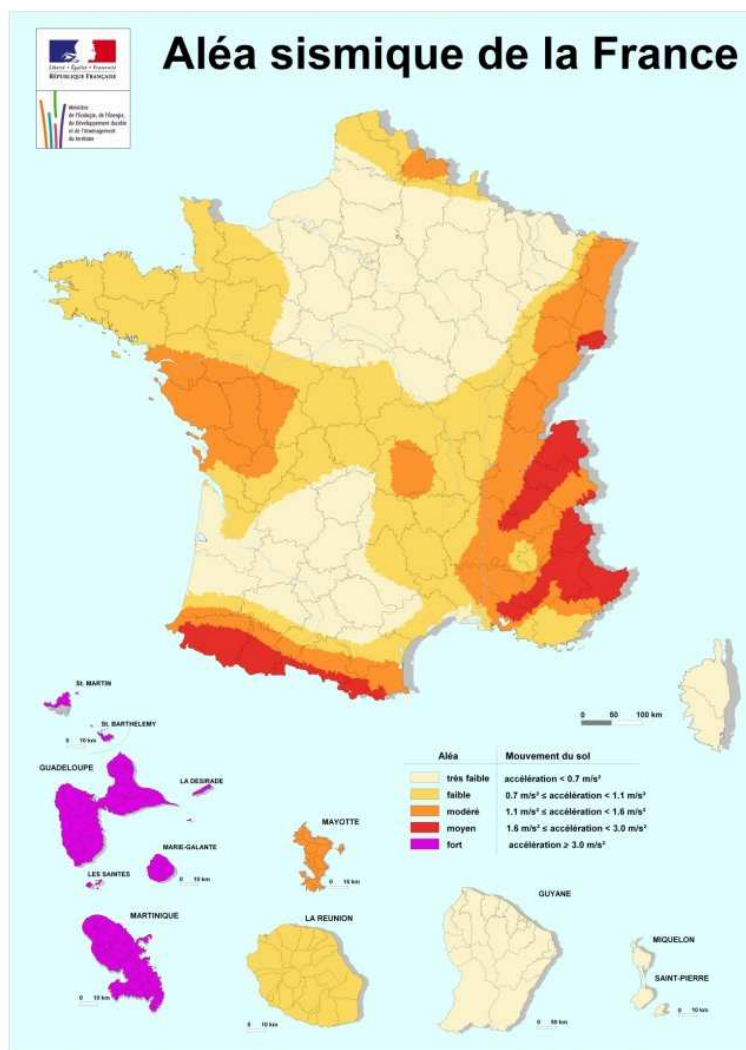


Figure 5 : Zonage sismique de la France en vigueur à partir de 2010 (source [www.planseisme.fr](http://www.planseisme.fr))

## 1.5 - Les règles parasismiques

Les enjeux économiques d'un séisme peuvent être considérables, on estime par exemple à quelque 200 milliards de dollars le coût global résultant du séisme de magnitude 7,3 survenu à Kobé (Japon) le 17 janvier 1995 qui a détruit une grande partie de la ville et fait près de 6500 victimes. Minimiser le risque sismique consiste à construire « parasismique » en s'appuyant sur des règles de construction dont l'utilisation est imposée par l'état. Dans ce contexte, l'objectif principal de la réglementation parasismique est la sauvegarde du maximum de vies humaines pour une secousse dont le niveau d'agression est fixé pour chaque zone de sismicité. La construction courante peut alors subir des dommages irréparables, mais elle ne doit pas s'effondrer sur ses occupants. En cas de secousse plus modérée, l'application des dispositions définies dans les règles parasismiques permet de limiter les destructions et, ainsi, les pertes humaines et économiques. Le zonage n'est donc pas une carte d'aléa sismique d'un point de vue strictement scientifique mais elle intègre la composante du souhait de prévention. Il répond aussi à un objectif de protection parasismique dans des limites économiques supportables pour la société. Pour la prise en compte du risque sismique, les bâtiments, les équipements et les installations sont répartis en deux classes, respectivement dites « à risque normal » et « à risque spécial » définis et renvoyant à une réglementation parasismique spécifique en fonction de l'une ou l'autre de ces deux classes.

### *Ouvrage à risque normal*

Il s'agit des ouvrages pour lesquels les conséquences d'un séisme demeurent circonscrites à leurs occupants et à leur voisinage immédiat. Ils sont classés en 4 catégories d'importance, chacune faisant l'objet d'une réglementation dont la sévérité augmente avec la catégorie. Par exemple un collège (catégorie III) doit pouvoir résister à un niveau sismique 1,2 fois supérieur à celui exigé pour une habitation individuelle.

- *Catégorie I* : ouvrages dont la défaillance présente un risque minime pour les personnes ou l'activité économique. Activité de longue durée exclue (exemple : hangar à foin).
- *Catégorie II* : ouvrages dont la défaillance présente un risque moyen pour les personnes.
  - habitations individuelles, habitations collectives, bureaux, dont la hauteur n'excède pas 28m,
  - établissements recevant du public de 4ème et 5ème catégories à l'exception des établissements scolaires,
  - parcs publics de stationnement,
  - autres bâtiments accueillant au plus 300 personnes.
- *Catégorie III* : ouvrages à risque élevé pour les personnes ou les activités.
  - bâtiments d'habitation collectifs, bureaux, de hauteur supérieure à 28m,
  - établissements recevant du public de 1ère à 3ème catégories,
  - autres bâtiments accueillant plus de 300 personnes,
  - établissements sanitaires et sociaux sauf exception,
  - bâtiments de production collective d'énergie,
  - établissements scolaires.
- *Catégorie IV* : ouvrages dont le fonctionnement est primordial pour la sécurité civile, pour la défense ou l'ordre public.
  - bâtiments abritant les moyens de secours,
  - bâtiments définis par le ministère de la Défense,
  - bâtiments assurant les communications,
  - établissements recevant du public de santé spécialisés en affectations graves,
  - production et stockage d'eau potable,
  - distribution publique de l'énergie,
  - centres de météorologie.

### *Ouvrage à risque spécial*

Il s'agit des ouvrages pour lesquels les effets sur les personnes, les biens et l'environnement, de dommages même mineurs résultant d'un séisme, peuvent ne pas être circonscrits au voisinage immédiat de ces ouvrages. Les barrages et les installations nucléaires font l'objet de recommandations de sûreté particulières.

## **2 - LES SEISMES ET LA REPONSE DES CONSTRUCTIONS**

Lors d'un séisme, c'est le sol qui est moteur. Les sollicitations mécaniques que le séisme engendre sont diverses et il est certain qu'une bonne connaissance de son action permettrait de mieux construire. Les séismes se manifestent à la surface du sol par un mouvement de va-et-vient (Ondes de Love cf. figure 1). Le mouvement est caractérisé par le déplacement et l'accélération du sol. Les constructions sont liées au sol au moins par leurs fondations, éventuellement par leurs parties enterrées (sous-sol). Les éléments de construction solidaires du sol suivent ces déplacements; du fait de leur masse, par inertie les parties présentes en élévation ne suivent pas instantanément le mouvement et il s'ensuit une déformation de la structure.

Si les constructions ont été conçues et réalisées suivant les règles de l'art en zone sismique, elles passeront par leur position initiale et se mettront à osciller. Au cours du mouvement, le bâtiment parasismique doit réagir dans un temps très court (quelques dizaines de secondes) sans dommage majeur. La rupture survient si le bâtiment n'a pas été conçu pour résister à ces mouvements.

Pour bien comprendre les effets d'un tremblement de terre sur les constructions nous allons analyser, à partir d'exemples simples, la façon dont réagissent les structures aux oscillations sismiques et les situations à risque qui leurs sont liées.

La figure 6 indique schématiquement comment réagit une construction (composée ici de 2 planchers) aux oscillations verticales (ondes de Rayleigh schématisées figure 1), aux oscillations horizontales (ondes de Love schématisées figure 1) qui sont les plus destructrices.

Dans ce contexte nous allons dans la suite limiter notre analyse aux effets des oscillations horizontales en simplifiant la construction à un seul plancher.

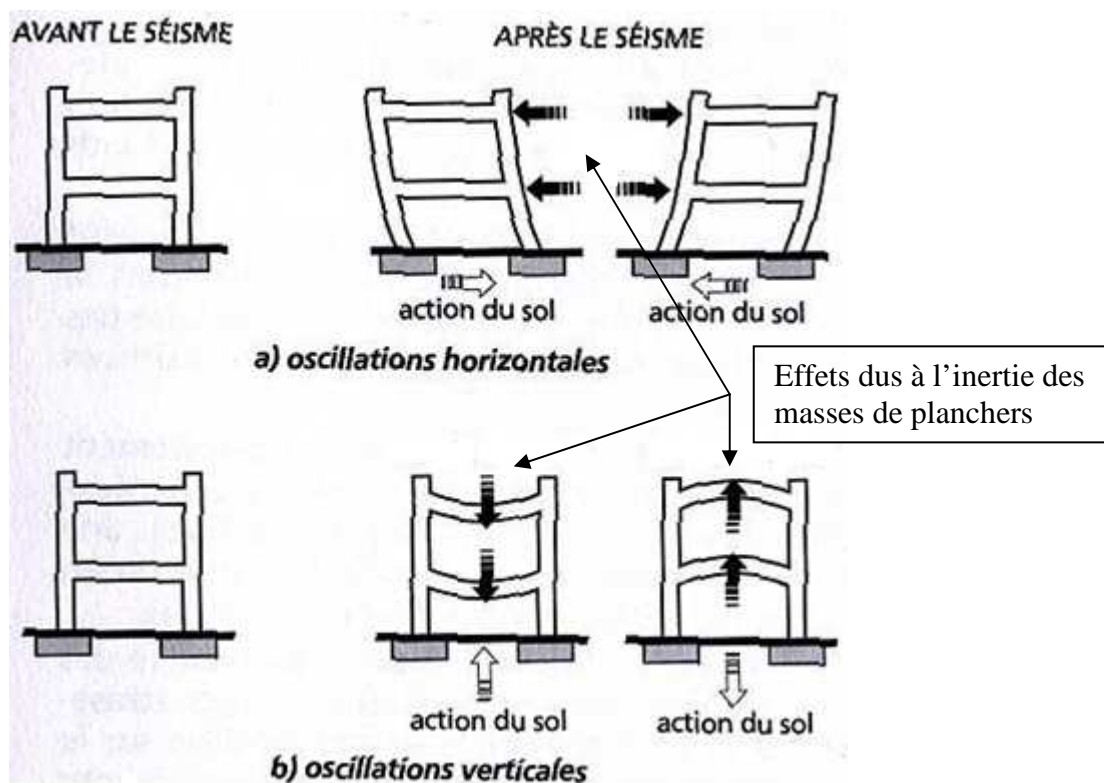


Figure 6 : Réponse des constructions aux actions horizontales et verticales des tremblements de terre

### 2.1 - Pendule direct – pendule inversé

Considérons une balançoire fixée à une branche dont le schéma est celui d'un pendule « direct » (figure 7a). Si l'utilisateur de la balançoire s'écarte de la position d'équilibre, le poids qui agit verticalement crée une composante de rappel (force  $F_r$ ) qui génère un mouvement d'oscillation (le balancement). Celui-ci peut être tracé dans un repère déplacement - temps et la courbe obtenue (sinusoïde) fait apparaître la **période propre du système** ( $T_p$  : temps qui s'écoule pour retrouver la position de départ).  $T_p$  est une caractéristique du système : elle ne dépend que de la masse de la balançoire et de la longueur de la corde.

Considérons un pendule inversé (figure 7b), constitué d'une boule de masse  $M$  sur une tige souple fixée au sol. Si on écarte la boule de sa position d'équilibre, la tige est fléchie et cette flexion génère une force de rappel ( $F_r$ ) qui est proportionnelle à la **rigidité** de la tige et à la distance d'écart par rapport à la verticale. En libérant la boule une fois écartée on génère un mouvement d'oscillation autour de la position verticale (on parle de **vibration libre**). Comme précédemment le tracé de ce mouvement dans un repère déplacement - temps conduit à faire apparaître la période propre du système.

Celle-ci est comme pour la balançoire une caractéristique du système boule – tige, elle est fonction de la masse  $M$  de la boule et de rigidité  $K$  de la tige, elle-même fonction de la souplesse du matériau utilisé, de la hauteur et de la section de la tige (aire et forme).

On montre que  $T_p = 2\pi\sqrt{M/K}$ .

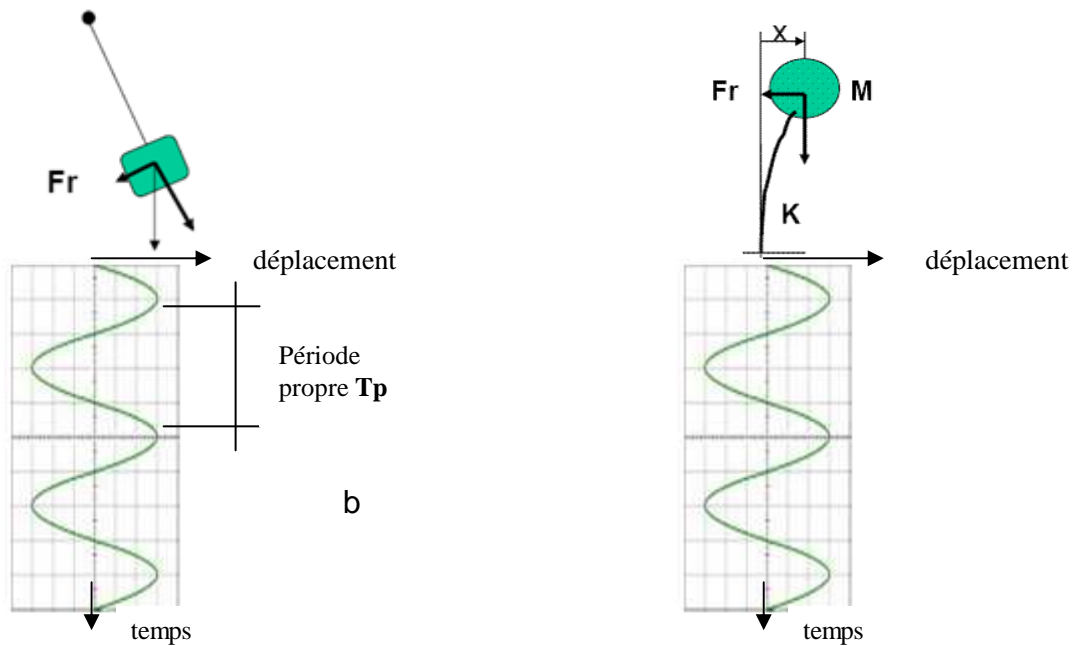


Figure 7 : Analogie du pendule : vibrations libres

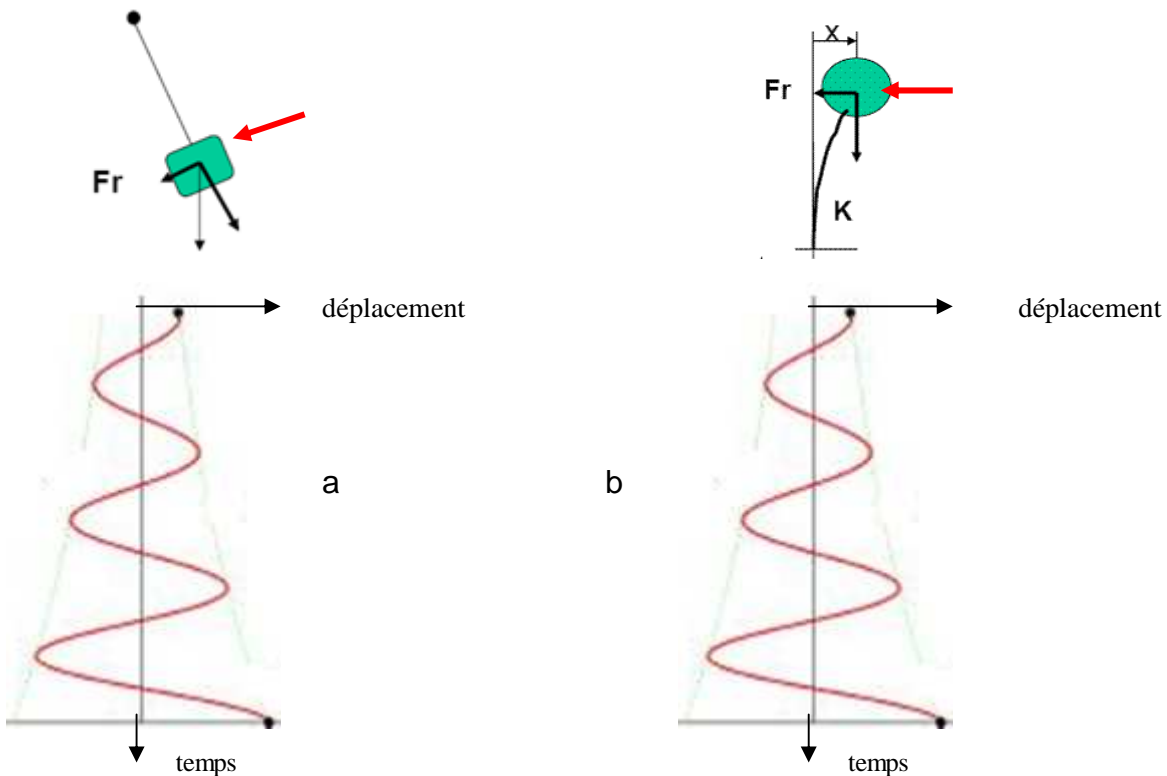


Figure 8 : Analogie du pendule : application d'une « poussée » (vibrations forcées) en phase avec le mouvement libre du système.



Pour amplifier le balancement on applique un « poussée », à chaque passage de la balançoire (effort rouge sur la figure 8a). Les enfants savent qu'à chaque poussée la balançoire va un peu plus haut (courbe rouge dans le repère déplacement-temps, à constater que la période propre est toujours la même) et que si le nombre de poussées (même de faible intensité) se multiplient la balançoire peut aller très haut.

Si de la même manière on exerce un effort « en phase » avec le mouvement libre du système boule sur tige, c'est-à-dire dont la variation a les mêmes caractéristiques que celle des vibrations libres (effort qui évolue de manière sinusoïdale avec un période égale à la période propre du système), alors l'amplitude des vibrations s'accroît progressivement (courbe rouge figure 8b) et l'on aboutit au **phénomène dit de résonance** qui, du fait des grandes déformations qu'il génère dans la tige peut conduire à sa rupture<sup>3</sup>. C'est donc un phénomène potentiellement dangereux.

Les immeubles — plus particulièrement les tours et les gratte-ciel — présentent aussi, en cas de séisme, la particularité de pouvoir entrer en résonance : d'une façon générale lorsqu'on fait vibrer une structure à une certaine période dépendant de ses caractéristiques géométriques (longueur, largeur, hauteur) ou mécaniques (masse, rigidité), la structure peut réagir en amplifiant considérablement les vibrations. Tout le monde connaît probablement l'histoire de ce pont métallique qu'un bataillon marchant au pas cadencé aurait emprunté : la cadence des pas étant la même que la fréquence de résonance du pont, les vibrations auraient été amplifiées et le pont se serait effondré.

## 2.2 - Séisme et mouvement des constructions

Les tremblements de terre sont un mouvement du sol. On montre que ce mouvement appliqué au pendule inversé considéré plus haut revient à un problème de même nature que celui qui consiste à appliquer une poussée périodique à la masse du pendule (figure 9a-9b). Par ailleurs sur le plan mécanique un pendule inversé peut être schématiquement équivalent à une construction telle que :

- un château d'eau (figure 10a), qui est un réservoir empli d'eau (la boule) sur une structure tubulaire (la tige)
- un immeuble à un étage (figure 10b) de masse  $M$  reposant sur des murs ou des poteaux de rigidité  $K/2$  (figure 9c).

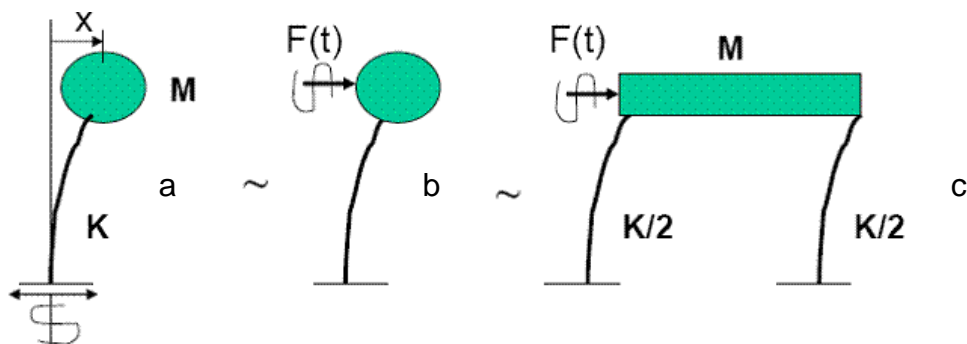


Figure 9 : Analogies mouvement sismique – application d'une poussée (a-b) et pendule inversé comme schéma d'une construction (b-c)

<sup>3</sup> La rupture apparaît dans un matériau lorsque les déformations locales imposées par le chargement entraînent une décohésion au sein de la matière, prémice d'une fissure. Cette valeur critique des déformations varie selon les matériaux comme on le verra § 3.3



Figure 10 : Exemple de constructions compatible avec un schéma à un degré de liberté : à gauche château d'eau en béton, à droite construction en portique bois

Sur ces bases on peut considérer que le schéma d'un immeuble à 2 étages est constitué de 2 boules sur une même tige, à 3 étages de 3 boules sur une même tige...etc. Du fait de sa ressemblance avec les ingrédients utilisés sur un BBQ, ce schéma est appelé le schéma « brochette » (cf. figure 11).

Nous avons vu plus haut que le pendule inversé : une boule sur une tige avait comme caractéristique sa période propre  $T_p$ , ce système est dit à 1 degré de liberté. On montre qu'un schéma brochette de 2 boules sur une même tige conduit à 2 périodes propres  $T_{p1}$  et  $T_{p2}$  et donc à 2 modes de résonance différents, il est dit système à 2 degrés de liberté. De la même manière un système de  $n$  boules sur une même tige aura  $n$  périodes propres et sera dit à  $n$  degrés de liberté ou multimodal. On doit constater cependant que c'est généralement la première période propre des immeubles qui est activée durant les séismes et de ce fait le pendule inversé dont la boule, de masse égale à celle de l'immeuble, est située au centre de gravité de l'immeuble et dont la tige dispose d'une rigidité équivalente à celle des éléments de la structure verticale est un schéma qui reste utilisable pour déterminer cette période propre.

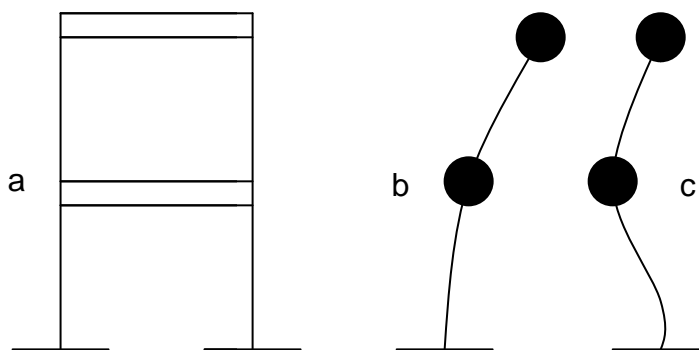


Figure 11 : a) système à 2 degrés de liberté, schéma « brochette » du mode 1 (b) et du mode 2 (c)

Pour un immeuble soumis à un séisme il en va de même, mais les ondes sismiques sont complexes. Elles peuvent être considérées comme la superposition d'ondes de différentes périodes; si ces périodes correspondent à une période de résonance de l'immeuble (en général en relation avec la première période propre), celui-ci va être sollicité de façon importante et l'immeuble va se déformer et éventuellement va subir des dégâts.

Sur la base du schéma en pendule inversé nous avons vu que la période de résonance est donnée par la relation  $T_p = 2\pi\sqrt{M/K}$ ,  $K$  étant d'autant plus grand que la hauteur est faible, que la section est massive et que le matériau est rigide. Ainsi, pour un type de structure donnée, en béton armé par exemple, la période de résonance des immeubles est principalement fonction de la hauteur de l'immeuble : plus l'immeuble est élevé, plus sa période de résonance est grande. Elle est aussi liée à la disposition des masses, plus la masse dans les étages est élevée plus la période est grande. L'ordre de grandeur des périodes de résonance pour les immeubles est de quelques secondes. Or, même à des centaines de kilomètres de distance d'un fort séisme, les ondes sismiques présentent une énergie importante dans le domaine de périodes allant de 0.5 secondes à 5 secondes, donc englobant les périodes de résonance des immeubles. Il convient donc d'être très vigilant vis-à-vis de la coïncidence période majeure du séisme – période propre de la construction, une telle situation devrait conduire à une modification structurelle pour en diminuer la vulnérabilité.

### 3 - VULNERABILITE SISMIQUE ET CONSTRUCTION PARASISMIQUE

#### 3.1 – Le génie parasismique

Le génie parasismique est la conjugaison, dans l'art de construire, d'un grand nombre de disciplines parfois très éloignées les unes des autres. Bien avant le développement des technologies parasismiques modernes, de nombreuses structures résistant aux séismes ont été bâties à travers le monde, telles que : églises, temples, mosquées et de nombreux châteaux. Les grandes civilisations ont donné naissance à des ouvrages intelligemment conçus et qui résistent de façon étonnante aux pires séismes. C'est le cas du site andin de Machu-Pichu, remarquable exemple d'architecture parasismique, de l'Alhambra de Grenade dont les fins piliers disposent, au niveau des chapiteaux, de feuilles de plomb autorisant les déplacements horizontaux, ou du palais impérial de Tokyo et des murailles qui l'entourent, composées de blocs de pierre pesant jusqu'à plusieurs tonnes. Ces bâtiments se sont admirablement bien comportés dans des régions souvent secouées de façon très sévère. Un fait surprenant retient l'attention, bien qu'isolées par des milliers de kilomètres, ces civilisations se sont inspirées de techniques assez similaires. Il est donc indéniable qu'il existe des règles élémentaires de construction permettant de résister efficacement aux séismes.

Il apparaît important de souligner que, dans le cas d'ouvrages courants, construire parasismique revient le plus souvent à respecter quelques règles simples et à se poser des questions de bon sens.

Plusieurs aspects interviennent dans la réalisation d'un projet de construction parasismique :

- la sismicité de la région et la nature du sol ;
- la qualité des matériaux ;
- la conception générale ;
- les éléments composant le bâtiment ;
- l'exécution des travaux.

Le problème est de savoir comment un bâtiment peut répondre aux sollicitations définies, de façon à (au choix) :

- éviter l'effondrement total ;
- limiter l'endommagement ;
- limiter les déformations pour assurer la continuité d'un service.

Sur les principes retenus préalablement : effet de séisme équivalent à l'effet d'un effort appliqué au niveau de la masse d'un système à un degré de liberté, les calculs en conception parasismique s'appuient sur le principe d'application d'efforts horizontaux au niveau de chaque plancher (cf. figure 12), chacun d'eux étant proportionnel à la masse de l'étage concerné et à l'accélération maximale que subit cet étage durant le séisme. Ces efforts doivent bien évidemment être cumulés à ceux des effets de la gravité (poids des planchers, des éléments de structure et des charges de service de l'immeuble) pour faire une analyse complète des efforts qui agissent sur l'immeuble.

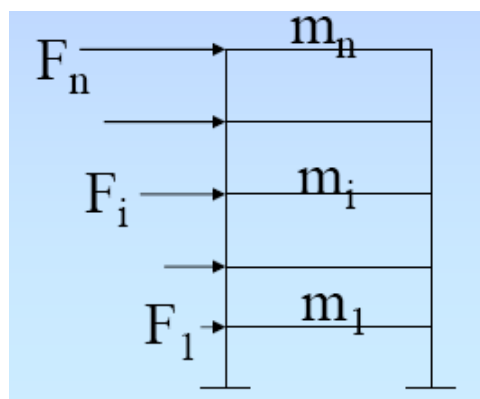


Figure 12 : Efforts retenus comme effets d'un séisme sur un immeuble de n niveaux

### 3.2 La sismicité de la région et la nature du sol

L'implantation d'un ouvrage nécessite de prendre en compte la sismicité de la région mais surtout de procéder à une étude de sol sérieuse permettant de dresser avec une bonne précision la coupe géologique et les caractéristiques des différentes couches. La qualité du sol joue un rôle important et c'est pourquoi, entre autres, le roc dur en place est à choisir plutôt qu'un remblai artificiel ou un terrain meuble, trop souvent gorgé d'eau, et dès lors **susceptible de se liquéfier** sous l'effet des vibrations, et de devenir en quelques instants incapables de soutenir un bâti quelconque (dans ce cas, il aurait fallu construire sur pieux ou puits par exemple).

Par ailleurs, il faut garder présent à l'esprit le risque des effets induits dus aux tremblements de terre : éboulements, glissements de terrain, etc...., qui peuvent mettre gravement en péril plusieurs bâtiments, voire tout un quartier construit sur une zone pentue en remblai. La construction parasismique dépend donc beaucoup de la nature du sol, et les solutions techniques qui seront proposées pour un bâtiment ne seront pas toujours transposables à d'autres bâtiments (des études sont nécessaires).

### 3.3 La qualité des matériaux

La nature des matériaux utilisés et leur qualité sont de première importance. Ils doivent répondre le mieux possible aux sollicitations mécaniques anormales que les tremblements de terre imposent. Il n'existe pas a priori un matériau plus « parasismique » qu'un autre; toutefois, il est évident que le béton armé ou la charpente métallique présentera une plus grande résistance que la maçonnerie ou le bois aggloméré. Il convient donc d'apporter un soin particulier au choix des matériaux.

Par ailleurs, les dimensions des éléments constituant le bâtiment devront être pensées en fonction de la qualité des matériaux pouvant réellement être obtenus sur le site. Par exemple, un mur en béton armé de faible performance devra avoir une épaisseur supérieure à celui pouvant faire appel à un béton de meilleure qualité ; cette remarque reste valable pour d'autres types de matériaux tels que la pierre, la brique, etc.

Plus généralement la dimension des éléments porteurs et le choix des matériaux qui les composent dépendent des sollicitations auxquels ceux-ci sont soumis. Il convient de faire en sorte que les seuils de ruptures locales (déformations excessives entraînant la formation de fissures) ne soient pas atteints. C'est l'art de l'ingénieur que de concevoir les structures afin que sous l'effet des chargements attendus une réserve de sécurité soit respectée par rapport à ces seuils critiques. Le tableau 3 ci-dessous donne quelques exemples de seuils critiques moyens

Matériau	Acier pour la construction métallique	Acier pour le béton armé	Béton sous compression	Maçonnerie ou béton non armé en traction	Néopène
Déformation moyenne à rupture <i>en mm par mètre de longueur</i>	200	70	3	0,2	> 1000

Tableau 3 : Déformation à rupture moyenne pour différents matériaux

### 3.4 Les points clés d'une conception parasismique

Il faut garder en mémoire que la construction doit pouvoir se déformer sans rupture significative et absorber l'énergie transmise au bâtiment par la secousse sismique. On introduit ainsi la notion de ductilité, qui est la propriété d'une construction de se déformer notablement avant la rupture.

A la ductilité s'oppose la fragilité, qui correspond à une rupture brutale avec peu de déformation (comme celle du verre). De façon imagée, pour la construction parasismique, il existe deux types de solutions :

- *le chêne* : une rigidité du bâti qui lui permette, grâce à sa cohésion et sa solidité mêmes, de ne pas se désintégrer ;

- *le roseau* : une élasticité suffisante, il plie mais ne rompt pas.

C'est pourquoi la tâche du concepteur est, dans le contexte d'une construction à usage donné, de trouver un compromis pour obtenir la combinaison optimale entre la résistance et la déformabilité, ce qui n'est pas chose facile, le comportement de l'ensemble du bâtiment dépendant du comportement de chacun des éléments et de la façon dont ils sont assemblés.

### 3.5 Le respect de la réglementation parasismique et la bonne exécution des travaux

Il n'est pas question d'exposer ici toutes les règles relatives à la conception et à la réalisation des bâtiments : les principes énoncés ne sont pas exhaustifs. Le génie parasismique est une véritable science en évolution et les indications données seront sans doute complétées à l'aide des enseignements tirés de l'observation in situ des séismes à venir. Les règles exposées sont simples, mais les derniers séismes ont montré que ces règles n'étaient pas toujours respectées.

Il est bon que la préoccupation parasismique soit intégrée dès les premières phases de la conception du projet, au même titre que l'étanchéité ou l'isolation. Cette approche doit devenir un réflexe, et la réglementation un aiguillon.

Il faut aussi avoir en tête que le respect le plus strict des règlements parasismiques est inutile sans une bonne mise en œuvre et une exécution sur chantier soignée et menée par des personnes responsables. La mauvaise exécution est hélas trop souvent la cause de désordres importants et de pertes humaines pourtant évitables.

Il est nécessaire que la préoccupation parasismique soit intégrée dès les premières phases de la conception du projet et qu'elle devienne un réflexe, de façon à en réduire et en contrôler les surcoûts probables. Ce réflexe de « construire parasismique » ne peut résulter que d'une collaboration permanente entre utilisateurs, architectes, ingénieurs et entreprises.

Il convient de rappeler qu'une application stricte des règles générales de la construction lors de la conception du projet, ainsi qu'une bonne exécution des travaux, permettent aux bâtiments de résister de façon satisfaisante aux séismes de faible à moyenne intensité.

Les forces dans le bâtiment sont proportionnelles aux masses des éléments ; il convient donc de répartir les masses de manière continue dans le sens vertical, mais aussi horizontal.

Les locaux/pièces comportant de lourdes charges devraient être placés le plus bas possible.

### 3.6 Les formes de bâtiments en plan

Les bâtiments n'ayant pas des formes simples doivent donner lieu à une réflexion plus approfondie, des calculs particuliers et des dispositions spécifiques. Il apparaît, lors de l'examen du comportement des structures ayant été soumises aux tremblements de terre, que **les formes les plus simples sont les plus fiables**. Dans ce sens, il convient de favoriser les symétries et d'éviter les angles rentrants. Lorsque les bâtiments ont des configurations irrégulières (formes en T, L, U, H, X, Y), il se développe des efforts particuliers de torsion qui peuvent même être à l'origine de leur endommagement. Si l'immeuble est constitué de blocs (différents par leur hauteur par exemple cf. figure 13) il convient de les séparer par des joints pour permettre à chacun de vibrer indépendamment.

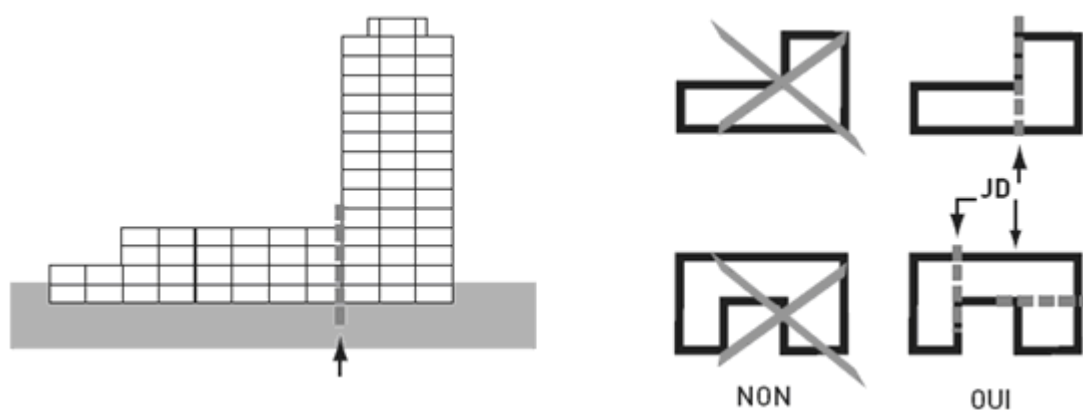


Figure 13 : Séparation par joint d'un immeuble en blocs de différentes formes afin de permettre une vibration indépendante durant le séisme et éviter des ruptures à leur liaison

### 3.7 Les formes de bâtiments en élévation

Comme pour les dispositions en plan, la conception des bâtiments en élévation doit prendre en considération simultanément les formes, les rigidités et les masses. Il est recommandé d'avoir des formes simples et d'éviter d'élever inutilement le centre de gravité des constructions. Bien que tolérées dans certains cas, les irrégularités (étages en retrait) sont à éviter et surtout les transparences : structure réduite dans un étage pour dégager des espaces (c'est souvent pratiqué pour l'installation de commerce au rez-de-chaussée d'immeubles de ville – cf. figure 14).

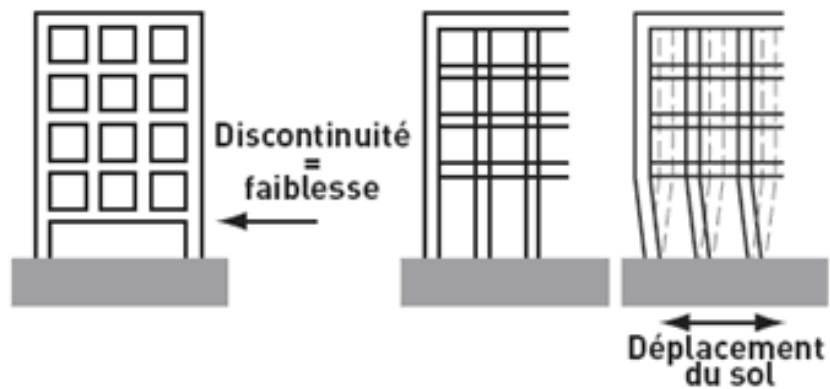


Figure 14 : Transparence de rez-de-chaussée provoquant une discontinuité de structure et en conséquence une faiblesse vis-à-vis du séisme

#### Cas des bâtiments de grande hauteur

C'est peut-être un paradoxe, mais des immeubles élancés de plus de vingt étages sont généralement moins vulnérables que de modestes maisons : en effet, ces bâtiments sont calculés pour résister au vent (l'action du vent peut être plus défavorable que celle du séisme) et, en raison de leur importance, ils font l'objet de plus d'études, de surveillance, depuis la conception jusqu'à la réalisation.

#### Cas des maisons individuelles

Bien qu'il s'agisse en général de constructions peu élevées, avec un caractère massif et très rigide, on n'a souvent constaté que ce type de maison subit d'importants dommages. Cependant, construire de façon parasismique des maisons individuelles ne demande rien de plus que l'application de quelques principes simples : l'utilisation de matériaux de bonne qualité et, d'une manière plus générale, le respect des règles de bonne construction qui touchent principalement :

- le système de fondation qui doit être adapté aux types de sol et de construction,
- la structure en élévation dont on doit assurer la bonne tenue notamment en positionnant des renforcements autour des ouvertures (portes et fenêtres) et à la liaison avec les planchers et la toiture (chainages).

### 3.8 Les fondations

Il existe deux grandes catégories de fondations, en fonction de la qualité du sol :

- les fondations superficielles : le bon sol se trouve pratiquement en surface. Il convient de lier ces fondations entre elles dans les deux directions par un système de poutres-semelles (cf. figure 15a). Ce dispositif permet de limiter les déplacements relatifs. Les fondations isolées sont à proscrire.
- les fondations profondes (rares pour les maisons individuelles) : en règle générale, les constructions sur sol mou se trouvent placées en situation plus défavorable que les constructions sur sol ferme. Lorsqu'on a un mauvais sol ou que les ouvrages sont trop lourds, il faut réaliser des fondations profondes (cf. figure 15b), qui doivent être reliées à leur partie supérieure par un réseau de longrines.

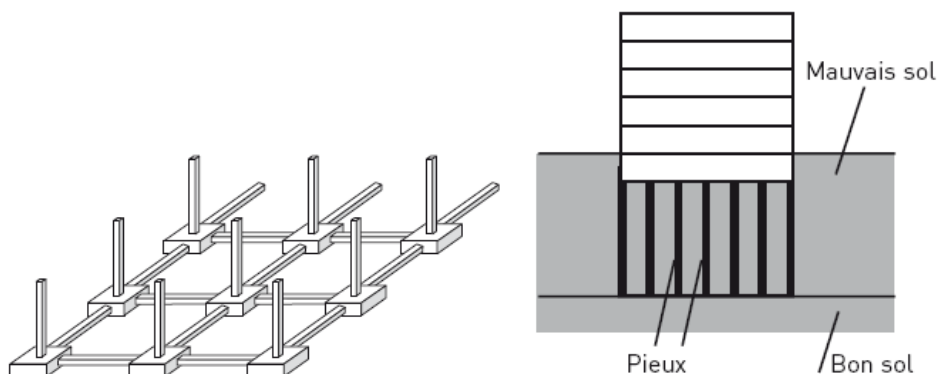


Figure 15 : Fondations, à gauche : fondations superficielles, à droite : fondations profondes.

## 4 – PISTES POUR REDUIRE LA VULNERABILITE

### 4.1 – Isolation sismique

Il s'agit d'introduire un système en interface entre la construction et le sol susceptible de filtrer les oscillations sismiques d'où le terme d'isolation sismique. Ces systèmes sont à base d'appuis en néoprène (isolateurs cf. figure 16) utilisé pour ses propriétés d'importante déformabilité (cf. tableau 3) et de vérins amortisseurs freinant par leur viscosité les mouvements intempestifs (même principe que les amortisseurs de voiture).

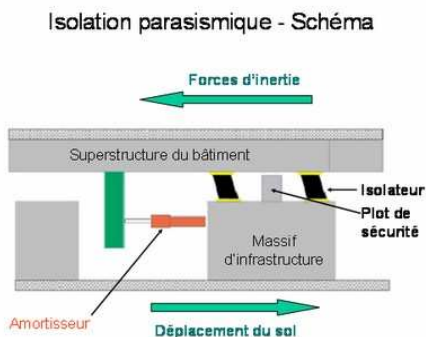


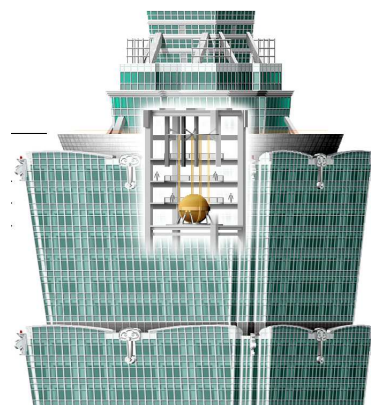
Figure 16 : principe de l'isolation sismique, filtrer et amortir le mouvement sismique : à gauche schéma, à droite sa mise en œuvre dans un collège en Martinique (photo CRM).

### 4.2 – Amortisseur introduit au sein même des structures

Le tremblement de terre introduit au sein de la structure une énergie qu'il est nécessaire de dissiper. La solution de l'isolation vue ci-dessus, filtre le mouvement et donc l'énergie qui est à dissiper. L'idée est ici d'introduire au sein même de la structure des amortisseurs (même principe que ceux cités ci-dessus) dans le but d'en constituer une source de dissipation d'énergie du fait de la grande viscosité qu'ils développent. L'énergie dissipée par les amortisseurs n'est plus disponible pour déformer et rompre les éléments de la structure qui se trouve ainsi beaucoup moins sollicitée et donc mieux protégés.



a



b

Figure 16 : a) contreventement amortissant au sein d'une structure en béton (ph. Staleson), b) masse « accordée » en haut de la tour Tapei 101 (Taiwan).

### 4.3 – Système de masse accordée

Ces systèmes utilisés notamment en Asie (Japon, Taiwan,...) dans les tours de grande hauteur vise à installer en haut de la structure un « pendule » conçu pour avoir un mouvement en opposition de phase avec celui de la structure, ce qui nécessite de régler la masse et le système d'accrochage (d'où le nom de masse accordée – cf. figure 16b). En cas de séisme le mouvement du pendule va réduire fortement les oscillations de la structure et de ce fait la protéger.

#### 4.4 – Renforcement de structures existantes

Les solutions précédentes sont principalement utilisées pour des ouvrages neufs dont la mise en place des systèmes préconisés pourra être prévue dès la conception de la structure. Pour les ouvrages existants il est bien souvent plus économique de proposer un renforcement de la structure existante par ajout de matière :

- rajout d'éléments tels que « diagonales » de contreventement (figure 17a) ou murs en béton armé pour renforcer localement une structure défaillante
- renforcer directement un élément existant par une extension de section ou le collage de matériaux additionnels (lame d'acier ou tissus de fibres de carbone, figure 17b).



Figure 17 : a) renforcement par contreventements métalliques extérieurs (ph. Common), b) renforcement par collage de tissus de fibres de carbone autour d'un poteau en béton armé (ph. Sika)

#### 5 - CONCLUSIONS : ce qu'il est nécessaire d'éviter

A titre d'exemple nous donnons ci-dessous quelques exemples issus du séisme de magnitude 7,3 survenu à Kobé (Japon) le 17 janvier 1995 et du séisme de magnitude 7.1 à Loma-Prieta (USA) le 17 octobre 1989 montrant que des erreurs de conception peuvent être dramatiques (photothèque AFPS).



Figure 18 : Effondrement d'immeubles, à gauche, effondrement du fait d'une faiblesse de structure en rez-de-chaussée (transparence) ; à droite, effondrement d'un étage, du fait d'une liaison (passerelle) qui a constitué une butée durant le mouvement entre deux blocs d'immeubles de différentes hauteurs.





Figure 19 : Effondrement de ponts ; à gauche, pont construit en pendule inversé (masse sur tige) et à gauche rupture d'un pont du fait de la faiblesse de la liaison entre les 2 tabliers superposés.



Figure 20 : Effondrement de poteaux en béton armé du fait de manque de renforcements ; à gauche, par compression excessive ; à droite par cisaillement de la liaison avec une poutre.

## 6 - REFERENCES

- Le risque sismique*, CD rom édité par l'Institut des Risques Majeurs (IRMa) de Grenoble, 2008  
 J. Mazars, Cours de « Génie parasismique », Grenoble-INP et ENI Tunis, 2008  
 C. Desprez, Analyse et Réduction de la Vulnérabilité Sismique des Structures Existantes, thèse de doctorat, Grenoble-INP, 2010  
 Le risque sismique en France, Collection les enjeux des Géosciences - BRGM éditions, 2009