

## CHAPITRE 2

### Caractéristiques des mouvements cycliques

#### 2.1 Le phénomène physique

Les séismes majeurs sont liés à l'existence de mouvements tectoniques globaux continuellement en action qui soulèvent des chaînes de montagnes et creusent des tranchées océaniques à la surface de la terre.

Ces mouvements affectent une quinzaine de "plaques" sphéroïdales et engendrent des contraintes sur les lignes de contact des plaques (Fig. 2.1). Lorsque ces contraintes deviennent trop élevées et supérieures à la « résistance au frottement », une rupture brutale se produit : c'est un tremblement de terre, à la suite duquel un nouvel état provisoire de stabilité est réalisé.

Il résulte de cette description qu'il existe des régions du monde à plus ou moins haut risque sismique, suivant qu'elles sont plus ou moins proches des zones de jonctions des "plaques" (Fig. 2.2).

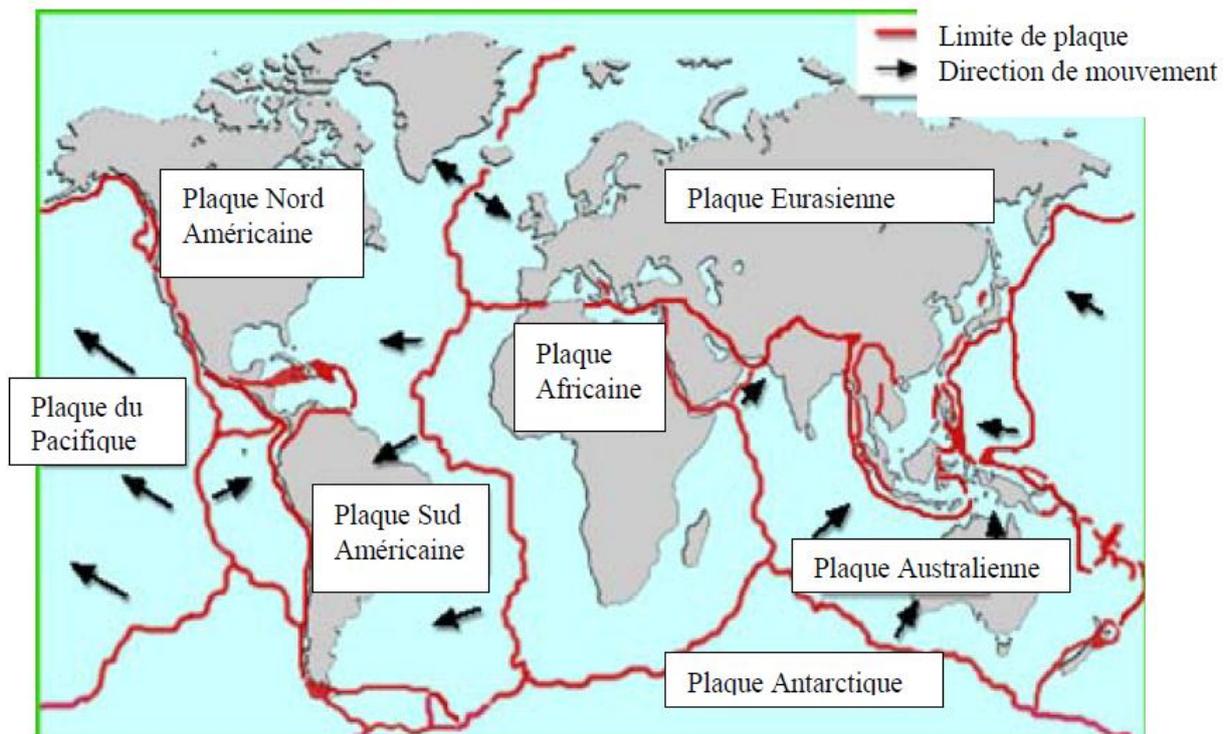


Fig. 2.1- Carte du monde montrant les principales plaques tectoniques  
([www.ideers.dris.ac.uk](http://www.ideers.dris.ac.uk))

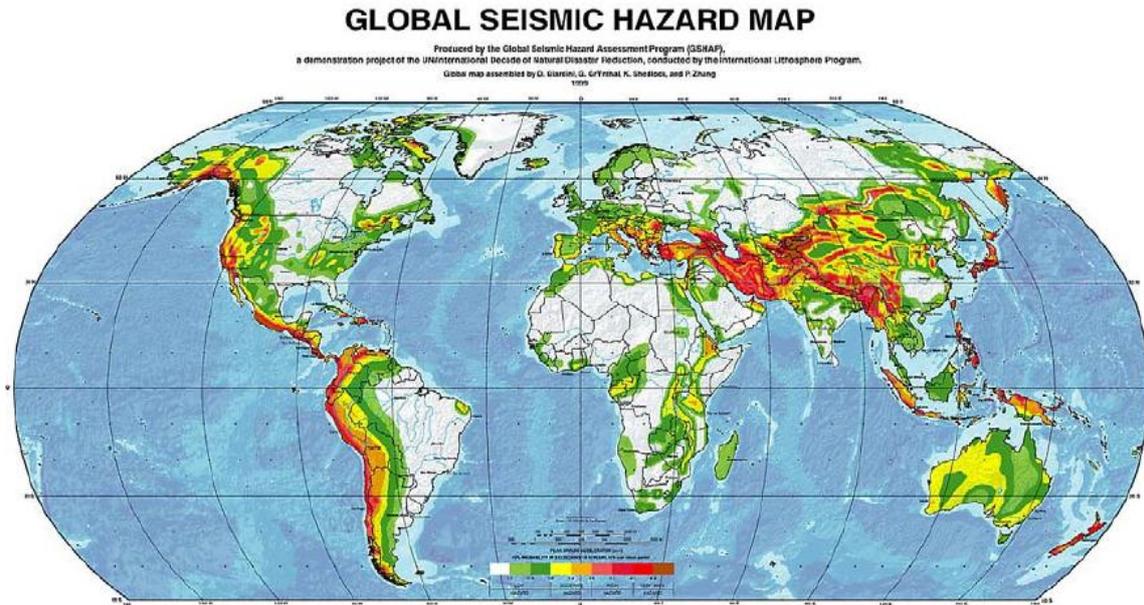


Fig. 2.1 – Les zones de sismicité élevée se trouvent aux lignes inter-plaques ( seismic Hazard = aléa sismique

L'importance relative des composantes du mouvement du sol en un point dépend de la position du point considéré par rapport au foyer (ou « hypocentre ») du séisme. A l'aplomb de celui-ci (« épicentre »), la composante verticale est du même ordre que la composante horizontale. A plus grande distance, l'importance relative de la composante verticale diminue et vaut 50 à 70% de l'horizontale. Les composantes de rotation ont généralement des effets négligeables.

Le mouvement vertical est souvent perçu comme moins dommageable que l'horizontal, partiellement en raison de l'importance généralement moindre de cette composante, mais surtout en raison du fait que les constructions sont naturellement conçues pour reprendre l'action (verticale) de la pesanteur avec une sécurité convenable alors qu'elles ne présentent pas les mêmes ressources pour une action horizontale.

### 2.1.1 Hypocentre ou foyer

L'**hypocentre** ou **foyer** est le point de départ de la rupture sismique sur une faille (Fig. 2.3). C'est à ce point que sont émis les trains d'ondes sismiques captées ensuite à leurs arrivées par les sismomètres. C'est donc un point essentiel dont la localisation, qui comprend aussi la profondeur à l'intérieur de la terre, est très importante dans l'analyse des tremblements de terre. La projection de l'hypocentre sur la surface terrestre s'appelle l'épicentre.

Pour les forts séismes, l'étendue spatiale et temporelle de la source est trop important pour que l'hypocentre puisse être assimilé à un point, aussi les sismologues définissent un centroïde qui correspond au barycentre de la rupture en temps et espace.

Lors de l'explosion d'une bombe nucléaire, l'hypocentre représente la zone à l'aplomb de l'explosion (quand elle est aérienne) et donc la zone d'impact majeure.

### 2.1.2 Epicentre

Lors d'un séisme, on désigne par **épïcéntré** la projection à la surface de la Terre de l'hypocéntré (ou foyer), le point où prend naissance la rupture (le préfixe grec *epi* signifie « au-dessus ») (Fig. 2.3). Le travail consistant à déterminer la position de l'épicentre du séisme s'appelle localisation.

Les ondes sismiques ont à parcourir le chemin le plus court pour atteindre l'épicentre à la surface du sol. Elles perdent, de ce fait, très peu d'énergie en raison du peu de roches qu'elles traversent. Comme elles ont plus d'énergie à l'épicentre, les dégâts provoqués sont plus importants en cet endroit qu'ailleurs.

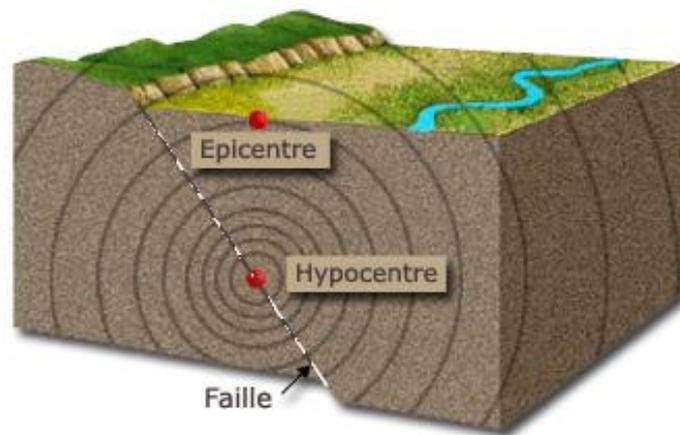


Fig. 2.3 – Hypocentre et épïcéntré d'un séisme

## 2.2 Caractéristiques des séismes

On peut caractériser la "taille" du tremblement de terre par différents paramètres:

**2.2.1 La magnitude  $M$**  (échelle de RICHTER) est une évaluation de l'énergie libérée au foyer du tremblement de terre. Comme telle, cette quantité n'est pas utilisable par l'ingénieur des constructions qui s'intéresse à un mouvement en surface et dans une zone géographique donnée. Le foyer peut se trouver à plusieurs kilomètres sous la surface et à plusieurs centaines de kilomètres de la zone donnée.

**2.2.2 L'intensité  $I$**  (échelle de MERCALLI) est une caractérisation de l'importance des effets matériels observés en surface et de la perception par la population. Cette description vaut pour une zone géographique donnée, mais est assez qualitative. L'intensité en un point dépend non

seulement de la taille du séisme (magnitude) mais aussi de la distance au foyer, de la géologie locale et de la topographie.

Les médias emploient souvent les termes d'**échelle de Richter** ou d'**échelle ouverte de Richter**, mais ces termes sont impropres : l'échelle de Richter, stricto sensu, est une échelle locale, surtout adaptée aux tremblements de terre californiens. Les magnitudes habituellement citées de nos jours sont en fait des **magnitudes de moment** (notées  $M_w$  ou  $M$ ).

La magnitude et l'intensité (comme l'échelle de Mercalli) sont deux mesures différentes. L'intensité est une mesure des dommages causés par un tremblement de terre. Alors qu'un séisme a théoriquement une seule valeur de magnitude (en pratique plusieurs valeurs de magnitude peuvent être citées, selon la manière dont les calculs ont été réalisés), l'intensité varie en fonction de l'endroit où l'observateur se trouve<sup>1</sup>. Il existe des relations reliant l'intensité maximale ressentie et la magnitude mais elles sont très dépendantes du contexte géologique local. Ces relations servent en général à retrouver la magnitude des tremblements de terre historiques.

### 2.2.3 L'accélération maximale ( $ag$ )

Un paramètre important pour l'évaluation des effets des séismes à un endroit donné est l'**accélération maximale** du sol ou accélération de pointe, PGA (Peak Ground Acceleration) en anglais.

L'amplitude de l'accélération maximale du sol permet de se faire une idée de la résultante de force  $F$  appliquée à la construction de masse  $m$  :  $F = m ag$  si la construction est indéformable et bouge comme le sol (en général  $F > m ag$ ).

C'est en termes d'accélération maximale  $ag$  au niveau du bedrock qu'on exprime les cartes de zonation ou zonage sismique quantifiant le niveau sismique à prendre en compte pour l'application des règles de constructions parasismiques.

### 2.2.4 Déplacement maximal $dg$

Un autre paramètre utile pour l'évaluation des effets des séismes à un endroit donné est le **déplacement maximal  $dg$**  du sol, qui donne une idée de l'ordre de grandeur du déplacement relatif du centre de gravité de la structure par rapport à la base de la structure : quelques cm en zone faiblement sismique, jusqu'à un m en zone très sismique.

### 2.2.5 La durée

La **durée** du tremblement de terre est un paramètre significatif dans les processus de fissurations et dégradations progressives des éléments d'une construction. Elle est liée à la magnitude du séisme.

Cette durée est au maximum de l'ordre de 60 s en zone très sismique, mais n'est que de quelques secondes en zone peu sismique.

### 2.2.6 L'accélérogramme

La caractérisation la plus explicite d'un tremblement de terre est évidemment constituée d'**accélérogrammes** enregistrés dans la zone géographique considérée, qui contiennent à la fois les aspects accélérations, durée et contenu fréquentiel (Fig. 2.4).

Les accélérogrammes constituent une donnée d'action directement utilisable par la dynamique des structures.

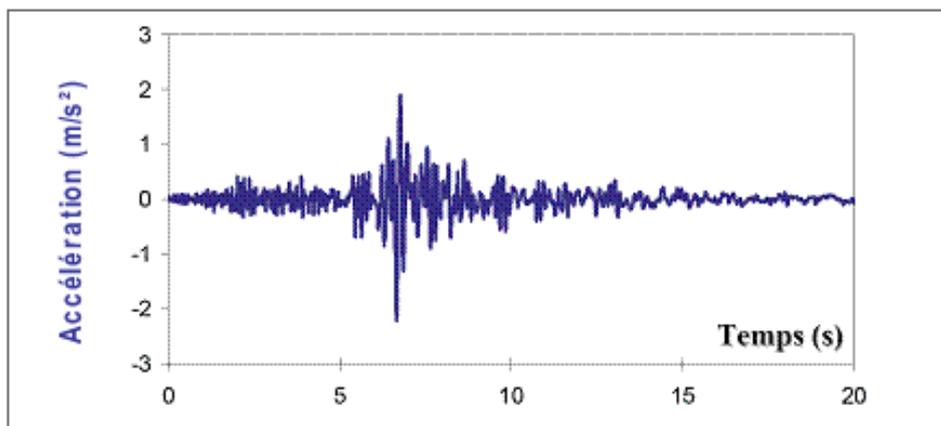


Fig. 2.4 – Accélérogramme enregistré d'un séisme

### 2.2.7 Spectre de réponse

Enfin, les **spectres de réponse** constituent la caractérisation des tremblements de terre la plus couramment utilisée par l'ingénieur des constructions (Fig. 2.5).

Ils sont des sous-produits des accélérogrammes et permettent un calcul simple des efforts internes dans une structure soumise à séisme.

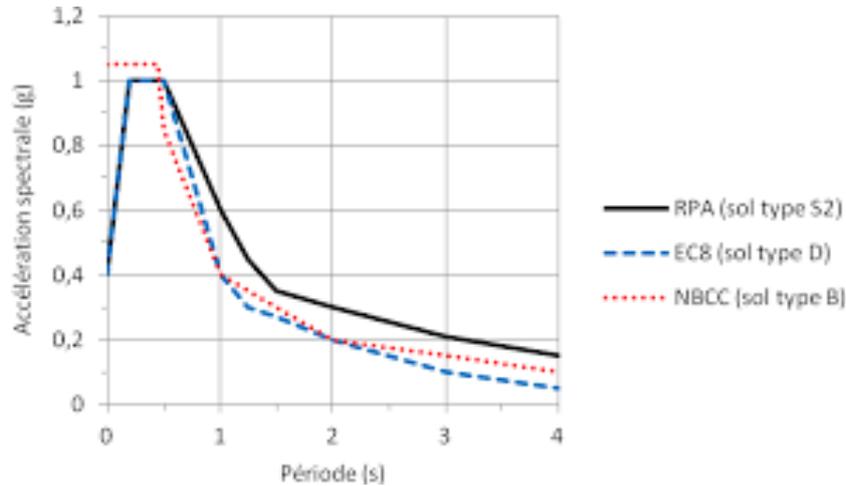


Fig. 2.5 – Spectre de réponse

## 2.3 – Effets particuliers des séismes

### 2.3.1 Tassement

Des sables secs soumis à vibration peuvent subir des tassements importants, qui peuvent être estimés par des mesures des vides du sable. Ces tassements peuvent atteindre quelques dizaines de cm (Fig. 2.6). Différentiels ou non, ils peuvent être suffisants pour rendre une construction inutilisable.

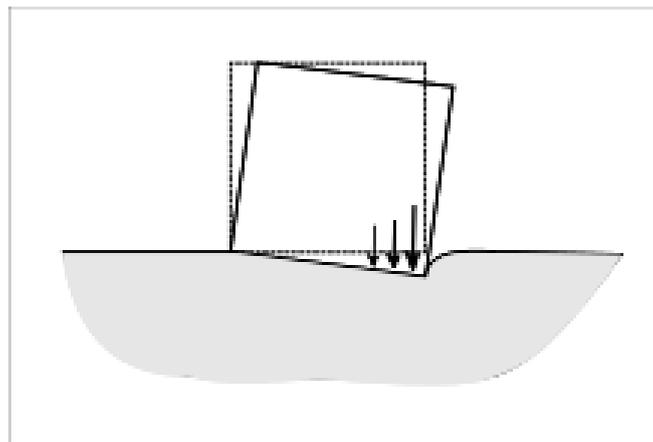


Fig. 2.6- Tassement dû à un séisme

### 2.3.2 Liquéfaction

Les sables fins saturés en eau peuvent être le siège d'un phénomène encore plus spécifique au contexte sismique : la **liquéfaction** des sols.

L'explication du phénomène est la suivante:

- La résistance au cisaillement d'un sol est donnée par la relation :

$$\tau_R = (\sigma - u) \operatorname{tg} \Phi$$

avec :  $\Phi$  : angle de frottement interne du sol;

( $\sigma - u$ ) : pression effective;

$\sigma$  : pression non déjaugée;

$u$ : pression interstitielle de l'eau contenue dans le sol.

- Comme la mise en mouvement du sol entraîne une montée de la pression interstitielle  $u$ , il y a réduction de la résistance  $\tau_R$  du sol, jusqu'à son annulation :

$$\tau_R = (\sigma - u) \operatorname{tg} \Phi = 0$$

Un matériau sans résistance au cisaillement se comporte comme un liquide, d'où le terme « liquéfaction » du sol.

Ce phénomène peut entraîner des effets catastrophiques :

- une couche non liquéfiable située au dessus d'une couche liquéfiée peut glisser sur celle-ci, si des pentes existent.
  - Des déplacements de sol de grande amplitude sont possibles: ainsi, des glissements de terrain de plusieurs km ont été observés au Pérou. Des constructions situées dans ce genre de site sont entraînées dans le mouvement général du sol (Fig. 2.7).
- dans les sites dont la surface est horizontale, on a observé des phénomènes d'inclinaison, voire de renversement des structures ; seul le respect de la condition de stabilité des bateaux (centre de gravité plus bas que le centre de carène) empêcherait ce renversement...



Fig. 2.7 – Liquéfaction d'un sol dû à un séisme

### 2.3.3 Tsunami

Lorsque le mouvement relatif des bords de la faille est de type coulissage vertical et qu'il a lieu au fond de la mer, il entraîne soit à une aspiration d'eau (si le fond descend d'un côté de la faille, l'autre côté restant fixe), soit à une poussée appliquée à l'eau (si le fond monte d'un côté de la faille, l'autre côté restant fixe).

Ce phénomène provoque une formation d'onde en surface de l'eau (vague); cette vague se propage depuis la zone épacentrale sur des centaines de km ; sa hauteur peut atteindre la dizaine de mètres pour des séismes majeurs ;

le « tsunami » est l'effet du déferlement de cette vague sur la côte : destruction de constructions, entrainement de bateaux à l'intérieur des terres, etc... (Fig. 2.8).



Fig.2.8- Déferlement d'une vague dû à un tsunami

### 2.3.4 Effets de site

Les sismologues parlent d'effet de site, lorsque les ondes sismiques se trouvent fortement modifiées par les caractéristiques géologiques ou topographiques qui peuvent amplifier ou atténuer les secousses :

La **nature du sous-sol** joue par exemple un rôle fondamental. Un substrat meuble va amplifier considérablement les mouvements par rapport à un socle rocheux. On peut souvent constater, après un séisme des dégâts plus importants dans les bâtiments construits sur des alluvions que sur un sol rocheux. Le séisme de Mexico en 1985 est à ce titre un cas d'école.

Les secousses sont également amplifiées par la **topographie locale**. Les mouvements sont alors beaucoup plus forts sur le haut d'une colline, d'une butte ou sur le rebord d'une falaise (Fig.2.9).

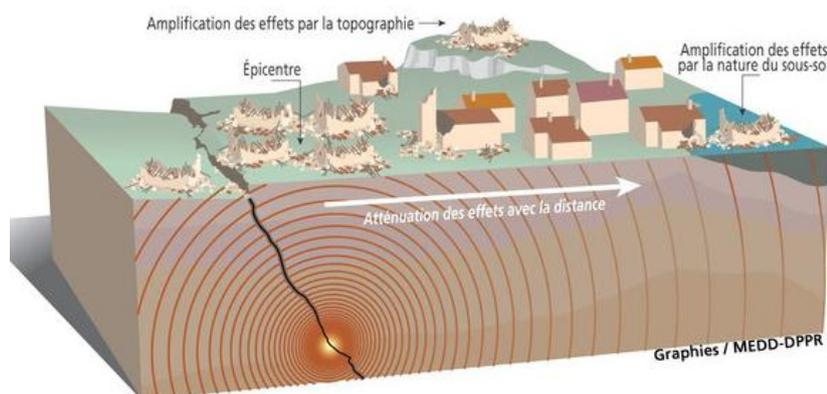


Fig. 2.9 – Effet de site

### 2.3.5 Effets induits

Des phénomènes naturels peuvent être provoqués ou induits par les séismes, et dont les effets s'ajoutent à ceux liés aux mouvements du sol (Fig. 2.10).

Les principaux effets induits sont les **mouvements de terrain** : glissements, éboulements, rupture de surplomb rocheux...

Les séismes peuvent également produire des **modifications dans les écoulements d'eau souterraine**. Il n'est pas rare d'observer le tarissement voire l'apparition d'une source après un séisme.

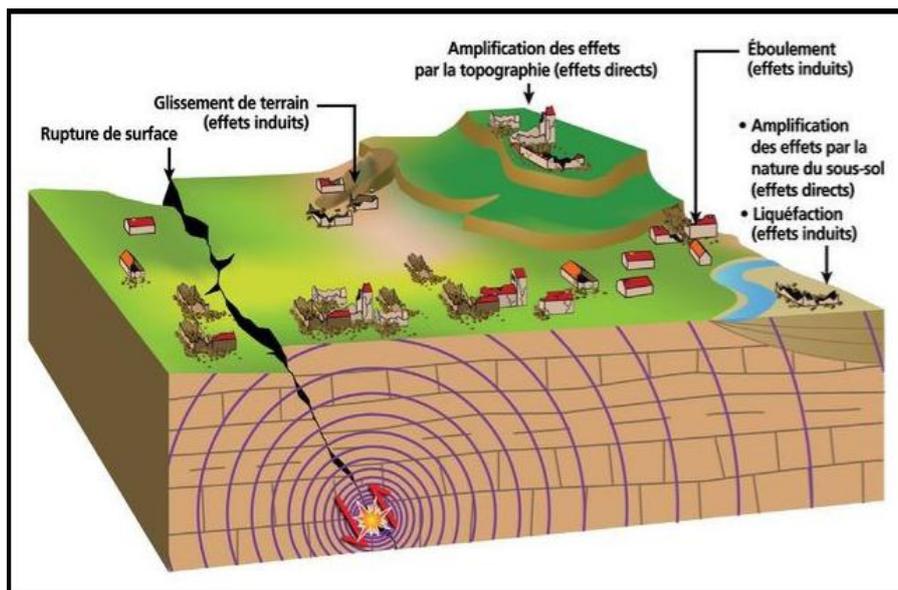


Fig. 2.10 – Effets