

Chapitre 1. Les séismes

1.1 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. 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". Figure 1.1.a.

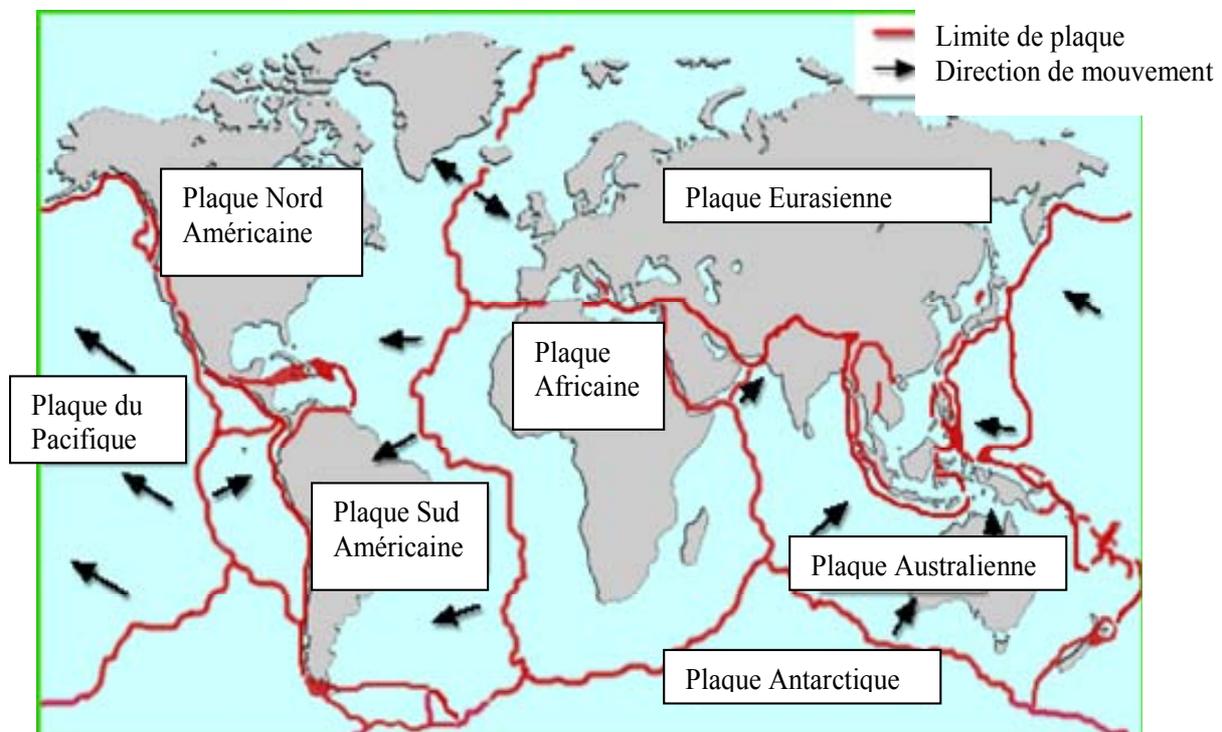


Figure 1.1.a. Carte du monde montrant les principales plaques tectoniques.

(d'après Bristol University website: www.ideers.bris.ac.uk).

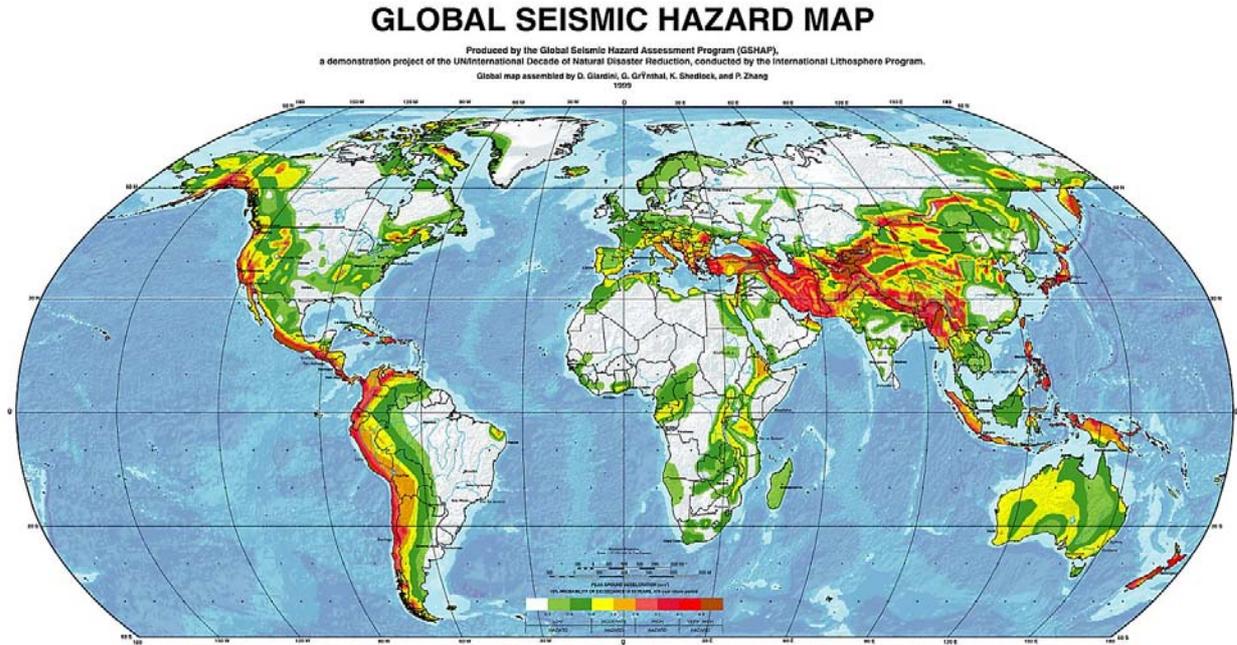


Figure 1.1.b. Les zones de sismicité élevée se trouvent aux lignes inter – plaques (seismic hazard = alea sismique).

Les zones de jonction inter - plaques ne sont pas les seules où se passent des décrochages de failles. Des phénomènes similaires, d'amplitude moindre, ont lieu dans des failles intérieures aux plaques mentionnées. On parle alors de séismes « intra - plaques ».

Pour les séismes importants, le mouvement relatif des bords de la faille peut être apparent en surface. (Fig.1.2 a). Il existe différents type de mouvement relatif : coulissage horizontal, coulissage vertical. Ces déplacements relatifs permanents du sol s'observent près de l'épicentre du séisme, mais le choc du tremblement de terre entraîne aussi la création et la propagation d'ondes de compression et de cisaillement dans le sol à des distances très grandes ; en fait ces ondes font le tour de la terre en s'atténuant progressivement. A la surface du globe, l'effet de ces ondes est un mouvement de déplacement vertical et horizontal du sol. Le déplacement horizontal différentiel entraîne des rotations (Fig.1.2 b).

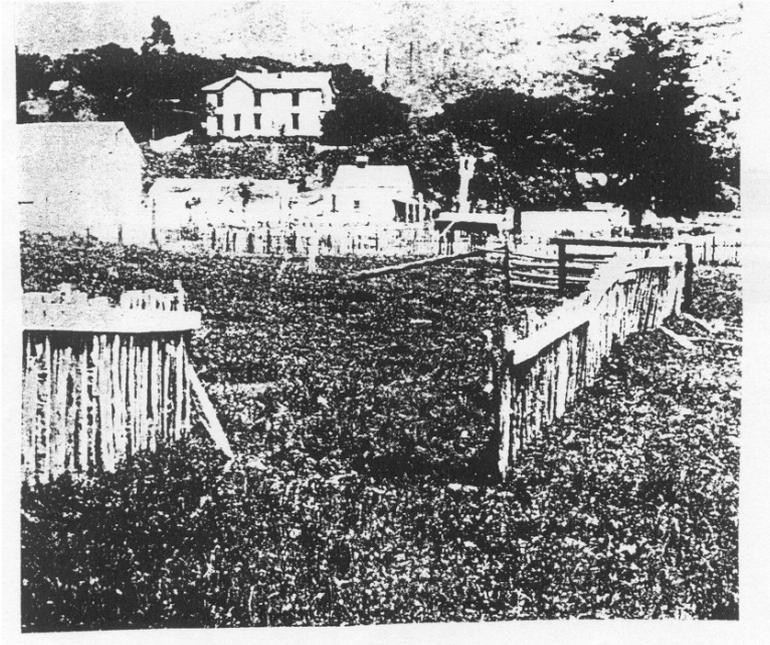


Figure 1.2 a.. Coulissage de la faille San Andreas (Californie).

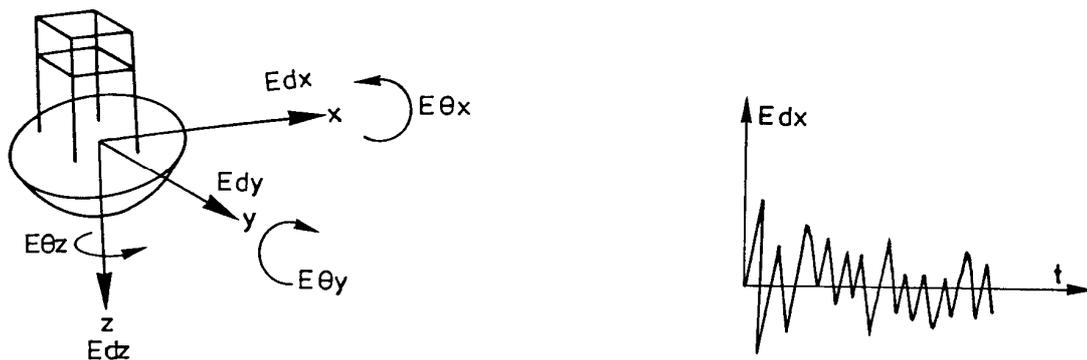


Figure 1.2 b. Composantes de l'action sismique.

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.

1.2 Caractérisation des séismes.

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

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.

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.

Un paramètre important pour l'évaluation des effets des séismes à un endroit donné est l'**accélération maximale a_g** du sol ou accélération de pointe, PGA (Peak Ground Acceleration) en anglais. Son ordre de grandeur est de 0,4 g à 0,6g en zone très sismique (Japon, Turquie) et de 0 à 0,1g en zone faiblement sismique (Belgique). 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 : $F = m a_g$ si la construction est indéformable et bouge comme le sol (en général $F > m a_g$, comme on le voit au Chapitre 2). C'est en terme de d'accélération maximale a_g 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. On en donne deux exemples aux Figures 1.3 et 1.7.

Un autre paramètre utile pour l'évaluation des effets des séismes à un endroit donné est le **déplacement maximal d_g** 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.

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.

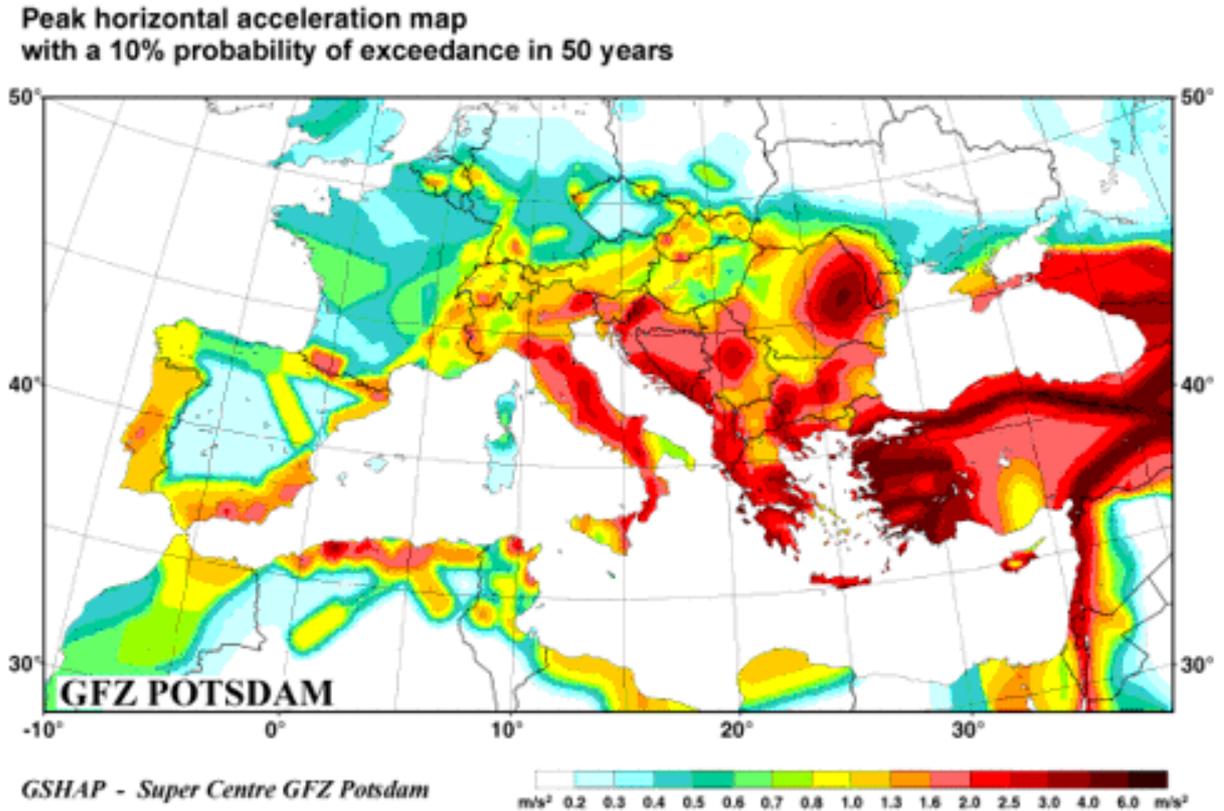


Figure 1.3. Zonation sismique européenne en accélération maximale a_g (PGA) en m/s^2 .
GFZ-Potsdam website <http://seismohazard.gfz-potsdam.de/projects/en/>

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. Les accélérogrammes constituent une donnée d'action directement utilisable par la dynamique des structures. Voir 2.1 à 2.3.

Enfin, les **spectres de réponse** constituent la caractérisation des tremblements de terre la plus couramment utilisée par l'ingénieur des constructions. Ils sont des sous-produits des accélérogrammes et permettent un calcul simple des efforts internes dans une structure soumise à séisme. Voir 2.4.

1.3 Effets particuliers des séismes.

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. Différentiels ou non, ils peuvent être suffisants pour rendre une construction inutilisable.

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 : Φ : angle de frottement interne du sol $(\sigma - u)$: pression effective

σ : 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 τ_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. La Figure 1.4 montre un effet de ce type en Alaska. Des constructions situées dans ce genre de site sont entraînées dans le mouvement général du sol.
- 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...

Les facteurs favorables à l'apparition du phénomène de liquéfaction sont :

- une énergie de vibration importante (fort tremblement de terre), nécessaire pour élever significativement la pression interstitielle u
- un sable fin à moyen, de densité peu élevée, à grains arrondis (faible cohésion) et saturé en eau.

Cette dernière circonstance se rencontre le plus souvent lorsque des loupes ou couches de sable sont comprises entre des couches d'argile imperméable. La sensibilité d'un sol au phénomène de liquéfaction est déterminable par des essais de laboratoire.

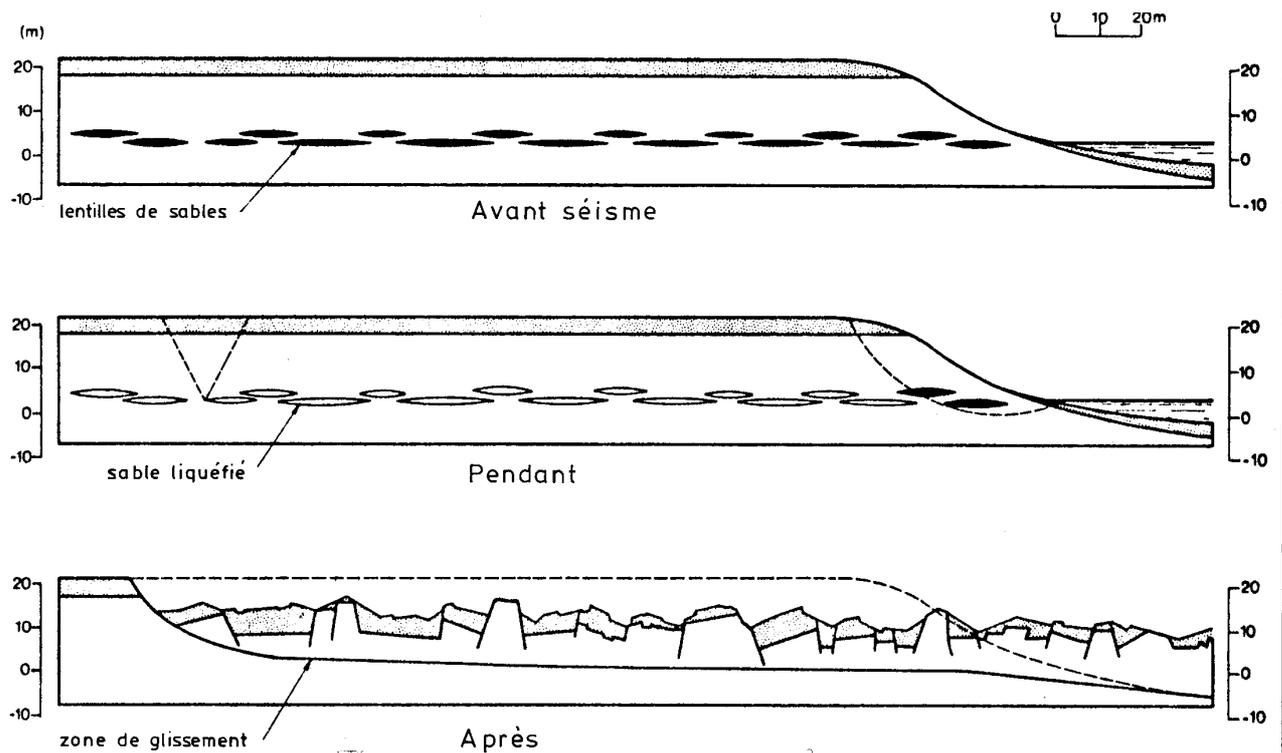


Figure 1.4. Schéma d'un glissement de terrain majeur résultant de la liquéfaction d'une couche de sable.

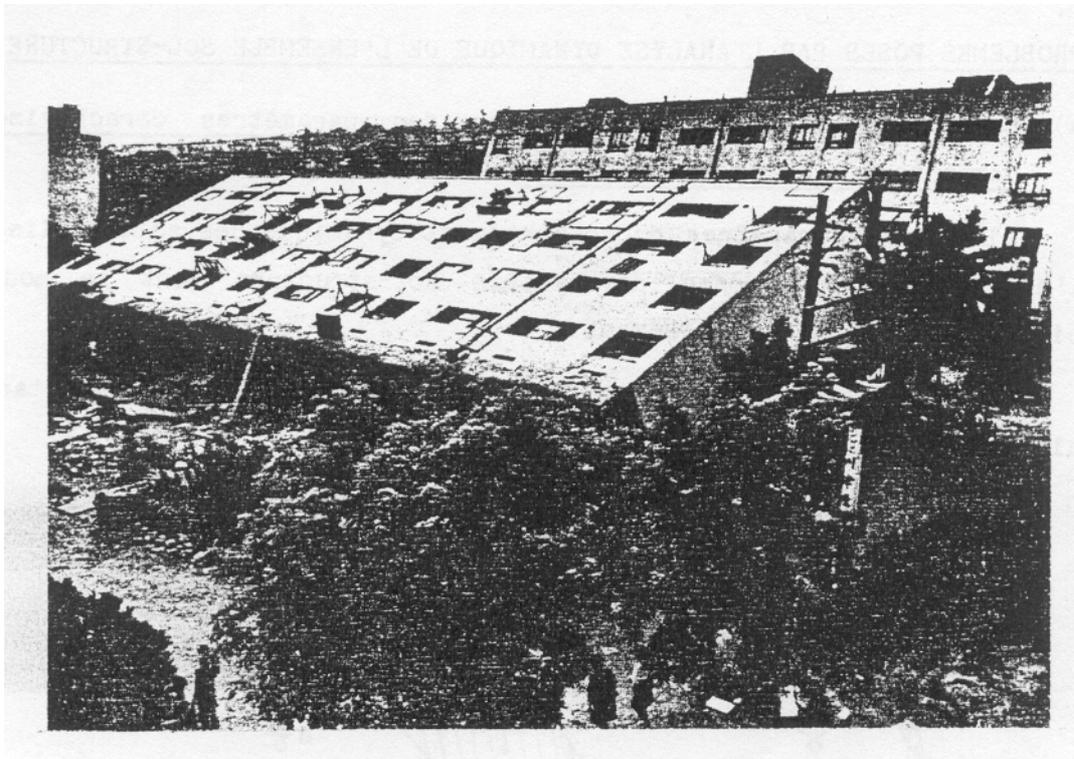


Figure 1.5. Le sol liquéfié entraîne l'inclinaison, voire le renversement, des bâtiments.

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 épiscopentrale 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...

1.4 Effets de site.

L'expérience montre que la distribution des accélérations dans une région n'est pas uniforme.

Les couches de sols situées au dessus du bedrock subissent leur propre excitation par le séisme et jouent un rôle de « filtre » pour les ondes transmises. Ce filtre est généralement un amplificateur. On définit plus en détail cet effet en 2.5 et 2.12.

On note aussi que, toutes fréquences confondues, les zones d'irrégularité géométrique de la surface du sol sont le siège d'amplification des mouvements du sol :

- les accélérations mesurées sur le bedrock sont plus importantes sur les crêtes qu'en zone plate
- de même dans les zones de discontinuité, telles des frontières alluvion-bedrock, en raison des déplacements différentiels de ces matériaux.

Ces informations qualitatives sont utiles lorsque le choix de l'endroit d'implantation de la construction existe.

1.5 Alea sismique & risque sismique dans une région donnée.**1.5.1 Alea sismique dans une région donnée.**

On définit comme l'**alea sismique** d'une région le niveau d'un fort séisme qui risque de se produire dans cette région, généralement caractérisé par la valeur de l'accélération de pointe a_{gR} ou PGA et reportée sur les cartes de zonation de l'alea sismique. Cette définition pose le problème de l'établissement de la valeur de calcul de a_{gR} .

Dans une région sismique donnée, il se produit de nombreux tremblements de terre au fil du temps et on observe qu'il existe une relation entre la magnitude de ces séismes et leur fréquence d'apparition : les petits séismes sont nombreux, les gros sont rares. Des lois statistiques ont été établies par différents chercheurs : Gutenberg-Richter, Ambraseys.

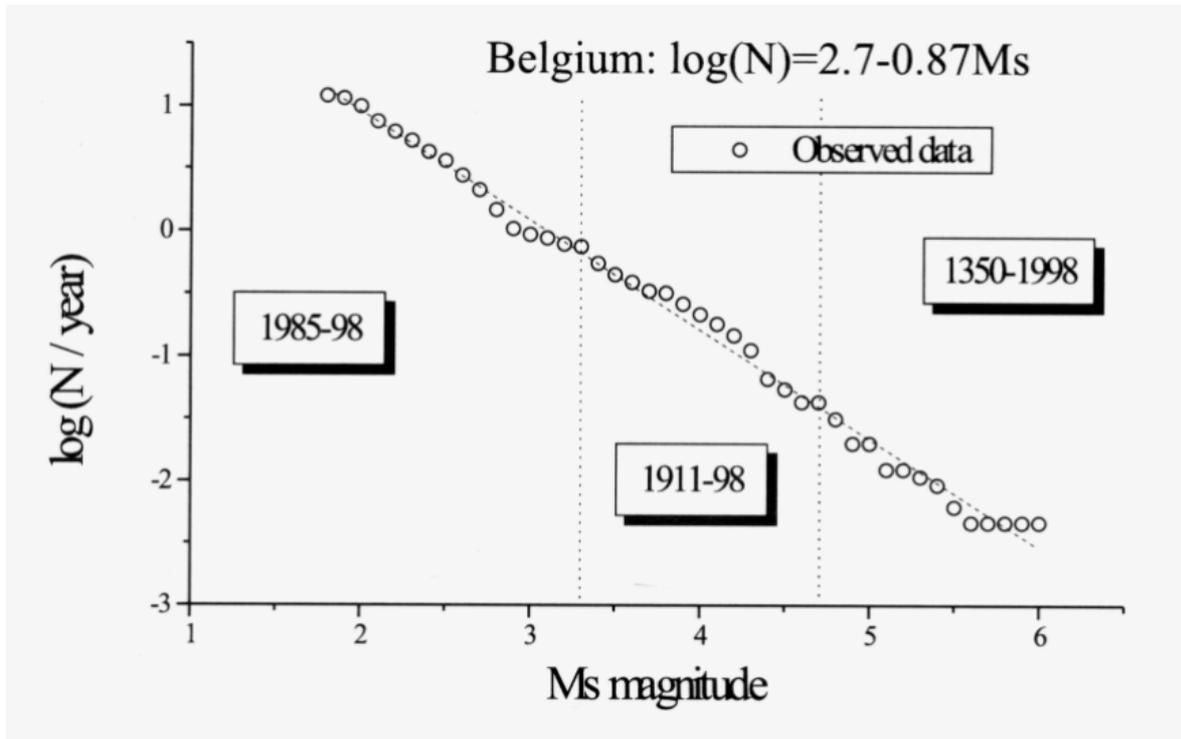


Figure 1.6. Fréquence d'occurrence des séismes (nombre annuel cumulé) en fonction de la magnitude M_s pour le territoire belge.

Une fois connue la loi (magnitude - fréquence d'apparition) pour une région donnée, il est possible de définir l'alea sismique à utiliser dans les projets de construction, à condition de définir la probabilité d'arrivée du séisme contre lequel on décide de se prémunir. Ce choix doit résulter d'une balance entre sécurité et coût, car plus la probabilité d'arrivée du séisme choisie est faible, plus le niveau d'action a_g et le coût de l'aspect antisismique de la construction sont élevés.

Dans l'Eurocode 8, EN1998-1 :2004, l'action sismique de référence à considérer pour les vérifications de non effondrement est associée à une probabilité P_{NCR} de dépassement en 50 ans égale à 10% , ce qui correspond aussi à une période de retour de référence $T_{NCR} = 475$ ans.

La valeur de la probabilité de dépassement P_R en T_L années d'un niveau spécifique de l'action sismique est liée à la période de retour de référence T_R de ce niveau d'action sismique conformément à l'expression : $T_R = -T_L / \ln(1 - P_R)$. Ainsi, pour une valeur de T_L donnée, l'action sismique peut être spécifiée de manière équivalente par sa période de retour de référence T_R ou sa probabilité de dépassement P_R en T_L années.

Dans l'Eurocode 8, on définit une deuxième action sismique de référence, qui doit être considérée pour les vérifications de limitation des dommages aux éléments non structurels (une forme d'action sismique « de service » ou « à l'ELS ». Elle est associée à une probabilité P_{DLR} de dépassement en 10 ans égale à 10% , ce qui correspond aussi à une période de retour de référence $T_{DLR} = 95$ ans.

On montre en 1.5.2 comment calculer cette action sismique « de service ».

1.5.2 Action sismique en phase de construction.

On peut établir une action sismique de calcul en phase travaux dont la probabilité qu'elle soit dépassée pendant la durée des travaux soit la même que la probabilité que l'action sismique de calcul soit dépassée sur la durée de 50 ans prise comme référence pour la construction permanente. On utilise la définition de l'Eurocode 8 (en 2.1) qui a servi à établir l'action sismique pour la construction permanente

Le taux de dépassement annuel, $H(a_{gr})$, de l'accélération maximale de référence au sol, a_{gr} , peut être pris comme variant avec a_{gr} selon la loi: $H(a_{gr}) \approx k_0 a_{gr}^{-k}$

La valeur de l'exposant k dépend de la sismicité mais est généralement de l'ordre de 3.

La valeur du coefficient d'importance γ_I , qui multiplie l'action sismique de référence pour obtenir la même probabilité de dépassement en T_L années qu'en T_{LR} années pour lesquelles l'action sismique de référence est définie, peut être calculée comme : $\gamma_I \approx (T_{LR}/T_L)^{-1/k}$.

Exemple. On veut évaluer l'accélération maximale de référence au sol pour un chantier dont la durée est 4 ans dans une zone où $a_{gR} = 0,25$ g.

On a : $T_{LR} = 50$ ans car l'action sismique de référence est associée à une probabilité de référence de dépassement en 50 ans

$T_L = 4$ ans (durée de la phase de construction)

$k = 3$

$$\gamma_{I, \text{travaux}} = (T_{LR}/T_L)^{-1/k} = (50/4)^{-1/3} = 0,20$$

L'action sismique de calcul a_g en phase travaux est égale à 0,20 fois l'action de calcul utilisée pour la construction finie et permanente: $a_g = \gamma_{I, \text{travaux}} a_{gR} = 0,20 \times 0,25 \text{ g} = 0,05 \text{ g}$

On note que l'Eurocode 8 donne aussi, dans des chapitres relatifs à des constructions particulières, des indications forfaitaires, forcément moins affinées. Ainsi, pour l'édification des constructions en béton préfabriqué (clause 5.11.1.5 (2)), on indique : « ...chaque fois qu'un séisme peut provoquer l'effondrement de certaines parties de la structure, avec des risques sérieux pour les vies humaines, des contreventements provisoires doivent être dimensionnés pour une action sismique réduite... cette action peut être supposée égale à une fraction A_p de l'action de calcul dont... la valeur recommandée de $A_p = \gamma_{I, \text{travaux}} = 30\%$ ».

On note aussi que l'application de la relation $\gamma_I = (T_{LR}/T_L)^{-1/k}$ donne comme valeur de l'action sismique définie en 1.5.2 pour les vérifications de limitation de dommage aux éléments non structurels : $\gamma_{I, \text{ELS}} = (T_{LR}/T_L)^{-1/k} = (50/10)^{-1/3} = 0,58$.

L'action sismique de calcul pour la limitation de dommage ou ELS serait donc $0,58 a_g$; mais l'Annexe Nationale à l'Eurocode 8 peut indiquer une autre valeur de « v » coefficient de réduction pour prendre en compte une plus petite période de retour de l'action sismique associée à l'exigence de limitation des dommages » (clause 4.4.2.3) (en fait $v = \gamma_{I, \text{ELS}}$). Les valeurs recommandées de l'Eurocode 8 sont

$\nu = 0,4$ pour les catégories d'importance III et IV et $\nu = 0,5$ pour les catégories d'importance I et II.

1.5.2 Risque sismique.

Le « risque sismique » est associé aux effets que le séisme produirait sur les « enjeux » : structures, sols (glissements de terrain, etc...), humains, activité économique. Il dépend donc de l'action (alea), des constructions ou sols et des enjeux.

Si on peut caractériser les constructions ou sols par un paramètre « vulnérabilité » et qu'on s'intéresse spécifiquement au risque associé aux constructions, on a :

$$\text{risque sismique} = \text{alea sismique} \times \text{vulnérabilité}$$

Deux méthodes de principe différent sont utilisées pour l'évaluation du risque sismique associé à un bâtiment :

- l'approche par calcul structurel détaillé : on établit un modèle de la structure dont on fait l'analyse afin d'établir les sollicitations internes, qu'on compare alors à des résistances et déformations de référence pour chaque élément structural. Ces comparaisons permettent d'établir le niveau de sécurité ou le risque associé à la structure. Cette procédure est très longue pour chaque bâtiment (~ 1 mois par bâtiment).
- On possède une base de données statistiques du comportement de structures, relevée lors de précédents tremblements de terre. On caractérise la structure étudiée par un « coefficient global de vulnérabilité ». En se référant à la base de données, on estime le risque sismique associé à la structure. Cette procédure est rapide (~ 1 heure par bâtiment) ; on l'utilise dans des évaluations globales pour une ville ou une région.

Le risque sismique associé à un bâtiment s'exprime en % de dégradation ou en rapport du coût de réparation au coût de reconstruction.

On peut aussi effectuer des études de risque en termes de pertes humaines ou économiques pour la ville ou le pays victime du séisme.

1.5.3 Incertitudes...

De nombreuses incertitudes affectent la connaissance de l'alea sismique d'une région :

- la base de donnée est faible, car on ne mesure vraiment les séismes que depuis 1950 environ et la méthode expliquée plus haut pour évaluer l'alea dans un région donnée est une méthode statistique où on parle d'évènements avec des périodes de retour de 475 ans (période de référence de l'Eurocode 8).
- les séismes majeurs sont des phénomènes peu fréquents et on a une connaissance très approximative, voire nulle, des évènements sismiques sur ce type de durée
- l'extrapolation est faite sur base d'une hypothèse : la répétitivité de l'histoire

- la connaissance de la géologie des sites, en particulier de la position des failles où se localisent les séismes, est souvent très partielle; plusieurs séismes récents ont fait découvrir des failles inconnues : Northridge (1994), Kobe (1995), Kocaeli (1999), etc...

Le résultat concret de cet état de fait est qu'après chaque séisme, on assiste à un relèvement du niveau de l'alea estimé pour la région considérée et les régions voisines. Ce relèvement peut être important. Ainsi, le a_g à considérer dans les projets à Istanbul est passé de 0,2g à 0,4g après le séisme de Kocaeli (1999).

On expliquera plus loin que la contre mesure raisonnable aux incertitudes sur l'action sismique, c'est le projet de structure offrant une réserve de résistance ou de capacité de déformation plastique.

1.6 Activité sismique en Belgique - Carte de zonage sismique .

La Belgique est située dans un domaine intra-plaque caractérisé par de faibles taux de déformation tectonique. L'activité sismique connue (depuis le 14^{ème} siècle) est considérée comme faible à modérée. Durant la période historique, le pays a subi des tremblements de terre dévastateurs comme celui du Pas de Calais de 1580 (magnitude M_s estimée à 6.0) et celui de Verviers de 1692 (magnitude M_s estimée entre 6.0 et 6.5). Durant le 20^e siècle, des tremblements de terre de plus faible magnitude ont créé des dégâts en 1938 (Oudenarde, $M_s=5.3$), 1983 (Liège, $M_s=4.7$) et 1992 (Roermond, $M_s=5.4$).

Une carte d'alea sismique régional, donnant l'accélération maximale au niveau du bedrock, a été établie pour des séismes d'une période de retour de 475 ans. (Annexe Nationale à l'Eurocode 8, version projet, 2008). Figure 1.7. La Belgique comporte 5 zones où l'accélération horizontale maximale de référence a_{gR} sur le rocher vaut respectivement :

Zone sismique 0 : Pas d'accélération significative

Zone sismique 1 : $a_{gR} = 0,40 \text{ m/s}^2$ ou 0,04 g

Zone sismique 2 : $a_{gR} = 0,60 \text{ m/s}^2$ ou 0,06 g

Zone sismique 3 : $a_{gR} = 0,80 \text{ m/s}^2$ ou 0,08 g

Zone sismique 4 : $a_{gR} = 1,00 \text{ m/s}^2$ ou 0,10 g

On verra au Chapitre 2 que la valeur critère de a_g considérée dans les projets est $a_g S = \gamma_1 \cdot a_{gR} S$ où S est un paramètre caractérisant le site.

Les zones considérées comme zones de sismicité très faible sont les zones pour lesquelles le produit $a_g S$ n'est pas supérieur à 0,06 g (0,60 m/s²). Il n'est pas nécessaire d'y effectuer de vérifications sismiques.

Les zones considérées comme de sismicité faible sont celles pour lesquelles le produit $a_g S$ n'est pas supérieur à 0,10 g (1,00 m/s²). Pour des catégories de structures bien définies, situées dans des ces zones, les exigences de projet peuvent être satisfaites par l'application de règles simplifiées.

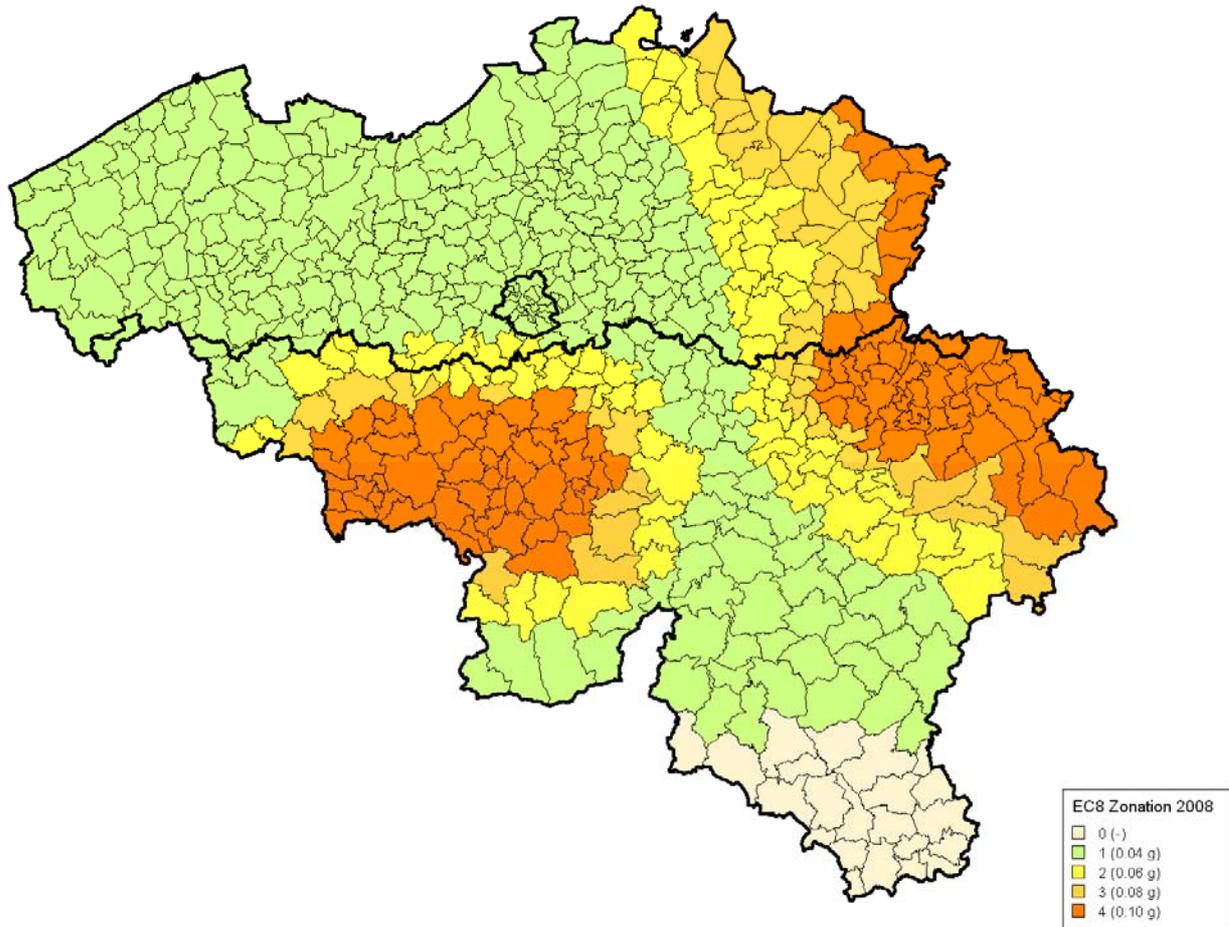


Figure 1.7. Carte de zonage sismique de la Belgique.

1.11. Quelques sites internet utiles pour les données relatives aux séismes.

<http://geology.about.com/library/bl/maps/blworldindex.htm>

<http://earthquake.usgs.gov>

<http://neic.usgs.gov/>

www.insu.cnrs.fr

www.emsc-csem.org

www.atcouncil.org

www.geologie.ens.fr

www.afps-seisme.org

<http://www-dase.cea.fr>

<http://isc.u-strasbg.fr>

<http://eost.u-strasbg.fr>

<http://gndt.ingv.i>

<http://www.hi.is>

<http://kandilli.koc.net/earthquake.htm>

<http://mceer.buffalo.edu>

<http://mae.ce.uic.edu>

www.ideers.bris.ac.uk

http://seismohazard.gfz-potsdam.de/projects/en/gshap/gshap_e.html

<http://www.emsc-csem.org>

<http://www.fema.gov/hazards/earthquakes/fema350.shtm>

cartes PGA

USGS

USGS

INSU-CNRS

CESM

ATC

ENS

AFPS site

CEA site

GNDT (National Group for Defence against earthquake-Italy)

site islandais, carte sismique

multidisciplinary center for earthquake engineering research

didactique sismique

seismic hazard map

site "Méditerranée"