

## INTENSITE MACROSISMIQUE

L'histoire française montre que des séismes importants se sont produits, entraînant dommages et victimes. Le plus célèbre en métropole est celui de 1909 (Lambesc) ayant provoqué environ 40 morts. Intégrer ces séismes anciens dans la réglementation impose de remonter dans le temps et de classer les séismes en fonction de leur intensité macrosismique.

### HISTORIQUE DES ÉCHELLES D'INTENSITÉ

Contrairement à la magnitude qui définit la source du séisme, l'intensité mesure ses effets sur les personnes ou les biens en un lieu donné. Le ressenti par les personnes et la quantité et la nature des dommages observés permettent de classer l'intensité selon une échelle dite **échelle macrosismique**.

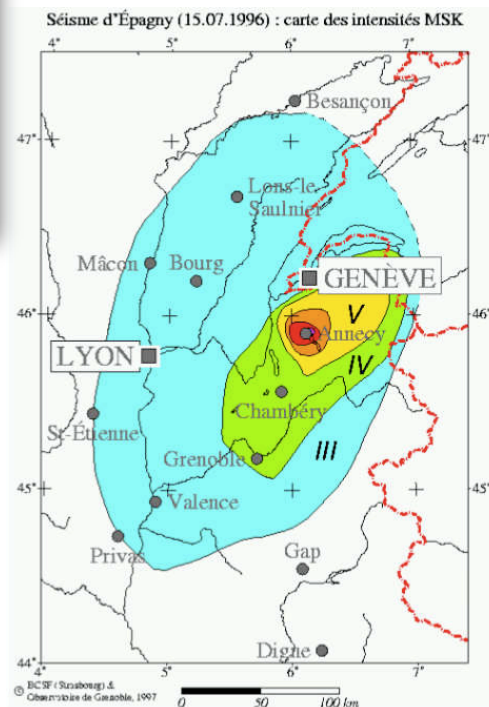
Macrosismique car elle est généralement utilisée afin de regrouper les effets du séisme en zones d'intensité homogène, englobant une région et définissant ainsi des contours d'égale intensité, ou isoséistes. En général, l'intensité diminue avec la distance mais des conditions particulières telles que des effets de site (amplifications du mouvement du sol à cause de conditions de site particulières) ou des effets de directivité liés à la position et l'orientation du séisme, peuvent dans certains cas créer des anomalies dans les cartes macro-sismiques. Pour un séisme donné, on donne souvent uniquement l'intensité à l'épicentre, la plus forte généralement : c'est l'intensité épicentrale.

Puisque l'intensité se base sur l'observation des effets, il existe plusieurs façon de la mesurer. Les plus anciennes échelles, et donc les plus utilisées, sont celles dites de **Mercalli** qui date de 1902, modifiée en 1956, et **MSK** créée en 1964, du nom des trois sismologues européens Medvedev, Sponheuer et Karnik. Les échelles d'intensité permettent ainsi de relier les séismes du passé à ceux du présent. En effet, pour les plus anciens, les écrits historiques qui peuvent exister suite à un tremblement de terre permettent de quantifier la sismicité passée et donc d'augmenter les époques couvertes par les catalogues de sismicité, indispensable à l'élaboration d'une étude de risque sismique.

La méthode utilisée pour estimer l'intensité varie d'un pays à l'autre; par exemple, pour la France, la valeur du degré d'intensité en chaque lieu est établie à partir de questionnaires distribués par le **Bureau Central Sismologique Français (BCSF)** aux habitants de la région touchée par le séisme.

En 1998, une nouvelle échelle d'intensité macrosismique a été établie pour l'Europe: c'est l'**Echelle Européenne Macrosismique EMS98**. Elle est définie selon 12 degrés (de I à XII), le degré VII étant la limite marquant le début de l'apparition des dommages, le degré IX correspondant à un séisme ayant des effets destructeurs, et le niveau XII à celui ayant des effets très dévastateurs.

Afin de définir l'intensité en fonction de l'effet sur les constructions, l'échelle EMS98 a puisé dans les observations de dommages collectées après des séismes européens majeurs. Puisque la qualité des constructions varient d'une région européenne à l'autre, et dans un souci d'homogénéisation européenne, les effets du séisme ont été modérés en fonction de la **qualité de la construction**, afin de tenir compte du fait que pour le même séisme, une construction fragile et une construction résistante n'allaient pas présenter les mêmes désordres. Il est donc possible de relier directement l'intensité macrosismique EMS98 à une **mesure du mouvement du sol**, contrairement aux échelles précédentes.



**Carte d'iso-intensité établie par le Bureau Central Sismologique Français suite au séisme de d'Annecy du 16 juillet 1996.**



**Exemple d'information historique disponible pour l'évaluation de l'intensité d'un séisme.**

#### Intensité V - Fort:

Dégâts de degré 1 de quelques bâtiments de classes de vulnérabilité A et B

#### Intensité VI - Dégâts légers:

Dégâts de degré 1 de nombreux bâtiments de classes de vulnérabilité A et B  
Dégâts de degré 2 de quelques bâtiments de classes de vulnérabilité A et B  
Dégâts de degré 1 de quelques bâtiments de classes de vulnérabilité C

#### Intensité VII - Dégâts:

De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3  
Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 2  
Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 1

#### Intensité VIII - Dégâts importants

De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3  
Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 2

#### Intensité IX - Destructions

De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 5  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3  
Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 2

#### Intensité X - Destructions importantes

La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité A subit des dégâts de degré 5  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 5  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3  
Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité F subissent des dégâts de degré 2

#### Intensité XI - Catastrophe

La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité A et B subit des dégâts de degré 5  
La plupart des bâtiments de la classe de vulnérabilité C subit des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 4, quelques uns de degré 5  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité E subissent des dégâts de degré 3, quelques uns de degré 4  
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité F subissent des dégâts de degré 2, quelques uns de degré 3

Typologie des Structures		Classe de Vulnérabilité					
		A	B	C	D	E	F
MAÇONNERIE	Moellon brut - pierre tout-venant	○					
	Brique crue (adobe)	○	—				
	Pierre brute	○	—				
	Pierre Massive			○	—		
	Maçonnerie non armée avec des éléments préfabriqués	○	—				
	Maçonnerie non armée avec des planchers en béton armée			○	—		
BÉTON ARMÉ	Maçonnerie renforcée ou chaînée				○	—	
	Ossature sans conception parasismique		○	—			
	Ossature avec un niveau moyen de conception parasismique			○	—		
	Ossature avec un bon niveau de conception parasismique				○	—	
	Murs en béton armé sans conception parasismique		○	—			
	Murs en béton armé avec un niveau moyen de conception parasismique			○	—		
BOIS	Bâtiments en charpente métallique				○	—	
	Bâtiments en bois de charpente				○	—	

○ classe de Vulnérabilité — gamme la plus probable  
--- gamme la moins probable, cas exceptionnel

L'échelle EMS98 propose une typologie des constructions européennes, les distinguant en fonction des matériaux de constructions et de dispositions constructives améliorant leur résistance. Chaque classe est qualifiée par un niveau de vulnérabilité, le A correspondant à une vulnérabilité forte (par exemple une construction en maçonnerie) tandis que le F correspond à une construction en béton armé respectant les dispositions constructives la rendant parasismique.

#### EN SAVOIR PLUS.

Le bureau central sismologique français: <http://www-bcsf.fr>

Base de données SisFrance: <http://www-sisfrance.fr>



IL Y A DES SÉISMES POUVANT PROVOQUER DES VICTIMES EN FRANCE. Un séisme historique majeur a eu lieu en France au 20<sup>ème</sup> siècle avec une magnitude estimée supérieure à 6 et des effets importants dans la région rurale d'Aix-en-Provence (Sud-Est de la France) avec une quarantaine de victimes recensée. Ce séisme a servi de test à une simulation du ministère en charge de l'environnement en 1982. L'étude concluait à des effets directs et indirects majeurs sur les constructions, les vies humaines et l'économie si ce même séisme se reproduisait aujourd'hui. Depuis, des tremblements de terre se sont produits, occasionnant des dommages (Arette 1967, Annecy 1996), permettant d'affirmer que d'autres séismes se produiront dans le futur.



## LA RÉGLEMENTATION PARASISMIQUE

Certes, on ne peut empêcher les séismes de se produire. Cependant, ce ne sont pas les séismes qui tuent mais les constructions qui s'écroulent. On peut ainsi se protéger des séismes en proposant un cadre technique qui rendent les habitations résistantes: c'est l'objectif même de la réglementation parasismique.

### EVITER LA FATALITÉ.

Les tremblements de terre sont parmi les phénomènes naturels ceux qui, depuis longtemps, frappent le plus l'imagination de l'homme. En effet, ils sont brusques et soudains, et les victimes qu'ils causent en quelques instants peuvent se compter par milliers. Ils revêtirent longtemps un caractère plus mystérieux encore car ils ébranlaient la croyance innée de l'homme en la fixité de la terre. Même si aujourd'hui les origines physiques des tremblements de terre sont de mieux en mieux connues, la puissance des secousses étonne encore parfois. Aucune autre force naturelle ne peut en un temps aussi court accumuler autant de dommages et de victimes. Les exemples catastrophiques les plus contemporains, tels que le séisme d'Izmit (Turquie, 1999), de Kobe (Japon, 1995), de Boumerdès (Algérie, 2003), du Kashmir (Pakistan, 2005), du Sichuan (Chine, 2008) ou d'Haiti (2010) montrent la fragilité des environnements urbains face à la puissance destructrice de ces événements.

Déjà, en son temps, **Rousseau** avait pointé du doigt les incohérences urbaines de **Lisbonne** qui avaient conduit à amplifier l'impact du séisme de **1755**. Nous sommes alors au XVIII<sup>ème</sup> siècle et l'origine des secousses sismiques reste encore un mystère: on parle d'êtres imaginaires remuants à l'intérieur de la terre, d'effondrement de gigantesques cavités souterraines, et les secousses de la terre sont naturellement considérées comme des punitions infligées par le ciel. Pourtant la modernité née du siècle des lumières qui voulait soulager le sort des hommes en les rendant "maîtres de toutes choses" amène Rousseau à reconsidérer les causes de la catastrophe de Lisbonne. Le 1<sup>er</sup> novembre 1755, la ville entière est anéantie par un tremblement de terre qui provoque une secousse morale dans l'Europe. **Kant** (philosophe allemand) propose alors une première explication physique sur l'origine des tremblements de terre.

A l'époque, les progrès de la connaissance scientifique avaient suscité une école de pensée, l'optimisme, qui dominait la vie intellectuelle d'alors. Elle reposait sur la certitude que l'homme pouvait connaître toutes les lois ordonnant l'univers et que ces dernières étaient d'ordre divin, lui-même harmonieux et fondamentalement bon. Lors du séisme de Lisbonne, tout le système métaphysique, qui établissait que le mal, d'origine divine, n'était qu'un "effet de perspective" dans la meilleure des créations possibles, s'effondre. Rousseau s'oppose à cette théorie et montre que l'Homme peut être maître de son destin et réduire ainsi l'**impact de la nature sur son existence**.



**Kant (1724-1804)**  
Philosophe Allemand



**Rousseau (1712-1778)**  
Philosophe Suisse



**Voltaire (1694-1778)**  
Philosophe Français



### La controverse Voltaire - Rousseau

Voltaire rédige le "Poème sur le désastre de Lisbonne" dans lequel il présente la fatalité des phénomènes naturels. Rousseau en 1756 lui répond que si l'on "n'avait point rassemblé là vingt mille maisons de six à sept étages et que si les habitants de cette grande ville eussent été dispersés plus également, et plus légèrement logés, le dégât eût été beaucoup moindre, et peut-être nul"



### Séisme de Kobé (Japon, 1995)

Exemple d'effondrement d'une structure en béton armé moderne. Ce dommage laisse supposer une mauvaise évaluation de l'aléa réglementaire ou un défaut de construction parasismique.

La **réglementation parasismique** revient à mettre en place les principes que Rousseau avait suggéré en son temps: adapter le développement urbain à l'environnement naturel afin de réduire l'impact de ce dernier sur l'existence humaine. Pour y arriver, il est nécessaire de connaître la puissance et la localisation des tremblements de terre pouvant se produire, d'évaluer leur impact sur un site donné et enfin de définir des **règles de construction** afin de rendre les édifices les plus capables de supporter les secousses sismiques. La réglementation parasismique revient ainsi à ajuster au mieux nos modes d'urbanisation au contexte sismique en présence.

## UNE RÉGLEMENTATION QUI ÉVOLUE AU FIL DES SÉISMES

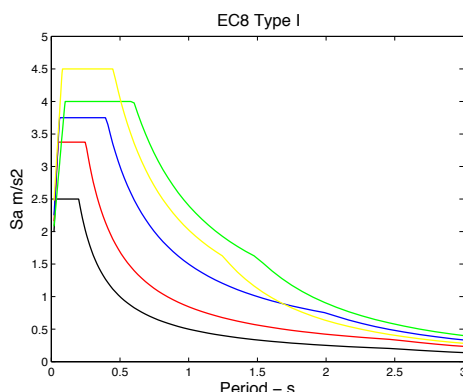
Il n'est intéressant de définir des règles parasismique que lorsqu'on est confronté à des tremblements de terre. C'est pourquoi elles apparaissent en premier dans les **pays les plus sismiques** tels que le Japon et les Etats-Unis. En France, on constate que les règles et leurs révisions vont évoluer au fil des tremblements de terre qui se produisent. Certes la France est un pays à sismicité modérée mais en 1960, suite au séisme d'Orléansville en Algérie, alors département français, les premières règles apparaissent sous forme de recommandations. Elles ne cesseront d'évoluer après le séisme d'Agadir au Maroc (1962) en règle **PS62**, puis celui d'El Asman (Algérie) en 1980 qui finira par aboutir à l'édition des premières règles modernes dites **PS92**, qui bénéficieront aussi des expériences des séismes des années 80 qui apporteront de nombreux enseignements (Mexico, 1985; Spitak 1988, Loma-Prieta 1989). Ce sont ces textes qui furent en application à partir de 1994/1995 pour le bâti courant, tandis que d'autres étaient éditées pour les maisons individuelles et les ouvrages à risque spécial.

## UNE RÉGLEMENTATION QUI CHANGE DE CONCEPT SCIENTIFIQUE

A partir des années 2000, de nouveaux concepts apparaissent. Tandis qu'avant on se protégeait contre un séisme caractéristique de la zone, ce qui implicitement revenait à supposer que les mêmes tremblements de terre se reproduisent aux mêmes endroits, la nouvelle réglementation considère la **probabilité qu'un mouvement du sol soit dépassé sur une période de vie d'un ouvrage**. Ce sont ces nouveaux concepts qui ont été suivis pour la nouvelle réglementation européenne dite des **Eurocode 8 (EC8)** pour une évaluation plus juste du mouvement sismique contre lequel se protéger. Elle permet également d'harmoniser les cartes d'aléa dans les différents pays et aux frontières.

On obtient ainsi une carte réglementaire adaptée au niveau de sismicité du territoire. Le mouvement du sol contre lequel se protéger dépend ainsi de la région (les Antilles sont plus sismiques que le bassin parisien), mais aussi de la fonction du bâtiment à construire et d'une performance à atteindre (c'est la sauvegarde des vies humaines qui est l'objectif de la réglementation, c'est-à-dire le non-effondrement de la structure, et la persistance de fonctionnement des ouvrages vitaux tels que les hôpitaux et les centres de secours qui doivent continuer à fonctionner), et enfin de la nature du sol (le mouvement au rocher sera différent du mouvement au sol).

En parallèle à cette réglementation nationale, des dispositifs spécifiques existent localement pour tenir compte des conditions de site particulières: ce sont les **Plans de Prévention du Risque Sismique PPRS** qui consistent à définir les zones qui sont susceptibles d'amplifier le mouvement du sol, c'est-à-dire de présenter des effets de site.../...



**Exemple de spectres de réponse réglementaires EC8: zone II, pour les différents types de sols**



**Carte du nouveau zonage sismique EC8 en France métropolitaine et outre-mer.** Le mouvement sismique contre lequel se prémunir est donné sous forme d'accélération du sol de référence issue d'une évaluation probabiliste de l'aléa sismique.

.../... Une fois l'aléa défini, les principes de conceptions et les règles de dimensionnement sont applicables afin de rendre l'ouvrage le plus résistant possible. Pour cela, on utilise des fonctions appelées **spectre de réponse**, qui pour chaque ouvrage, caractérisé par ses caractéristiques propres (période de vibration et amortissement) nous donne l'accélération qu'il devra supporter. Aux ingénieurs de dimensionner l'ouvrage en conséquence.

### EN SAVOIR PLUS.

Association Française de ParaSismique AFPS:

<http://www.afps-seisme.org/>

Le site du plan séisme:

<http://www.planseisme.fr/>

## ON PEUT SE PROTÉGER CONTRE LES SÉISMES.

En définissant l'aléa sismique probable et en appliquant des principes de conception et de dimensionnement adaptés, il est possible de contrer les effets des tremblements de terre. Ces derniers ne sont pas prêts de s'arrêter. Il est donc raisonnable de mettre en place des outils réglementaires sur lesquels s'appuyer afin de concevoir un ouvrage adapté à la région. Ces outils pour le bâti neuf n'engagent qu'un surcoût faible par rapport au coût des vies sauvées.

## SÉISMES EN RHÔNE-ALPES: MYTHE OU RÉALITÉ?

L'analyse des séismes passés et la surveillance de l'activité sismique sont formelles: il existe une intense activité sismique dans les Alpes, nous révélant une région en perpétuel mouvement. D'ailleurs quelques exemples récents nous ont rappelé que les Alpes étaient une région sismique.

### DES SÉISMES HISTORIQUES IDENTIFIÉS.

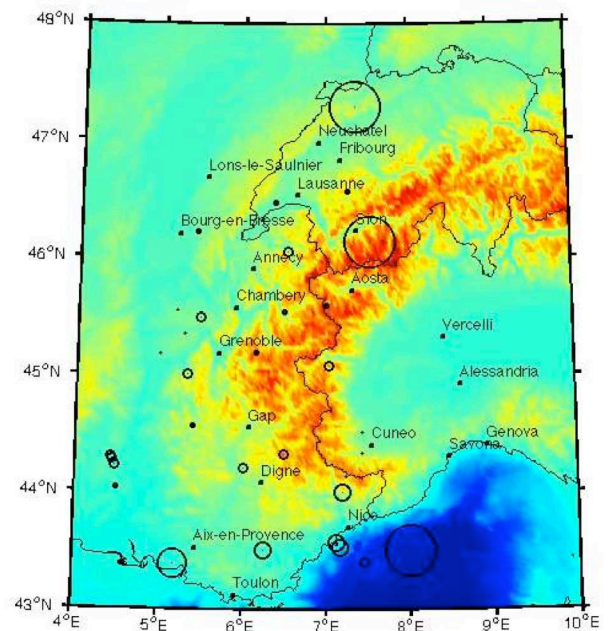
Les séismes en Rhône-Alpes se font rares...tant mieux. Il ne faut cependant pas oublier que certains événements importants se sont produits dans le passé, affectant les villes de la région de quelques dommages significatifs aux constructions. Parce qu'ils sont peu nombreux, les populations perdent le souvenir et la mémoire de ces événements et il est compréhensible de se demander si séismes il y a réellement. Pourtant, si on regarde dans le passé proche et si on s'intéresse non plus à la région Rhône-Alpes seule mais au massif des Alpes dans son ensemble, des séismes marquant apparaissent: ce sont les séismes de **Lambesc** dans le Sud des Alpes (1909) ayant provoqué dommages et victimes, le séisme de **Corrençon** (1962) ayant fissuré des maisons dans le Vercors, ceux de **Chamonix** de 1905 et 2006 où des fissures et des chutes objets ont été répertoriés, ou encore celui de **Epagny** (1996) qui provoqua de nombreux dommages et au cours duquel la catastrophe humaine a été évitée de justesse.

Ces séismes importants sont aussi la signature révélatrice d'une **intense activité sismique**, que l'homme ne peut pas toujours ressentir mais que les instruments des sismologues savent détecter. Ils révèlent ainsi les mouvements des plaques. Cette activité va être d'autant plus remarquable que les **vallées alpines**, omniprésentes sur le territoire montagneux de la région alpine et constituées du remplissage des anciens lacs glaciaires par des sédimentaires, vont amplifier le mouvement sismique du sol, phénomène pouvant être à l'origine de dégâts plus importants.

Les données historiques et instrumentales permettent d'identifier plusieurs secteurs des Alpes où règnent une activité sismique importante. On distingue ainsi :

- (1) des zones actives dont la sismicité témoigne de l'activité des fronts alpins, avec d'est en ouest l'arc interne piémontais, puis celui du Briançonnais qui se poursuit jusqu'au Valais, et les Alpes externes, depuis le nord du Vercors jusqu'au Chablais suisse;
- (2) des zones à sismicité modérée qui comprennent le Jura, le bassin molassique suisse, les massifs subalpins méridionaux, la Provence, le Bas Dauphiné et l'Ouest du Massif Central;
- (3) des zones très peu sismiques avec la Bourgogne, la Bresse, le Diois, les massifs cristallins externes des Alpes et le Languedoc.

Les séismes sont aux limites de la région Rhône-Alpes, mais de fortes intensités ont été recensées. Parmi eux, on peut citer le séisme du Bugey (N de Grenoble) qui s'est produit le 19/02/1822 avec une intensité épicentrale de VII-VIII (70km de Grenoble) et le séisme de Laragne du 19/05/1866 d'intensité VII-VIII qui s'est produit dans les Alpes provençales à 90 km au Sud de Grenoble. Le séisme d'intensité VIII dans le Piémont italien à 120 km à l'ESE du Grenoble (02/04/1808), de Chamonix du 29/04/1905 à 140 km de Grenoble et d'intensité épicentrale Io=VII-VIII, de Lambesc de 1909 d'intensité épicentrale Io=VIII-IX à 170 km du site et du Valais du 09/12/1755 (Io=VIII-IX) et du 25/07/1855 (Io=IX) figurent comme les séismes les plus forts de la zone des Alpes du Nord à laquelle Grenoble est rattachée.



**Séismes historiques dans les Alpes (Source : base Sisfrance).** Les plus gros séismes sont ceux de Bâle (1356 - IX), d'Imperia (1887 - IX) et du Valais (1855 - IX). Le séisme de Lambesc (1909) est d'intensité VIII-IX. La taille des cercles représente l'intensité des séismes.

### Le Réseau Sismalp.

Le projet Sismalp, lancé en 1987 avec un financement provenant de l'Institut national des sciences de l'Univers (INSU-CNRS), de la Délégation aux risques majeurs (ministère de l'Environnement), du conseil général de l'Isère et de la région Rhône-Alpes, visait à l'établissement d'un réseau de plusieurs dizaines de stations sismologiques automatiques réparties sur l'ensemble du Sud-Est de la France, du lac Léman à la Corse. Les objectifs étaient de surveiller la sismicité régionale et de mieux comprendre la sismotectonique, de mieux estimer le risque sismique, de mieux connaître la structure profonde de la lithosphère alpine, de constituer enfin une banque de données homogène pour permettre des recherches fondamentales sur la source sismique.

<http://sismalp.obs.ujf-grenoble.fr/>



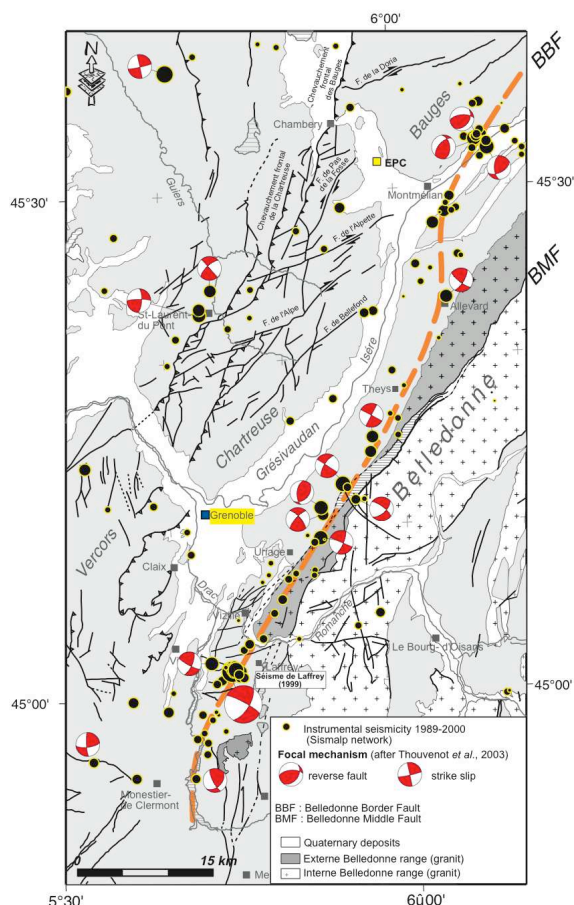
## LE CAS PARTICULIER DE GRENOBLE.

Parmi cette sismicité, une faille active a été détectée par le réseau régional Sismalp : la **faille bordière de Belledonne** située le long du massif de Belledonne et orientée NE-SW. Cette faille est à l'origine d'une activité sismique très proche de Grenoble, avec des magnitudes atteignant 3 et plus, ressenties localement par la population et ayant parfois occasionnés des désordres. C'est sur cet alignement que les séismes importants se sont produits, tels que le séisme de **1962** (Corrençon  $M_L=5.3$ ), de Faverges en **1980** ( $M_L=4.7$ ) et du Grand Bornand de **1994** ( $M_L=5.1$ ).

Autour de Grenoble, les données historiques sont issues de Levret et al. (1996) qui recensent une cinquantaine d'événements localisés et dont les magnitudes et les profondeurs ont été recalculées. Les autres séismes historiques sont extraits de la base de données SISFRANCE (<http://www.sisfrance.net/>).

A proximité immédiate, les séismes ont produit des intensités inférieures à V, à l'exception des séismes du Grésivaudan du 07/01/1851 (**V-VI** à Grenoble), avec un épocentre localisé à environ cinq kilomètres au Nord-Ouest du site, de Corrençon du 25/04/1962 (NW de Grenoble à environ 20 km) d'intensité épicentrale de **VII-VIII** et de profondeur 10 km et de Voreppe du 12/01/1754, qui compte parmi les premiers séismes historiques rapportés pour avoir engendré des dommages dans les Alpes mais restant assez mal connu. Avec une intensité épicentrale **VI-VII**, l'épicentre de ce séisme est positionné à une vingtaine de kilomètres au NNW de Grenoble. Plus éloignés de Grenoble, des séismes se sont produits en particulier dans le massif cristallin de Belledonne, à plus de 30 km de Grenoble mais ayant atteint le 22/07/1881 une intensité épicentrale de **VII**.

D'autre part, la configuration des vallées alpines, omni-présentes en région Rhône-Alpes provoquent des phénomènes communément nommés effets de site. Ces vallées, à **remplissage glacio-lacustre**, sont constituées de sédiments résultant du remplissage des anciens lacs glaciaires, processus en cours actuellement au lac d'Annecy et du Bourget. Ces vallées génèrent des amplifications pouvant dans certains cas être considérables. L'observation de ces phénomènes dans plusieurs villes de Rhône-Alpes par le **réseau accélérométrique national RAP** telles que Grenoble, Annecy ou Chambéry a permis d'étudier ces phénomènes spectaculaires. Les conclusions montrent que systématiquement, le mouvement du sol sera exacerbé, augmentant le risque sismique des constructions.



Carte de localisation de Grenoble et séismes principaux détectés par Sismalp à proximité de la ville (d'après Thouvenot et al., 2003).

## EN SAVOIR PLUS.

Le réseau SISMALP : <http://sismalp.obs.ujf-grenoble.fr/>

Le réseau RAP : <http://www-rap.obs.ujf-grenoble.fr>

Base de données SisFrance: <http://www-sisfrance.fr>

Levret et al., (1996). Edité par IPSN, Fontenay-aux-Roses.

Thouvenot et al., (2003) Geophysical Journal International.



Dommages observés lors du séisme d'Epagny (Annecy, 1996). Le montant des dommages a été estimé à 50 million d'euros.

**LE RISQUE SISMIQUE EN RHÔNE-ALPES EST UNE RÉALITÉ.** Malgré un niveau de sismicité relativement modéré, les séismes forts du passé, les remplissages sédimentaires importants et la nature des constructions sont des indicateurs qui incitent à considérer sérieusement le risque sismique en Rhône-Alpes. Dans ce contexte de sismicité, Grenoble est une ville à fort enjeux économiques et sociétaux, avec la présence de nombreuses industries sensibles (chimiques, nucléaires), des entreprises à forts impacts économiques sur la région et une population importante (environ 300 000 habitants). D'autres villes (Annecy, Chamonix, Corrençon) ont été touchées par des séismes ayant provoqués des dommages. Cependant, les séismes étant rares, on est face à une faible implication des collectivités locales et des pouvoirs publics pour la réduction du risque sismique: les périodes de retour sont grandes et il est nécessaire d'apporter de la connaissance auprès des responsables politiques locaux.

## MAGNITUDE DES SÉISMES

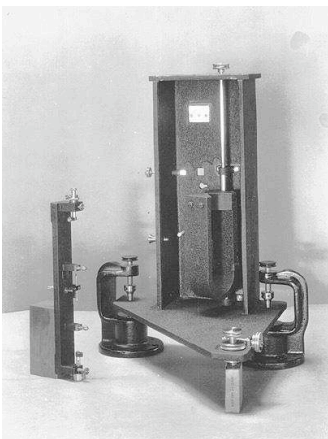
En réalité, la plus grosse magnitude jamais mesurée l'a été au Chili en 1960 atteignant 9.5. Puisque la magnitude représente l'énergie produite à la source du séisme, on peut envisager une magnitude supérieure, l'ultime étant un séisme se produisant sur une faille faisant le tour de la terre.

### LA MAGNITUDE DE RICHTER

La sismologie a toujours été une science qui s'est appuyée sur l'analyse et la compréhension d'observations faites sur le terrain. Ainsi, en 1931 un sismologue japonais du nom de **Kiyoo Wadati** construit un diagramme reproduisant le mouvement du sol généré par des séismes en fonction de la distance. Il constate que les courbes qui en découlent, quelque soit le séisme, forment des droites parallèles les unes aux autres. Le fait que des séismes de taille différente produisent des droites parallèles suggère ainsi qu'il est possible de caractériser la taille d'un séisme par un nombre simple.

En 1935, **Charles Francis Richter** reprend cette idée à son compte en classant la taille des séismes sur une échelle caractérisant l'importance du mouvement du sol produit. En utilisant les données du réseau californien de l'époque, il constate une relation répétitive d'atténuation du mouvement du sol en fonction de la distance. Il propose alors la définition d'une échelle de magnitude, dite échelle de Richter. Il définit la **magnitude 0** de référence comme celle produisant à **100 km** un déplacement sur le sismomètre de l'ordre de  **$3 \cdot 10^{-3}$  mm**. Cependant, pour établir cette relation, il ne se sert que d'un instrument de mesure (un sismomètre de type Wood-Anderson), il n'utilise que des séismes de type californien, c'est-à-dire essentiellement des séismes générés sur des failles en décrochement, enregistrés à courte distance de la zone épicentrale.

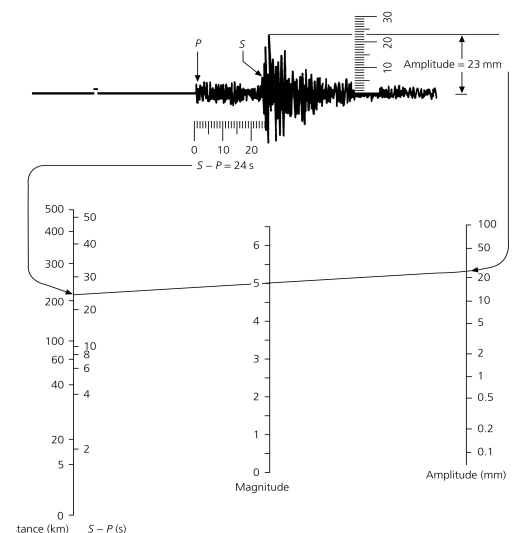
Ainsi, la relation établie en 1935 par Richter ne peut être extrapolée stricto-sensu à d'autres régions du monde, à d'autres données, sans tenir compte des mécanismes des séismes utilisés, des instruments qui enregistrent et de l'atténuation des ondes avec la distance dans la croûte terrestre. Elle n'est également valable que pour des données collectées à **courte distance** et, par conséquent, cette magnitude est depuis appelée **magnitude locale  $M_L$** . Ainsi, il n'est pas rare de constater des  $M_L$  différentes pour un même séisme, données par des organismes différents, puisque étroitement liées aux différentes constantes appliquées pour établir cette relation empirique. Il n'est pas non plus surprenant d'obtenir des **magnitudes inférieures à 0** lorsque le réseau est suffisamment précis et sensible pour détecter des petites ruptures sismiques: c'est en particulier le cas lors de la surveillance de l'activité sismique des mines.



Un sismomètre de type Wood-Anderson  
(source <http://www.eas.slu.edu/>  
Université de Saint-Louis.



**Charles Francis Richter**, l'inventeur de la magnitude de Richter en 1935.



**Exemple d'utilisation de la relation de Richter** pour caractériser la magnitude locale  $M_L$  en fonction de la distance du séisme et de l'amplitude du mouvement du sol mesuré sur un sismomètre Wood-Anderson.

Depuis Richter, de nouvelles définitions de la magnitude ont été proposées, essentiellement pour caractériser les événements quelque soit la région du monde, enregistrés par tout type d'instruments, ces derniers ayant considérablement évolués depuis 1935, et de façon à estimer physiquement, et non plus empiriquement, la taille de la rupture.

## LES DIFFÉRENTES MAGNITUDES DES SÉISMES.

Depuis Richter en 1935, d'autres façons de mesurer la taille d'un séisme ont été proposées, toujours avec le soucis de rendre globale l'estimation de la taille du séisme.

La **magnitude  $M_s$**  dite des ondes surface est proche de l'esprit de la magnitude locale, à l'exception près qu'elle n'utilise qu'un type d'onde, les ondes de surface, contenues dans le sismogramme. Cette magnitude est encore très utilisée puisqu'elle permet de caractériser les séismes qui vont générer beaucoup d'ondes de surface (par exemple les séismes sur des failles en coulissage comme la faille de San Andreas en Californie ou la faille Nord-Anatolienne de Turquie). Au contraire, elle ne pourra pas être utilisée pour des séismes profonds qui ne génèrent que très peu d'ondes de surface, qui sont pourtant les plus gros séismes. Elle présente l'inconvénient de ne pouvoir être utilisée pour l'alerte rapide puisque les ondes de surface, moins rapide que les ondes de volume, apparaissent tardivement sur les sismogrammes.

La **magnitude  $m_b$** , dite des ondes de volume, utilise les premières ondes rapides qui arrivent sur le sismogramme, essentiellement composées d'onde de volume. Elle permet à grande distance d'évaluer la taille du séisme, et elle est par conséquent bien adaptée aux séismes situés à grande profondeur, comme cela est le cas dans les zones de subduction. Elle présente cependant l'inconvénient de ne plus caractériser correctement la taille du séisme dès que la surface de rupture devient importante. C'est le problème de la saturation des magnitudes, traduisant finalement l'empirisme de ces grandeurs car elles caractérisent des observations plutôt que la taille réelle des tremblements de terre.

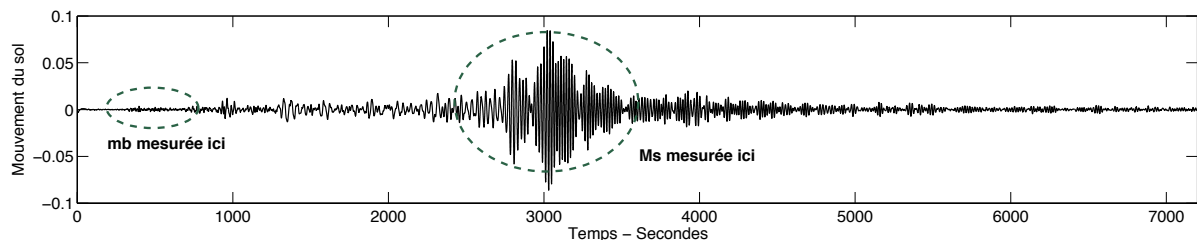
C'est pour cela qu'en 1977, Hiroo Kanamori introduit la **magnitude  $M_w$** , dite magnitude de moment. Son estimation repose sur la physique de la rupture et elle est directement proportionnelle à .../...

Magnitude	Longueur caractéristique de la rupture	Coulissage	Durée de la rupture	Energie dégagée
9	800 km	8 m	250 s	$E_5 = E_4 \times 30$
8	250 km	5 m	85 s	$E_4 = E_3 \times 30$
7	50 km	1 m	15 s	$E_3 = E_2 \times 30$
6	10 km	20 cm	3 s	$E_2 = E_1 \times 30$
5	3 km	5 cm	1 s	$E_1 = E \times 30$
4	1 km	2 cm	0,3 s	E

**Ordre de grandeurs des paramètres physiques du séisme (la longueur de la rupture le long de la faille, le glissement ou coulissage entre les deux lèvres de la faille et la durée de la rupture), des magnitude de moment des séismes en fonction de l'énergie libérée.** Entre une magnitude 4 et 5, 30 fois plus d'énergie est libérée (d'après Perrier et Madariaga, 1991).

.../... l'énergie libérée lors de la rupture sismique, et donc à sa taille. Moins immédiate et évidente à calculer que les magnitudes précédentes, elle utilise des processus de traitement élaboré des sismogrammes. C'est cette magnitude dont on parle lorsque les media rapportent des informations sur les séismes produisant des catastrophes.

Le séisme le plus gros jamais enregistré s'est produit en 1960 au Sud du Chili. De magnitude  **$M_w=9.5$** , il a provoqué des destructions importantes et des changements dans le paysage. En comparaison, le séisme de Sumatra de 2004 avait une magnitude  $M_w$  de 9.3.



### Les plus gros tremblements de terre connus

Equateur	1906	8.8
San Francisco	1906	8.5
Valparaiso-Chili	1906	8.2
Kanto-Japon	1923	8.3
Kamtchatka-Russie	1923	8.5
Banda-Indonésie	1938	8.5
Chillan-Chili	1939	8.3
Tibet	1950	8.6
Kamtchatka-Russie	1952	9.0
Alaska	1957	9.1
Valdivia-Chili	1960	9.5
Iles Kouriles-Russie	1963	8.5
Alaska-USA	1965	8.7
Mexique	1985	8.1
Andaman-Sumatra	2004	9.3
Ile de Nias-Sumatra	2005	8.7
Tonga	2006	8.3
Cauquenes-Chili	2010	8.8

**Exemple de détermination des magnitude  $m_b$  et  $M_s$  pour le séisme du Chili enregistré dans les Alpes.**

### EN SAVOIR PLUS.

Madariaga R. et Perrier G. Les tremblements de terre. Presses du CNRS, 1991.

**L'ECHELLE DES MAGNITUDES EST UNE ECHELLE OUVERTE.** Tandis que les premières échelles de magnitudes étaient calées sur des relations empiriques pour classer les séismes les uns par rapport aux autres, la magnitude de moment a été établie afin de quantifier physiquement la taille d'un séisme en fonction de son énergie libérée. On peut ainsi imaginer un séisme dépassant la magnitude 10, limitée finalement par la taille de la rupture d'une faille sur plusieurs milliers de kilomètres. A la différence des intensités macrosismiques qui sont établies en fonction des effets du séisme, la magnitude de moment est la seule mesure reliée à la taille de l'événement.



## VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DU BÂTI EXISTANT

Le bâti existant, c'est-à-dire construit avant la mise en place des règles de construction, est en général vulnérable. Cependant, des constructions monumentales ou bien réalisées résistent parfaitement aux séismes. On constate aussi que des structures à priori identiques s'endommagent plus facilement : analyser leur vulnérabilité consiste ainsi à essayer de prédire le comportement de ces constructions sous séismes, en intégrant toutes nos incertitudes.

### LE BÂTI ANCIEN: UNE DIFFICULTÉ À GÉRER

L'augmentation des populations dans des noyaux urbains de plus en plus grands, exposés aux séismes et constitués d'un habitat hétérogène de qualité très variable sont les ingrédients qui positionnent le milieu urbain parmi les éléments les plus critiques de la chaîne du risque sismique. En effet, et les relations dommages physiques/pertes en vies humaines le montrent bien, il y a une forte corrélation entre le **nombre de constructions endommagées** après un séisme et celui **des victimes**. Il convient alors de connaître la façon qu'il aura de se comporter afin de gérer, prédire et évaluer sa **vulnérabilité** et son **intégrité** post-sismique.

Déterminer les bâtiments et les structures les plus vulnérables vis-à-vis du séisme au niveau d'une région, d'une ville ou d'un grand nombre de bâtiments est une tâche particulièrement ambitieuse et difficile pour plusieurs raisons:

- ❖ Travailler au niveau d'une ville ou d'une région signifie devoir étudier un nombre de bâtiments ainsi qu'une variété de types de structure (maçonnerie, béton armé, portiques, murs porteurs...) très importants avec des moyens financiers bien évidemment limités.
- ❖ Il est aussi souvent difficile d'avoir accès à toutes les informations nécessaires à ce type de diagnostic (plans de ferrailage mais aussi plus simplement schémas du système porteur, caractéristiques des matériaux utilisés, code de dimensionnement utilisé, fondations...).
- ❖ De plus, bien appréhender le comportement sismique d'une structure existante est bien plus difficile que de la dimensionner. En effet, on sait évaluer comment se comporte une structure qui respecte toutes les dispositions constructives et les règles de l'art : c'est la procédure de dimensionnement. Mais qu'en est-il d'une structure pour laquelle les dispositions constructives n'ont pas (ou partiellement) été respectées et qui ne peut être associée à un modèle « réglementaire » de comportement : c'est la phase de diagnostic sismique ou d'analyse de vulnérabilité.

Les objectifs des analyses de vulnérabilité sont essentiellement de trois natures:

- ❖ **Estimer les dommages prévisibles** aux personnes et aux biens juste après le séisme pour se représenter les dommages sismiques à l'échelle d'une ville ou pour décider des moyens de secours à mettre en place.
- ❖ **Identifier les bâtiments les plus vulnérables** aux séismes de façon à planifier et organiser une politique de renforcement du bâti existant.
- ❖ Un troisième objectif, indirect, consiste également à **profiter de travaux de transformation générale** d'un bâtiment (par exemple, accessibilité, aménagement thermique, réhabilitation...) pour établir une analyse de vulnérabilité et intégrer le sismique dans le projet de transformation.



**Séisme d'Izmit (Turquie 1999).** De nombreux exemples ont montré sur des groupes de structures a priori identiques, des différences de dommages considérables.

**Aléa sismique** - Il est défini par la probabilité qu'un séisme d'une certaine magnitude puisse affecter une région durant une période donnée. Son coté aléatoire, c'est-à-dire non prévisible, impose d'estimer le niveau de connaissance du problème, se traduisant par la représentation des incertitudes.

**Vulnérabilité sismique** - Elle caractérise la capacité des bâtiments et des structures à supporter les secousses sismiques (vulnérabilité physique), et la capacité des populations à se comporter de façon cohérente et raisonnée face à un événement majeur (vulnérabilité sociale). Dans ces deux cas, il est important de traduire notre méconnaissance des comportements afin d'en tenir compte dans notre estimation globale.

**Risque sismique** - Le risque sismique est la probabilité de survenue d'un séisme (aléa), sa gravité dans le cas où il survient (dommage et pertes) et l'estimation du niveau de connaissance du problème (approche probabiliste).

**VULNÉRABILITÉ COLLECTIVE** - Elle aborde la vulnérabilité à l'aide de méthodes statistiques, voire probabilistes. L'objectif de cette analyse est de représenter la vulnérabilité sous forme statistique, c'est-à-dire pour un ensemble de bâtiments regroupés par zone urbaine, par parcs immobiliers ou par fonction de bâtiments. Elles sont en général destinées à **informer** et **représenter** l'impact potentiel d'un séisme ou à classer de façon relative un élément (quartier, groupe de bâtiments...) par rapport à un autre.

**VULNÉRABILITÉ INDIVIDUELLE** - Elle est souvent basée sur des évaluations détaillées, proches des méthodes de diagnostic intégrant des notions de calcul. Elles sont en général proposées afin de connaître la **stabilité sismique** d'une structure pour une sollicitation sismique de référence et elles conduisent à proposer des solutions de **renforcement**.

Dans certains cas, certaines pratiques individuelles utilisent la même approche que celle de la vulnérabilité collective, au moins dans une première phase globale permettant une première classification sommaire du bâti. Pour cette raison, nous parlons plutôt **d'inventaire sismique**, c'est-à-dire un recensement des constructions en récupérant des informations structurales utiles à l'analyse sismique.

**PRINCIPE DES MÉTHODES COLLECTIVES** - Les méthodes empiriques d'évaluation de la vulnérabilité suivent à peu près toutes la même démarche:

- ❖ Définition d'une typologie.
- ❖ Collecte des informations structurales caractérisant les bâtiments.
- ❖ Application d'une fonction d'endommagement.
- ❖ Représentation des dommages.

D'autre part, elles s'organisent en différents niveaux d'analyse, depuis des évaluations très sommaires jusqu'à des évaluations plus détaillées.

## QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATION EN FRANCE.

❖ *La méthode RiskUE* - Sur la base d'observations in-situ des caractéristiques structurales, elle propose des fonctions de vulnérabilité moyenne et les intervalles des valeurs possibles et probables. Deux niveaux d'analyse sont proposés: le niveau I uniquement empirique et le niveau II reposant sur des approches mécaniques. Même si cette méthode analyse les bâtiments un par un, les résultats sont généralement représentés statistiquement (par classe de construction ou par secteur).

❖ *La méthode VULNERALP* - Elle repose essentiellement sur la méthode italienne. Elle produit une courbe de vulnérabilité en ne considérant que les caractéristiques générales des constructions. Une courbe moyenne et les courbes probables sont proposées, ces dernières traduisant finalement notre méconnaissance. Trois niveaux ont été proposés: un niveau 0 élémentaire proche d'un inventaire sismique, un niveau 1 qui améliore la connaissance des constructions et donc leur réponse probable, et un niveau 2 équivalent à la méthode RiskUE de niveau 1.

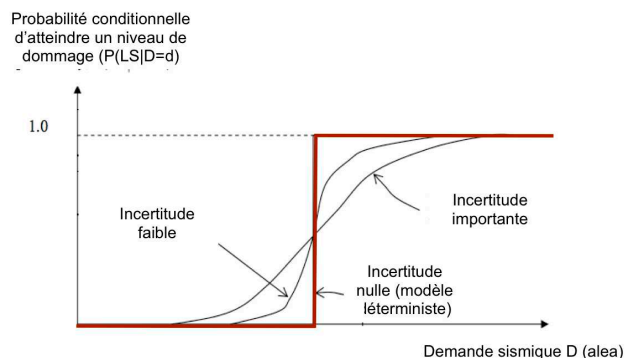
## EN SAVOIR PLUS.

Le Projet VULNERALP

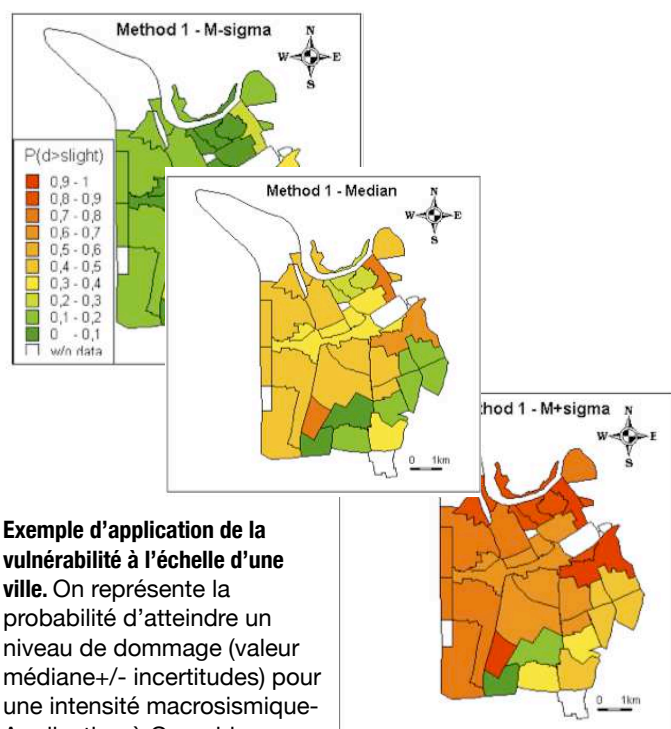
<http://www-lgit.obw.ujf-grenoble.fr/~pgueg>

Combescore et al., Cahier technique AFPS n°25.

Coburn and Spence, Prentice Hall Eds, 2002.



**Courbe de fragilité exprimant la probabilité d'atteindre un certain niveau de dommage pour un aléa donné.** Plus l'incertitude du modèle est importante, plus la courbe est inclinée. Un modèle sans incertitude (modèle déterministe) donne la limite exacte entre la zone non endommagée (le domaine à gauche de la courbe rouge) et la zone endommagée (domaine à droite), pour une valeur déterministe de l'aléa.



**Exemple d'application de la vulnérabilité à l'échelle d'une ville.** On représente la probabilité d'atteindre un niveau de dommage (valeur médiane +/- incertitudes) pour une intensité macrosismique-Application à Grenoble

**LES BÂTIMENTS ANCIENS NE SONT PAS TOUS VULNÉRABLES.** C'est le constat des observations faites après les grands tremblements de terre. Cependant, tandis que les réglementations techniques s'améliorent à chaque mise à jour, la lenteur du renouvellement urbain place le bâti existant au cœur de la vulnérabilité physique au séisme. Savoir l'évaluer et la représenter sont deux des étapes essentielles à l'analyse du risque sismique.

## EFFETS DE SITE

Il n'est pas facile de savoir qui des rochers ou des sédiments sont les sols les plus critiques vis-à-vis du séisme. Certains reliefs rocheux montrent des amplifications inquiétantes tout comme certains remplissages sédimentaires : c'est la nature des formations géologiques mais aussi la géométrie des reliefs et des bassins qui provoquent les plus fortes amplifications du mouvement sismique, avec des conséquences directes pour la résistance des structures. Il faut donc pouvoir les évaluer afin de s'en prémunir.

### ORIGINE DES EFFETS DE SITE.

Lors des grands séismes historiques, l'analyse des intensités a amené les scientifiques à attribuer au sol des effets sur la distribution des dommages. Différents types de sol modulent en effet la sévérité des ondes sismiques et en conséquence la distribution des dommages. C'est ce que l'on appelle les **effets de site**. En général, on distingue les effets liés à la nature des sols de ceux liés à la topographie.

### LES EFFETS LIÉS À LA TOPOGRAPHIE

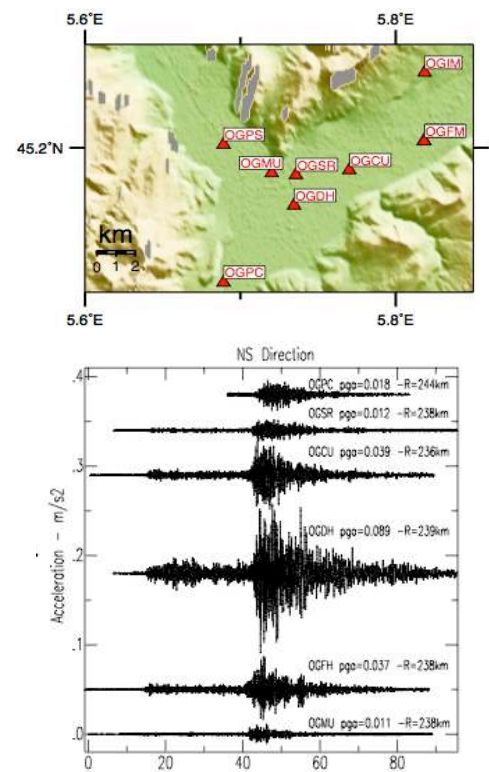
Quelques observations réalisées en France et à l'étranger ont montré que le mouvement sismique du sol était perturbé par la présence de topographie marquée. C'est l'hypothèse avancée pour expliquer les dommages importants observés lors du séisme de **Lambesc** (1906) sur le village de Rognes, situé sur un relief marqué. Quelques exemples montrent ailleurs des destructions plus marquées au sommet des reliefs: par exemple lors du séisme de San Fernando (1971), en 1987 lors du séisme de Whittier Narrows (Californie, 1987) ou en 1994 au cours du séisme de Northridge (Californie) de 1994. Pour ce dernier cas, Spudich, un sismologue de l'US Geological Survey, observa de fortes amplifications du mouvement sismique généré par une série de répliques entre le haut et le bas d'un mont situé dans Los-Angeles. Ces effets ont également été révélés par des simulations numériques qui montrèrent que l'effet principal de la topographie est une amplification importante du mouvement du sol (**30 à 100%** selon les auteurs), dans des bandes de fréquences étroites (**2-15 Hz**). La présence et la localisation de cette amplification sont étroitement liées à la caractéristique de l'onde sismique incidente (**longueur d'onde**) et à la géométrie de la pente. Ces effets mal connus sont attribués à l'interférence entre le relief et les ondes, ou parfois à l'interférence qui se produit entre les ondes directes venant du séisme, et celles qui se focalisent dans le relief.

### LES EFFETS LIÉS À LA GÉOLOGIE.

Les effets de site de nature géologique ont quant à eux bénéficié d'un grand nombre d'observations systématiques. La plupart des villes exposées aux séismes dans le monde ont présenté des **dommages variables en fonction de la nature du sol**, d'autant plus qu'elles sont quasi systématiquement fondées sur des remplissages alluvionnaires. Coburn et Spence affirment que, entre des sols raides ou rocheux et des sédiments mous, les intensités macrosismiques peuvent varier d'un **niveau de dommage**. Pour les constructions les plus faibles (par exemple en maçonnerie), cela peut correspondre à une augmentation des dommages de l'ordre de 30%, qui se traduit en terme de pertes de vies humaines par une augmentation considérable des victimes. En France, certaines villes présentent des effets de site majeurs. Ce sont par exemple les cas de Grenoble, d'Annecy, de Nice ou de Lourdes qui depuis quelques années font l'objet d'une surveillance initiée par le **Réseau Accélérométrique Permanent**. En général, on distingue trois observations caractérisant la présence d'effets de site: **l'amplification** du mouvement du sol dans les couches molles généralement situées en surface, la **résonance fréquentielle** au sein de ces couches, et **l'allongement** du mouvement sismique.



**Exemple d'effets due au relief:** la ville de Rognes, construite sur un relief marqué, présentait des dommages plus importants en son sommet lors du tremblement de terre de Lambesc 1909.



**Exemple d'effets due à la géologie:** Grenoble, construite sur un bassin sédimentaire important et constitué de formations molles, présente systématiquement des amplifications du mouvement. Sur cet exemple, la station du réseau accélérométrique permanent RAP située sur le rocher OGMU a une amplitude et une durée limitées par rapport aux autres stations situées sur les sédiments.



### CONSÉQUENCE DES EFFETS DE SITE SUR LES STRUCTURES

La plupart des régions caractérisées par un effet de site majeur sont souvent constituées d'un remplissage de formations molles sur un horizon géologique plus raide. Par molles on entend des formations dans lesquelles la propagation des **ondes de cisaillement  $\beta$**  est relativement faible. Selon la classification des sols donnée par les codes de **dimensionnement parasismique** (EC8), les vitesses  $\beta$  peuvent atteindre pour les sols les plus mous des valeurs inférieures à 180 m/s (**type de sol D**) avec exceptionnellement des valeurs inférieures à 100 m/s (sol type S1). Inversement, les sols raides ont des vitesses de propagation des ondes S supérieures à 800 m/s (**type de sol A**). Ils sont souvent associés à des sédiments raides à très raides, ou à des rochers fracturés ou compacts (par exemple,  $\beta=2000$  m/s pour un granite sain).

Dans le cas d'une formation sédimentaire composée de couches planes superposées les unes sur les autres, l'onde sismique pénètre la couche sédimentaire. Elle est **piégée** au niveau de l'interface inférieure entre le sol et le substratum rocheux. Plus le sédiment sera mou par rapport au rocher, plus l'énergie sismique sera concentrée et piégée dans la couche de surface: c'est le principe du tambour ou de **la caisse de résonance**. Une des conséquences directes est donc de créer un **phénomène de résonance** de la couche, qui se met à vibrer à sa fréquence naturelle. Cette fréquence, dite **fréquence fondamentale**, ne dépend que de la vitesse des ondes et de l'épaisseur des sédiments. La conséquence directe est donc une focalisation des plus hautes énergies sismiques dans une bande de fréquence étroite. Plus un **sédiment sera mou**, plus il amplifiera vers les basses fréquences, c'est-à-dire **pour les structures les plus hautes**. Inversement, plus les sédiments seront fins, plus les amplifications auront lieu haute fréquence, avec des conséquences pour les **bâtiments les moins élevés**.

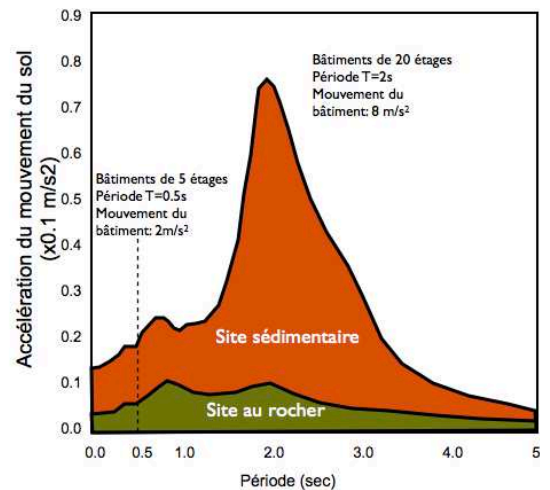
A Mexico, ce phénomène particulièrement marqué a été prépondérant sur la localisation et le type de dommage. Rapidement après la secousse, les scientifiques ont pointé un phénomène de résonance entre le sol et les structures, entraînant une distribution particulière des dommages où seuls les bâtiments de 10 à 20 étages étaient considérablement détruits. **Mexico** est une situation exceptionnelle mais des situations identiques peuvent se reproduire ailleurs. On comprend alors les impacts et les conséquences que peuvent avoir ces effets sur la plupart des milieux urbains.

**Phénomène de résonance:** La résonance représente le phénomène selon lequel un système mécanique est sensible à certaines fréquences. Un système résonant peut accumuler une énergie, si celle-ci est appliquée sous forme périodique, et proche d'une fréquence dite "fréquence de résonance" ou "fréquence naturelle". Soumis à une telle excitation, le système va osciller de plus en plus, jusqu'à atteindre un régime d'équilibre qui dépend des éléments dissipatifs du système (amortissement), ou bien jusqu'à une rupture d'un composant du système. Si une structure ne dissipe pas suffisamment son énergie de vibration ou si la sollicitation est entretenue à une fréquence égale à celle de la structure, celle-ci s'endommagera.

#### EN SAVOIR PLUS.

Bard, 2002, Risque Info n°13, IRMA, Grenoble.

Guéguen, 2009, Habilitation à Diriger les Recherches, Université J. Fourier, Grenoble.



**Amplification du mouvement du sol lors du tremblement de terre de Mexico (1985).** Le mouvement sismique est représenté en fonction du mouvement d'un oscillateur ayant différentes périodes de vibration. La période d'oscillation de la couche sédimentaire montre une forte amplification à 2 secondes, là où toute l'énergie sismique se focalise. Ce sont donc les bâtiments ayant cette période qui vont être les plus secoués.



**Illustration du phénomène de résonance:** à proximité d'un bâtiment de 10 étages intact, un bâtiment d'une vingtaine d'étages a été complètement détruit lors du séisme de Mexico (1985), dû à un effet de site important.

**LES BÂTIMENTS CONSTRUITS SUR DU ROCHER NE SONT PAS PLUS SÛRS QUE LES AUTRES.** Une chose est certaine par contre: des conditions de sol particulières entraînent des mouvements du sol particuliers. Dans la phase de conception de la structure, la réglementation sismique conseille ainsi de tenir compte des effets de site qui peuvent moduler le mouvement du sol de référence à prendre en compte pour le dimensionnement du projet.

## SURVEILLANCE SISMOLOGIQUE

Si vous êtes près de l'épicentre d'un tremblement de terre, attendez-vous à entendre une forte détonation, suivie de secousses. Si vous êtes plus loin, le premier avertissement peut être un bruit soudain, un grondement ou l'oscillation du bâtiment dans lequel vous vous trouvez. Ensuite, vous sentirez une secousse, rapidement suivie d'un mouvement de roulement de haut en bas et de gauche à droite. C'est une expérience qui ne manque jamais d'être effrayante. Ces observations représentent le passage des ondes sismiques, de différentes natures, que les instruments de surveillance enregistrent.

### LES ONDES SISMQUES.

Quand un tremblement de terre est assez fort pour endommager des bâtiments, les témoignages rapportent finalement les effets des secousses sur les structures. Toutefois, pour des séismes plus petits, le **son** qui précède ou accompagne la secousse est perçu **comme la plus forte perception du tremblement de terre**. Certains auteurs rapportent que la plupart des petits tremblements de terre produisent du bruit. Ce son vient de la nature des ondes qui sont générées par la source sismique au moment de la rupture. En réalité, une **rupture sismique** va libérer de l'énergie sous forme d'une **multitude d'ondes** dites sismiques qui, se propageant dans la terre, vont nous informer sur les propriétés des matériaux traversés et sur la rupture sismique à l'hypocentre du tremblement de terre. Pour cette raison, enregistrer les tremblements de terre est vite devenu le fondement de la sismologie.

Un séisme va propager des ondes dans toutes les directions: ces dernières traversent la terre avec des vitesses et des modes de déplacement différents. On distingue en général les **ondes de volume** des **ondes de surface**.

**LES ONDES DE VOLUME** - Elles se propagent à l'intérieur de la terre à grande vitesse, celle-ci dépendant des propriétés des matériaux (environ 6 km/s). Les ondes de volume vont

- ❖ soit se propager en déplaçant le sol dans la direction de propagation, en **dilatant** ou **compressant** le sol: on parle d'ondes de compression ou **ondes primaires P**. Ce sont ces ondes qui sont responsables du **grondement sourd** qui accompagne un tremblement de terre puisqu'elles sont comparables aux ondes émises par nos cordes vocales pour communiquer.
- ❖ soit se propager en déplaçant le sol **perpendiculairement** à la direction de propagation. Elles sont plus lentes que les P et on les appelle ainsi les **ondes secondaire S** ou ondes de cisaillement.

En mesurant la différence des temps d'arriver des ondes P et S sur un sismogramme, il est possible de connaître la **distance** séparant l'hypocentre de la station de mesure.

**LES ONDES DE SURFACE** - Ce sont des ondes qui vont être guidées par la surface de la terre, comme les vagues à la surface d'un lac. Moins rapides que les ondes de volumes, elles provoquent néanmoins des amplitudes importantes. Deux types d'ondes de surface existent:

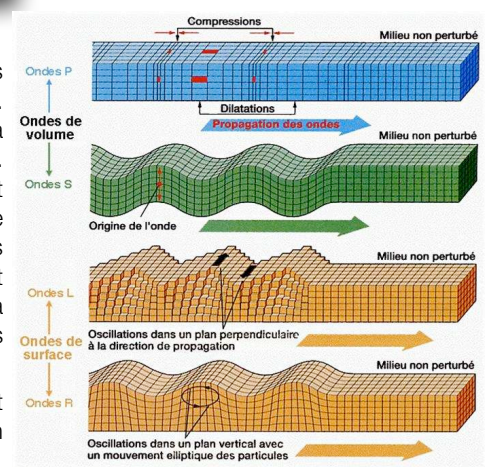
- ❖ les ondes de **Love** qui se déplacent comme des ondes S mais sans mouvement vertical: elles peuvent être à l'origine de nombreux dégâts aux constructions.
- ❖ les ondes de **Rayleigh** qui se propagent à la fois en vertical et aussi en horizontal.

### LES RÉSEAUX DE SURVEILLANCE

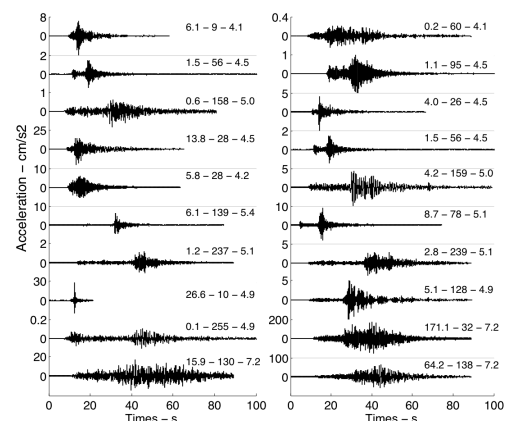
Plusieurs types d'instruments de surveillance sismologique existent: en générale c'est la nature des ondes à enregistrer qui les distinguent, c'est-à-dire leur amplitude et leur longueur caractéristique. Les principaux types d'instrument sont les **réseaux vélocimétrique courte-période**, **vélocimétriques large-bande** et les **réseaux accélérométriques**.

*En la dite année (1711) le 6ème dudit mois (octobre) à 8 heures du soir en un temps serain et beau, il se fit un double tremblement de terre presque coup sur coup sous un bruit sourd qui surprit tout le pais comme étant une chose icy fort extraordinaire.*

Témoignage lors du tremblement de la Sarthe de 1711 (d'après <http://canton-la-suze-sur-sarthe.over-blog.com/article-2774309-6.html>)



**Exemples de propagations des ondes sismiques.** On distingue les ondes de volume (P et S) des ondes de surface (Love L et Rayleigh R).



**Les enregistrements des tremblements de terre n'ont pas tous la même allure (Source: RAP).**

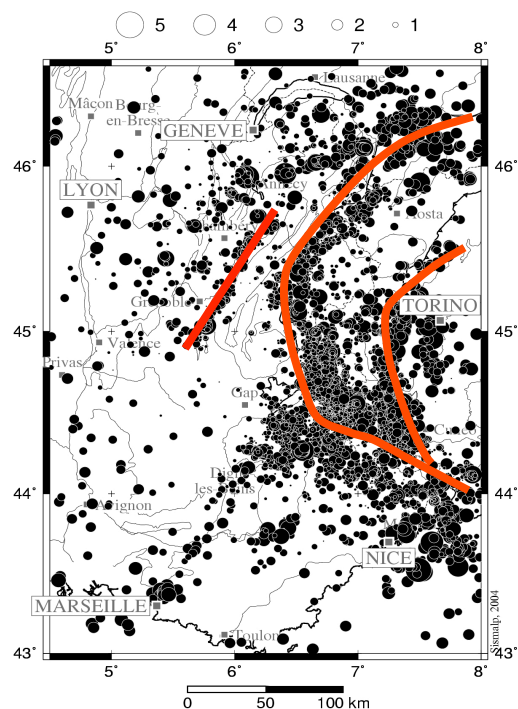
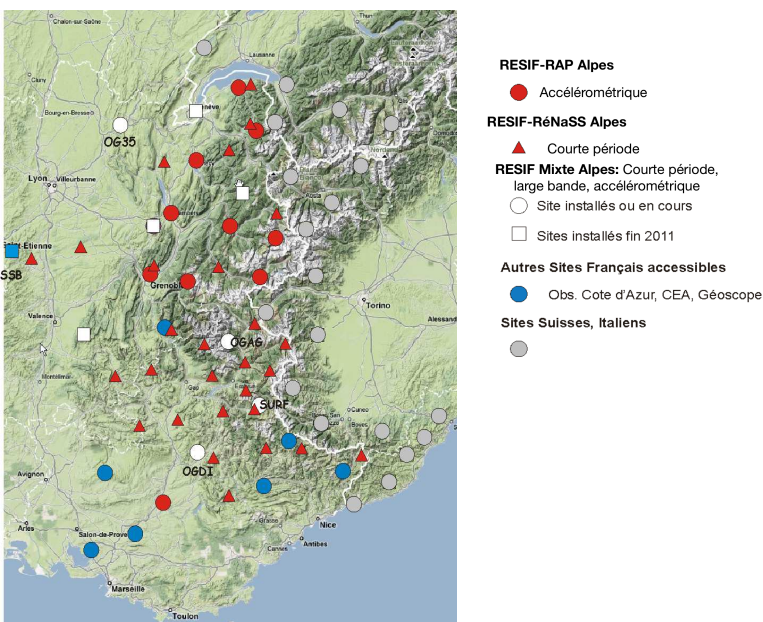
- ❖ Tous les tremblements de terre ne génèrent pas autant d'ondes de surface que d'ondes de volume.
- ❖ Puisqu'elles ne voyagent pas à la même vitesse, toutes ces ondes vont se superposer sur les enregistrements des sismomètres.



**LES RÉSEAUX VÉLOCIMÉTRIQUES COURTE-PÉRIODE.** Ils servent à enregistrer la vitesse de déplacement du sol. Ils permettent de détecter les moindres mouvements du sol générés par des ruptures tectoniques de petites dimensions (failles). On les appelle **courte-période** car ils sont conçus pour enregistrer les **ondes de volumes** au-delà de 1Hz, c'est-à-dire celles générées par des séismes proches. Les stations sont installées dans des endroits isolés afin de ne pas être polluées par les vibrations générées par l'activité humaine.

**LES RÉSEAUX VÉLOCIMÉTRIQUES LARGE-BANDE.** Ils permettent l'enregistrement à grande distance des ondes sismiques générées par les **grands tremblements de terre**. Toutes les ondes sont enregistrées, en particulier celles qui traversent la terre (ondes de volume) et qui servent à étudier sa structure interne. On les appelle large-bande car ils détectent des ondes qui, à grande distance, ont des **longues périodes de vibration** (plusieurs km). On les installe en générale tout autour du globe, dans des endroits calmes afin d'avoir des niveaux de détection très bas.

**LES RÉSEAUX ACCÉLÉROMÉTRIQUES.** Ils servent à mesurer l'accélération du sol générée par des tremblements de terre forts et proches. Ils sont large-bande et contrairement aux réseaux vélocimétriques très sensibles, ils permettent d'obtenir l'**amplitude de la sollicitation** sans saturer. Ils servent principalement aux ingénieurs afin de connaître le mouvement contre lequel se protéger et aux sismologues qui s'intéressent aux mécanismes de la rupture sismique le long des grands accidents géologiques. En général, on les installe là où il y a des **enjeux**, c'est-à-dire en ville ou à proximité d'installation particulière.



**Sismicité dans les Alpes entre 1989 et 2002.** Le réseau SISMALP a permis d'identifier finement les arcs alpins de sismicité ainsi que la présence de failles actives, comme celle à proximité de Grenoble dite de Belledonne. (source SISMALP: <http://sismalp.obs.ujf-grenoble.fr>)

#### EN SAVOIR PLUS.

Le réseau SISMALP : <http://sismalp.obs.ujf-grenoble.fr/>

Le réseau RAP : <http://www-rap.obs.ujf-grenoble.fr>

Les documents pédagogiques de l'EOST: <http://eost.u-strasbg.fr/pedago/Accueil.html>

**SENSIBILITÉ D'UN SYSTÈME** - On la définit comme le rapport entre les mouvements maximal  $V_{max}$  et minimal  $V_{min}$  que le système peut enregistrer ( $DR = V_{max}/V_{min}$ ). Elle s'exprime en Bell (ou dB) qui mesure la puissance d'une onde acoustique (1Bell=mesure en logarithme de base 10 de l'énergie par unité de temps *puissance*).  $DR = 20 \log(V_{max}/V_{min})$  dB

#### Exemple de la terre:

Les séismes les plus forts peuvent générer  $10 \text{ m/s}^2$ . Le bruit de fond sismique génère  $10^{-9} \text{ m/s}^2$  soit 10 ordres de grandeur. Si on veut enregistrer toute l'activité avec le même instrument, celui-ci doit avoir une dynamique de  $DR_{\text{Terre}} = 200\text{dB}$

Pour les sismomètres les plus anciens (analogiques), DR est fonction de la résolution de l'aiguille sur le papier (0.1mm) et de la dimension de la feuille (10cm). D'où  $DR = 60\text{dB}$ .

Pour les sismomètres modernes (numériques), les Volts sont convertis en points de numérisation (counts). DR est défini par le nombre d'octets disponibles pour enregistrer les points.  $V_{max}$  dépend du nombre d'octets disponibles sur la station (on parle de station 8, 12, 16 20 et 24bit). Chaque octet correspond à un facteur 2 de la Dynamique du système. Donc  $DR_n = 2^{n-1}$  -  $DR_{24} = 138 \text{ dB}$ .

**LES SÉISMES FONT DU BRUIT.** Parmi la multitude d'ondes qu'ils génèrent, l'onde P sonore peut être entendue par l'Homme. Les instruments, plus sensibles que l'Homme, permet d'enregistrer la totalité des ondes et remonter ainsi à la structure de la terre et la mécanique de la rupture. Certains permettent également de mesurer le mouvement du sol contre lesquels les ingénieurs devront construire des habitations résistantes. Observer les séismes est la base de la progression de notre connaissance sur les tremblements de terre et la structure de la terre profonde et superficielle.



## CONCEPTION PARASISMIQUE

Il est possible de construire des bâtiments qui résistent au séisme: c'est le rôle de la réglementation parasismique. Il en existe pour tout type de matériaux. Même si le béton armé est un matériau qui, alliant les propriétés du béton à celles de l'acier, présente les meilleurs propriétés pour résister à un séisme, un mauvais emploi, des malfaçons ou des erreurs de conception peuvent rendre une construction fragile. La conception parasismique édicte quelques règles à respecter.

### QUELQUES RÈGLES DE L'ART À RESPECTER

Les codes de dimension présentent les règles de l'art afin de rendre les constructions saines et sûres. Les respecter c'est s'assurer que tout a été mis en oeuvre afin d'atteindre cet objectif. De mauvais matériaux, des erreurs de conception, des réalisations hasardeuses rendent tous les efforts inutiles, et cela quelque soit le matériau utilisé. Les constructions en béton armé ne seront pas plus sûres si elles ne respectent pas les principes élémentaires qui doivent assurer une limitation des efforts dans les éléments porteurs, et par conséquent les dommages sismiques. Les ingénieurs et les architectes ont la connaissance et la responsabilité du dimensionnement, et ils sont en ce sens incontournables dans tous les cas.

Les observations post-sismiques montrent systématiquement les mêmes dommages ou presque: des étages écrasés, des bâtiments basculés, des bâtiments accolés plus endommagés ou encore des remplissages détruits. Respecter la conception replace aussi le bâtiment dans son environnement et apporte des éléments de réponse pour le rendre parasismique.

### RESPECTER LA RÉGULARITÉ EN ÉLÉVATION

En élévation, la régularité des formes, la répartition homogène des masses et des rigidités sont des critères importants qui conditionnent la stabilité et la résistance des structures sous séisme.

**Régularité de forme.** Les formes irrégulières en élévation donnent lieu à des oscillations différentielles. Les parties de bâtiment de volume et/ou de hauteur distinctes vont osciller différemment et les éléments porteurs peuvent être soumis à des efforts de sens contraire, situation très défavorable pour la solidité de l'ouvrage.

**Répartition des masses.** Plus le centre de gravité est bas, plus les contraintes sur les structures verticales seront réduites en cas de séisme. De même, les constructions en forme de pendule inversé (masse importante perchée) sont particulièrement vulnérables car elles produisent des moments de renversements importants et des contraintes élevées dans les éléments verticaux et les fondations.

**Niveaux transparents.** L'expérience montre que les structures qui possèdent des niveaux transparents (c'est-à-dire sans suffisamment de systèmes de contreventement) sont plus vulnérables et résistent moins aux sollicitations sismiques. De nombreux exemples montrent l'effondrement de la structure provoqué par l'absence de contreventement dans les niveaux transparents. Puisqu'ils sont plus flexibles que les autres niveaux, les poteaux verticaux subissent de grandes déformations latérales et leur rupture provoque l'effondrement du bâtiment. Elle se traduit souvent par l'écrasement du niveau.



**Exemple d'une construction en béton armé endommagée lors du tremblement du Chili (2010).** Même en béton armé, un mauvais respect des règles de conception entraîne la destruction complète de la structure.



**Exemple de dommage dû à l'irrégularité en élévation.** Variation des géométries.



**Exemple de dommage dû à l'irrégularité en élévation.** Etage transparent ou souple.

## CONCEPTION PARASISMIQUE

### RESPECTER LA RÉGULARITÉ EN PLAN

Les bâtiments de forme en plan irrégulière sont exposés à de la torsion d'axe verticale qui est à l'origine, dans de nombreux cas, de dommages importants. Elles "vibreront" autour des zones plus rigides.

**Structure irrégulière de forme.** Dans les angles rentrants (c'est-à-dire à la jonction de deux parties ayant des rigidités différentes dans une même direction horizontale), la différence de rigidité induit des oscillations en opposition de phase qui provoquent des concentrations de contraintes et des dommages importants.

**Élancement de la structure.** Une structure élancée en plan (rapport largeur sur longueur supérieure à 1/3) est le siège de déplacements différentiels d'une extrémité à l'autre. En effet, un séisme provoque des mouvements de sol différents suivant la nature du sol de fondation et qui, sur une grande distance, peuvent être considérables. Une alternative pour réduire l'élancement est de fractionner le bâtiment par des joints parasismiques.

### INTÉGRER L'ENVIRONNEMENT À LA CONCEPTION

Des dommages peuvent également être dus à l'environnement de la structure, environnement anthropique comme naturel.

**Environnement anthropique.** Lors de secousses, il n'est pas rare de voir des bâtiments se cogner. Il est donc indispensable de respecter des distances entre bâtiments et/ou d'intégrer des joints dits parasismiques entre des blocs afin de limiter les effets d'un bâtiment sur l'autre.

**Environnement naturel.** Le terrain va jouer un rôle important. Selon le sol de fondation, des tassements peuvent apparaître sous la structure, du fait d'un phénomène dit de liquéfaction. La perte de portance provoque souvent le basculement de la structure, même si la structure a été parfaitement dimensionnée.

### CONCEVOIR LA STRUCTURE AFIN QU'ELLE DISSIPÉ L'ÉNERGIE DE VIBRATION

C'est certainement la prescription la plus importante que l'on retrouve dans les codes parasismiques EC8. La conception doit permettre à la structure de dissiper de l'énergie. Principe de base du dimensionnement en capacité, elle permet à une structure une déformation de plus en plus importante sans augmenter les efforts dans les éléments porteurs. Le respect d'une certaine quantité d'acier par surface de béton ou par longueur d'élément fait partie de ces principes.

### S'ASSURER QUE LES ÉLÉMENTS SECONDAIRES RÉSISTENT

Les éléments non porteurs, tels que les remplissages en maçonnerie, les balcons, les parapets, les éléments de façade et les cheminées, doivent également respecter quelques principes élémentaires. Ils doivent être intégrés dans la conception et la dimension de la structure car leur chute peuvent être catastrophique.

**Concevoir en capacité.** La structure porteuse d'un bâtiment doit toujours être conçue de façon ductile, c'est-à-dire permettant une déformation importante dans ses éléments les plus sollicités par le séisme. La méthode de dimensionnement en capacité offre un procédé simple et efficace, en contrôlant et en localisant les plus grandes déformations aux endroits qui seront les plus renforcés.

### EN SAVOIR PLUS.

Les grands ateliers - [www.lesgrandsateliers.fr/](http://www.lesgrandsateliers.fr/)

Site de l'Office Fédérale Suisse de l'Environnement (OFEV) - <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00799/index.html?lang=fr>

Conception parasismique - Cahier technique de l'AFPS - <http://www.afps-seisme.org/>



**Exemple de dommage dû à l'irrégularité en plan.**  
Structure irrégulière de forme.



**Exemple de dommage dû à l'environnement.**  
Tassement de la structure dû à la liquéfaction



**Exemple de dommage dû à l'environnement.**  
chocs entre deux bâtiments adjacents.

**SEULS LES BÂTIMENTS BIEN CONÇUS RÉSISTENT.** Le béton armé est un matériau qui s'adapte bien à la conception parasismique, lorsque son emploi est maîtrisé. Une structure résistera bien à une sollicitation sismique uniquement si les principes de base seront respectés. Seuls les ingénieurs et architectes formés peuvent proposer des structures résistantes et ils sont en cela incontournables



## ZONAGE SISMIQUE DE LA FRANCE

De la même façon que l'on parle de crue décennale ou centennale pour exprimer le risque hydraulique, le risque sismique s'appuie sur une estimation de l'aléa sismique en fonction d'une période de retour. Tandis que pour les inondations les nombres sont ronds et représentatifs de périodes simples, celui du sismique est plus étonnant: on parle de période de retour de 475 ans. Pourtant ce chiffre a une signification mathématique puisqu'il représente la période de retours à considérer pour un événement qui a 10% de chance de se produire lors des 50 prochaines années.

### Risque sismique et réglementation

La réglementation parasismique a émergé à la suite de grands tremblements de terre provoquant de grandes catastrophes humaines: celui de 1906 à San Francisco ou de Messine en 1908 ont amené les responsables à réfléchir à l'évaluation de l'aléa sismique. A l'époque, le manque d'enregistrement limitait la connaissance du mouvement du sol auquel on pouvait s'attendre en une région donnée. Cette lacune imposait non seulement de considérer un **mouvement du sol forfaitaire** (par exemple 0.1g, soit 10% de l'accélération due à la pesanteur) et de ne considérer que les zones qui avaient déjà subi des tremblements de terre. Selon ce principe, depuis réfuté, les séismes majeurs ne se produisent que là où ils se sont déjà produits, limitant ainsi la qualité de l'évaluation de l'aléa.

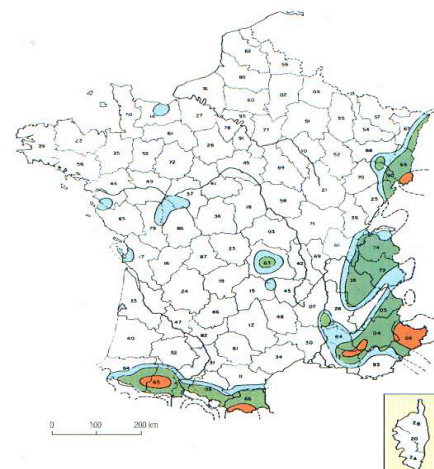
Avec la normalisation européenne, de nouveaux principes ont été adoptés afin de définir l'aléa sismique, de façon homogène en Europe: ce sont les documents **Eurocode** dont le volet 8 concerne les séismes, et communément nommé **EC8**. Cette normalisation impose certaines contraintes, avec au final un objectif clair: réduire les dommages et donc les pertes lors de tremblements de terre.

Selon l'EC8, la conception parasismique des constructions est définie afin d'assurer la **protection des vies humaines, la limitation des dommages aux structures et la continuité opérationnelle des constructions importantes pour la sécurité civile**. On associe ainsi un niveau sismique à un objectif de comportement selon l'importance du bâtiment, importance définie selon le nombre de victimes potentielles en cas d'effondrement et les conséquences induites en cas de dysfonctionnement post-sismique.

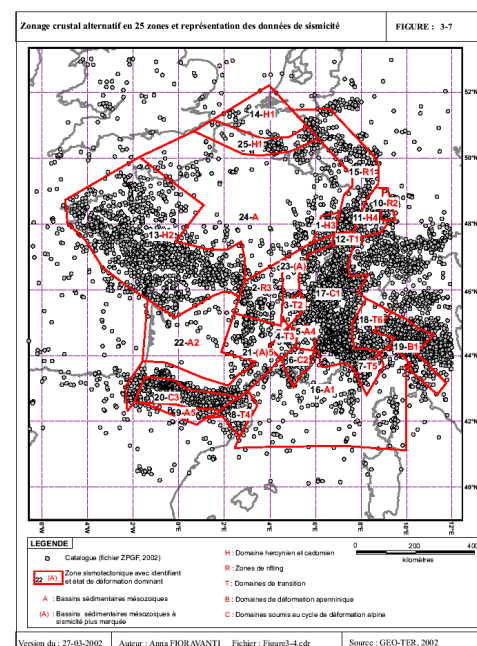
Afin d'être conforme, la structure nouvelle doit être conçue et construite pour résister, sans effondrement local ou global, à un **mouvement du sol de référence**, où que l'on se trouve sur le territoire français. La structure doit en outre, après cet événement, conserver une capacité de résistance résiduelle notable (notamment vis-à-vis des charges permanentes, pour pouvoir résister à une réplique). Il faut donc pouvoir évaluer l'agression sismique, définie comme l'action sismique de référence, selon la fonction et les objectifs de comportement associés à la structure mais aussi en fonction du **risque que l'on accepte de prendre durant la vie de l'ouvrage**, et cela où que l'on soit sur le territoire: c'est le principe du zonage sismique réglementaire.

### Zonage sismique de la France

Le zonage sismique de la France s'appuie sur le principe de l'approche probabiliste: cette dernière consiste à évaluer la possibilité (ou probabilité) d'observer un mouvement sismique de référence sur une période donnée et contre lequel se protéger. Cette approche, largement utilisée dans le monde, suit trois étapes: la reconnaissance des zones sismogènes capables de générer des séismes, puis pour chacune des zones le développement d'un modèle de sismicité afin d'estimer les taux annuels d'occurrence des magnitudes possibles, et enfin la sélection d'un modèle de prédiction du mouvement du sol permettant d'estimer le mouvement du sol produit par ces séismes.



**Zonage PS92.** Le zonage ancien de la France dit des PS92, définit les zones les plus sismiques (en orange et vert) en fonction des séismes anciens connus s'étant produits. On retrouve les séismes de Bâle dans l'Est, de Lambesc et du Golf de Gènes vers le Sud-Est, de Catalogne et d'Arudy dans les Pyrénées.



**Découpage tectonique.** Exemple de découpage tectonique proposé par GEOTER lors de la réalisation du zonage EC8. Les zones mettent en évidence les secteurs les plus actifs, représentés par la localisation des épicentres des séismes anciens.



## ZONAGE SISMIQUE

Identifier les zones potentiellement capables de générer un séisme. Selon la connaissance de la tectonique active de la région concernée, les zones où peuvent se produire des séismes sont identifiées le long des failles reconnues comme étant actives. Dans le cas de la France où la sismicité est diffuse et les failles mal connues, il convient de considérer des zones couvrant des régions vastes mais homogènes d'un point de vue tectonique. En fonction de la sismicité observée sur chaque zone, constituée des séismes passés (catalogue historique, période pré-instrumentale) et de la sismicité récente (catalogue instrumental fourni par les réseaux de surveillance), il est possible d'établir une relation de récurrence pour la sismicité. Elle fournit les taux annuels des magnitudes pouvant se produire dans une zone source.

**Taux d'occurrence des séismes.** Sur chaque zone, on peut estimer un nombre moyen annuel de séismes. Gutenberg et Richter montrèrent en effet en 1944 que ce nombre décroît selon une loi logarithmique de la forme :

$\log_{10} N = a - bM$  où  $N$  est le nombre de séismes par an,  $a$  et  $b$  des coefficients qui dépendent de la région et du niveau de sismicité.

A l'aide de ces informations, il est possible de définir les magnitudes maximales et minimales à prendre en compte pour l'estimation de l'aléa sismique.

**Estimation du mouvement du sol.** En fonction du taux annuel d'occurrence des séismes de chaque magnitude, des modèles de prédiction du mouvement du sol permettent d'estimer les mouvements du sol que peuvent produire les séismes futurs dans ces zones de sismicité diffuse. Ces modèles, abusivement appelés lois d'atténuation, sont établis en fonction des données collectées par les réseaux de surveillance. En respectant quelques précautions mathématiques, il est alors possible de connaître le **taux d'occurrence** de l'accélération du sol contre lequel se protéger partout sur la zone d'étude.

**Modèle d'occurrence des séismes dans le temps.** Les séismes sont supposés se produire de façon indépendante dans le temps: la possibilité qu'un séisme survienne ne dépend donc pas du temps écoulé depuis le dernier séisme s'étant produit. Cette affirmation conduit à considérer un modèle de Poisson qui permet d'estimer la probabilité  $P$  qu'un phénomène se produise au moins une fois pendant une période  $t$  selon la relation:  $P = 1 - e^{-\lambda t}$ .

Puisque la sismicité suit ce **modèle de Poisson**, l'accélération engendrée également. L'Autorité Nationale, considérant l'impact économique qu'elle engendre, impose que l'agression sismique de référence corresponde à une probabilité de dépassement sur **50 ans** ( $t$ ) de **10%** ( $P$ ), ce qui conduit à considérer une période de retour  $T$  de **475** ans. 50 ans correspond à la durée de vie moyenne d'un ouvrage. Il est également possible de calculer cette probabilité pour des périodes de retour plus longs.

Pour certains types de construction ayant une importance pour la sécurité civile et pour lesquels une continuité de service est nécessaire, on amplifie l'accélération du sol contre laquelle se protéger. Ceci revient à augmenter la période de retour (ou diminuer la probabilité de dépassement sur une période donnée). Les constructions sont ainsi classées en «classes d'importance» et une valeur est affectée à chaque classe. Il en va de même selon la qualité des sols.

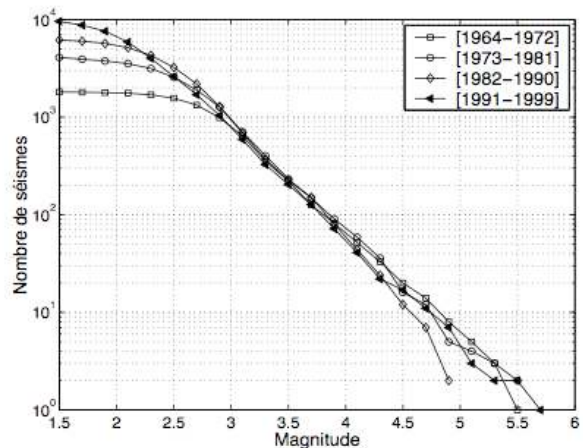
Avec les zones sismogènes, les niveaux de sismicité et les valeurs de référence, on obtient le zonage réglementaire de la France auquel se référer pour toute construction neuve.

### En savoir plus.

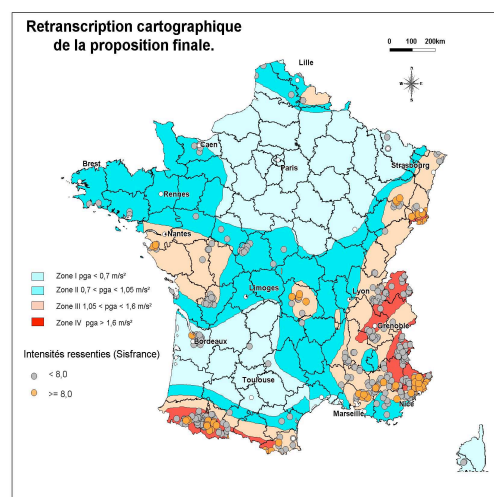
Beauval, C., Thèse de doctorat, 2003. <http://www-lgit.obs.ujf-grenoble.fr/~beauvalc/>

Le site du Plan séisme du ministère de l'écologie. <http://www.planseisme.fr/>

Les règles EC8. <http://www.eurocode1.com/fr/eurocode8.html>



**Modèle de sismicité en France.** Les courbes de Gutenberg-Richter ( $\log_{10} N = a - bM$ ) calculées sur quatre périodes du catalogue de sismicité instrumentale du Laboratoire de Détection Géophysique du CEA montre que la sismicité est stable sur la France (d'après Beauval, 2003).



**Ebauche du nouveau zonage EC8 de la France.** Contrairement à la carte PS92 (déterministe), cette carte (probabiliste) intègre l'ensemble des connaissances des sismologues et des tectoniciens, traduisant l'importance des zones les plus sismiques, au détriment des événements historiques seuls.

**LE SÉISME CONTRE LEQUEL SE PROTÉGER NE REVIENT PAS TOUS LES 475 ANS.** Afin de mieux tenir compte du caractère aléatoire des tremblements de terre, la période de retour de 475 ans correspond à une probabilité de 10% de connaître une accélération réglementaire sur 50 ans, la durée de vie d'un ouvrage. Les séismes sont indépendants les uns des autres et la durée entre deux événements peut être plus longue... ou plus courte. Mais cette probabilité devient alors plus faible.

## LA SISMOLOGIE URBAINE

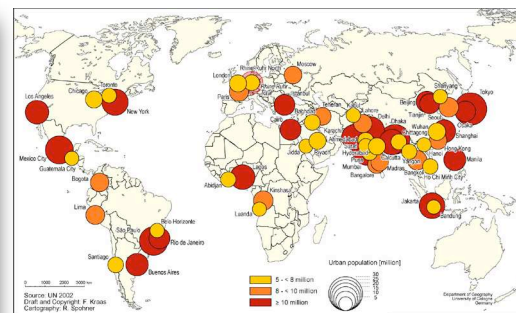
Sans tomber dans une “rousseauisation” excessive, l’homme, en se concentrant de plus en plus dans des noyaux urbains gigantesques, participe à l’explosion des catastrophes sismiques majeurs de ces dernières années. La sismologie urbaine consiste à prendre la mesure de l’environnement urbain dans l’évaluation du risque sismique. Urbanisation excessive et aléa sismique élevé sont les ingrédients d’une sismologie des villes bien différente de la sismologie des champs.

### LES MÉGALOPOLES SONT EXPOSÉES À DES MEGASÉISMES

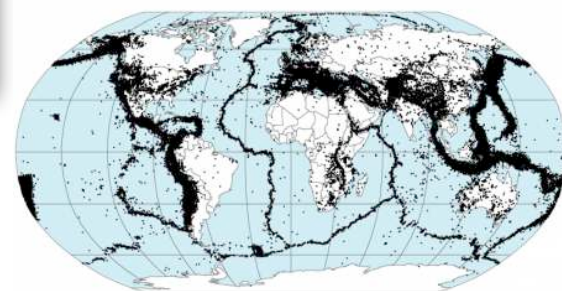
Il existe une relation classique avec laquelle débute chaque exposé abordant les notions de risque, d’aléa et de vulnérabilité. Le risque  $R$  est par définition la réunion d’un aléa  $A$ , d’une vulnérabilité  $V$  à cet aléa et de la valeur de l’élément exposé  $E$ . On pourrait débattre longtemps sur la définition et les limites de ces notions, suivant que l’on se place du côté du sismologue, de l’ingénieur ou du sociologue. Coburn et Spence, des scientifiques anglais, rappellent cependant qu’au cours du dernier siècle, le coût des séismes ramené à la valeur de l’année 2000 est de l’ordre de mille milliard de dollars. Rapporté par an, ils constatent que cette valeur augmente au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, essentiellement à cause de l’augmentation et de la concentration des populations dans des grands centres urbains exposés à un aléa sismique fort.

Depuis un siècle, l’aléa ou encore le nombre de séismes par an, n’a ni augmenté ni diminué : seul la vulnérabilité des milieux a évolué. En effet, quelque 50 000 tremblements de terre se produisent en moyenne chaque année, résultat du mouvement des plaques tectoniques. Parmi ces 50 000 événements, quelques uns sont d’une magnitude potentiellement dévastatrice. En dépit de l’amélioration de notre connaissance depuis la confirmation de l’existence de la tectonique des plaques avancée en 1912 par Wegener, il est toujours impossible de connaître exactement où et quand se produiront les prochains grands tremblements de terre. Ce que l’on connaît par contre, c’est l’énorme croissance de la population urbaine située le long des lignes de faille sismiques connues, ce qui rend plus que probable le fait que les futures catastrophes surpasseront celles de San Francisco ou de Tokyo. Non seulement le nombre de personnes à risque est plus élevé que jamais, mais la concentration des richesses et des infrastructures modernes dans les mégapoles pourrait provoquer un tremblement de terre en zone urbaine infiniment plus dévastateur en termes économiques que le tremblement de terre de Kobe en 1995, qui a pourtant causé des pertes économiques de plus de 100 milliards de dollars, ce qui en fait, à ce jour, l’une des catastrophes naturelles les plus coûteuses de tous les temps. Les séismes récents de Haiti (2010) ou de Chine (2009) sont les preuves évidentes de catastrophes à venir.

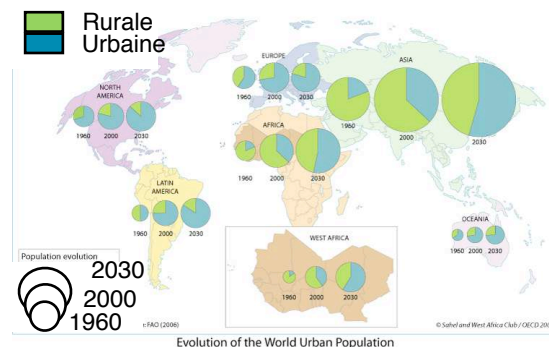
En France, nous ne sommes pas en reste. La sismicité modérée de notre pays conduit à un oubli rapide (voir un déni) du risque sismique. Pourtant, un séisme historique majeur a eu lieu au XX<sup>ème</sup> siècle qui produisit des effets importants dans la région rurale de Lambesc (Aix-en-Provence). Pour une magnitude estimée supérieure à 6, ce séisme dit séisme de Lambesc (1909), a servi de base en 1982 à une simulation du Ministère en charge de l’environnement afin d’évaluer quel impact ce séisme aurait s’il se produisait maintenant, dans une région depuis fortement urbanisée. Cette simulation conclut alors à des effets directs et indirects majeurs sur les constructions, les vies humaines et l’économie.



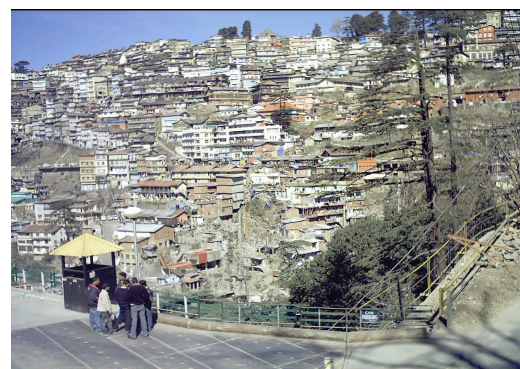
Preliminary Determination of Epicenters  
358,214 Events, 1963 - 1998



**Comparaison de la localisation des grandes agglomérations et des tremblements de terre dans le monde.** On constate des grands centres urbains très exposés, essentiellement le long du Pacifique, en Europe du Sud et en Asie du Sud-Est.



**Evolution de la population urbaine par continent.** Depuis 1960, la population urbaine ne cesse d’augmenter au détriment de la population rurale, avec une prévision à 2030 qui suit cette tendance.



Exemple d’une nouvelle urbanisation exposée



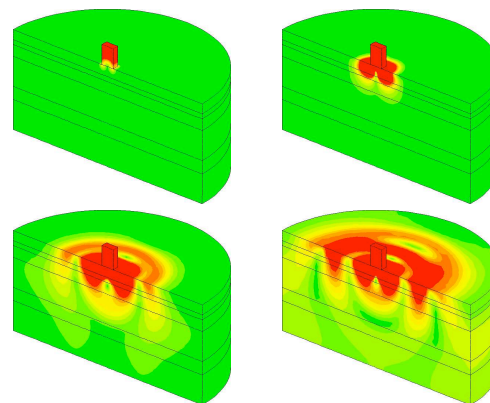
## LES INGRÉDIENTS DE LA SISMOLOGIE URBAINE

La sismologie urbaine consiste à s'intéresser simultanément à la définition de l'aléa local, à la réponse et au comportement des structures sous séismes mais également à la particularité du champ d'onde que l'on peut observer en zone urbaine. Finalement, on s'intéressera à la sismologie urbaine afin de pouvoir comprendre la répartition des dommages sismiques en milieu urbain, qui dans certains cas peut montrer des variations latérales importantes, sur de courtes distances, mais aussi faire apparaître des endommagements très localisés dans les structures. Comprendre ces observations nécessite d'intégrer l'ensemble du milieu urbain, depuis le mouvement du sol jusqu'à la réponse de la ville.

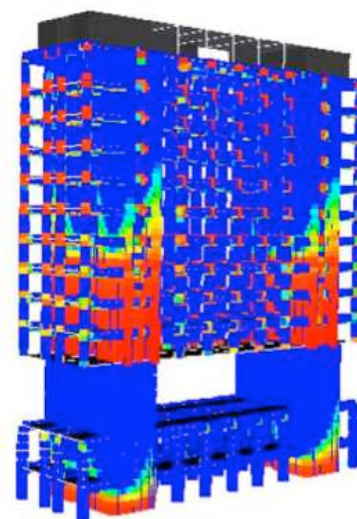
**Les conditions locales.** L'analyse du champ d'ondes sismiques en milieu urbain a montré l'importance des formations sédimentaires de surface sur le mouvement sismique. On sait en particulier depuis 1985 et le fameux séisme de Michoacan (Mexique) les conséquences que peuvent entraîner des formations très molles et des remplissages sédimentaires à géométrie complexe (2D ou 3D) sur le mouvement du sol. Malheureusement, des effets de site de nature géologique s'observent dans la plupart des villes situées en zones sismiques, car les villes se sont construites pour des raisons historiques sur des terres cultivables, à proximité de cours d'eau ayant déposés des sédiments.

**Effet Site-Ville.** Tandis que le risque sismique consiste bien souvent à aborder séparément l'aléa et la vulnérabilité, il est légitime de se demander si l'urbain peut modifier, perturber voir contaminer le mouvement sismique incident. On sait bien qu'une onde sismique est sensible à toutes les hétérogénéités qu'elle rencontre, surtout quand celles-ci possèdent des propriétés très différentes de l'environnement où elles se trouvent. Pourquoi ne pas alors considérer les bâtiments comme des points rigides et oscillants, perturbant le champ d'onde en milieu urbain? Cette question est d'autant plus pertinente en présence d'un habitat dense et massif, ce qui à l'aube du XXI<sup>ème</sup> siècle semble être l'évolution majeure des grandes concentrations urbaines.

**La qualité du bâti sismique.** Des époques de construction différentes, des techniques et des matériaux qui évoluent, des dispositions architecturales qui transforment le gabarit des édifices font que l'environnement urbain est très hétéroclite. La réponse urbaine va donc varier d'un point à l'autre de la ville. En conséquence, la nécessité – particulièrement dans notre "vieille Europe" – de traiter le problème de l'existant, conduit à proposer des méthodes d'analyse de la vulnérabilité à l'aide de méthodes adaptées au contexte sismologique. Les méthodes classiques empiriques sont limitées et de nouvelles méthodes se développent, expérimentales et s'appuyant sur la recherche des caractéristiques dynamiques d'un bâtiment.



**Exemple d'interaction Site-Ville.** La vibration d'un bâtiment génère des ondes qui se propagent dans le sol.



**Exemple de simulation de l'endommagement de l'Hôtel de Ville de Grenoble.** La modélisation réalisée par le laboratoire 3SR de Grenoble montre l'endommagement de la structure (zones rouges) lors d'un séisme fort survenant à Grenoble.

*"Extreme catastrophes have been rare only because the exposure of modern megacities to earthquake hazard has been relatively short (#50 years): an increase in the number of such catastrophes now seems to be inevitable."*

Jackson, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2006

## EN SAVOIR PLUS.

Coburn A. and R. Spence. 2002. Earthquake protection. John Wiley and Sons, Ltd

Guéguen, P. 2009. Habilitation à diriger les recherches, Université Joseph Fourier.

## LES GRANDES CATASTROPHES SISMIQUES SONT À VENIR.

L'augmentation des populations dans des noyaux urbains de plus en plus grands, exposés aux séismes et constitués d'un habitat hétérogène de qualité très variable sont les ingrédients qui positionnent le milieu urbain parmi les éléments les plus critiques de la chaîne du risque sismique. En effet, et les relations dommages physiques/pertes en vies humaines le montrent bien, il y a une forte corrélation entre le nombre de constructions endommagées après un séisme et celui des victimes. Comme le mentionne Jackson, la période de retour des méga tremblements est tellement longue que les mégalo-poles, dans leur configuration actuelle, n'ont pas encore subi ces tremblements de terre, laissant craindre des catastrophes à venir.