

20 idées reçues sur le **RISQUE SISMIQUE**





EDITO

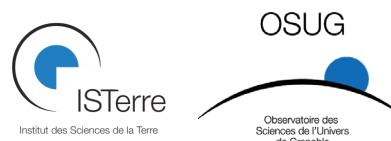
Les tremblements de terre en France sont rares mais parfois, des secousses telluriques viennent rappeler aux populations et aux autorités que la France est bel et bien un pays sismique. Quelques événements sont ainsi ressentis chaque année, qui déclenchent systématiquement une série de questions quant à leur origine et au risque sismique auquel la France est exposée.

Ces documents, rédigés de façon à approfondir certaines idées reçues sur la réalité du risque sismique en France, s'inscrivent dans les priorités définies par le Cadre d'actions de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015-2030 adopté lors de la conférence mondiale de l'ONU en 2015. Ces fiches tentent ainsi d'apporter un panorama le plus complet possible des connaissances actuelles des phénomènes sismiques afin d'améliorer les connaissances des représentants des pouvoirs publics à tous les niveaux, de la société civile, des scolaires, des collectivités et des bénévoles, ainsi que du secteur privé.

Les tremblements de terre sont, à l'origine, des phénomènes naturels qui engendrent des processus complexes. Ces fiches simplifient volontairement certaines notions relatives à des processus complexes liés aux déclenchements des tremblements de terre, à la propagation des ondes et aux conséquences sur les environnements urbains, les infrastructures et les populations. Il est illusoire de vouloir détailler toutes les notions auxquelles ils se réfèrent tout en souhaitant proposer un document compréhensible par le plus grand nombre sans dénaturer le propos scientifique. Par conséquent, certaines notions et vocabulaires apparaîtront peut-être ici trop compliqués mais les références et les renvois vers des ressources documentaires plus complètes permettront aux lecteurs d'enrichir et d'approfondir leur connaissance.

Les fiches, organisées en 20 idées reçues, replacent également le phénomène physique dans les processus administratifs de réduction du risque sismique en France. Elles restent un support facile à manipuler et à diffuser, et apportent un support pédagogique pour lutter contre certaines informations fausses ou approximatives relayées parfois.

Ces documents s'appuient sur les résultats des recherches, des expériences et des observations menées à l'Institut des Sciences de la Terre de Grenoble (ISTerre), une unité membre de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble (OSUG).



ISTerre est une unité mixte de recherche de l'Université Grenoble Alpes, du Centre National de la Recherche Scientifique, de l'Université Savoie Mont-Blanc, de l'Institut de Recherche pour le Développement et de l'Université Gustave Eiffel.



Ces documents ont été réalisés avec le soutien de la Fondation MAIF et du Programme Interrégional du Massif des Alpes (POIA-FEDER).



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES





TABLE DES MATIÈRES

Idée reçue n°1. LA SISMOLOGIE... ON A DÉJÀ TOUT DÉCOUVERT !

Histoire de la sismologie..... 1

Idée reçue n°2. LES SÉISMES NE SONT PAS IMPORTANTS PAR RAPPORT AUX AUTRES CATASTROPHES NATURELLES

Conséquences et pertes 3

Idée reçue n°3. IL N'Y A PAS DE RISQUE DE SÉISMES DESTRUCTUEURS EN FRANCE

Intensité macroseismique 5

Idée reçue n°4. L'ÉCHELLE DE MAGNITUDE DE RICHTER CONTIENT 10 NIVEAUX

Magnitude et séismes 7

Idée reçue n°5. LES SÉISMES NE FONT PAS DE BRUIT

Ondes et surveillance sismologique 9

Idée reçue n°6. IL N'Y A PAS DE SÉISMES À CRAINdre À GRENOBLE

Risque sismique en Rhônes-Alpes..... 11

Idée reçue n°7. LES ALPES NE SE DÉFORMENT PAS

Tectonique et cycle sismique..... 13

Idée reçue n°8. ON NE PEUT RIEN FAIRE FACE AUX SÉISMES

La réglementation parasismique..... 15

Idée reçue n°9. LES SÉISMES DESTRUCTEURS SE PRODUISENT TOUS LES 475 ANS

Zonage sismique de la France..... 17

Idée reçue n°10. LES CONSTRUCTIONS EN BÉTON ARMÉ RÉSISTENT MIEUX AUX SÉISMES

Conception parasismique..... 19

Idée reçue n°11. CONSTRUIRE PARASISMIQUE, C'EST AU MOINS 10% DE SURCOÛT

Le coût de la construction..... 21

Idée reçue n°12. ON NE PEUT PAS PRÉDIRE L'IMPACT D'UN SÉISME SUR DES CONSTRUCTONS

Vulnérabilité sismique du bâti-existant..... 23

Idée reçue n°13. SUR UN ROCHER, LES VIBRATIONS SONT PLUS FORTES QUE SUR LES SÉDIMENTS

Effets de site..... 25

Idée reçue n°14. UNE FOIS LE SÉISME PASSÉ, ON NE CRAINT PLUS RIEN

Les répliques..... 27

Idée reçue n°15. L'HOMME NE PEUT PAS CRÉER DE SÉISMES

La sismicité induite..... 29

Idée reçue n°16. UN SÉISME NE SE PRODUIT PAS SI DES PETITS SÉISMES ONT LIEU AVANT

Les essaims sismiques..... 31

Idée reçue n°17. ON NE PEUT PAS ANTICIPER UN SÉISME

Alerte précoce 33

Idée reçue n°18. LES SÉISMES SONT IMPRÉVISIBLES: PERSONNE N'EST RESPONSABLE

Droit et responsabilité..... 35

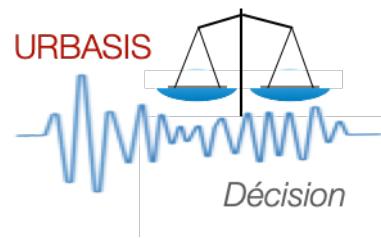
Idée reçue n°19. EN CAS DE SÉISME, C'EST MON ASSUREUR QUI ME REMBOURSERA

La protection des biens et des personnes..... 37

Idée reçue n°20. LES GRANDES CATASTROPHES SONT DERRIÈRE NOUS

Sismologie urbaine..... 39

CE DOCUMENT A ÉTÉ RÉALISÉ DANS LE CADRE DU PROJET SISM@ALP-SWARM ET URBASIS-DÉCISION





HISTOIRE DE LA SISMOLOGIE

Depuis son apparition sur Terre, l'homme subit les tremblements de terre. La compréhension des mécanismes à l'origine de ces séismes est le résultat d'un long processus de réflexion qui a abouti, au début des années 1960, à établir le lien entre les observations de surface et les processus internes.

La relation entre la tectonique des plaques et les tremblements de terre est alors confirmée.



A L'ORIGINE... AU BORD DE LA MÉDITERRANÉE

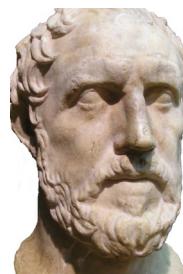
Tout commence au bord de la Méditerranée où des philosophes s'interrogèrent sur le fonctionnement de la Terre et cherchèrent tout particulièrement à expliquer les observations de phénomènes naturels en lien avec la terre et le ciel.

De nombreux séismes frappent alors la région, comme en -490 et -430. En -426 un séisme frappe la Grèce entraînant, selon **Thucydide**, un tsunami. Plus tard, en -227 la ville de Rhodes fut ébranlée par un séisme qui renversa la statue du colosse. A cette époque, et Platon le confirme, la Terre est ronde, et elle est en partie creuse. Aristote, dans son traité des Météorologiques, associe une origine commune aux vents et aux séismes.

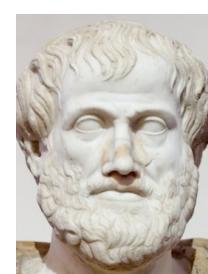
Après observation de la vapeur humide, il considère que les vents, et par là même les séismes, sont dus à l'existence d'une émanation sèche qu'il nomme **Pneuma** (du latin *pneuma* « souffle »).

Cette émanation, générée en grande quantité, résulte d'une production de chaleur interne ou externe (due au soleil).

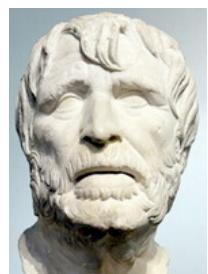
Lorsque le **Pneuma** sort, les vents sont produits. Quand il est empêché, il s'accumule dans la terre et provoque des tremblements de terre. Quelques années plus tard, **Sénèque** reprend cette théorie en l'associant à la vapeur humide en expliquant que *“nous voyons l'eau bouillonner sur le feu [...] Alors la vapeur de ces eaux bouillonnantes secoue vivement tout ce qu'elle frappe”*. Cette théorie, avec l'idée que l'on se faisait alors de la structure interne de la Terre, va traverser les âges et évoluer faiblement jusqu'au XIX^{ème} siècle.



Thucydide



Aristote



Sénèque



DES BLOCAGES.... DES AVANCÉES MAIS LE PNEUMA PERSISTE !

Au Moyen Âge, période au cours de laquelle les explications rationnelles des phénomènes naturels sont rares de peur d'être taxées d'hérésie, le **Pneuma** sera repris sans grandes évolutions.

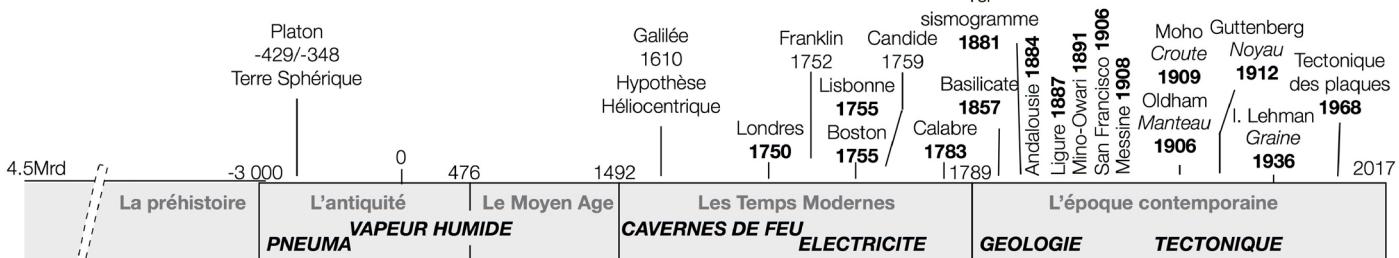
C'est à partir des XVI^{ème} et XVII^{ème} siècles que certains, comme le philosophe **Pierre Gassendi**, analysant la théorie de Sénèque, se demandent comment des vents pourraient ébranler de si grandes montagnes. Selon lui, ce sont bien des gaz et des feux internes dans des cavernes situées à proximité de la surface qui génèrent ces tremblements de terre. La Terre reste creuse et cette variante a le mérite d'expliquer le lien entre séismes et volcans.

Cette théorie sera reprise par **Emmanuel Kant** en 1755 après le séisme de Lisbonne pour expliquer que *“les tremblements de terre nous révèlent que, vers la surface, la*

terre est creusée de cavernes [...] Les cavités contiennent toutes un feu ardent, ou du moins une matière combustible qui n'a besoin que d'une légère stimulation pour faire rage avec furie alement et ébranler [...] le sol au-dessus”.

Nous sommes au milieu du XVIII^{ème} siècle quand l'électricité devient à la mode : elle devient à l'origine de processus naturels, dont les séismes. Cependant, la connaissance de l'électricité évolue vite et cette théorie ne survivra pas au XVIII^{ème} siècle.

Quant à elles, les théories basées sur le **Pneuma** et la présence de cavernes persistent : comme le résume en 1888 le minéralogiste **Auguste Daubrée**, les tremblements de terre semblent générés par des éruptions volcaniques qui ne peuvent atteindre la surface ou par la vapeur d'eau accumulée sous terre.



RELIGIONS, MYTHES ET CROYANCES PERSISTENT JUSQU'AU XX^{ÈME}

Des mythes ont servi également à expliquer les raisons des séismes : un grand dragon frémissant dans les profondeurs pour les Chinois, un poisson-chat bondissant et supportant l'archipel nippon pour les Japonais, un chien de traîneau supportant la Terre et se grattant le dos en Sibérie etc... Au cours de l'Histoire, les séismes sont parfois attribués à la météo ou encore à des interventions divines. Encore récemment, il arrive que les explications scientifiques soient éclipsées par des discours religieux qui établissent un lien entre péchés et tremblements de terre, comme en 2003 à Boumerdes (Algérie) et en 2010 à Haïti.

SÉISMES ET GÉOLOGIE

Dès 1783, **Deodat Dolomieu** et **Robert Mallet**, commencent à s'intéresser à l'aspect géologique des séismes, l'un sur le séisme de Calabre, l'autre sur celui de Basilicata. Une série de séismes, survenant dans des zones très peuplées, frappe les esprits de l'époque : en 1884 en Andalousie, en 1887 dans le Golf de Gêne, en 1906 à San Francisco, en 1891 au Japon. Concernant ce dernier séisme, le sismologue japonais Bunjiro Koto identifia pour la première fois la faille impliquée lors de l'incident.

Harry Reid observa aussi la faille à l'origine du séisme de San Francisco de 1906, et proposa la théorie innovante du rebond élastique, encore d'actualité.

...MOUVEMENT DES PLAQUES ET INTÉRIEUR DE LA TERRE

Cependant, les sciences de la Terre restent toujours dominées par la théorie fixiste qui stipule que la surface terrestre est immuable. Quelques idées mobilistes (la surface terrestre est en mouvement, les continents sont mobiles) sont pourtant apparues au XVI^{ème} siècle, sous l'impulsion de géographes/navigateurs qui constatèrent des similitudes de part et d'autre des océans. La théorie fixiste reste dominante au XIX^{ème} et seuls des déplacements terrestres verticaux sont admis.

En 1908, **Franck Taylor** expose devant la société américaine de géologie son hypothèse de la dérive des continents, expliquant la création des chaînes de montagnes le long des côtes américaines par un effet de collision.

Reprise par **Alfred Wegener** en 1912, cette théorie ne reçut que peu d'échos positifs car les hypothèses invoquées n'étaient ni scientifiquement étayées ni convaincantes. À cette époque l'intérieur de la Terre reste méconnu et le scepticisme des scientifiques pour des mouvements terrestres horizontaux doit être levé par des arguments solides.

A la fin du XIX^{ème} début du XX^{ème} la structure de la Terre, telle que proposée par **Édouard A Roche** (1881), par **Emil Wiechert** (1897) et enfin **Eduard Suess** (1909), est composée d'un noyau et d'une enveloppe. Ce modèle incomplet servira de base à un moment crucial des sciences de la Terre : **l'apparition de la sismologie**.

...ET LA SISMOLOGIE APPARUE ENFIN: STRUCTURE INTERNE, TECTONIQUE DES PLAQUES ET SÉISMES

En 1889 à **Potsdam** en Allemagne, les vibrations du sol provoquées par un séisme japonais sont enregistrées pour la première fois. C'est le début de la sismologie moderne.

À cette époque, les instruments (sismomètres) se développent et on commence à enregistrer et à interpréter les ondes sismiques qui se propagent.

Grâce à cela, en 1906 le **manteau** est découvert par Richard Oldha, en 1909 la **discontinuité entre la croûte et le manteau** par **Mohorovic**, en 1912 le **noyau interne** et la **discontinuité manteau-noyau** par **Gutenberg**, en 1936 le **noyau interne** par Inge Lehmann... et en 1940, on peut dire que les grandes enveloppes de la Terre sont connues.

Elles seront affinées par la suite mais l'existence de ce manteau visqueux permet à Arthur Holmes en 1945 de proposer l'hypothèse de cellules de convection dans le manteau comme moteur possible des déplacements horizontaux des continents.

En 1962, Harry Hesse publie un article qui, s'appuyant sur de nouvelles observations scientifiques, comme la présence des fosses océaniques, les flux de chaleur et l'âge du

fond océanique, propose l'expansion des fonds océaniques comme modèle de la tectonique des plaques.

La tectonique des plaques est définitivement adoptée en 1968 grâce à Jack Oliver et Brian Isacks qui publient un article dont le titre évocateur est "Sismologie et la nouvelle tectonique": ils parviennent à expliquer la sismicité sur tout le globe terrestre par le modèle de la tectonique des plaques. La majorité scientifique est ainsi convaincue et la théorie fixiste est rejetée.

LA SISMOLOGIE EST UNE SCIENCE ANCIENNE. Mais le siècle qui s'est achevé a vu de nombreuses avancées sur l'origine des tremblements de terre. On constate que ces progrès n'ont été possibles qu'avec l'avènement de la sismologie instrumentale. Il reste encore de nombreuses découvertes à faire, la plus importante étant certainement la prédition des séismes. Le chemin est encore long et en attendant, se protéger des séismes passe par une meilleure définition de l'aléa sismique ... uniquement rendue possible grâce aux découvertes passées.



CONSÉQUENCES ET PERTES

La décennie passée a été marquée par des phénomènes naturels majeurs. Ces catastrophes génèrent des coûts considérables, qu'il s'agisse d'événements hydrologiques ou atmosphériques, ou encore ceux moins fréquents, de nature géologique. En analysant les événements du passé, on constate que les séismes sont les catastrophes naturelles qui ont provoqué le plus de victimes et de pertes économiques ces dernières années. Ce bilan est lié à l'accroissement et à la concentration des populations et des richesses dans des zones urbaines de plus en plus importantes.

LE COÛT DES CATASTROPHES NATURELLES

Au cours de la deuxième moitié du vingtième siècle, le coût global des catastrophes a augmenté d'un facteur 15 jusqu'à atteindre durant la décennie 90 des pertes économiques de l'ordre de **66 milliards de dollars par an**.

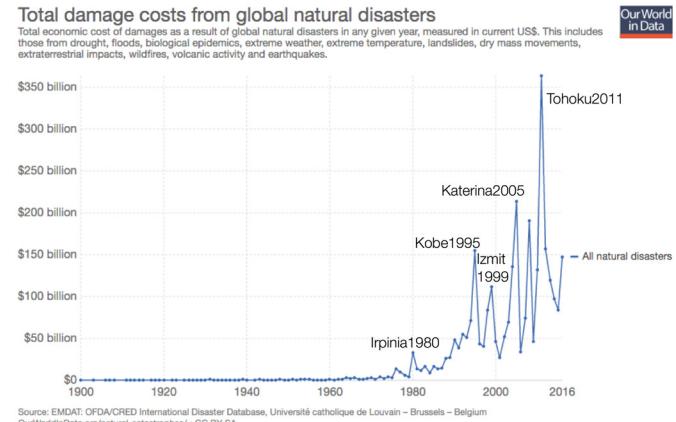
Parmi ces phénomènes, on distingue ceux provoquant des désastres : ces événements sont peu fréquents mais ils ont des conséquences considérables sur le bien-être des populations, sur l'environnement, les institutions et l'équilibre financier d'une région.

La prédisposition d'une région à subir un désastre naturel peu fréquent est mesurée par la capacité de l'événement à générer des pertes supérieures à 1% du Produit National Brut (PIB), entraînant par conséquent une résilience économique lente et difficile.

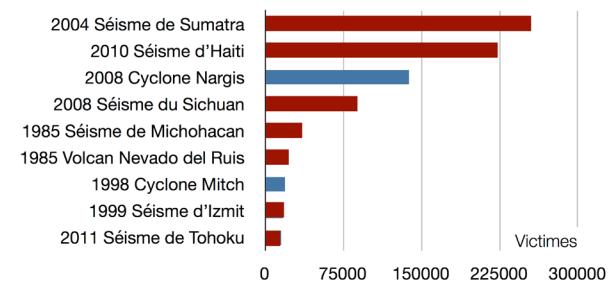
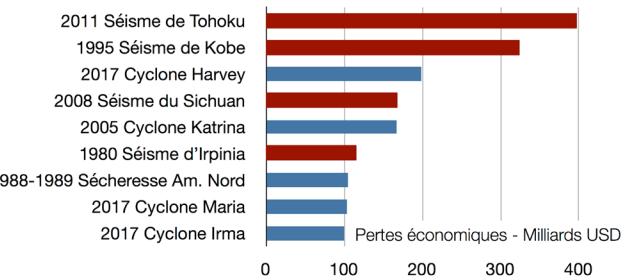
Selon cette définition, **les phénomènes géologiques** se distinguent des autres aléas naturels : entre 1980 et 2016, ils représentent environ **15% des catastrophes naturelles mondiales** mais sont responsables de la moitié des pertes économiques et de 80% des victimes.

Ces chiffres sont directement corrélés à l'aléa sismique et à la vulnérabilité des constructions, puisque la plupart des variables considérées (victimes, pertes économiques...) sont directement fonction de l'importance des dommages. Par exemple, en 1995 le séisme de Kobé frappa le Japon, provoquant une perte économique record à l'époque de 178 milliards de dollars, soit l'équivalent de 0,7% du PIB.

Face à la période de retour des grands séismes, James Jackson, professeur de sismologie à Cambridge (Angleterre) n'hésite pas à affirmer que les grandes catastrophes sont à venir, et des simulations récentes expliquent qu'au rythme d'expansion de l'urbanisation actuelle, les victimes des tremblements de terre pourraient atteindre **2,8 millions en 2100**.



Pertes économiques (en \$US 2017) provoquées par les dommages produits par les catastrophes naturelles (1900-2016) - Source EMDAT International Disaster Database.



Pertes économiques et victimes des dernières catastrophes naturelles - Source EMDAT International Disaster Database.

→ DES CONSÉQUENCES VARIABLES EN FONCTION DU PAYS

L'urbanisation rapide amplifie également les risques de désastres par une combinaison complexe de **concentration démographique, d'exclusion sociale et de pauvreté, accompagnée d'une méconnaissance du risque**. L'urbanisation rapide se fait au détriment de la qualité des infrastructures, créant ainsi un accroissement de la vulnérabilité physique des constructions qui est à l'origine de la plupart des pertes humaines et des dégâts matériels. Cette pression entraîne alors une exploitation inadaptée des espaces, un faible respect des règles et des bonnes pratiques permettant de minimiser les dommages et les dysfonctionnements, et de maigres possibilités de transférer ou de répartir les risques.

Ce dernier point est certainement celui qui limite la résilience d'un pays. On constate en effet que **la concentration des pouvoirs économiques et politiques dans une seule mégapole réduit la capacité de réaction du pays à un désastre naturel**. Cela a été le cas pour Haïti et Katmandou et pourrait le devenir pour des villes telles que Quito (Équateur), Lima (Pérou) ou Téhéran (Iran), autant de régions pour lesquelles des **séismes majeurs sont à craindre**.

L'inégalité des pays et des peuples face à cette menace se traduit par des conséquences humaines plus faibles dans les pays développés et par des conséquences économiques plus faibles dans les pays moins développés.

Par ailleurs, les pertes économiques dépendent bien évidemment de l'amplitude et de la sévérité des vibrations sismiques mais aussi de la qualité de la construction et de l'investissement financier consenti (englobant les efforts directs pour concevoir des structures parasismiques mais également les efforts indirects portant sur la connaissance de l'aléa sismique).

→ SE DOTER D'OUTILS DE SIMULATION

Une étude récente menée sur les séismes du bassin méditerranéen a fourni une compilation de données et de modèles pour **estimer les impacts économiques et humains des tremblements de terre**.

Les tremblements de terre sont des événements complexes et rares, et les informations post-séismes doivent être soigneusement examinées avant que les modèles puissent être développés.

De nouvelles sources de données caractérisant le bâti (télédétection, recensement national), couplées à des algorithmes d'intelligence artificielle, promettent de nouvelles perspectives de **prédition des dommages sismiques**, via des méthodes pertinentes et économiquement supportables. Des efforts doivent aussi être déployés pour étudier d'autres variables prédictives afin de modéliser les conséquences globales d'un séisme (impact sanitaire, psychologique, etc.).

Ces modélisations pourraient permettre de simuler, via des arbres de décision, le bénéfice de certaines décisions politiques prises pour atténuer les conséquences des séismes.

Cyclones et tempêtes - 66 % des événements

Inondations - 13 %

Séismes et Volcans - 12 %

Sécheresse - 9 %

Séismes et Volcans - 47 % des pertes

Cyclones et tempêtes - 42 %

Inondations - 4 %

Sécheresse - 7 %

Séismes et Volcans - 78 % des victimes

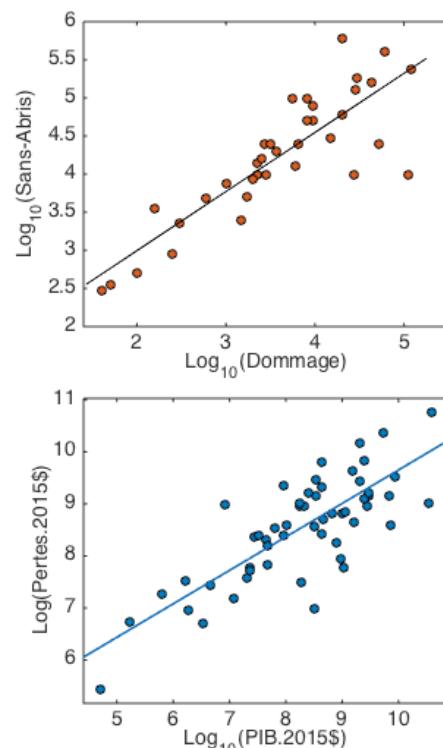
Cyclones et tempêtes - 21 %

Inondations - 0 %

Sécheresse - 1 %

Comparaison des conséquences par type d'aléa naturel.

Source EMDAT International Disaster Database.



Exemple de relations entre variables décisionnelles et données caractérisant la région impactée et les dommages sismiques

- D'après Guettiche et al., International Journal of Disaster Risk Science 2017

SELON R. BRAUMAN (ancien président de médecins sans frontières), et d'un point de vue purement médical, donné par un acteur des situations d'urgence qui se base sur son expérience de ces dernières années, un désastre naturel est en premier un séisme, et en deuxième un événement climatique se produisant à proximité d'une zone à forte population.

Même si les politiques publiques portent de plus en plus leur attention vers les phénomènes liés au changement climatique global, les séismes restent pour l'instant les événements naturels les plus à même de provoquer des désastres.

À la différence des inondations ou tempêtes qui verront certainement leur nombre et leur taille augmenter dans les années à venir, c'est maintenant que les séismes provoquent des désastres considérables.

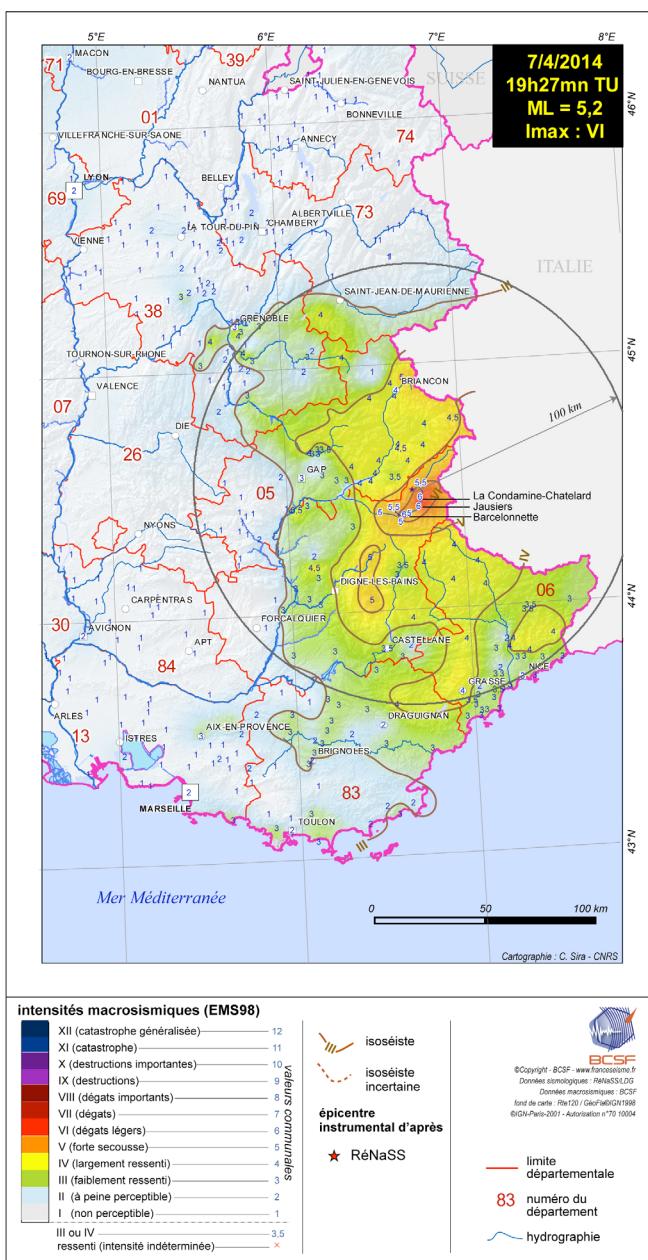


INTENSITÉ MACROSMIQUE

L'analyse de la sismicité historique montre que des séismes importants se sont produits en France, 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 les classer en fonction de leur intensité macrosmique.



HISTORIQUE DES ÉCHELLES D'INTENSITÉ



Carte d'iso-intensité établie par le Bureau Central Sismologique Français suite au séisme du 7 Avril 2014 (Ubaye). Intensité VI (Source BCSF)

La magnitude et l'intensité sont deux paramètres qui permettent de caractériser un séisme.

La magnitude est mesurée grâce à des sismomètres tandis que l'intensité d'un séisme est évaluée par le biais de son impact sur les biens ou les personnes en un lieu donné. Le ressenti par les personnes ainsi que la quantité et la nature des dommages observés permettent de classer l'intensité d'un séisme selon une échelle dite **échelle macrosmique**.

Cette échelle est généralement utilisée afin de classer les effets du séisme et ainsi définir, au sein d'une région, des contours d'égale intensité sismique, 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, à l'orientation de la faille et à son mécanisme de rupture) peuvent dans certains cas créer des anomalies dans les cartes macro-sismiques.

Pour un séisme donné, on donne souvent uniquement la valeur de l'intensité à l'épicentre (généralement la plus forte valeur) : c'est l'intensité épcentrale.

Les échelles d'intensité permettent aussi de relier les séismes du passé à ceux du présent. En effet, pour les plus anciens d'entre eux, certains documents historiques écrits suite à un tremblement de terre permettent de quantifier la sismicité passée. Ces données sont indispensables à l'élaboration d'une étude de risque sismique ou d'une carte définissant l'aléa sismique.

Puisque l'intensité se base sur l'observation des effets d'un séisme, il existe plusieurs façons de la mesurer. Parmi les plus couramment utilisées, on peut citer celles de **Mercalli (1902)** et **MSK (1964)**.

En 1998, une nouvelle échelle d'intensité macrosmique a été établie pour l'Europe : c'est l'**Échelle Européenne Macrosmique EMS98**.

Afin de définir l'intensité en fonction de l'effet sur les constructions, l'échelle EMS98 a puisé dans les observations faites après des séismes européens majeurs. Puisque la qualité des constructions varie d'une région européenne à l'autre, et dans un souci d'homogénéisation, les effets observés ont été pondérés en fonction de la **qualité de la construction**. À la différence des autres échelles, il est donc possible de relier directement l'intensité macrosmique EMS98 à une mesure du mouvement du sol.

Exemples de description des niveaux d'intensité EMS98

INTENSITÉ V – FORT:

- Dégâts de **degré 1** de quelques bâtiments de classes de **vulnérabilité A et B**.

INTENSITÉ VII – DÉGÂTS:

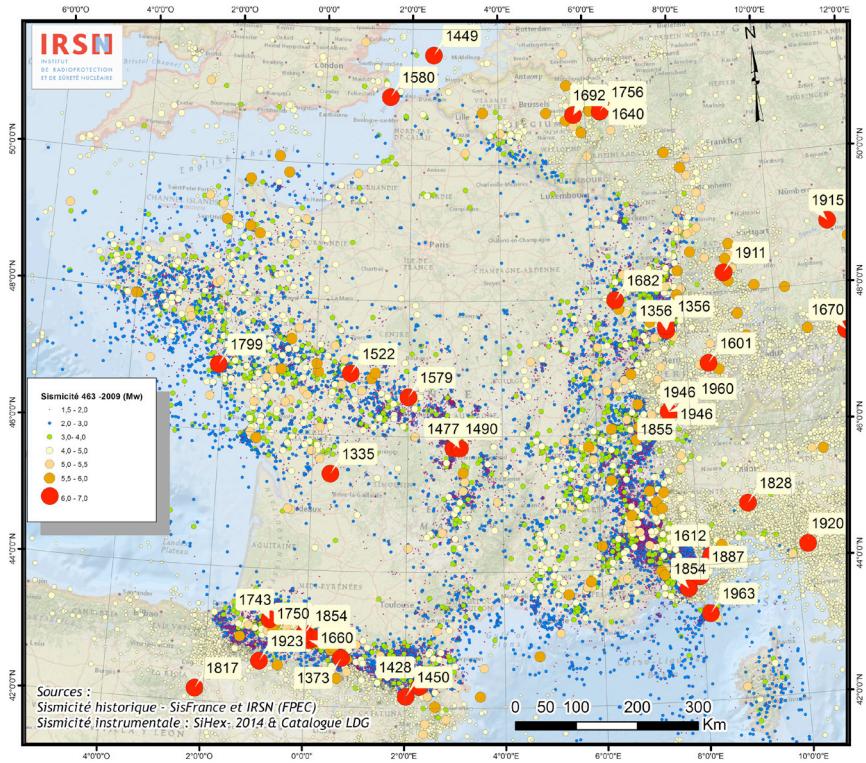
- De nombreux bâtiments de la classe de **vulnérabilité A** subissent des dégâts de **degré 3**, quelques uns de **degré 4**.
- De nombreux bâtiments de la classe de **vulnérabilité B** subissent des dégâts de **degré 2**, quelques uns de **degré 3**.
- Quelques bâtiments de la classe de **vulnérabilité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

INTENSITÉ 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 XI – CATASTROPHE

- La plupart des bâtiments de la classe de **vulnérabilité A et B** subissent des dégâts de **degré 5**.
- La plupart des 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 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**.



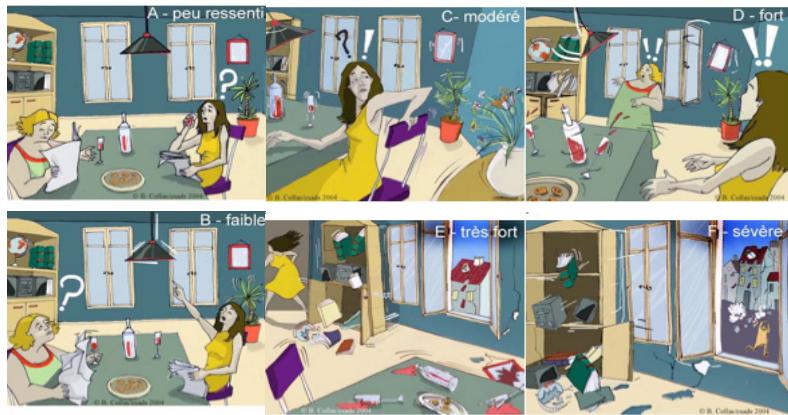
Carte des séismes historiques de France. 1000 ans de sismicité historique en France. La base de données SISFRANCE (<https://sisfrance.irsn.fr/>) recense les séismes historiques et récents en fonction de leur intensité (d'après IRSN)



ENQUÊTES INTERNET : UNE ESTIMATION TOUJOURS PLUS RAPIDE

S'appuyant sur les nouvelles technologies et les outils mobiles de communication, des questionnaires en ligne sont de plus en plus utilisés afin de collecter de l'information sur le ressenti de la population, immédiatement après un séisme. Ces informations, essentielles pour alerter les autorités, apportent une estimation rapide et géolocalisée de l'importance des secousses. Ce dispositif, très complémentaire de l'estimation des magnitudes, privilégie la rapidité de la collecte d'informations et compte sur le nombre des témoignages pour arriver à une estimation pertinente de l'intensité macroseismique.

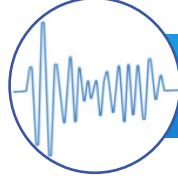
Ces dernières années, les améliorations apportées sur l'interprétation et la fiabilité des informations permettent de renforcer l'efficacité de cette méthode d'estimation.



Exemple de vignettes aidant les témoins à caractériser le ressenti de la secousse, associé à une intensité pour établir des cartes rapides de sévérité (Source BCSF).

IL Y A DES SÉISMES POUVANT PROVOQUER DES VICTIMES EN FRANCE. Un séisme historique majeur a eu lieu à Lambesc au XX^e 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 recensées.

Ce séisme se reproduisant en 2020 provoquerait des dommages et un nombre de victimes comparable à celui observé en Italie pour des séismes récents (environ 400 bâtiments endommagés et 300 victimes). D'autres séismes historiques référencés en France permettent d'affirmer que d'autres se produiront dans le futur.



MAGNITUDE ET SÉISMES

On entend souvent «... le séisme de magnitude 7 sur l'échelle de Richter qui en compte 10... » En réalité, la plus grosse magnitude jamais mesurée l'a été au Chili en 1960 et atteignait 9,5. Même si cela n'a pas été le cas pour l'instant, il n'est pas exclu que des magnitudes plus importantes soient possibles, en fonction de la dimension de la faille impliquée.



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. 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, quel que soit le séisme, forment des droites parallèles les unes aux autres.

Le fait que des séismes de tailles différentes produisent des droites parallèles suggère qu'il est possible de caractériser la taille d'un séisme par un nombre simple.



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



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

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.

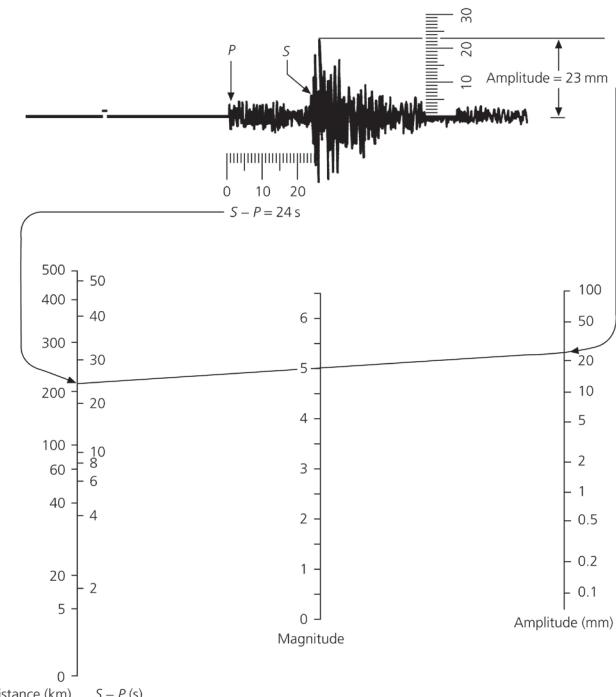
En utilisant les données du réseau californien de l'époque, il constate une relation entre l'atténuation des mouvements du sol et la distance.

Il propose alors une échelle de magnitude, dite échelle de Richter. Il définit la magnitude 3 comme étant une référence qui est caractérisée par un déplacement de 1 millimètre sur un sismomètre situé à 100 km de l'épicentre du séisme.

Cependant, pour établir cette relation, il n'a utilisé qu'un instrument de mesure (**un sismomètre de type Wood-Anderson**), il s'est uniquement concentré sur des séismes de type californien qui possèdent des caractéristiques qui leur sont propres.

C'est pourquoi l'échelle de Richter doit être adaptée à d'autres régions du monde et pour d'autres données. Les différents mécanismes à l'origine des séismes, les instruments utilisés pour l'enregistrement des données et l'effet de la distance sur l'atténuation des ondes sismiques sont des éléments qui doivent être pris en compte.

Cette échelle n'est également valable que pour des données collectées à courte distance. C'est pourquoi, cette relation, initialement nommée « Echelle de Richter » est désormais appelée **magnitude locale M_L** . Il n'est pas rare que des organismes apportent des valeurs de M_L différentes pour un même séisme. Ces valeurs vont en effet dépendre des données utilisées et de l'approche méthodologique appliquée. 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.



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 - Perrier at Madariaga, Les tremblements de terre, 1991

Il n'en reste pas moins que Richter posa à l'époque le principe de la magnitude. Depuis, de nouvelles définitions ont été proposées, pour caractériser tous les événements sismiques, quelle que soit la région du monde et quels que soient les instruments d'enregistrement utilisés. Par ailleurs ces derniers ont considérablement évolué depuis 1935, de façon à estimer physiquement, et non plus empiriquement, l'amplitude d'un séisme.

LES DIFFÉRENTS TYPES DE MAGNITUDES

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

La magnitude M_s s'apparente à la magnitude locale, à l'exception près que M_s n'est déterminée que par **les ondes de surface** qui sont enregistrées par le sismomètre. 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 coulissement 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.

Ces ondes, moins rapides que d'autres, apparaissent tardivement sur les sismogrammes, si bien qu'elles **ne peuvent pas être utilisées pour diffuser rapidement une alerte au séisme**.

La magnitude M_b , dite des **ondes de volume**, est déterminée par **les premières ondes rapides qui arrivent au sismogramme**. Ce type de magnitude permet **d'évaluer la taille d'un séisme situé à grande distance ou à grande profondeur**, comme c'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 : elles vont caractériser des observations plutôt que la taille réelle des tremblements de terre.

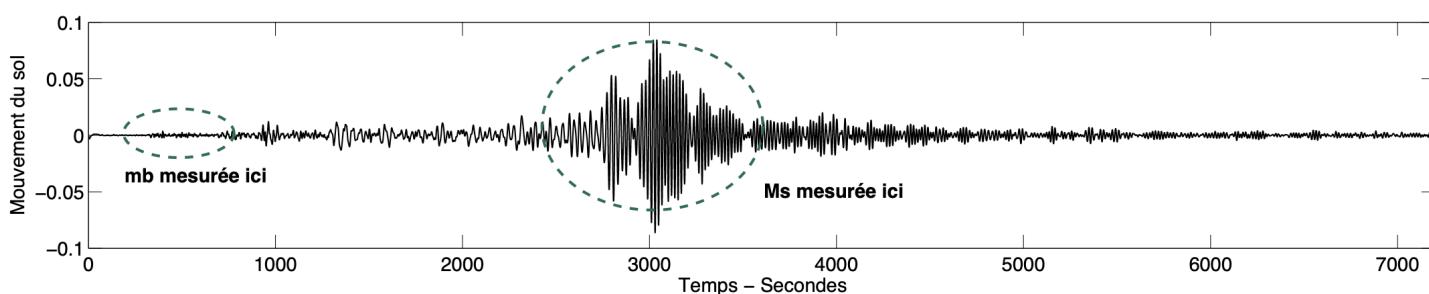
C'est pour cela qu'en 1977, Hiroo Kanamori introduit la magnitude M_w , dite magnitude de moment.

L'estimation de **la magnitude de moment M_w** repose sur la physique de la rupture, elle est **proportionnelle à l'énergie libérée lors de la rupture sismique, et donc à la taille du tremblement de terre**. Moins immédiate et évidente à calculer que les magnitudes précédentes, elle s'appuie sur des processus élaborés de traitement des sismogrammes. **C'est cette magnitude qui est mise en avant dans les médias** lorsqu'ils font état des catastrophes sismiques.

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 Tohoku au Japon de 2011 avait une magnitude M_w de 9,0.

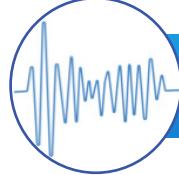
Magnitude	Longueur caractéristique de la rupture	Coulissement	Durée de la rupture	Energie dégagée
9	800 km	8 m	250 s	$E_5 = E_4 \times 30$
8	250 km	5 m	85 s	$E_4 = E_3 \times 30$
7	50 km	1 m	15 s	$E_3 = E_2 \times 30$
6	10 km	20 cm	3 s	$E_2 = E_1 \times 30$
5	3 km	5 cm	1 s	$E_2 = E_1 \times 30$
4	1 km	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 coulissement entre les deux lèvres de la faille et la durée de la rupture), des magnitudes 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).



Exemple de détermination des magnitudes M_b et M_s pour le séisme du Chili enregistré dans les Alpes.

L'ÉCHELLE DES MAGNITUDES EST UNE ÉCHELLE OUVERTE. La magnitude caractérise la taille d'un événement physique. Les différences de magnitude qui sont rapportées pour un même événement sismique sont liées à la méthode d'estimation de ladite magnitude. La magnitude de moment M_w a été établie afin de quantifier physiquement la taille d'un séisme en fonction de son énergie libérée. On peut imaginer un séisme de magnitude 10, limitée finalement par la taille de la rupture d'une faille sur plusieurs milliers de kilomètres.



ONDES ET 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 phénomènes correspondent au passage d'ondes sismiques de différentes natures, que les instruments de surveillance enregistrent.

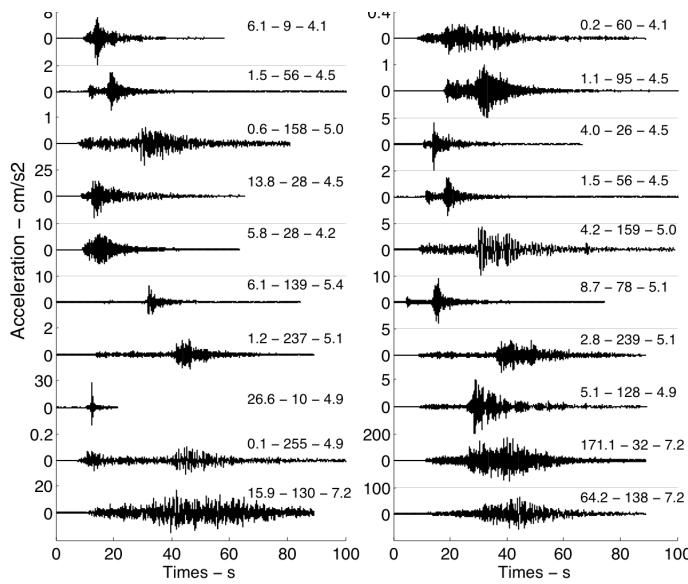


LES ONDES SISMIQUES

Concernant les tremblements de terre assez puissants pour endommager les bâtiments, les témoignages se focalisent sur l'effet des secousses sur ces infrastructures. Toutefois, quand il s'agit de séismes plus petits, les témoignages décrivent davantage la **perception du son qui précède ou accompagne la secousse**. Certains auteurs mentionnent en effet que la plupart des petits tremblements de terre produisent du bruit.

La rupture sismique, à l'origine du tremblement de terre, va libérer de l'énergie sous forme d'une multitude d'ondes sismiques. Ces ondes vont se propager différemment selon la nature du milieu. C'est notamment la vitesse de propagation des ondes qui va être déterminante par rapport aux matériaux qu'elles traversent.

Pour cette raison, enregistrer les tremblements de terre est vite devenu le fondement de la sismologie. Un séisme va rayonner des ondes dans toutes les directions : ces dernières traversent la terre avec des vitesses et des composantes de déplacement différentes.



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 chiffres représentent l'accélération variable lisible sur l'accélérogramme, la distance entre le séisme et la station d'enregistrement et la magnitude du séisme.

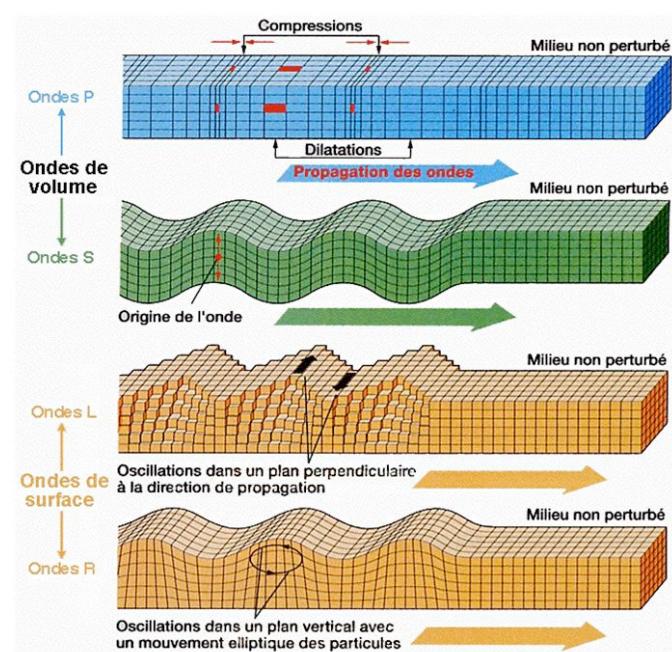
Ces données vont nous renseigner sur la structure interne de la Terre ainsi que sur la nature de la rupture sismique. On distingue en général les ondes de volume des ondes de surface.

LES ONDES DE VOLUME - Elles se propagent à l'intérieur de la Terre à grande vitesse (environ 6 km/s).

- Les **ondes de compression ou ondes primaires P** : elles sont responsables du grondement sourd qui accompagne un tremblement de terre puisqu'elles sont comparables aux ondes émises par une source sonore.
- Les **ondes secondaires S ou ondes de cisaillement** : elles sont plus lentes que les P. En mesurant la différence des temps d'arrivée 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 : Elles sont moins rapides que les ondes de volumes, elles provoquent néanmoins des amplitudes importantes.

- Les **ondes du Love** comparables aux ondes S sans le mouvement vertical.
- Les **ondes de Rayleigh** qui génèrent des mouvements complexes du sol, semblables à un objet au sein d'une vague.



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



LE BRUIT D'UN SÉISME

Certains témoignages font mention de bruits survenant lors des séismes. Ces sons, qui peuvent s'apparenter parfois à un grondement ou à une explosion, sont générés par les ondes sismiques qui rayonnent depuis la source du séisme. Les ondes générées par la rupture vont atteindre la surface où elles vont se transmettre dans l'air sous forme d'ondes sonores.



LES RÉSEAUX DE SURVEILLANCE

Plusieurs types d'instruments de surveillance sismologique existent et chaque appareil est destiné à enregistrer un type d'onde. Les principaux instruments utilisés sont les capteurs vélocimétriques courte-période, vélocimétriques large-bande et les capteurs accélémétriques.

« En la dite année 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 païs comme étant une chose icy fort extraordinaire. »

— *Témoignage lors du tremblement de la Sarthe de 1711*

« Un grand bruit comme une poche de gaz qui explosait et après on a ressenti comme une onde de choc [...] »

« J'ai cru que quelque chose avait implosé au rez-de-chaussée (bouteille de gaz) ou qu'un très gros objet s'était écrasé tout proche de la maison. »

— *Commentaires associés aux témoignages pour le séisme du 12/02/2018 à 03h08 ; Séisme à 23 km de Fontenay-le-Comte (département 85, 4h08 locale, profondeur 10km, Magnitude 4.7) selon BCSF-RENASS*

LES RÉSEAUX VÉLOCIMÉTRIQUES COURTE-PÉRIODE

Ils servent à enregistrer la **vitesse de déplacement du sol**. Ils permettent de détecter les moindres mouvements 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.

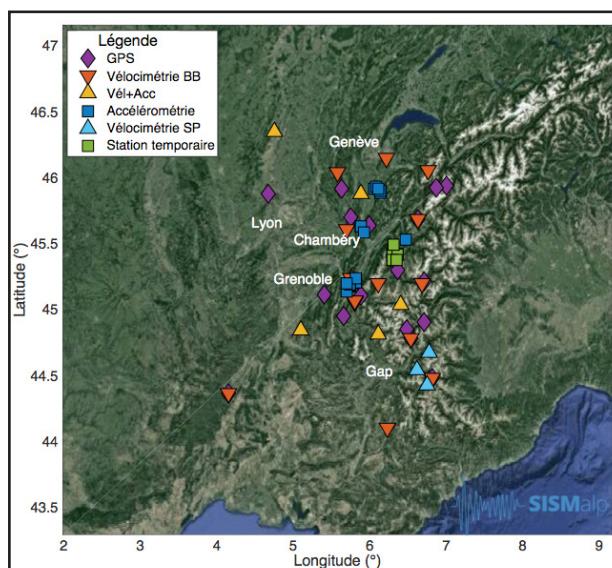
Les stations sont installées dans des endroits isolés afin de ne pas être polluées par les vibrations générées par l'activité humaine.

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 secondes). On les installe en général 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.



RÉSEAU SISMOLOGIQUE ET GÉODÉSIQUE FRANÇAIS - RESIF : Depuis 2010, un programme de modernisation des services d'observation en science de la Terre a été lancé. Bénéficiant du statut d'Équipement d'Excellence, ce programme a permis de doter la France d'un réseau moderne de surveillance de la sismicité, alliant les différentes composantes: géodésique, accélémétrique, gravimétrique, vélocimétrique.

Ces stations transmettent en temps réel les données et celles-ci sont stockées, sauvegardées, contrôlées au centre de données de RESIF localisé à Grenoble (ISTerre) et hébergé par l'Université de Grenoble Alpes.

Ce centre de données respecte les standards internationaux et est ainsi interconnecté avec les centres européens et américains. Cette réalisation a permis de positionner la France parmi les meilleurs réseaux de surveillance, en garantissant ainsi la mise à disposition de données de grande qualité aux scientifiques.

Localisation des points d'observation dans les Alpes, gérés par SISMAlp (ISTerre/université de Grenoble Alpes). Chaque point correspond à un type d'instrument, tous appartenant aux Réseau Sismologique et Géodésique Français RESIF

LES SÉISMES FONT DU BRUIT. Parmi la multitude d'ondes qu'ils génèrent, l'onde P peut être entendue par l'Homme. Des instruments, plus sensibles que l'Homme, permettent d'enregistrer la totalité des ondes et de se représenter la structure de la terre et la mécanique de la rupture. Certains instruments permettent également de mesurer le mouvement du sol pour lequel les ingénieurs devront construire des habitations résistantes. L'étude des ondes sismiques permet d'enrichir notre connaissance des tremblements de terre et de la structure profonde et superficielle de la Terre.



RISQUE SISMIQUE EN RHÔNES-ALPES

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 déformation. D'ailleurs quelques exemples récents nous ont rappelé que les Alpes étaient une région sismique.

Si le risque sismique reste modéré, du fait de certaines particularités régionales, géologiques et géographiques, il n'est pas négligeable et doit être pris en compte dans l'aménagement du territoire.



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 par le passé, affectant les villes et les constructions de la région de quelques dommages significatifs. Parce qu'ils sont peu nombreux, ces événements marquent faiblement la mémoire des populations dans les zones concernées, et c'est alors tout naturellement que des interrogations sur l'existence de ces séismes sont soulevées.

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 marquants apparaissent :

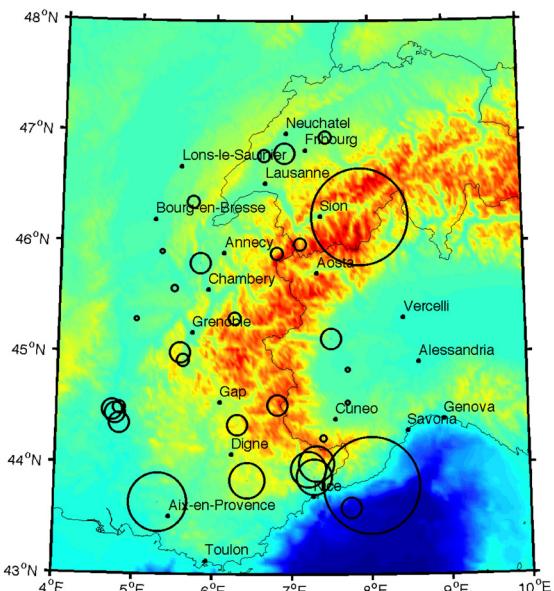
- Les séismes de **Lambesc** dans le Sud des Alpes (1909) ayant provoqué dommages et victimes,
- Le séisme de **Corrençon** (1962) ayant fissuré des maisons dans le Vercors,
- Les séismes de **Chamonix** de 1905 et 2006 où des fissures et des chutes d'objets ont été répertoriées,
- Le séisme d'**Epagny** (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**.

Ces événements témoignent de l'activité des plaques. Les vallées alpines, omniprésentes en territoire montagneux, sont constituées du remplissage d'anciens lacs glaciaires par des sédiments. Ces processus sont actuellement en cours au lac d'Annecy et du Bourget.

De ce fait, **les vallées alpines vont amplifier le mouvement sismique du sol**, provoquant souvent des ressentis et des dommages plus importants. Ces vallées génèrent des amplifications pouvant dans certains cas être considérables.

L'observation de ces phénomènes dans plusieurs villes de Rhône-Alpes (Grenoble, Annecy, Chambéry) par le réseau accélérométrique national RAP/RESIF, a permis d'étudier ces phénomènes spectaculaires. Les conclusions montrent que systématiquement, le mouvement du sol sera exacerbé, augmentant le risque sismique des constructions.



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.

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

- 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;
- 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;
- Des **zones très peu sismiques** avec la Bourgogne, la Bresse, le Diois, les massifs cristallins externes des Alpes et le Languedoc.



LE CAS PARTICULIER DE GRENOBLE

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.

Ces activités occasionnent parfois des désordres et elles sont ressenties localement par la population.

C'est sur cet alignement que des séismes importants se sont produits, tels que le séisme de **Corrençon** en 1962 ($M_L=5.3$), de **Faverges** en 1980 ($M_L=4.7$) et du Grand **Bornand** de 1994 ($M_L=5.1$).



Dommages à Corrençon-en-Vercors
lors du séisme éponyme de 1962, de magnitude estimée à 5.5

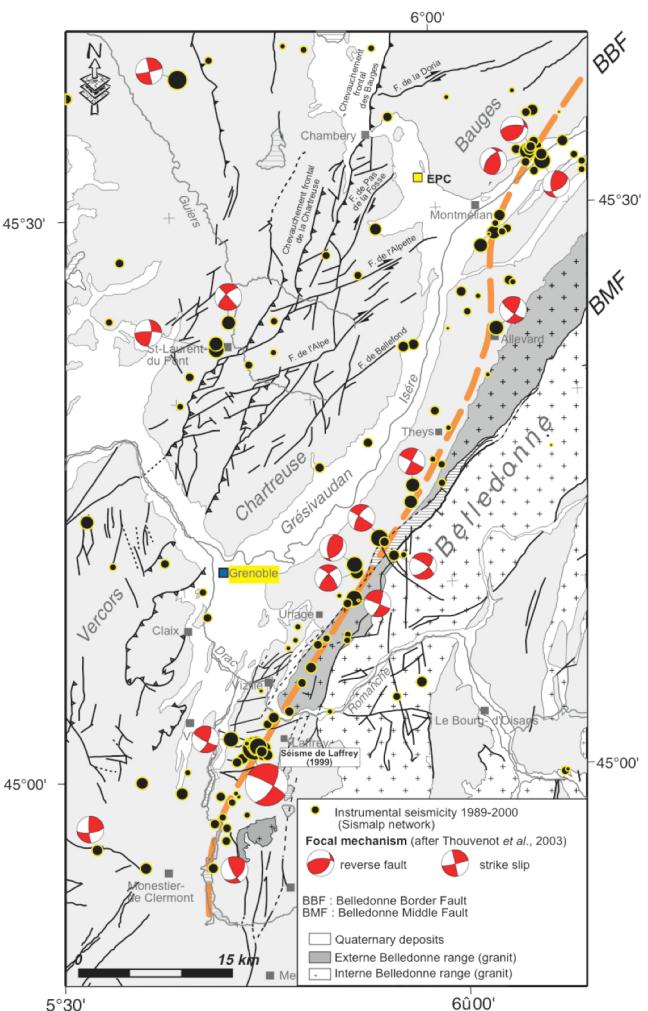
À proximité immédiate de Grenoble, les séismes ont des intensités inférieures à V, à l'exception de :

- **Séisme Grésivaudan**, intensité V-VI à Grenoble, le 07/01/1851, avec un épicentre localisé à environ cinq kilomètres au Nord de la ville ;
- **Séisme de Corrençon**, d'intensité épicentrale de VII-VIII et de profondeur 10 km, le 25/04/1962 ;
- **Séisme de Voreppe**, le 12/01/1754, qui compte parmi les premiers séismes historiques rapportés pour avoir engendré des dommages dans les Alpes mais qui reste 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 ont eu lieu dans le massif cristallin de Belledonne, à plus de 30 km de Grenoble mais ayant atteint des intensités épicentrales supérieures à VII.

Des séismes de forte intensité, situés aux limites de la région Rhône-Alpes, ont été recensés.

Parmi eux, on peut citer le séisme du **Bugey** (Nord 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.



Carte de localisation de Grenoble et séismes principaux détectés par SISMAlp à proximité de la ville - Dunand and Guéguen, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2005, d'après Thouvenot et al., *Geophysical Journal International*, 2003)

LE RISQUE SISMIQUE EN RHÔNE-ALPES EST UNE RÉALITÉ. Malgré un niveau de sismicité modéré, les séismes forts du passé, les remplissages sédimentaires importants et la nature des constructions incitent à considérer sérieusement le risque sismique en Rhône-Alpes. Dans ce contexte de sismicité, Grenoble est une ville à forts enjeux économiques et sociaux, 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). 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 décideurs locaux.

 **SISMAlp** (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 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, d'enfin constituer une banque de données homogène pour permettre des recherches fondamentales sur la source sismique. À partir de 2010, une phase de renouvellement a été entreprise, modernisant les stations et renforçant l'infrastructure de détection et de gestion des données.
<https://sismalp.osug.fr/>



TECTONIQUE ET CYCLE SISMIQUE

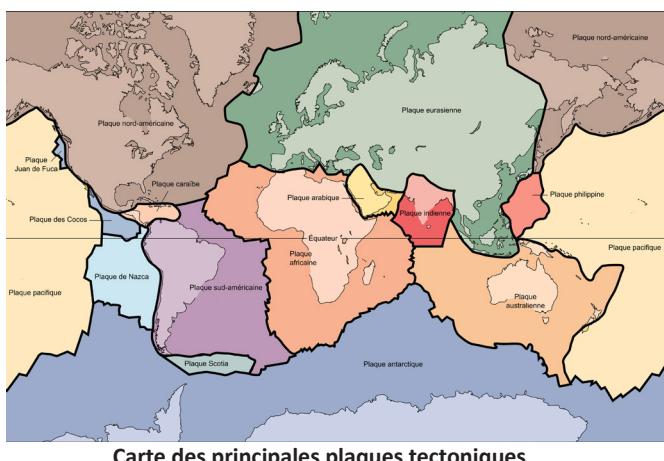
Les Alpes continuent de se déformer ! Certes, à vitesse lente, mais de façon immuable, conséquence du mouvement des plaques. Les instruments de mesure de plus en plus précis permettent de mesurer le mouvement des plaques et nous donnent des éléments afin de quantifier ce mouvement, relié à la tectonique des plaques. Des observations plus récentes permettent également d'avoir une idée de la fréquence à laquelle les séismes devraient se reproduire : c'est le principe du cycle sismique.



LA TECTONIQUE DES PLAQUES

Pendant plusieurs siècles, les sciences de la Terre ont été dominées par la **théorie fixiste** selon laquelle la quasi-totalité du globe terrestre est à l'état solide et composé d'une surface immuable et immobile. Cependant, quelques idées **mobilistes** apparaissent au XVI^{ème} siècle : elles s'appuient sur la forme des continents, émettant l'hypothèse que les continents étaient réunis autrefois.

Au début du XX^{ème}, l'**hypothèse de la dérive des continents** est formulée mais le manque de preuves scientifiques ne permet pas de convaincre la communauté scientifique. Cependant, en 1960, grâce à de nouvelles observations et à l'avancée de la sismologie expérimentale qui permettra de se représenter l'intérieur de la Terre, la **tectonique des plaques** est finalement adoptée.



Carte des principales plaques tectoniques

La surface de la Terre est donc constituée de plaques qui sont en mouvement les unes par rapport aux autres. Ces plaques tectoniques ont la capacité de dériver, d'entrer en contact de différentes manières et de créer des déformations du sol : c'est la tectonique des plaques. Celle-ci est à l'origine des tremblements de terre.

En fonction de la composition des plaques (certaines plus lourdes que d'autres) et de la vitesse du mouvement relatif de l'une par rapport à l'autre, les zones de contact entre les plaques vont présenter des **caractéristiques particulières**, qui conditionnent à la fois les reliefs et les types de séismes :

- Les **contacts en convergence**, entre une plaque océanique et une plaque continentale, vont produire une zone de subduction : la plaque océanique va se plier pour glisser sous la plaque continentale qu'elle rencontre.

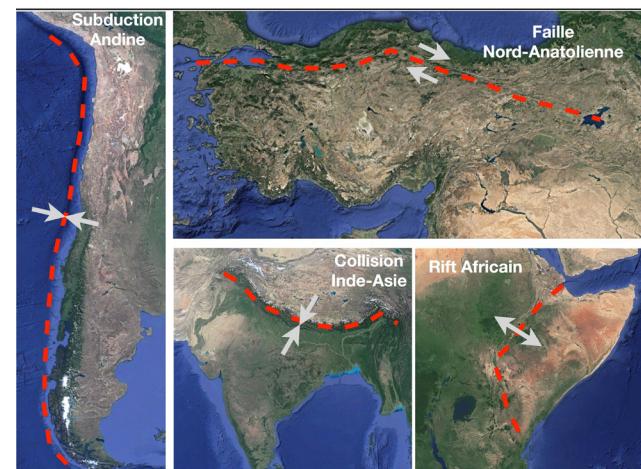
Ce phénomène de subduction est associé à la création d'une chaîne de montagnes, à un volcanisme actif, ainsi qu'à la manifestation de séismes de très grande magnitude (supérieure à 8), localisés en surface mais également à grande profondeur. C'est par exemple le cas des Andes, situées au niveau d'une zone de contact entre la plaque océanique de Nazca et la plaque continentale d'Amérique du Sud.

- Les **contacts en extension**, entre deux plaques océaniques ou continentales qui s'éloignent l'une de l'autre. Ce type de contact est systématiquement associé à du volcanisme (par exemple le rift africain qui découpe l'est du continent, ou la ride méso-océanique de l'Atlantique), et à des séismes plus superficiels.

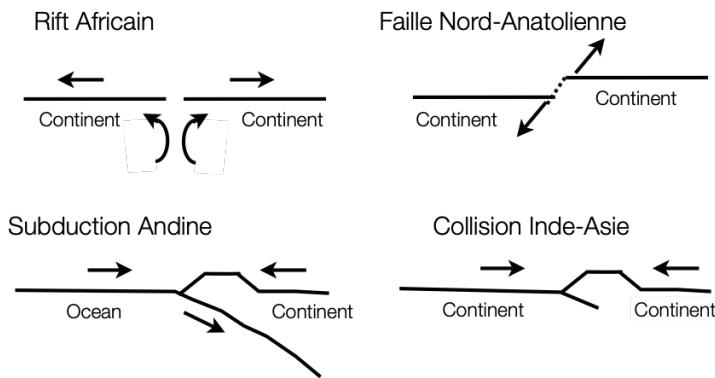
- Les **contacts en compression** entre plaques continentales sont à l'origine des chaînes de montagnes (par exemple la plaque Indienne poinçonnant à grande vitesse la plaque eurasienne, à l'origine de l'Himalaya) et sont liés à une sismicité plus superficielle et de grande magnitude.

- Les **contacts en glissement horizontal** entre les plaques sont caractérisés par des failles très marquées, à l'origine de séismes plus superficiels et donc plus destructeurs (par exemple la faille San Andreas en Californie ou Nord Anatolienne en Turquie).

On retrouve ces caractéristiques en France, avec la zone en extension du fossé rhénan (région de Mulhouse) et la géothermie associée, la compression du sud-ouest et la chaîne des Pyrénées, les failles coulissantes en bordure externe de la chaîne des Alpes, et la zone de subduction des Antilles.



Principaux contacts entre plaques



Principaux contacts entre plaques - En fonction de la nature (masse) et de la vitesse relative d'une plaque par rapport à l'autre, la morphologie des contacts change, donnant lieu à des séismes différents en termes de magnitude, de localisation et de nature des ondes émises au moment de la rupture.



CYCLE SISMIQUE ET RISQUE

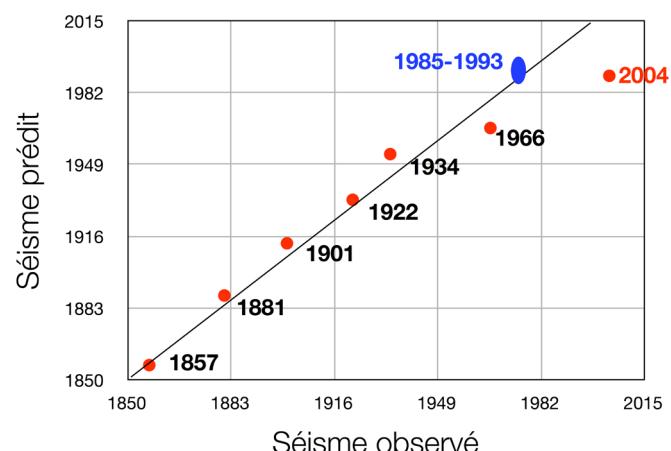
Le développement des **stations GPS** contribue à comprendre la nature des mouvements relatifs entre les plaques. Ces stations permettent des **mesures précises sur des temps d'observation courts**, lorsque les plaques ont des vitesses de déplacement rapides, ou sur des temps longs lorsqu'elles sont plus lentes.

Les observations montrent un mouvement relativement constant, de quelques millimètres par an entre l'Espagne et la France, ou de quelques centimètres (voire plus d'une dizaine) le long de la zone de subduction andine. À leur frontière, les plaques sont bloquées l'une par rapport à l'autre du fait de leur frottement. Dans cette zone de contact, **les contraintes s'accumulent** jusqu'à dépasser un seuil de résistance : la rupture se produit alors, **libérant de l'énergie sous forme d'ondes sismiques**. Puis, les plaques reprennent leur mouvement et au bout d'un laps de temps comparable, ce seuil est de nouveau atteint et la rupture se produit à nouveau. L'énergie libérée (ou la **magnitude**) étant proportionnelle à la contrainte accumulée, on constate une répétition des séismes, à intervalles réguliers, avec des magnitudes comparables : c'est le principe du **rebond élastique** proposé par Harry F. Reid en Californie après le séisme de San Francisco (1906) pour expliquer le fonctionnement du cycle sismique.

C'est la raison pour laquelle de grands séismes, les fameux "big one", sont attendus au Japon ou en Californie, même si ce cycle réserve parfois des soubresauts qui perturbent la répétition des séismes. Le cas de la Californie est un exemple bien connu, avec un séisme qui s'est fait attendre, rompant la constance temporelle du cycle. Cependant, puisque la tectonique est le moteur principal de la sismologie, à l'échelle de la Terre, le nombre de séismes par an et par magnitude est globalement stable.

Plus localement, les modèles de **Gutenberg-Richter** estiment un nombre moyen annuel de séismes, qui décroît en fonction de la magnitude. C'est sur la base de cette information que l'on interprète les répétitions de séismes dans certaines régions du monde (Chili, Haïti, ...). Ainsi, il est possible d'affirmer avec certitude que certaines régions sont sous la menace d'un gros séisme, comparable à ceux s'étant déjà produits par le passé (Téhéran, Lima, Istanbul...).

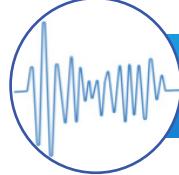
On peut également établir que si des séismes se sont produits en France, d'autres se produiront avec une magnitude comparable. Ces observations sont essentielles à la définition de l'**aléa sismique** contre lequel se protéger.



Séquence sismique de Parkfield (Californie) - Les dates correspondent aux séismes observés, en rouge l'écart en 2004 par rapport à la prédition de la série stable antérieure.

Malheureusement le cycle sismique n'apparaît pas toujours aussi constant. Un mouvement de glissement se produit le long de la zone de contact, relâchant les contraintes sans produire de tremblements de terre. Ce cycle est appelé un séisme lent. Puisque les contraintes se libèrent lentement, le risque de tremblements de terre est moins probable. Identifier des zones de failles en glissement et des zones de failles bloquées (pas de déplacements au niveau de la faille) est essentiel à la définition de l'aléa sismique.

LES ALPES SE DÉFORMENT ! Même si les déformations ne sont pas très importantes, la déformation des Alpes, associée à la sismicité, se poursuit. Des séismes ont eu lieu par le passé, il y en aura d'autres d'amplitude comparable. Le GPS est un outil intéressant qui apporte des éléments quantitatifs sur le blocage des failles, et les possibilités d'un séisme à moyen terme. Dans une région à sismicité diffuse, sans failles majeures ou contact de plaque principal, il est difficile d'évaluer le taux d'occurrence des séismes importants.



LA RÉGLEMENTATION PARASISMIQUE

On ne peut empêcher les séismes de se produire. Cependant, ce ne sont pas les séismes qui tuent mais les constructions qui s'écroulent. Ainsi, il est possible de se protéger des séismes en proposant un cadre technique visant à rendre les habitations résistantes : c'est l'objectif même de la **réglementation parasismique**.

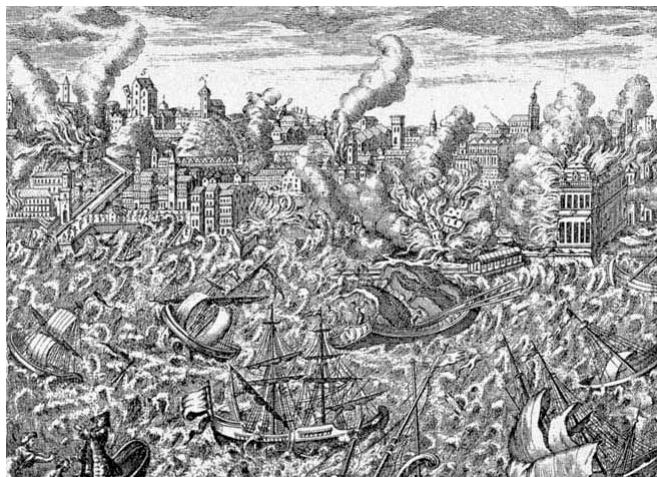


SÉISMES ET CONSÉQUENCES

Les tremblements de terre sont brusques et soudains, et en quelques instants ils engendrent des victimes qui peuvent se compter par milliers. Aucune autre force naturelle ne peut en un temps aussi court accumuler autant de dommages et de victimes. Les exemples catastrophiques les plus récents, tels que les séismes d'**Haïti** (2010), de **Katmandu** (Népal, 2015), de **Pedernales** (Équateur, 2016) ou du **Mexique** (2017) montrent la fragilité des environnements urbains face à la puissance déstructrice de ces événements, provoquant victimes et pertes économiques importantes.

Les séismes, comme ceux de **Christchurch** (Nouvelle-Zélande, 2010), de **Napa** (Californie, 2014) ou la séquence sismique d'Italie centrale (**Amatrice** et **Norcia**, 2016), nous rappellent que pour ces séismes modérés (magnitude autour de 6) les conséquences peuvent aussi être considérables. Ces séismes sont comparables à ceux historiques ayant provoqué en France des dommages et des victimes.

Les relations entre dommages physiques et pertes en vies humaines montrent qu'il existe une forte corrélation entre le nombre de victimes et le nombre de constructions endommagées après un séisme.



Cette eau-forte de 1755 montre les ruines de Lisbonne en flammes et un tsunami submergeant les navires du port, suite au tremblement de terre.

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 ».

La **réglementation parasismique** revient finalement à considérer les principes que Rousseau avait suggéré en son temps, après la catastrophe de Lisbonne en 1755 : **adapter le développement urbain à l'environnement naturel afin de réduire l'impact de ce dernier sur l'existence humaine**. Cette réglementation doit donc définir les mouvements sismiques contre lesquels se protéger et comment adapter les constructions en conséquence.



SE PROTÉGER POUR LIMITER LES DOMMAGES ET PROTÉGER LA VIE HUMAINE

Nous pouvons constater que par le passé, suite à de forts séismes, l'adoption de **nouveaux principes de constructions** par la société, les décideurs et les professionnels est naturelle et systématique.



Séisme d'Emilia Romagna (Italie, 2012). Exemple de dommages observés pour un séisme de magnitude modérée (M=6) sur des bâtiments industriels et historiques.

Ces nouveaux principes de construction s'appuient sur l'observation de certains éléments et techniques de construction défaillantes : c'est par exemple le cas après le séisme de Lisbonne où des techniques de construction ont été prohibées après 1755.

Des catastrophes humaines comme celle de 1906 à San Francisco ou de Messine en 1908 ont également amené les responsables à réfléchir au moyen d'estimer l'**aléa sismique** pouvant se produire en une région donnée. À l'époque, le manque d'enregistrements limitait la connaissance du mouvement du sol auquel on pouvait s'attendre et les processus à l'origine des tremblements de terre étaient encore méconnus.

Cette lacune imposait non seulement de considérer un mouvement du sol forfaitaire mais aussi de ne considérer que les zones qui avaient déjà subi des tremblements de terre.

On peut plus récemment citer les séismes de **Michoacan au Mexique** en 1985, ayant influencé le code de construction mexicain, ou encore celui de **Christchurch** en Nouvelle Zélande (2010) ayant révélé une faiblesse dans la conception de bâtiments récents.

Naturellement, il n'est intéressant de définir des règles parasismiques 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 États-Unis. L'amélioration de nos connaissances, du nombre et de la qualité des observations, a permis l'émergence de nouveaux principes et de nouvelles règles ayant un objectif universel : **la sauvegarde des vies humaines**.

LA RÉGLEMENTATION PARASIMIQUE

Une réglementation qui évolue au fil des séismes

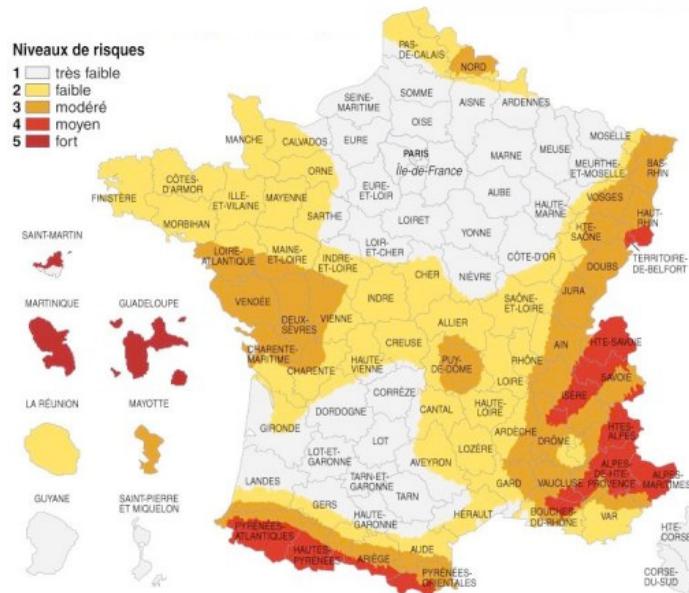
En France, on constate que les règles et leurs révisions vont évoluer au fil des tremblements de terre qui se produisent. Certes la France est un pays à sismicité modérée mais en 1960, suite au séisme d'**Orléansville** en Algérie, alors département français, les premières règles apparaissent sous forme de recommandations. Elles ne cesseront d'évoluer comme après le séisme d'**Agadir** au Maroc (1962) en **règles PS62**. Le séisme d'**El Asman** (Algérie) en 1980 fera aboutir l'édition des premières règles modernes, dites **PS92**, qui bénéficieront également des enseignements tirés d'autres séismes (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 édités pour les maisons individuelles et les ouvrages à risque spécial.

Une réglementation qui change de concept scientifique

À 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. Ces nouveaux concepts ont servi la nouvelle réglementation européenne, dite des **Eurocode 8** (EC8), pour une évaluation plus juste du mouvement sismique contre lequel se protéger. Cette réglementation permet également d'harmoniser les méthodes d'évaluation de l'aléa sismique dans les différents pays et aux frontières.

On obtient ainsi une carte réglementaire représentant le niveau de sismicité du territoire. Le mouvement du sol contre lequel se protéger **dépend de la région** (les Antilles sont plus sismiques que le bassin parisien), de **la nature du sol**, 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.



Carte du zonage sismique réglementaire en France métropolitaine et outre-mer (Source : <http://www.planseisme.fr>). Le mouvement sismique contre lequel se protéger est donné sous forme d'accélération du sol de référence issue d'une évaluation probabiliste de l'aléa sismique.

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 localement les zones qui sont susceptibles d'amplifier le mouvement du sol, c'est-à-dire de présenter des effets de site. Une fois l'aléa défini, les principes de conception et les règles de dimensionnement sont appliqués afin de rendre l'ouvrage le plus résistant possible. Aux ingénieurs de dimensionner l'ouvrage en conséquence.

Cette règle ne s'applique qu'aux nouvelles constructions. Les constructions anciennes, conçues selon d'autres principes, restent un élément critique à gérer, à l'origine de la plupart des victimes comme ce fut le cas lors des séismes italiens récents.

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.



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 et de l'impact de la sismicité sur les populations et les biens. L'aléa sismique correspond à la probabilité de voir un séisme important se produire pendant une certaine période. Concernant les séismes, on parle de période de retour de 475 ans. Ce chiffre représente une période de retour qui est à considérer pour un événement qui a 10% de chance de se produire au cours des 50 prochaines années.

RISQUE SISMIQUE ET RÉGLEMENTATION

Les séismes de 1906 à **San Francisco** ou de **Messine** en 1908 ont amené les responsables à réfléchir à l'évaluation de l'aléa sismique. À 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 et de ne considérer que les zones ayant 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.

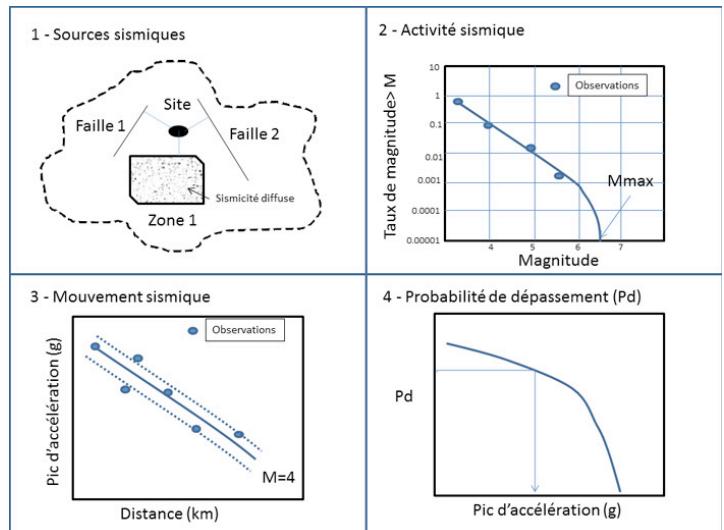
Avec la normalisation européenne, de nouveaux principes dits probabilistes ont été adoptés afin de définir l'aléa sismique, de façon homogène en Europe. Pour construire une structure résistante, sans effondrement local ou global, elle doit pouvoir supporter un **mouvement du sol de référence**. Il faut donc pouvoir évaluer l'agression sismique. Elle est définie comme l'action sismique de référence, associée au **comportement de la structure** et au **risque toléré** durant la vie de l'ouvrage, et cela où que l'on soit sur le territoire. C'est l'objectif 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 quatre étapes :

- La **reconnaissance des zones sismogènes** capables de générer des séismes ;
- Le développement d'un **modèle de sismicité** pour chacune des zones afin d'estimer les taux annuels d'occurrence des magnitudes possibles ;
- La sélection d'un modèle de **prédiction du mouvement du sol** permettant d'estimer le mouvement du sol produit par ces séismes ;
- L'évaluation de la probabilité que ce mouvement du sol soit dépassé sur une période donnée.



Principe général de l'évaluation de l'aléa sismique en une région donnée. Chaque étape est l'affaire des sismologues et s'appuie sur la connaissance des tremblements de terre acquise depuis ces dernières années (d'après IRSN)

IDENTIFIER LES ZONES POTENTIELLEMENT CAPABLES DE GÉNÉRER UN SÉISME

Selon la connaissance de la région concernée, les zones où peuvent se produire des séismes se situent **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 et géologique. Pour chaque zone il est possible d'**observer la sismicité passée** (catalogue historique, période pré-instrumentale) et **la sismicité récente** (catalogue instrumental fourni par les réseaux de surveillance). Grâce à ces observations, il est possible d'établir une **relation de récurrence pour la sismicité** et de déterminer les **taux annuels des magnitudes** pouvant se produire dans une zone active.

Taux d'occurrence des séismes

Sur chaque zone, on peut estimer un nombre moyen annuel de séismes. En effet, en 1944, Guttenberg et Richter ont montré que ce nombre décroît selon une loi mathématique dont les coefficients dépendent de la région et du niveau de sismicité.

À l'aide de ces informations, il est possible de définir l'occurrence des 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.

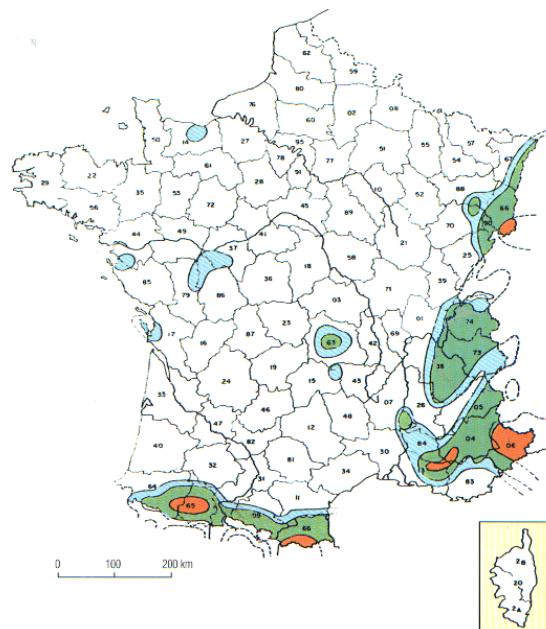
Modèle d'occurrence des séismes dans le temps

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 mathématique (appelé modèle de Poisson) qui permet d'estimer la probabilité qu'un phénomène se produise au moins une fois pendant une durée d'exposition. Pour la France, mais également pour de nombreux autres pays dans le monde, il a été admis de se protéger contre un mouvement du sol qui a une probabilité de 10% de se produire sur 50 ans, c'est-à-dire la durée de vie (ou d'exposition) moyenne des ouvrages. Cela se traduit par un événement de période de retour de 475 ans. Il est également possible de calculer cette probabilité d'apparition de phénomène sismique sur des périodes de retour plus longues.

Pour certains types de constructions ayant une importance pour la sécurité civile et pour lesquels une continuité de service est nécessaire, les calculs prennent en compte un mouvement du sol qui est amplifié. Ceci revient à augmenter la période de retour (ou diminuer la probabilité de dépassement sur une période donnée). Les constructions sont ainsi catégorisées en «classes d'importance» et une valeur est affectée à chaque classe. Il en va de même selon la qualité des sols.

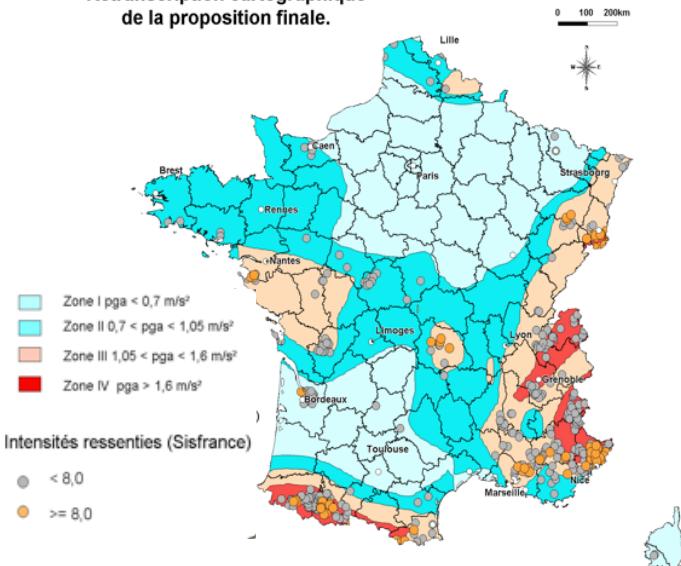
Évolution du zonage sismique

Le découpage géographique et les valeurs de référence du mouvement du sol nécessaires à l'établissement du zonage réglementaire reflètent l'état des connaissances du moment. Les progrès scientifiques de ces dernières décennies, en particulier portant sur la prédiction du mouvement du sol et les incertitudes qui lui sont associées, ont apporté de nouveaux éléments pour une meilleure prise en compte du risque sismique. Comme par le passé, des évolutions sont en réflexion qui aboutiront à une modification de ce zonage.



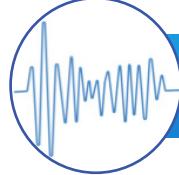
Zonage PS92 (source : site du plan séisme). Le zonage ancien de la France dit des PS92, définit les zones les plus sismiques (en orange et vert) en fonction des séismes anciens connus s'étant produits. On retrouve les séismes de Bâle dans l'Est, de Lambesc et du Golf de Gênes vers le Sud-Est, de Catalogne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

Retranscription cartographique de la proposition finale.



Ébauche 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 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 subir 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. Le zonage traduit l'état de connaissance du moment et une évolution est prévue dans les prochaines années.



CONCEPTION PARASISMIQUE

Il est possible de construire des bâtiments qui résistent aux séismes : c'est le rôle de la réglementation parasismique. Il en existe pour tout type de matériaux. Le béton armé est un matériau qui, alliant les propriétés du béton à celles de l'acier, présente les meilleures propriétés pour résister à un séisme. Cependant, un mauvais emploi de ce matériau, 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 observations post-sismiques révèlent presque systématiquement les mêmes dommages : des étages écrasés, des bâtiments basculés, des éléments secondaires détruits et des bâtiments plus endommagés lorsqu'ils sont accolés. Les codes de dimensionnement permettent de rendre les constructions saines et sûres. Les respecter, c'est s'assurer que tout a été mis en œuvre pour atteindre cet objectif. Ce sont les ingénieurs et les architectes qui ont la connaissance et la responsabilité du dimensionnement. L'environnement dans lequel se trouve le bâtiment doit également être pris en compte afin de le rendre parasismique. Face aux séismes, les constructions en béton armé ne seront pas plus sûres si elles ne respectent pas les principes élémentaires qui limitent les efforts dans les éléments porteurs.



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 plan.
Structure irrégulière de forme.

INTÉGRER L'ENVIRONNEMENT À LA CONCEPTION

Environnement anthropique (environnement créé ou modifié par l'homme)

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.



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

Environnement naturel

Le terrain va jouer un rôle important. Selon sa nature, des tassements peuvent apparaître sous la structure, du fait d'un phénomène de liquéfaction. Le phénomène de liquéfaction est un événement qui survient pendant un séisme, lorsqu'un sol saturé en eau s'affaisse et que l'eau remonte à la surface. Ce phénomène provoque souvent le basculement de la structure, même si celle-ci a été parfaitement dimensionnée.

RESPECTER LA RÉGULARITÉ EN PLAN

Élancement de la structure

L'élancement correspond au rapport entre la longueur et la largeur du bâtiment. Lors d'un séisme, plus une structure est élancée, plus elle risque de subir des mouvements de sol différents d'une extrémité à l'autre. Selon les fondations du bâtiment et selon les mouvements et la nature du sol, les dégâts peuvent être considérables. Une alternative pour réduire l'élancement est de fractionner le bâtiment par des joints parasismiques.

Structure irrégulière de forme

Les angles rentrants sont caractérisés par la jonction de deux parties d'une structure ayant une rigidité différente. Cette différence de rigidité induit des oscillations opposées ainsi qu'une concentration des forces de contraintes, provoquant alors des dommages importants.



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

→ RESPECTER LA RÉGULARITÉ EN ÉLÉVATION

En élévation, la régularité des formes, la répartition homogène des masses et une rigidité régulière sont des critères importants qui conditionnent la stabilité et la résistance des structures sous l'action d'un séisme.

Régularité de forme

Les formes irrégulières en élévation donnent lieu à des oscillations différentielles. Dans ce cas, les éléments porteurs peuvent être soumis à des efforts de sens contraire, situation très défavorable pour la solidité de l'ouvrage.

Répartition des masses

Le centre de gravité d'un objet (ou d'une structure) correspond au point où les forces en action sur l'objet se concentrent.

Plus le centre de gravité est bas, plus les contraintes sur les structures verticales seront réduites en cas de séisme. Il en va de même pour les constructions en forme de pendule inversé pour lesquelles une masse importante se retrouve perchée.

Niveaux transparents

Un niveau transparent correspond à un étage dont le nombre de murs ou de poteaux résistants est insuffisant, créant une discontinuité avec le reste du bâtiment. C'est par exemple le cas des parkings ou des espaces de commerce installés au rez-de-chaussée des immeubles.

Ce type de construction est plus vulnérable et résiste moins aux sollicitations sismiques. De nombreux exemples montrent que l'effondrement ou l'écrasement d'un niveau de la structure ont été provoqués par l'absence de contreventements dans les niveaux transparents. De plus, les poteaux verticaux subissent de grandes déformations latérales et leur rupture provoque l'effondrement du bâtiment.



Exemple de dommage dû à l'irrégularité en hauteur.
Étage transparent ou souple.

Source image: AIR
<https://www.air-worldwide.com/publications/air-currents/izmit-duzce-ten-years-later-istanbul-at-greater-risk-today/>

→ CONCEVOIR LA STRUCTURE AFIN QU'ELLE DISSIPE L'ÉNERGIE DE VIBRATION

C'est certainement la prescription la plus importante que l'on retrouve dans les codes parasismiques EC8. Dissiper l'énergie doit permettre à la structure d'encaisser une déformation de plus en plus importante sans augmenter les efforts dans les éléments porteurs. Des dissipateurs d'énergie permettent de dissocier les mouvements du sol de ceux du bâtiment. Le respect d'une certaine quantité d'acier par surface de béton ou par longueur d'élément fait également parti 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 dans le dimensionnement de la structure car leur chute peut 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.



Exemple de dispositif de renforcement parasismique.
Des dissipateurs ductiles encaissent la déformation latérale,
Christchurch 2011

SEULS LES BÂTIMENTS BIEN CONÇUS RÉSISTENT. La conception doit limiter dans la mesure du possible certaines irrégularités en plan et en élévation tout en prenant en compte l'environnement. Une structure résistera bien à une sollicitation sismique uniquement si les principes de base seront respectés, avec ajouts de dispositifs spéciaux éventuellement. C'est donc en faisant appel aux ingénieurs et architectes formés que cet objectif sera atteint et ils sont en cela incontournables.



LE COÛT DE LA CONSTRUCTION

La réglementation parasismique impose certaines règles en fonction du zonage sismique et du type de construction. Avec l'arrivée de la nouvelle réglementation, des régions ont vu leur classification évoluer et doivent désormais appliquer la réglementation parasismique. Selon certaines idées reçues, le surcoût serait considérable et risquerait de provoquer le ralentissement du marché de l'immobilier des régions concernées. Pourtant construire parasismique n'est ni inutile vis-à-vis de la qualité des constructions et de la sécurité des personnes, ni particulièrement onéreux si les méthodes récentes de dimensionnement sont appliquées.



QUE NOUS DIT LA RÉGLEMENTATION PARASISMIQUE ?

Pour diminuer les conséquences économiques et humaines, il est approprié de mettre en place la **réglementation parasismique**. C'est avec cet objectif principal (la sauvegarde des vies humaines) qu'une nouvelle réglementation a été mise en place en France. Elle s'applique au bâti courant et impose des dispositifs permettant de **limiter la destruction des bâtiments** et ainsi de **diminuer les pertes économiques et sociales**.

Les décrets du 22 octobre 2010 redéfinissent la **prévention du risque sismique** (Décret n°2010-1254) et la **délimitation des zones de sismicité du territoire** (Décret n°2010-1255).

Dans le cadre de la réglementation parasismique, le dimensionnement des éléments structuraux (murs et planchers) et non structuraux doit prendre en compte les efforts produits par la vibration du sol, au même titre que les charges d'exploitation, les charges dues au vent ou à la neige dans certaines régions.

La France est découpée en **zones sismiques** en fonction de l'importance des vibrations du sol pouvant produire un séisme et de l'impact que ces dernières peuvent avoir sur les structures.

Zones de sismicité				
	2	3	4	5
II	PS-MI	PS-MI	PS-MI/EC8	
II	EC8 ag=1.1 γ=1	EC8 ag=1.6 γ=1	EC8 ag=3 γ=1	
III	EC8 ag=0.7 γ=1.2	EC8 ag=1.1 γ=1.2	EC8 ag=1.6 γ=1.2	EC8 ag=3 γ=1.2
IV	EC8 ag=0.7 γ=1.4	EC8 ag=1.1 γ=1.4	EC8 ag=1.6 γ=1.4	EC8 ag=3 γ=1.4

Obligation d'application des règles et coefficients. Les règles sont obligatoires depuis le 01 janvier 2011 dans les zones de sismicité 2 à 5, et pour les bâtiments de classes II à IV, avec un coefficient pondérateur fonction de l'importance de la structure:

- II : maison individuelle ou petit logement collectif
 - III : établissement recevant du public et logements collectifs
 - IV : établissement devant continuer à fonctionner pendant la crise.
- Dans certains cas, ce n'est pas l'EC8 qui s'applique mais des règles spéciales pour les maisons individuelles dites PS-MI.

Les constructions n'ayant pas toutes la même importance en termes de dimensions et d'occupation, la réglementation impose de rendre certaines structures plus résistantes que d'autres. Les efforts à prendre en compte seront donc modulés en fonction des **classes des bâtiments** et **de la région**.

Certains professionnels et certains décideurs pensent encore que la sécurité parasismique des bâtiments passe uniquement par un dimensionnement entraînant un surcoût qui peut s'avérer important. Pourtant, il existe des solutions au moment de la conception qui peuvent apporter de la stabilité et de la sécurité **pour un coût moindre**.

Hugo Bachmann, ancien professeur à l'école Polytechnique Fédérale de Zurich en Suisse, propose une liste de recommandations. Il soulève également deux points essentiels :

- Intégrer l'**ingénieur et l'architecte** dès le départ dans la conception du projet,
- Employer des **méthodes modernes de dimensionnement**, qui grâce aux progrès récents quant à la compréhension du comportement dynamique des structures sous séisme, permettent une résistance augmentée.

La Suisse est un pays comparable à la France en termes de niveau séisme, et ces recommandations peuvent donc être reprises ici.

« Ce sont des structures ductiles et dimensionnées en capacité qui, par rapport aux anciennes pratiques, vont permettre la maîtrise du surcoût lié au parasismique, tout en améliorant la résistance des structures. En adaptant ainsi les éléments structuraux, l'ajout d'éléments nouveaux n'est plus systématique, comme le voulaient avant les anciennes pratiques. »

Hugo Bachmann - ETHZ - *Conception parasismique des bâtiments – Principes de base à l'attention des ingénieurs, architectes, maîtres d'ouvrages et autorités - Directives de l'OFEG - Berne*



ET LA SÉCURITÉ DANS TOUT ÇA ?

Hugo Bachmann va même jusqu'à dire que «*dans un pays à sismicité modérée comme la Suisse, le prix de la sécurité parasismique des nouveaux bâtiments est généralement nul à modeste (de quelques pour-mille).*» Dans le nouveau zonage sismique de la France de 2010, **de nouvelles régions ont été intégrées à des zones dans lesquelles certaines exigences parasismiques sont devenues obligatoires**, pour les constructions neuves et pour certaines transformations/rénovations du bâti existant.

Cette nouvelle réglementation pose des questions sur sa mise en œuvre pratique et confronte les élus à des décisions à prendre, sans qu'ils aient les connaissances suffisantes pour appréhender les conséquences de leur décision, ni les moyens nécessaires à leur réalisation. Or, leurs décisions engagent leur responsabilité ou celle de leur collectivité.

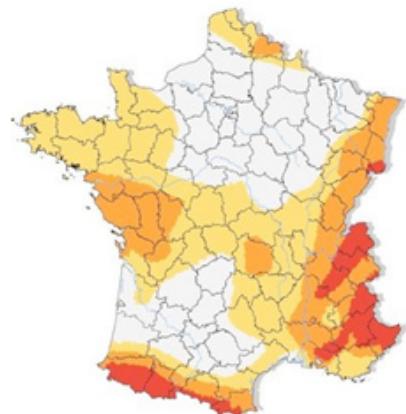
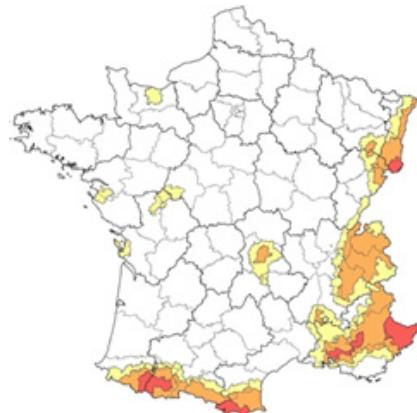
À l'opposé d'Hugo Bachmann, certains professionnels et élus voient dans le parasismique une contrainte entraînant le ralentissement du marché de l'immobilier.

C'est d'autant plus présent dans l'ouest de la France, là où le nouveau zonage réglementaire a changé le niveau sismique dans un grand nombre de départements. Les conseillers généraux de Vendée dans un manifeste envoyé à la Ministre de l'Environnement du moment, affirmaient que « *l'actuel zonage est totalement inadapté au risque sismique dans notre département. Il pénalise l'activité des professionnels du bâtiment. Or, le bureau central sismologique français n'a pas relevé d'activité sismique plus importante en Vendée qu'en région Bretagne, classée pourtant en zone de sismicité faible !* », propos traduisant à quel point la méconnaissance de l'aléa sismique et des principes de la construction parasismique pouvait amener à des propos erronés.

Rappelons tout de même que deux séismes historiques (région d'Angoulême en 1935, intensité VII ayant entraîné de nombreux dommages, et Ile d'Oléron en 1972) font partie des plus gros séismes connus du XX^{ème} siècle.

Toujours selon un conseiller de Vendée (propos rapporté dans la presse), les normes parasismiques « *entraînent un surcoût s'élevant en moyenne de 8 % à 15 % pour la construction d'une maison* », bien loin du un pour mille constaté en pratique par Bachmann.

Une étude récente pilotée par le ministère de la transition écologique et solidaire (MTEs) indique également que le surcoût moyen en zones II et III n'est que de l'ordre de 1 à 2% pour des bâtiments de classe II à IV, mais sur la base de constructions réalisées selon des principes qui ne sont pas forcément les plus récents. **Ces coûts peuvent certainement encore diminuer.**



Zone PS92/EC8	Classe des bâtiments PS 92 / EC8		
	B/II	C/III	D/IV
Ia/2	1.0/0.7	1.5/0.84	2.0/1
Ib/3	1.5/1.1	2.0/1.32	2.5/1.54
II/4	2.5/1.6	3.0/1.92	3.5/2.24

Comparaison des cartes et des valeurs de dimensionnement entre l'ancienne (PS92) et la nouvelle (EC8) réglementation - Toutes les valeurs ont été revues à la baisse du fait d'une meilleure définition de l'aléa sismique (par exemple Nice ou Strasbourg ont un niveau sismique plus bas pour leur dimensionnement). Par contre, les zones sismiques sont plus nombreuses (ouest de la France) ou ont été réévaluées. C'est le cas de Grenoble, mais la modification reste très modeste : en passant de Ib à 4, les coefficients sont passés de 1.5 à 1.6, 2 à 1.92 et 2.5 à 2.24 pour les classes de bâtiments II, III, IV respectivement.

UN CHANGEMENT RÉGLEMENTAIRE PEUT AVOIR DES CONSÉQUENCES MAJEURES, TANT AU NIVEAU DE LA POLITIQUE DE PRÉVENTION DES RISQUES QUE DE L'ÉCONOMIE GÉNÉRALE DES PROJETS. Il est important de ne pas s'arrêter devant la perspective de surcoûts hypothétiques qui empêcheraient l'application des normes qui visent à assurer la sécurité des biens et des personnes. La réglementation actuelle dépend de l'état des connaissances du moment, elle est donc susceptible de s'améliorer au fil du temps. Cette amélioration de la connaissance a permis de mieux comprendre le lien entre mouvement sismique et comportement des structures. C'est pourquoi de nouvelles méthodes de dimensionnement, plus efficaces et permettant de maîtriser les surcoûts, ont pu aboutir. Ces méthodes doivent être diffusées largement et éviter ainsi la transmission de chiffres erronés sur le coût du dimensionnement parasismique.



VULNERABILITÉ SISMIQUE DU BÂTI EXISTANT

Le bâti existant, c'est-à-dire construit avant la mise en place des règles de construction parasismique, est en général vulnérable. On constate aussi que des structures a priori identiques s'endommagent différemment. Analyser leur vulnérabilité consiste ainsi à essayer de prédire le comportement de ces constructions sous l'action des séismes, en intégrant toutes les incertitudes, et à représenter les conséquences auxquelles s'attendre pour un scénario de séisme.

→ LES SCÉNARIOS SISMIQUES COMME OUTILS DE PRÉVENTION

Pour tenter de réduire le risque, certaines agglomérations comme celle de Nice en France ont fait l'objet d'une **analyse du risque sismique** représentée sous forme de scénarios. Cette analyse a pour objectif la diffusion d'informations auprès du public, la simulation des pertes et des dysfonctionnements, et la mise en place d'un plan d'action pour la gestion du risque sismique dans la vallée.

Ces simulations s'appuient essentiellement sur la définition de **l'aléa sismique** et de la **vulnérabilité des constructions**, puisque la plupart des variables simulées (victimes, pertes économiques...) sont directement corrélées aux dommages.

On peut se demander quel est l'intérêt de ce genre d'exercices coûteux, mais une étude américaine considère que l'investissement de 40 millions de dollars à l'échelle mondiale pour ce genre d'exercices, dans les années 90, doit avoir réduit de 280 millions de dollars les pertes économiques. D'autres exemples concernant les catastrophes naturelles rapportent un ratio [coût des opérations de prévention sur bénéfices en termes de réduction des pertes] favorable, de l'ordre de 1/3.

Ces actions permettent de transférer de façon compréhensible une partie de la connaissance des scientifiques aux politiques et aux populations, en particulier au niveau local comme le recommande le cadre de Sendai de 2015 porté par l'UNESCO pour la réduction des catastrophes naturelles.

- Il est aussi souvent difficile d'avoir accès à toutes les informations nécessaires à ce type de diagnostic (plans deferraillage mais aussi plus simplement schémas du système porteur, caractéristiques des matériaux utilisés, code de dimensionnement utilisé, fondations...).

- De plus, appréhender correctement le comportement sismique d'une structure existante est bien plus difficile que de la dimensionner. En effet, on sait évaluer le comportement d'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.



→ LE BÂTI ANCIEN: UNE DIFFICULTÉ À GÉRER

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 structures (maçonnerie, béton armé, portiques, murs porteurs...) très importants avec des moyens financiers bien évidemment limités.

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 côté aléatoire, c'est-à-dire non prévisible, impose d'estimer le niveau de connaissance du problème, se traduisant par la représentation des incertitudes.

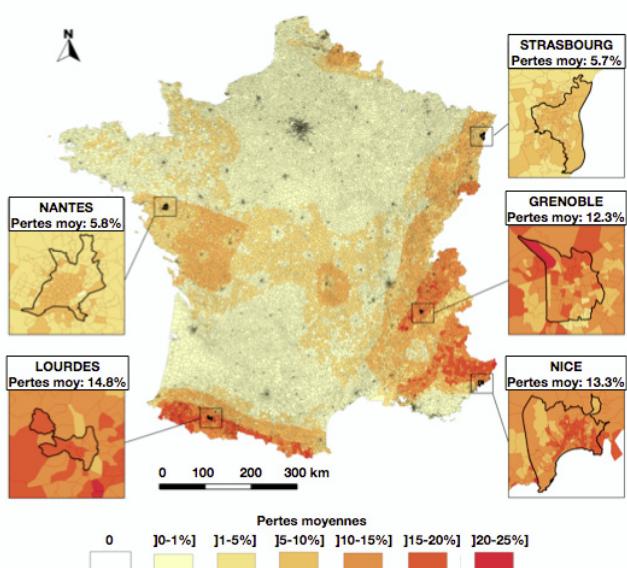
Vulnérabilité sismique - Elle caractérise la capacité des bâtiments et des structures à supporter les secousses sismiques (vulnérabilité physique), et la capacité des populations à se comporter de façon cohérente et raisonnée face à un événement majeur (vulnérabilité sociale). Dans ces deux cas, il est 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 survie 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).

L'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 et améliorer la résilience de la ville.
- 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.



Dommage en pourcentage de la valeur du bien pour un aléa de période de retour 475 ans, obtenu par la méthode URBASIS - Riedel and Guéguen, *Natural hazards*, 2018

PRINCIPE DES MÉTHODES GLOBALES OU EMPIRIQUES

Les méthodes empiriques (qui se basent sur l'observation et l'expérience) d'évaluation de la vulnérabilité suivent à peu près toutes la même démarche :

- Définition d'une typologie afin de classer les bâtiments ;
- 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 deux niveaux d'analyse qui sont le niveau I uniquement empirique (observations) 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 permet de qualifier, selon trois niveaux, la vulnérabilité des bâtiments et d'une ville face aux séismes. Cette méthode reposait sur l'utilisation de questionnaires (auto-administrés) et sur l'inspection visuelle extérieure des structures (type de construction, sa géométrie, l'âge de la construction...). Les résultats ont permis de créer un inventaire et une hiérarchisation sismique des structures tout en mettant en avant la manière dont le risque sismique était perçu par la population. Les connaissances acquises par cette méthode sont ensuite transmises aux gestionnaires.

La méthode URBASIS – Cette méthode consiste à définir sur un jeu de données dans lequel on retrouve à la fois les attributs généraux (comme le nombre d'étages ou la forme du toit), mais aussi la classe de vulnérabilité selon l'échelle d'intensité dite EMS98 et les relations qui relient ces informations par des méthodes d'apprentissage. Une fois la vulnérabilité obtenue, des simulations de variables décisionnelles sont possibles afin de connaître les conséquences d'un séisme ou d'un aléa, comme par exemple les coûts économiques. Cette méthode a l'avantage de s'appuyer sur des données disponibles, à généraliser à l'ensemble d'un territoire.

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 constituent 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 les intégrer à la définition de l'aléa sismique.



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. **Définitions 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

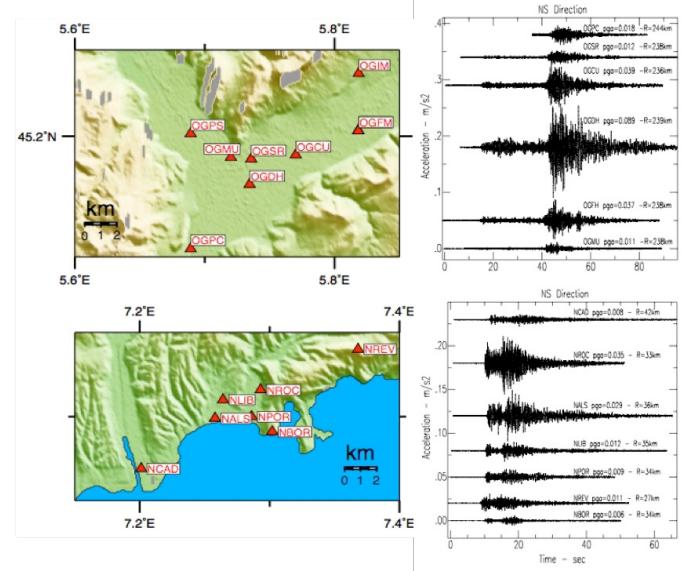
Quelques observations réalisées en France et à l'étranger ont montré que le mouvement sismique du sol était perturbé par la présence d'une topographie marquée. C'est l'hypothèse avancée pour expliquer les dommages importants observés lors du séisme de **Lambesc** (1906) sur le village de Rognes, situé sur un relief marqué. Quelques exemples montrent ailleurs des destructions plus prononcées au sommet des reliefs : par exemple lors du séisme de **San Fernando** de 1971 (Californie), en 1987 lors du séisme de **Whittier Narrows** (Californie) ou en 1994 au cours du séisme de **Northridge** (Californie). Pour ce dernier cas, Spudich, un sismologue de l'US Geological Survey, observa de fortes amplifications du mouvement sismique produit par une série de répliques sismiques entre le haut et le bas d'un relief situé dans Los-Angeles.



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

Ces effets ont également été révélés par des simulations numériques qui montrent 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.



Exemple d'effets dû 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.



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. Par ailleurs, ces villes sont quasi systématiquement fondées sur des **zones de remplissages alluvionnaires** qui **contribuent à l'amplification des mouvements du sol**.

Coburn et Spence affirment que, entre des sols raides ou rocheux et des sédiments mous, les intensités macrosismiques peuvent varier d'un niveau. Pour les constructions les plus fragiles (par exemple en maçonnerie), cela peut correspondre à une augmentation des dommages de l'ordre de 30%, soit une augmentation considérable des pertes humaines.

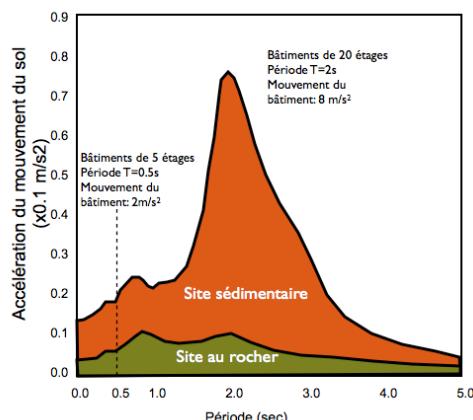
En France, certaines villes présentent des effets de site majeurs. Ce sont par exemple les cas de **Grenoble**, **d'Annecy**, de **Nice** ou de **Lourdes** qui depuis quelques années font l'objet d'une surveillance initiée par le **Réseau Accélérométrique Permanent**.

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.

CONSÉQUENCES DES EFFETS DE SITE SUR LES STRUCTURES

Dans les régions caractérisées par un effet de site majeur, les sols sont souvent constitués de formations sédimentaires, situées au-dessus d'une formation plus dure composée de roche, que l'on appelle le **substratum rocheux**. Dans les sédiments, les ondes de cisaillement émises par un séisme **se propagent à une vitesse plus lente que dans la roche**. Selon la classification des sols donnée par les codes de dimensionnement parasismique (EC8), ces vitesses 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, dans les sols raides, les vitesses sont supérieures à 800 m/s (type de sol A). Ils sont souvent associés à des formations sédimentaires dures à très dures, ou à des formations de roche fracturée ou compacte (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 se retrouve piégée entre le sol et le substratum rocheux.



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.

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.

Ce phénomène de résonance dans la couche entraîne la vibration de cette dernière pour une fréquence dite fondamentale, qui dépend de la vitesse des ondes et de l'épaisseur des sédiments qu'elle traverse.

Plus la couche constituée de sédiments mous sera épaisse, plus l'onde sismique sera amplifiée dans les basses fréquences. C'est-à-dire qu'elle aura principalement un impact sur les structures les plus hautes.

Inversement, plus la couche sera fine, plus l'onde sera amplifiée dans les hautes fréquences, avec des conséquences sur les bâtiments les moins hauts.

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.



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

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 dissipateurs 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.

LES BÂTIMENTS CONSTRUIS SUR DU ROCHER NE SONT PAS PLUS SURS 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.



LES RÉPLIQUES

Après un séisme important, il n'est pas rare de constater que de nombreux séismes de plus faible magnitude se produisent dans la zone de l'épicentre. Leur nombre et la durée de la séquence sismique varient d'un séisme à l'autre mais ils peuvent continuer à endommager les structures déjà fragilisées par le séisme principal. Surtout, ils maintiennent les personnes déjà affectées dans un état d'inquiétude constante, les fragilisant psychologiquement. Anticiper les répliques est une activité difficile sur laquelle de nombreux chercheurs se penchent.



UNE SÉQUENCE SISMIQUE

Un tremblement de terre se décompose souvent en une séquence de trois étapes successives :

Les précurseurs – Avant le séisme principal, on voit parfois se produire des séismes annonciateurs : **les précurseurs**. Ceux-ci sont habituellement peu nombreux, pas toujours ressentis par la population et ils couvrent généralement une période située immédiatement avant le séisme principal. On considère qu'environ 40% et 70% des séquences sismiques ont des précurseurs, respectivement pour des séismes modérés à forts et des séismes de magnitude supérieure à 7.

Il est difficile d'identifier parmi l'activité sismique moyenne les séismes précurseurs, ces derniers sont généralement identifiés a posteriori.

En combinant de nombreuses observations, on constate que les précurseurs font partie de la **phase de préparation de la nucléation du séisme principal**. La nucléation correspond à un changement des conditions au niveau d'une faille, aboutissant à l'apparition d'un tremblement de terre. Le point de nucléation correspond à l'endroit sur la faille où commence le séisme, en réaction à une augmentation des contraintes présentes dans la croûte terrestre.

Le séisme principal – La deuxième étape couvre un temps court, caractérisée par le séisme ayant la plus forte magnitude de la séquence. D'origine tectonique, il correspond à une **décharge de l'énergie accumulée dans la croûte, capable de produire une rupture le long d'une faille**.

La durée du séisme principal correspond au temps nécessaire à la rupture pour se développer. Elle dépend de la magnitude du séisme et les vibrations associées vont aussi dépendre de la distance à laquelle nous nous situons par rapport à l'épicentre. Généralement, cette séquence s'étale sur plusieurs dizaines de secondes, atteignant parfois quelques minutes pour les plus fortes magnitudes.

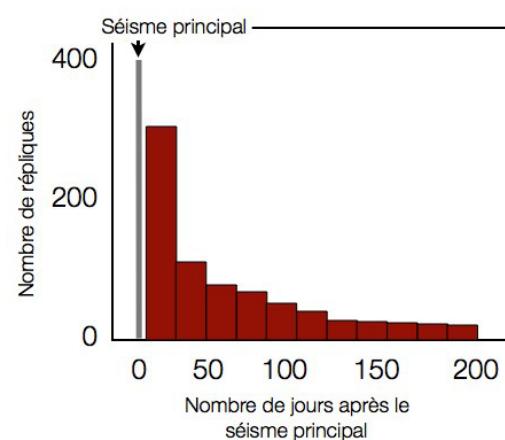
C'est au cours de cette séquence que se produisent généralement les plus fortes conséquences, économiques et humaines.

Les répliques – Enfin la troisième étape couvre celle des répliques, c'est-à-dire la période durant laquelle **des centaines, voire des milliers de séismes se produisent en réaction au tremblement de terre principal**. En général, leur nombre varie avec la magnitude et la nature du séisme principal.

Leur magnitude est toujours inférieure à celle du séisme principal. En général la réplique la plus forte a une magnitude inférieure de 1.1 à 1.2 par rapport à celle du séisme principal selon la loi proposée par Markus Bath en 1965.

Les répliques se localisent essentiellement sur le plan de faille du séisme principal ou sur des failles proches situées dans les zones mises en charge par le séisme principal. Elles couvrent ainsi une région proche de la zone de l'épicentre, de l'ordre de la longueur de la faille ayant rompu. Les répliques peuvent s'étaler sur un temps très long, avec **des conséquences importantes sur les personnes et les structures déjà fortement fragilisées par le séisme principal**.

Pour mieux les interpréter, des réseaux d'intervention post-sismique sont généralement déployés rapidement après le séisme principal, afin de mieux identifier la faille qui a rompu, les mécanismes des séismes, les processus en jeu, etc.



Décroissance du nombre de séismes dans la région du séisme de Maule (Chili, 2010) en fonction du temps écoulé depuis la date du séisme. Ces répliques ont été enregistrées par le réseau temporaire d'intervention post-sismique du CNRS/INSU, installé une semaine après le séisme principal. (Données RESIF-DC).

L'organisation d'une séquence sismique suit en général cette structuration mais bien évidemment il est possible de voir des séquences s'éloignant plus ou moins de ce modèle général. Cependant, on constate dans la nature que ce modèle représente la grande majorité des séquences sismiques observées.



COMMENT GÉRER LA PÉRIODE DES RÉPLIQUES ?

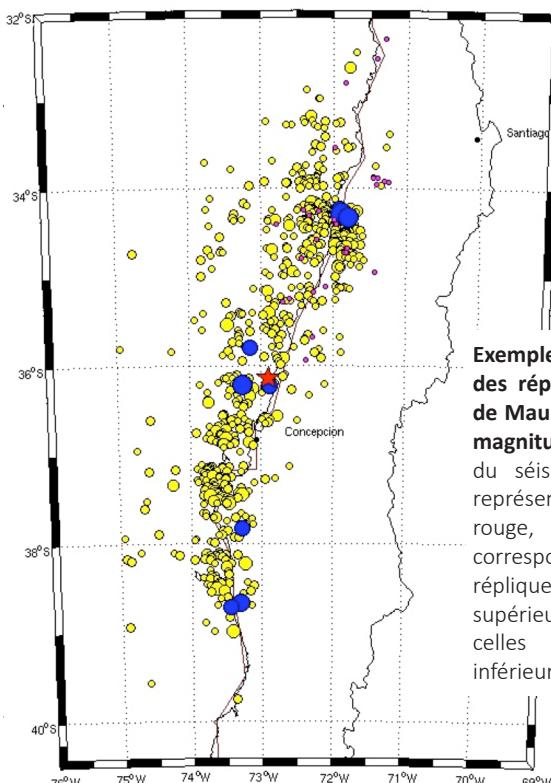
La répartition en temps des répliques

Après le séisme principal, le nombre de répliques se produisant par unité de temps (c'est-à-dire le taux par minute, heure, jour...) décroît rapidement. **Le taux de répliques est proportionnel à l'inverse du temps écoulé depuis le séisme principal.** On peut l'utiliser afin d'estimer la probabilité qu'une réplique se produise au cours du temps. Ainsi, quelle que soit la probabilité qu'une réplique se produise le premier jour, le deuxième jour la probabilité est égale à la moitié de la probabilité du premier jour et le dixième jour correspondra à environ 1/10 de la probabilité du premier jour, etc...

Cette relation empirique a été décrite pour la première fois par un sismologue japonais (Fusakichi Omori en 1894) et est connue comme la **loi d'Omori**.

Simultanément, le nombre de répliques par magnitude après un séisme principal suit une loi du type Gutenberg-Richter. En combinant ces deux lois, **il est possible de déterminer la probabilité d'avoir une réplique ainsi que sa magnitude, en fonction du temps.** Des études récentes ont montré que le régime de décroissance des répliques est fonction de la région où a lieu la séquence.

L'analyse des répliques sismiques permet d'enrichir et de compléter la connaissance du séisme principal. Néanmoins, de nombreuses interrogations restent à approfondir en ce qui concerne la distribution en temps et en espace des répliques.



Exemple de localisation des répliques du séisme de Maule (Chili, 2010) de magnitude 8.8. La position du séisme principal est représentée par l'étoile rouge, les cercles bleus correspondent aux répliques de magnitude supérieure à 6, en jaune celles de magnitude inférieure à 6.

La fragilisation des bâtiments

Au cours d'une séquence de séismes, les bâtiments sont susceptibles d'accumuler les dommages. Ils peuvent se fragiliser pendant le séisme principal, puis ne plus être capables de résister à une réplique de magnitude inférieure, pouvant entraîner leur ruine totale.

C'est la raison pour laquelle, immédiatement après un séisme, architectes et ingénieurs sont mobilisés afin d'évaluer rapidement l'intégrité des bâtiments sur lesquels ils vont appliquer un tag : vert, le bâtiment est a priori sûr ; rouge, le bâtiment doit être détruit ; orange, le bâtiment présente des faiblesses et devra être analysé plus tard. Cette classification permet de **donner l'autorisation aux populations de réintégrer leur domicile.**

Cette évaluation rapide est certes imprécise mais la pression des populations à vouloir réintégrer leur domicile impose une rapidité d'exécution. La mise en sécurité des populations est importante comme on l'a vu lors du séisme de Christchurch (Nouvelle-Zélande, 2010) au cours duquel ce sont les répliques qui ont provoqué le plus de pertes.

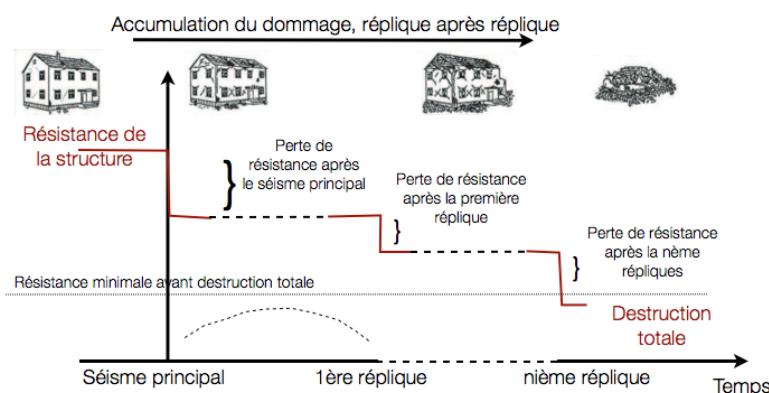


Illustration de l'accumulation du dommage, réplique après réplique. Les structures fragilisées après le séisme principal, résistent moins et peuvent continuer à s'endommager avec des séismes de plus faible magnitude qui caractérisent la séquence de répliques.

La gestion des personnes

Au cours de ces répliques, la gestion des populations est essentielle. Passé le choc psychologique du séisme principal, les répliques entretiennent un état de stress. Ce stress entraîne sur le long terme des conséquences non négligeables pour la société, et préparer les populations est également un élément du dispositif de prévention vis-à-vis du risque sismique. Des témoignages décrivent également avoir ressenti des "séismes fantômes", c'est-à-dire des secousses sans tremblements de terre, à la manière des marins qui, une fois à terre, continuent de sentir la houle.

LES RÉPLIQUES SONT DIFFICILES À GÉRER. Il est encore compliqué d'estimer quand et avec quelle magnitude une réplique va se produire, même si l'apport des nouvelles données permet une meilleure compréhension du processus. Dans une séquence sismique, la gestion de la phase des répliques est complexe pour les autorités, à cause de l'état de stress, de l'urgence et des bâtiments à évaluer. Il faut néanmoins intégrer le fait que si un séisme majeur se produit, avoir anticipé l'après permet une meilleure gestion et réduit considérablement les pertes.



LA SISMICITÉ INDUIITE

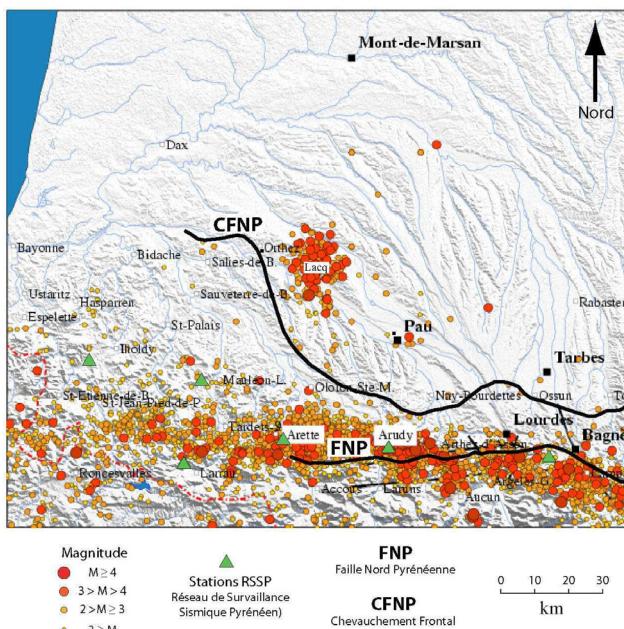
À cause de certaines activités, l'Homme provoque parfois des tremblements de terre. Même si cela est avéré depuis longtemps, une augmentation des cas de sismicité induite est apparue ces dernières années, essentiellement en lien avec la recherche de nouvelles sources d'énergie. Cette sismicité, parfois située dans des régions n'ayant jusqu'à présent pas eu de séismes naturels, implique de considérer ces nouveaux séismes, de comprendre leurs processus et d'évaluer si de nouvelles cartes d'aléa sismique doivent être proposées.



ORIGINE DE LA SISMICITÉ INDUIITE

Puisqu'un tremblement de terre est associé à une rupture le long d'une faille, on peut imaginer que toute **modification artificielle** des contraintes altère l'équilibre dans la croûte, et est donc susceptible de générer un séisme. C'est effectivement le cas dans ce que l'on nomme la **sismicité induite**, provoquée par différentes actions :

L'exploitation des géo-ressources – Ce n'est pas nouveau, l'exploitation de ressources de la terre, issues de **mines** ou de **gisements d'hydrocarbures**, modifie les contraintes naturelles dans la terre. En France, les cas les plus connus sont ceux du gisement de **Lacq** (Pyrénées), où la sismicité est produite par l'extraction du gaz, et de **Gardanne** (sud-est) où l'effondrement des voûtes ou des parois des anciennes mines provoque des séismes.



La sismicité autour du gisement de Lacq. On observe une sismicité très localisée, sans lien avec la sismicité naturelle de la région. *extrait de T. Bardaine, Thèse de doctorat de l'Université PPA, 2005.*

Les remplissages des barrages – La masse apportée par un remplissage artificiel peut **modifier localement les contraintes dans la croûte terrestre**, et en particulier le long de failles préexistantes. Il semblerait ainsi, selon un article publié dans la revue *Nature*, que le remplissage du barrage des **Trois Gorges** (Chine) soit à l'origine du séisme du **Sichuan** de

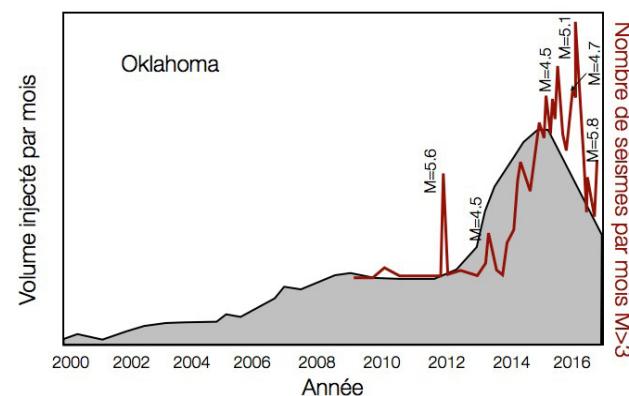
2008 ayant entraîné environ 70 000 victimes. Ce cas reste à confirmer, mais d'autres exemples existent : celui du remplissage du barrage du **Monteynard** (proche de Grenoble) en 1963 a provoqué un séisme de magnitude supérieure à 4.

L'exploitation par fracturation hydraulique

L'injection à haute pression de fluides dans les roches peu perméables est à l'origine d'une sismicité intense. Elle est utilisée afin de créer des fractures et faciliter la récupération des hydrocarbures. **La sismicité associée est généralement faible en surface**, sans conséquences majeures. Cependant, cette technique est également utilisée en géothermie, une ressource durable, qui dans le cas de **Bâle** en Suisse a provoqué des séismes très superficiels de magnitude supérieure à 3 ayant entraîné l'arrêt temporaire du programme géothermique national. En France, le site de **Soulz-la-Forêt (Bas-Rhin)** est le cas le plus connu et le plus surveillé, avec une sismicité intense et des magnitudes de l'ordre de 3.

L'injection de déchets ou de fluides pour stockage

L'injection à très haute pression de déchets issus de l'exploitation pétrolière, ou pour le stockage de CO₂ en profondeur, est à l'origine d'une **sismicité intense**. Les cas les plus remarquables sont ceux du site **Valence** en Espagne (centre de stockage de gaz liquide) et de l'**Oklahoma**. À Valence, la concentration de la population et l'augmentation très forte de la sismicité ont entraîné l'arrêt du projet. Les séismes de l'Oklahoma sont les plus marquants de ces dernières années, atteignant des magnitudes supérieures à 5.



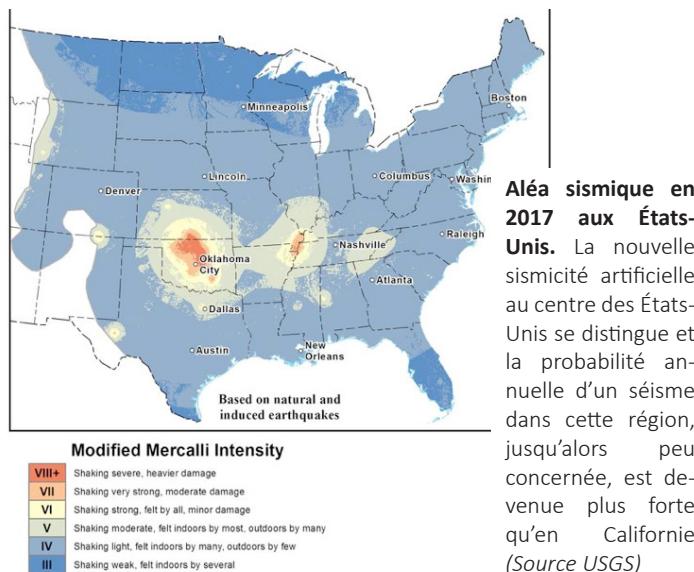
Corrélation entre le volume injecté par les compagnies pétrolières en Oklahoma et la sismicité locale. On observe un forçage des séismes, avec un décalage de quelques mois avec les volumes injectés. - *D'après Langenbruch and Zoback, Science Advance, 2016.*

D'autres sources de sismicité induite ont été observées : des essais nucléaires souterrains ou la construction de la tour 101 à **Taipei** (Taiwan) ayant localement réactivé une faille cachée. Cependant, c'est une sismicité marginale comparée à celles produites par **l'exploitation des géo-ressources**. C'est un sujet sociétal fort dont les enjeux économiques sont importants.

CONSÉQUENCE DE LA SISMICITÉ INDUIITE POUR LE RISQUE SISMIQUE

Modification de l'aléa sismique – Une étude récente publiée dans le *Bulletin de la Société Américaine de Sismologie* suspecte l'exploitation pétrolière intensive en **Californie** du début du XIXème siècle d'être à l'origine des séismes les plus importants. Il est alors raisonnable de se demander dans quelle mesure **l'activité humaine** peut avoir modifié la représentation de l'aléa sismique d'une région ou d'un pays.

Avec l'enjeu des ressources énergétiques au centre des préoccupations de nombreux décideurs, cette situation devrait normalement se maintenir, voire même se généraliser. Le cas récent de l'**Oklahoma** indique clairement à court terme une modification notable de l'aléa sismique au centre des États-Unis, dans une région jusqu'à maintenant sans activité sismique. Elle devrait raisonnablement être prise en compte dans **la définition des règles de construction**.



La fragilisation des bâtiments – Cette « nouvelle » sismicité engendre des vibrations du sol. À la différence de la sismicité naturelle, plus profonde, celle-ci se situe plus en surface et pour des séismes dits modérés (magnitude autour de 3 et 4), les vibrations peuvent être importantes. Se pose alors la question des constructions présentes à proximité qui jusqu'à présent ne devaient pas être conçues en respectant les **règles parasismiques**, mais nouvellement confrontées à une sismicité non négligeable.

La gestion du bâti existant, sa vulnérabilité et son évolution dans le temps doivent être considérées sous un nouvel angle d'autant que le mouvement sismique induit ne présente pas forcément les mêmes caractéristiques que celui naturel : un nouveau champ d'activités scientifiques est en développement.

Conséquence économique et sociale – La sismicité induite implique **des conséquences socio-économiques majeures**. Le cas de **Groeningen** aux Pays-Bas, un champ gazier important, en est certainement l'illustration la plus flagrante. La population locale est exposée à de nouvelles conséquences : des **dommages aux constructions**, la **baisse des prix de**

l'immobilier, des **inquiétudes concernant les risques de rupture des digues des polders**, un **sentiment d'anxiété et d'insécurité** engendrant des problèmes de santé, de la colère... Ces impacts sociaux et émotionnels sont exacerbés par la défiance de plus en plus grande vis-à-vis des compagnies pétrolières et du gouvernement, et ont ré-ouvert des discussions sur la répartition inégale des produits de la production de gaz, la région locale exposée n'en tirant que très peu d'avantages directs.

La production a été ralentie mais cette manne économique est indispensable aux Pays-Bas. De nombreux plans de prévention et d'atténuation ont été mis en place afin de regagner en légitimité, et la recherche très active se focalise sur la compréhension des processus physiques à l'origine de la sismicité, afin de proposer des dispositifs de suivi et de contrôle en fonction des volumes exploités.



Conséquence médiatique de la sismicité de Groningen (Pays-Bas). Parce que les personnes exposées ne sont pas celles qui profitent des retombées économiques de l'exploitation, la pression sociale est forte et a requis un investissement très important des autorités en gestion et plan de prévention.

Un autre exemple est celui des projets de géothermie en Suisse. La sismicité induite ayant fortement impacté les populations locales, qui n'acceptent pas cette nouvelle nuisance, le programme national a été stoppé pendant plusieurs années. Mais cela a également incité les autorités à anticiper les nouvelles exploitations, par la réalisation d'étude de risque et d'impact comme dans la région de Genève, pendant presque 2 ans avant la mise en exploitation.

LA SISMICITÉ INDUIITE, UN ENJEU DE SOCIÉTÉ POUR L'AVENIR. La recherche de nouvelles sources d'énergie risque de voir se généraliser la sismicité induite. Même les énergies vertes comme la géothermie, pourtant acceptée par les populations, sont remises en question du fait du risque qu'elles peuvent faire encourir aux populations. De nombreux programmes de recherche sur le contrôle forcé de cette sismicité artificielle, sur la prédition des conséquences sur les constructions vulnérables et sur les impacts économiques ont été lancés au niveau mondial afin de répondre aux enjeux de sociétés associés et qui nous concernent tous.



LES ESSAIMS SISMIQUES

Parfois, on observe une augmentation rapide et très localisée de la sismicité, sans qu'aucune raison apparente ne soit identifiable. Ce phénomène, appelé essaim sismique, n'est pas exceptionnel puisqu'il s'observe un peu partout où la tectonique est active. En revanche, l'essaim sismique surprend et inquiète les populations locales, notamment car son activité est susceptible de durer longtemps, ce qui soulève des interrogations quant à l'imminence d'un séisme plus fort. Ces essaims restent difficiles à appréhender par les autorités locales et les scientifiques qui essayent de mieux comprendre les processus en jeu.

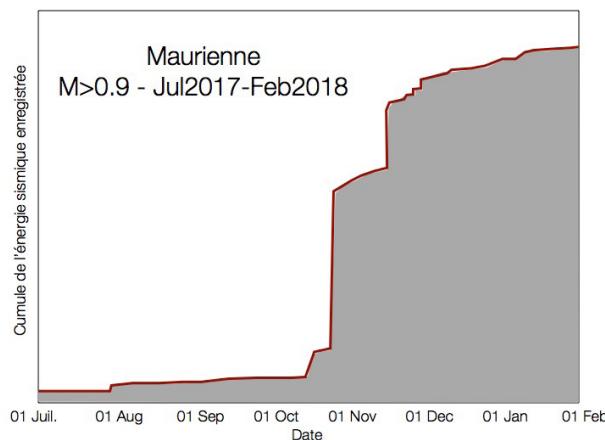


QUE SAIT-ON DES ESSAIMS ?

Lorsqu'ils sont naturels, c'est-à-dire non induits par un forçage artificiel, les essaims correspondent à une augmentation localisée de tremblements de terre, concentrés dans l'espace et dans le temps, sans qu'un événement plus grand que tous les autres ne se distingue ... Jusqu'à ce que, parfois, un séisme plus important se produise. Cette incertitude empêche la gestion efficace et sereine de la crise sismique.

La période d'activité d'un essaim varie : elle peut être de l'ordre de quelques jours, semaines ou mois, voire même quelques années. Il n'est pourtant pas aisé, à la fin de la période, de distinguer clairement l'activité de l'essaim de l'activité sismique classique de la région.

Les tremblements de terre classiques se composent généralement d'un choc principal suivi de répliques. Concernant l'essaim, l'activité sismique suit un cycle d'augmentation puis de décroissance progressive, c'est pourquoi un seul séisme ne peut pas forcément être identifié comme étant le choc principal.



Quelques raisons, parmi d'autres, à l'origine des essaims peuvent être :

- Des circulations de fluides ou de la géothermie naturelle dans la croûte terrestre qui activent le glissement le long de failles existantes.
- Des glissements lents, que l'on nomme asismiques, le long de failles et qui génèrent des petites séquences de séismes.

• Une **activité magmatique profonde soudaine**, qui provoque l'ouverture de fissures et la génération de séismes.

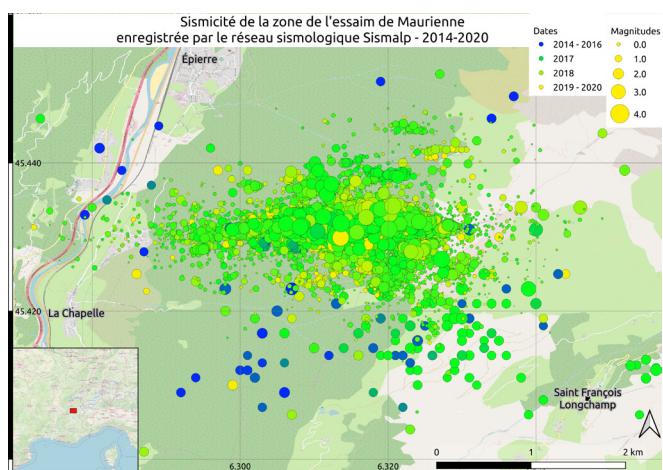
• La **modification locale des contraintes** dans des régions en équilibre instable, provoquée par le passage des ondes d'un séisme lointain.

Il n'existe pas de prédiction avérée des essaims. Les questions sur lesquelles se penchent les scientifiques et qui permettront d'améliorer leur gestion sont :

« Pourquoi un essaim se déclenche ? Combien de temps il va durer ? Quelle va être la magnitude la plus importante de la séquence ? ».

Des questions compliquées, au regard des processus physiques complexes qui contrôlent ces paramètres !

Dans le massif des Alpes, quelques **essaims sismiques connus sont actifs**, avec des périodes fréquentes de réactivation : **l'essaim de Vallorcine (74)** et **l'essaim de l'Ubaye (04)**, qui provoquent l'inquiétude des populations, d'autant qu'ils sont localisés à proximité de deux séismes historiques (**Chamonix, 1905, Ubaye 1959**). Un troisième essaim récemment activé se situe sur la commune de La Chapelle (**Vallée de la Maurienne, 73**). Jusqu'alors inactif (en tout cas depuis 1989 et la mise en place de l'observation instrumentale des Alpes), il vient récemment de se déclencher, illustrant que ces phénomènes peuvent survenir partout dans les Alpes, exposant alors potentiellement à ce phénomène les 2 millions d'habitants qui y résident.



L'essaim sismique de la Maurienne - L'observation sismique, depuis 1989, montre à partir de 2015 une augmentation anormale de la sismicité, brusque et très localisée à l'entrée de la vallée.



GESTION ET PRÉDICTION DES ESSAIMS SISMIQUES

L'objectif ultime d'un programme efficace de gestion de la sismicité en essaim est d'**appréhender**, voire d'**anticiper**, le risque sismique qui en résulte.

Le risque sismique peut être défini comme **la probabilité que des conséquences indésirables surviennent suite à l'apparition de tremblements de terre**. Ces conséquences peuvent inclure entre autres des pertes humaines, des blessés, l'effondrement des bâtiments, des coûts économiques et l'interruption des activités.

Pour le cas particulier de la sismicité en essaim, les conséquences pour la population affectée peuvent se traduire par des **troubles psychologiques liés à l'angoisse**. Ces conséquences peuvent également concerner la **dégradation de l'image attractive d'une région ou d'une ville**, du fait de son exposition, mais aussi à cause de la non-considération de cette exposition par les autorités en charge de la gestion des territoires.

Entre les tremblements de terre et les essaims (naturels ou anthropiques) les processus physiques peuvent être différents, mais dans le cadre de leur gestion, les mêmes questions clés se posent. Elles concernent la magnitude maximale possible, les mouvements du sol associés créant les vibrations, le ressenti et les dommages aux structures et infrastructures, etc...

Les populations impactées s'interrogent sur l'évolution du phénomène : elles se tournent alors vers les **services de l'état**, qui eux-mêmes se tournent vers les **scientifiques**. Cette situation impose la mise en place d'une pédagogie en amont ou rapidement pendant la crise, d'une analyse précise et une communication maîtrisée, afin que les messages envoyés par les scientifiques soient les plus compréhensibles et les plus assimilables par les populations affectées.

Deux exemples récents de séquence d'essaims reflètent les enjeux qui leur sont associés :

- La séquence de **Kumamoto au Japon** (2016), avec une magnitude maximale de 7.0 ayant causé environ 50 morts, 1 000 blessés et des pertes économiques, confirme l'aspect critique de ces séquences pour la gestion de crise.
- La séquence de **L'Aquila en Italie** (2019), ayant entraîné la mort d'environ 300 personnes et la mise en examen des scientifiques pour défaut de communication, illustre à elle seule les efforts qui doivent être fournis afin d'améliorer la compréhension des processus à l'origine des essaims, la prédition de leurs effets, la communication et l'information en cas d'activation.

CE N'EST PAS PARCE QU'UN ESSAIM S'ACTIVE QUE TOUTE L'ÉNERGIE ACCUMULÉE VA SE LIBÉRER DOUCEMENT SANS QU'UN SÉISME PLUS FORT NE SE PRODUISE. C'est toute la difficulté d'interprétation des séismes ainsi enregistrés, étant actuellement dans l'impossibilité de connaître la magnitude la plus forte probable lorsqu'une séquence en essaim démarre. Il faut donc se tourner vers d'autres moyens de prévention et de gestion : la pédagogie, l'éducation et l'information. L'exemple de L'Aquila n'incite cependant pas les scientifiques à participer à cette action de prévention auprès des populations exposées. L'observation doit se maintenir afin d'apporter des éléments permettant de mieux comprendre et anticiper ces séquences.

Il existe cependant de nombreux autres essaims sismiques dont l'activité reste modérée. Mais attention de ne pas imaginer que lorsqu'un essaim démarre, les contraintes libérées empêcheront qu'un séisme plus important se produise. Le cas de L'Aquila doit nous rappeler la prudence avec laquelle les informations doivent être transmises aux populations.



Séisme de l'Aquila: les sept scientifiques italiens acquittés

Condamnés en première instance à six ans de prison, les sept experts ont finalement été acquittés en appel ce lundi par la Cour d'appel de l'Aquila. En 2012, ils avaient été accusés d'avoir sous-estimé les risques sismiques avant le séisme meurtrier de 2009.



Aquila: "Les sismologues ne possèdent pas la vérité absolue"

Au lendemain de la condamnation de scientifiques italiens à 6 ans de prison pour avoir sous-estimé les risques sismiques dans la région de l'Aquila en Italie, la communauté scientifique est sous le choc. La réaction de Robin Lacassin, directeur de l'équipe de tectonique à l'Institut de physique du globe.



Procès du séisme de l'Aquila: les experts condamnés à 6 ans de prison

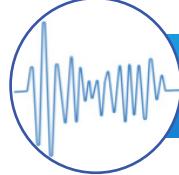
Les scientifiques ont été reconnus coupables d'avoir sous-estimé les risques avant le séisme meurtrier de l'Aquila en Italie le 6 avril 2009. Le parquet avait requis quatre ans de prison.



Aquila: "Ce n'est pas juste la sismologie qui a été jugée, mais toute la science"

La communauté scientifique dénonce à l'unanimité le jugement "incroyable" du procès du séisme de L'Aquila, survenu en 2009 en Italie. Il est, selon elle, rigoureusement impossible de prévoir un

Extrait de la séquence d'articles publiés par l'Express - Condamnés en première instance, les scientifiques de la commission d'expert des Grands Risques italiens seront finalement acquittés



ALERTE PRÉCOCE

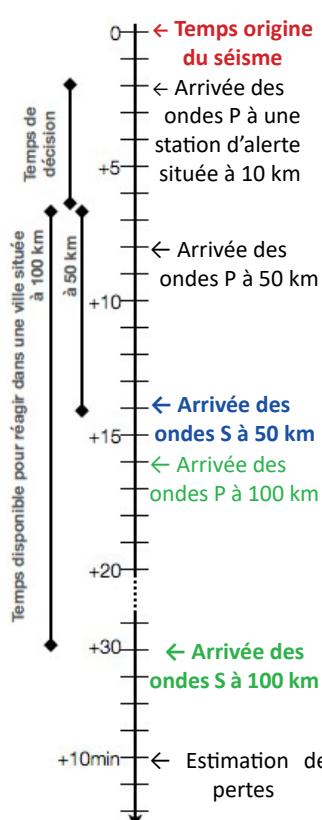
Pour l'instant, la prédiction des séismes est impossible. En revanche, des initiatives voient le jour partout dans le monde afin d'être en mesure de faire de l'alerte précoce, c'est-à-dire être prévenu quelques instants avant l'arrivée des ondes sismiques sur la région exposée. L'intérêt de tels dispositifs est d'arriver à prendre des mesures rapides afin d'atténuer certaines conséquences ou effets indirects du séisme qui amplifient les pertes humaines et économiques.



QUELQUES SECONDES OU MINUTES POUR RÉAGIR

À la différence d'autres risques naturels qui peuvent compter sur des prévisions ou des signes précurseurs suffisamment fiables, donnés par des réseaux terrestres ou des images satellites, **aucun signe précurseur n'a été jusqu'à maintenant validé scientifiquement pour prédire l'occurrence imminente d'un tremblement de terre**. Cependant, il est possible de s'appuyer sur certains processus physiques connus concernant les tremblements de terre et la propagation des ondes pour tenter une alerte.

Donner l'alerte est impossible sans les avancées technologiques de ces vingt dernières années qui ont vu les réseaux de surveillance sismologique se moderniser rapidement. La généralisation du transfert en continu des enregistrements du mouvement du sol vers les centres opérationnels rend possible une **surveillance permanente** et le **développement de solutions** de plus en plus efficaces, qui mobilisent chercheurs et opérationnels.



Immédiatement après qu'un séisme se soit produit, les ondes sismiques se propagent dans la croûte. Il faut un certain laps de temps pour que les ondes parcourent la distance qui sépare l'hypocentre du séisme et les zones à alerter. C'est ce laps de temps qui est utilisé par les sismologues pour tenter de mettre en place une alerte, dite précoce si celle-ci est diffusée le plus en amont possible de l'arrivée des ondes qui vont produire les dommages.

Chronogramme de l'alerte précoce. Un des enjeux est de réduire au maximum le temps de décision qui comprend la récupération des données, le calcul des paramètres importants et la prise de décision.

Toutes les ondes ne se propagent pas à la même vitesse et il est admis que ce sont les ondes les plus lentes (ondes de cisaillement ou ondes S) qui sont les plus nocives pour les environnements urbains.

On peut alors profiter du laps de temps supplémentaire donné par la différence de temps d'arrivée des ondes les plus rapides, les ondes de compression (ou ondes P), et des ondes S, pour calculer et transmettre des informations.

La temporalité de la séquence sismique va déterminer la série d'informations à évaluer et à utiliser pour enclencher les actions à mettre en place pour réduire l'impact du séisme. Tout l'enjeu est donc de pouvoir produire en quelques secondes (<5 secondes) les informations essentielles :

La localisation du séisme

L'amplitude des ondes diminue avec la distance, et ainsi leur impact sur les zones urbaines. À plus courte distance, les conséquences vont dépendre de la position du séisme en profondeur et si l'évaluation rapide de ce paramètre reste encore imprécise, des recherches scientifiques se consacrent à son estimation.

La magnitude du séisme

Plus la magnitude sera importante, plus l'énergie des ondes sismiques sera élevée. La magnitude est évaluée à partir des enregistrements fournis par les stations de surveillance. Il semble donc illusoire de prédire le futur avant de l'avoir vécu. Cependant, certains travaux se penchent sur l'utilisation des 2-3 secondes des premières ondes enregistrées pour tenter de prédire la magnitude qu'aura au final le séisme. Le laps de temps entre ondes P et S permet de diffuser cette information avant l'arrivée des ondes destructrices sur la zone à alerter.

Le mouvement du sol

Ce paramètre va donner la nocivité de la secousse. Il dépend de la distance et de la magnitude mais aussi d'autres paramètres comme ceux décrivant la rupture (le type de faille et le type de rupture associée, certains effets dits de directivité qui privilégient une direction de plus forte intensité, etc...). Des avancées importantes ont été faites ces dernières années, mais il reste encore beaucoup d'efforts afin d'arriver à une estimation fiable.

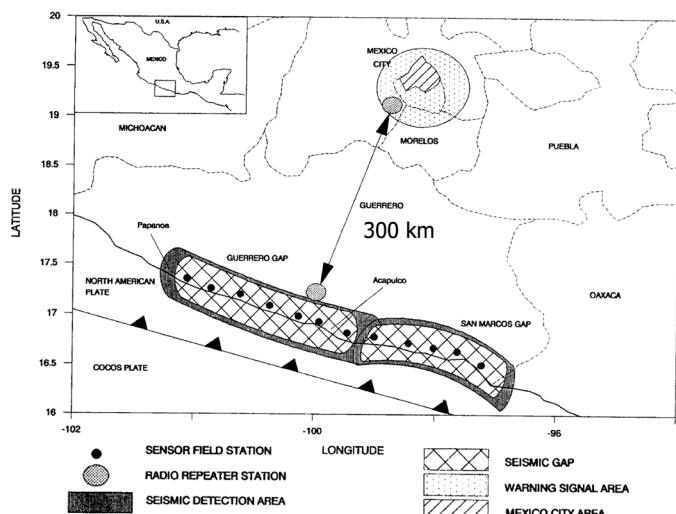


QUELQUES EXEMPLES ET CONTRE-EXEMPLES

L'objectif des alertes précoce n'est pas l'évacuation des populations mais l'anticipation d'actions à déclencher rapidement pour limiter les conséquences des séismes. Les informations d'alerte peuvent ainsi être transmises aux hôpitaux, aux gestionnaires des transports publics, aux centres de production d'énergie, ou aux agences gouvernementales qui prennent alors des contre-mesures pour limiter les pertes. C'est ce qui est mis en place à **Mexico City**, **Taiwan**, **Istanbul** ou au **Japon**, pays précurseurs en alerte précoce, bénéficiant d'une configuration adaptée.

Par exemple, lors du séisme de **1985 au Mexique**, l'épicentre situé à 400 km environ de Mexico aurait permis un délai d'une minute pour avertir les populations, ce qui aurait très certainement diminué le nombre de victimes. Le Japon donne un autre exemple de système d'alerte : pour répondre à la menace des grands séismes japonais situés en mer, le Japon a installé des stations de mesure au fond des océans au plus proche des localisations probables des tremblements de terre, pour anticiper l'arrivée des ondes sur les îles en augmentant au maximum le temps de décision.

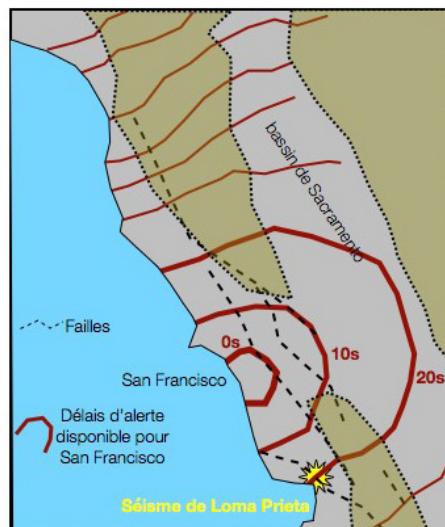
On constate, lors des grands séismes, que **les victimes sont essentiellement dues à la destruction des constructions de mauvaise qualité, de quelques étages**. Leur évacuation peut ne prendre que quelques secondes et l'alerte précoce trouve pleinement sa raison d'être.



Exemple de la configuration mexicaine. Les ronds sont les stations d'alerte mises en place le long de la zone de subduction, en grisée et hachurée la zone sismogène sous surveillance. A 300km, la ville de Mexico. D'après Erdik, 2006.

Plusieurs séismes passés auraient pu bénéficier d'un tel système. Par exemple, lors du séisme du **Pakistan** (2005), 80% des bâtiments ont été détruits dans la ville d'**Uri** située à 60km de l'épicentre. Le délai entre les ondes P et S était de 7.5s, l'arrivée des ondes S a nécessité 18s, donnant un temps d'alerte d'environ 10s pour évacuer les habitations. À **Islamabad** située à 105km et durement touchée par le séisme, une alerte aurait bénéficié de plus de 20s de délais. À **Pisco** (Pérou) en 2007, 80% des bâtiments ont été détruits à 50km de l'épicentre. Le délai entre les ondes P et S était de 6s environ, avec une onde S arrivant au bout de 15s, c'est-à-dire un temps disponible pour la décision de 10s environ. En même temps, à Ica (115 km de l'épicentre) ce sont 30s disponibles pour se mettre à l'abri.

Évidemment d'autres situations ne sont pas favorables à la mise en place d'un système d'alerte précoce. À **Bam** (Iran) en 2003, les ondes S arrivant en moins de 4s, aucun système n'aurait permis une anticipation. En **France** métropolitaine, la géographie des villes exposées à proximité des séismes ne permet pas la mise en place d'un système d'alerte précoce, les temps de propagation étant trop courts. Aux **Antilles**, la zone de subduction se situant à plusieurs kilomètres, des îles pourraient bénéficier d'un tel système.



Exemple de la Californie. Le réseau dense de stations permet une détection rapide des séismes pouvant affecter San Francisco. Le délai d'alerte disponible aurait été dans le cas du séisme de Loma Prieta (1989-M 6.9) de 20s. (d'après R. Allen)

Mais certains séismes (autres que les séismes de subduction) exposent aussi des régions à un aléa important. Se posent alors d'autres questions sociales, comme la gestion et le coût des fausses alertes (qu'il faut absolument maîtriser, par exemple en augmentant le nombre de stations de surveillance et la redondance de l'information), le fait de ne pouvoir anticiper tous les séismes pouvant se produire, et donc ne pas recevoir systématiquement une information, et enfin choisir d'informer uniquement les autorités et les institutions ou entreprises ciblées. Sur ce dernier point, le Japon a décidé de mettre en place un système directement à destination des populations : recevoir un message, même quelques secondes avant sans pouvoir réagir, permet malgré tout d'éviter la surprise et de préparer le corps à subir l'effet du séisme, atténuant également les conséquences psychologiques.

L'ALERTE PRÉCOCE PEUT PERMETTRE L'ANTICIPATION D'UN SÉISME ET LA RÉDUCTION DES PERTES HUMAINES. Il reste encore beaucoup de chemin avant de rendre le système opérationnel (gestion des fausses alertes) mais l'évolution des stations de mesure et l'apport des nouvelles technologies nous permettent d'imaginer des systèmes efficaces dans un futur proche. Se pose néanmoins la question de la pertinence d'un tel système pour un pays à sismicité modérée, notamment vis-à-vis du rapport coût-bénéfice comparé à la mise en place sur le long terme de la réglementation parasismique.



DROIT ET RESPONSABILITÉ

Les séismes ne sont pas prévisibles mais certaines règles peuvent en atténuer les effets. La judiciarisation de la société fait que lors de catastrophes naturelles, de plus en plus de procédures sont enclenchées pour trouver des responsables. Parce que la Convention Européenne des Droits de l'Homme mentionne le droit à la vie comme fondement de l'Union, tout défaut de prévention et de précaution peut être condamnable, comme l'a confirmé le procès et la sentence de l'affaire Xynthia. Avec la modification du zonage sismique, certains élus souhaitent réduire les contraintes réglementaires, ce qui pourrait leur être reproché.



RESPONSABILITÉ ET PRÉVENTION

En 1987, une première loi définit la sécurité civile comme ayant pour objet « *la prévention des risques de toute nature ainsi que la protection des personnes, des biens et de l'environnement contre les accidents, les sinistres et les catastrophes* » (art. 1 Loi n°87-565 du 22 juillet 1987). En 2004, sa modernisation actualise cette définition afin d'y inclure l'ensemble des modalités de la gestion des risques. La puissance publique apparaît alors dans la prévention des risques et cela va questionner sa responsabilité.

Le concept de **responsabilité** est central dans la **mise en place des politiques d'aménagement**. Jusque dans les années 1980, les personnes publiques (dites aussi personnes morales de droit public, qui représentent une entité - état, collectivités, institutions... - qui ont des droits et des obligations, notamment parce qu'elles ont un devoir d'intérêt général et de respect de la réglementation du droit administratif) ne peuvent être poursuivies.

Le terme de responsabilité (du latin *respondere* qui signifie « répondre de ») amène à justifier ce que nous avons fait ou dit. De nos jours, c'est l'idée qui implique « *la mise en place de mécanismes permettant de mettre en cause une personne en raison de la non-réalisation d'un engagement qu'elle a pris, ou d'un dommage qu'elle a causé* » (Cans et al., 2014). À partir des années 80, la judiciarisation de la société à comme effet **d'engager pénalement des poursuites contre les élus**. Ce changement est provoqué par la nouvelle attitude des victimes, comme l'illustre la condamnation de l'état dans l'affaire de l'amiante.

Depuis, la question de la responsabilité des élus devient un sujet sensible et ces derniers craignent les poursuites engageant leur responsabilité. Ils tentent à deux reprises de réagir :

Lors de la **loi du 13 mai 1996**, relative à la responsabilité pénale pour des faits d'imprudence (Loi n°96-393 du 13 mai 1996), qui impose une appréciation de ces délits qui ne sont constitués que lorsqu' « *il est établi que l'auteur des faits n'a pas accompli les diligences normales compte tenu, le cas échéant, de la nature de ses missions ou de ses fonctions, de ses compétences ainsi que du pouvoir et des moyens dont il disposait* ».

Lors de la **loi du 10 juillet 2000** (dite loi Fauchon) qui précise la définition des délits non intentionnels (Loi n°2000-647 du 10 juillet 2000). « *L'objectif est de réduire le domaine de la responsabilité pénale des personnes physiques, et exige désormais une faute qualifiée lorsque le lien de causalité entre la faute et le dommage est direct* ». Ainsi, « *les personnes physiques qui n'ont pas causé directement le dommage, mais qui ont créé ou contribué à créer la situation qui a permis la réalisation du dommage ou qui n'ont pas pris les mesures permettant de l'éviter* » peuvent être reconnues pénalement responsables qu'en cas de faute qualifiée : soit en ayant « *violé de façon manifestement délibérée une obligation particulière de prudence ou de sécurité prévue par la loi ou le règlement, soit en ayant commis une faute caractérisée et qui exposait autrui à un risque d'une particulière gravité qu'elle ne pouvait ignorer* ».

LE CAS DES RISQUES NATURELS ET DE LA SÉCURITÉ CIVILE

Les conditions d'engagement de la responsabilité des élus sont complexes, notamment pour le risque sismique car afin d'engager la responsabilité d'une personne, l'existence d'un dommage est le point de départ de toute action juridique : sans dommage, aucune responsabilité ne peut être engagée. Dans ce cas, la procédure pour imprudence nécessite la recherche de responsabilité le jour de l'accident, ou en amont, l'existence de moyens non mis en œuvre pour prévenir le risque, comme l'application d'une réglementation.

Encore faut-il démontrer un lien de causalité : le devoir des élus est de s'assurer que la réglementation a été mise en œuvre, notamment au moment de l'instruction du permis de construire.

De ce fait, si la réglementation n'est pas suivie, plusieurs responsabilités peuvent être engagées pour infraction de négligence en raison des obligations des différents acteurs (constructeur, élus, commune, état ou technicien).

À ce jour, aucune jurisprudence n'existe pour ce type de cas puisqu'aucun séisme majeur récent ne s'est produit. La nouvelle jurisprudence française et internationale montre pourtant que les décideurs publics sont de plus en plus interrogés sur leur responsabilité.

En France, la majorité des procès est liée à une faute au moment de la délivrance du permis de construire. À l'étranger, et concernant le risque sismique, les jurisprudences invoquent :

1. Un défaut d'information,
2. Un défaut de contrôle et de prescriptions techniques,
3. Un défaut de conception.

Les prérogatives des élus sont claires (article L1221-1 du Code général des collectivités territoriales): devoir d'informer, de prévenir, d'alerter, de planifier et de gérer la crise. Ainsi, en analysant les jurisprudences internationales et en s'inspirant des faits concernant les risques naturels en général, il est possible de faire un parallèle et d'imaginer ce qu'il pourrait se passer en France lors d'un séisme.

La responsabilité en cas de faute reviendrait en premier lieu aux acteurs de la construction, même si elle peut être partagée. L'État peut aussi partager certaines responsabilités mais mettre en cause cette responsabilité a souvent été perçue comme une remise en cause de l'État lui-même, chose inacceptable avant 1980.

Les articles 2 et 8 de la Convention européenne des droits de l'Homme exigent que les autorités prennent les mesures les plus performantes possible pour la protection des biens et des personnes, ainsi que des mesures de prévention et de précaution. L'article 2 traite des catastrophes produites et des pertes humaines constatées, tandis que l'article 8 traite des catastrophes non produites et discute de leur éventualité. Ainsi « l'absence de toute législation de l'État, son inaptitude et son inapplication seront de nature à engager sa responsabilité ». Si les élus connaissent le risque et n'ont pas pris les moyens nécessaires à sa prévention, leur responsabilité pourrait être engagée en cas de séisme destructeur. Cependant, au regard des textes de jurisprudence en droit pénal, le risque est défini dans une logique de prévention et non dans une logique de précaution, c'est à dire privilégiant le risque certain du risque incertain. Pour le risque sismique, il est difficile de faire cette nuance, et l'appréciation du juge serait déterminante alors.



EUROPEAN COURT OF HUMAN RIGHTS
COUR EUROPÉENNE DES DROITS DE L'HOMME

Press Unit
Unité de la Presse

Fiche thématique – Environnement et CEDH

mars 2020

Cette fiche ne lie pas la Cour et n'est pas exhaustive

Environnement et Convention européenne des droits de l'homme

Bien que la [Convention européenne des droits de l'homme](#) ne consacre pas en tant que tel un droit à l'environnement, la Cour européenne des droits de l'homme a été amenée à développer une jurisprudence dans le domaine de l'environnement en raison du fait que l'exercice de certains des droits garantis par la Convention peut être compromis par la dégradation de l'environnement et l'exposition à des risques environnementaux.

[Droit à la vie \(article 2 de la Convention\)](#)

ÖZEL ET AUTRES C. TURQUIE, 17 novembre 2015.

Cette affaire concernait le décès des proches des requérants, ensevelis sous les décombres des immeubles d'habitation qui se sont effondrés dans la ville de Çınarcık – située dans une région classée comme « zone à risque majeur » sur la carte des régions sismiques – lors du tremblement de terre du 17 août 1999, qui fut l'un des plus meurtriers en Turquie. La Cour a conclu à la violation de l'article 2 de la Convention sous son volet procédural, jugeant en particulier que les autorités turques n'avaient pas fait preuve de promptitude pour déterminer les responsabilités et les circonstances de l'effondrement des immeubles ayant causé le décès des proches des requérants.

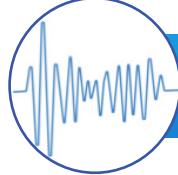
RETOUR SUR LE PROCÈS DE L'AQUILA

Suite au **séisme de L'Aquila du 6 avril 2009**, un procès s'est tenu et a délibéré le 22 Octobre 2010 **sur la responsabilité des experts italiens accusés dans la prévention d'une catastrophe naturelle**. Ce procès est le premier à se tenir dans ce domaine contre des experts scientifiques. Les motivations sont construites en majorité sur les allégations du procureur. Elles comprennent la description de la séquence sismique et de ses précurseurs, les devoirs de la protection civile, l'analyse détaillée de la réunion de la Commission de Mars, les évaluations scientifiques des défenseurs et l'analyse de l'évaluation des risques sismiques. La seconde partie du procès se consacre à l'évaluation des liens de causalité, c'est-à-dire la manière dont les informations alléguées ont mené aux conséquences connues.

Le tribunal des Abruzzes **a retenu la responsabilité des sept experts italiens pour homicide par imprudence et mise en danger d'autrui**. En effet, le tribunal les accuse d'avoir sous-estimé les risques une semaine avant le tremblement de terre, ce qui n'a pas permis de prendre des mesures pour protéger la population. Le procureur Fabio Picuti dénonce dans son réquisitoire « *une analyse incomplète, inapte, inadaptée, coupable et trompeuse car en l'isant le procès-verbal de la Commission Grands risques [Note: qui se réunit pour avis lors de catastrophes], nous trouvons des informations banales, inutiles, auto-contradictoires et fallacieuses* ». Quant au procureur Alfredo Rossini, il estime que « *ces responsables sont très qualifiés et auraient dû donner des réponses différentes à la population* ». En d'autres termes, les motivations d'une telle sentence sont déterminées par une évaluation approximative des risques et une inefficacité des activités et des devoirs de chacun pour la prédition et la prévention. Deuxièmement, ces motivations sont renforcées par la présence d'informations incomplètes, imprécises et contradictoires sur la nature, les causes, les dangers et sur les développements futurs de l'activité sismique. « *La mauvaise analyse des risques ne se limite pas à ne pas considérer un seul facteur, mais aussi à sous-estimer plusieurs indicateurs de risque et la corrélation entre eux. Ce comportement a induit un effet rassurant sans équivoque* » (Verdict de la Cour Suprême). La sanction retenue est de six ans de prison ferme pour ces experts et à l'interdiction perpétuelle de la fonction publique.

En Appel du 10 novembre 2014, la cour de L'Aquila prend le contre-pied de la décision et **les sept experts scientifiques sont acquittés**. En effet, la cour souligne que les faits ne pouvaient constituer un délit. Cependant les juristes suggèrent une plus grande prudence pour les experts. La cour a également jugé que le premier procès était infondé affirmant qu'aucun blâme ne pouvait être attribué aux scientifiques dans la mesure où les évaluations scientifiques avaient été effectuées lors de la commission. La Cour suprême a confirmé le verdict d'appel. Seul le huitième membre de la commission, un politique, a été condamné à de la prison ferme.

EN CAS DE SÉISME, LES RESPONSABILITÉS SERAIENT PARTAGÉES. Cependant, l'affaire Xynthia et les jurisprudences européennes portant sur le risque sismique indiquent que les personnes publiques, et notamment les élus, seraient exposées à des poursuites en cas de non-respect de la réglementation. Le suivi et le contrôle des permis de construire sont des éléments essentiels à la protection des personnes et des biens. La suppression de cette réglementation mettrait clairement l'État et les élus en position d'être poursuivis, puisque les études d'évaluation l'affirment: la France est un pays à sismicité avérée.



LA PROTECTION DES BIENS ET DES PERSONNES

La prévention est au cœur du dispositif de protection contre les catastrophes naturelles. L'assureur intervient aussi dans le dispositif de protection. Depuis les années 1980, un régime spécial a été mis en place en France pour couvrir les catastrophes naturelles : basé sur la solidarité nationale, il permet l'anticipation d'un événement majeur. Avec l'augmentation du nombre et de l'amplitude des catastrophes naturelles, certains s'interrogent sur son évolution possible.



LA PRÉVENTION COMME OUTIL DE PROTECTION

Les deux principes inscrits dans la politique de prévention du risque en France sont **l'information auprès des citoyens** et **l'intégration de ce risque dans les plans d'urbanisme**. Pour l'information aux citoyens, une commune dispose de tout un arsenal de documents et plans : les **Plans Communaux de Sauvegarde (PCS)**, les **Schémas de Cohérence Territorial (SCOT)**, les **Plans de Prévention des Risques Naturels Prévisibles (PPRN)** ou le **Dossier d'Information Communal sur les Risques Majeurs (DICRIM)**.

En 1982, les plans d'exposition aux risques naturels sont institués pour porter à connaissance de la population l'existence d'aléas naturels. Vient ensuite en 1995 une réforme qui remplace les plans d'exposition par les Plans de Prévention des Risques Naturels Prévisibles, soit les PPRN. Ces PPRN imposent des exigences portant sur les constructions et l'occupation des sols, afin de **réduire la vulnérabilité des biens et des personnes**. Dans le même temps, la **loi Barnier de 1995** est mise en place : elle vise à renforcer et à unifier l'action de prévention (loi n°95-101). Le Fonds Barnier est plus particulièrement instauré pour le **financement d'actions de réduction des conséquences des aléas naturels**.

De 2009 à 2014, le Fonds Barnier passe de 79 millions d'euros à 217 millions d'euros, avec comme conséquence la mise en place de nombreux PPRN. Ce montant ne représente que 1% du PIB et les acteurs locaux constatent toujours sur le terrain des insuffisances dans l'application concrète des politiques de prévention.



DES ACTIONS QUI RESTENT EN DEÇÀ DE L'EXPOSITION RÉELLE

La **tempête Xynthia** en 2010 et **les inondations du Sud** en 2002 et 2003 sont les événements les plus marquants de ces dernières années. Ils ont déclenché la mise en place de nouveaux outils de prévention réglementaire, via les **Programmes d'Actions et de Prévention des Inondations (PAPI)** ou la **directive inondation**. Ces programmes ont en effet conduit, en 2017, à l'approbation de 9 885 Plans de Prévention des Risques Inondations (PPRI), et force est de constater que la prévention s'appuie sur des expériences récentes pour évoluer. Concernant le sismique, on constate une faible représentation du niveau sismique puisque **le nombre de plans approuvés est faible** : en 2018, 208 plans de prévention des risques sismiques ont été approuvés en France, et seulement 125 en Métropole,

sur 21 366 communes exposées à un aléa sismique (soit 0,6% des communes) (MEDDE, 2011). On constate ainsi que l'État n'est pas pro-actif dans la mise en place d'actions de prévention sur le risque sismique.

D'ailleurs, peu de moyens du Fonds Barnier sont attribués au risque sismique. Sur les comptes de 2009, cela représente **7%** des dépenses, essentiellement aux Antilles avec la mise en place du Plan Séisme depuis 2007, alors que 58% des dépenses ont été attribuées aux inondations. Sur ces 7%, **5%** ont été alloués à la rénovation d'infrastructures de secours (par exemple, des casernes de pompiers dans le Sud-Est de la France) depuis 2013.

Pour compléter la protection des personnes et des biens, **l'assurance est certainement le dernier maillon**, intervenant une fois le sinistre produit. En France, un dispositif a été adopté garantissant à chacun une indemnisation en cas de catastrophes naturelles. En partenariat avec l'État, les assurés et les assureurs, il permet de prendre en charge les indemnisations : **le régime CAT-NAT**.



LE RÉGIME CAT-NAT

Le premier rôle de l'assureur est d'indemniser les sinistrés en apportant des services aux clients en répondant aux contraintes du terrain et du client. Vis-à-vis des catastrophes naturelles, plusieurs modèles existent :

1. Celui où le régime repose essentiellement sur le marché privé (ex: Angleterre) ;
2. Celui sans organisation spécifique où l'Etat intervient ponctuellement (ex: l'Italie) ;
3. Celui s'appuyant sur un dispositif public obligatoire et sous monopole (ex: l'Espagne).

En France, des modèles hybrides public-privés existent, dont celui décrit comme le régime CAT-NAT.

Il est entré en vigueur en France avec la loi 82-600 du 13 juillet 1982 relative à **l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles**, depuis inscrite dans le code des assurances (articles L125-1 à L125-6). Il partait du besoin de proposer une solution viable en réponse à plusieurs constats :

- Une **augmentation significative des sinistres et des pertes** du fait, non pas de l'augmentation des aléas, mais de la concentration des biens et des richesses économiques.
- La **diminution de la tolérance aux sinistres provoqués par la nature**, de moins en moins perçus comme un aléa normal de la vie, qui augmente la demande de prévention et d'indemnisation.

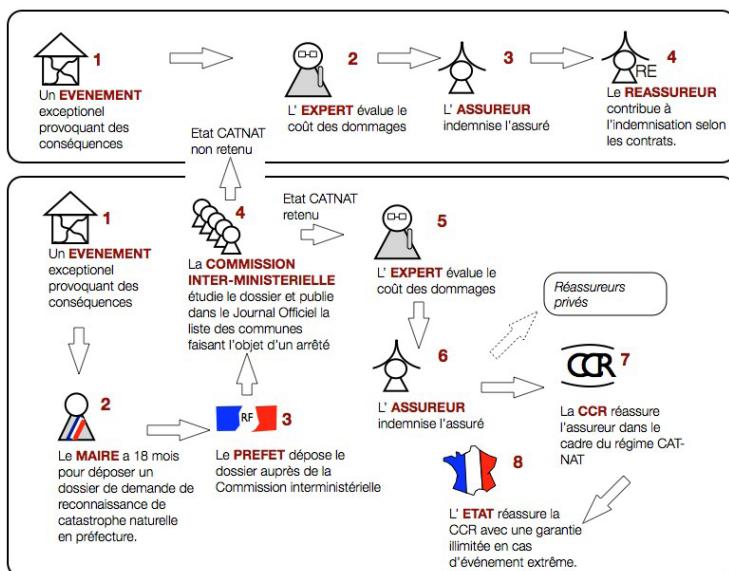
Le régime CAT-NAT mis en place fait intervenir la solidarité nationale. Il remplace la couverture jusqu'alors modeste du Fonds de secours pour les victimes de sinistres et calamités, créé en 1956.

Le nouveau régime est une extension obligatoire des contrats d'assurance dommages pour les biens (6% pour les primes des véhicules terrestres à moteurs et 12% de la prime pour les autres biens).

Le déclenchement du **dispositif de remboursement** est subordonné à la décision de **classer une région en état de catastrophe naturelle**. Pour le risque sismique, ce sont les cartes d'intensités macro-sismiques qui permettent à la commission interministérielle d'établir cet état. Les assureurs peuvent céder à une entreprise publique, la Caisse Centrale de Réassurance (CCR), une partie des risques et des primes collectées, et souscrire auprès de la CCR une réassurance leur garantissant une couverture en cas de pertes excessives (200% des primes).

L'État actionnaire de la CCR est le dernier réassureur, en échange d'une rémunération représentant 1,8% des primes. C'est donc un partenariat public-privé qui s'applique à l'assurance des catastrophes naturelles en France.

Les assurés bien indemnisés, les assureurs qui ne perdent pas d'argent et l'État (qui en perçoit) semblaient satisfaits de ce modèle jusqu'en 1992. Date à partir de laquelle le modèle rentable pour les assureurs a vu sa marge fortement réduite avec l'augmentation des sinistres (en particulier par la prise en charge des effets de la sécheresse et l'aggravation des inondations).



LE RÉGIME CAT-NAT PERMET UNE COUVERTURE SATISFAISANTE DES ASSURÉS. Cependant, l'augmentation des sinistres entraîne une réflexion sur son évolution. Concernant le séisme, ce régime serait déficitaire si un séisme important aux Antilles ou en métropole se produisait, l'État au final couvrant les pertes des assureurs et de la CCR. Dans tous les cas les assurés seraient dédommagés mais avec comme conséquence l'augmentation des cotisations. Il faut donc anticiper l'événement sismique majeur, via l'application des règles de construction, l'établissement de PPRS en nombre et la réalisation de simulations fiables des conséquences socio-économiques.

FAIRE ÉVOLUER LE MODÈLE.... SANS LE RÉVOLUTIONNER

Depuis, des réflexions naissent pour proposer une évolution du régime CAT-NAT. La Fédération Française de l'Assurance (FFA) réitère régulièrement son appel à une modernisation du régime qui pourrait passer par :

- La **modulation des franchises légales** actuellement de 10% pour tous ;
- La **responsabilisation des collectivités et des entreprises**, en les encourageant à se doter de PPR, efficaces pour réduire les conséquences, se traduisant par des modulations des franchises avec les compagnies d'assurance ;
- La **prévention via l'éducation aux risques** dès l'enfance, par l'instauration d'une journée nationale consacrée à la prévention.

Cependant, même si la prévention est l'affaire de tous, les assureurs ne semblent pas prêts à consentir des efforts en ce sens. Pour eux, faire de la prévention n'est pas leur rôle, mais celui du Fonds Barnier. La fédération française de l'assurance affirme que « *la prévention contre les aléas naturels est avant tout une affaire publique. S'il est vrai qu'elle fait appel à la responsabilité de chacun, elle doit être orchestrée collectivement* ».

Les objectifs de l'indemnisation et de la prévention sont opposés : la prévention contre les risques naturels a une **dimension sociale** et traduit un désir de société, alors que la législation sur l'indemnisation est centrée sur une **perspective économique**.

La question de l'efficacité d'une même tarification à l'exposition au risque via les actions de prévention se pose aussi. D'une part, l'intérêt de la prévention pour la population est limité et d'autre part celle-ci ne prend pas forcément conscience de la nécessité des actions préventives mises en place par les pouvoirs publics.

Pour le volet sismique, une étude récente mentionne les **limites de l'assurance privée dans une région à forte sismicité et à enjeux économiques élevés** comme la Californie, en constatant une très faible couverture sismique de la population du fait du montant des primes. Le modèle solidaire antinomique au modèle économique américain aurait dans ce cas-là quelques vertus non négligeables. Cette réflexion va dans le sens des assureurs qui souhaitent une amélioration du régime CATNAT français, tout en conservant le principe de solidarité.



SISMOLOGIE URBAINE

L'Homme, en se concentrant de plus en plus dans des centres urbains gigantesques, participe à l'explosion des catastrophes sismiques majeures 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 MÉGASEISMES

Les grands séismes qui provoquent des dommages et des pertes considérables (par exemple, Izmit, 1999 ; L'Aquila, 2009 ; Amatrice, 2016) rappellent constamment aux politiques et aux décideurs que **la réduction du risque sismique et une résilience accrue des zones urbaines sont essentielles**, tant pour le bien-être et la sécurité des populations locales que pour le maintien de l'équilibre financier et économique mondial. Cela est d'autant plus important compte tenu de la croissance de la population urbaine mondiale à laquelle nous sommes confrontés et la concentration des richesses et des infrastructures modernes dans les villes.

Coburn et Spence, des scientifiques anglais, ont montré qu'au cours du dernier siècle, le coût des séismes ramené à la valeur de l'année 2000 est de l'ordre de mille milliards de dollars. Rapporté par an, ils constatent que cette valeur augmente au cours du XX^{ème} siècle, essentiellement à cause de **l'augmentation et de la concentration des populations dans des grands centres urbains** exposés à un aléa sismique élevé.

Selon l'Organisation mondiale de la santé, la population urbaine en 2014 représentait 54% de la population mondiale totale, en hausse de 34% par rapport à 1960 et devrait croître continuellement d'environ 1,5% à 1,6% par an entre 2015 et 2030. En parallèle, depuis un siècle et l'apparition des observatoires sismologiques, l'aléa ou encore le nombre de séismes par an, n'a ni augmenté ni diminué. Près de 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**.

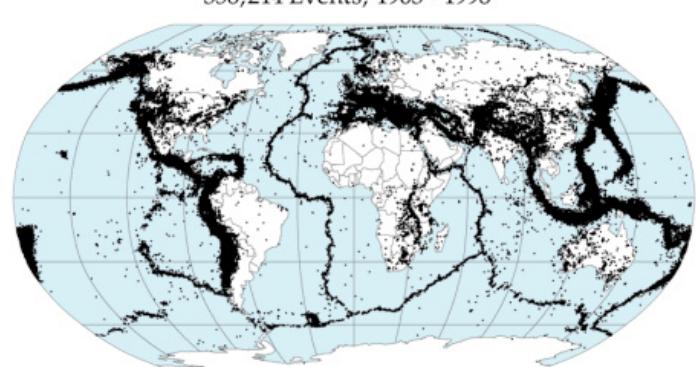
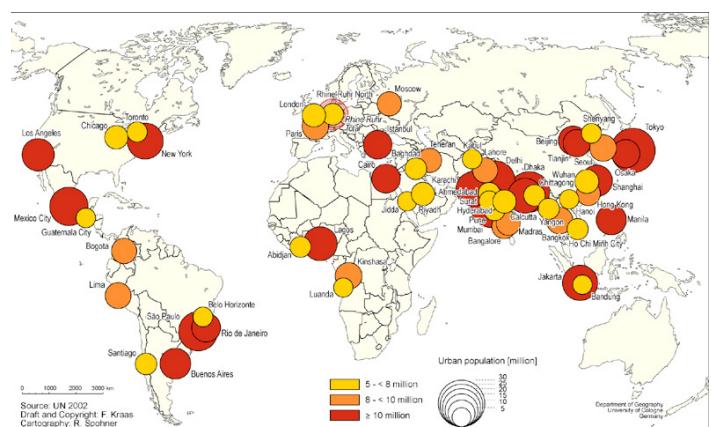
En dépit de l'amélioration de notre connaissance depuis la confirmation de l'existence de la tectonique des plaques au milieu du XX^{ème} siècle, il est toujours impossible de prédire exactement où et quand se produiront les prochains grands tremblements de terre. Ce que l'on connaît par contre, c'est 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 en termes de dégâts.

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 avoir comme conséquences des dégâts sismiques en zone

urbaine infiniment **plus dévastateurs en termes économiques** que ce qui a été observé jusqu'à maintenant. En conséquence, les pertes dues aux tremblements de terre devraient s'élever à environ 2,8 millions d'ici à 2100.

Même un tremblement de terre **modéré** peut avoir des **effets dévastateurs sur les environnements urbains et l'économie**, en particulier dans les zones densément peuplées abritant des structures et des infrastructures, des richesses et des biens critiques (le cas du séisme de Napa ou de Christchurch).

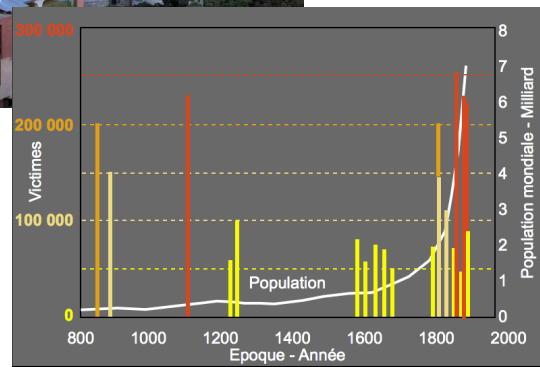
L'apparition de la sismicité induite change également la donne. Une sismicité nouvelle, parfois très près des villes modifie localement l'aléa et par conséquent les pertes potentielles.



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



Hills of Petionville, Haïti
© Andrew Wiseman



Augmentation des catastrophes sismiques en fonction de la population mondiale - d'après Holzer and Savage, *Earthquake Spectra*, 2013

- Les **interactions entre le mouvement du sol** pendant un séisme et la **réponse des bâtiments**;

- La **modélisation des pertes** à l'échelle urbaine via des études de vulnérabilité et de risque.

C'est donc une **approche multi-disciplinaire** qui est nécessaire, entre le **génie civil**, la **sismologie**, la **physique des ondes**, la **géotechnique** et l'**actuariat**. Le fil conducteur de ces études reste et doit rester les sciences de la Terre. Ce sont en effet les sciences de la Terre qui pourront amener les ingrédients nécessaires à la définition du risque sismique en zone urbaine.

La **sismologie urbaine** consiste ainsi à s'intéresser simultanément:

Aux 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, entraînant des effets de site parfois importants. La plupart des villes situées en zones sismiques sont construites sur des formations favorables aux effets de site.

À l'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. Cette question est d'autant plus pertinente en présence d'un habitat dense et massif, ce qui à l'aube du XXème siècle semble être l'évolution majeure des grandes concentrations urbaines.

À la qualité du bâti sismique – Les évolutions constructives font que l'environnement urbain est très hétérogène. La nécessité – particulièrement dans notre "vieille Europe" – de traiter le problème de l'existant qui vieillit naturellement ou lors de séquences d'événements extrêmes, conduit à imaginer des méthodes innovantes pour évaluer et suivre dans le temps la qualité des constructions vis-à-vis du séisme.

À l'évaluation des pertes – Des méthodes de simulations des pertes sont nécessaires afin de proposer des mécanismes de protection (basés sur la couverture assurantielle) qui évoluent avec les changements d'exposition à l'aléa sismique des centres urbains et des zones industrialisées.

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.

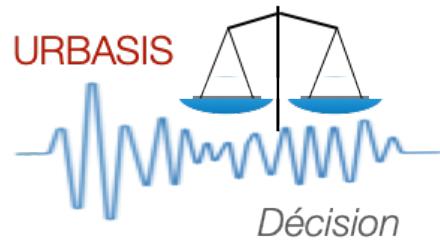
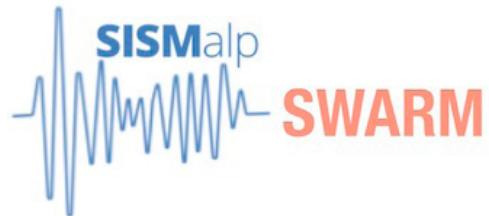
Comme le mentionne Jackson, la période de retour des mégaséismes est tellement longue que les mégapoles, dans leur configuration actuelle, n'ont pas encore subi ces tremblements de terre, laissant craindre des catastrophes à venir. La sismologie urbaine doit se développer et proposer des solutions innovantes.

LES INGRÉDIENTS DE LA SISMOLOGIE URBAINE

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 conduisant certains à insister pour la **suppression des règles parasismiques**, et par conséquent la **réduction de la protection des personnes**. Pourtant, un séisme historique majeur a eu lieu au XX^e siècle, il produisit en 1909 des effets importants dans la région rurale de **Lambesc** (Aix-en-Provence). Pour une magnitude estimée supérieure à 6, ce séisme a servi de base en 2016 à une simulation réalisée dans le cadre d'un projet financé par la Fondation MAIF destiné à estimer les conséquences économiques et les bâtiments endommagés s'il se produisait en 2016, 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**, du même ordre de grandeur que les séismes d'Italie centrale des années 2000- 2010.

Les environnements urbains ou densément industrialisés concentrent les éléments exposés, en termes de populations et de ressources. Le risque doit être évalué à cette échelle en priorité. Certaines caractéristiques spécifiques aux zones urbaines et industrielles en Europe doivent être analysées, notamment:

- L'**impact d'un séisme** de faible probabilité sur une ville;
- La **prédition du mouvement du sol** produit par la sismicité naturelle ou induite située à proximité;
- La **modélisation des séismes** à grande distance et leur impact sur l'environnement urbain;
- La **variabilité spatiale du mouvement du sol** qui sollicite les bâtiments de façon différente;
- La **réponse particulière des grandes vallées** (par exemple alpines) sur lesquelles les grandes agglomérations se concentrent ;



20 Idées Reçues sur le Risque Sismique

Document réalisé en 2020- 2021

Édité en version papier en 2021

Produit dans le cadre du projet SISM@lp-Swarm (ISTerre)

Philippe GUÉGUEN
Directeur de recherche, Université Gustave Eiffel
Docteur en sismologie

et

Gersande LEMARCHAND
Chargée de communication scientifique

ISTerre (Institut des Sciences de la Terre)
Université Grenoble Alpes
1381 Rue de la Piscine,
CS 40700
38058 GRENOBLE Cedex 9

04 76 63 52 00

philippe.gueguen@univ-grenoble-alpes.fr



Observatoire des Sciences
de l'Univers de Grenoble

UGA
Université
Grenoble Alpes



IRD
Institut de Recherche
pour le Développement
FRANCE

UNIVERSITÉ
SAVOIE
MONT BLANC

Université
Gustave Eiffel



AGENCE
NATIONALE
DE LA COHÉSION
DES TERRITOIRES

