

Risque sismique

Analyse de la vulnérabilité du bâti existant. Estimation et réduction des incertitudes dans l'estimation des dommages et des pertes pour un scénario donné

La France est un pays à sismicité modérée

Par le passé, des séismes importants se sont produits. Même rares, ils peuvent produire des dommages et des victimes et il faut être capable de les anticiper

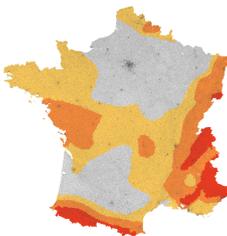
Page 2



Une réglementation nationale

Pour s'en protéger, la France s'est dotée d'une réglementation nationale qui impose des règles de construction parasismique

Page 2



La vulnérabilité sismique

Afin de prédire les dommages et les conséquences d'un séisme sur le territoire national, il faut connaître la vulnérabilité des constructions

Page 3

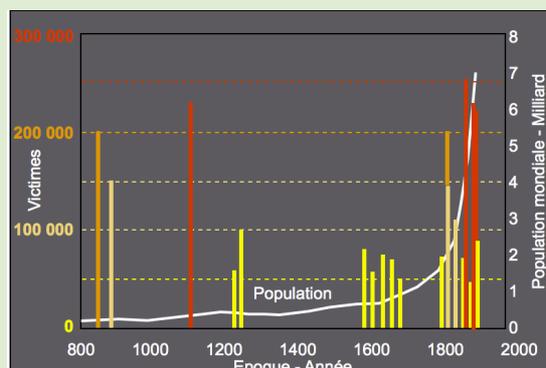
L'évaluation des conséquences directes

La décision publique en terme de prévention doit s'appuyer sur l'évaluation des conséquences directes et indirectes des séismes

Page 4

Les catastrophes sismiques

Les catastrophes naturelles - La décennie passée a été marquée par des phénomènes naturels majeurs. Au cours de la deuxième moitié du siècle dernier, le coût global de ces 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 les catastrophes majeures, celles dues aux tremblements de terre sont les plus préjudiciables et les plus imprévisibles. Elles représentent environ 15% des catastrophes naturelles mondiales mais sont responsables d'un tiers des victimes et des pertes économiques. Les politiques publiques portent de plus en plus leur attention vers les phénomènes liés au changement climatique global, mais ce sont



Augmentation des catastrophes sismiques en fonction de la population mondiale - d'après Holzer, T. L., & Savage, J. C. (2013). Global earthquake fatalities and population. Earthquake Spectra, 29(1), 155-175.

les séismes qui pour l'instant sont les plus à même de provoquer des désastres.

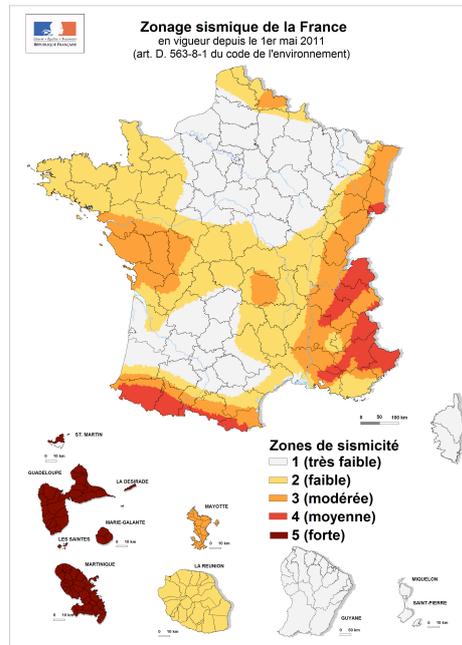
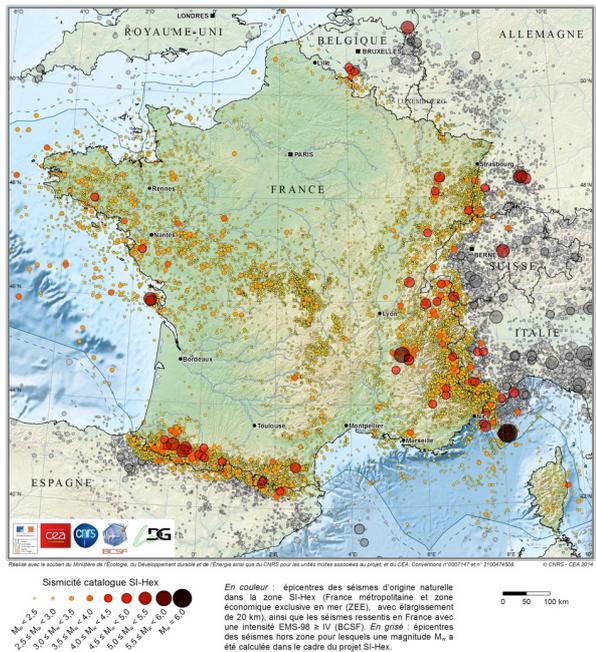
Une population de plus en plus exposée - Les catastrophes sismiques semblent plus nombreuses ces dernières années. Pourtant selon l'USGS (bureau géologique américain), le taux annuel de séismes est stable, avec en moyenne 15 séismes de magnitude supérieure à 7 et 1

de magnitude supérieure à 8 par an. Simultanément, la population urbaine mondiale est en pleine expansion. On observe alors une augmentation de l'exposition aux séismes des biens et des personnes et Holzer et Savage expliquent en 2013 qu'à ce rythme, les victimes des tremblements de terre seront de plus en plus nombreuses au cours du siècle à venir, pouvant atteindre 2.8 million en 2100.

La situation française. Les séismes en France sont moins fréquents et moins importants. Cependant la population et l'exposition des biens augmentent de la même façon et on peut se demander quel est le niveau de risque sismique sur le territoire.

La Fondation MAIF a décidé de financer un projet de recherche mené à ISTerre par Ismael Riedel et portant sur l'évaluation de la vulnérabilité et du risque sismique en France métropolitaine.

Sismicité Instrumentale de l'Hexagone 1962-2009



Nota: le projet ne portait que sur la France métropolitaine

La France est un pays à sismicité modérée

Les séismes en France métropolitaine se font rares...tant mieux. Il ne faut cependant pas oublier que certains événements importants se sont produits dans le passé, affectant les villes de quelques dommages significatifs aux constructions et provoquant ainsi des victimes. Parce qu'ils sont peu nombreux, les populations et les décideurs perdent le souvenir et la mémoire de ces événements et il est compréhensible de se demander si séismes il y a réellement.

Pourtant, si on regarde le passé proche, des séismes marquants apparaissent : ce sont les séismes en mer Ligure au large de Nice (1887) et de Lambesc en Provence (1909), tous les deux ayant provoqué des dommages et des victimes. D'autres séismes plus anciens (séisme de Bâles de 1356, séisme de Catalogne de 1428) nous confortent dans l'idée que des séismes majeurs se reproduiront. Plus récemment, les séismes de Corrençon en Isère (1962), d'Arrette dans les Pyrénées (1967) ou d'Epagny en Savoie (1996), même s'ils n'ont pas provoqué de victimes, ont produit des dommages économiques importants.

L'analyse de la sismicité historique et la surveillance moderne permettent de comprendre l'occurrence des séismes sur le territoire et leur répartition géographique. On observe ainsi que statistiquement il se produit en France 10 séismes de magnitude supérieure à 4 par an, 1 séisme de magnitude supérieure à 5 tous les 3 ans et supérieure à 6 tous les 30 ans.

Une réglementation nationale qui évolue

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

A partir des années 2000, de nouveaux concepts apparaissent. Tandis qu'avant on se protégeait contre un séisme caractéristique de la zone, ce qui implicitement revenait à supposer que les mêmes tremblements de terre se reproduisent aux mêmes endroits, la

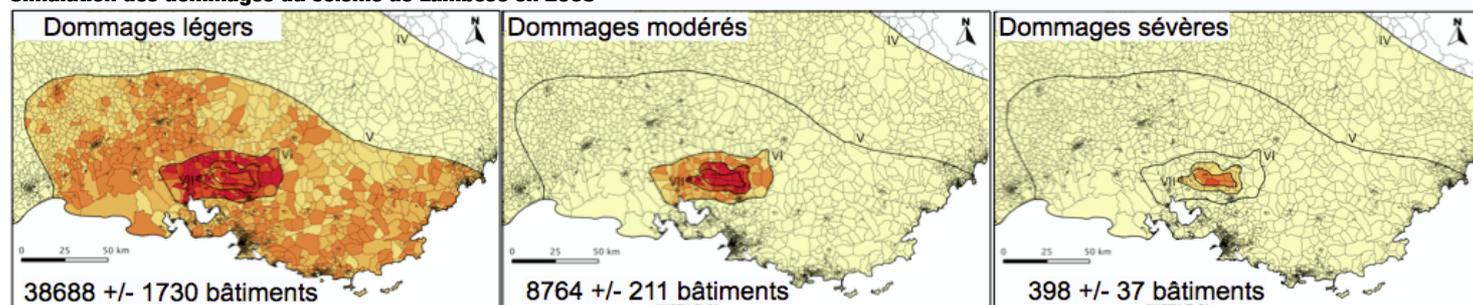
nouvelle réglementation représente l'aléa sismique par un mouvement du sol pouvant se produire (ou ayant une certaine probabilité de se produire) sur une période donnée, qui correspond à la durée d'existence d'un ouvrage. Ce sont ces nouveaux concepts qui ont été suivis pour la nouvelle réglementation européenne dite des Eurocode 8 (EC8) aboutissant à une évaluation plus juste du mouvement sismique contre lequel se protéger. Elle permet également d'harmoniser les cartes d'aléa dans les différents pays et aux frontières.

On obtient ainsi une carte réglementaire (ou zonage sismique) qui représente le niveau de sismicité du territoire. Le mouvement du sol contre lequel se protéger dépend ainsi de trois facteurs: (1) la région (les Alpes sont plus sismiques que le bassin parisien), (2) la fonction du bâtiment à construire et la performance à atteindre (c'est la sauvegarde des vies humaines qui est l'objectif de la réglementation, c'est-à-dire le non-effondrement de la structure, et la persistance de fonctionnement des ouvrages vitaux tels que les hôpitaux et les centres de secours qui doivent continuer à fonctionner), et enfin (3) la nature du sol de fondation puisque le mouvement sismique sera modifié selon que l'on est situé sur du rocher ou des sédiments.

Vulnérabilité sismique

Analyser à grande échelle la réponse du bâti et simuler les dommages sismiques pour des séismes historiques et récents

Simulation des dommages du séisme de Lambesc en 2008



Dès que l'on souhaite analyser le risque sismique à grande échelle (une ville, un pays...), nous sommes confrontés à une difficulté majeure: l'hétérogénéité et le grand nombre de constructions à évaluer. En effet, la plupart des estimations de pertes économiques, humaines, directes ou indirectes reposent sur des corrélations avec les dommages.

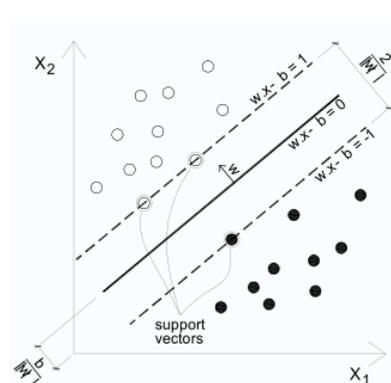
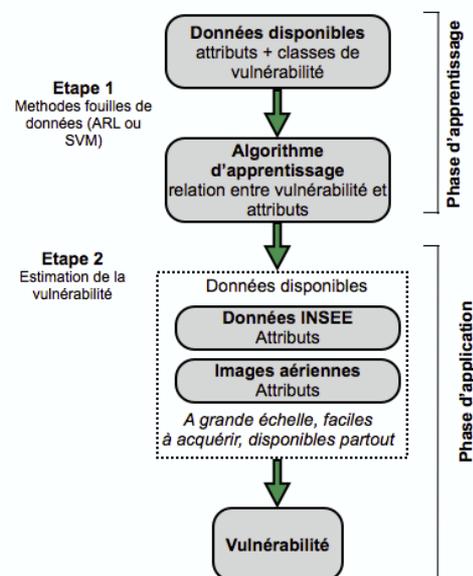
Contrairement aux méthodes classiques utilisées dans le monde, nous avons proposé une méthode innovante s'appuyant sur le principe de la fouille de données (*datamining* en anglais). Tandis que les standards actuels demandent que l'on évalue la vulnérabilité sismique en décrivant les constructions par un grand nombre de paramètres, nous sommes partis des données disponibles décrivant l'urbanisation pour en extraire des informations pertinentes sur la vulnérabilité sismique. Les données peuvent être issues des bases nationales (comme les données INSEE) ou extraites d'images aériennes ou satellite.

Les méthodes utilisées consistent à définir un jeu de données dans lequel nous avons 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 macro-sismique dite EMS98. Un apprentissage est alors mené selon la méthode dite *Association Rule Learning* et *Support Vector Machine* permettant de définir la relation la plus performante entre les attributs et la classe de vulnérabilité. Puis sur un jeu de données équivalent, nous validons notre apprentissage en comparant les classes estimée par notre méthode simple à celles observées réellement sur le terrain par des méthodes standard.

Nous avons utilisé un jeu de données disponibles sur Grenoble pour construire notre apprentissage, provenant de projets régionaux ou européens antérieurs. Nous avons validé ensuite cette approche sur deux zones urbaines particulières, Nice et Strasbourg, qui avaient fait l'objet d'évaluation sismique par des méthodes standards. Le constat est que, même si elle part d'attributs simples, notre méthode permet de représenter l'urbanisation par des classes de vulnérabilité qui au final donnent des dommages probables comparables à ceux obtenus par des méthodes standard, pour un scénario sismique donné. C'est l'objectif de cette méthode et puisque les attributs sont disponibles sur tout le territoire, en supposant un bâti comparable, nous pouvons estimer les dommages probables partout, quelque soit le séisme, de façon plus simple et moins coûteuse que par les méthodes traditionnelles.

Nous avons ainsi pu tester la validité de notre estimation sur les quelques séismes historiques les mieux documentés comme celui de Lambesc (1909). L'urbanisation ayant considérablement évoluée, nous pouvons également évaluer les conséquences si le même séisme se reproduisait maintenant. Pour celui de Lambesc, les dommages sont alors comparables à ceux observés lors du séisme de l'Aquila en Italie de magnitude équivalente. Une validation a également été faite lors du séisme de l'Ubaye de 2014, où le nombre de bâtiments endommagés relevés sur le terrain était équivalent à celui estimé par notre machine.

Description de la méthode



Principe du Support Vector Machine

Dommmages et pertes économiques

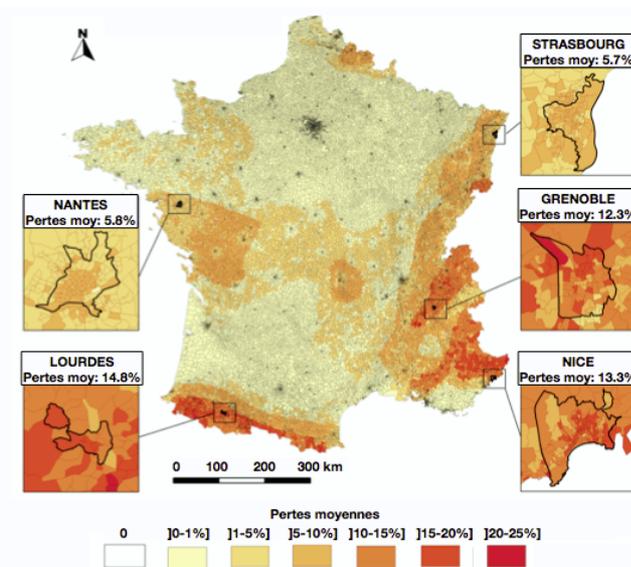
La décision publique en terme de prévention doit s'appuyer sur l'évaluation des conséquences directes et indirectes des séismes et des politiques publiques

Une fois la vulnérabilité calculée sur tout le territoire, il est possible d'évaluer le dommage pour tout type de séismes, et en particulier l'aléa sismique réglementaire national. Après une conversion rigoureuse de l'accélération en intensité selon des modèles compatibles à la sismicité française, on en déduit les intensités ayant 10% de chance d'être dépassées sur 50 ans (c'est-à-dire un aléa de période de retour de 475 ans). En juxtaposant aléa et vulnérabilité, nous obtenons la probabilité de subir des dommages de niveaux D1 (faible) à D5 (fort) selon l'échelle adoptée en Europe.

Les pertes sont ensuite évaluées à partir des dommages exprimés. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur

des retours d'expériences de séismes européens et américains permettant de corréler dommages et pertes économiques directes. Ces dernières ont été exprimées en pourcentage de la valeur du bien immobilier. Pour ce scénario, on constate des pertes supérieures à 10% pour les villes les plus exposées à un aléa sismique important (Nice, Grenoble et Lourdes). Cet exercice peut se répéter en modulant l'aléa pour des périodes de retour différentes: dans notre étude, les pertes pour les trois villes précédentes sont de l'ordre de 1% de la valeur du bien immobilier pour un aléa ayant 10% de probabilité d'être dépassé sur 5 ans (soit une période de retour de 47 ans).

Dommage en pourcentage de la valeur du bien pour un aléa de période de retour 475 ans



Echelle de dommage EMS98



Renforcer le bâti... mais à quel prix?



Plusieurs stratégies peuvent alors être testées, selon que l'on applique la réglementation pour toute nouvelle construction, que l'on renforce efficacement tout le bâti existant pour le rendre conforme aux règles ou que l'on suive une stratégie de renforcement qui soit économiquement la plus rentable en ciblant les actions sur certains bâtiments.

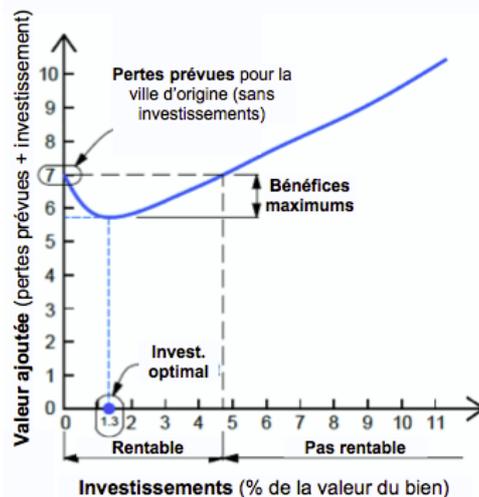
C'est cette dernière option que nous avons testée sur la France, en nous concentrant sur les bâtiments les plus vulnérables. Plusieurs scénarios de renforcement ont été envisagés, selon que l'on renforce totalement ou partiellement les bâtiments de classe de vulnérabilité la plus faible, ou que l'on répartisse les investissements sur toutes les structures. Là encore, le coût du renforcement par rapport à la valeur immobilière a été ajusté à partir de références existantes dans la littérature.

Quelle que soit la ville considérée, nos résultats nous montrent que d'un point de vue uniquement économique (sans parler de l'impact psychologique, humain et des coûts indirects des pertes liées au séisme), l'investissement dans le renforcement du bâti existant n'est rentable que pour les grandes périodes de retour (T=475 ans), c'est-à-dire pour faire face aux séismes les plus importants.

Analyse des pertes et des bénéfices pour Grenoble

Ville	Investis mt	475 ans		95 ans		47 ans	
		Perte dir	Bénéfic	Perte dir	Bénéfic	Perte dir	Bénéfic
Original	0	1.3 Mds	0	470 mi	0	77 mi	0
Stratégi	510 mi	495 mi	295 mi	108	0	10 mi	0

Analyse coût-bénéfice du renforcement du bâti existant



En savoir plus:

- Riedel I. **2015**. Analyse de la vulnérabilité du bâti existant. Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble Alpes, soutenance le 08 juillet 2015, Grenoble, 212 pages.
- Riedel I., Guéguen P., et al. **2015**. Seismic Vulnerability assessment of urban environments in moderate-to-low seismic hazard regions..., Natural Hazards, 76(2):1111-1141. doi , Natural Hazards.
- Riedel I., Guéguen P., et al. **2014**. Macro-scale vulnerability assessment of cities using Association Rule Learning, Seismological Research Letters, 85(2): 295-305.