

LE RISQUE SISMIQUE DANS LA REGION GRENOBLOISE : ETAT DES LIEUX en juillet 2003

P.Y. Bard (Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées)

S.Cartier (Chargé de recherche au CNRS)

F. Cotton. (Professeur à l'Université Joseph Fourier (Grenoble 1))

M. Dietrich (Directeur de recherche au CNRS)

D. Hatzfeld (Directeur de recherche au CNRS)

P. Gueguen (Chargé de recherche du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)

Au cours des dernières décennies, les habitants de Grenoble ont eu plusieurs fois l'occasion de ressentir, plus ou moins fortement, des secousses sismiques, le dernier en date étant celui de Laffrey du 11/01/1999. Dans les tours de l'île Verte, le tremblement de terre du Friul en 1976 à 500 km à l'est a même provoqué une frayeur suffisante pour amener certains habitants à passer la nuit dehors ! Qu'en est-il exactement du risque sismique dans la région ? Le **"risque"** étant la résultante de l'**"aléa"** (traduisant la probabilité d'occurrence d'un événement d'ampleur donnée) et de la **"vulnérabilité des enjeux"** (traduisant la fragilité de l'ensemble des biens et systèmes exposés), cette fiche présente brièvement l'état des connaissances et des actions entreprises pour chacun de ces deux domaines.

Aléa sismique

Aléa régional

Les Alpes constituent une des zones les plus sismiques de France. La connaissance de cette activité fait appel d'une part aux archives historiques, qui permettent de remonter jusqu'à 5 à 6 siècles, et d'autre part aux réseaux sismologiques instrumentaux, et en particulier le réseau Sismalp (<http://sismalp.obs.ujf-grenoble.fr/>) : au bout de 10 ans de fonctionnement, ce dernier a permis d'en obtenir une vision très fine, mettant en évidence deux arcs de sismicité, l'arc piémontais et l'arc briançonnais, ainsi qu'une sismicité soutenue en bordure occidentale des massifs cristallins externes (Belledonne – Aiguilles Rouges). Cette surveillance sismique est complétée depuis peu par des mesures de géodésie satellitaire (stations GPS permanentes) permettant de détecter les déformations de quelques mm/an sur l'ensemble de la chaîne ; en particulier, les déformations autour de la "faille de Belledonne" vont être surveillées par au moins 2 stations installées à Chamrousse et au fort Saint-Eynard.

L'analyse de toutes ces informations montre que, pour la région grenobloise en particulier, l'on doit considérer la possibilité de séismes au moins comparables à ceux d'Annecy-Epagny (1996), de Corrençon (1962) ou de Chamonix (1905), à proximité immédiate (quelques kilomètres) de l'agglomération [Certains géologues/sismologues n'excluent pas non plus la possibilité de séismes similaires à ceux du Valais de 1855, dont la magnitude dépassait 6 selon toute probabilité]. Le projet Interreg IIIB Sismoalp en cours (coordination LGIT) via la confrontation des scénarii suisses, français et italien devra permettre de confronter les scénarii envisagés (WP3) dans les différentes vallées et notamment de comprendre si les scénarii « valaisans » sont possibles en Isère. Leur magnitude pourrait donc être au moins égale à 5.5, avec un mécanisme soit en chevauchement sur la rampe présente sous les massifs cristallins externes, soit en coulissage dextre sur la faille "de Belledonne", soit enfin en coulissage senestre sur une autre faille conjuguée dans la cluse de l'Isère.

Cette "menace" (modérée) se traduit concrètement par le classement de la région grenobloise en zone "Ib" du zonage sismique national, ce qui rend obligatoire l'application des règles de construction parasismique avec une accélération de calage de 0.15 g. Une révision du zonage sismique national est en cours dans le cadre de la préparation à l'arrivée de la nouvelle réglementation européenne (à l'horizon 2003-2005) ; les résultats préliminaires des études en cours indiquent des niveaux de cet ordre de grandeur pour l'ensemble de la zone « Nord des Alpes françaises », alors qu'elles révisent plutôt à la baisse les niveaux dans les zones réputées les plus sismiques de métropole (Alpes-maritimes, Provence, Pyrénées orientales, Sud-Alsace).

Aléa local

Le sous-sol grenoblois présente une configuration très particulière, avec sa cuvette en Y remplie d'alluvions postglaciaires très épaisses (plusieurs centaines de mètres) confinée entre Belledonne,

Chartreuse et Vercors. Cette structure encaissée conduit à des effets particuliers de réverbération et de résonance, appelés "effets de site": les ondes sismiques sont quasiment "piégées" dans les formations superficielles (sables, argiles, graviers), beaucoup plus déformables que le substratum rocheux, et il en résulte un phénomène d'écho, avec des réflexions successives entre la surface et les parois rocheuses. A certaines fréquences privilégiées, il s'établit alors des phénomènes de résonance, caractérisés par à la fois de fortes amplifications, et une prolongation importante des mouvements en surface. Par exemple, entre le musée dauphinois et l'île verte, les mouvements sont multipliés par un facteur 10 dans la gamme de fréquences correspondant aux immeubles de plus de 5 étages (soit entre 0.3 et 5 Hz). L'existence de tels effets (également mis en évidence sur les argiles du Trièves) attire aussi l'attention sur la sensibilité potentielle des bâtiments de grande hauteur (10 étages et plus) à de gros séismes plus lointains (Durance, Ligurie, Valais, ...).

De telles amplifications locales ont montré en d'autres lieux qu'elles pouvaient être à l'origine d'énormes dégâts, comme par exemple à Caracas en 1967, à Mexico en 1985, à San Francisco en 1989, à Kobé en 1995, à Istanbul en 1999 ou à Bhuj en 2001. Un important programme de recherche a été lancé en collaboration avec l'IPSN (Institut de protection et de Sûreté Nucléaire aujourd'hui IRSN Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) pour mieux comprendre ces phénomènes. Des financements locaux (Pôle Grenoblois sur les Risques Naturels, Conseil Général), régionaux (Contrat de Plan Etat-Région), et nationaux (IPSN, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, CNRS/INSU, BRGM), ont permis de réaliser un certain nombre d'études et de mettre en place des équipements de surveillance. Le bilan de ces études et équipements est très brièvement listé ci-dessous :

Synthèse des forages géotechniques

Une synthèse des forages de l'agglomération grenobloise a été réalisée en 2003. Cette synthèse (1400 forages identifiés) a été intégrée dans un Système d'Information Géographique. L'interprétation de ces forages a permis de réaliser des coupes géologiques de la cuvette grenobloise et de reconstituer l'histoire du remplissage du bassin.

Forage de Montbonnot

Pour caler toutes les mesures géophysiques menées depuis la surface, un forage profond a été réalisé à l'automne 1999 à Montbonnot dans le Grésivaudan. Ce forage a atteint le substratum à 534 m de profondeur, et a été l'occasion de réaliser de nombreuses diagraphies en puits, permettant donc de mieux connaître les caractéristiques mécaniques de ces sédiments en profondeur.

Ce forage a également été instrumenté à l'automne 2000 à l'aide de deux capteurs accélérométriques, l'un dans le substratum, et l'autre en surface.

Etudes géophysiques sur le remplissage quaternaire

Une campagne de plusieurs centaines de mesures gravimétriques réalisées par le LGGE (Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement) a d'une part permis d'obtenir la géométrie 3D du contact substratum / remplissage quaternaire, et d'autre part, après calibration sur le forage profond de Montbonnot, révélé leur très grande épaisseur sous Grenoble (plus de 800 m).

Diverses campagnes de sismique (réflexion, réfraction, avec plusieurs types de source : explosif ou camion vibreur, SASW) menées à différents endroits de la cuvette ont confirmé les fortes épaisseurs et leur grande variabilité latérale, mais aussi permis de mesurer la vitesse de propagation des ondes sismiques (surtout P mais aussi parfois S), et mis en évidence des réflecteurs intermédiaires.

Des mesures de bruit de fond sismique en réseau ont également conduit à une estimation indépendante des profils de vitesses sismiques, par des méthodes utilisant les courbes de dispersion des ondes de surface. Le projet Interreg Sismoalp permettra de synthétiser l'ensemble de ces mesures et d'effectuer certaines mesures complémentaires (« mesures de bruits de fond en forage »)

Enregistrements sismiques

Le réseau accélérométrique national permanent (<http://rap.obs.ujf-grenoble.fr/>) a un sous-ensemble local comprenant maintenant 7 stations (2 au rocher, et 5 en surface dans la cuvette), permettant l'enregistrement d'au moins tous les événements ressentis (une petite dizaine d'événements soit en tout quelques dizaines d'enregistrements à ce jour, dont plusieurs sur la paire de stations du forage de Montbonnot). Ces données sont publiques ce qui n'est pas toujours le cas de tous les enregistrements similaires suisses ou italiens : le programme SISMOALP permettra de réunir les données collectées dans les différentes vallées sous un même format. Cette mise en commun améliorera grandement la qualité de l'estimation de l'aléa sismique sur l'arc alpin.

Plusieurs campagnes temporaires ont également été réalisées. La dernière, avec un réseau très dense de 29 stations centré sur le couvent du Bon Pasteur (Saint-Martin-d'Hères), a permis une mise en évidence expérimentale directe de ces phénomènes de réverbération à l'intérieur de la cuvette, et révélé également leur importance quantitative spectaculaire (en moyenne 4 fois plus importantes que les ondes directes) [thèse de C. Cornou, 2002].

Modélisation numérique

La connaissance de la structure géologique a permis la réalisation de simulations numériques (encore préliminaires) anticipant sur les effets d'un séisme de taille comparable à celui de Corrençon (1962), mais situé beaucoup plus près de l'agglomération (à l'est ou au sud, voire juste dessous). Ces simulations confirment de façon évidente l'extrême importance des phénomènes de diffraction et de réverbération, ainsi que leur contrôle très étroit par la géométrie tridimensionnelle de la cuvette.

D'autres estimations ont été obtenues par la technique dite des fonctions de Green empiriques en extrapolant les informations obtenues sur la base d'enregistrements de petits séismes situés au front de Belledonne ou à Laffrey.

Ces deux approches conduisent à des estimations d'accélération maximale dans la cuvette pouvant atteindre et même dépasser 0.3 g (niveau réglementaire actuel pour la zone Ib: 0.15 g), et à des niveaux spectraux notablement supérieurs aux niveaux réglementaires, surtout pour les bâtiments de plus de 6-7 étages.

Les projets en cours permettront de comparer les méthodes de simulations utilisées dans la cuvette grenobloise avec celles utilisées ou en développement dans d'autres vallées alpines (Italie et Suisse). Nous pourrions ainsi valider nos méthodes et confirmer ou non la validité des normes actuelles via ces tests internationaux.

Etudes géotechniques

Un point très important à éclaircir concerne le comportement non-linéaire des matériaux (argile, graviers, sables) constituant le remplissage, qui peut éventuellement conduire à une modification sensible (généralement bénéfique) de la réponse sous sollicitation forte à modérée. Le programme Interreg SISMOVALP permettra d'effectuer les prélèvements et des mesures en laboratoire au triaxial cyclique. Des calculs préliminaires ont été réalisés à l'aide de divers codes de calcul 1D nourris avec des paramètres non-linéaires "estimés" d'après la littérature : ils mettent en évidence des effets réducteurs, mais relativement modérés. Le programme Interreg SISMOVALP permettra d'effectuer via les prélèvements grenoblois et les études de nos collègues étrangers de mettre en place une base de donnée géotechnique spécifique « alpine » qui servira de référence pour ce type de calcul en remplacement des paramètres actuels tirés d'une littérature bien souvent « californienne ».

D'un point de vue réglementaire, ces effets de site sont pris en compte de façon forfaitaire au travers de formes spectrales différenciées suivant la nature du sous-sol. Ces différenciations forfaitaires sont notoirement insuffisantes et même fausses pour la configuration géologique très particulière de Grenoble. Les nouvelles formes spectrales en préparation dans l'EC8 seront moins mauvaises, mais encore insatisfaisantes car trop optimistes. La meilleure solution pour prendre en compte cette configuration très spécifique serait certainement l'élaboration d'un PPR sismique [Grenoble serait sans doute la première agglomération importante de France à le demander d'elle-même, ce qui serait conforme à son image de site pilote en matière de risques naturels]. Le programme Interreg SISMOVALP permettra de tester les formes spectrales proposées par l'EC8, de proposer avec nos partenaires étrangers des formes spectrales plus adaptées au contexte alpin et de réfléchir avec les acteurs locaux aux moyens pouvant permettre de tenir compte de la spécificité alpine (PPR sismique?). La constitution d'une base de données accélérométriques aidera à « valider » les simulations effectuées.

Vulnérabilité physique de l'existant

Depuis 1994 et 1995, les règles parasismiques ont été rendues obligatoires pour tous les bâtiments "à risque normal" neufs (y compris les maisons individuelles) situés en zone sismique, comme c'est le cas de l'agglomération grenobloise (zone Ib du zonage national) ; Il en va de même pour les Ouvrages d'Art neufs. Les installations "à risque spécial" ont fait l'objet d'un arrêté spécial (10/05/93) s'appliquant également aux installations existantes.

Pour le bâti courant "à risque normal", même si la réglementation technique présente des défauts (cf plus haut), le faible taux de renouvellement (1% par an ?) fait que l'essentiel de la vulnérabilité sismique vient de l'existant, qui dans une immense majorité a été construit sans aucune conception parasismique, et, en outre, pour une certaine classe de bâtiments datant des années 50-60-début 70, à une époque où les besoins étaient tels que la quantité primait sur la qualité. La vulnérabilité de ces bâtiments est donc un élément essentiel du risque, qu'il est primordial de savoir apprécier pour orienter une politique de confortement bien ciblée.

Pour les installations "à risque spécial", leur nombre est assez important sur la région, notamment à proximité immédiate de l'agglomération, et une estimation du risque réel passe donc nécessairement par la prise en considération des dispositions mises en oeuvre pour réduire les risques directs et induits dans ces installations.

Risque normal

Très peu a été fait dans ce domaine jusqu'à maintenant, mis à part un petit nombre d'opérations ponctuelles sur certains bâtiments à l'occasion de grands programmes de réhabilitation (comme en ce moment le CARGO)

Les premières études dont nous ayons connaissance sont celles réalisées dans le cadre de la thèse de M. Farsi (1996), qui a d'une part mesuré les fréquences propres d'une cinquantaine de bâtiments de l'agglomération (essentiellement des HLM), et d'autre part effectué une étude préliminaire de vulnérabilité en utilisant différentes techniques, du très rudimentaire (échelle d'intensités et classes de bâtiments) au un peu plus élaboré (calculs pseudo-statiques sur plans disponibles). Ces études ont révélé que la fréquence propre de la majorité des bâtiments d'habitation collective se situe dans la plage d'amplification de la cuvette grenobloise et que l'on peut donc s'attendre, en cas de séisme de magnitude 5.5 proche, à une intensité de l'ordre de VIII dans la cuvette, avec des niveaux de dommage atteignant 20 à 30 % pour les bâtiments en maçonnerie, et 7 à 15 % pour ceux en béton armé (non parasismique) qui forment l'essentiel du parc grenoblois. Une étude particulière sur un des bâtiments du campus a de plus mis en évidence son manque de résistance dans le cas d'un séisme local de magnitude 5.5 conduisant à des niveaux d'accélération autour de 0.25 à 0.30 g.

Cette étude préliminaire a eu au moins deux conséquences :

- En premier lieu, l'approche par bruit de fond a attiré l'attention du bureau VERITAS, qui l'a déjà utilisée en complément à ses approches traditionnelles sur une-demi douzaine d'ouvrages de l'agglomération, et a décidé de cofinancer une thèse (F. Dunand, 2001-2004) sur le sujet.
- En second lieu, elle suggérait fortement qu'il faudrait étudier la question de la vulnérabilité de l'ensemble du parc de plus près. La première tâche consiste à recenser l'existant et à le classer par type de vulnérabilité.

Un premier pas dans cette dernière direction a été effectué avec l'étude lancée par le CETE de Lyon avec des financements SETRA, CERTU et SDAU. Dans une première phase (achevée), un recensement de tous les bâtiments de classe D (140) et des ouvrages d'art de catégorie C (4) et D (82) a été effectué. La deuxième phase (à venir) consiste à en sélectionner une vingtaine (10 bâtiments, 10 ouvrages) pour évaluer plus spécifiquement leurs forces et leurs faiblesses, et proposer des stratégies de confortement.

Il faudrait également engager une démarche similaire pour les bâtiments de classe C (ERP, IGH, écoles notamment), et une certaine population du parc de bâtiments B (logement social et bureaux des années 50-70 en particulier, centre ville, ...).

Mais le coût du renforcement parasismique est tel à l'heure actuelle pour l'existant qu'une telle démarche implique nécessairement un dialogue très étroit avec les services techniques locaux et les décideurs locaux, pour établir des priorités, et profiter de toutes les opérations réhabilitation lourde pour établir un diagnostic de vulnérabilité sismique. Le projet Interreg SISMOVALP permettra d'établir les méthodes possibles pour établir ces priorités en faisant le point sur les actions envisagées dans les autres vallées alpine et par la discussion avec les acteurs locaux.

Installations "à risque spécial"

L'arrêté spécial (10 mai 1993) fixant les règles applicables aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement a amené la DRIRE Rhône-Alpes à faire le point sur les établissements concernées de l'agglomération grenobloise, qui sont énumérés ci-dessous :

- ILL (Grenoble)
- Eurotungstène Poudres (Grenoble)
- Sandvick Hard Materials (Grenoble)
- Elf Atochem (Jarrie)
- Oxysynthèse (Jarrie)
- Enichem Elastomères (Champagnier)
- Rhodia Chimie Chlor'alp (Pont de Claix)
- Sobegal (Domène)
- Elf Atochem (Brignoud)

La procédure utilisée pour ces installations est fondée sur la Règle Fondamentale de Sûreté (RFS 1.2c) dans sa version antérieure à 1998 (elle vient d'être remodelée). Cette dernière fait intervenir les notions de SMHV ("Séisme Maximum Historiquement Vraisemblable"), et de SMS ("Séisme Majoré de Sécurité"), auxquels sont associés des spectres de dimensionnement.

Les études conduites par le CEA Grenoble ont fait la synthèse de diverses évaluations effectuées dans les années 70 et 80 par le BRGM et l'IRSN, qui ont conduit à définir deux types de séisme de référence:

- un séisme proche situé à la verticale du site et correspondant au séisme de Corrençon du 25/04/1962 (profondeur 5 km)

- un séisme "régional" situé à une distance épacentrale de 10 km (front de Belledonne), et correspondant au séisme de Chamonix du 29/04/1905 (profondeur estimée à 25 km).
Pour chacun, les niveaux d'intensité retenus sont de VII-VIII pour le SMHV, et de VIII-IX pour le SMS.

Les études conduites pour les autres installations ont généralement été effectuées par le BRGM ou ANTEA, et donnent lieu à des niveaux de sollicitations qui varient d'un site à l'autre d'un facteur pouvant aller jusqu'à 2, suivant l'année de réalisation de l'étude, et les conditions de site. On y remarque une tendance à la baisse des niveaux de sollicitation pour les études les plus récentes.

Les résultats de ces études ont été pris en considération pour la vérification de la tenue au séisme de divers équipements sensibles se trouvant dans ces installations industrielles, ce qui a dans certains cas débouché sur des actions de renforcement spécifiques. Cependant, les conditions de site y ont été prises en compte de manière au mieux forfaitaire, et sans doute souvent sous-estimées (pour les installations construites dans la cuvette).

Voirie et réseaux

La vulnérabilité sismique des divers réseaux (alimentation en eau, assainissement, gaz, électricité, téléphone, canalisations industrielles, ...) et de la voirie (ouvrages d'art notamment) constitue un élément essentiel du risque. Dans ce domaine, tout reste donc à faire.

Conclusions

Les séismes de Mexico, de Kobé, de Bhuj, ont régulièrement rappelé l'importance des effets de site ; ceux de d'Agadir (1959), San Salvador (1986), d'Italie centrale (1997), d'Athènes (1999) nous ont aussi montré à quel point des séismes modérés (magnitude inférieure à 6) survenant en zone urbaine peuvent engendrer des dommages très importants.

La situation en Rhône-Alpes n'a certes rien à voir avec le Japon, la Turquie ou la Californie ; mais il n'en demeure pas moins que si un séisme comme celui de Corrençon ou de Chamonix survenait demain à proximité immédiate d'une des grandes agglomérations alpines, il y a fort à parier qu'il causerait des dommages très significatifs, allant bien au-delà des chutes de cheminées.

La vallée de Grenoble a permis d'initier les études d'effet de site dans les vallées alpines (voir liste de référence) et constitue un site pilote pour l'évaluation du risque sismique dans les vallées alpines.

La réglementation actuelle ne semble pas adaptée au contexte très particulier des vallées alpines. Les projets de recherche en cours permettront de préciser les limites des réglementations actuelles, de proposer les adaptations nécessaires (techniques et réglementaires) en cohérence avec les propositions de nos collègues italiens, allemands, slovènes ou suisses sur une base technique réaliste, validée et faisant l'objet d'un consensus à l'échelle de l'arc alpin.

Références

- Bard (1982). "Diffracted waves and displacement field over two dimensional elevated topography." *Geophys. J. R. astr. Soc.* **71**: 731-760.
- Bard, P. Y. and J. Riepl-Thomas (1999). Wave propagation in complex geological structures and local effects on strong motion. *Wave motion in earthquake engineering*. E. Kausel and G. D. Manolis, WIT Press: 38-95.
- Bettig, B., P. Y. Bard, F. Scherbaum, J. Riepl, et al. (2003). "Analysis of dense array measurements using the modified auto-correlation method (SPAC)." *Boletín de Geofísica Teoría e Aplicada*(in press).
- Cornou, C. (2002). *Traitement d'antenne et imagerie sismique dans l'agglomération grenobloise : implication pour le risque sismique*. Grenoble, Université Joseph Fourier.
- Cornou, C. and P. Y. Bard (2003). "Site-to-bedrock over 1D transfer function ratio: an indicator of the proportion of edge-generated surface waves ?" *Geophys. Res. Lett.*(in press).
- Cornou, C., P. Y. Bard and M. Dietrich (2003). "Contribution of dense array analysis to basin edge induced waves identification and quantification. Application to Grenoble basin, French Alps (II)." *Bull Seism. Soc Am*(in press).
- Cotton, F., P. Y. Bard, C. Berge-Thierry and D. Hatzfeld (1999). "Qu'est-ce qui fait vibrer Grenoble ?" *La Recherche* **320**: 39-41.
- Cotton, F., C. Berge-Thierry, F. Lemeille, A. Pitarka, et al. (1998). Three-dimensional simulation of earthquakes in the Grenoble's basin (Western Alps). *Second International symposium on the effects of surface geology*, Yokohama, Japan, 1-3 December.
- Dietrich, M., C. Cornou, C. Bordes, P. Y. Bard, et al. (2001). Geophysical exploration for site effects assessment borehole measurements and vibroseis profiling in the Isere valley near Grenoble. *EGS XXVI General Assembly*, Nice, France.
- Dietrich, M., R. Guiguet and V. Chaffard (1998). "Imagerie sismique des remplissages alluviaux dans la région de Grenoble." *Rapport d'étude LGIT*.
- Gueguen, P., C. Cornou, P. Y. Bard and F. Dunand (2003). Origine des bouffées haute énergie observées sur le bassin de Grenoble. *VIème Colloque national AFPS*, Ecole Polytechnique Palaiseau France.
- Lebrun, B. (1997). *Les effets de site: étude expérimentale et simulation de trois configurations*. Grenoble, Université Joseph Fourier: 194.
- Mohammadioun, B. (2000). "Evaluation probabiliste de l'aléa sismique en France." *Journée technique AFPS du 20/09/2000*.
- Vallon, M., F. Bonnaffé, X. Janson, M. C. Mieulet, et al. (1996). *Carte des isopaches du remplissage quaternaire de la cuvette grenobloise déduite des anomalies gravimétriques.*, Rapport Interne du Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement.

