

F. Cotton, P.Y. Bard, C.
Berge et D. Hatzfeld

Fabrice Cotton et
Catherine Berge sont
ingénieurs de recherche à
l'Institut de Protection et de
Sûreté Nucléaire (IPSN)
Pierre-Yves Bard et Denis
Hatzfeld sont chercheurs à
l'université de Grenoble,
ainsi qu'au LCPC Paris pour
le premier.

Qu'est ce qui fait vibrer Grenoble ?

Les séismes, proches ou lointains, ont toujours vu leurs effets amplifiés dans la ville de Grenoble. Comme à Mexico, c'est la nature et la structure du sous-sol qui en sont responsables, mais peut-on en quantifier l'ampleur ? Dotés de nouveaux outils de simulation, de reconnaissance et d'observation, les sismologues tentent de répondre, et veulent faire de Grenoble un site pilote pour l'étude de ces effets.

Le 11 janvier dernier, à quatre heures et demie du matin, les habitants du village de Laffrey près de Vizille en Isère sont brutalement réveillés par des vibrations. A vingt kilomètres de là, en plein centre ville, les Grenoblois sont aussi tirés de leur sommeil. Le séisme, peu profond*, n'est pourtant pas très fort: l'Observatoire de Grenoble donne une magnitude de 3.6, et localise l'événement à 5 km au sud de Vizille. Une fois encore, la "cuvette grenobloise" s'est comportée comme une énorme caisse de résonance pour les ondes sismiques. La secousse de Laffrey illustre un phénomène connu depuis le début du XIX^{ème} siècle¹, mais que l'on commence seulement à savoir quantifier: dans les Alpes, les effets des séismes sont plus importants dans les vallées que sur le reste du relief, et peuvent varier suivant les endroits au sein d'une même vallée.

De ce point de vue, Grenoble est un cas d'école en France: de par sa configuration géologique typique des grandes vallées alpines et sa localisation dans une zone tectoniquement active, c'est l'une des rares villes en France où la population est presque "habituée" aux séismes,. Dans les grandes tours de vingt-huit étages du quartier de l'Île Verte, on se souvient encore de la frayeur provoquée en 1976 par le tremblement de terre du Friul (Italie), localisé à cinq cent kilomètres ! Et les séismes du Grand-Bornand de 1994, et d'Annecy en 1996, restent gravés dans bien des mémoires, alors qu'ils n'ont même pas été ressentis dans les

village dominant la ville. D'où vient une telle amplification des vibrations sismiques?

Elle est liée à la nature géologique du sous-sol et à la géométrie du bassin de Grenoble. C'est une véritable cuvette en forme de Y au confluent des vallées de l'Isère et du Drac (figure 1). Tout comme Chambéry, Annecy, le Valais suisse, ..., la ville se trouve au cœur d'une vallée creusée par les glaciers, et remplie de sédiments (sables, argiles, graviers) beaucoup plus souples que le substratum rocheux: c'est ce contraste, comme on l'expliquera plus loin, qui est à l'origine de ce que les sismologues appellent des "effets de site". Redécouvertes il y a une trentaine d'années, ces amplifications locales ont été étudiées après de forts séismes ayant entraîné d'énormes dégâts, dont elles se sont avérées en grande partie responsables. Ce fut le cas, par exemple, à Caracas en 1967, à Mexico en 1985, et plus récemment à Kobé en 1995.

Bien que située dans une région sismiquement très calme comparée à la Californie, au Japon ou à la Grèce, Grenoble n'est cependant pas à l'abri d'un séisme de magnitude 5.5 à proximité de la ville, du type de celui de Corrençon ou d'Annecy. L'on sait, grâce au réseau sismologique de surveillance Sismalp, que la faille dite "de Belledonne" est active, les géologues connaissent plusieurs autres failles actives dans la région, et les mesures de géodésie satellitaire GPS confirment que la région se déforme. L'agglomération grenobloise abrite aujourd'hui 400000 habitants, de nombreuses industries, y compris chimiques, et un réacteur nucléaire. L'évaluation du risque sismique est donc une préoccupation de équipes de recherche, ainsi que des autorités locales et régionales. Faute de savoir quand et avec quelle magnitude frappera le prochain séisme, leur objectif est de quantifier ses effets potentiels.

De quelles informations dispose-t-on ? Les stations de mesure de mouvements sismiques à Grenoble même n'existent que depuis 1995, grâce à l'opération-pilote "RAP" (Réseau Accélérométrique Permanent). Pour toute la période précédant l'installation de ces instruments, les seules données disponibles sont exprimées en "intensités", estimées sur la base des dommages observés ou la perception du séisme par les habitants. Une analyse récente ² de l'enquête menée auprès de la population après le séisme de Corrençon en 1962 (un séisme de magnitude 5.3 à 40 kilomètres de la ville) montre une augmentation systématique d'un degré de l'intensité macrosismique dans les vallées de l'Isère et du Drac.

Les outils théoriques et numériques développés ces dernières années nous ont d'abord éclairé sur les mécanismes responsables des effets de site³ : c'est le piégeage des ondes sismiques dans les formations superficielles, moins denses et moins rigides que le substratum rocheux. Pourquoi ? le contraste de rigidité ne laisse

bien passer l'énergie sismique que dans un sens (rigide vers souple), et les ondes sismiques émises au foyer, une fois transmises dans le bassin, y restent quasiment piégées. Les réflexions successives qui s'ensuivent entre la surface et les parois rocheuses du bassin conduisent alors à des phénomènes de résonance à certaines fréquences privilégiées, se traduisant dans les mouvements en surface par à la fois de fortes amplifications, et une prolongation importante. On imagine aisément que les conséquences puissent être dramatiques lorsque ces fréquences amplifiées par le sol correspondent aux fréquences propres des bâtiments.

Les fréquences ainsi privilégiées, les amplifications correspondantes, et les durées de mouvement, doivent donc être estimées. La durée est un paramètre important (bien que non pris en compte à l'heure actuelle) car une sollicitation longue et soutenue entraîne inévitablement une fatigue progressive des constructions. Première difficulté, la géométrie complexe de la cuvette grenobloise ne permet pas d'utiliser les formules classiques pour calculer les deux premiers paramètres (on ne sait le faire analytiquement que pour des empilements de couches planes). Et la seconde est d'évaluer simultanément la durée. Seule une double approche expérimentale et numérique peut fournir ces informations de manière fiable.

Dix stations sismologiques ont d'abord été installées dans le bassin grenoblois d'avril 1995 à janvier 1996. Elles ont enregistré plusieurs petits séismes locaux non ressentis par la population⁴. Le plus important d'entre eux est le séisme de la combe de Lancey de magnitude 2.5 localisé à l'est de la vallée du Grésivaudan (sur la faille "de Belledonne"). Parallèlement, plusieurs stations acélérométriques permanentes ont été implantées entre 1995 et 1998, et ont d'ores-et-déjà enregistré une dizaine d'événements, dont le séisme de Laffrey du 11 janvier dernier. Tous ces enregistrements montrent de très forts effets de site, amplifiant jusqu'à 10 à 20 fois les mouvements pour des fréquences comprises entre 0.3 et 5 Hz, et prolongeant le mouvement d'environ 20 secondes à l'intérieur du bassin.

Nous avons ensuite réalisé diverses simulations numériques. Ceci se fait en deux étapes. La première consiste à réunir toutes les informations disponibles sur le sous-sol pour construire un modèle en trois dimensions des vitesses de propagation des ondes dans le sous-sol. Et la seconde correspond à la modélisation numérique proprement dite.

Que connaît-on du sous-sol grenoblois ? Le forage le plus profond est curieusement assez ancien. Il date de 1943, une époque où l'on cherchait des réservoirs de gaz souterrains. Réalisé au sud de la ville dans le quartier Beauvert, il traverse 400 mètres de cailloutis, sables et argiles de formations lacustres sans jamais atteindre le substratum rocheux. Si les foreurs de l'époque n'ont

pas trouvé d'hydrocarbures, ils nous donnent néanmoins une indication fondamentale (pas vraiment nécessaire s'il faut gagner de la place): les lacs datant du quaternaire récent (dernières périodes inter-glaciaires) ont déposé dans le bassin plusieurs centaines de mètres de formations meubles. Des années de travail et près d'une centaine de mesures microgravimétriques⁵, complétées par diverses mesures sismiques (réflexion⁶, bruit de fond⁴), ont confirmé cette épaisseur très importante, et en ont précisé les variations spatiales: le remplissage semble atteindre 900 mètres au plus profond, et 450 mètres au forage de Beauvert. Le modèle issu de ces observations nous a fourni les informations nécessaires à une modélisation tridimensionnelle, la première pour une vallée alpine (les principales précédentes ayant été réalisées pour des bassins Californiens ou Japonais).

Plusieurs scénarios ont été étudiés⁷. Le premier modélise le séisme de la combe de Lancey, pour lequel on dispose de nombreuses mesures. Il illustre les effets d'un séisme en coulissage NNE-SSW sur la faille "de Belledonne". Premier résultat, l'amplitude et la durée des mouvements ainsi prédits sont à peu près cohérentes avec celles enregistrées. Quand les ondes pénètrent dans le bassin, leur amplitude augmente brutalement d'un facteur cinq. Elles sont alors piégées dans les sédiments et, tandis qu'à l'extérieur du bassin, la durée n'excède pas quelques secondes, elle peut atteindre plus de trente secondes à l'intérieur. Cette simulation désigne clairement deux zones où les mouvements sont maximaux: la première est la vallée du Grésivaudan (partie de la cuvette la plus proche du foyer), et la seconde, le centre ville où le bassin est le plus profond (figure 2). Les autres scénarios (séisme sous la ville à cinq kilomètres de profondeur, séisme au sud de la ville) confirment ce phénomène d'amplification, tout en montrant sa sensibilité à la position du foyer, et en indiquant donc que, pour connaître vraiment le risque dans son ensemble, nous devons soit estimer précisément où peuvent se produire les séismes, soit (comme ce n'est pas encore possible) prendre une enveloppe supérieure des effets attendus pour chacun des cas a priori envisageables.

Pour ce faire, l'examen des failles en surface, l'étude de la microsismicité régionale et la mesure des déformations lentes de la croûte terrestre par géodésie spatiale sont aujourd'hui en cours. Par ailleurs, notre connaissance du bassin est encore loin d'être suffisante et fiable, et nous allons réaliser de nouvelles reconnaissances géophysiques et géotechniques, dont un forage profond à l'automne 99. Nous comptons également sur les réponses à l'enquête de perception lancée auprès de la population après le séisme du 11 janvier dernier, pour "interpoler" les observations instrumentales sur les effets d'amplification.

Ce tremblement de terre est survenu alors que nos simulations numériques - encore limitées au seul domaine basse fréquence - commencent à porter leurs fruits. Les enregistrements obtenus à

cette occasion (figure 3), qui confirment l'ampleur du problème avec une accélération de 1 cm/s² au rocher, et de 5 à 9 cm/s² dans le bassin, vont être précieux pour valider et améliorer notre approche.

Ces premiers résultats posent une question importante : les valeurs de dimensionnement imposées dans les normes de construction parasismique, tant pour les bâtiments courants que pour les installations industrielles, seraient-elles dépassées en cas de séisme de magnitude 5.5 sur la faille "de Belledonne" ?

Pour y répondre, il reste à résoudre une difficulté de taille: extrapoler les effets des petits séismes (étudiés ici) à ceux de séismes importants n'est en effet pas immédiat. Le problème a divisé les sismologues et les ingénieurs pendant de longues années^{3,8}... Les études en laboratoire montrent en effet que l'amplification entre rocher et sol ne reste pas proportionnelle à l'amplitude du mouvement sismique lorsque ce dernier dépasse un certain seuil: la réponse du sol n'est plus linéaire, et les effets d'amplification tendent à diminuer. Il reste donc à évaluer les caractéristiques de ce comportement non-linéaire pour les matériaux constitutifs de la cuvette grenobloise, et à les introduire dans des modèles de calcul adaptés, après avoir dûment validé ces derniers sur des données de mouvements forts très bien contrôlés. C'est l'un des objectifs des réseaux de stations installés par l'IPSN en Californie près des failles très actives de San Andreas et de San Jacinto.

- 1 Ladoucette
- 2 Cushing et al.
- 3 Bard et Riepl
- 4 Lebrun
- 5 Vallon
- 6 Dietrich
- 7 Cotton et al.
- 8 Mohammadioun et Pecker

