

PROJET

**"CONTRIBUTIONS A LA CONNAISSANCE DU RISQUE SISMIQUE
DANS LA REGION RHONE-ALPES"**

Principaux résultats

4 avril 2000

**Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique,
Observatoire de Grenoble**

(UMR CNRS 5559)

PRINCIPAUX RESULTATS AU 04/04/2000

1 - Préambule

Le financement accordé par le comité de programme en 1997 correspondait à plusieurs actions, qui devaient être effectuées par plusieurs équipes :

Instrumentation

- i) mise à niveau du réseau d'alerte "temps réel" du LGIT (LGIT)

Etudes appliquées

- ii) exploitation des données accélérométriques (RAP ou RAM) pour des évaluations déterministes de l'aléa sismique (LGIT, Résonance S.A.)
- iii) investigations sur la nature du bruit de fond sismique en milieu urbain, et sur ses utilisations possibles pour l'analyse des conditions de site (LGIT, BRGM)
- iv) analyse de la vulnérabilité des cheminées et sur les moyens de renforcement (LGIT, Résonance S.A.)

Le financement accordé était réparti comme suit entre les différents projets et les différents participants:

	LGIT		Résonance SA		BRGM		Total
	Equipe-ment	Fonctionnement	Equipe-ment	Fonctionnement	Equipe-ment	Fonctionnement	
1. Réseau temps réel	90	-					90
2. FGE		40		60			100
3. Bruit de fond		80				60	140
4. Cheminées		-		90			90
Total	90	120	-	150	-	60	420

Au 03/04/2000, l'ensemble des crédits destinés à des "extérieurs" (BRGM, Résonance) n'ont pas été consommés, de même que les crédits d'équipement du LGIT. Les crédits de fonctionnement du LGIT n'ont pas encore tous été utilisés, car nous estimons n'avoir pas encore épuisé les études sur Annecy.

2. Travaux effectués et Résultats

2.1 - Instrumentation : Mise à niveau du réseau de surveillance sismique en temps réel du LGIT

2.1.1 - Contexte général

Le Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique de Grenoble (LGIT) assure depuis une vingtaine d'années la surveillance de la sismicité du Sud-Est de la France. Il s'appuie pour cela sur deux types d'équipements : d'une part le réseau Sismalp, qui comporte une quarantaine de stations sismologiques numériques, à transmission différée par ligne téléphonique, et d'autre part sur un réseau temps réel constitué de trois stations analogiques téléométrées.

Ces trois stations, de technologie ancienne, sont transmises en temps réel, soit par radio (station GRN, près de Grenoble), soit par liaison téléphonique dédiée (station GDM, dans le barrage de Grand'Maison, et station SURF, près du col de Larches).

Le rôle de ce petit réseau téléométré est important pour le suivi en temps réel de l'activité sismique et pour assurer l'alerte sismique. Les informations transmises par les trois stations sont enregistrées sur trois tambours à papier thermique. On dispose ainsi d'une visualisation simple des sismogrammes dans un but de contrôle, mais cela constitue aussi un outil pédagogique, voire médiatique. Ces données sont également numérisées et traitées par un micro-ordinateur, ce qui nous permet de déclencher une alerte (transmission d'un message par radio-messagerie Tam-Tam).

Bien que la responsabilité officielle de l'alerte sismique soit confiée au Réseau national de surveillance sismique (Rénass), dont le centre opérationnel se trouve à l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg, la mise en alerte du réseau Sismalp reste fondamentale au niveau régional. Ce réseau, par le nombre de ses stations, est en effet la principale composante régionale du Rénass, et sa responsabilité dans la gestion des crises sismiques régionales est prépondérante.

Dans de telles situations de crise, le suivi en temps réel est indispensable pour pouvoir répondre à la demande importante de la part des autorités, des media et du public. L'exemple du séisme d'Epagny Annecy) du 15 juillet 1996, de magnitude 5,3, a montré l'importance de ce suivi. C'est grâce à la mise en alerte du réseau Sismalp que la position exacte de l'hypocentre a pu être connue et communiquée aux services de sécurité en Haute-Savoie et que la mission d'intervention de l'Institut national des sciences de l'Univers (Insu) a pu se rendre sans délai dans la région épacentrale pour y installer un réseau temporaire de haute densité. Cependant, le réseau d'alerte du LGIT a mal fonctionné, entraînant un retard de plusieurs heures dans notre intervention. Le vieillissement du réseau téléométré, installé il y a plus de quinze ans, est en partie responsable de ce dysfonctionnement.

2.1.2 - Utilisation des crédits

En 1997, grâce à une subvention de l'Insu, nous avons amorcé une rénovation de ce matériel, en remplaçant l'électronique d'émission aux deux stations GRN et SURF. Le complément reçu dans le cadre de ce contrat (90 kF) a été utilisé en 1998 pour remplacer l'électronique d'émission à la troisième station (GDM) et l'électronique de réception pour les trois stations. Au laboratoire, la baie d'acquisition a été entièrement rénovée, ce qui permet d'améliorer considérablement la qualité et la fiabilité des données transmises.

2.1.3 - Fonctionnement actuel

Désormais, les signaux acquis par les trois stations sont, sous un délai de quelques dizaines de secondes, mis automatiquement à la disposition du Rénass par l'intermédiaire d'une

connexion ftp entre le centre de calcul de l'observatoire de Grenoble et celui de Strasbourg. Parallèlement, un micro-ordinateur serveur scrute les signaux acquis et déclenche une alerte locale lorsque ceux-ci sont d'amplitude anormale. Outre l'envoi de messages Tam-Tam, la radio-messagerie Itineris est maintenant utilisée en raison de sa meilleure couverture géographique. Une récupération automatique des données du réseau Sismalp est également lancée de façon à disposer le plus rapidement possible du maximum d'information. Pour toute détection, les signaux sont en outre affichés en temps quasi-réel sur le site internet du LGIT à la page SISMALP (<http://www-lgit.obs.ujf-grenoble.fr/>, cliquer sur "observations" puis sur "SISMALP") En cas de séisme fort ou ressenti, notre délai minimum pour procéder à une première localisation est désormais de quelques minutes.

2.2 - Exploitation des enregistrements accélérométriques rhône-alpins (RAP + interventions)

2.2.1 - Rappel des objectifs

Grâce à la sensibilité des appareils mis en place dans le cadre du RAP Rhône-Alpes, un nombre significatif d'enregistrements a d'ores-et-déjà pu être obtenu (près d'un millier, cf le site internet <http://rap2.obs.ujf-grenoble.fr/>, ou <http://www-lgit.obs.ujf-grenoble.fr/>, cliquer sur "observations" puis sur "RAP"). De plus, l'intervention post-séisme lors de la crise d'Epagny-Annecy a elle aussi permis de recueillir plusieurs dizaines d'enregistrements supplémentaires à très courte distance (Lebrun, 1997)

La demande faite en 1997 visait donc à exploiter au mieux les enregistrements ainsi obtenus, au travers de 2 actions :

- une analyse "de routine" des enregistrements du RAP, comprenant :
 - la détermination des paramètres source (*moment, chute de contrainte, dimensions, éventuellement temps de montée*) de façon à essayer d'établir progressivement des lois d'échelle (et aussi de voir dans quelle mesure de telles lois d'échelle existent réellement pour des séismes de magnitude 2 à 4, qui forment l'essentiel des enregistrements du RAP en l'absence de crise particulière).
 - la détermination de lois d'atténuation empiriques caractérisant la dépendance de l'accélération maximale, ou d'autres quantités représentatives, avec la distance et la magnitude).
- une analyse plus élaborée consistant à utiliser les enregistrements "faibles" déjà obtenus pour faire des estimations assez réalistes de ce à quoi on pourrait s'attendre en cas de séisme plus important. Nous avons proposé pour cela d'utiliser la technique des fonctions de Green empiriques ("FGE") en améliorant la description cinématique de la source, et en palliant les incertitudes incontournables sur un certain nombre de paramètres plus ou moins bien contrôlés (paramètres source du petit événement, lois d'échelle, chute de contrainte du gros événement cible, position du point de nucléation,...) par le recours systématique à une approche "LHS" ("Latin Hypercube Sampling", McKay, 1988).

2.2.2 - Analyse "de routine" des enregistrements du RAP

Nous avons indiqué dans notre demande que ce travail serait effectué soit par l'éventuel "Physicien Adjoint" dont nous avons demandé le recrutement à l'INSU sur un profil RAP, soit par un stagiaire vacataire (mais avec un certain niveau de compétences). Comme le recrutement n'a jamais abouti, nous avons donc convenu que ce travail serait fait dans le cadre d'un travail de thèse, celui de Cécile Comou, qui a démarré à l'automne 1998. Cette thèse comportait cependant un autre volet (enregistrements sismologiques sur un réseau dense de stations dans

l'agglomération grenobloise), par lequel nous avons commencé (premier semestre 99) et qui a demandé plus de travail que prévu pour la récupération et l'archivage de données. Ce travail de routine systématique a donc été décalé dans le temps mais il sera effectué dans le courant 2000.

2.2.3 - Estimations d'incertitude de la méthode FGE

Ce travail a comporté plusieurs étapes.

Nous avons d'abord amélioré le code original de K. Irikura, en remplaçant la source en dislocation rectangulaire à rupture unilatérale

- soit par un modèle "de Kostrov" (crack circulaire ou rectangulaire, avec fonction source dépendant de la distance au point de nucléation).
- soit par un modèle composite constitué d'une multitude de cracks circulaires "de Kostrov", de taille variable (modèle adapté du modèle de Zeng et Anderson).

Ces versions améliorées ont été développées conjointement au LGIT et à Résonance SA, et ont fait l'objet de diverses publications: Bard et al., 1997; Bard et al., 1998; Pavic et al., 1998; Lebrun et al, 1998.

Nous avons par ailleurs introduit et automatisé la démarche "LHS" : pour chaque estimation FGE, nous introduisons les valeurs moyennes et les incertitudes (écarts-types) sur les estimations d'une dizaine de paramètres "de calcul" (m_0 , le moment sismique de la fge, $\Delta\Sigma$, la chute de contrainte du séisme cible, la dimension de la source du petit séisme, la vitesse de rupture, la localisation du point de nucléation du sisme cible, les plans focaux, le facteur de forme L/W de l'événement cible, et la vitesse d'ondes S moyenne dans la croûte). Les incertitudes ont été estimées à partir d'une enquête auprès d'une vingtaine de sismologues internationaux. Une description plus détaillée de cette démarche pourra être trouvée dans le document fourni en annexe. L'ensemble du logiciel "FGE améliorée + LHS" est maintenant opérationnel.

Il a été appliqué à plusieurs cas "rhône-alpins", comme indiqué dans le tableau suivant.

Calculs effectués			
Cas	Séisme cible	Sites d'étude	FGE
1	séisme d'Annecy: ML = 5.3	Zone épiscopale (bassin annécien)	Répliques, réseau d'intervention + données RAP (97)
5	séisme ML=5.5 sur faille bordière de Belledonne	Cuvette grenobloise	Séisme de Lancey 95 Séisme de Laffrey 1999

Zone annécienne

Les objectifs étaient multiples: étude de la sensibilité à la fonction de Green empirique "de départ", estimation en champ proche des mouvements sismiques correspondant au choc principal du 15/07/96.

La première étape était nécessairement l'analyse des enregistrements de répliques (29 événements au total), en vue de déterminer les paramètres de source correspondants: nous avons eu la grande surprise de constater que les chutes de contrainte étaient extrêmement faibles: inférieures à 0.2 Mpa, descendant parfois en dessous de 10 kPa (magnitudes inférieures à 2, fréquences coin très faibles, inférieures à 10 Hz). Il se peut que le modèle de source

classique en ω^2 ne soit pas valable pour de tels petits séismes superficiels, avec une branche intermédiaire qui rend très délicate l'estimation des fréquences coin et donc des chutes de contrainte.

Cela est peut-être en liaison avec la profondeur très faible de ces événements (< 4 km), mais a posé un problème que nous n'avons jamais rencontré auparavant, dans la mesure où nous supposons a priori une chute de contrainte "normale" (environ 1 Mpa) pour le choc principal. Nous nous sommes donc limités aux fge pour lesquelles la chute de contrainte était la moins faible.

Nous avons alors effectué deux types de calculs (présentés dans un rapport annexe):

- avec un événement de départ (01/08/96 à 06:00, magnitude Sismalp = 2.1), nous avons appliqué la méthode LHS pour deux sites d'enregistrement, Annecy-le-Vieux (Rocher) et Meythet (Alluvions), et avons obtenu des estimations du mouvement lors du choc principal (magnitude 5.3, moment $1.7 \cdot 10^{16}$ N.m, chute de contrainte 0.72 MPa). On trouve des niveaux spectraux moyens (sur le spectre de réponse en accélération) autour de 1.5 à 2 m/s² pour des fréquences comprises entre 3 et 10 Hz, avec un écart-type correspondant à un facteur 2.5 à 3.
- nous avons par ailleurs, pour les deux mêmes sites, réalisé une étude de la sensibilité à la fonction de Green empirique "de départ". Nous avons pour cela considéré 4 autres événements, et avons effectué les calculs pour le cas "de référence" (sans l'analyse d'incertitude LHS). Les résultats varient assez sensiblement d'une fge à l'autre, les niveaux spectraux moyens sont légèrement plus élevés que dans l'étude précédente, et les écarts-types restent comparables (mais n'ont pas beaucoup de signification, puisqu'ils ne correspondent qu'à 5 cas différents).

Réplique	Date	Heure	Latitude	Longitude	Magni-tude	Moment	Chute de contrainte
7	25/07/96	16:12	45.944	6.078	1.1	$5.6 \cdot 10^{10}$	3 kPa
23	29/07/96	15:34	45.921	6.108	2.0	$1.2 \cdot 10^{12}$	20 kPa
24	29/07/96	15:40	45.927	6.108	1.3	$1.1 \cdot 10^{11}$	7 kPa
25	30/07/96	02:16	45.951	6.088	1.3	$1.6 \cdot 10^{11}$	15 kPa
28	01/08/96	06:00	45.941	6.084	2.1	$1.5 \cdot 10^{12}$	0.2 Mpa

Zone grenobloise

Nous disposons au départ de 3 enregistrements de petits séismes situés sur la "faille de Belledonne": nous leur avons appliqué la méthode FGE "multicracks", pour le cas de référence correspondant à un séisme de magnitude 5.5 avec une chute de contraintes de 3 MPa (sans l'approche LHS).

Puis est survenu en janvier 1999 le séisme de Laffrey, qui a procuré un très beau jeu d'enregistrements accélérométriques sur le réseau de l'agglomération grenobloise. Nous avons alors appliqué la méthode LHS à deux sites, celui du Musée Dauphinois (rocher) et un autre au centre de Grenoble, pour deux séismes cibles sur la faille de Belledonne (tous deux de magnitude 5.5: un à La Combe de Lancey (Nord-Est), et un autre à Laffrey (Sud). Les résultats indiquent de façon concordante que :

- l'écart-type sur ces estimations tourne autour d'un facteur 2 (ce qui est relativement faible)

- la comparaison aux spectres réglementaires actuels révèle un excès de pessimisme au rocher (mouvements estimés très inférieurs aux sollicitations réglementaires), et par contre un certain optimisme trop optimistes dans la vallée, où les mouvements estimés sont supérieurs aux sollicitations réglementaires d'un facteur 2 à 3.

Cette technique sera maintenant appliquée en routine sur tous les enregistrements du RAP qui en vaudront le coup, à commencer par ceux obtenus à Nice le 01/11/1999 lors d'un séisme de magnitude 3 survenu dans la région de Peille.

2.3 - Nature du bruit de fond sismique et techniques de reconnaissance du sous-sol en milieu urbain

2.3.1 - Rappel des objectifs

Plusieurs études précédentes, menées notamment dans diverses régions alpines, avaient montré d'une part l'importance des effets de site, d'autre part la lourdeur des études classiques par enregistrement de séismes (à cause du contexte de sismicité faible), et enfin les difficultés et le coût des reconnaissances géophysiques "classiques" (sismique réflexion et réfraction), notamment en milieu urbain. Nous souhaitons donc, dans le cadre de ce projet, concentrer nos efforts sur une nouvelle technique d'exploration du sous-sol, ne nécessitant aucune source artificielle: l'analyse du bruit de fond enregistré "en réseau" à l'aide de plusieurs capteurs à distances variables. L'idée de base, fondée sur l'hypothèse que le bruit de fond est constitué essentiellement d'ondes de surface, est d'en déduire, soit par analyse F-K ("fréquence - nombre d'onde"), soit par intercorrélacion spatiale (Aki, 1957), les courbes de dispersion des ondes de surface (Rayleigh et Love), et de remonter ainsi à la structure en vitesse, non seulement en ondes P mais aussi et surtout en ondes S.

Notre objectif était de nous familiariser avec ces techniques, et de les appliquer à quelques sites rhône-alpins, avec une confrontation avec les résultats fournis par d'autres techniques de reconnaissance. Nous voulions donc réaliser des enregistrements de bruit de fond en réseau, les analyser, et en comparer les résultats avec ceux fournis par d'autres méthodes. Nous avons choisi le site d'Annecy où le BRGM avait d'autres études en cours (et en projet), et devait donc réaliser des mesures "SASW" (Seismic Analysis of Surface Waves) à l'aide d'un dispositif instrumental qui vient d'être développé à Orléans.

2.3.2 - Mesures SASW dans la région d'Annecy (BRGM Marseille: P. Dominique)

Dans le cadre du microzonage sismique d'Annecy et de ses environs, des mesures de vitesse des ondes de cisaillement (Ondes S) par la méthode d'Analyse spectrale des ondes de surface (SASW) ont été réalisées sur plusieurs sites. La connaissance de la vitesse des ondes S des couches superficielles est fondamentale en microzonage sismique, car elle donne accès au module de rigidité G, lequel permet la modélisation des mouvements du sol soumis à des sollicitations sismiques.

La méthode SASW est basée sur l'étude de la dispersion des ondes de surface (Ondes de Rayleigh). Dans le cas d'un milieu dont les propriétés élastiques varient avec la profondeur, la vitesse des ondes de surfaces varie avec la longueur d'onde, et donc la fréquence. Le milieu joue le rôle d'un spectrographe donnant à chaque composante spectrale une vitesse caractéristique. Suivant la fréquence considérée, les ondes de surface contiennent des informations sur le milieu traversé entre la surface et la profondeur maximale de pénétration des différents modes. Une composante haute-fréquence associée à une faible longueur d'onde, apportera des informations sur des formations superficielles, alors que des composantes basse fréquence concerneront les couches profondes. L'inversion généralisée de la courbe de dispersion, à partir d'un modèle initial permet de calculer un modèle tabulaire de répartition des ondes S.

Les sites choisis correspondent essentiellement à 3 zones :

- Les bords du lac : jardins du Paquier, Stade du Coteau.

- La Zone Industrielle des Iles, le long du Fier et de l'autoroute Grenoble-Genève (+ le stade municipal à l'ouest d'Annecy).
- L'aéroport d'Epagny et le village d'Epagny (proche de l'épicentre du séisme du 15 juillet 1996)

Le dispositif employé est un dispositif classique de sismique réfraction avec trois types de distance inter-trace: 5,10 et 20 m (longueur des flûtes: 120, 240 et 480 m avec une centrale d'acquisition de 24 traces). Deux sortes de géophones ont été utilisés, en alternance le long des flûtes, de fréquence propre 4.5 et 2 Hz. L'emploi de géophones basse fréquence a pour but de chercher à enregistrer les ondes basse fréquence qui affectent les couches plus profondes. Les sources étaient de trois types: des explosifs (de 100 à 500 g de dynamite), le marteau classique et une chute de poids montée sur un moteur thermique. Cette dernière s'est révélée indispensable pour les mesures en zone urbaine, où l'usage de la dynamite est impossible.

L'ensemble des résultats a été consigné dans un rapport BRGM (Fabriol et al., 1998, document R40392). Il en ressort les conclusions suivantes :

- d'un point de vue méthodologique, cette méthode SASW est capable de pénétrer jusqu'à 30 m de profondeur en milieu urbain (source chute de poids), et jusqu'à 60 m en milieu périurbain avec une source explosive
- l'utilisation de géophones 2Hz ou 4.5 Hz n'a pas apporté d'améliorations énormes par rapport aux géophones 10 Hz classiques.
- l'inversion des courbes de dispersion a permis de déterminer des profils de vitesse Vs, validées de surcroît par l'interprétation des ondes de volume diffractées
- il reste cependant des problèmes méthodologiques associés aux inversions de vitesse (couches molles "pincées")
- enfin, les modèles obtenus sur le site d'Annecy indiquent une grande variabilité spatiale de Vs, avec les valeurs les plus faibles en bord de lac (100 à 150 m/s), des valeurs plus élevées en surface à l'aéroport (300 m/s), et des vitesses en profondeur dépassant 600 à 800 m/s en dehors de la zone du lac.

2.3.3 - Mesures de bruit de fond en réseau dans l'agglomération grenobloise (LGIT Grenoble + Université de Potsdam + IPSN)

Ces mesures SASW, qui utilisent des sources artificielles, ne permettent donc pas de pénétrer au delà d'une profondeur de 30 m en ville, et 60 m en dehors. Or, dans les Alpes, il existe beaucoup d'endroits où les épaisseurs des formations quaternaires sont beaucoup plus importantes, notamment toutes les grandes vallées glaciaires. Nous avons donc commencé à étudier une autre technique, celle utilisant des enregistrements en réseau du bruit de fond sismique naturel, technique à laquelle un doctorant (B. Bettig) consacre sa thèse.

Notre intention première était de démarrer ces nouvelles études de bruit de fond sur l'agglomération annécienne, et de comparer avec les mesures SASW. Entre temps, les choses se sont un peu précipitées sur le site de Grenoble, avec des demandes fortes à la fois du SDAU et de l'IPSN pour des études spécifiques de la structure du bassin grenoblois. Nous avons donc décidé de mener nos premières études de ce type sur le site de Grenoble, et d'aller sur Annecy une fois que les techniques de traitement seraient au point. Au printemps 1999, des mesures ont été réalisées en collaboration avec l'Université de Potsdam et l'IPSN [qui dispose d'une instrumentation appropriée que la nôtre: ensemble de 13 stations totalement identiques avec très bonne synchronisation temporelle grâce à un GPS quasi-continu] en 7 sites de l'agglomération grenobloise (Chantoume / Domène, La Taillat/ Gières, Campus, Bon Pasteur, Parc Mistral, Sunchrotron). Nous voulions effectuer des mesures similaires sur Annecy au deuxième semestre 1999, mais les instruments sur lesquels nous comptons ont été mobilisés pour des interventions non prévues après le séisme d'Izmit (Turquie) du 17/08/1999.

Les données acquises sur les sites grenoblois sont encore en cours d'analyse, à l'aide de plusieurs techniques de traitement de signaux multitraces: SPAC (autocorrélation spatiale), f-k

(fréquence – nombre d'ondes), Music, à la fois à Potsdam et à Grenoble. Certaines de ces techniques ont été appliquées en l'état à ces nouvelles données, d'autres ont donné lieu (et donnent encore) à d'importants développements méthodologiques (thèse de B. Bettig). Néanmoins, même si les résultats sont encore préliminaires, ils montrent que l'on peut effectivement, moyennant certaines précautions, reconstruire le profil de vitesses jusqu'à de très grandes profondeurs (plusieurs centaines de mètres: 500 à 600 m) à partir d'enregistrements du bruit de fond naturel, et ce en environnement urbain. Les précautions à mettre en oeuvre concernent l'ouverture du réseau (qui doit être suffisamment large: au moins 1 à 2 km dans le cas – fort particulier – de Grenoble), ainsi que la bande passante et la calibration des capteurs (qui doivent descendre jusqu'à 0.2 Hz dans le cas de Grenoble). Ainsi, sur Grenoble, avec des réseaux d'ouverture variable de 100 m à 1 km et des capteurs de 0.2 Hz, il est possible d'identifier les courbes de dispersion de 0.5-1 Hz à 4-5 Hz, et donc d'inverser les profils de vitesse jusqu'à 500 à 600 m. Il subsiste cependant encore des problèmes, car des techniques différentes d'analyse (f-k, SPAC) donnent des résultats sensiblement différents à basse fréquence: ces problèmes sont en cours d'analyse par B. Bettig (Scherbaum et al., 1999; Bettig et al., 2000).

De nouvelles mesures sont programmées pour l'été 2000, sur deux sites:

- Grenoble avec une ouverture plus grande (jusqu'à 2 km) et des capteurs encore plus large bande (0.05 Hz) pour bien contraindre les courbes de dispersion à très basse fréquence. Le site de la Cjgantourne où a été effectué le forage profond et où la profondeur exacte du substratum est parfaitement connue sera étudié avec un soin particulier.
- Annecy, et notamment les jardins du Paquier, où l'on s'attend à trouver des épaisseurs certes supérieures à 30 m mais bien inférieures aux 500 à 900 m de Grenoble, et où donc des capteurs à moyenne période et surtout une ouverture de réseau de quelques centaines de mètres devraient suffire.

Par ailleurs, des études par modélisation numérique sont en cours (B. Bettig) pour analyser les limites de cette méthode dans le cas où la structure n'est pas latéralement invariante, et notamment le cas de la cuvette grenobloise.

Quoi qu'il en soit, ces résultats encore préliminaires sont très encourageants, et nous ont incité à déposer un projet européen (appel à propositions Environnement et Développement Durable, 15/02/2000) sur les utilisations du bruit de fond pour l'estimation des effets de site. Ces études ont aussi contribué à renforcer la visibilité internationale du LGIT dans ce domaine (nombreuses communications invitées).

2.4 - Analyse de la vulnérabilité des cheminées et propositions de techniques de renforcement

Cette partie du projet a été réalisée en quasi-totalité par un bureau d'études privé, Perreten et Milleret S.A., sous la responsabilité de M. Koller. La méthodologie et les résultats en sont indiqués dans deux rapports spécifiques (Koller et Lacave, 1999; Duchêne et al., 1999).

2.4.1 - Rappel des objectifs

Le séisme d'Annecy-Epagny du 15/07/96 a provoqué la chute d'un grand nombre de cheminées. S'il était survenu en journée ou en soirée, les conséquences en auraient été dramatiques. Or, un séisme de cette magnitude ne peut pas être considéré comme exceptionnel dans la région, où un certain nombre de villes présentent des rues étroites, de plus en plus souvent piétonnières. Une politique de prévention du risque sismique devrait donc accorder une attention particulière à la tenue des cheminées et donc à la manière de les renforcer.

Les questions auxquelles nous souhaitons apporter des éléments de réponse étaient donc les suivantes:

- quelles sont les cheminées qui présentent un danger, comment les identifier, comment les recenser ?
- est-il possible, pour de tels ouvrages de proposer des solutions de renforcement suffisamment peu onéreuses pour être économiquement acceptables ? [et ces solutions sont-elles compatibles avec la préservation de certains caractères architecturaux ?]
- enfin, comment organiser ce renforcement à l'échelle d'une ville, et qui doit en supporter le coût ?

Nous souhaitons donc "profiter" de la sensibilité particulière à ce problème dans la ville d'Annecy pour y conduire une étude de cas.

2.4.2 - Analyse de vulnérabilité - Mesures des fréquences propres des cheminées

La première étape a consisté à faire un "état des lieux", concernant la typologie des cheminées existantes (deux types: post 1940 en boisseaux maçonnés et enduits, "anciennes" le plus souvent en briques et quelquefois en pierre, et le plus souvent enduites).

Quant aux conditions d'appui, ces cheminées peuvent être soit construites dans le prolongement direct d'un mur mitoyen (encastrement direct au couronnement du mur, élancement réel hauteur/largeur = élancement apparent), soit, lorsque le mur s'arrête au niveau des combles, comporter une partie "invisible" et passer au travers du toit: leur élancement réel est alors sensiblement plus important que leur élancement apparent.

L'évaluation de la stabilité sous séisme de ces cheminées a alors été conduite par le calcul sur la base d'une étude paramétrique prenant en considération les dimensions des cheminées (hauteur, largeur, épaisseur), en constatant que la ruine provenait essentiellement du renversement par suite des moments appliqués. Dans ces conditions, il a été possible de montrer que les moments de renversement (action sismique) et les moments de stabilisation (résistance de la cheminée) ne dépendent que de la masse par unité de longueur, de la hauteur, et de la dimension de la section, et sont quasiment indépendants de la nature des matériaux constitutifs. Dès lors, le rapport entre ces deux moments, ne dépend que du rapport entre la hauteur h de la cheminée et sa dimension a dans le sens de l'effort. Autrement dit, l'accélération maximale que peut supporter une cheminée ne dépend que de son élancement:

Les valeurs essentielles qu'il faut déterminer sont donc d'une part l'accélération de sollicitation (au niveau de la cheminée) et d'autre part son élancement réel.

Accélération efficace à prendre en compte

L'accélération effective subie par une cheminée dépend, outre du séisme lui-même, des caractéristiques dynamiques du bâtiment et de la cheminée. Néanmoins, à partir de mesures de fréquences propres sur 3 cheminées, il a été possible de justifier une hypothèse suivant laquelle, dans le vieil Annecy, il n'y a quasiment jamais coïncidence entre les fréquences propres des cheminées (au minimum 7 Hz) et celles des bâtiments (3-4 niveaux minimum).

Dès lors, on peut tabler sur une accélération efficace "réglementaire" de l'ordre de **0.375 g**. Comme, à ce niveau, il y aurait sans doute aussi beaucoup de dommages structuraux, l'étude a retenu une action sismique "de dimensionnement" pour l'identification des cheminées vulnérables de seulement **0.19 g** (correspondant à un degré d'intensité inférieur): seules les cheminées manifestement instables pour ce niveau de sollicitation devraient être renforcées.

Ces valeurs peuvent faire l'objet de discussions, et être modifiées en fonction d'une étude de microzonage.

Détermination de l'élancement

Cette valeur est plus facile à établir, par un examen visuel de la cheminée et de ses conditions de liaison avec la structure de l'immeuble. Cet examen devra cependant être réalisé par un ingénieur praticien relativement expérimenté, seul à même de déterminer la nature et l'efficacité de ces liaisons.

Donc, l'estimation de la vulnérabilité d'une cheminée doit prendre en compte au moins autant ses conditions environnementales que les calculs proprement dits, qui peuvent se résumer par un tableau à double entrée, fourni dans l'étude:

$\gamma_{\max} > a/h g$: renforcement à étudier.

$\gamma_{\max} < 0.67 a/h g$: cheminée "sûre".

$0.67 a/h g < \gamma_{\max} < a/h g$: cheminée à regarder de plus près.

Propositions pratiques

Si l'on estime à 500 le nombre de cheminées dans le vieil Annecy, il n'est pas économiquement envisageable de faire faire un examen systématique par un ingénieur praticien (coût unitaire estimé à environ 500F, coût total 250 kF). Il est donc proposé de faire un premier tri au moyen d'un questionnaire établi par des spécialistes mais qui serait rempli par les ramoneurs, pour un coût unitaire d'environ 100F. Au bout d'une année de campagne, l'analyse de ces questionnaires devrait alors permettre de sélectionner une centaine de cheminées qui seraient alors examinées par des spécialistes : Une telle procédure aurait un coût total diminué de moitié (120 kF)

2.4.3 – Procédures de renforcement

Plusieurs types de solutions de renforcement ont été étudiés :

- ❖ intervention extérieure
 - barres extérieures
 - cornières d'angle
 - treillis

A priori, une telle intervention ne pose pas de problème d'ordre architectural d'après l'architecte des bâtiments de France, les cheminées d'Annecy n'étant pas considérées comme ayant une valeur patrimoniale quelconque... Par contre cela n'est pas toujours faisable techniquement ou économiquement, surtout lorsque le point d'ancrage de la cheminée est sous le toit dans les combles.

- ❖ intervention intérieure
 - barres dans alvéoles des boisseaux (cheminées récentes uniquement)
 - tubage inox rigide
 - tubage procédé "solid-flue" (le seul possible lorsque les conduits ne sont pas droits)

Pour chacune de ces solutions, l'amélioration de résistance a été calculée en fonction des caractéristiques géométriques de la cheminée. Cette amélioration s'avère effective et satisfaisante dans pratiquement tous les cas. Les critères de choix de procédé de renforcement deviennent dès lors essentiellement économiques.

Le coût et l'efficacité de ces procédures sont résumées dans le tableau ci-après :

Type de renforcement		Efficacité (facteur d'augmentation de la résistance moyenne)	Coût (Valeur moyenne, kF)
Intervention extérieure	Barres d'armature intégrées dans l'enduit	10	4
	Comières d'angle	12	3.3
	Treillis	2	3.1
Intervention intérieure	Armatures dans alvéoles des boisseaux	8	3.5
	Tubage inox rigide	18	7.6
	Tubage procédé "solid-flue"	> 50	9.9

2.4.4 – Synthèse

La procédure suivante pourrait donc être envisagée, à Annecy ou dans toute autre ville où le problème des cheminées serait perçu comme préoccupant

- Campagne de détection des cheminées présentant un danger potentiel, initiée par la commune, via une sollicitation des ramoneurs, indemnisés pour cette tâche
- examen détaillé des cheminées suspectes et de la configuration de leur environnement, en vue de la détermination du niveau de sollicitation et de l'élançement
- détermination d'un degré de risque par importation des paramètres précédents dans un tableau à double entrée ou dans une abaque
- détermination du coût de renforcement en fonction des caractéristiques de la cheminées

Le coût pour en arriver là, pour un stock d'environ 500 cheminées, serait d'environ 120 à 150 kF

- Décision de renforcement ou de statu quo
- devis détaillé individuel, spécifique à la cheminée concernée
- travaux

Quant à savoir comment payer ces travaux, cela est une autre question ? Une compagnie d'assurance interrogée (AXA) a clairement indiqué qu'aucune incitation ne peut être espérée de leur part (!...). le bon sens pourrait conduire à procéder comme suit :

- campagne de sensibilisation des propriétaires concernés
- le cas échéant, proposition d'aides de la collectivité publique, soit directe, soit par incitation fiscale (réduction des impôts locaux)
- pour les cheminées présentant un danger particulièrement évident, et en cas de refus délibéré du propriétaire de procéder à un renforcement, intervention contraignante de l'autorité

3 - Publications

- Bard, P.-Y., 1998. Microtremor measurements: a tool for site effect estimation ?, *State-of-the-art paper, Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on seismic motion, Yokohama, December 1-3, 1998, Balkema, 3, 1251-1279.*
- Bard, P.-Y., 1999. Some considerations on the use of noise for site effect estimation, *State-of-the-art paper, Third International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, May 17-19, 1999.*
- Bard, P.-Y., M. Koller and R. Pavic, 1997. Ground motion prediction with the empirical Green's function technique: an assessment of uncertainties and confidence level, *Proceedings of the International Symposium on Natural Disaster Prediction and Mitigation, Kyoto, Japan, December 1-5, 1997, 81-91.*
- Bard, P.-Y., M. Koller and R. Pavic, 1998. Ground motion prediction with the empirical Green's function technique: an assessment of uncertainties and confidence level, *2nd Japan-Turkey Workshop on Earthquake Engineering, Istanbul, February 1998.*
- Cornou, C., et P.-Y. Bard, 1999. Simulation numérique du bruit de fond : rapport H/V et courbes de dispersion. *5^{ème} Colloque National de l'AFPS, ENS Cachan, 19-21 Octobre 1999, Vol. I, 112-119.*
- Cotton, F., P.-Y. Bard, C. Berge et D. Hatzfeld, 1999. Qu'est-ce qui fait vibrer Grenoble ?, *La Recherche, 320, Mai 1999, pp. 39-41.*
- Duchêne, J.-Y., J. Barreiro, M. Koller, 1999. Ville d'Annecy: Vulnérabilité des cheminées et propositions de renforcement, Rapport technique Perreten et Milleret S.A., 14 pages + 4 annexes.
- Fabriol, H., A. Bitri, B. Lebrun, J.-M. Balthassat et G. Richalet, 1998. Application de la méthode SASW (Analyse spectrale des ondes de surface) dans le district d'Annecy (France). Rapport BRGM R40392, n 40 pages, 22 figures
- Kamae, K., P.-Y. Bard and K. Irikura, 1998. Prediction of strong ground motion at EUROSEISTEST using the empirical Green's function method, *Journal of Seismology, 2-3, 193-207.*
- Koller, M., et C. Lacave, 1998. Exploitation des données accélérométriques pour des évaluations déterministes de l'aléa sismique dans la région d'Annecy, Rapport technique RESONANCE Ingénieurs Conseils S.A. RT219.01, 23 pages, 16 figures
- Koller, M., et C. Lacave, 1999. Mesures de la fréquence propre fondamentale de cheminées dans la vieille ville d'Annecy, Rapport technique RESONANCE Ingénieurs Conseils S.A. RT219.02, 8 pages, 4 figures
- Lebrun, B., D. Hatzfeld and P.-Y. Bard, 2000. A site effect study in urban area: experimental results in Grenoble (France), *Pageoph, in press.*
- Pavic, R., Koller, M., , P.-Y. Bard, and C. Lacave-Lachet, 2000. Ground motion prediction with the empirical Green's function technique: an assessment of uncertainties and confidence level, *Journal of Seismology, 4, 59-77.*
- Scherbaum, F., J. Riepl, B. Bettig, M. Ohrberger, F. Cotton and P.-Y. Bard, 1999. Dense array measurements of ambient vibrations in the Grenoble basin to study local site effects, *AGU Fall meeting, San Francisco, December 2000.*
- Zerva, A., A. Petropulu and P.-Y. Bard, 1999. Blind deconvolution methodology for site response evaluation exclusively from ground surface seismic recordings, *Soil Dyn. and Earthq. Engng, 18, 47-57.*