Mémoire présenté en vue de l'obtention de
l'Habilitation à Diriger des Recherches
à l'Université des Sciences et Technologies de Lille

par **Anne-Marie Duval**

spécialité : sismologie de l'ingénieur

Thème:

Des effets de site aux scénarios de crise sismique: méthodes et applications

"Effet de site", création de Nathalie Bergeron-Duval, 2007

Devant le jury composé de MM.:

Catherine BERGE-THIERRY	IRSN BERSSIN, Fontenay aux roses	Rapporteur
Félix DARVE	INPG Lab. 3S, Grenoble	Rapporteur
Jean-Pierre MAGNAN	LCPC Direction Technique, Paris	Rapporteur
Pierre-Yves BARD	LGIT, LCPC / Univ. Grenoble	Examinateur
Luc CHOUINARD	Univ. McGill, Dép. de Génie Civil, Montréal, Canada	Examinateur
Jean-Louis DURVILLE	Conseil Général des Ponts et Chaussées, Paris	Examinateur
Hormoz MODARESSI	BRGM ARN, Orléans	Examinateur
Isam SHAHROUR	USTL Lab. Mécanique, Lille	Examinateur

Soutenance : le 10 décembre 2007 à Paris, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

CETE Méditerranée

© 2008 Tous droits réservés.

Enregistrement de la sismicité sur les pistes de l'aéroport de Nice par l'ERA en 1993.

Merci à mes compagnons de voyage à bord de l'ERA "Risque sismique": à ceux qui ont fait naître l'équipe et m'ont accueillie, à ceux qui ont fait un bout de vol à bord et à ceux qui volent aujourd'hui.

Du plus vieux baroudeur à la plus jeune "ingénieuse", ils ont permis l'aboutissement des travaux présentés ici dans le partage d'un même enthousiasme. La rédaction de ce mémoire tient à la confiance et au soutien quotidien d'Etienne Bertrand, Sylvain Vidal, Michel Pernoud, Héloise Cadet, Julie Régnier et Aiham Saad.

Que les parfums d'Afrique du nord et d'Espagne accompagnent la retraite des uns et que la beauté des Alpes Maritimes conserve leur dynamisme à ceux qui restent ou rejoignent l'ERA.

Merci aussi à Isam Shahrour pour sa curiosité scientifique et ses conseils, à Jean-François Semblat sans qui je ne me serais certainement pas lancée dans l'HDR, à Catherine Berge-Thierry, à Félix Darve, à Jean-Pierre Magnan, à Pierre-Yves Bard, à Luc Chouinard, à Jean-Louis Durville et à Hormoz Modaressi qui m'ont fait l'honneur de participer à ce jury et m'ont enrichie de leur vision du domaine et de leurs réflexions.

© 2008 Tous droits réservés.

Mes missions professionnelles en bref …

Mesurer les effets de site: Les effets de site sont des modifications du signal sismique liés à la configuration géologique de surface et qui conduisent souvent à une aggravation des dégâts. Dès mon arrivée dans l'ERA "Risque sismique" en 1991, la prévision des effets de site a constitué mon thème central de recherche. Des méthodes d'évaluation devaient être développées pour réaliser des microzonages. J'ai d'abord mis au point les processus de traitement pour obtenir la fonction de transfert par séisme d'un site en comparant des enregistrements de séismes d'une station à une autre. Puis j'ai testé une méthode japonaise ("H/V bruit de fond") ce qui constituait une première en France au moins. En 1994, j'ai soutenu une thèse de doctorat sur la détermination de la réponse d'un site aux séismes à l'aide du bruit de fond sismique. De nombreuses études, toujours basées sur l'enregistrements de séismes et de bruit en France comme à l'étranger ont suivi ces premiers développements. Cette technique a été proposée dans les premières études préalables aux plans de prévention des risques sismiques ou dans d'autre type d'étude comme des avant projet d'ouvrages d'art. J'ai parallèlement participé au projet européen SESAME qui a permis d'établir des bases communes de cette technique et mis à disposition des futurs utilisateurs de la méthode (notamment dans les pays en voie de développement) des outils gratuits et validés par la communauté scientifique internationale. Pour fiabiliser les microzonages en France, un travail de thèse a été conçu en collaboration avec le LGIT : il s'agit de définir une procédure fiable et reproductible permettant d'adapter le spectre de réponse réglementaire de référence aux conditions locales de site en se basant sur des mesures de bruit de fond.

Evaluer d'autres maillons de la chaîne du risque sismique: Les problématiques soumises à l'ERA par l'Etat ou les collectivités territoriales se limitent rarement aux seuls effets de site. Etablir des propositions de contenu technique pour les Plans de Prévention des Risques sismique nécessite par exemple d'identifier et de lier entre eux les éléments qui constituent le risque. Ce nécessaire élargissement des domaines de compétence a motivé ma participation à des actions de recherche variées: depuis la sismo-tectonique (la campagne SALAM a permis de découvrir une faille active dans la région niçoise) jusqu'à l'analyse dynamique d'ouvrage d'art et de bâtiments (par l'enregistrement de vibrations ambiantes. Mais mon expérience la plus solide et la plus étendue sur la chaîne du risque est sans doute ma participation au pilotage et la réalisation d'études liées au projet GEM-GEP à Nice. L'objectif était de mettre au point des méthodes conduisant à l'estimation des dommages envisageables en cas de séisme. Cette expérience pilote devait être reproductible dans toute ville française. L'accent était mis sur la vulnérabilité du bâti existant et le repérage des structures de gestion de crise les plus fragiles. L'intérêt de ce projet tient à la fois des développements scientifiques à la mesure de l'importance des moyens mis en œuvre, mais aussi à ces retombées sur le plan de la politique de gestion des risques en France (concertation des acteurs institutionnels, communication envers le public, préparation du Plan National Séisme).

Etablir des scénarios de crise sismique: Après cette première expérience de réalisation de scénario de crise sismique à Nice, diverses applications basées sur les mêmes principes ont été réalisées par l'ERA (notamment pour des PPRs). Par ailleurs, nous développons depuis d'autres concepts pour produire des scénarios de dommages sismiques tenant compte de divers aléas et de la vulnérabilité correspondante des éléments qui constituent les infrastructures routières (projet SISROUTE pour la Direction des Routes du Ministère de l'Equipement) ou l'ensemble d'un territoire (projet européen FORESIGHT).

Animer la recherche: Je dirige depuis 2002 l'Equipe de Recherche Associée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées « ERA Risque Sismique » du Laboratoire de Nice, équipe dans laquelle je travaille depuis 1991. Depuis 2002 également, je partage avec Jean-François Semblat (LCPC) la responsabilité d'une Opération de Recherche qui permet de coordonner les programmes de recherche concernant le risque sismique des unités du LCPC, des unités mixtes LCPC - Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et des Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées. Mon implication à différents niveaux dans le montage, la gestion, le suivi ou l'encadrement de projets scientifiques et de groupes de travail m'a permis de découvrir plusieurs aspects de l'animation de la recherche. Ces missions complètent mon expérience de chargée d'études et renforcent les liens tissés avec les autres services du Ministère de l'Ecologie du Développement et de l'Aménagement Durables, les organismes de recherche français et étrangers préoccupés comme mon équipe par les séismes et leurs conséquences.

© 2008 Tous droits réservés.

SOMMAIRE

PREAMBULE **1**

1 ACTIVITES DE RECHERCHE **4**

1.1 Contexte de mes activités 4
1.1.1 Le risque sismique : une vaste problématique *4*
1.1.2 Les spécificités de mon cadre de travail : l'ERA Risque sismique *4*
1.1.3 Evolution de mes missions et responsabilités *5*
1.2 Domaines de recherche 6
1.2.1 Comprendre et prévoir les effets de site *6*
1.2.2 Observation des dommages *12*
1.2.3 De l'étude d'aléa aux scénarios de crise sismique *13*

2 PRODUITS ET ACTIONS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES **17**

2.1 Synthèse 17
2.2 Publications scientifiques et techniques 17
2.2.1 Revues internationales à comité de lecture *17*
2.2.2 Revues françaises à comité de lecture *18*
2.2.3 Rapports d'étude *19*
2.2.4 Rapports de recherche *23*
2.2.5 Articles de vulgarisation *26*
2.3 Rencontres scientifiques 27
2.3.1 Conférences internationales *27*
2.3.2 Conférences nationales *31*
2.3.3 Séminaires *32*
2.3.4 Manifestations du Réseau Scientifique du Ministère de l'Equipement *33*
2.4 Participation à des projets de recherche 33
2.5 Collaboration et partenariats 38
2.5.1 Opérations de recherche du LCPC *38*
2.5.2 Autres collaborations *39*
2.5.3 Séjours à l'étranger ou missions sur le terrain *40*
2.6 Animation scientifique 40
2.6.1 Groupes d'experts *40*
2.6.2 Affiliations *40*
2.6.3 Participation à l'organisation de séminaires et conférences *40*
2.6.4 Groupes de travail. *41*
2.6.5 Rôle dans l'organisation de la recherche au LCPC *41*
2.7 Actions de formation 41
2.7.1 Encadrement de travaux de thèse *41*
2.7.2 Encadrement de personnels temporaires *42*

3 DETECTION DES EFFETS DE SITE **46**

3.1 Introduction 46
3.1.1 Description des phénomènes *46*
3.1.2 Objectifs des recherches *47*
3.1.3 Les différentes approches de l'effet de site *48*
3.2 Méthode basée sur l'enregistrement de séismes 49
3.2.1 Principe et mise en œuvre *49*
3.2.2 Illustration sur Nice *50*
3.2.3 Contraintes de mise en oeuvre et d'exploitation *51*
3.3 Méthode « H/V bruit de fond » 53
3.3.1 Historique de la méthode *53*
3.3.2 Principe et résultats antérieurs *53*
3.3.3 Application sur la ville de Nice *55*
3.3.4 Conclusion *61*
3.4 Résultats du projet européen Sesame 64

© 2008 Tous droits réservés.

3.4.1 Introduction 64
3.4.2 Simulations numériques du bruit de fond 64
3.4.3 Avancées réalisées pour la technique "H/V bruit de fond" 66
3.4.4 Avancées réalisées pour les techniques de réseau 74
3.4.5 Conclusions 77
3.5 Utilisation combinée des méthodes basées sur le bruit de fond 79
3.5.1 Introduction 79
3.5.2 Summary of the previous studies 79
3.5.3 Array measurements: strategy and analysis 81
3.5.4 Site effect estimation with the empirical function determined with the Japanese network Kik-Net 84
3.5.5 Conclusions 85
3.6 Méthode de simulation numérique 86
3.6.1 Seismic wave propagation and site effects 86
3.6.2 Preliminary analytical Results 89
3.6.3 Boundary element formulation 91
3.6.4 Model for a plane SH-wave 92
3.6.5 Influence of incidence 95
3.6.6 Amplification in a damped medium 96
3.6.7 P and Sv-waves 99
3.6.8 Comparison between numerical and experimental results 101
3.6.9 Conclusions 103
3.7 Conclusion sur la détection des effets de site 106

4 EFFETS DE SITE ET DOMMAGES SISMIQUES 107

4.1 Introduction 107
4.2 Caracas, Venezuela, séisme de 1967 107
4.2.1 Introduction 107
4.2.2 Damages dues to 1967 earthquake in Los Palos Grandes district 108
4.2.3 « H/V on microtremors » methodology 109
4.2.4 Field operation 109
4.2.5 H/V ratio computation 110
4.2.6 Results in Los Palos Grandes 110
4.2.7 Comparison with geology, earthquake damages and with numerical simulation 113
4.2.8 Conclusions 114
4.3 Nice, France, séisme de 2001 115
4.3.1 Introduction 115
4.3.2 Objectifs et moyens de l'enquête 116
4.3.3 Analyse des réponses individuelles 117
4.3.4 Mise au point d'une échelle de perception individuelle des effets d'un séisme 119
4.3.5 Analyse des niveaux moyens de perception 120
4.3.6 Analyse cartographique des niveaux de perception 123
4.3.7 Les enseignements de cette étude 125
4.4 Les Saintes, Antilles françaises, séisme de 2004 127
4.4.1 Introduction 127
4.4.2 Event summary 127
4.4.3 Site effect assessment tools 128
4.4.4 Terre de Haut 129
4.4.5 Terre de Bas, Petites-Anses 132
4.4.6 Vs profile from ambient vibration measurements 133
4.4.7 Comments and conclusion 134
4.5 Conclusions sur ces études post-sismiques 135

5 SCENARIOS DE RISQUE SISMIQUE 137

5.1 Introduction 137
5.2 Scénario urbain : Gem-gep 138
5.2.1 Objectif de l'exercice 138
5.2.2 Bâti B, Échelle globale 138
5.2.3 Bâti B, Échelle du secteur 138
5.2.4 Bâti C-D 142

© 2008 Tous droits réservés.

5.2.5 Remarques finales sur les enseignements de l'étude Gem-gep 143
5.3 Scénario sismique routier: Sisroute 144
5.3.1 Aims of Sisroute 144
5.3.2 Tree kinds of scenario 145
5.3.3 Global concept of Sisroute 146
5.3.4 Quantitative tools selected for hazard assessement 149
5.3.5 Vulnerability and damage assessment for simple road element 152
5.3.6 First test of sisroute in the Alps 153
5.3.7 Comments as temporary conclusion 154
5.4 Scénario sismique territorial: Foresight 155
5.4.1 Introduction 155
5.4.2 Methodology overview 156
5.4.3 Results 158
5.4.4 Conclusion 160
5.5 Conclusion sur les scénarios 161

6 BILAN ET PERSPECTIVES 163

6.1 Vers une meilleure appréciation du risque 163
6.2 Projets et collaborations 165
6.3 Valorisation de la recherche en sismologie de l'ingénieur 166

7 GLOSSAIRE 168

© 2008 Tous droits réservés.

Préambule

Ce document présente le contexte de mes travaux, mes principaux domaines d'activité et mon implication dans l'animation de la recherche.

La première partie présente une synthèse de mes activités à travers deux chapitres :

☞ Le chapitre 1 évoque le contexte de mes activités professionnelles et propose une synthèse des domaines de recherche que j'ai abordés en les illustrant par quelques références bibliographiques.

☞ Le chapitre 2 rassemble les produits et actions scientifiques sous forme de liste de références.

La seconde partie trace plus précisément le contour de mes activités scientifiques. Les résultats obtenus dans les principaux domaines de recherche sont présentés souvent sous forme d'articles publiés dans des revues ou des actes de conférences.

☞ Le chapitre 3 évoque les travaux dans le domaine de la détection des effets de site et passe en revue les méthodes mises en oeuvre.

☞ Le chapitre 4 illustre le lien entre effets de site et dommages sismiques sur la base de 3 cas (Caracas, Nice et les Saintes en Guadeloupe)

☞ Le chapitre 5 présente la conception de trois types de scénarios d'envergure et de précision différentes : urbain, routier et territorial.

Enfin, **un bilan des travaux** est dressé dans le chapitre 6 avec des perspectives de recherche.

Un modeste glossaire a été constitué en fin de volume.

Les références bibliographiques constituées d'un nom et une année comme [Aki, 1957] sont rassemblées à la fin de chacun des chapitres.

Les autres références, constituées de lettres et numéros comme EE[54], sont celles auxquelles j'ai contribué. Elles sont explicitées et listées dans le chapitre 2 (après le tableau de synthèse page 17).

© 2008 Tous droits réservés.

© 2008 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

PARTIE 1 SYNTHESE DES ACTIVITES

© 2008 Tous droits réservés.

1 Activités de recherche

1.1 Contexte de mes activités

1.1.1 Le risque sismique : une vaste problématique

Le séisme est le risque naturel majeur le plus meurtrier, tant par ses effets directs (chutes d'objets, effondrements de bâtiments) que par les phénomènes qu'il peut engendrer (mouvements de terrain, raz-de-marée, etc.). Chaque année, il y a plus de cent cinquante séismes de magnitude supérieure ou égale à 6 à la surface du globe. Pour diminuer le risque sismique on tente, sans succès jusqu'à présent, de prédire les séismes. Parallèlement, l'approche préventive consiste à évaluer l'aléa et à diminuer la vulnérabilité des territoires. Ainsi l'analyse du risque sismique recouvre de vastes domaines techniques et scientifiques puisqu'elle s'attache à caractériser la menace sismique elle-même, mais aussi ses effets sur les structures bâties et les sociétés humaines.

En France, l'Etat s'est donné pour mission d'établir le niveau de risque et d'en informer les citoyens à travers les Plans de Prévention des Risques naturels depuis 1995. Le contenu et la portée de la partie sismique de ces plans évoluent encore aujourd'hui à côté d'autres supports des politiques de prévention comme les plans communaux de sauvegarde ou les scénarios de crise sismique. Un Plan National de Prévention du Risque Sismique a été lancé par le gouvernement français sur la période 2005-2011 pour réduire la vulnérabilité de notre pays au risque sismique. Cette prise en compte de plus en plus générale du risque a certainement contribué à rapprocher des techniciens et scientifiques travaillant jusqu'à présent sur le risque sismique sans beaucoup d'interactions: sismologues, ingénieurs, sociologues, architectes, etc. Le lien naissant entre les différents maillons de la chaîne du risque sismique permet de répondre plus efficacement à l'évolution de la demande publique en matière de connaissances mais aussi d'actions préventives.

L'équipe dans laquelle je travaille depuis 1990 est fondée sur cette continuité de la chaîne entre sismologie et ingénierie. Réalisant à la fois des produits d'études et de recherche, elle se situe à l'interface de plusieurs milieux et se distingue d'autres équipes de recherche françaises par des spécificités qui méritent d'être évoquées pour éclairer mon parcours professionnel.

1.1.2 Les spécificités de mon cadre de travail : l'ERA Risque sismique

En 1980, des géotechniciens du LRPC de Nice (Jean-Pierre Méneroud) et du LCPC (Jean-Louis. Durville) réalisèrent une mission post-sismique pour étudier les effets du séisme d'El-Asnam en Algérie. La création de l'Equipe de Recherche Associée au LCPC (ERA6 "Risque sismique"[1]) concrétisa en 1983 la volonté de travailler à Nice sur ces effets en étroite collaboration avec d'autres chercheurs du LCPC (notamment Pierre-Yves Bard). Cette petite équipe occupa dès lors une place unique entre organismes de recherche et services de l'Etat pour participer activement au développement de méthodes liées au risque sismique et à la mise en place de doctrines nationales. Sa position originale d'expert scientifique en a fait l'un des interlocuteurs privilégiés des directions centrales et des services techniques centraux du Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables et de ses services déconcentrés (précisions dans le glossaire page 171).

L'insertion de l'ERA6 dans un centre d'études techniques de l'équipement (CETE Méditerranée) favorise un contact privilégié avec les services publics en charge de la gestion concrète du risque (Directions Départementales de l'Equipement ou Conseils Généraux) et autorise l'application rapide des innovations issues de la recherche. Ainsi, une grande partie de l'activité de l'ERA consiste à mettre au point des méthodes d'évaluation du risque qu'elle peut ensuite diffuser et appliquer dans le cadre d'avant projets sommaires (dimensionnement de structures) ou de l'application des politiques de prévention (Plan de Prévention des Risques) par exemple.

L'ERA, comme toute composante d'un CETE se doit d'équilibrer son budget par des prestations d'études rémunérées pour le compte de différents services publics, en établissant avec eux une

[1] On trouvera dans le glossaire du présent document quelques précisions sur les ERA, les CETE, le LCPC et le RST

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

relation commerciale basée sur le respect des règles des marchés publics et en suivant les processus de gestion des affaires en vigueur au CETE.

Par ailleurs, selon le statut des ERA, l'équipe établit avec le LCPC un programme quadriennal de recherche sur la base duquel elle est évaluée tous les 4 ans. Parallèlement, l'ERA fait des propositions de recherche dans le cadre d'une opération de recherche LCPC. Le financement à la clef correspond à une partie du budget de l'ERA, l'autre étant assurée par des prestations de recherche et d'étude pour le compte de ses autres partenaires.

Sur le plan scientifique, l'ERA se distingue par son savoir-faire et ses moyens en termes **d'instrumentation sismologique**. Les nombreuses études réalisées en France et à l'étranger dans le cadre de prestations diverses ont nourri le travail scientifique sur l'aléa. Les commandes d'études ont orienté également les travaux de l'équipe vers les thématiques complémentaires de la vulnérabilité et des scénarios comme le montrent l'évolution de mes propres thèmes de recherche (chapitre 1.2 page 6).
La position originale de l'ERA, unité de recherche dans un bureau d'études et d'ingénierie public, **à l'interface entre la sismologie et l'ingénierie** présente donc des atouts appréciables pour faire progresser la connaissance en matière de risque sismique.

Enfin, autre spécificité fondamentale de l'ERA : sa taille limitée pour une équipe de sismologie. D'où la nécessité vitale de créer des liens forts avec d'autres équipes complémentaires dans le milieu de la recherche et dans le réseau scientifique et technique du ministère de l'équipement (voir précisions page 171).

1.1.3 Evolution de mes missions et responsabilités

Je suis membre de l'ERA depuis décembre 1990 sous différents statuts: stagiaire (1990), vacataire(1991), doctorante LCPC (1992-1994), vacataire de nouveau (1995), chargée de recherche (1996), puis directrice de recherche (2007). Depuis mon intégration, je remplis les **missions de chargée d'étude et de recherche** participant à la production de l'équipe.

Durant les premières années, j'ai tenu essentiellement un rôle de géophysicienne. Les questions posées à l'ERA étant très variées, elles m'ont permis de m'initier à divers aspects de la **sismologie de l'ingénieur**, à essayer de comprendre, de sélectionner ou d'adapter les solutions proposées par la communauté scientifique ou la réglementation.
L'aspect le plus fondamental de mon travail durant ces premières années est lié au **traitement du signal sismologique**. En effet, l'ERA venait d'acquérir un réseau d'enregistreurs numériques autonomes qui a immédiatement été mis en œuvre pour enregistrer la sismicité dans de multiples campagnes en France et à l'étranger. Avec le soutien de mes collègues de l'UMR Géosciences Azur à Sophia-Antipolis, j'ai mis en place un système permettant de disposer de bases de données sismologiques rapidement exploitables. Puis j'ai développé ou adapté des outils de traitement du signal pour dégager du bruit de fond sismique ou des séismes l'information recherchée, en testant différents algorithmes et paramètres.
Après Monaco [EE 58] et Nice [EE 10], l'équipe a enchaîné de nombreuses campagnes de terrain dont je traitais souvent les données sur place. J'ai ainsi passé plusieurs mois au Venezuela pour réaliser des microzonages sur la côte orientale du lac de Maracaibo [Rs41] [Cp28].
En 1994, j'ai soutenu sous la direction du Professeur Pierre Mechler[2] (et grâce à l'encadrement de Pierre-Yves Bard) une thèse de doctorat sur la base des premiers tests réalisés en France sur la méthode « H/V bruit de fond » [Af9].
Après un séjour scientifique au Japon, j'ai repris mes fonctions de chargée d'étude et de recherche dans l'ERA: **conception et pilotage d'expérimentations de terrain, traitement de données sismiques, calculs d'aléa** … La plupart des 58 études (listées page 20) ont permis une progression des méthodes ou de leur maîtrise (on peut par exemple citer les études pour le viaduc de Millau sur l'A75 [EE 56] ou celle sur la stabilité des pistes de l'aéroport de Nice [EE32]).
D'autres opérations étaient plus directement conçues dans le cadre de la recherche LCPC pour tester un aspect méthodologique (comme l'expérimentation de Caracas en 1995, relatée page 107 [Ai8]) ou pour transférer une partie des connaissances acquises à un organisme tiers (comme le microzonage de Tunis en 1998 [Rs38]). Ces opérations ont toutes fait l'objet d'un rapport de recherche et de

[2] Université Pierre et Marie Curie, Paris 6

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

communications scientifiques [Af8] [Cp27]. Durant cette période, j'ai participé activement au projet GEMITIS à Nice [EE11] [Cp29] [Ca22] et à Pointe à Pitre [Rs36] [Ai3].

Au départ en retraite en 2001 du directeur de l'ERA (Jean-Pierre Mèneroud), j'ai été nommée directrice de l'ERA. A mes fonctions de chargée d'études et de recherche se sont donc ajoutées des **tâches de gestion, d'encadrement et de direction d'équipe** à partir de cette date.

Les actions à conduire étaient particulièrement intéressantes. J'ai notamment participé activement à deux grands projets totalement dans la continuité de mes activités: SESAME (projet européen visant à établir un guide international concernant la méthode testée depuis ma thèse) [Rs1] à [Rs11]et GEM-GEP (mise au point de scénario de crise sismique sur Nice à la demande de l'Etat) [EE1] à [EE9].

Parallèlement à mon rôle dans l'ERA, je suis depuis 1997 impliquée dans l'animation des "thèmes" puis "opérations" de recherche du LCPC sur le risque sismique[3]. Le programme de recherche de l'ERA s'intègre naturellement dans cette organisation de la recherche propre au Réseau Scientifique et Technique de l'Equipement.

Durant mon parcours professionnel, j'ai également contribué à l'animation du domaine technique en participant à divers groupes de travail ou instances liées à la prévention du risque sismique, ainsi qu'au comité d'évaluation des chercheurs de l'équipement (voir liste des participations page 40).

En 2003 des recrutements sont venus renforcer l'ERA. Grâce à l'investissement de ces nouveaux équipiers (Jean-François Vassiliades, Michel Pernoud, techniciens supérieurs et Etienne Bertrand, chargé de recherche), grâce au recrutement temporaire de jeunes chercheurs et ingénieurs (vacations), nous avons pu non seulement honorer nos contrats d'étude et de recherche, mais aussi poursuivre la conception, l'animation et la réalisation de projets structurants en partenariat avec des équipes françaises et étrangères (voir liste page 33). Les thèmes de ces projets successifs ont accompagné l'évolution de mes propres thèmes de recherche : de l'aléa local jusqu'au scénarios de crise sismique.

1.2 Domaines de recherche

Mon expérience de géophysicienne de l'ERA m'a permis de participer à la progression des méthodes d'investigation sur l'aléa local: tenter de **comprendre et de prévoir les effets de site** m'a bien occupée durant une dizaine d'année. Mais peu à peu, à travers la mise au point de PPR [EE19] [EE20] [EE41] [EE42] et l'important projet GEM-GEP, j'ai été conduite à m'investir au côté de mes collègues du LGIT[4] dans le domaine inédit en France de la **vulnérabilité des structures** au sens statistique. Cette incursion dans le maillon suivant de la chaîne du risque m'a ensuite permis de m'engager plus résolument dans **la conception de scénario de crise sismique**.

1.2.1 Comprendre et prévoir les effets de site

Objectifs des recherches

En 1991, après plusieurs mois de travail sur l'analyse sismo-accoustique du glissement de la Clapière (Alpes Maritimes) [Rs42] [Rs31], j'ai quitté la montagne pour la côte en me tournant définitivement vers l'aléa sismique lors du microzonage de Monaco [EE58]. Ce choix était motivé d'une part par l'intérêt technique de l'étude et par l'importance des enjeux : si l'aléa sismique est relativement modéré en métropole, les effets de site semblaient pouvoir aggraver cet aléa par endroit. Les mesures réalisées sur la Côte d'Azur concrétisaient très rapidement pour moi la réalité de ces phénomènes: un même séisme était clairement amplifié d'un quartier à l'autre d'une même ville [Cn10]. Les fréquences amplifiées étaient, comme l'avaient d'ailleurs prévus les calculs du LCPC, dans la gamme de résonance de certains bâtiments [Cp33]… La mise au point des méthodes expérimentales de caractérisation des effets de site allait rapidement devenir l'axe central de mes travaux.

[3] Les opérations de recherche du LCPC permettent de planifier, structurer et valoriser ses actions en mobilisant les équipes et les moyens sur des thématiques identifiées dans son programme stratégique. Chaque opération regroupe les unités du LCPC et des CETE impliqués dans un domaine technique, organise la production de recherche et permet la répartition des crédits à ces unités.

[4] Laboratoire de Géophysique Interne et de Tectonophysique, Grenoble UMR (LCPC, Universités, CNRS IRD)

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Son objectif est de répondre au mieux à une question : **"Comment fournir aux ingénieurs des actions sismiques réglementaires prenant en compte la réalité des effets de site ?"**

Lors de leur propagation dans la terre, les vibrations subissent différentes modifications en fonction des milieux traversés. Des phénomènes de résonance dans les couches superficielles peuvent amplifier le signal sismique à une fréquence (F_o) propre au site. Ces phénomènes d'amplification s'accompagnent très souvent d'un allongement de la phase forte du signal, qui accentue la fatigue des matériaux et peut conduire au dépassement de seuils limites de résistance. Les dommages sont d'autant plus aggravés que la fréquence propre des bâtiments s'approche de celle du sol. Nombre des séismes dévastateurs récents ont ainsi vu leurs conséquences alourdies par les effets de site (séismes de Mexico en 1985, Turquie en 1999, Algérie en 2003, par exemple).

Deux grands types d'effet de site peuvent être distingués:

- d'une part les effets de site « lithologiques », pour lesquels un contraste d'impédance entre un substratum rigide et une couverture meuble provoque des réflexions d'ondes et leur entrée en résonance;
- d'autre part les effets de site « topographiques » liés à la forme très prononcée de certains reliefs formant un piège pour les ondes qui se focalisent sur certaines zones de la topographie.

Les effets de site représentent un enjeu important dans la prévention parasismique : si on ne peut prédire quand aura lieu un séisme, il semble tout de même possible de prédire où et comment le signal sismique devrait être amplifié. Les réglementations nationales, même si elles évoluent sous la poussée des sismologues en ce sens, ne peuvent fournir que des valeurs forfaitaires qui reflètent peu la réalité physique des phénomènes locaux. L'objectif des microzonages est de délimiter des zones d'aléa homogène. Pour chaque zone, la réponse aux séismes est caractérisée, au moins qualitativement sinon quantitativement, en proposant une fonction d'amplification des sols sur tout le spectre ou en indiquant la fréquence de résonance des sols F_o et éventuellement le niveau d'amplification associé.

Mon objectif a donc été de **mettre au point des méthodes fiables de caractérisation de la réponse des sites aux séismes**. Les simulations numériques sont de plus en plus performantes. Toutefois leur fiabilité restera toujours contrôlée par la qualité de la représentation du sous-sol et donc par les moyens géotechniques investis en amont. D'où l'intérêt des **approches expérimentales basées sur l'observation et l'analyse de signaux sismiques,** qui s'affranchissent (pour une étude ponctuelle au moins) de la connaissance approfondie du sous-sol.

Caractérisation des sites par enregistrement de séismes

La mesure de séismes est l'approche privilégiée pour déterminer les effets de site. La méthode classique consiste à enregistrer des séismes sur différents sites représentatifs et à comparer les spectres en fréquence résultants avec ceux obtenus à une station de référence [Borcherdt, 70]. Cette dernière station sera choisie idéalement sur le substratum horizontal. Les premiers enregistrements réalisés à Nice en 1991 ont ainsi révélé des amplifications très importantes (autour de 1 Hz) dans les zones de remplissage alluvial (Figure 3.2—1 page 50).

Chaque événement sismique enregistré sur un site résulte de différents facteurs dépendant de la réponse instrumentale, de la source du séisme, de la nature des terrains traversés en profondeur et enfin de l'effet de site. Les 3 premiers facteurs peuvent être considérés comme identiques entre deux sites voisins. Le rapport spectral entre un site quelconque et un site de référence proche (ne provoquant pas d'effet de site) permet de mettre en évidence la modification apportée par le site pour le séisme considéré. Dans la pratique, on observe une dispersion notable de ce rapport spectral d'un séisme à l'autre. Il faut donc obtenir un grand nombre de rapports et calculer un rapport moyen (**la fonction de transfert** du site) qui sera ensuite utilisée pour adapter le spectre de réponse du séisme de référence aux conditions locales.

J'ai réalisé avec l'ERA une quinzaine de campagnes d'enregistrement de séismes dans des configurations très différentes sur les plans géologique, sismologique, environnemental ou réglementaire (exemples à Monaco [EE58], au Venezuela [Rs41], dans les Alpes [EE52], en Grèce [Rs37], en Tunisie [Rs38] ou dans les Antilles [Rs36]) et dans des contextes contractuels différents (partenariat de recherche ou commande d'études).

Avec Sylvain Vidal, technicien responsable du réseau d'enregistreurs, nous avons recherché, pour chaque étude, la meilleure adéquation entre l'objectif scientifique et la mise en œuvre sur le terrain: choix des instruments, paramétrage (fréquence d'échantillonnage, longueur des enregistrements, mode de déclenchement …). Ces expériences m'ont permis de perfectionner le traitement des

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

données acquises en améliorant la fiabilité et la précision des informations produites. Elles m'ont permis d'identifier les contraintes, souvent antagonistes, qui contrôlent la portée des résultats et d'ajuster au mieux nos procédures.

La méthode « site / référence » est évidemment toujours d'actualité: en 2006, j'ai participé au déploiement du réseau de l'ERA pour le microzonage de la ville de Beyrouth (Liban) dans le cadre d'un partenariat avec le CNRSL[5] et le LGIT [Rs22] (travaux de thèse de M. Brax). Depuis janvier 2007, ce réseau est disposé à Rognes dans les Bouches du Rhône pour mesurer pour la première fois les **effets de site topographiques** réputés être à l'origine des dégâts occasionnés par le séisme de Provence de 1909 (travaux de thèse de A Saad). Cette méthode est illustrée dans le chapitre 3.2, page 49.

La méthode « H/V bruit de fond »

Dès les années 1950, des scientifiques japonais ont détecté dans les enregistrements de bruit de fond sismique des indices de caractérisation du comportement des sols soumis à séismes [Aki, 1957]. Le mode de traitement consistait alors simplement à étudier le contenu spectral d'un enregistrement brut. Puis d'autres modes d'analyse, dont celui fondé sur le **rapport spectral des voies horizontales sur la voie verticale,** ont été proposés toujours au Japon [Nogoshi, 1970]. Cependant, il a fallu la conjonction de plusieurs facteurs pour que la méthode parvienne à son succès actuel: la prise de conscience internationale de l'importance des effets de site pour la prévention parasismique, le développement des outils de traitement informatique du signal et enfin la publication en 1989 par un ingénieur japonais d'un article traduit en anglais [Nakamura, 1989]. Les tentatives de justification présentées dans cette publication ont tout d'abord suscité la surprise sinon un rejet de la méthode par de nombreux sismologues. Mais elle a également provoqué l'intérêt et le début des analyses qui se poursuivent encore. En effet, les avantages de la méthode sont très vite apparus: rapide et économique (quelques minutes d'enregistrement de bruit de fond suffisent), elle permet de disposer pour de nombreux points de certaines caractéristiques de la réponse des sols aux séismes.

Mon travail de thèse a consisté à évaluer la méthode en comparant les rapports H/V (issus de bruit de fond, de séismes ou de tirs) à des rapports spectraux site /référence issus des mêmes sources ainsi qu'à des simulations numériques de réponse des sols. Les premières mesures montraient sur les zones alluviales de Nice des pics très importants à des fréquences correspondant à celles prévues par les simulations numériques et vérifiées par l'enregistrement de séismes (voir chapitre 3.3.3, page 55).

Les nombreuses études réalisées entre 1991 et 2001 m'ont permis de mieux cerner les capacités et les limites de cette technique, d'affiner les traitements et de les automatiser. Ainsi, j'ai ainsi analyser un nombre très important de mesures de bruit de fond pour les comparer à des rapports spectraux issus de séismes ou à des simulations numériques [Af8] [Af9] [Ai9].

La synthèse des données de plusieurs études a permis de confirmer l'intérêt de la méthode [Ai7]. De nombreux enregistrements en France et à l'étranger ont effectivement montré que les sites sur lesquels des phénomènes d'amplification sont attendus montrent des courbes « H/V bruit de fond » avec des pics, alors que les mêmes courbes sont plates sur des sites rocheux (sans amplification).
Pour les sites "amplificateurs", les rapports H/V permettent de pointer la fréquence fondamentale des sites, en dessous de laquelle il n'y a pas d'amplification.
Les fréquences (F_o) des premiers pics des fonctions de transfert issues de séismes et celles des courbes « H/V bruit de fond » correspondent généralement très bien. Cela peut être expliqué par différents facteurs, comme l'ont démontré plusieurs travaux numériques [Lachet, 1994] [Bonnefoy-Claudet, 2006] : l'ellipticité des ondes de Rayleigh, la phase d'Airy du mode fondamental des ondes de Love et partiellement la résonance des ondes de volume cisaillantes (S). Selon ces résultats numériques, ces courbes fournissent un minimum fiable du niveau d'amplification spectrale. Mais elles ne permettent pas d'estimer la largeur de bande impliquée dans l'amplification spectrale, ni le niveau réel de l'amplification en cas de mouvement fort.
L'étude réalisée à Caracas (Venezuela) ([Ai7] ou chapitre 4.2 page 107), qui compare les niveaux des pics H/V aux dommages sismiques, laisse tout de même entrevoir des possibilités comme cela est rappelé à la page 12.
Les résultats positifs obtenus autour du port de Nice [Cp33] ont largement incité à densifier les mesures sur la ville de Nice dans le cadre du microzonage en cours. Près de 600 mesures ont été

[5] Centre National de la Recherche Scientifique Libanais

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

réalisées lors d'études particulières (dont l'étude sur la stabilité des pistes de l'aéroport [EE32]) et de campagnes générales pour le projet GEM-GEP [EE9]. Un mode d'analyse et de représentation cartographique a été mis au point. Ainsi, les premières cartes de fréquences (F_o) issues du bruit de fond ont pu être comparées à Nice aux fonctions de transfert issues de la sismicité, au modèle géotechnique 3D réalisé à partir de la synthèse de tous les sondages disponibles, aux simulations numériques plus ou moins complexes [EE7]. Les résultats sont appréciables en termes de gestion des risques : les fréquences $_{Fo}$ sont minimales au centre des bassins (1 Hz dans le centre ville, en dessous de 1 Hz pour la plaine du Var). Elles augmentent en s'éloignant du centre et sont maximales (au delà de 5 Hz) en bordure de bassin. Les valeurs en ordonnée des rapports H/V correspondant à F_o sont maximales sur l'aéroport (remplissage anthropique) et sur certains zones des bassins sédimentaires du centre ville [EE1]

En 2001, je disposais d'une certaine expérience de ces analyses de bruit de fond. Or la technique se diffusait rapidement auprès d'un public de plus en plus large dans le monde sans modalité d'application et d'interprétation commune. Le projet SESAME piloté par P.-Y. Bard (LCPC-LGIT) a permis de fédérer les principales équipes européennes compétentes dans le domaine pour **élaborer des bases communes de mise en œuvre et de compréhension des phénomènes**. Ainsi, entre 2001 et 2004, je me suis d'abord investie avec des collègues français, portugais, norvégiens, italiens et grecs dans l'évaluation de l'influence des conditions expérimentales sur les courbes H/V. Nous avons créé une vaste base de données d'enregistrements sismiques dédiée à une étude paramétrique. Plus de 600 tests ont été analysés statistiquement pour statuer de manière objective sur l'influence de 60 paramètres très divers comme: le matériel d'enregistrement [Rs2], l'heure de la mesure, la source de bruit, la proximité de structures, la météo ou le matériau de recouvrement du sol. L'un des résultats les plus important est que les sources de bruit proches sont à proscrire, tout comme les mesures faites par fort vent [Rs1][Cp8] [Cp13].

Parallèlement à cette évaluation, nous avons défini des modes opératoires communs pour l'acquisition et le traitement des données, avec des jeux de paramètres de base dans les deux cas. J'ai également participé à la mise au point de l'algorithme de traitement commun qui a débouché sur un logiciel gratuit de traitement multi-plateforme [Rs5][Cp12] [Cp9].

La phase suivante de SESAME a consisté à mettre en commun un grand nombre de données sismologiques et géotechniques sur des sites très variés, à appliquer de manière homogène les différentes méthodes disponibles (simulations numériques, "site/référence séisme" et "H/V bruit de fond") et à cheminer ensemble vers un consensus sur l'interprétation des rapports "H/V bruit de fond" [Rs4].

L'homogénéisation des procédures de terrain, de traitement et d'interprétation a ensuite été transcrite dans un guide international d'utilisation de la méthode [Rs3] qui, outre des conseils pratiques de mise en œuvre, expose également les derniers développements théoriques sur le sujet. Les produits (rapports, guide et logiciel) sont disponibles sur http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/. Ces références garantissent aujourd'hui l'homogénéité de l'utilisation de la méthode "H/V bruit de fond" par des techniciens non spécialisés, y compris dans de nombreux pays en voie de développement où son expansion est rapide. L'ensemble des résultats a été présenté lors d'une session spéciale dans la conférence internationale de Génie Parasismique à Vancouver en 2004 [Cp11], dont s'inspire très largement le chapitre 3.4 (page 64).

La méthode « bruit de fond en réseau »

Au cours de ses investigations sur le bruit de fond sismique en 1957, le professeur Aki avait également décelé dans le bruit de fond la source possible d'une méthode d'investigation géophysique de sub-surface qui délivrerait des profils de vitesse d'onde de cisaillement (V_s). Plusieurs équipes (surtout japonaises) ont travaillé sur la possibilité de retrouver la courbe de dispersion des ondes de surface à partir de mesures en réseau, soit par une analyse de type fréquence-nombres d'ondes, soit par une technique d'auto-corrélation spatiale [Aki, 1957]. Ainsi, à partir de l'enregistrement simultané de quelques minutes de bruit de fond sur plusieurs stations, il est possible de déduire un profil de vitesse d'onde de cisaillement (V_s). Ce type de méthode de prospection est très intéressant, notamment en ville où il est impossible de réaliser des tirs d'explosifs classiques en sismique prospection. Comme pour la méthode H/V, son caractère économique la rend attractive. Le paragraphe 3.4.4 (page 74) donne quelques précisions sur ces techniques.

La première campagne de mesure de bruit de fond que j'ai effectuée en 1991, consistait à réaliser des enregistrements en réseau (11 capteurs tri-directionnels) sur 13 sites à Nice. Il est vite apparu à l'heure du traitement des données que les horloges internes des enregistreurs n'étaient pas assez

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

finement synchronisées pour exploiter correctement les temps de trajet des ondes d'un capteur à l'autre! Ces enregistrements ont alors été traités avec la méthode H/V", donnant des résultats si "captivants" qu'ils ont occulté pour moi l'autre méthode.

En 1995 j'ai repris contact avec ses techniques dans l'équipe du Professeur Irikura à l'Université de Kyoto (Disaster Prevention Resarch Institute). Là, j'ai testé différentes versions des algorithmes mis au point par l'équipe sur des données acquises en Californie (autour de Northridge dans la vallée de San Fernando) avec des réseaux de différentes tailles (de 300 à 2000 m). Cette initiation m'a permis de prendre conscience des possibilités de ces techniques, mais aussi du poids important de la connaissance à priori du modèle à atteindre.

Le projet SESAME a été en partie consacré à ces techniques dans le but de favoriser en Europe une meilleure appropriation de la thématique et d'améliorer la qualité (précision, fiabilité et l'indépendance) des résultats. Pour mon équipe cette démarche s'est traduite par l'organisation d'enregistrements dans le centre de Nice sur la station RAP NALS [Bonnefoy-Claudet, 2004] [EE4] [EE1]. L'application des techniques de bruit de fond en réseau par Sylvette Bonnefoy-Claudet a confirmé les hypothèses sur la configuration du site: une forte épaisseur d'alluvions est à l'origine des fortes amplifications observées à partir de 1 Hz sur les séismes et sur les rapports H/V.

L'ERA6 a alors acquis un matériel spécifique (un numériseur pouvant être connecté à 18 capteurs) pour réaliser ce type d'expérience entre autre (mais aussi pour les mesures en bâtiments comme on le verra plus loin). Nous avons testé le matériel en Guadeloupe en 2005 lors d'une mission post-sismique. L'un des sites étudiés était suspecté d'avoir provoqué des effets de site à cause d'une épaisse couche de cendres volcaniques ce qui a été confirmé par l'analyse du bruit en réseau effectué par Etienne Bertrand [EE17] [Cp2] (résultats page 129).

En 2006, le Groupe de Travail "caractérisation des sites" du GIS RAP nous a d'ailleurs demandé l'application de cette technique (complétée par des sondages SPT) sur 14 sites répartis en métropole [Rs28] [EE14] [Cp3].

Par ailleurs, en 2004, j'ai proposé au LCPC avec Pierre-Yves Bard un sujet de thèse sur l'utilisation combinée des méthodes fondées sur le bruit de fond pour **améliorer et uniformiser les procédures d'études dans le cadre des PPR sismique**. C'est ainsi qu'Héloise Cadet [T1] a travaillé durant 3 ans sur cette thématique en suivant successivement 2 objectifs.

1) Le premier consistait à mettre au point *un protocole aisément reproductible afin d'obtenir la fréquence fondamentale d'un site (*F_o*) et un profil de vitesse d'onde S (*V_s*) à partir d'enregistrements de bruit de fond*. Les techniques "H/V" et "réseau" devaient donc être respectivement mises en œuvre. Elle a d'abord identifié le cadre d'utilisation de chaque technique et leurs limites d'interprétation (liés à la taille ou la géométrie des réseaux, aliazing …). Puis elle s'est attachée à décrire les étapes impliquant des mesures ponctuelles pour obtenir F_o et des mesures en réseau débouchant sur un profil de V_s (contraint par F_o). Elle a défini une grille de critères pondérés pour quantifier la fiabilité de chaque étape. La somme des scores permet d'évaluer la fiabilité du résultat final. Un exemple d'application de cette procédure est proposé dans le chapitre 3.5 (page 79 [Cn2]).

2) Le deuxième objectif de cette thèse consistait à proposer *des fonctions d'amplification analytiques basées sur une approche empirique et dépendant de* F_o *et* V_{sz} (V_s moyen dans les z premiers mètres). 28000 enregistrements de séismes issus de la base de données du réseau japonais ont été exploités dans ce sens. Chacun des 600 sites de cette base fait l'objet d'une caractérisation géo-mécanique par sondage. Les enregistrements ont été effectués en surface et en fond de puits. Or les courbes à produire doivent refléter la modification spectrale apportée par une colonne de sol par rapport à une station de référence en surface. H. Cadet a donc mis au point une méthode de correction des rapports spectraux qui uniformise le rocher d'une part (V_{s30}=800 m/s) et le replace en surface (en corrigeant au passage l'effet de surface libre). Une fois tous les accélérogrammes corrigés, elle a pu les classer selon les paramètres F_o et V_{sz} des sites et proposer une courbe moyenne de correction par classe. Elle a finalement transcrit ces résultats dans une formule analytique qui donne l'amplification spectrale à partir de F_o et V_{s30}.

Les courbes obtenues par Héloise Cadet tiennent mieux compte de l'effet de site sur les stations japonaises que ne le fait l'application des spectres EC8. Ceci est vrai pour toutes les fonctions établies quelle que soit la profondeur z de V_{sz} et même pour celles qui ne tiennent compte que de F_o.

Ce travail en cours forme la base d'une procédure homogénéisée de modification des spectres réglementaires pour des sites particuliers dans un microzonage.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Simulation numérique des effets de site

La simulation numérique des effets de site est fondamentale pour comprendre les phénomènes et les prévoir. Le cas des effets dits "lithologiques" est le plus étudié jusqu'à présent et celui pour lequel les modèles numériques de propagation d'onde sont les plus aboutis, du moins dans la version simplifiée du problème: celle des milieux tabulaires.

Dans ce cas simple, un calcul tout aussi simple permet d'obtenir un ordre de grandeur des fréquences de résonance des sols et des niveaux d'amplification à partir de l'épaisseur et de la vitesse des ondes S dans chacune des couches. Ces calculs ont été systématiquement réalisés pour tous les sites étudiés. Mais ils reposent sur des hypothèses trop sommaires pour expliquer les phénomènes, qui peuvent être complexes.

La simulation numérique de la propagation d'une onde sismique à travers une colonne de sol est possible grâce à plusieurs approches basées sur des hypothèses différentes de comportement des sols. Les trois logiciels que j'ai utilisés demandent des niveaux d'information différents.

PSV1D est basé sur des hypothèses de linéarité de comportement des sols. Il donne la réponse d'une onde S à travers une colonne de sols.

Les logiciels Shake [Schnabel,1972] et Cyberquake [@BRGM] font appel à des lois de comportement des sols non-linéaires (ou linéaire équivalent) pour simuler la propagation d'un accélérogramme à travers une colonne de sol. Ces simulations numériques sont l'une des bases d'évaluation des méthodes expérimentales et sont utilisées régulièrement par mon équipe. A Nice, par exemple, les réponses de 4000 colonnes de sol (issus du modèle géotechnique 3D) ont été calculées dans le cadre du projet GEM-GEP [E9].

Mais, dans de nombreux cas, une simple colonne de sol ne permet pas de simuler l'amplification provoquée par des remplissages de vallée (configuration 2D) ou des bassins (configuration 3D). Les modes de propagation numérique doivent alors être adaptés à ces cas plus complexes. Le LCPC est l'un des centres de développement des méthodes de propagation d'ondes. Plusieurs modules spécialisés ont récemment enrichi le logiciel CESAR-LCPC par des approches basées sur les éléments finis, les éléments de frontière et les équations intégrales. La mise au point de ces méthodes et des paramètres de simulation s'appuie en partie sur les résultats expérimentaux.

La complémentarité des approches entre l'ERA6 et le service des modèles numériques du LCPC (Jean-François Semblat) a ainsi permis de tester plusieurs modèles numériques et d'affiner, voire de prolonger, les résultats expérimentaux sur Nice ([Ai9] article transcrit au paragraphe 3.6 page 86 du présent rapport) et sur Caracas [Ai5] par exemple.

En 2007, mes axes de recherche s'appuyant sur des développements numériques sont principalement liés aux effets de site topographiques.

Effets de site topographiques

Si les recherches ont été prolixes ces dernières années pour les effets de site lithologiques, il n'en est pas de même pour les effets dus aux reliefs topographiques. En termes de prévention, l'enjeu est notable, au moins pour les villages perchés du sud de la France. En termes scientifiques, les simulations numériques réalisées jusqu'à présent n'expliquent pas correctement l'ampleur des phénomènes. La pauvreté de la réglementation sur ce point témoigne des lacunes de la connaissance. L'intérêt de ce thème s'est traduit dès 2006 par le démarrage de deux thèses pour lesquelles je suis conseillère d'étude :

- Aiham Saad (thèse LCPC/ERA6/UNSA) [T2] travaille sur la prise en compte des effets de site topographiques dans les microzonages sismiques par des approches expérimentales (campagne en cours à Rogne en Provence et sur la colline du Château à Nice) et numériques (sous la direction de J.-F. Semblat et sur la base de CESAR-LCPC). L'objectif est de produire des courbes de réponses caractéristiques de topographies usuelles (modèles canoniques).
- Emeline Mauffroy (thèse UMR GéosciencesAzur/ERA6/UNSA) [T3] tente de quantifier l'effet des hétérogénéités dans les reliefs et l'influence de l'eau dans les amplifications topographiques par une étude paramétrique numérique. Des campagnes tomographiques, puis d'enregistrement de la sismicité, ont été réalisées sur la colline du Laboratoire souterrain à Bas Bruit (LSBB, Rustrel, 83) et sont en cours d'analyse.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

1.2.2 Observation des dommages

L'observation des dommages provoqués par un séisme est à la base de la prise de conscience des effets de site. Les trois principales études de cas auxquelles j'ai participé m'ont apportées des enseignements très différents.

Le premier cas concerne la ville de Caracas au Venezuela, où la campagne de mesure de bruit de fond que j'ai conduite avec mes collègues de l'ERA6 et de la FUNVISIS en 1995 a conforté et précisé les explications sur la répartition des dommages du séisme de 1967. Ce séisme avait provoqué de graves dommages à certains bâtiments, allant jusqu'à la destruction totale, dans certains quartiers de Caracas. Ces dommages avaient été répertoriés sur carte après le séisme. Des profils de sismique réflexion avaient permis de reconnaître la géométrie du bassin sédimentaire qui compose un des quartiers les plus affectés (Palos Grandes). Les calculs effectués à l'époque indiquaient une probable mise en résonance, à 0.6 Hertz, des ondes sismiques provoquée par un fort contraste d'impédance vers 180 mètres de profondeur (au centre) [Bolton, 1970]. En 1995, l'ERA6 et la FUNVISIS ont réalisé 184 mesures de bruit de fond sismique. J'ai analysé ces enregistrements pour obtenir des courbes H/V. Les fréquences correspondant aux pics des courbes obtenues ont été étudiées dans le détail et comparées à la géométrie du bassin de Palos Grandes, ainsi qu'à la répartition des dégâts sur les bâtiments. Ces fréquences correspondent à celles prévues par les calculs au centre du bassin [Ai5]. Elles ont été mises en relation avec la hauteur et le premier mode de résonance des immeubles les plus endommagés soit 0.6 Hz au centre du bassin. La correspondance de ces valeurs apportait une preuve de l'intérêt de la méthode H/V pour détecter les fréquences de résonance. La valeur maximale du rapport H/V entre 0.5 et 15Hz a été ensuite étudiée. Les rapports H/V sont relativement faibles sur le rocher entourant le bassin sédimentaire. Par contre, les zones montrant les pics les plus élevés (supérieur à 5 dans l'étude) correspondent à des zones de grande épaisseur du bassin où se sont effondrés 4 bâtiments élevés. Plusieurs points montrent des pics encore plus élevés sur une zone qui n'était pas bâtie à l'époque du séisme (autour de l'aéroport de Caracas). Cette constatation a entraîné nombre de commentaires : si les simulations numériques ont expliqué après cette étude que le pic H/V correspond bien en fréquence et dans certains cas (simples: 1D) au pic de résonance des ondes S, le niveau de ce pic est théoriquement infini. Il est donc encore difficile de trouver une explication physique à la correspondance entre ce maximum des courbes et un niveau "relatif" d'amplification spectral du signal sismique. La correspondance entre les plus forts pics H/V et les dégâts observés serait-elle donc due au hasard ?

Pour statuer sur l'interprétation de ces niveaux relatifs des pics "H/V", il faudra sans doute avancer dans deux directions. Il faudra d'une part réaliser d'autres campagnes post-sismiques en ayant mesuré au préalable les fréquences de résonance des bâtiments. D'autre part, il faudra progresser dans la compréhension physique de la propagation du bruit de fond sismique.

Il reste que cette étude sur Caracas constitue une preuve de la capacité de la méthode H/V a déterminer la fréquence de résonance des sols et que les cartes indiquant les niveaux relatifs des pics ne sont pas forcément à oublier. Cette analyse est présentée page 107.

Un autre cas d'analyse post-sismique a été réalisé à Nice. Le 25 février 2001, un séisme de magnitude 4.7 en mer Ligure était ressenti dans le sud-est de la France. L'intensité de ce séisme a été estimée par le BCSF à V (selon l'échelle EMS98) au maximum à Nice. Il a semblé intéressant de corréler finement la perception du séisme à Nice avec les études expérimentales et numériques d'effet de site en cours. Cette corrélation s'est appuyée sur l'analyse de près de 4000 réponses individuelles envoyées par la population niçoise suite à la diffusion d'un questionnaire par voie de presse. Ce travail réalisé pour le compte du MEDD [EE28] a permis de construire une échelle de perception des effets de la secousse par chaque observateur et de concevoir des outils méthodologiques pouvant être repris lors d'études post-sismiques. La mise en relation des limites du microzonage, de la profondeur du remplissage sédimentaire, de l'étage d'observation, de l'époque de construction du bâtiment et des valeurs moyennes de perception indique des corrélations faibles mais notables. Bien que les données de départ imposent des limites sévères à l'interprétation (faible niveau de la secousse et répartition irrégulière des réponses) l'analyse confirme une perception des effets plus importante dans les zones alluviales que sur le substratum rocheux. Sur le plan méthodologique, l'échelle de perception individuelle et l'analyse par zone carrée semblent particulièrement adaptées à l'approche des effets de site. Cette étude a été l'occasion d'une réflexion avec les organismes concernés par les futures enquêtes macro-sismiques qui devraient bénéficier d'aménagements, afin de pouvoir tirer de ces actions l'information la plus riche possible en matière de prévention. Cette analyse est présentée page 115.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Enfin, la dernière campagne d'observation post-sismique à laquelle j'ai participé s'est déroulée aux Antilles. Le 21 novembre 2004, un séisme de magnitude 6,3 a secoué le sud de la Guadeloupe, déjà éprouvée par de fortes intempéries. Les deux îles appelées "Les saintes", situées à 15 km de l'épicentre, ont subi les plus forts dommages. Quelques semaines après le séisme, le CETE Méditerranée organisait une mission post sismique visant à créer des synergies entre ses experts en aléa (ERA6) et une nouvelle équipe d'experts en vulnérabilité en appliquant diverses méthodes d'analyse, y compris des enregistrements sismiques. L'approche pluridisciplinaire mise en œuvre montra que certains des principaux dommages avaient sans doute été accentués lors du séisme par des effets de site dus à des remplissages de cendres volcaniques et par l'adéquation entre la réponse des sols et celles des bâtiments [Cp2]. L'observation de la gestion de crise a également mis en évidence la nécessité de préparer à l'avance l'inspection post-sismique des bâtiments dans l'urgence [EE17]. Les résultats de cette analyse sont présentés page 127.

1.2.3 De l'étude d'aléa aux scénarios de crise sismique

Si le travail sur l'aléa local constitue le cœur de mes recherches, les questions posées à mon équipe amènent un élargissement important de mes champs d'investigation, à la fois vers la source des séismes et vers la vulnérabilité des structures. Ces actions sont souvent réalisées en partenariat avec des équipes plus spécialisées.

Aléa régional et mouvements forts

La plupart des études commandées à l'ERA impliquent la détermination des actions sismiques à prendre en compte au droit d'un site spécifique ou sur des territoires. Pour cela l'aléa régional doit être déterminé soit en suivant la réglementation en vigueur, soit sur la base d'analyses spécifiques. Une des procédures mises en œuvre consiste à établir de manière **déterministe** le séisme majeur historiquement recensé sur le site (exemple de l'étude du site de Vulcania dans le massif central [EE46]).

D'autres objectifs d'étude nécessitent également l'analyse approfondie du **contexte sismo-tectonique local** pour choisir un séisme de scénario ou pour estimer le **taux d'activité d'une faille voire son rejeu possible en surface** (exemples des viaducs de Tende dans les Alpes Maritimes [Cn7] ou de Thues dans les Pyrénées [EE23]). Les derniers développements théoriques ou numériques fournissent parfois des éléments de réponse sur ce dernier point.

Par ailleurs, diverses lois empiriques sont proposées dans la littérature pour évaluer l'atténuation du signal avec la distance. Mais elles ne s'appliquent strictement que pour les zones où elles ont été établies. Or le contexte tectonique de la Californie, par exemple, diffère nettement de celui de la France métropolitaine. D'où la nécessité d'enregistrer des mouvements forts et d'établir **des lois empiriques valables en France**. C'est l'un des points qui justifie l'existence du **Réseau Accéléromètrique Permanent** depuis 1998. Je participe avec mon équipe et nos collègues de Géo-sciences Azur à la mise en place et au suivi des stations du sud-est de ce réseau (RAP-AZUR).

Autre exemple d'action pour améliorer la connaissance de l'aléa régional: le projet **SALAM** qui a été lancé en 2000 avec l'UMR Géosciences Azur. Cette campagne d'enregistrement de la sismicité par un réseau dense de stations dans les Alpes Maritimes a permis de localiser un essaim de sismicité important (600 événements en quelques mois) provenant d'une faille inconnue jusqu'à présent à quelques kilomètres au nord de Nice [Af1] [Ai2].

Enfin, dans le cadre d'un contrat entre le CETE et le gouvernement monégasque, j'ai récemment participé à l'encadrement d'une thèse sur l'aléa régional [Mondielli, 2005] [T5].

Vulnérabilité des structures

A partir de 2001, les études que j'ai conduites dans le cadre du projet GEM-GEP à Nice s'attachaient à une nouvelle thématique: la vulnérabilité des structures. La démarche visait à comparer la fiabilité de diverses approches plus ou moins coûteuses pour évaluer la vulnérabilité des bâtiments au séisme. Mon action visait à organiser la **collecte d'un volume important de données sur des bâtiments de classe C (recevant du public ou de grande hauteur) et D (stratégique),** en liaison avec la Préfecture et divers organismes publics. L'approche a été conçue avec le LGIT. J'ai piloté sa réalisation sur le terrain en formalisant les contacts avec les différents organismes et en produisant des éléments justificatifs de l'enquête. Le déroulement de ces enquêtes (terrain ou internet) a été laborieux et a nécessité de nombreuses explications et interventions. L'équipe grenobloise (Philippe Guéguen et

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

François Dunand, LGIT) a traité et interprété les données collectées. Le projet incluait également des études plus spécifiques de certains bâtiments par des ingénieurs du CETE. Ce projet a finalement débouché sur des outils concrets d'approche sommaire de la vulnérabilité particulièrement nécessaires pour les PPR sismique [EE1].

Parallèlement à ces études liées aux approches sommaires de la vulnérabilité, j'ai organisé avec P. Guéguen plusieurs **campagnes d'enregistrement de séismes et de bruit de fond dans des immeubles** qui ont été traités (par F. Dunand notamment) pour déterminer certaines des caractéristiques de la réponse dynamique des bâtiments selon leur type constructif et leur hauteur [Cn5].

Au cours de la mission post-sismique en Guadeloupe en 2005, nous avons mis au point et réalisé une campagne d'enregistrement du bruit de fond à différents niveaux du bâtiment de la DDE à Saint Phy (Basse-Terre). Etienne Bertrand a ensuite déduit de ces enregistrements les différents modes de vibrations de la structure [Cp6] [EE17].

En 2007, nous avons lancé avec le GIS-RAP et l'UMR Géo-sciences Azur l'instrumentation permanente d'un bâtiment à Nice (expérience « Bat-RAP ») afin d'acquérir des enregistrements de mouvements forts dans un bâtiment spécifique (du CHU).

Conception de scénarios de crise sismique

Depuis 1983, le LCPC et l'ERA6 ont fait de la ville de Nice l'un de leurs sites privilégiés pour tester les techniques de caractérisation des effets de site. A partir de 1993, j'ai participé au projet GEMITIS, qui a permis d'avancer à Nice sur la définition de l'aléa mais également d'ouvrir la démarche vers la définition des enjeux Cp[29] EE[10] EE[11]. Dès 1998, le Groupe d'Etude et de Proposition du Conseil Général des Ponts et Chaussées a demandé à l'ERA6 et au LCPC de mettre en place le projet GEM-GEP. Ce projet financé par l'Etat et par la Communauté d'Agglomération Nice-Côte d'Azur visait à développer des méthodes de **scénarios de crise sismique et à déterminer les zones les plus fragiles dans les systèmes urbains.**

Après une première phase de travail sur l'aléa [EE 9], le travail de GEM-GEP a porté sur la vulnérabilité puis la réalisation de scénarios. Les cartes résultantes illustrent la répartition possible des taux de dommages moyens par quartier selon le scénario envisagé [EE 1].

L'ensemble des problèmes techniques soulevé par l'évaluation de dommages dans une ville est loin d'être résolu. Lorsque des solutions sont proposées, elles laissent en générale place à de larges incertitudes. La mise au point de telles procédures dans le contexte de villes méditerranéennes était d'ailleurs l'objectif d'un projet européen RISKUE lancé par le BRGM dès 2001 [Mouroux et al., 2004] ; (http://www.risk-ue.net). Ce projet, dont l'une des 7 villes test était Nice, a permis de compléter les études réalisées dans le cadre de GEM-GEP.

Cela a été le cas pour affecter à chaque quartier une courbe de dommage correspondant au type constructif le plus représenté pour le bâti courant. Ces courbes, principalement issues de travaux italiens, indiquent les taux de dommage moyens constatés sur des bâtiments de même type en fonction de l'importance du séisme.

Sur la base des cartographies de vulnérabilité réalisées par quartier, Etienne Bertrand, Pierre-Yves Bard et moi-même avons tenté plusieurs combinaisons d'information afin d'affiner les scénarios de dommages possibles. Nous avons proposé de prendre en compte un incrément d'intensité en cas d'effet de site avéré et d'augmenter encore cet incrément si la fréquence de résonance du sol correspond en moyenne à celles des immeubles du quartier. Les résultats montrent une forte accentuation des taux de dommages dans les secteurs sensibles du centre ville (l'extrait du rapport final de GEM-GEP correspondant à ce travail est présenté en page 138). L'approche étant très sommaire, ces cartes ne représentent pour l'instant qu'une indication grossière de la répartition relative des zones les plus sensibles dans une ville, de nombreux paramètres locaux n'étant à cette échelle d'étude pas pris en compte.

Ainsi le projet GEM-GEP m'a permis des excursions dans le domaine des scénarios de crise en appliquant des techniques mises au point ailleurs, mais aussi en proposant des avancées.

Sur le plan "politique", la constitution d'un Comité d'Orientation et de Validation et d'un Comité de Communication ont mobilisé des représentants de l'Etat et des collectivités territoriales. Ce suivi régulier a certainement permis une appropriation de la problématique du risque sismique au niveau local et a participé à l'élaboration du Plan National Séisme.

Ma participation au pilotage des études m'a donné une conscience plus claire des limites techniques des résultats. La confrontation de ces limites avec les enjeux de la politique de gestion des risques dessinée par ces comités de suivi a constitué une expérience nouvelle pour moi, qui se poursuit à

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

travers divers groupes de travail axé sur le Plan Communal de Secours "séisme" de la ville de Nice ou celui du scénario de crise sismique dans les Bouches du Rhône.

L'expérience acquise autour de GEM-GEP nous a permis de nous lancer dans un autre projet : la conception de **SISROUTE,** en partenariat avec le SETRA[6] sur commande de la Direction des Routes. La méthode SISMOA, au départ de la démarche, visait à affecter un indice de vulnérabilité à un ouvrage d'art à partir de données facilement accessibles, en se basant sur des observations de comportements réels de structures en cas de séisme [Cp5]. Dans la continuité, mon équipe a mis au point le concept global de SISROUTE qui débouche sur des scénarios de crise sismique le long d'un itinéraire routier [Cp7] [EE18]. Cette conception (démarrée avec le stage de Camille Renou [s5]) a abouti en 2006 à des procédures d'études et à un outil informatique. SISROUTE prend en compte les différents types d'aléas induits par un séisme, ainsi que les différents types de tronçons de route (chaussée, ouvrage d'art, mur de soutènement). Le principe retenu pour sa mise en œuvre sur un itinéraire consiste d'abord à réaliser des études sommaires dont le but est de délimiter des tronçons homogènes et d'affecter à chacun des paramètres géotechniques prédéfinis. Cette caractérisation se traduit par une quantification forfaitaire de chaque aléa (amplification possible du mouvement, valeurs d'accélérations "seuil" susceptibles de déclencher un phénomène induit) et de la vulnérabilité correspondante. Ces données sont ensuite intégrées dans un système d'information géographique qui permet de simuler l'effet d'un séisme quelconque ou de prendre en compte les actions sismiques réglementaires. L'émulation d'un scénario produit une combinaison des valeurs d'aléa et de vulnérabilité qui se traduit par un risque plus ou moins élevé de coupure de la route. La méthodologie d'étude et les outils informatiques sont en phase de test sur des itinéraires stratégiques des Alpes et des Pyrénées. Le concept de SISROUTE (présenté dans le chapitre 5.3 page 144) pourrait à terme être appliqué à l'ensemble du réseau structurant d'une région.

Un autre type de scénario a été élaboré dans la haute vallée de la Tinée (06) au cours du projet européen **FORESIGHT** (http://www.acri-st.fr/foresight). Il s'est inspiré d'une part des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sommaire élaborées dans le cadre de GEM-GEP (stage de J. Régnier [S2]). Il a repris d'autre part le principe de la propagation de l'accélération maximale et de valeurs seuils susceptibles de déclencher des phénomènes induits (stage d'A. Saad [S1]). La combinaison des valeurs d'aléa et de vulnérabilité aboutit cette fois à un facteur de sécurité qui exprime sans doute mieux la possibilité d'occurrence d'un événement induit comme un éboulement. Les cartes de scénarios résultantes expriment donc à la fois des possibilités de dommages aux structures et un niveau de risque de déclenchement des phénomènes induits. L'application de cette combinaison a été rendue possible par le peu de constructions sur le territoire. La correspondance entre la valeur de l'accélération en surface et l'indice de vulnérabilité des structures est entachée d'une erreur qui reste à quantifier. Mais ce travail a pointé l'intérêt de prendre en compte les phénomènes induits par le séisme tels que les chutes de blocs, les glissements de terrain et la liquéfaction [Cp1] [Rs12] et [Rs13].

La conception de ce scénario, qui marque un progrès méthodologique, est présentée au chapitre 5.4 (page 155)

Références:

[Aki, 1957] Aki K., "Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors", Bulletin Earthquake Research Institute, Tokyo Univ., 35, pp 415-456, 1957.

[Bard, 2004] Bard P.Y. and SESAME participants, 2004. "The SESAME project: an overview and main results", in Proceedings of the 13th World Conf. on Earthquake Engineering, Vancouver, August 2004, n°2207, 2004.

[Bolton, 1970] Bolton Seed H., Idriss I.M., Dezfulian H., "Relationships between soil conditions and building damage in the Caracas Earthquake of july 29, 1967" in Report N°EERC 70-2, College of Engineering University of California, Berkeley, Californie, Feb. 1970.

[Bertrand, 2006] E. Bertrand, A.-M. Duval and S. Vidal, "Dynamic response Assessment of Building from Microtremor Measurements in Guadeloupe, France", First European Conf. on Earthquake Engineering and Seismology , Genève, Suisse, n°177, 9 pages, 3-8 sept . 2006.

[Bonnefoy-Claudet, 2006] Bonnefoy-Claudet S., F. Cotton and P.-Y. Bard, "The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review", in Earth-Sciences Review, 79, 205-227, 2006.

[Borcherdt, 1970] Borcherdt R. D. and J.F. Gibbs, "Effects of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake", in Bull. Seism. Soc. Am, 66, 467-500, 1970.

[Lachet, 1994] Lachet C. and Bard P.-Y. "Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique", J. Physics of the Earth, 42, pp 377-397, 1994.

[6] Service d'Etude Technique des Routes et Autoroutes, Ministère de l'Equipement

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

[Mondielli, 2005] Mondielli, P., "Contribution à la connaissance de l'aléa sismique en Principauté de Monaco", thèse de doctorat de l'Université Nice-Sophia-Antipolis, 230p, 2005.
[Mouroux, 2004], P. Mouroux, E. Bertrand, M. Bour, B. Le Brun, S. Depinois, P. Masure, and the RISK-UE team, "The European RISK-UE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios" 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, 1-6th August, 2004.
[Nakamura, 1989] Nakamura Y., "A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface", in Quarterly Report RTRI., 30, 25-33, 1989.
[Nogoshi, 1970] Nogoshi M. and T. Igarashi, "On the propagation characteristics of microtremor", in J. seism. Soc. Jpn., 23, 264-280, 1970.

© 2008 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

2 Produits et actions scientifiques et techniques

2.1 Synthèse

Type de produit		nombre	référence	N°page
Participation à l'encadrement de thèses		5	T	41
Stage encadré		28	S	42
Expérimentation de terrain		81	Exp	
Revue internationale à comité de lecture		10	Ai	17
Revue française à comité de lecture		9	Af	18
Conférences internationales	Résumé publié dans actes	26	Ca	26
	Article publié dans actes	34	Cp	26
Conférences nationales	Résumé publié dans actes	3	Cm	31
	Article publié dans actes	10	Cn	31
Séminaire		10	Se	32
Manifestation du Réseau Scientifique et Technique du Ministère de l'Equipement		6	Ma	33
Presse "grand public"		5	Gp	26
Rapport de recherche		42	Rs	23
Rapport d'étude		58	EE	19

Figure 2.1—1: Synthèse des produits jusqu'en juillet 2007

2.2 Publications scientifiques et techniques

2.2.1 Revues internationales à comité de lecture

références "Ai[nn] "

Ai[1] J-L Chatelain, B. Guillier, F. Cara, A.-M. Duval, K. Atakan, P.-Y. Bard and the WP02 SESAME team, "Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings", Bulletin of Earthquake Engineering, doi 10.1007/s10518-007-9040-7 ISSN: 1570-761, Jul. 2007.

Ai[2] B. Guillier, K. Atakan, J.-L. Chatelain, J. Havskov, M. Ohrnberger, F. Cara, A.-M. Duval, S. Zacharopoulos, P. Teves-Costa, SESAME team, " Influence of instruments on the H/V spectral ratios of ambient vibrations ", Bulletin of Earthquake Engineering, doi 10.1007/s10518-007-9039-0, ISSN: 1570-761, Jul. 2007.

Ai[3] F. Courboulex, C. Larroque, A. Deschamps, C. Kohrs-Sansorny, C. Gélis, J. L. Got, J. Charreau, J. F. Stéphan, N. Béthoux, J. Virieux, D. Brunel, C. Maron, A. M. Duval, J-L. Perez, P. Mondielli "Seismic hazard on the French Riviera: observations, interpretations and simulations", Geophysical Journal International, doi 10.1111/j.1365-246X.2007.03456.x 170 (1), 387–400, 2007.

Ai[4] B. Le Brun, A.-M. Duval, P.-Y. Bard, O. Monge, M. Bour, S. Vidal, H. Fabriol, "Seismic microzonation: a comparison between geotechnical and seismological approaches in Pointe-à-Pitre (French West Indies)", Bulletin of Earthquake Engineering, n°2, pp.27-50, 2004.

Ai[5] J.-F. Semblat, A.-M. Duval, P. Dangla, "Modal Superposition for the Analysis of Seismic-Wave Amplification", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.93, n°3, pp.1144-1153, 2003.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Ai[6] J.-F. Semblat, A.-M. Duval, P. Dangla, "Seismic site effects in a deep alluvial basin: numerical analysis by the boundary element method", Computers and Geotechnics, COGE 812, 29(7), pp.573-585, 2002.

Ai[7] J.-F. Semblat, P. Dangla, M.Kham, A.-M. Duval, *"Seismic site effects for shallow and deep* alluvial basins : in-depth motion and focusing effect", Soil Dynamics and Earthquake Eng., vol.22, No.9-12, pp.849-854, 2002.

Ai[8] A.-M. Duval, P.-Y. Bard, B. Le Brun, C. Lacave-Lachet, J. Riepl, D. Hatzfeld, "H/V technique for site response analysis synthesis of data from various surveys", Bolletino di Geofisica teorica ed Applicata, Vol.42, N°3-4, pp.267-280, 20 01.

Ai[9] A.-M. Duval, S. Vidal, J.-P. Méneroud, A. Singer, F. De Santis, C. Ramos, G. Romero, R. Rodriguez, A. Pernia, N. Reyes, C. Griman, "Caracas, Venezuela, Site effect determination with microtremors"; Pure and Applied Geophysics, PAGEOPH, Vol.158, n°12, pp.2513-2523, 2001. Egalement publié dans le volume : “Earthquake microzoning”, Eds: Roca, A. and Oliviera, C.; Birkhauser Verlag, Basel, 2001; 363 pages ISBN 3-7643-6652-4 en anglais. Présentation du livre en ligne: http://www.birkhauser.ch/6652-4_Roca_Flyer.pdf

Ai[10] J.-F. Semblat, A.-M. Duval, P. Dangla, "Numerical analysis of seismic wave amplification in Nice (France) and comparisons with experiments", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.19, n°5, pp.347-362, 2000.

2.2.2 Revues françaises à comité de lecture

références Af[nn]

Af[1] J.-F. Semblat, R. Paolucci, A.-M. Duval, "Simplified vibratory characterization of alluvial basins", Comptes-rendus de l’Académie des Sciences, T.335, pp.365-370, Elsevier, 2003.

Af[2] F. Courboulex, A.-M. Duval, A. Deschamps, A. Lomax, C. Larroque, "Les enseignements du petit séisme de Peille (Alpes Maritimes, France)", Comptes-rendus de l’Académie des Sciences, T.333, pp.105-112, Elsevier, 2001.

Af[3] J.-F. Semblat, A.-M. Duval, "Quantitative estimation of the seismic site effects through modal methods", Comptes-rendus de l’Académie des Sciences, IIa, T.331, pp.91-96, Elsevier, 2000.

Af[4] C. Larroque, S. Gaffet, C. Cornou, E. Schissele, E. Bertrand, N. Béthoux, M. Corrazzi, F. Courboulex, A. Deschamps, A.-M. Duval, C. Marron, J.-P. Glot, F. Janod, R. Guiguet, S. Vidal, J. Virieux, "Une expérience multi-antennes à Annot pour l’analyse des effets de site en sismologie", Comptes-rendus de l’Académie des Sciences, IIa, T.329, pp.167-174, Elsevier, 1999.

Af[5] J.-F. Semblat, A.-M. Duval, P. Dangla, "Amplification du mouvement sismique: effets de site dans le centre de Nice", Revue Française de Génie Civil, vol.3, n°1, pp.57-75, 1999.

Af[6] A.-M. Duval, J.-P. Méneroud et S. Vidal, "La méthode « H/V bruit de fond » et ses applications aux études d'effet de site", Monographies d'Etudes et Recherches du réseau des LPC 96-97, pp 22-25, document n°502 897 publié par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1999.

Af[7] J.-P. Méneroud, A.-M. Duval et al., "Nouveau tunnel de Tende. Etude de l'aléa sismique", Monographies d'Etudes et Recherches du réseau des LPC 96-97, pp 19-22, document n°502 897 publié par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1999.

Af[8] A.-M. Duval, J.-P. Méneroud, S. Vidal, P.-Y. Bard, "Une nouvelle méthode d'évaluation des sols aux séismes par enregistrement du bruit de fond", Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°203, pp.75-90, mai-juin1996.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Af[9] A.-M. Duval, "Détermination de la réponse d'un site aux séismes à l'aide du bruit de fond - Evaluation expérimentale", Rapport Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°GT62, 264 p., LCPC, Paris, juillet 199 6.

2.2.3 Rapports d'étude

références EE[nn]

Risque sismique à Nice: Projets GEMITIS et GEM-GEP

Projet GEM-GEP, Etude de scénarios de crise sismique à Nice:

EE[1] "Le Risque Sismique à Nice: apport méthodologique, résultats et perspectives opérationnelles, rapport final GEM-GEP", par P.-Y. Bard, A.-M. Duval, E. Bertrand, J.-F. Vassiliades, S. Vidal, P. Foin, P. Guéguen, C. Thibault, B. Guyet, F. Dunand, S. Bonnefoy-Claudet, J.-P. Méneroud, G. Vettori, publication présentée et diffusée lors de la conférence du 7 avril 2005 sous l'égide des Maîtres d'Ouvrage (LCPC, CGPC, METATTM, MEDD, CANCA), 52 pages, avril 2005.

Rapports pour les Maîtres d'Ouvrage: LCPC, CGPC, DRAST, DGUHC, Mairie de Nice:

EE[2] "GEM-GEP Phase II, Eléments de l'enquête sur la vulnérabilité des bâtiments de classe C et D", par A.-M. Duval, J.-F. Vassiliades, E. Bertrand, B. Guyet, P. Munier, C. Thibault et S. Vidal, compte rendu de mesures CETE Méditerranée, affaire n°01360304, 27 pages, janv. 2005.

EE[3] "GEM-GEP Phase II, Etude d'un bâtiment de classe D : Préfecture des Alpes Maritimes", par C. Thibault, P.-Y. Bard, A.-M. Duval, F. Dunant, P. Guéguen, et S. Vidal, rapport CETE Méditerranée, affaire n°9802740136-05, 21 pages + a nnexes, avril 2005.

EE[4] "Mesure du bruit de fond en réseau: détermination du profil de Vs dans le square Alsace-Lorraine à Nice", par S. Bonnefoy-Claudet, P.-Y. Bard, A.-M. Duval et S. Vidal, rapport CETE Méditerranée, affaire n°987400136/04, 18 pages, déc . 2003.

EE[5] "Mise à disposition d'éléments pour étude vulnérabilité sismique : Caserne Magnan et Hôpital Saint-Roch à Nice", par A.-M. Duval, J.-F. Vassiliades, S. Vidal et P. Guéguen, rapport CETE Méditerranée, affaire n°987400136/05, 44 pages, oct . 2003.

EE[6] "Périodes et amortissement des bâtiments niçois à partir d'enregistrements du bruit de fond sismique", par P. Guéguen, A.-M. Duval, S. Vidal, J.-F. Vassiliades, P.-Y. Bard et F. Dunand, rapport CETE Méditerranée, affaire n°987400136/04 e t 09, 112 pages, oct. 2003.

EE[7] "Contribution à l'étude de l'aléa local à Nice: Complément d'analyse du bruit de fond sismique", par A.-M. Duval et S. Vidal, rapport CETE Méditerranée, affaire n°987400136/04, 41pages, fév. 2003.

EE[8] "Diagnostic de vulnérabilité aux séismes : enregistrement de bruit de fond sismique dans les immeubles", par A.-M. Duval et S. Vidal, compte rendu de mesures CETE Méditerranée au LCPC n°OP11M031/2003/ERA6/D1, 17 pages, mai 2003.

EE[9] "GEM-GEP Phase I - Risque sismique sur Nice - Etude de Scénarios de gestion de crise sismique - Définition de l'aléa, de la vulnérabilité et des enjeux", par J.-P. Méneroud, A.-M. Duval, C. Michel, C. Thibault, S. Vidal, J.-L. Gastaut, A. Tortet, J. Delgado, T. Jessin, J.-F. Saillet et C. Tartar, rapport CETE Méditerranée, affaire n°98740136, 139 pages + annexes, fév. 2000.

EE[10] "Programme DIPCN/Méditerranée Projet GEMITIS/Nice (1993-1996) rapport 2ème année", rapport BRGM-CETE Méditerranée au Ministère de l'Environnement, document public BRGM R38241, 94H270, 72 pages + annexes, déc. 1994.

EE[11] "Programme DIPCN/Méditerranée Projet GEMITIS/Nice (1993-1996)", rapport BRGM-CETE Méditerranée au Ministère de l'Environnement, document public BRGM R37853 P042320022, 112 pages, déc. 1993.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Autres études et expertises

EE[12] "Participation à différentes instances en liaison avec le pôle de compétitivité Gestion des risques et vulnérabilité des territoires ", par A.-M. Duval, E. Bertrand, G. Verrhiest, rapport CETE Méditerranée à la DRAST (Direction des Affaires Scientifiques du Ministère de l'Equipement), affaire n°067424906, 12 pages, déc. 2006.

EE[13] "SISROUTE: système d'évaluation de scénario de crise sismique sur itinéraires routiers, Mise au point méthodologique: concept, aléa, SIG", par A.-M. Duval, E. Bertrand, A. Saad, rapport CETE Méditerranée au SETRA, affaire n°047421500/02, 17 pages, oct. 2006.

EE[14] "Réseau Accéléromètrique, Reconnaissance par Standard Penetration Test", par J.-P Calomili, J.-L. Perez, A.-M. Duval, E. Bertrand, rapport CETE Méditerranée à la DRAST (Direction des Affaires Scientifiques du Ministère de l'Equipement), affaire n°20/1290201, produit LCPC n°OP11M064/2006/ERA6/1, 41 pages, oct. 2006

EE[15] "Bilan des actions à engager pour études préliminaires au Plan de Prévention des Risques sismique à Nice ", par A.-M. Duval, E. Bertrand, J. Régnier, rapport CETE Méditerranée à la DDE06, affaire n°037419207-03, 24 pages, oct. 2006

EE[16] "Analyse de l'aléa sismique à Saint Beat", par A.-M. Duval, E. Bertrand et Y. Bertrand, rapport CETE Méditerranée au CETE Sud-Ouest/DLT/GERM, affaire n°067424004, 42 pages, oct. 2006.

EE[17] "Compte-rendu de mission en Guadeloupe suite au séisme des Saintes du 21 novembre 2004", par A.-M. Duval, E. Bertrand, S. Vidal, H. Nahornyj, G. Verrhiest et G. Jacquet, rapport CETE Méditerranée à DRAST et DGUHC, affaire n°05742 2937/01/02, produit LCPC n°OP11M064/2006/ERA6/F, 287 pages, mars 2006.

EE[18] "SISROUTE: système d'évaluation de scénario de crise sismique sur itinéraires routiers, Mise au point méthodologique: concept, aléa, SIG", par A.-M. Duval, C. Renou, E. Bertrand, P. Maurin, A Calvino, rapport CETE Méditerranée au SETRA, affaire n°047421500/01, produit LCPC: n°OP11M031/2005/ERA6/E3, 76 pages, déc. 2005.

EE[19] "Etudes préalables à l'établissement d'un Plan de Prévention des Risques Sismiques à Salon de Provence, Bouches du Rhône", par A.-M. Duval, E. Bertrand, S. Vidal, J.-F. Vassiliades, H. Nahornyj, G. Verrhiest, G. Jacquet, S. Lopez et P. Maurin, rapport CETE Méditerranée à la DDE13, affaire n°037418587-03, 74 pages + annexe s, nov. 2005.

EE[20] "Etudes préalables à l'établissement d'un Plan de Prévention des Risques Sismiques à Pélissanne, Bouches du Rhône", par A.-M. Duval, E. Bertrand, S. Vidal, J.-F. Vassiliadès, H. Nahornyj, G. Verrhiest, G. Jacquet, S. Lopez et P. Maurin, rapport CETE Méditerranée à la DDE13, affaire n°037418587-02, 71 pages + annexes, nov. 2005.

EE[21] "Etudes préalables à l'établissement d'un Plan de Prévention des Risques Sismiques à Grans, Bouches du Rhône", par A.-M. Duval, E. Bertrand, S. Vidal, J.-F. Vassiliadès, H. Nahornyj, G. Verrhiest, G. Jacquet, S. Lopez et P. Maurin, rapport CETE Méditerranée à la DDE13, affaire n°037418587-01, 68 pages + annexes, nov. 2005.

EE[22] "Analyse de l'aléa sismique sur la base aérienne de Luxeuil, Haute Saône. Détermination des SMHV et SMS", par E. Bertrand et A.-M. Duval, rapport CETE Méditerranée à la DDE70 (SBA), affaire n°04.742.0641, 26 pages, août 2004.

EE[23] "Analyse de l'aléa sismique au tunnel et au viaduc de Thuès, RN116, Pyrénées Orientales", par A.-M. Duval, E. Bertrand et J.-L. Pérez, rapport CETE Méditerranée au CETE Sud-Ouest/DLT/GERM, affaire n°03.74.1673, 42 pages, avr il 2004.

EE[24] "Analyse de l'aléa sismique au droit du Pont de la Lune - RD2205; Vallée de la Tinée, département des Alpes Maritimes", A.-M. Duval, E. Bertrand, M. Pagani, J.-L. Pérez, V. Remy, J.-F. Vassillades et S. Vidal, rapport du CETE Méditerranée au Conseil Général des Alpes-Maritimes, Direction des Infrastructures Routières; affaire n°037419329, 39 pages, déc. 2003.

© 2008 Tous droits réservés.

EE[25] , "Analyse de l'aléa sismique au droit du Pont de Valdeblore - RD2205; Vallée de la Tinée, département des Alpes Maritimes", par A.-M. Duval, E. Bertrand, M. Pagani, J.-L. Pérez, V. Remy, J.-F. Vassillades et S. Vidal, rapport du CETE Méditerranée au Conseil Général des Alpes-Maritimes, Direction des Infrastructures Routières; affaire n°037419328, 45 pages, déc. 2003.

EE[26] "Bassin minier de Gardanne(13), contribution à l'étude des effets de site sismologiques, mesures complémentaires ", par A.-M. Duval, S. Vidal et N.Lokmane, rapport du CETE Méditerranée à INERIS, affaire n°027401362/02, 20 p ages, sept. 2003.

EE[27] "Bassin minier de Gardanne(13), contribution à l'étude des effets de site sismologiques, application de la méthode H/V bruit de fond", par A.-M. Duval, S. Vidal et N.Lokmane, rapport du CETE Méditerranée à INERIS, affaire n°017401362/ 06, 43 pages, oct. 2002.

EE[28] "Etude de la perception du séisme du 25 février 2001 à Nice ; Exploitation de l'enquête lancée par voie de presse auprès de la population niçoise", par A.-M. Duval, A. Milliard, C. Fleury, A. Tortet, S. Vidal, P. Munier, J.-L. Gastaud, J.-P. Méneroud et V. Rémy, rapport du CETE Méditerranée à la Direction de la Prévention des Risques du Ministère de l'Environnement, affaire n°017401274, produit LCPC: OP11M031/2002/ERA6/A2, 69 pages + 53 cartes en annexe, juil. 2002.

EE[29] "Etude de la réponse des sols aux séismes autour du bâtiment LECA - Cadarache (installation nucléaire de base)", par A.-M. Duval, S. Vidal et J.-P. Méneroud, rapport du CETE Méditerranée à IPSN-CEA, affaire n°008810201, 50 pages + annexes, juil. 2001.

EE[30] "Route Nationale 20, viaduc de l'Ariège, Etude sismique préliminaire ", par J.-P. Méneroud, A.-M. Duval, rapport CETE Méditerranée au CETE du Sud-Ouest, LR Toulouse, affaire n°007401053-1, 16 pages, déc. 2000.

EE[31] "Prise en compte du risque sismique dans les documents d'urbanisme à petite échelle (DTA, SCOT)", par J.-P. Méneroud, A.-M. Duval et T. Le Bihan, 33 pages, Rapport d'étape à la Direction Générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction, affaire n°987400053, nov. 2000.

EE[32] "Aéroport de Nice Côte d'Azur - Etude de faisabilité pour l'aménagement de la zone sud. Etude de stabilité de la plateforme aéroportuaire", par J.-P. Méneroud et A.-M. Duval, Rapport Fondasol-CETE Méditerranée, (partie CETE: calculs sismiques, effets de site, campagne de mesures, liquéfaction, stabilité sous séisme), Maître d'ouvrage: CCI des Alpes Maritimes, Maître d'œuvre: DDE06, affaire CETE n°: 98269, Fondasol: EN99117, 176 pages + Annexes, oct. 2000.

EE[33] "Cartographies préalables à l'établissement du Plan de Prévention des risques sismiques et mouvements de terrain de Cabannes (Bouches du Rhône), Etude Technique", par J.-P. Méneroud, A.-M. Duval, M. Payani, C. Thibault, S. Vidal, rapport CETE Méditerranée à la DDE13, service juridique, n°97.740, 53 pages + anne xes, oct. 2000.

EE[34] "Cartographies préalables à l'établissement du Plan de Prévention des risques sismiques et mouvements de terrain de Plan d'Orgon (Bouches du Rhône), Etude Technique", par J.-P. Méneroud, A.-M. Duval, M. Payani, C. Thibault, S. Vidal, rapport CETE Méditerranée à la DDE13, service juridique, affaire n°97.740, 51 page s + annexes, oct. 2000.

EE[35] "Cartographies préalables à l'établissement du Plan de Prévention des risques sismiques et mouvements de terrain d'Orgon (Bouches du Rhône), Etude Technique", J.-P. Méneroud, A.-M. Duval, M. Payani, C. Thibault, S. Vidal, rapport CETE Méditerranée à la DDE13, service juridique, afaire n°97.740, 53 pages + annexes, oct . 2000.

EE[36] "Cartographies préalables à l'établissement du Plan de Prévention des risques sismiques et mouvements de terrain d'Eygalières (Bouches du Rhône), Etude Technique", par J.-P. Méneroud, A.-M. Duval, M. Payani, C. Thibault, S. Vidal, rapport CETE Méditerranée à la DDE13 service juridique, affaire n°97.740. 54 pages + annexes, oct. 2000.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

EE[37] "Cartographie des risques sismiques, Etude du développement d'un système d'information géographique (SIG)", par J.-P. Méneroud, A.-M. Duval, D. Chétrit, J.-L. Gastaut, rapport à la Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques du MELT, 83 pages, affaire n°9874000129GS95496, juin 2000.

EE[38] "RN 202 bis – Ouvrage de franchissement du Var- Calcul d'accélérogrammes", par J.-P. Méneroud, A.-M. Duval, rapport CETE Méditerranée à la DDE06, affaire n°007170401, 10 pages, mai 2000.

EE[39] "Cartographies préalables à l'établissement du Plan de Prévention des risques sismiques et mouvements de terrain de Beaulieu (Alpes Maritimes), Etude Technique", J.-P. Méneroud, A.-M. Duval, S. Vidal, rapport CETE Méditerranée à la DDE06, service juridique, affaire n°97.740, 21 pages + annexes, mars 1999.

EE[40] "Autoroute A51 Grenoble - Sisteron, Viaduc de Monestier, section Coynelle- Col du Fau, Etude d'effets de site", par J.-P. Méneroud, S. Vidal et A.-M. Duval, rapport CETE Méditerranée à Scétauroute Rhône-Alpes, affaire n°9 7487, 16 pages + annexes, juil. 1999.

EE[41] "Cartographies préalables à l'établissement du Plan de Prévention des risques sismiques et mouvements de terrain de Lamanon (Bouches du Rhône), Etude Technique", par J.-P. Méneroud, A.-M. Duval, M. Payani, C. Thibault, S. Vidal, rapport CETE Méditerranée à la DDE13 service juridique, affaire n°97.740, 50 pages + annexes, déc. 1998.

EE[42] "Cartographies préalables à l'établissement du Plan de Prévention des risques sismiques et mouvements de terrain de Sénas (Bouches du Rhône), Etude Technique", par J.-P. Méneroud, A.-M. Duval, M. Payani, C. Thibault, S. Vidal, rapport CETE Méditerranée à la DDE13 service juridique, affaire n°97.740, 56 pages + annexes, déc. 1998.

EE[43] "Casablanca & Mohamédia (Maroc) – Projet Procter & Gamble – Caractérisation de l'aléa sismique régional", par J.-P. Méneroud et A.-M. Duval, rapport CETE Méditerranée à la société SOCOTEC, 78 pages, affaire n°98784411, nov. 1998.

EE[44] "Central téléphonique Nice-Carnot, Évaluation de la vulnérabilité vis-à-vis du risque sismique", par C. Thibault, J.-P. Mèneroud, A.-M. Duval et S. Vidal, rapport CETE Méditerranée à France-Télécom, Direction Régionale de Nice, affaire n°97361/73, 49 pages, nov. 1998.

EE[45] "Jorf Lasfar (Maroc)- Futur centre de stockage de GPL – Caractérisation de l'aléa sismique régional", par J.-P. Méneroud et A.-M. Duval, rapport CETE Méditerranée à la société Fondasol, affaire n°98160, 35 pages, mai 1998.

EE[46] "Vulcania, Centre européen du volcanisme, caractérisation de l'aléa sismique régional", par J.-P. Méneroud, S. Vidal et A.-M. Duval, rapport CETE Méditerranée à la DDE du Puy de Dôme, affaire n°98236, 13 pages, avril 1998.

EE[47] "Cartographies préalables à l'établissement du Plan de Prévention des risques sismiques et mouvements de terrain de Cornillon-Confoux (Bouches du Rhône), Etude Technique", par J.-P. Méneroud, A.-M. Duval, M. Payani, C. Thibault et S. Vidal, rapport CETE Méditerranée à la DDE13 service juridique, affaire n°97.740.568, , 50 pages + annexes, mars 1998.

EE[48] "Cartographies préalables à l'établissement du Plan de Prévention des risques sismiques et mouvements de terrain de Velaux (Bouches du Rhône), Etude Technique", par J.-P. Méneroud, A.-M. Duval, M. Payani, C. Thibault et S. Vidal, rapport CETE Méditerranée à la DDE13 service juridique, affaire n°97.740, 44 pages + annexes, fév. 1998.

EE[49] "Central téléphonique Nice-Carras, Évaluation de la vulnérabilité vis-à-vis du risque sismique", par C. Thibault, J.-P. Mèneroud, A.-M. Duval et S. Vidal, rapport CETE Méditerranée à France-Télécom, Direction Régionale de Nice, affaire n°97360/73, 53 pages, janv. 1998.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

EE[50] "Immeuble industriel « La Ruche Vulcain », Etudes de fondation et de la réponse des sols", par D. Geoffroy et A.-M. Duval, rapport CETE Méditerranée la Principauté de Monaco, Service des Travaux publics, affaire n°97495.74/01, 17 pages + annexes, janv. 1998.

EE[51] "Exercice de planification stratégique- Cantons de Sierentz et Huningue – Etude d'effets de site par mesures de bruit de fond", par J.-P. Méneroud, O. Sebe, A.-M. Duval, S. Vidal et C. Lacave, rapport CETE Méditerranée au CETE de l'Est, affaire n°9674565, 16 pages + annexes, fév. 1997.

EE[52] "Nouveau tunnel de Tende, vallée de la Roya, Alpes Maritimes, Etude de l'aléa sismique, effet de site"; par A.-M. Duval, J.-P. Mèneroud et S. Vidal, rapport CETE Méditerranée à DIT,. affaire n°96741512, 69 pages + 3 volumes d'annexes, déc. 1996.

EE[53] "Autoroute A43 Viaduc du Pont des Chèvres, Etude d'effets de site par mesure de bruit de fond", par J.-P. Méneroud, S. Vidal, A.-M. Duval, rapport CETE Méditerranée à la Société Française du Tunnel Routier du Fréjus, Paris, affaire n°96740454, 28 pages + annexes, oct. 1996.

EE[54] "Stockage pétrolier de la Cantinas à Caracas, Vénézuéla. Etude d'effets de site", par J.-P. Mèneroud, A.-M. Duval et S. Vidal, rapport CETE Méditerranée à la FUNVISIS (Vénézuela) pour MARAVEN, affaire n°91/96.664, 71 pages + 2 volumes d'annexes, mai 1996.

EE[55] "Etude des effets de la réponse des sols par enregistrement de bruit de fond, Central téléphonique de Berlioz, Nice", par J.-P. Mèneroud, A.-M. Duval et S. Vidal, rapport CETE Méditerranée à la société Fondasol, affaire n°96.53 7/74, 15 pages, mars 1996.

EE[56] "Etude de l'aléa sismique au substratum rocheux sur le grand viaduc de Millau, A75 la Méridienne", par J.-P. Méneroud et A.-M. Duval, rapport CETE Méditerranée au Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Equipement et des Transports, Arrondissement Interdépartemental des Ouvrages d'Art, Millau, affaire n°95.516/74, 15 pages + annexes, janv. 1996.

EE[57] "A51 Grenoble - Sisteron, Franchissement de l'Ebron, Etude de l'aléa sismique local"; par J.-P. Mèneroud, A.-M. Duval, S. Vidal, J Fréchet, J.-F. Gamond, C. Beck, M. Tardy, P.-Y. Bard, E. Barnichon et J.-M. Gaboriaud, rapport CETE Méditerranée à DIT, affaire n°93/95666/74, 176 pages + 4 volumes d'annexes, mai 1995.

EE[58] "Microzonage sismique de la Principauté de Monaco", par J.-P. Mèneroud, P.-Y. Bard, F. Creuly, A.-M. Duval, S. Vidal, D. Geoffroy et A. Oddou, rapport CETE Méditerranée au Département des Travaux Publics et des Affaires sociales de la Principauté de Monaco, affaire n°89/92541/74, 97 pages + annexes, fév. 199 2.

2.2.4 Rapports de recherche

(références Rs[nn])

⇒ SESAME (2001-2004) Projet européen: Project No. EVG1-CT-2000-00026:

Principale production du Consortium:

Un Cdrom avec un logiciel gratuit , un manuel de mise en œuvre et d'interprétation de la méthode "H/V bruit de fond".

Participation aux rapports du consortium pour la Direction Générale de la Recherche de la Commission Européenne:

Rs[1] "Final Report on measurement Guidelines H/V technique: experimental conditions WP02", deliverable D08.02, 38 pages, juin 2003.

Rs[2] "Final Report of the Instrument Workshop, 22-26 October 2001, University of Bergen, Norway, WP02, Controlled Instrumental Specifications", deliverable D01.02, 45 pages, avril 2002.

Participation aux travaux conduisant aux rapports:

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Rs[3] "Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations, measurements, processing and interpretation", deliverable D23.12, 61 pages, déc. 2004.

Rs[4] "H/V Technique: Empirical Evaluation. Comparisons of experimentally and theoretically estimated transfer functions with the (H/V) spectral ratio and evaluation of the applicability of the latter in cases of linear or/and non-linear soil behaviour", deliverable D16.04, 62 pages, juin 2004.

Rs[5] "H/V Technique: Data processing. Report on the Multiplatform H/V Processing Software"; deliverable D09.03, 37 pages, juin 2003.

Rapports CETE Méditerranée pour le LCPC et pour les membres du consortium SESAME:

Rs[6] "SESAME WP02 - State of the survey - Comments on available tests perfomed by several teams", par A.-M. Duval, J.-F. Vassiliades et S. Vidal, produit LCPC n°OP11M031/2003/ERA6/B5, 23 pages, mars 2003.

Rs[7] "SESAME WP02 - Test CETE valables pour l'évaluation des paramètres expérimentaux", par A.-M. Duval, J.-F. Vassiliades et S. Vidal, produit LCPC n°OP11M031/2003/ERA6/B2, 389 pages, avril 2003.

Rs[8] "Test ETH Zurich valables pour l'évaluation des paramètres expérimentaux – traitements et graphes réalisés selon accord janvier 2003", par A.-M. Duval, J.-F. Vassiliades, D. Faeh (ETH, Zurich, Suisse), produit LCPC n°OP11M031/2003 /ERA6/B4, 49 pages, avril 2003.

Rs[9] "SESAME WP02 - Experimental condition evaluation Team 12 contribution - 2002 July / Résultats préliminaires des expériences conduites par L'Equipe de Nice (équipe 12)", par A.-M. Duval et S. Vidal, produit LCPC n°OP11M0312002/E RA6/B3, 86 pages, juil. 2002.

Rs[10] "SESAME WP03 software V1 Evaluation", par A.-M. Duval et E. Querendez, produit LCPC n°OP11M031/2002/ERA6/B4, 36 pages, août 2002.

Rs[11] "SESAME WP03: Sesame software V1 Evaluation test conclusions CETE-INGV", par F. Carra (INGV, Roma), E. Querendez et A.-M. Duval, produit LCPC n°OP11M031/2002/ERA6/B5, 20 pages, sept. 2002.

⇒ FORESIGHT (2004-2006) Projet européen: Project No. SSPI-CT-2003-511139:

Rapports CETE Méditerranée pour la Direction Générale de la Recherche de la Commission Européenne:

Rs[12] "WP3900: Methodology for determining shallow depth profiles of S-wave velocity from ambient vibration in alluvial deposit; WP6300: Site effect assessment in some sites of the Alps Natural Laboratory ", rapport CETE Méditerranée par E. Bertrand et A.-M. Duval, delivrable D58-D118, 26 pages, août 2006.

Rs[13] "WP 7300: Risk management combining time-dependent hazard and vulnerability assessments, Example of earthquake scenario in Alps Natural Laboratory ", rapport CETE Méditerranée par E. Bertrand et A.-M. Duval, delivrable D123, 8 pages, août 2006.

Rs[14] "WP4600, Progress report: Visualising seismological data in the Alps Laboratory", par A.-M. Duval, deliverable D77-D78-D79, 11 pages, juin 2005.

Rs[15] "WP3900 progress report: Methodology for determining shallow depth profiles of S-Waves velocity from ambient vibration in alluvial deposit", par E. Bertrand et A.-M. Duval, deliverable D57, 8 pages, juin 2005.

⇒ Projet PASSERELLE (2004-2006) RDT/MEDD CV04000072 :

Publications par le consortium (co-responsable scientifique du projet):

Rs[16] "PASSERELLE, Rapport final 2007", rapport au MEDD, produit LCPC n°OP11M064/2007/ERA6/3, 59 pages, janv. 2007.

© 2008 Tous droits réservés.

Rs[17] " Cahier de suivi du projet PASSERELLE, octobre 2006", rapport aux participants du projet, produit LCPC n°OP11M064/2006/ERA6/14, 10 pages, oct . 2006.

Rs[18] " Cahier de suivi du projet PASSERELLE, mars 2005", rapport aux participants du projet, produit LCPC n°OP11M031/2005/ERA6/B7, 17 pages, mar s 2005.

Rs[19] " Cahier de suivi du projet PASSERELLE, octobre 2005", rapport aux participants du projet, produit LCPC n°OP11M031/2005/ERA6/B8, 17 pages, oct . 2005.

Rs[20] "PASSERELLE, Rapport intermédiaire 2005", rapport au MEDD, produit LCPC n°OP11M031/2005/ERA6/B9, 28 pages, oct. 2005.

⇒ Autres rapports de recherche dans le cadre du financement recherche LCPC:

Rs[21] "PASSERELLE, rapport final axe B3, ", rapport au MEDD, par E. Bertrand et A.-M. Duval, produit LCPC n°OP11M064/2006/ERA6/15, 37 pages, déc . 2006.

Rs[22] "Mise en place d'un réseau sismologique temporaire à Beyrouth", par A.-M. Duval, E. Bertrand et S. Vidal, rapport CETE Méditerranée au LCPC, affaire n°067423841-01, produit LCPC n°OP11M064/2006/ERA6/5, 22pages, juil. 2006.

Rs[23] "PASSERELLE, Compte rendu de recherche 2005 de l'axe B3", par E Bertrand, K. Manchuel, S. Vidal et A.-M. Duval, rapport CETE Méditerranée au LCPC n°OP11M031/2005/ERA6/B10, 37 pages, déc. 2005.

Rs[24] "Compte rendu d'activité 2004 au LCPC de l'ERA6 Risque Sismique", par A.-M. Duval, E. Bertrand, S. Vidal et J.-F. Vassiliades, rapport CETE Méditerranée au LCPC n°OP11M031/2005/ERA6/Z3, 41 pages, fév. 2005.

Rs[25] "Compte rendu d'activité 2001-2004 au LCPC de l'ERA6 Risque Sismique", par A.-M. Duval, E. Bertrand, S. Vidal et J.-F. Vassiliades, rapport CETE Méditerranée au LCPC n°OP11M031/2005/ERA6/Z1, 46 pages, fév. 2005.

Rs[26] "Réseau Accélérométrique Permanent, Réseau du Sud-Est, Compte rendu du suivi technique du réseau au cours de l'année 2005", par S. Vidal et A.-M. Duval, rapport CETE Méditerranée à la DRAST affaire n°987400137/08/01, produit LCPC n°OP11M031/2005/ERA6/A1, 10 pages, déc. 2005.

Rs[27] "Programme quadriennal 2006-2009 ERA6 Risque Sismique", par A.-M. Duval et E. Bertrand, rapport CETE Méditerranée au LCPC n°OP11M031/2005/E RA6/Z2, 30 pages, oct. 2005.

Rs[28] "Réseau Accéléromètrique Permanent Français, Reconnaissance géotechnique de 14 sites, campagne de mesure de bruit de fond en réseau", par E. Bertrand, S. Vidal et A.-M. Duval, rapport CETE Méditerranée à DRAST et LCPC affaire n°037420129/01, produit recherche LCPC n°OP11M031/2005/ERA6/B5, 24 pages + annexes, j anv. 2005.

Rs[29] "Réseau Accélérométrique Permanent, Réseau du Sud-Est, Compte rendu du suivi technique du réseau au cours de l'année 2004", par S. Vidal et A.-M. Duval, rapport CETE Méditerranée à la DRAST, affaire n°987400137/07/01, produit LCPC n°OP11M031/2005/ERA6/A2, 10 pages, déc. 2004.

Rs[30] "Réseau Accélérométrique Permanent, Réseau du Sud-Est, Compte rendu du suivi technique du réseau au cours de l'année 2003";par S. Vidal et A.-M. Duval, rapport CETE Méditerranée à la DRAST affaire n°987400137/06/01, produit LCPC n°OP11M031/2003/ERA6/A1, 10 pages, déc. 2003.

Rs[31] "Un an d'enregistrement de la sismicité dans un immeuble niçois - Bâtiment B2 CCI / DDE pour traitement par LCPC/LGIT", par S. Vidal, A.-M. Duval et J.-F. Vassiliades, compte rendu de mesure CETE Méditerranée au LCPC n°OP11M031/2003 /ERA6/D3, affaire n°017401362, 15 pages, déc. 2003.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Rs[32] "Synthèse des recherches conduites dans le cadre du thème Géo36 - Sujet : Utilisation du bruit de fond", par A.-M. Duval, rapport CETE Méditerranée au LCPC n°OP11M031/2003/ERA6/B3, affaire n°017401362/06, 29 pages, mai 2003.

Rs[33] "Essais d'identification de ruptures sismiques sur le glissement de la Clapière", par A.-M. Duval, D. Amitrano, M. Josselin, M. Glenet et S. Vidal, compte rendu de recherche du CETE Méditerranée au LCPC suite collaboration avec le LAEGO, Ecole des Mines de Nancy, fiche recherche 2-23-480, 36 pages, juin 2002.

Rs[34] "Utilisation de la méthode H/V bruit de fond sur le glissement de la Clapière", par A.-M. Duval, Y. Guglielmi et S. Vidal, compte rendu de recherche du CETE Méditerranée n°01-74-01362-02 au LCPC, fiche recherche 1-36-01-0, 32 pages, juin 2002.

Rs[35] "Diagnostic de vulnérabilité aux séismes: enregistrement de bruit de fond sismique dans les immeubles", par A.-M. Duval et S. Vidal, compte rendu de mesure au LCPC n°OP11M031/2002/ERA6/D1, fiche recherche 136060, 18 pages, juin 2002.

Rs[36] "Pointe à Pitre Guadeloupe: projet GEMITIS, Etude méthodologique de l'aléa sismique local", par A.-M. Duval, S. Vidal, compte rendu de recherche du CETE Méditerranée n°96.641 au LCPC, Thème 036, sujet 1 36 01 7 Actions sismiques, 80 pages + 2 volumes d'annexes, août 98.

Rs[37] "Etude des effets de site a Kozani (Grèce)", par A.-M. Duval et S. Vidal, Compte rendu de recherche du CETE Méditerranée n°97.538 au LCPC dans le cadre de la collaboration LCPC/ Université de Thessalonique, 48 pages + 2 volumes d'annexes, mars 1998.

Rs[38] "Microzonage de Tunis (Tunisie), étude de l'aléa sismique local par enregistrement de séismes et de bruit de fond", par A.-M. Duval et S. Vidal, compte rendu de recherche du CETE Méditerranée n°97.740.6060 au LCPC dans le cadre de la coopération CETE/LCPC/ENIT, Thème 036, Sujet 1 36 01 7 Actions sismiques, 100 pages, juil. 1998.

Rs[39] "Versant de la Clapière à Saint Etienne de Tinée, Corrélations entre nanosismicité et déplacements, Développements du système de traitement automatique", par J.-P. Méneroud, A.-M. Duval et S. Vidal, compte rendu de recherche du CETE Méditerranée n°88/95 430/74 au LCPC, 62 pages + 2 volumes annexes, janv. 1996.

Rs[40] "H/V bruit de fond à Caracas (Vénézuéla), Etude de l'aléa sismique local", par A.-M. Duval, J.-P. Méneroud et S. Vidal, compte rendu de recherche au LCPC n°96.740.664 dans le cadre de la coopération franco-vénézuélienne CETE/LCPC/FUNVISIS, 83 pages + 2 volumes d'annexes, août 1996.

Rs[41] " Microzonages sismiques de la Côte Orientale du Lac de Maracaïbo et de El Vigia (Venezuela)", par J.-P. Méneroud, A.-M. Duval et S. Vidal, projet et rapport en collaboration avec la FUNVISIS, projet INTEVEP 92-174, en espagnol, 95 pages + 2 volumes d'annexes, affaire n°91664, septembre 1994.

Rs[42] "Versant de la Clapière à Saint Etienne de Tinée, analyse d'enregistrements sur le dispositif sismo-accoustique", par J.-P. Méneroud, C. Guido, A.-M. Duval et S. Vidal, rapport CETE Méditerranée n°88/93.430/74 à la Délégation aux Risques Majeurs et au Conseil Général des Alpes-Maritimes, avril 1993.

2.2.5 Articles de vulgarisation

Reportages ou articles de presse pour lesquels j'ai été interrogée (références « Gp[nn] »)

Gp[1] Participation à un reportage vidéo avec entretien sur prévention risques majeurs pour le stand de la ville de Nice à la Foire Internationale de Nice (4-13 mars 2006).

Gp[2] Contribution à la revue des services de l'état dans les Alpes Maritimes, Actions de l'Etat, n°23, page 12, mai 2005.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Gp[3] Participation à un article de vulgarisation dans la revue "Recherche et Equipement" éditée par la DRAST, n°2, page 22 et 23: "les effets de si te mieux caractérisés", fév. 2004.

Gp[4] Contribution à l'article "Retour d'expérience pour la gestion du risque sismique", revue des services de l'état dans les Alpes Maritimes, Actions de l'Etat, n°17, page 4, déc. 2002.

Gp[5] Suite à un entretien avec F. Heros, journaliste, publication d'un article-dossier "Quand la terre tremble …" (11 pages) du numéro 79 du magazine mensuel "Science Frontière", nov. 2002.

2.3 Rencontres scientifiques

2.3.1 Conférences internationales

références : Cp[nn]: article publié dans actes;
Ca[nn]: poster ou présentation orale avec résumé publié dans actes

Ca[1] E. Bertrand, A.-M. Duval and A. Saad, "3D Geotechnical Soil Model of Nice, France, Inferred from Seismic Noise Measurements, for Seismic Hazard Assessment", Paper Number: NS11D-0798, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 10-14 dec 2007.

Cp[1] E. Bertrand, A.-M. Duval and A. Saad, "Assessment of seismic risk in the upper Tinée valley, southeastern France" , in International Symposium on Seismic Risk Reduction, Romanian Academy, Bucharest, 10 pages, 26-29 Apr. 2007.

Cp[2] A.-M. Duval, E. Bertrand, G. Verrhiest, G. Jacquet and H. Nahornyj, "Combined survey of site effect and damage distribution in "Les Saintes" island (French West Indies) after the Guadeloupe 6.3 earthquake in 2004", 3rd Int. Symp. on the Effects of Surface Geology on seismic motion, ESG 2006, Grenoble, n°029, pp939-94 9, 29 août - 01 sept. 2006.

Cp[3] H. Cadet, P. Guéguen, A.-M. Duval and E. Bertrand, " Geotechnical classification of the French Accelerometric Network (RAP) stations", 3rd Int. Symp. on the Effects of Surface Geology on seismic motion, ESG 2006, Grenoble, n°11 3, pp811-819, 29 août - 01 sept. 2006.

Cp[4] E. Bertrand, A.-M. Duval and S. Vidal, "Seismological measurements for site effect investigation in the Var valley, Nice, France", 3rd Int. Symp. on the Effects of Surface Geology on seismic motion, ESG 2006, Grenoble, n°00 3, pp907-918, 29 août - 01 sept., 2006.

Cp[5] P. Marchand, D. Davi, P. Schmitt, C. Thibault, A.-M. Duval and D. Criado, "SISMOA: a simplified method to assess the seismic vulnerability of existing bridges", First European Conf. on Earthquake Engineering and Seismology , Genève, Suisse, n°150, 10 pages, 3-8 sept. 2006.

Cp[6] E. Bertrand, A.- M; Duval and S. Vidal, "Dynamic response Assessment of Building from Microtremor Measurements in Guadeloupe, France", First European Conf. on Earthquake Engineering and Seismology , Genève, Suisse, n°177, 9 pages, 3-8 sept. 2006.

Cp[7] A.-M. Duval, E. Bertrand, C. Renou, P. Marchand, D. Davi and D. Criado, "SISROUTE : Earthquake scenario generation along roads : hazard assessment principles and global concept of the system', First European Conf. on Earthquake Engineering and Seismology , Genève, Suisse, n°516, 10 pages, 3-8 sept. 2006.

Ca[2] D. Davi, P. Schmitt and A.-M. Duval, "Seismic Risk Assessment Tool for Road Networks (tentative)", International Seminar on Risk Management for Roads, PIARC, Ha Noi, Viet Nam, 26-28 avril 2006.

© 2008 Tous droits réservés.

Ca[3] E. Bertrand, K. Manchuel, A.-M. Duval, "Seismological measurements for site effect investigation in the Var valley, Nice, France", General Assembly of International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, Santiago, Chile, 2-8 oct. 2005.

Ca[4] K. Atakan, P-Y. Bard, F. Cara, J-L. Chatelain, G. Cultrera, A.M. Duval, B. Guillier, F. Kind, B. Moreno, P. Roquette, A. Tento, P. Teves-Costa, "J-SESAME: a dedicated software for H/V spectral ratios", 29th General Assembly of the European Seismological Commission, Session F3, Potsdam, sept. 2004.

Cp[8] A.-M. Duval, J.-L. Chatelain, B. Guillier, SESAME WP02 team "Influence Of Experimental Conditions On H/V Determination Using Ambient Vibrations (Noise)", n°306, 15 pages (+poster), 13th World Conf.on Earthquake Eng., Vancouver, 1-6 août, 2004.

Cp[9] K. Atakan, A.-M. Duval, N. Theodulidis, B. Guillier, J.-L. Chatelain, P.-Y. Bard, SESAME-Team "The H/V spectral ratio technique: the experimental conditions, data processing and empirical reliability assessment", n°2268, 12 pages , 13th World Conf.on Earthquake Eng., Vancouver, 1-6 août 2004.

Cp[10] M. Koller, J.-L. Chatelain, B. Guillier, A.-M. Duval, K. Attakan, C. Lacave, P.-Y. Bard and the sesame wp12 participants, "Practical user guidelines and software for the implementation of the H/V ratio technique : measuring conditions, processing method and results interpretation", n°3132, 10 pages, 13th World Conf.on Earthquake Eng ., Vancouver, 1-6 août 2004.

Cp[11] P.-Y. Bard and the SESAME participants, "The SESAME project : an overview and main results", n°2207, 16 pages, 13th World Conf.on Eart hquake Eng., Vancouver, 1-6 août 2004.

Cp[12] K. Atakan, A-M. Duval, N. Theodulidis, P-Y. Bard, SESAME Team, "On the reliability of the H/V technique", 11th Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Eng. and 3rd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Eng., Berkeley, 8 pages, 7-9 janv. 2004.

Cp[13] A.-M. Duval, J.-L. Chatelain, B. Guillier, SESAME WP02 team, "Influence of experimental conditions on H/V determination using ambient vibrations (noise)" 11th Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Eng. and the 3rd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Eng., Berkeley, 8 pages, 7-9 janv. 2004.

Ca[5] P. Teves-Costa, A.-M. Duval, J.-L. Chatelain, B. Guillier, F Cara, G. Giulio, D. Faeh, J. Woessner, K. Atakan, M.B. Sorensen and SESAME WP02 team, "Influence of experimental conditions on measuring noise for H/V estimation", Geophysical Research Abstract, 5, 12954, European Geophysical Society, 2003.

Ca[6] Gélis C., Courboulex F., Deschamps A., J.-L Got, A.-M. Duval, C. Larroque, "How seismic activity reveals active faults in the south east of France ?", poster, European Geosciences Union and American Geoscience Union Joint Assembly, Nice, 6-11 avril 2003.

Ca[7] J.-F. Semblat, M. Kham, P. Guéguen, P.-Y. Bard, A.-M. Duval, "Site-city interaction through modifications of site effects", 7th US Conf. on Earthquake Eng., Boston, 2002.

Ca[8] B. Guillier, K. Atakan, A.-M. Duval, Sesame project WP02 team, "Influence of instruments on H/V spectral ratio of ambient noise", 28th General Assembly European of the Seismological Commission, Genova, sept 2002

Ca[9] B. LeBrun, A.M. Duval, M. Bour, P.-Y. Bard, O. Monge and H. Fabriol, "Site effect study in Pointe à Pitre", 28th General Assembly European of the Seismological Commission, Genova, sept. 2002.

Ca[10] J.-F. Semblat, M. Kham, P. Guéguen, P.-Y. Bard, A.-M. Duval, "Site-city interaction through modifications of site effects", 7th US Conf. on Earthquake Eng., Boston, 2002.

Cp[14] J.-F. Semblat, P. Guéguen, M. Kham, P.-Y. Bard, A.-M Duval, "Site-City interaction at local and global scales", 12th European Conference on Earthquake Engineering, Londres, ref 807, 10 pages, août. 2002.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Ca[11] B. Guillier; K. Atakan, A.-M. Duval, M. Ohrnberger, R. Azzara, R. Cara, J. Havskov, G. Alguacil, P. Teves-Costa, N. Theodulidis and the SESAME WP02 team, "Influence of instruments on H/V spectra of ambient noise", poster, 27th General Assembly of the European Geophysical Society, Nice, avril 2002.

Ca[12] A. Deschamps, N. Bethoux, F. Courboulex, A.-M. Duval, Y. Hello, A. Anglade, D. Brunel, S. Vidal, "Study of the February 25th 2001 event (Ml=4.6) offshore of Nice and it's contribution to seismic hazard evaluation", 27th General Assembly of the European Geophysical Society, Nice, avril 2002.

Cp[15] A.-M. Duval, “H/V on microtremor” along North-South profile crossing Los Palos Grandes, Caracas", Taller Internacional “Estudio de metodos y acciones para contrarrestar los efectos producidos por terremotos en Caracas (1999-2001)”, Serie Tecnica n°1, pp.44-48, 2001.

Ca[13] J.-F. Semblat, A.-M. Duval, "Analyser l'amplification du mouvement sismique: méthode simplifiée ou modélisation complète", 1st Albert Caquot Int. Conference, Paris, 3-5 oct. 2001.

Cp[16] J.-F. Semblat, R. Chabert, R. Paolucci, A.-M. Duval, "Fundamental frequencies of alluvial basins: estimations by various modal méthods", 10th Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Eng., Philadelphia, 10 pages, 7-10 oct. 2001.

Ca[14] J.-F. Semblat, P. Dangla, M. Kham, A.-M. Duval, "Seismic site effects in shallow and deep alluvial basins: in-depth motion and focusing effects", 10th Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Eng., Philadelphia, 7-10 oct. 2001.

Ca[15] F. Courboulex, A. Deschamps, N. Béthoux, D. Brunel, E. Calais, J. Deverchère, S. Gaffet, B. Hustedt, C. Larroque, A. Lomax, C. Maon, T. Monfret, R. Pillet, C. Sansorny, J.-F. Stéphan, J. Virieux, A.-M. Duval, J.-P. Meneroud, J.-L. Perez, S. Vidal, P. Mondielli, "Preliminary results of the SALAM (Sismologie et Alea dans les Alpes Maritimes) experiment", poster, 26th General Assembly of the European Geophysical Society, Nice, 26-30 mars 2001.

Ca[16] J.-F. Semblat, A.-M. Duval, R. Paolucci, , "Modal approaches for the estimation of seismic wave amplification", 10th Int. Conf. on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Tucson, 7-12 janv. 2001.

Ca[17] A.-M. Duval, J. Delgado, J.-P. Méneroud, S. Vidal, "GEM-GEP project in Nice (France) : a geotechnical model and site effect mapping", poster, 25th General Assembly of European Geophysical Society, Nice, 25-29 avril 2000.

Ca[18] J.-F. Semblat, A.-M. Duval, "Analysis of site effects through modal approaches", poster 25th General Assembly of European Geophysical Society, Nice, 25-29 avril 2000.

Ca[19] F. Courboulex, A.-M. Duval, A. Lomax, A. Deschamps, "Regional and local hazard investigation using a small earthquake near Nice (France)", poster, 25th General Assembly of European Geophysical Society, Nice, 25-29 avril 2000.

Cp[17] J.-P. Méneroud, A.-M. Duval, P.-Y. Bard, "Methodological study on seismic risk assessment", 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, n°1874, 8 pages, 30 janv.- 4fév. 2000.

Cp[18] J.-F. Semblat, A.-M. Duval and P. Dangla, "Analysis of seismic site effects : BEM and Modal approach vs experiments", 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, n°1257, 8 pages, 30 janv.- 4 fév. 2000.

Cp[19] N. Bouden-Romdhane, P. Mechler, A.-M. Duval, J.-P. Méneroud, S. Vidal, "Microzoning the city of Tunis using both background noise and weak motions", 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, n°343, 8 pages, 3 0 janv.- 4 fév. 2000.

Ca[20] J.-F. Semblat, R. Paolucci, A.-M. Duval, R. Chabert, "Different types of modal approaches to investigate site effects", 6th International Conf. on Seismic Zonation, Palm Springs, USA, 12-15 Nov. 2000.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Cp[20] J.-F. Semblat, P. Dangla and A.-M. Duval, "BEM analysis of seismic wave amplification in Caracas", NUMOG VII, pp275-280, 7th Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics, Graz, Balkema, sept. 1999.

Ca[21] J.-F. Semblat, A.-M. Duval, P. Dangla, J.-P. Méneroud, "Seismic waves amplification : experimental versus numerical analysis", 2nd Conf. On Earthquake Geotechnical Eng., Lisbonne, pp.211-216, Balkema, juin 1999.

Ca[22] J.-F. Semblat, A.-M. Duval, "Seismic site effects on the french riviera: analysis by the boundary element method", 4th European Conf. on Numerical Methods in Geotechnical Eng., Udine, Italy, pp.201-210, Springer, oct. 1998.

Cp[21] A.-M. Duval, S. Vidal, J.-P. Méneroud, "Relation between curves obtained from microtremor and site effect observed after Caracas, 1967 earthquake", 9 pages, 11th European Conf. on Earthquake Eng. (EAEE-AFPS), Paris, sept. 1998.

Cp[22] J.-P. Mèneroud, A.-M. Duval, P.-Y. Bard, "Elaboration of elastic response spectra for the new seismic regulation code of Monaco", 5 pages, 11th European Conf. on Earthquake Eng. (EAEE-AFPS), Paris, sept. 1998.

Cp[23] J.-P. Mèneroud, J.-P. Ivaldi, P. Guardia, A.-M. Duval, S. Vidal, "Road bridge building in seismic zone in French-Italian maritime Alps: methodology of seismic hazard definition", 5 pages, 11th European Conf. on Earthquake Eng. (EAEE-AFPS), Paris, sept. 1998.

Cp[24] N.B. Romdhane, P. Mechler, A.-M. Duval, J.-P. Mèneroud, S. Vidal, "Microzoning the city of Tunis by recording background noise", 10 pages, 11th European Conf. on Earthquake Eng. (EAEE-AFPS), Paris, sept. 1998.

Ca[23] A.-M. Duval, J.-F. Semblat, J.-P. Mèneroud, "Site effect determination in Nice, France (GEMITIS project)", 28th General Assembly of the European Geophysical Society, Nice, 24 avril 1998.

Cp[25] P.-Y. Bard, A.-M. Duval, "Reliability of the H/V technique for site effects measurement: an experimental assessment", 4 pages, 7th Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Istanbul, juil. 1997.

Cp[26] J.-P. Méneroud, A.-M. Duval, "Investigaciones de microzonificacion sismica por via experimental en Caracas", 10 pages, Conf. anniversaire des 30 ans du séisme de Caracas en juillet 1967, Caracas, Venezuela, juil. 1997.

Cp[27] A.-M. Duval, P.-Y. Bard, J.-P. Méneroud, S. Vidal, "Mapping site effect with microtremors", 5th Int. Conf. on Seismic Zonation, Nice, Vol II, pp1522-1525, oct. 1995.

Cp[28] A.-M. Duval, J. Mendoza, J.-P. Méneroud, F. Prida, F. De Santis, A. Singer, S. Vidal, "Experimental microzonation in Venezuela", Vol III, 8 pages, 5th Int. Conf. on Seismic Zonation, Nice, oct. 1995.

Cp[29] P.-Y. Bard, M. Bour, A.-M. Duval, C. Martin, J.-P. Mèneroud, P. Mouroux, C. Thibault, M. Terrier and S. Vidal, "Seismic zonation methodology on the city of Nice Progress Report", 5th Int. Conf. on Seismic Zonation, Nice, Vol III, 36 pages, oct. 1995.

Cp[30] P. Mondielli, N. Béthoux, J.-P. Mèneroud, A.-M. Duval, "The prevention of seismic risk in the Principality of Monaco", 5th Int. Conf. on Seismic Zonation, Nice, Vol I, pp841-848, oct. 1995.

Ca[24] J.-P. Méneroud, A.-M. Duval, Ch. Thibault, S. Vidal, "Microzoning methodology for big city microzonations in moderate seismicity area the example of the city of Nice", 5th Int. Conf. on Seismic Zonation, Nice, oct. 1995.

Cp[31] A. Marcellini, P.-Y. Bard, G. Iannaccone, J.-P. Méneroud, P. Mouroux, R. Romeo, F. Silvestri, A.-M. Duval, C. Martin, A. Tento, "Benevento seismic risk project II - The microzonation", 5th Int. Conf. on Seismic Zonation, Nice, Vol I, pp810-817, oct. 1995.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Cp[32] S. Nechtschein, P.-Y. Bard, J.-C. Gariel, J.-P. Méneroud, P. Dervin, M. Cushing, C. Gaubert, S. Vidal, A.-M. Duval, "A topographic effect study in the Nice region", 5th Int. Conf. on Seismic Zonation, Nice, Vol II, pp1067-1082, oct. 1995.

Ca[25] A.-M. Duval, "Microtremor can bring microzonation new strategy", (conférence invitée), Segundo Coloquio Internacional sobre "Microzonification sismica", Cumana, Venezuela, juin 1995.

Cp[33] A.-M. Duval, P.-Y. Bard, J.-P. Méneroud, S. Vidal, "Usefulness of microtremor measurements for site effect studies", 10th European Conf. on Earthquake Eng., Vienne, pp521-527, août 1994.

Ca[26] A.-M. Duval, A. Deschamps, P.-Y. Bard, G. Iannacone, R. De Franco, A. Marcellini, "Benevento (Italy) seismic microzonation: site effects determination from shots and microtremors records", XIX General Assembly of the European Geophysical Society, Grenoble, avril 1994.

Cp[34] A.-M. Duval, P. Mechler, "Evaluation of seismic site effects in a city by background noise measurements", 8th Int. Symp. on Earthquake Prognostic, Téhéran, 12 pages, sept. 1993.

2.3.2 Conférences nationales

références : Cn[nn]: article publié dans actes;
Cm[nn]: poster ou présentation orale avec résumé publié dans actes

Cn[1] E. Bertrand, A.-M. Duval and A. Saad, " Scénario de risque sismique dans une vallée alpine : La haute Tinée, Alpes Maritimes, France", 10 pages, 7ème Colloque National de Génie Parasismique (AFPS), Ecole Polytechnique, Palaiseau, 6-9 Jul. 2007.

Cn[2] H. Cadet, A.-M. Duval and E. Bertrand, "Case study of noise array measurements in soft clay at l'Ebron, Trièves, Isère, France", 10 pages, 7ème Colloque National de Génie Parasismique (AFPS), Ecole Polytechnique, Palaiseau, 6-9 Jul. 2007.

Cn[3] A.-M. Duval, "Présentation des résultats de GEM-GEP: suite", Conférence sur le Risque Sismique à Nice, sous l'égide du CGPC, METATTM, MEDD et CANCA, 7 avril 2005.

Cn[4] N. Lokmane, J.-F. Semblat, G. Bonnet, L. Driad, A.-M. Duval, " Sollicitations sismiques dues aux exploitations minières: amplifications des ondes et vibrations des structures", Journées des Sciences de l'Ingénieur 2003, Dourdan, France, 6 pages, 9-11 déc. 2003.

Cm[1] J.-L. Chatelain, B. Guillier, A.-M. Duval, équipe SESAME WP02, "Influence des conditions expérimentales de mesure du bruit de fond sismique dans l'application de la méthode H/V", 6ème Colloque National de Génie Parasismique (AFPS), Ecole Polytechnique, Palaiseau, 1-3 juil. 2003.

Cn[5] F. Dunand, P.-Y. Bard, A.-M. Duval, P. Guéguen et S. Vidal, "Périodes et amortissements des bâtiments niçois à partir d'enregistrements de bruit de fond", vol I p291-298, 6ième 6ème Colloque National de Génie Parasismique (AFPS), Ecole Polytechnique, Palaiseau, 1-3 juil. 2003.

Cn[6] E. Bertrand, G. Courrioux, B. Bourgine, M. Bour, A.-M. Duval, A. Guillen and P. Mouroux, "Modèle complet 3D-4G pour la caractérisation de l'aléa sismique à Nice", 8 pages, 6ème Colloque National de Génie Parasismique (AFPS), Ecole Polytechnique, Palaiseau, 1-3 juil. 2003

Cm[2] N.Lokmane, G.Bonnet, J.F.Semblat, L.Driad, A.M. Duval, "Influence des effondrements miniers sur les structures de surface", 6ème Colloque National de Génie Parasismique (AFPS), Ecole Polytechnique, Palaiseau, 1-3 juil. 2003.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Cn[7] A.-M. Duval, J.-P. Méneroud, S. Vidal, J.-P. Ivaldi, P. Guardia, N. Bethoux, “L’étude du risque sismique lié à un grand ouvrage: Viaduc de Tende", 10 pages cahier technique de juin 2002 de l'AFPS, journée technique AFPS/CFGI « Géologie et Risque Sismique » du 22 nov. 2001.

Cn[8] F. Courboulex, A.M. Duval, A. Lomax, A. Deschamps (2000) : "Le seisme du 1er Novembre 1999 (Alpes Maritimes, France)", Actes du congres Riviera 2000, Tectonique active et geomorphologie, 18-22 Oct. 2000, Villefranche sur Mer, revue d'Analyse Spatiale, no special, 61-66.

Cm[3] J.-F. Semblat, A.-M. Duval, "Analyse numérique et expérimentale des effets de site sismiques", 14ième Congrès Français de Mécanique, Toulouse, 30 août-3 sept 1999.

Cn[9] J.-F.Semblat, A.-M. Duval, P. Dangla, "Effets de site dans le centre de Nice : analyse numérique par éléments de frontière", 5ème Colloque National de Génie Parasismique (AFPS), ENS-Cachan, 19-21 Octobre 1999, pp.91-98.

Cn[10] J. P. Méneroud, F. Creuly, A.-M. Duval, S. Vidal, "Etude des effets de site par voie expérimentale, 3ème Colloque National de l’AFPS, Saint Rémy-lès-Chevreuses, 8 pages, mars 1993.

2.3.3 Séminaires

références Se[nn]

Se[1] " Le risque sismique : importance et évaluation des effets de site dans la définition de l’aléa." par H. Cadet, A.-M. Duval et E. Bertrand, CETE Méditerranée, Journée CNFGG,

Se[2] "Ecoute sismique des versants instables : Apports potentiels" par D. Amitrano, V. Saetta, J.R. Grasso, J.L. Got, G. Senfaute, Y. Guglielmi, A.-M. Duval, L. Effendiantz, CETE de Lyon, Journées Nationales de Géologie et Géotechnique (JNGG), oct. 2002.

Se[3] "Le microzonage sismique par la méthode H/V bruit de fond" et " Exemple de scénario sismique appliqué à la ville de Nice", par A.-M. Duval, journée consacrée au risque sismique du RéSeau Régional Risques Naturels PACA-CorSe, juin 2002.

Se[4] "Caracas, Venezuela : pointing important Seismic hazard by means of microtremor", par A.-M. Duval, Euroconferences : Control and management of major natural risk: Seismic risk, prevention, protection and management, SpeetSe Island, oct. 1997.

Se[5] "Site effects and Seismic hazard asSessment in urban environments", par P.-Y. Bard et A.-M. Duval, Segundo Seminario Latino-Americano "Volcanes, Sismos y Prevencion", Lima-Arequipa, nov. 1996.

Se[6] "Les risques sismiques : Microzonage pilote sur la ville de Nice, Evaluation des effets de site et Aléa local", par A.-M. Duval, 8ièmes Rencontres Régionales de l'Environnement, Nice, oct. 1996.

Se[7] "Experimental methods used by CETE Mediterranee (French Planning Ministry) to determine sismological site effect", par A.-M. Duval, conférence sur invitation de Shimizu-Corporation, Tokyo, déc. 1995.

Se[8] "Experimental results obtained with "H/V ratio" on microtremor to determine soil resonance frequency”, par A.-M. Duval, Séminaire au centre “Earthquake Ground Motion Disaster Prevention ReSearch Institut”, Univ. de Kyoto, nov. 1995.

Se[9] "Evaluation of Seismic site effects in a city by background noiSe measurements", par A.-M. Duval et P. Mechler, séminaire à l'Ecole Nationale d'Ingénieur de Tunis (ENIT), oct. 1994.

Se[10] "Etudes des effets de site à Benevento (Italie)", par A.-M. Duval, Journées de la Commission Nationale Française de Géophysique et Géodésie (CNFGG), Institut de Physique du Globe, Paris, déc. 1993.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

2.3.4 Manifestations du Réseau Scientifique du Ministère de l'Equipement

références Ma[nn]

Ma[1] "La vulnérabilité d'itinéraires routiers", Journées CILPC, Lyon, D. Criado, A.-M. Duval, mai 2006.

Ma[2] "Risques sismiques: aléa et vulnérabilité à différentes échelles", Journée LCPC organisée par J.-F Semblat, P.-Y. Bard et A.-M. Duval. Présentation des activités de l'Opération de recherche « Risque sismique », volume de synthèse (135 pages), nov. 2003.

Ma[3] "Le microzonage sismique par la méthode H/V bruit de fond - Détermination des effets de site", par A.-M. Duval et P. Guéguen, 4ièmes Journées du Réseau Scientifique et Technique, organisées par la DRAST, Rouen, 5-6 sept. 2002.

Ma[4] "Séisme virtuel dans le centre de Nice, sismologie et modélisation numérique", par A.-M. Duval et J.-F. Semblat, Journées "1+1>2 partenariat ou sous traitance", Nantes LCPC, déc. 1997.

Ma[5] "Amplification d'ondes sismiques dans une vallée", par A.-M. Duval et J.-F. Semblat, Journées Dynamiques CESAR-LCPC, Paris LCPC, oct. 1997.

Ma[6] "Utilisation du bruit de fond en sismologie appliquée - Ouverture vers le génie civil", par A.-M. Duval, Journées de reconnaissance géophysiques et géotechniques, LCPC-LRPC, Nantes, France, oct. 1996.

2.4 Participation à des projets de recherche

Les actions de recherche conduites dans le cadre des thèmes et opérations de recherche du LCPC ne figurent pas dans la liste des projets, de même que toutes les études conduites dans un cadre strictement commercial.

- Projet **Microzonages sismiques de la côte orientale du lac de Maracaïbo (Vénézuela)**

El Vigia et Lagunillas

Date: 1992-1993
Contexte : Problème de subsidence de la côte orientale du lac de Maracaïbo (extraction pétrolière) et stabilité de la digue.
Partenaires : Projet réalisé au Vénézuela dans le cadre d'accord de coopération et transfert de technologie entre la France et le Vénézuela, organismes impliqués: CETE Méditerranée / FUNVISIS (Fundacion Venezolana de Investigaciones sismologicas) / LCPC / INTEVEP
Contribution : réalisation étude: campagne de terrain (6 mois), traitement des données, analyse, rapport.

- Projet européen **Seismic risk assessment in Benevento** (Italie)

European seismic test site

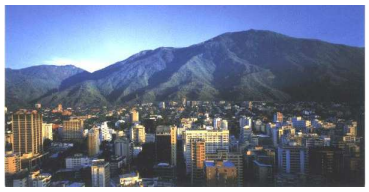
Date: 1990-1993
Partenaires : colaboration CETE Méditerranée / LCPC / CNR Milan / CNRS Sophia-Antipolis.
Contribution: traitement du bruit de fond et de la campagne de tirs sismiques, analyse, rapport.

© 2008 Tous droits réservés.

- Projet **GEMITIS Nice** *du grec "gê" (terre) et du latin "mitigare" (tempéré, doux) …pour exprimer l'idée d'une "terre civilisée"!*

Programme : Décennie Internationale de la Prévention des Catastrophes Naturelles décrétée par l'Assemblée Générale des Nations Unies. Concours financier: ministères de l'environnement (pour BRGM) et de l'équipement (pour CETE Méditerranée).
Date: 1993 - 1998
Résumé: Le projet GEMITIS a été élaboré pour répondre aux objectifs fixés par la DIPCN. Il porte sur la mise au point d'une méthologie de maîtrise des risques naturels s'inscrivant dans le développement urbain et transposable à d'autres pays de la région Méditerranée. L'objectif principal était d'élaborer un processus abordant l'ensemble des dimensions de la problématique (techniques, humaines, économiques etc) pour aboutir à une appropriation active de la prévention du risque par les responsables locaux. Les villes de Nice et de Pointe à Pitre ont été choisies comme villes pilotes pour mettre en place un programme de "contrôle" du risque sismique. La première phase représente un travail d'analyse du risque (microzonage, vulnérabilité …). Les deux autres phases étaient tournées vers l'action avec une participation et même une appropriation de la problématique par les acteurs locaux.
Participants: .. BRGM, CETE Méditerranée (phase 1). *Pilotage* : BRGM
Contribution personnelle: participation aux études d'aléa sur Nice et Pointe à Pitre

- Projet Microzonage de **Caracas** (Vénézuela)



Date: 1995
Partenaires : accord de coopération et transfert de technonologie CETE Méditerranée / FUNVISIS (Fundacion Venezolana de Investigaciones sismologicas) / LCPC
Contribution : Campagnes de mesures de bruit de fond, traitement, analyse, rapport.

- Projet Etude stokage pétrolier Las Cantinas, Venezuela

Date: 1995
Partenaires : LCPC / MARAVEN
Contribution : Campagnes de mesures séismes et de bruit de fond, traitement, analyse, rapport.

Projet **GEMITIS Antilles - Microzonage de Pointe à Pitre**

Programme : idem GEMITIS Nice
Date: 1998
Résumé: idem GEMITIS Nice. La ville de Pointe à Pitre a été choisie comme ville pilote pour les Antilles
Participants: BRGM, LCPC, CETE Méditerranée (microzonage).
Contribution personnelle: étude aléa local, traitement données séismes et bruit

- Projet **GEM-GEP**

Programme : GEM-GEP a été lancé en 1997 pour poursuivre les travaux de GEMITIS sur l'initiative du Groupe d'Etudes et de Propositions Parasismiques du Conseil Général des Ponts et Chaussées et sur financement des ministères de l'équipement, de l'écologie et de la municipalité niçoise.
Date: 1997 - 2005 (conférence finale en mars 2005)
Site : http://www.equipement.gouv.fr/article.php3?id_article=795

© 2008 Tous droits réservés.

Résumé: GEM-GEP visait à établir les processus nécessaires pour évaluer les dommages provoqués par un séisme en site urbain. La mise au point de méthodes de caractérisation des aléas, des enjeux et de leur vulnérabilité a été réalisée sur la ville pilote de Nice. La première phase du projet a été consacrée à la poursuite des études d'aléa démarrées dans GEMITIS. Plusieurs séismes susceptibles de provoquer des mouvements forts sur la côte d'azur ont été proposés. Différentes techniques de microzonage ont été testées pour déterminer l'aléa local. Concernant la vulnérabilité, des techniques de différents niveaux permettant d'approcher de manière plus ou moins approfondie (et économique) la vulnérabilité du bâti existant ont été testées. Des études statistiques ont également été réalisées par quartier, puis croisées avec les données d'aléa pour produire des cartes de dommages. Conformément aux recommandations du comité d'orientation et de validation de GEM-GEP (constitué de représentants de l'Etat et des collectivités territoriales), ce projet a débouché sur une appropriation des produits d'étude par les acteurs locaux.
Participants*:* CETE Méditerranée, ERA6, LGIT, LCPC. ***Pilotage technique***: ERA6 / LCPC
Contribution personnelle: pilotage / réalisation d'études.

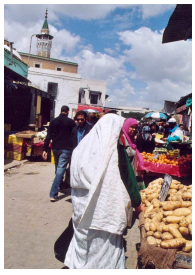
- Projet Etude des effets de site à **Kozani** (Grèce)

Date: 1997
Partenaires : Projet réalisé en Grèce le cadre d'accord de coopération CETE Méditerranée / Université de Thessalonique / LCPC.
Contribution : traitement des données séisme, analyse, rapport.

- Projet **EURO SEIS TEST** (Volvi, Grèce)

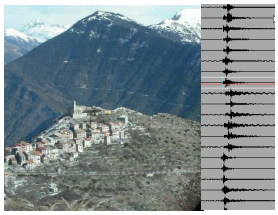
Date : 1997
Programme : UE contract EV5V_CT.93.0281
Partenaires de l'étude : LCPC / CETE Méditerranée/ Université de Thessalonique
Résumé: EUROSEIS is a large physical laboratory (Test Site), only 30 km distant from Thessaloniki, in northern Greece. The creation of a European database of the EURO-SEISTEST recordings and surveys, offers the opportunity to earth scientists, seismologists and engineers to test and calibrate their numerical tools and to improve their experiences and knowledge.
Contribution : participation aux traitements de la campagne d'enregistrements de 1997 (bruit de fond, H/V, réseau, tirs et séismes).

- Projet **Microzonage de Tunis** (Tunisie)



Date: 1997-1998
Partenaires: Projet réalisé dans le cadre d'accord de coopération LCPC/ CETE Méditerranée / Ecole Nationale d'Ingénieur de Tunis.
Contribution : microzonage, campagne de terrain, traitement des données (séismes et bruit de fond), analyse, rapport.

- Projet **SALAM**
  " Sismologie et ALéa dans les Alpes Maritimes"



Date: 1999-2000
Contrat: Projet initié dans la perspective du GIS MEDRINA (mystérieusement disparu très jeune)
Partenaires: UMR GéoAzur / CETE Méditerranée
Résumé: L'objectif était d'enregistrer la sismicité d'une petite zone de 20X20km avec un réseau très dense de 20 capteurs afin de réduire l'incertitude sur la localisation des séismes. Les résultats ont

© 2008 Tous droits réservés.

largement dépassé cet objectif puisqu'au cours des 6 mois d'enregistrement une crise sismique s'est déclenchée à l'intérieur de la zone étudiée au nord de Nice (600 séismes). Un nouveau réseau de faille au nord de Nice (Blausasc) a été mis en évidence.

Contribution : Responsable de projet pour la partie CETE

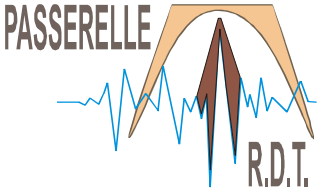
- Projet **SESAME**
  " Site Effect Assessment using Ambient Excitations "

Programme : UE 5ième PCRD n°EVG1-CT-2000-00026
Date du contrat : mai 2001 - oct 2004
Site : http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/

Résumé : Le projet s'inscrivait dans le domaine de la gestion du risque sismique par la définition des effets de site, spécialement en milieu urbain. Il visait à éclaircir les conditions de mise en œuvre et les limites d'interprétation des méthodes d'investigation basées sur le bruit de fond sismique. Ces méthodes très rapides et économiques sont, depuis les années 2000, mises en oeuvre par un public de plus en plus large sans que leurs conditions d'utilisation ne soient reconnues unanimement par la communauté scientifique. Le but était donc de clarifier les possibilités concrètes de ces méthodes pour produire des informations utiles, directes ou indirectes sur les effets de site. Les deux techniques concernées étaient « H/V bruit de fond » et la méthode dite « bruit de fond en réseau » consistant à obtenir une courbe de dispersion des ondes de surface et à l'inverser pour obtenir un profil de vitesse des ondes de cisaillement. Le travail incluait une partie théorique et numérique pour mieux comprendre la nature du bruit sismique et pour développer des outils numériques capables de simuler du bruit sismique dans des environnements complexes. Il incluait également des approches expérimentales avec traitements de données réelles pour établir de manière consensuelle des bases communes de mise en oeuvre de ces méthodes. Ces travaux incluaient la stabilité et le fondement physique des résultats pour les deux techniques. Tous les résultats théoriques, numériques et analytiques ont été utilisés pour produire ensuite un guide de mise en œuvre de la méthode «H/V bruit de fond » et des recommandations pratiques d'utilisation des méthodes en réseau. Pour les deux méthodes, des logiciels ont également été développées et mis à disposition.

Participants*:* voir liste de 14 équipes européennes page 39 ***Pilotage*** : P. -Y. Bard (LCPC/LGIT)
Contribution personnelle: responsable du WP12, participation à 3 WP.

- Projet **PASSERELLE**
  "Un lien entre la recherche et la gestion du risque sismique et gravitaire dans les Alpes Maritimes"



Programme « Risques Décisions Territoire » MEDD n°CV040000-7 2
Date du contrat : juil 2004 - déc 2006
Site : http://www.rdtrisques.org/projets/passerelle.

Résumé: Le projet PASSERELLE avait pour but de créer dans le département des Alpes Maritimes un lien entre chercheurs et services opérationnels dans le domaine du risque sismique et gravitaire. Le constat de départ est que ces deux milieux (recherche et gestion du risque) interagissent trop peu couramment au niveau local pour qu'une synergie efficace soit rapidement mise en place en cas de crise. PASSERELLE visait donc à mettre en œuvre une base d'échanges concrets durant 2 ans. Plusieurs actions techniques reflétant différents thèmes de recherche ont été planifiés autour d'une zone cible du nord de Nice par les équipes de chercheurs du CETE Méditerranée et de l'UMR Géo-Azur. Durant tout la durée du projet, ces équipes ont régulièrement présenté l'avancement et l'orientation donnés à ces actions aux responsables des services publics en charge de la gestion du risque. Ces présentations, suivies de débats ouverts ont permis de dessiner l'état des connaissances dans le domaine de l'aléa sismique et gravitaire, ainsi qu'une meilleure identification des objets d'étude des organismes de recherche. Symétriquement ces échanges ont aidé les chercheurs participants à mieux comprendre les moyens mis en œuvre pour élaborer et appliquer une politique de gestion des risques. Ce projet a servi de support de lancement par la Communauté d'Agglomération Nice Côte-d'Azur à une plateforme plus pérenne d'interactions entre recherche et politique de gestion des risques: le COSRIS (Comité d'Orientation et de suivi du Risque sismique) dans le cadre du Plan National Séisme.

Participants*:* UMR Géosciences Azur et le CETE Méditerranée, ERA6 (porteurs du projet) /// DDE06 (cellule Risques Naturels) /// Centre Opérationnel Départemental Préfecture des Alpes Maritimes ///

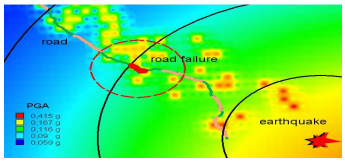
© 2008 Tous droits réservés.

Mairie de Nice (service Risques Urbains) /// Communauté de Communes des Côteaux d'Azur /// Service Environnement de la CANCA (Communauté d'Agglomération Nice Côte d'Azur)
Contribution personnelle = Pilotage :: F. Courboulex (CNRS) et A.-M. Duval (CETE M.)

- Projet **FORESIGHT**
  " Frequent Observation-driven Realistic Evaluation and Simulation of Interacting Geophysical Hazard Triggers "

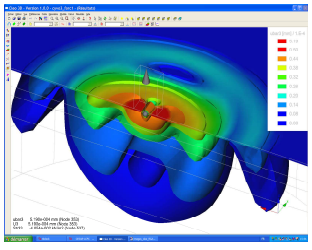
Programme : UE 6ième PCRD (STREP) n°511139
Date du contrat : septembre 2004 - septembre 2006
Site : http://www.acri-st.fr/foresight/
Résumé: FORESIGHT avait pour objectif de mieux comprendre les interactions (mécanismes couplés) entre les tremblements de terre, les volcans, les glissements de terrain et les tsunamis. Il visait a contribuer à l'harmonisation des méthodes d'investigation et de protection au niveau européen, ainsi qu'à la mise en place de nouveaux systèmes de gestion des risques à l'échelle européenne avec la participation de la protection civile dans le projet. Le travail scientifique a été réalisé sur la base de 4 chantiers naturels : L'Islande, les Açores, les Alpes (Haute vallée de la Tinée) et la Turquie. Il a souligné le couplage mécanique et les interactions temporelles entre les processus géophysiques.
Participants*:* voir liste des 15 équipes européennes page 39. ***pilotage*** : CNRS Toulouse + AcriST
Contribution personnelle: contractor, responsable de WP

- Projet **SISROUTE**
  " Scénario de crise sismique sur itinéraire routier "



Contrat *:* Commande SETRA / DR
Date: 2003-2007
Résumé: SISROUTE est une méthodologie d'étude qui produit des scénarios de crise sismique sur un itinéraire routier. Sa mise au point a abouti à des procédures d'études et à un outil informatique. SISROUTE prend en compte les différents types d'aléas induits par un séisme, ainsi que les différents types de tronçons de route (chaussée, ouvrage d'art, mur de soutènement). Le principe retenu pour sa mise en œuvre sur un itinéraire consiste d'abord à réaliser des études sommaires dont le but est de délimiter des tronçons homogènes et d'affecter à chacun des paramètres géotechniques prédéfinis. Cette caractérisation se traduit par une quantification forfaitaire de chaque aléa (amplification possible du mouvement, valeurs d'accélérations "seuil" susceptibles de déclencher un phénomène induit) et de la vulnérabilité correspondante. Ces données sont ensuite intégrées dans un système d'information géographique qui permet de simuler l'effet d'un séisme quelconque ou de prendre en compte les actions sismiques réglementaires. L'émulation d'un scénario produit une combinaison des valeurs d'aléa et de vulnérabilité qui se traduit par un risque plus ou moins élevé de coupure de la route. La méthodologie d'étude et les outils informatiques sont en phase de test sur des itinéraires stratégiques des Alpes et des Pyrénées. SISROUTE pourrait à terme être appliqué à l'ensemble du réseau structurant d'une région.
Participants*:* CETE Méditerranée (Laboratoire de Nice: ERA6 + service Géotechnique; Département Ouvrage d'Art; Département Informatique), SETRA, CETE Sud Ouest (Laboratoire de Toulouse).
Contribution personnelle: pilotage scientifique conception et test.

- Projet **QSHA** " Quantitative seismic Hazard Assessment"
  Estimation quantitative de l'aléa sismique:
  Comparaison des différentes approches numériques et empiriques,
  Développements nouveaux et analyse critique



Programme : AO Catastrophes Tellurique ANR-05-CATT-011
Date du contrat : 2006-2008
Site : http://qsha.unice.fr

© 2008 Tous droits réservés.

Résumé:. QSHA est un projet qui vise à améliorer la simulation numérique des mouvements provoqués par un séisme en surface. La première étape consiste à caractériser le sous sol aux échelles crustale et locale par la géométrie des interfaces et la rhéologie des matériaux. Plusieurs zones d'étude sont envisagées autour de Grenoble, Nice, Naples et Alger. La construction de structures 3D et la définition des séismes attendus en incluant les incertitudes de nos connaissances de ces zones seront orientés vers des objectifs de simulations de la propagation des ondes. Les méthodes numériques actualisées fondées sur les équations intégrales, les méthodes d'éléments finis (incluant la méthode des éléments spectraux), les méthodes de différences finies, les méthodes des volumes finis et les méthodes des éléments discrets seront comparées autour de cas tests. Ces simulations permettront d'affiner les estimations des accélérations du sol en intégrant les approches probabilistes, déterministes et en s'aidant des données via des approches empiriques pour des zones spécifiques.
Participants*:* .UMR Geo-Azur + INRIA/ENPC + UMR CEREGE /// UMR LGIT Grenoble + UBO /// BRGM - ARN /// CEA-DASE /// LCPC / IRSN / CETE Méditerranée
Pilotage : Prof. J. Virieux (UMR GéoAzur / LGIT)
Contribution personnelle: responsable de WP1-3

- Projet **Microzonage sismique de Beyrouth (Liban)**

Date: 2006-2009
Partenaires : Convention de coopération et d'échanges en cours de montage entre le Conseil National de la Recherche Scientifique du Liban/ Institut de Physique du Globe de Paris / CETE Méditerranée / UMR LGIT Grenoble.
Contribution : Première étude microzonage et mission terrain juin 2006. Encadrement travaux doctorante.

- Projet **IMAGINE**

Programme AO Gis RAP 2007
Date du contrat : 2007-2008
Résumé: Ce projet vise améliorer la modélisation des effets de site dans l'estimation du mouvement sismique. Il est composé de deux parties. La première propose une application de la méthode « quarter wavelength » pour la caractérisation du sol sous les stations accélérométriques RAP, afin d'améliorer la prise en compte des effets de site locaux dans la prédiction du mouvement sismique. La deuxième partie propose une estimation conjointe de l'aléa sismique probabiliste site-spécifique et des effets de site.
Participants*: IRSN / BRGM / IRD / CETE Méditerranéee*. ***Pilotage*** : F. Bonilla (IRSN)
Contribution personnelle: participation aux travaux du groupe.

2.5 Collaboration et partenariats

2.5.1 Opérations de recherche du LCPC

Les recherches sur le risque sismique au LCPC sont coordonnées au sein d'un programme de recherche spécifique (dit "opération") regroupant chercheurs du LCPC, des Laboratoires mixtes LCPC-ENPC et des Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées. D'autres partenaires internes au ministère de l'équipement participent également à ces activités (ENTPE, SETRA).

Entre 2002 et 2006, j'ai animé avec Jean-françois Semblat (LCPC) l'opération de recherche "Risques sismiques" qui s'articulait autour de six axes de recherches :
- *aléa régional* : néotectonique, comportement des failles, mouvements forts,
- *aléa local* : effets de site, interaction site-ville,

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

- *fondations* : caractérisation dynamique des sols, liquéfaction, interaction sols-structure,
- *dynamique des structures* : approches statistiques, stationnaires et transitoires,
- *vulnérabilité* : prévention, cartographie,
- *vibrations induites* par les mines et carrières.

En 2006, nous avons proposé une nouvelle opération "Aléa et risque sismique". Cette opération est très complémentaire de l'opération "Ouvrage en site sismique", conduite par le LCPC Nantes pour avancer sur les aspects de géotechnique sismique (notamment sur la liquéfaction et les interactions sols - structure). L'Opération "Aléa et Risques sismiques" est structurée autour de 3 thèmes:

- *Aléa* : objectif :
  - Améliorer la connaissance des phénomènes liés à l'aléa sismique depuis la source jusqu'à la surface : aléa régional, effets de site (amplification 3D, non-linéarités), l'interaction site-ville…
  - Avancées des techniques de modélisation et de détermination des phénomènes : expérimentales, numériques et analogiques (avec le récent simulateur de séismes de la centrifugeuse du LCPC Nantes).
- *Vulnérabilité* : objectif :
  - Mettre au point des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des structures,
  - Améliorer le lien entre aléa et vulnérabilité dans les scénarios de crise sismique.
- *Scénario* : objectifs :
  - Permettre la cartographie du risque sismique (scénario, PPR sismique) à différentes échelles.

2.5.2 Autres collaborations

- Collaborations régulières en France :
  - BRGM
  - GEOTER International
  - UMR LGIT, UMR Géo-Azur, UMR CEREGE, Ecole des Mines d'Ales …
  - Dans le cadre d'échanges de données: GIS RAP, BCSF, RENASS, CSEM, Service Environnement de Monaco (contrat d'assistance technique et scientifique 2001-2005)
- Dans le cadre du projet européen SESAME (2001-2004) :
  - UJFG.LGIT Université Joseph Fourier (UMR) (Grenoble, France)
  - CNRS.LGIT Centre National de la Recherche Scientifique (Grenoble, France)
  - LCPC Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Paris, France)
  - RICSA Résonance Ingénieurs-Conseils SA (Genève, Suisse)
  - UPOTS.GEO Université de Potsdam (Potsdam, Allemagne)
  - ULGG.DG0.GIH Université de Liège (Liège, Belgique)
  - UIB.ISI Université de Bergen (Bergen, Norvège)
  - ETH.GEOP.SSS Ecole Polytechnique de Zürich (Zürich, Suisse)
  - IESEE Inst. de Sismologie de l'Ing. et de Génie Parasismique (Thessalonique, Grèce)
  - ICTE.IGI Institut de la Terre et de l'Espace (Lisbonne, Portugal)
  - INGV Institut National de Géophysique et de Volcanologie (Rome, Italie)
  - IGSAS.SD Institut de Géophysique (Bratislava, Rep. Slovaque)
  - CNR.GSAQ Centre National de la Recherche (Milan, Italie)
- Dans le cadre du projet européen Foresight (2005-2006):
  - CNRS Dynamique Terrestre et Planétaire CNRS.DTP France (coordinateur)
  - ACRI Sciences de la Terre ACRI-ST France (coordinateur)
  - Department of Earth Sciences University of CambridgeUCAM.DES UK
  - Sólveig Thorvaldsdóttir Ph. person Iceland
  - Iceland Geosurvey ISOR Iceland
  - National Commisioner of the Icelandic Police CPS NCIP-CPS Iceland
  - Nordic Volcanological Institute NVI Iceland
  - Icelandic Meteorological Office IMOR Iceland
  - Science Institute, University of Iceland SIUI Iceland
  - Centre of Volcanology of the University of Azores CVUA Azores
  - Secretaria Regional da Habitacao e Equipamentos/SRPCBA SRHE/SRPCBA Azores
  - Euro-Med. Network for Info. and Training in Risk Management REMIFOR France
  - Earth and Marine Sciences Research Institute TUBITAK Turkey
  - Istanbul Metropolitan Municipality IBB Turkey

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

- Dans le cadre du projet ANR QSHA (2006-2008): LCPC, BRGM, CEA -DASE, UMR Géo-Azur, UMR LGIT, IRSN, UMR CEREGE.
- Dans le cadre du projet RAP IMAGINE: IRSN, IRD, BRGM
- Dans le cadre de contrat de collaborations spécifiques:
  - Funvisis (Vénézuéla, 1995)
  - ENIT (Tunisie, 1998)
  - CNRSL (Liban, 2006).
- A ces contacts scientifiques s'ajoutent les liens pour la partie "étude" de mon activité avec les autres départements du CETE Méditerranée, avec d'autres CETE (en tant que co-traitant), avec les DDE, DRIRE, DRIREN ainsi que les Directions centrales des Ministères (stratégie, commande directe).

2.5.3 Séjours à l'étranger ou missions sur le terrain

- Nombreuses opérations de terrains en France depuis 1990.
- Vénézuéla: 3 mois de terrain en 1992 à Maracaibo et à El Vigia (microzonage, séisme) et 1995 à Caracas (bruit de fond la nuit dans Caracas, séismes à Las Cantinas le jour).
- Japon: 3 mois à Kyoto et Tokyo (visite scientifique aux centres de recherche sur le risque sismique Projet Franco-Japonais de prédiction des mouvements forts), à Kobé (expérimentation) en 1996.
- Tunis, Tunisie, 3 jours en 1998 (coop. technique, expérimentation)
- Ateliers de travail en Norvège (2001), Allemagne (2002), Italie (2002) et Slovaquie (2003) pour le projet scientifique Européen SESAME
- Visite des installations du Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), Berkeley (Californie, US) en 2004.
- Participation à l'exercice de crise sismique en situation réelle sur l'île de San-Miguel aux Açores dans le cadre du projet FORESIGHT (juin 2005).
- Ateliers de travail du projet européen FORESIGHT
- Mission post-sismique en Guadeloupe (Fev 2005)
- Beyrouth, Liban: collaboration LGIT/CNRSL/ERA06: microzonage de Beyrouth (thèse Marleine Brax en cours); campagne de mesure de bruit de fond du 1 au 8 juillet 2006. Choix des sites et installation de notre parc d'enregistreurs pour mesure de la sismicité durant plusieurs mois

2.6 Animation scientifique

2.6.1 Groupes d'experts

- GEM-GEP : projet de scénario de crise sismique sur Nice, piloté par le LCPC et l'ERA06, initié par le Groupe d'Etudes et de Propositions Para-sismiques du Conseil Général des Ponts et Chaussées. Participation au Comité d'Orientation et de Validation et au Comité de Communication (2001-2005).
- Conseil Scientifique du GIS CURARE (Centre Universitaire de Réflexion pour une agence des risques environnementaux) depuis 2005.
- Réseau Régional Risques Naturels PACA Corse depuis 1999.
- Etablissement du Plan Communal de Sauvegarde "Séisme" de la ville de Nice (2005-2007).
- Comité de pilotage SDRS (Scénario départemental de risque sismique) des Bouches du Rhône (2005-2007).
- MIRNAT 06 (Mission Interministérielle sur les Risques NATurels)
- Réseau Régional des Risques (club Risque PACA)

2.6.2 Affiliations

- AFPS (Association Francaise du Génie Parasismique).
- EUG (European Geosciences Union).
- AGU (American Geophysical Union).

2.6.3 Participation à l'organisation de séminaires et conférences

- Journée « Risques sismiques » du LCPC, 28 septembre 2007,

© 2008 Tous droits réservés.

- Séminaire de restitution des résultats du projet PASSERELLE avec les scientifiques et les services publics des Alpes Maritimes en octobre 2006,
- Conférence GEM-GEP avec le CGPC et la CANCA, avril 2005,
- Journée LCPC: "Risques sismiques: aléa et vulnérabilité à différentes échelles", le 21 novembre 2003,
- Journées de formation du Réseau des Ponts et Chaussées « la prise en compte de l'aléa sismique dans les études géotechniques » du 16 au 18 mars 1999,
- Conférence internationale sur le microzonage à Nice: participation aux activités du comité local d'organisation en 1995.

2.6.4 Groupes de travail.

- Groupes de travail de l'Association Française de Génie Parasismique:
- GT "Microzonage" (2000-2002).
- GT "Mouvement sismique pour l'Ingénieur" (1997-2004).
- Comité d'Evaluation des Plans de Prévention des Risques Sismiques, début en 2007.
- Groupe de Travail du GIS-RAP (Reseau Accéléromètrique Permanent) "Caractérisation géotechnique des sites", depuis 2005.
- Groupe de travail "Risques Naturels" du pôle de compétitivité "Gestion des risques et vulnérabilité des territoires", 2005.
- Groupe de travail du SETRA :"Vulnérabilité et renforcement au séisme des ponts existants": responsable du sous-groupe "Aléas" (2006-2008).
- Groupe de travail COSRIS (Comité d'Orientation et de suivi du Risque sismique) mis en place par la CANCA (Communauté d'Agglomération Nice Côte d'Azur)", début en 2008.
- Groupe de Travail "Impact des risques naturels sur les installations industrielles" animé par la DRIRE-PACA, à partir de 2007.
- Membre élu du Comité d'évaluation des chercheurs du Ministère de l'Equipement (2003-2007).

2.6.5 Rôle dans l'organisation de la recherche au LCPC

- Depuis 2002 : Responsable de l'ERA06 depuis 2002
- 1997-2000 : Responsable de l'axe "Aléa local" dans le thème Géo36
- 2001-2005 : Responsable avec J.-F. Semblat (LCPC) de l'opération 11E031 « Risque sismique »
- 2006-2009 : Responsable avec J.-F. Semblat (LCPC) de l'opération 11M064 « Aléa et Risque sismique »
- 2006 : Groupe de Travail "Organisation de la recherche au LCPC "

2.7 Actions de formation

- Journées de formations du Réseau des Ponts et Chaussées « la prise en compte de l'aléa sismique dans les études géotechniques » du 16 au 18 mars 1999. Co-organisatrice des journées, Intervention sur 6 sujets.
- Cours d'introduction à la sismologie de l'ingénieur à l'Université Nice Sophia-Antipolis :
  - Master professionnel : Aménagement et Géo-ingénierie (MAG)
  - Master recherche : Dynamique des Systèmes Géologiques et Aléa (DGSA)

2.7.1 Encadrement de travaux de thèse

T[1] **Héloise Cadet**, Doctorante LCPC/ERA/UJF. Directeur de thèse : P.-Y. Bard (LGIT). Conseillère d'étude: A.-M. Duval. Cette thèse s'est déroulée d'oct. 2004 à oct. 2007 au sein de l'ERA06 à Nice. Sujet: *"Utilisation combinée des méthodes fondées sur le bruit de fond dans le cadre du microzonage sismique".*Thèse soutenue le 31 octobre 2007 à Grenoble.

T[2] **Marleine Brax**, Doctorante CNRS du Liban/ LGIT Grenoble. Directeur de thèse : P.-Y. Bard (LGIT). Conseil d'étude: A. Sursock (CNRSL), M. Elie Rahhal (USJ Beyrouth), A.-M. Duval et E. Bertrand. Cette thèse se déroule d'oct. 2006 à oct. 2009 dans le cadre d'un accord de

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

coopération CETE Méditerranée/ CNRS/ LGIT /IPGP Sujet: *"Détermination de l'aléa sismique à Beyrouth".*

T[3] **Aiham Saad**, Doctorant Univ. Nice -Sophia Antipolis (boursier du gouvernement syrien). Directeur de thèse: J.-F. Semblat (LCPC). Conseillère d'étude: A.-M. Duval. Cette thèse se déroule d'oct. 2006 à oct. 2009 au sein de l'ERA06. Sujet: *" Prise en compte des effets de site topographiques dans les microzonages sismiques: approches expérimentales et numériques.".*

T[4] **Emeline Maufroy**, Doctorant Univ. Nice -Sophia Antipolis.. Directrice de thèse : A. Deschamps (UMR Géosciences Azur)s. Conseillers d'étude: S Gaffet et A.-M. Duval. Cette thèse se déroule d'oct. 2006 à oct. 2009 à GA et dans l'ERA06, LR de Nice. Sujet: *"Comprendre et modéliser les effets de site topographiques, Application à la région PACA".*

T[5] **Philippe Mondielli**, thèse "Contribution à la connaissance de l'aléa sismique en Principauté de Monaco", thèse de doctorat de l'Université Nice-Sophia-Antipolis, 230p, 2005. Ce travail de recherche a fait l'objet d'une convention entre le Gouvernement de Monaco et l'ERA.

2.7.2 Encadrement de personnels temporaires

Stages sous convention niveau « Master »

S[1] **Aiham Saad,** stage de Master II recherche Génie Civil, Ecole Polytechnique Universitaire de Lille 1, du 1 mars 2006 au 10 juillet 2006. sujet: *"Aléa et scénario de crise sismique dans la vallée de la Tinée*"

S[2] **Julie Régnier,** stage de fin d'étude de l'École Nationale des Travaux Publics de l'Etat, du 1 avril au 30 juin 2006; sujet: "*Estimation des études à mener pour établir le Plan de Prévention des risques naturels sismiques à Nice*".

S[3] **Philippe Langlaude,** stage de Maîtrise des Sciences et Techniques Géosciences et Géotechniques, Univ. Nice Sophia-Antipolis, du 1 avril au 30 juin 2006, sujet: *"Mise en place d'outils de traitement sismologique et traitement des séismes enregistrés dans la vallée du Var"*

S[4] **Yves Bertrand,** stage de Maîtrise des Sciences et Techniques Géosciences et Géotechniques, Univ. Nice Sophia-Antipolis, du 1 avril au 30 juin 2006, sujet: *" Détermination de l'aléa sismique au droit de plusieurs sites dans les Pyrénées (Projets d'Ouvrages d'Art)."*

S[5] **Camille Renou** (DESS "Risques Géologiques, Imagerie de Surface et de Subsurface, Cartographie", Univ. Montpellier II), stage d'avril à septembre 2005, sujet: *"mise au point méthodologie de scénario de crise sismique sur des itinéraires routiers pilotes"*.

Stages sous convention « autres niveaux »

S[6] **Catherine Gourdin,** stage de Licence III (Sc Terre) Univ. Nice Sophia-Antipolis du 17 avril au 12 mai 2006, sujet: "*Aide à la préparation d'un projet de recherche sur l'effet du relief sur les dégâts du séisme de Lambesc 1909*"

S[7] **Thomas Mary** (2^{ième} année de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Vaux en Velin); stage de juin à septembre 2005, sujet: "*Prise en compte des mouvements de terrain sous séisme: Assistance à la définition du contenu des études techniques préalables aux Plans de Prévention des Risques Sismiques*".

S[8] **Aurélia Giandelli** (Licence Sciences de la Terre, UJF Grenoble) stage en juillet 2004, sujet : *"Analyse sélective de bases de données accélérométriques européennes et japonaises".*

S[9] **Elise Lange-Bertaux** (2^{ième} année Ecole d'ingénieurs en Génie des Système Industriels, la Rochelle) stage de juin à juillet 2002, sujet: *"participation au groupe de travail WP02 du projet européen SESAME".*

S[10] **Delphine Bejot**, (2^{ième} année MST "Géosciences et Géotechniques", UNSA), stage d'avril à juin 2001, sujet : *"Analyse spectrale du bruit de fond sismique dans des bâtiments".*

S[11] **Olivier Sebe**. (3^{ième} année Ecole d'Ingénieur : Ecole et Observatoire de Physique du Globe de Strasbourg), participation à l'encadrement du stage de fin d'étude pour la partie méthodologique et traitement de données réalisé à Nice d'avril à juin 1998, sujet: *"Evaluation des effets de site à l'échelle cantonale : contribution méthodologique et application aux cantons de Huningue et Sierentz"*.

© 2008 Tous droits réservés.

S[12] **Emmanuel Phelut** (1ière année IUT Génie Civil, la Rochelle), stage avril 1996, sujet: *« Analyse de la réponse de la station de référence à Nice ».*

S[13] **Anne Bergère** (2ième année Ecole d'Ingénieur : Ecole et Observatoire de Physique du globe de Strasbourg), stage co-encadré d'août à septembre 1995, sujet: *"Etude sur le bruit de fond sismique de Caille (06)"*.

S[14] **Jean-Marc Verdier** (2ième année IST Grenoble), participation à l'encadrement du stage de fin d'étude de juillet à septembre 1993, sujet: *"Etude de l'activité nano-sismique du versant de la Clapière"*.

Vacations

S[15] **Laetitia Mozziconacci** (Maîtrise des Sciences de la Terre, UNSA) vacations juillet 2004, sujet: *"Traitements sismologiques sur les données de la base ATACAM".*

S[16] **Camille Renou** (2ième année MST "Géosciences et Géotechniques", UNSA), vacations en juillet 2004, sujet: *"Risque sismique sur itinéraire routier, comparaison des possibilités de différents logiciels, définition de l'architecture du projet, cahier des charges"*.

S[17] **Nicolas Fiorentini** (DESS Informatique Appliquée aux Sciences de la Terre, UNSA), vacations de février à avril 2004, sujet : *"Mise en place de la BDD ATACAM".*

S[18] **Marco Pagani** (Docteur en sismologie, CNR Milan), vacations de novembre à décembre 2003, sujet : *"Méthode aléa régional et taux activités failles".*

S[19] **Etor Querendez** (DEA, Science de la Terre, UNSA), vacations en novembre et décembre 2002, sujet : *"Participations aux travaux de recherche du projet européen SESAME".*

S[20] **Tanguy Le Bihan** (DEA Dynamique de la lithosphère; UMPC, Paris VI), vacations d'octobre à novembre 2000, sujet: *"Prise en compte du risque sismique dans les documents d'urbanisme à petite échelle (DAT, SDAU) "*.

S[21] **Julie Sarperi** (1ière année MST "Géosciences et Géotechniques", UNSA), vacations en juillet 2000, sujet: *"Bilan des lois empiriques de propagation des actions sismiques; analyse des mouvements de terrain en dynamique par méthode de Newmark".*

S[22] **Karine LePiouffe** (1ière année MST "Géosciences et Géotechniques", UNSA), vacations en juin 2000, sujet: *"modèle géotechnique 3D de Nice (GEM-GEP)".*

S[23] **Vincent Bestagno** (DESS "Image, Multimédia et sciences Territoriales", UNSA), vacations de janvier à mars 1999, sujet: *"intégration données géologiques au 1/5000ième dans SIG GEM-GEP".*

S[24] **Laurence Barlet** (DESS « Géophysique Appliquée », UPMC, Paris 6), vacations de novembre 1998 à janvier 1999, sujet : *"Portage de programmes de traitement sous MATLAB".*

S[25] **Erwan Le Gavrian** (DESS « image, Multimédia et sciences territoriales », UNSA), vacations novembre et décembre 98, sujet: *"Etude sur la faisabilité de la cartographie automatique indiquant la présomption d'un niveau d'aléa au moyen d'un SIG". Participation à l'encadrement.*

S[26] **Marianne Font**, (DEA Dynamique de la lithosphère; Universités de Nice et Grenoble), vacations novembre et décembre 1998, sujet: *"Mise en place sous système d'information géographique (ARCVIEW) d'une procédure d'estimation assistée de l'aléa régional"*.

S[27] **Christine Guido** (DEUG Physique, UNSA), vacations à mi-temps entre octobre 1991 et août 1992, sujet: *"Etude sismo-accoustique du glissement de la Clapière. Essais de typologie des événements enregistrés au mois de mars 1991".*

S[28] **Claire-Odile Sylvestrin** (DEUG Géologie, UNSA), vacations juillet 1991, sujet: *"Appréciation quantitative de la réponse de l'appareillage sismique"*.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

© 2008 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

PARTIE 2 RESULTATS SCIENTIFIQUES

© 2008 Tous droits réservés.

3 Détection des effets de site

Ce chapitre présente les différentes méthodes de détection d'effets de site que j'ai pu expérimenter. Il débute par une introduction sur la nature et l'importance des enjeux, ainsi que les objectifs de recherche. Le paragraphe 3-2 illustre l'intérêt de la première méthode utilisée: celle qui consiste à **enregistrer des séismes en différents points d'un territoire** et à comparer les signaux obtenus. Mon expérience dans ce domaine est liée à la réalisation d'un nombre important de campagnes d'enregistrements qui ont permis d'affiner les traitements et la maîtrise de l'exploitation des résultats. Le paragraphe 3-3 présente l'évaluation de la **méthode "H/V" basée sur le bruit de fond sismique**, évaluation que j'ai poursuivie après ma thèse de doctorat (1995) en confrontant les résultats de multiples approches sur des cas d'études très variés. Le paragraphe 3-4 résume les principaux produits obtenus par le consortium du projet européen **SESAME** auquel j'ai contribué entre 2001 et 2004. Ce projet visait à établir des bases internationales de mise en œuvre et d'interprétation des méthodes basées sur le bruit de fond: la méthode "H/V" ainsi que la méthode dite de "bruit de fond en réseau". Dans la poursuite des travaux réalisés durant le projet SESAME, la thèse d'Héloïse Cadet (collaboration entre le LGIT et l'ERA6, soutenue en octobre 2007 à Grenoble) visait à proposer une procédure de modification des spectres de réponse réglementaires pour prendre en compte les effets de site. Cette modification devait se traduire par une formule analytique basée sur les caractéristiques des effets de site (fréquence fondamentale F_0 et vitesse des ondes de cisaillement V_s) obtenues à partir du bruit de fond sismique. Cette démarche a conduit Héloïse Cadet à établir un **protocole de mise en œuvre du bruit de fond dans le cadre d'études de microzonage**. Le paragraphe 3-5 présente l'application de ce protocole sur un territoire étudié auparavant par enregistrement de séismes et simulation numérique. Enfin le paragraphe 3-6 illustre la **complémentarité des approches expérimentales et de simulations numériques** pour caractériser les amplifications sismiques.

Les chapitres 3-1, 3-2 et 3-3 sont issus d'un article soumis au Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées en 2007 dans le cadre d'un numéro spécial "Risque sismique":

Titre de l'article: "Détection des effets de site: mise au point de méthodes expérimentales et application à Nice"

Auteurs: Anne-Marie Duval[1], Etienne Bertrand[1], Sylvain Vidal[1], José Delgado[2]
1: Equipe de Recherche Associée au LCPC "Risque sismique", CETE Méditerranée
2: Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, Espagne.

Résumé:
Les effets de site représentent un enjeu important pour la prévention parasismique puisqu'ils peuvent aggraver considérablement les dommages lors d'un séisme. La connaissance de la réponse des sols aux séismes permet d'adapter la réglementation parasismique à ces contraintes lors de microzonages et de Plan de Prévention des risques. Les méthodes expérimentales de détermination des effets de site visent à obtenir les paramètres de l'amplification sismique par la mesure de séismes ou de bruit de fond sismique. Cet article présente les principaux résultats obtenus jusqu'en 2005 par l'ERA "Risque sismique" dans la mise au point de ces techniques et leur application comparée sur la ville de Nice. Cette ville a effectivement constitué le principal chantier d'application grâce à de multiples campagnes d'enregistrements sismiques. De nombreux séismes ont d'abord été analysés par la méthode des fonctions de transfert. La méthode "H/V bruit de fond" a été appliquée sur plus de 600 points et les résultats interpolés spatialement. Un modèle géotechnique du sous-sol a ensuite permis de comparer les résultats obtenus avec la géologie et des simulations numériques de la propagation des ondes. La complémentarité des méthodes et leurs atouts respectifs sont mis en valeur sur ce territoire à fort enjeu.

3.1 Introduction

3.1.1 Description des phénomènes

Le terrible séisme de Mexico a spectaculairement illustré en 1985 la nature et l'impact des effets de site. Ce séisme, engendré à plus de 300 km de la capitale, a traversé le territoire mexicain en subissant les effets d'atténuation dus à la distance parcourue. Mais à leur entrée dans la cuvette

© 2008 Tous droits réservés.

argileuse qui forme Mexico, les ondes ont été piégées et sont entrées en résonance avec le site. Ce phénomène a considérablement amplifié le signal sismique autour de 0,5 Hertz [Singh, 1988]. Les bâtiments de 10 à 30 niveaux dont les modes propres de vibration correspondent à cette fréquence ont subi les plus lourds dommages.

Depuis, les études montrent que les effets de site sont responsables de l'augmentation des dégâts pour certains des grands séismes destructeurs (séismes de Northridge en 1994, Kobe en 1995, Turquie en 1999, Boumerdes en 2003).

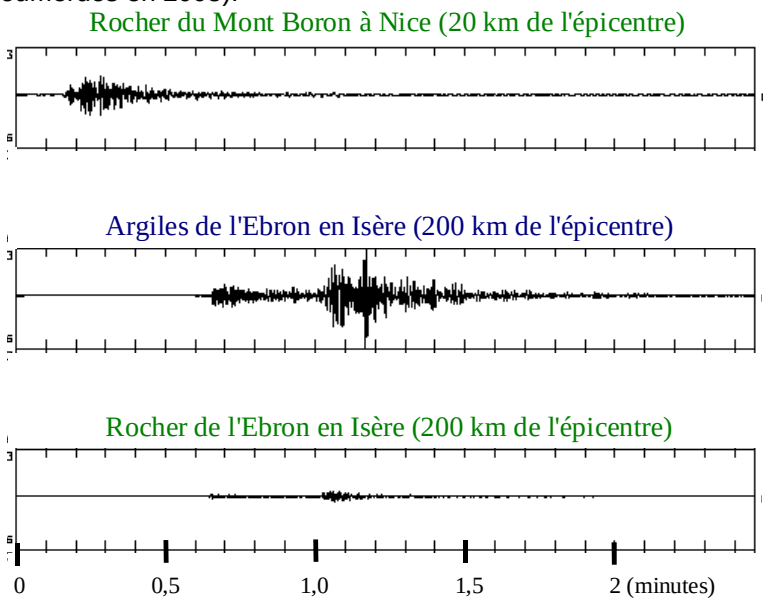


Figure 3.1—1: enregistrement d'un séisme de mer Ligure à Nice (20 km) et dans l'Isère (Ebron, 200 km). Même échelle pour les 3 traces.

La Figure 3.1—1 illustre localement les modifications provoquées par ces effets. Le séisme impliqué dans cette figure a été engendré en mer à 20 km de Nice environ avec une magnitude de 4,7. Il a été enregistré par différentes stations disposées à Nice ainsi qu'en Isère à plus de 200 km au nord. Sans effet de site, seule la distance au séisme influerait sur l'amplitude des vibrations du sol. Si l'on compare les enregistrements faits au rocher, les ondes arrivent normalement plus tard dans l'Isère et subissent une atténuation due à la distance. Par contre, pour la station posée sur un remplissage argileux en Isère, l'amplitude maximale est encore plus forte que celle mesurée au rocher de Nice. Le séisme a été amplifié par la couche d'argile.

Ces phénomènes d'amplification des ondes s'accompagnent très souvent d'un allongement de la phase forte du signal, induisant ainsi la fatigue des matériaux composant les structures et provoquant parfois des dépassements de seuils de résistance. Sismologues et ingénieurs se sont peu à peu penchés sur ces phénomènes dangereux et parfois très complexes [Aki, 1993]. Ils ont réussi à dégager deux grands types d'effet de site :

- les effets de site « lithologiques » pour lesquels un contraste d'impédance entre un substratum rigide et une couverture meuble provoque des réflexions multiples puis un piégeage des ondes dans la couche superficielle. Une approximation de la fréquence de résonance fondamentale F_o est donnée par $F_o = V_s /(4H)$ où V_s est la vitesse moyenne des ondes de cisaillement (S) dans la couverture sédimentaire de hauteur H. Dans ce cas, le phénomène est modélisé à l'aide d'une simple colonne de sol. Mais dans la réalité, les phénomènes sont souvent liés à des remplissages anthropiques ou alluviaux dans des vallées qui nécessitent des modèles de terrain en deux dimensions, voire à des formes de bassins beaucoup plus complexes et des modèles en trois dimensions,
- les effets de site « topographiques » : la forme très prononcée de certains reliefs constitue un piège pour les ondes qui se focalisent sur certaines zones du relief et subissent des amplifications et un allongement notable du signal.

3.1.2 Objectifs des recherches

Les effets de site représentent un enjeu important dans la prévention parasismique : si l'on ne peut prédire quand aura lieu un séisme, il semble tout de même possible de prédire où et comment le signal sismique devrait être amplifié. Ainsi, l'objectif des microzonages est de délimiter sur des cartes des zones d'aléa homogène. Pour chaque zone, la fréquence fondamentale (F_o) des sites doit être

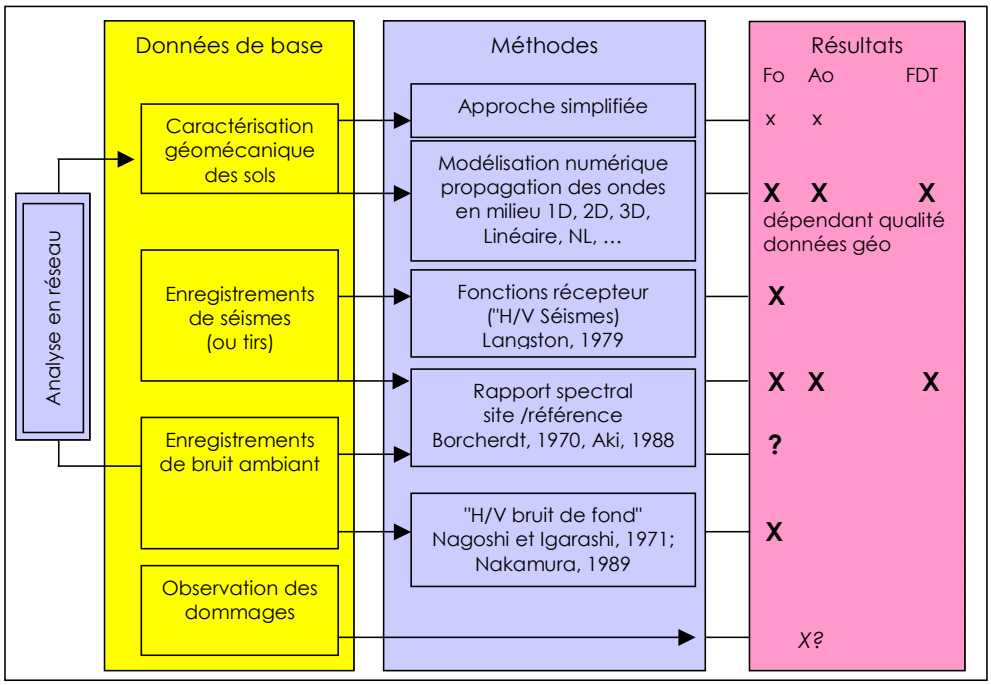
© 2008 Tous droits réservés.

identifiée et la réponse spectrale des sites (leur fonction de transfert) doit être reconnue. La reconnaissance des sols et de leur réponse permet de définir des comportements types et d'adapter les spectres de dimensionnement des structures imposés par les réglementations parasismiques afin de prendre en compte les effets de site. En effet, les réglementations ne peuvent que donner des valeurs forfaitaires et simplifiées qui ne reflètent que rarement la réalité physique des terrains. L'enjeu consiste donc à comprendre les phénomènes et à mettre au point des méthodes fiables permettant d'affiner la réglementation soit au niveau national (règles PS 92, EC8) soit au niveau local (dans le cadre de Plan de Prévention des Risques).

Les recherches conduites notamment par l'ERA06 ont permis de mettre en œuvre et de comparer diverses méthodes de détermination des effets de site au cours de multiples microzonages depuis 1991 en France (Nice, Pointe à Pitre) et à l'étranger (Vénézuela, Tunisie, Grèce, Monaco). Par ailleurs, de nombreuses études ponctuelles ont été conduites pour préciser les effets de site attendus : au droit de projets autoroutiers (viaduc de l'Ebron 1995, tunnel de Tende 1996) ou d'installations spécifiques (centraux téléphoniques, immeubles, installations nucléaires).

3.1.3 Les différentes approches de l'effet de site

Le Schémas 3.1—1 illustre les différentes approches possibles de l'effet de site qui ont été explorées durant les dernières années.



Schémas 3.1—1: les différentes méthodes adoptées pour déterminer les effets de site.

L'utilisation de diverses méthodes permet la comparaison des résultats et participe peu à peu à l'amélioration des choix techniques à faire selon les études [Kudo, 1995]. Les valeurs caractérisant les effets de site qu'on cherche à déterminer sont à minima la fréquence de résonance (F_o) des sites et l'amplification correspondante provoquée par le site à cette fréquence (A_o). Pour être plus précis, on cherche également à déterminer la fonction de transfert (FDT sur Schémas 3.1—1) du site donnant l'amplification attendue pour toutes les fréquences.

Différents modes de simulation de propagation des ondes ont ainsi été proposés, en une, deux, voire trois dimensions, en faisant l'hypothèse ou non de la linéarité du comportement des sols. La fiabilité et la précision de ces méthodes ne cessent de s'améliorer, prenant mieux en compte la complexité physique des phénomènes comme cela est évoqué dans [Semblat, 2008]. Cependant, la validité des résultats numériques dépend largement de la qualité et de la quantité des paramètres géophysiques utilisés. Cela implique une bonne connaissance de la géométrie des interfaces souterraines et des caractéristiques mécaniques de chaque formation. La marge d'incertitude liée à ces données, ainsi que leurs coûts d'acquisition, conduisent souvent à mettre en œuvre des méthodes expérimentales de détermination des effets de site. L'ERA "Risque sismique" s'est spécialisée dans ce type d'approche

© 2008 Tous droits réservés.

qui permet de quantifier les effets de site à partir de mesures de vibration. Les premiers microzonages réalisés par l'ERA étaient basés sur la méthode aujourd'hui classique des rapports spectraux site /référence issus de l'enregistrement de la sismicité (méthode "des fonctions de transfert"). L'expérience accumulée lors des nombreuses applications permet de conclure sur les caractères essentiels de la méthode et ses possibilités. Ces points font l'objet du chapitre 2 de cet article. A partir de 1991, l'ERA a testé une autre approche: celle du rapport spectral vertical / horizontal sur des enregistrements de séismes (méthode "fonction récepteur") mais aussi et surtout sur du bruit de fond ambiant (méthode "H/V bruit de fond"). Les premiers tests ont suscité de l'étonnement face à la précision des résultats dans de nombreux cas et notamment sur la ville de Nice. Le chapitre 3 de cet article illustre certains de ces résultats. Ces résultats ont été ensuite repris dans une évaluation européenne (projet SESAME) où de nombreuses équipes expertes se sont regroupées pour donner à la méthode une assise commune et comprendre les mécanismes physiques en jeu. SESAME a également permis d'explorer une autre utilisation du bruit ambiant par l'enregistrement en réseau pour caractériser des profils géophysiques de sol. Cette synthèse évoque largement des travaux réalisés à Nice dans le cadre de projets scientifiques plus larges: GEMITIS [GEMITIS, 1994] [Bard, 1995], RISK-UE [RISKUE, 2004] et GEM-GEP [CETE, 2000] [GEM-GEP, 2005].

3.2 Méthode basée sur l'enregistrement de séismes

3.2.1 Principe et mise en œuvre

La mesure de séismes est l'approche privilégiée pour déterminer les effets de site. La méthode classique consiste à enregistrer des séismes sur différents sites représentatifs et à comparer les résultats avec une station de référence [Duval, 1996][Borcherdt, 1970]. Cette dernière station sera choisie, idéalement, sur le substratum horizontal. Les données sismiques exploitées proviennent de l'enregistrement des vibrations du sol, au moyen de capteurs de vitesse de vibration pour les mouvements relativement faibles, de capteurs d'accélération pour les mouvements les plus forts.

Chaque événement sismique enregistré sur un site résulte de différents facteurs. Le signal enregistré est traité numériquement par transformées de Fourier pour obtenir son spectre en fréquence. L'enregistrement du séisme j sur le site i peut ainsi être représenté dans le domaine spectral par :

$$S_{ij}(f)= O_j(f).P_{ji}(f).H_{ij}(f).I_i(f)$$

où $O_j(f)$ représente l'effet de la source sismique elle-même, $P_{ji}(f)$ l'effet de la propagation entre le séisme et la zone d'étude (à l'échelle régionale), $H_{ij}(f)$ la modification recherchée du signal en sub-surface, $I_i(f)$ la réponse instrumentale du matériel d'acquisition et f la fréquence considérée.

Si la distance site-référence est faible par rapport à la distance épicentre-référence, on considère que les effets de source $O_j(f)$.et de propagation $P_{ji}(f)$ sont identiques entre les stations.

Une correction instrumentale pourra être effectuée pour ramener les enregistrements de toutes les stations à la même réponse ($I_i(f)= I_{ref}(f)$).

En effectuant la division spectrale des vibrations dues à un même séisme, d'un site i par rapport à la référence (où l'on suppose que $H_i(f)=1$ quelle que soit f), on obtient donc la réponse spectrale ou l'effet de site au site i soit :

$$S_{ij}(f)/ S_{ref\,j}(f)= H_{ij}(f)$$

Dans la pratique, on observe sur un site (i) une dispersion non négligeable de ce rapport spectral $H_{ij}(f)$ d'un séisme (J) à l'autre (effet d'azimut, de source, de distance, de magnitude): il faut donc obtenir un grand nombre (N) de rapports et calculer un rapport moyen appelé **la fonction de transfert** du site.

$$H_i(f) = \Sigma_j[H_{ij}(f)] / N$$

Cette fonction de transfert (sans dimension) sera ensuite appliquée au spectre du séisme de référence pour l'adapter aux conditions locales.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

3.2.2 Illustration sur Nice

A titre d'illustration, la Figure 3.2—1 présente les accélérogrammes obtenus sur les sites du RAP à Nice pour deux séismes:

- celui du 25 février 2001 (dont les effets à Nice sont évoqués dans un chapitre précédent), magnitude 4.7, émis en mer Ligure à une trentaine de km au sud de Nice.
- et celui du 2 septembre 2006, de magnitude 4, émis dans la région de Menton à une trentaine de km également (voir Tableau 3.2—1).

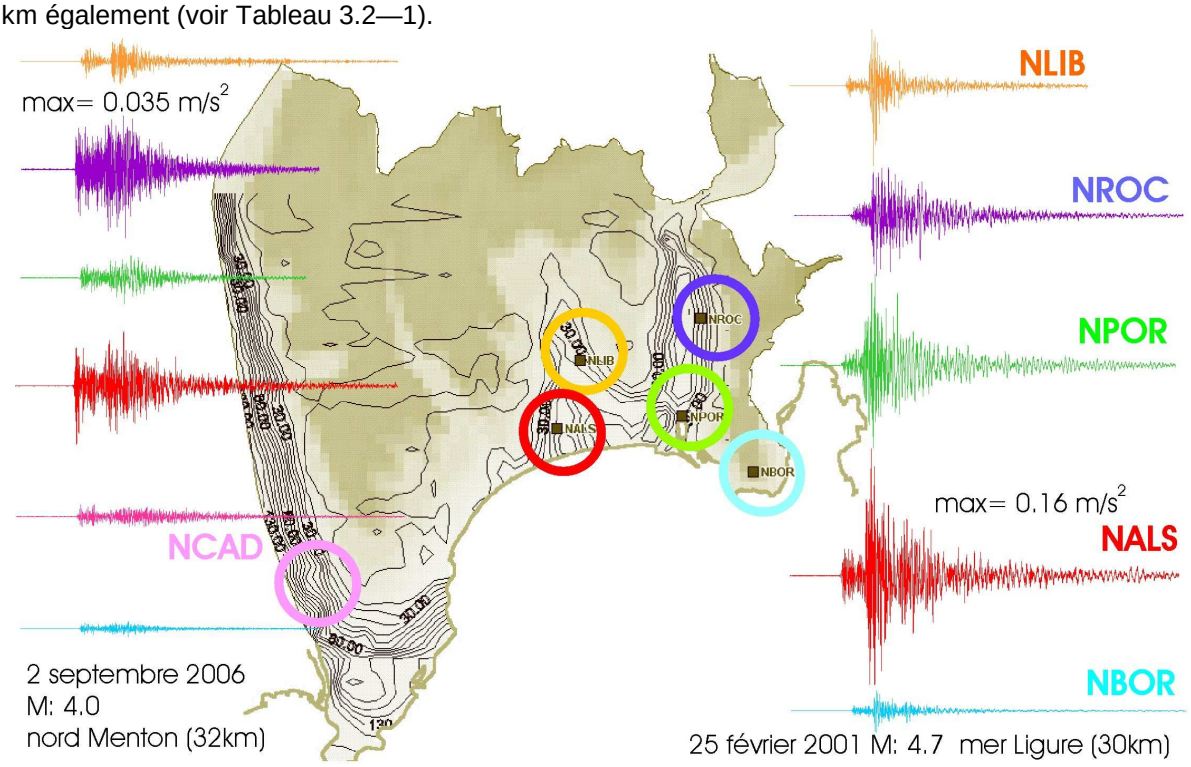


Figure 3.2—1: Enregistrements accéléromètriques (voies Est-Ouest) de 2 séismes par les stations RAP de Nice. L'échelle verticale est différente d'un séisme à l'autre.

Site	Séisme du 25 février 2001		Séisme du 2 septembre 2006	
	PGA: Valeur maximale de l'accélération (voie E-O)	Rapport PGA site/NBOR	PGA Valeur maximale de l'accélération (voie E-O)	Rapport PGA site/NBOR
NBOR	0.027		$4{,}4\ 10^{-3}$	
NCAD			$5{,}24\ 10^{-3}$	1
NALS	0.16	6	$2{,}94\ 10^{-2}$	7
NLIB	0.1	4	$1{,}14.10^{-2}$	3
NPOR	0.11	4	$1{,}31\ .10^{-2}$	3
NROC	0.07	3	$3{,}46\ .10^{-2}$	8

Tableau 3.2—1: Valeurs maximales de l'accélération (Peak Ground Acceleration, PGA) enregistrée sur les voies E-O pour deux séismes régionaux à Nice et rapport avec la valeur à NBOR.

La station NBOR est considérée comme la station de référence au rocher. L'accélération maximale (PGA) par rapport à NBOR est multipliée par 8 pour NROC pour le séisme de 2006 (mais ce coefficient n'est que de 3 en 2001), par 6 à 7 pour NALS, par 3 à 4 pour NPOR et NLIB. Le site CAD présente pour le séisme du 2 septembre 2006 des accélérations plus importantes que NBOR alors qu'il est plus éloigné de la source. Cette comparaison suggère un effet de site qui ne peut toutefois être quantifié avec ces enregistrements à cause du biais induit par la distance au séisme différente. D'autre part, l'accélération maximale ne renseigne que sur les fréquences qui sont les plus amplifiées. Pour préciser l'amplification entre 0 et 20 Hertz, les rapports spectraux entre les enregistrements de chaque site et celui correspondant à la référence sont présentés sur la Figure 3.2—2. Ils mettent en

© 2008 Tous droits réservés.

évidence les amplifications provoquées par tous les sites alluviaux par rapport à la station de référence. Ces amplifications sont particulièrement notables autour de 1 Hertz pour la station NALS puisque le niveau spectral dépasse 20. Le site NPOR présente également de très fortes amplifications.

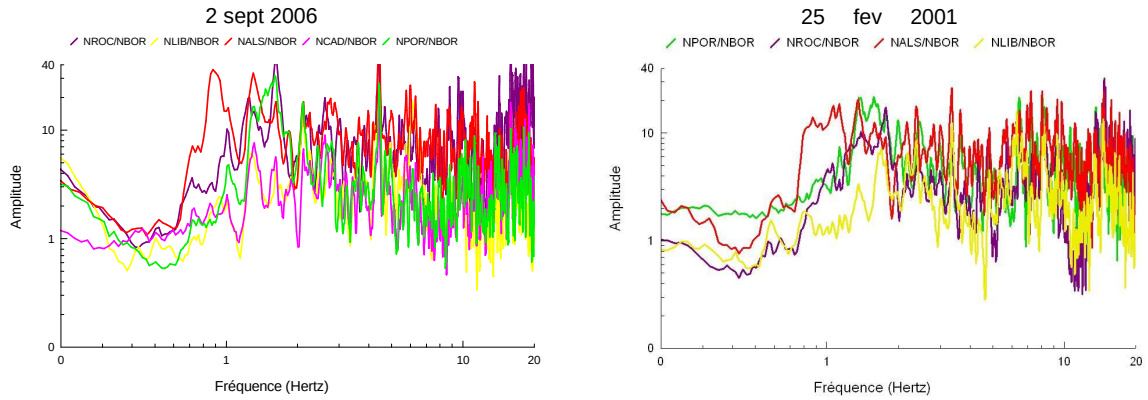


Figure 3.2—2: Nice: rapports spectraux site / référence (NBOR) pour les stations RAP pour le séisme du 2 septembre 2006 (gauche) et du 25 février 2001 (droite). Le code couleur est le même que pour les accélérogrammes de la figure 3.2-1.

3.2.3 Contraintes de mise en oeuvre et d'exploitation

Ce type d'opération d'enregistrement de la sismicité est toujours considéré comme le moyen le plus fiable physiquement de déterminer les effets de site. La réalisation concrète de nombreuses campagnes d'enregistrement de séismes en vue de microzonages et le traitement d'importants volumes de données nous permettent aujourd'hui d'énoncer plus clairement les contraintes à prendre en compte. En effet, la qualité du microzonage réalisé avec cette méthode dépend de l'équilibre entre des facteurs souvent antagonistes:

Les premiers facteurs sont liés aux choix des sites:

- **Représentativité du site de référence choisi**: Un substratum affleurant horizontal et proche du réseau n'est pas toujours disponible. De plus, ce substratum régional peut avoir des caractéristiques géo-mécaniques très faibles. Cependant, même si cette unité semble pouvoir modifier le signal sismique, elle pourra dans la plupart des cas être prise comme référence dans la mesure où l'aléa régional est défini sur celle-ci sous la forme d'accélérogramme ou de spectre de dimensionnement.

- **Dimension du réseau d'enregistrement**: Pour que l'effet de la propagation puisse être considéré comme identique au droit de toutes les stations, on considère que la distance séisme - réseau doit être au moins 5 fois la distance entre stations du réseau. Donc une grande distance entre la référence et un site ne permettra pas de prendre en compte des séismes très locaux.

Les autres facteurs sont liés aux évènements sismiques :

- **Dispersion des rapports spectraux**: Pour tenir compte des effets différentiels en fonction de l'azimut du séisme, il est nécessaire de disposer d'enregistrements provenant d'un grand nombre de directions. Par ailleurs, le contenu spectral des séismes d'une même zone source peut varier de manière assez importante selon la magnitude. Cette dispersion conduit à prendre en compte un grand nombre de séismes pour établir une moyenne. C'est ainsi que nos campagnes de mesures ont souvent été prolongées de mois en mois pour disposer d'une quinzaine d'évènements exploitables au moins.

- **Rapport signal/bruit:** En ville, le rapport signal sur bruit peut être très pénalisant en haute fréquence surtout. Mais cela peut également être le cas sur un site industriel, proche d'une voie de

© 2008 Tous droits réservés.

circulation, soumis au vent, à la houle ou à tout autre source de vibrations. Dans des zones pour lesquelles la sismicité est modérée (comme le territoire métropolitain français), ce bruit ambiant peut être comparable dans certaines bandes de fréquences ou pour tout le spectre aux signaux émis par les rares évènements sismiques régionaux. Le temps d'acquisition doit alors être allongé pour multiplier les enregistrements de séismes d'origine variée et obtenir des informations suffisantes sur l'ensemble du spectre. Dans la pratique, l'amplitude d'un rapport spectral site/référence ne sera prise en compte pour le calcul de la fonction de transfert que lorsque le rapport signal /bruit sera supérieur au moins à 2, à la fois sur le site et à la référence pour le séisme considéré. A Nice ou à Grenoble par exemple, 6 mois ont été nécessaires pour obtenir une quinzaine d'évènements très faibles. La Figure 3.2—3 illustre les conséquences de ces restrictions pour le microzonage réalisé dans la ville de Tunis [Duval, 1998]: les téléséismes (lointains) ne dépassent le bruit de fond que dans les basses fréquences. Les séismes régionaux plus proches donnent des résultats dans des gammes de fréquences plus larges. Tandis que les tirs d'explosifs utilisés également comme source ne peuvent être considérés comme "instructifs" que dans les hautes fréquences. En l'occurrence, les rapports montrent que le site étudié (MEDI) provoque de fortes amplifications autour de 1 Hertz. Mais les informations en hautes fréquences sont assez pauvres.

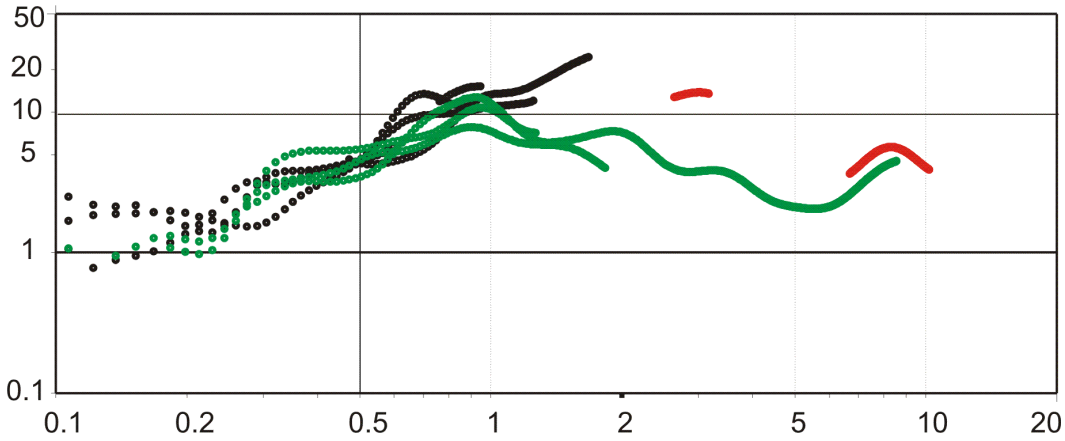


Figure 3.2—3: Microzonage de Tunis (Tunisie). Rapports spectraux MEDI / REF pour séismes régionaux (vert), lointains (noir) et tir (rouge).

- **Non linéarité de comportement des sols**: Prévoir un mouvement fort à partir des relations établies en mouvements faibles fait appel à une hypothèse de linéarité de comportement des sols qui est de plus en plus remise en cause. Il semble donc crucial d'obtenir des fonctions de transfert avec des mouvements les plus forts possibles.

Enfin les derniers facteurs sont liés au coût de ces études:

- **Extension spatiale des résultats**: Un zonage géotechnique doit être effectué pour délimiter des zones d'aléa homogène et désigner les sites à instrumenter. Selon les moyens mis en œuvre, ce zonage se basera sur une simple synthèse géologique ou sur l'analyse (voir la réalisation) de sondages géotechniques. Les réponses aux séismes obtenues sur les sites ponctuels seront ensuite étendues à chaque zone (éventuellement par des simulations numériques) avec une fiabilité dépendant de la qualité du zonage géotechnique.

- **Enregistrement continu**: Pour obtenir un grand nombre d'enregistrements, il faut enregistrer en continu (et non sur déclenchement par dépassement de valeurs seuils comme cela est encore le cas pour les instrumentations accéléromètriques permanentes). Cela implique une gestion de base de données importante et coûteuse.

- **Dispositif d'enregistrement**: Les dispositifs d'enregistrement tendent à devenir de plus en plus légers et peu encombrants, mais encore très coûteux. Lorsque l'étude géotechnique a permis d'individualiser une zone à instrumenter, les conditions de choix d'un site restent contraignantes: alimentation électrique (secteur ou panneau solaire), couplage du capteur avec le sol, sécurité contre vol et dégradation, niveau de bruit, intempéries, température. La Figure 3.2—4 illustre le cas d'un site en zone montagneuse, agricole et en plein hiver.

© 2008 Tous droits réservés.

Figure 3.2—4: exemple de dispositif de protection d'un enregistreur sismique en région alpine

Ces contraintes de mise en oeuvre et d'exploitation de la méthode des fonctions de transfert nous ont conduit à nous pencher d'autres méthodes basées sur le bruit de fond sismique.

3.3 Méthode « H/V bruit de fond »

3.3.1 Historique de la méthode

Dès les années 1950, des scientifiques japonais ont détecté dans les enregistrements de bruit de fond sismique des indices de caractérisation du comportement des sols soumis à séismes ([Aki, 1957] et [Aki, 1993]). Le mode de traitement consistait alors simplement à étudier le contenu spectral d'un enregistrement brut. Puis d'autres modes d'analyse dont celui fondé sur le **rapport spectral des voies horizontales sur la voie verticale** ont été proposés toujours au Japon [Nogoshi, 1970]. Mais il a fallu la conjonction de plusieurs facteurs pour que la méthode parvienne à son succès actuel: la prise de conscience de l'importance des effets de site pour la prévention parasismique, le développement des outils de traitement informatique du signal et enfin la publication en 1989 par un ingénieur japonais d'un article dans une revue publié en anglais [Nakamura, 1989].

Les tentatives de justification présentées dans cette publication ont tout d'abord provoqué la surprise sinon le rejet de la méthode par de nombreux sismologues. Mais elle a également provoqué l'intérêt et le début des analyses qui se poursuivent encore. En effet, les avantages de la méthode sont très vite apparus: rapide et économique, elle permet de disposer pour de nombreux points de certaines caractéristiques de la réponse des sols aux séismes. Notre position a consisté en premier lieu à tester la méthode en comparant ses résultats à d'autres sources d'information, puis à contribuer à éclaircir les explications possibles sur la nature et la propagation des ondes composant le bruit de fond sismique. Les nombreux travaux réalisés ont été prolongés par le projet européen SESAME qui a permis d'aboutir à un guide d'utilisation de la méthode [Bard, 2004] [Duval, 2004].

La méthode « H/V bruit de fond » est aujourd'hui de plus en plus utilisée dans le monde entier dans des études de site ou des microzonages pour identifier les sites présentant des risques d'amplification sismique afin de déterminer les fréquences de résonance.

3.3.2 Principe et résultats antérieurs

La nature des ondes composant le bruit de fond sismique est une question posée depuis longtemps. Le projet SESAME a permis de progresser sur la question [Bard, 2004]. Le bruit sismique ambiant (microtremor en anglais) est constitué par des ondes de volumes et des ondes de surface créés :

- pour des longues périodes (jusqu'à 5 secondes environ) : par les perturbations atmosphériques sur les océans se propageant sur la surface de la croûte terrestre. Il existe également d'autres sources naturelles de bruit tellurique comme les séismes lointains.

- pour les périodes plus courtes : par l'activité humaine et industrielle.

Sur le plan de l'expérimentation, la méthode consiste à poser un capteur de vibration tri-directionnel (verticale, longitudinale et transversale) sur le sol à étudier durant une période de 10 à 30 minutes. Le bruit ambiant est alors enregistré par la station d'acquisition numérique (Figure 3.3—1).

© 2008 Tous droits réservés.

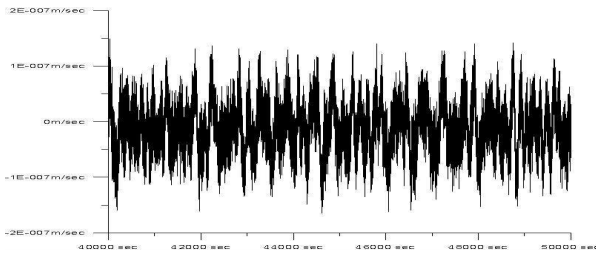


Figure 3.3—1: exemple d'enregistrement de bruit de fond sismique (vitesse de vibration du sol en mètre/sec)

Le traitement des 3 traces sismiques obtenues par enregistrement est le suivant :

- Pour chaque enregistrement on recherche d'abord des fenêtres de signal (de l'ordre de la minute en général) dans lesquelles le signal est le plus stable possible en évitant les signaux transitoires.
- Une analyse spectrale par transformée de Fourier (FFT) est réalisée sur chacune de ces fenêtres. L'amplitude des spectres est lissée. On appellera H le spectre en amplitude moyen des voies horizontales et V celui de la voie verticale.
- Pour chaque fenêtre, le rapport du spectre H sur le spectre V est calculé.
- Une moyenne des rapports issus d'un grand nombre de fenêtres aboutit au rapport « H/V » représentatif du site.

Il est aujourd'hui possible de confirmer l'intérêt essentiel de la méthode: la courbe résultante « H/V bruit de fond » présente un pic à une fréquence correspondant à la fréquence fondamentale de résonance des sites sédimentaires. La Figure 3.3—2, issue de nombreux enregistrements en France et à l'étranger montrent effectivement que les sites sur lesquels des phénomènes d'amplification sont attendus montrent des courbes « H/V bruit de fond » avec des pics, alors que les mêmes courbes sont plates sur des sites rocheux (sans amplification) [Duval, 2001a].

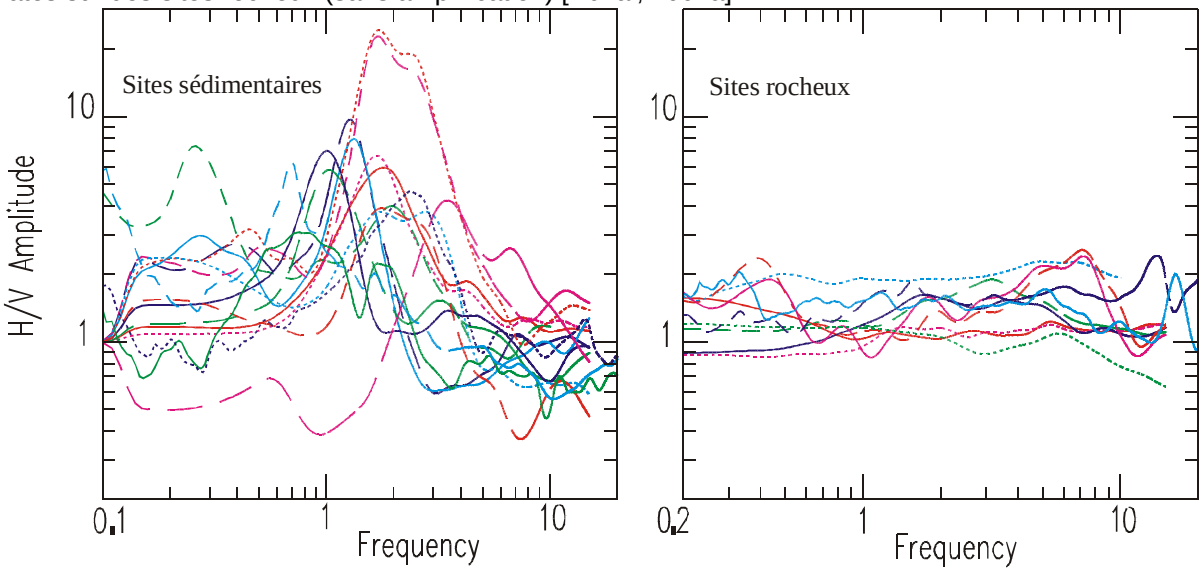


Figure 3.3—2: Exemples de rapports "H/V bruit de fond"

Comme cela a été montré par les travaux réalisés dans le cadre de SESAME [Duval, 2008], l'existence de ce pic dans le rapport H/V peut être justifié par différents facteurs: ellipticité des ondes de Rayleigh, phase d'Airy du mode fondamental des ondes de Love et partiellement résonance des ondes de volume cisaillantes (S) [Bonnefoy-Claudet, 2006].

Avant d'aboutir au consensus sur les possibilités de la méthode et la mise au point de modes opératoires communs, de nombreuses évaluations ont été conduites. Les premiers résultats acquis à partir de 1991, concernant la stabilité dans le temps et dans l'espace ainsi que des comparaisons avec des enregistrements de séismes ou des simulations numériques, furent très encourageants [Duval, 1996b]. Une synthèse de plusieurs études réalisées par l'ERA06 et le LGIT [Duval, 2001a] a ensuite abouti aux conclusions suivantes:

© 2008 Tous droits réservés.

- Les méthodes “H/V bruit de fond” et « fonction récepteur » (ou “H/V sur séisme”) permettent de quantifier la fréquence fondamentale des sites en dessous de laquelle il n’y a pas d’amplification. Les fréquences de premiers pics des fonctions de transfert issues de séismes et celles des courbes "H/V bruit de fond" correspondent généralement très bien (Figure 3.3—3).
- Elles fournissent un niveau minimum fiable du niveau d’amplification spectrale. Mais elles ne permettent pas d’estimer la largeur de bande impliquée dans l’amplification, ni le niveau réel de l’amplification en cas de mouvement fort.
- Sauf exception, elles permettent de vérifier qu’une zone ne présente pas d’effet de site (zone rocheuse).

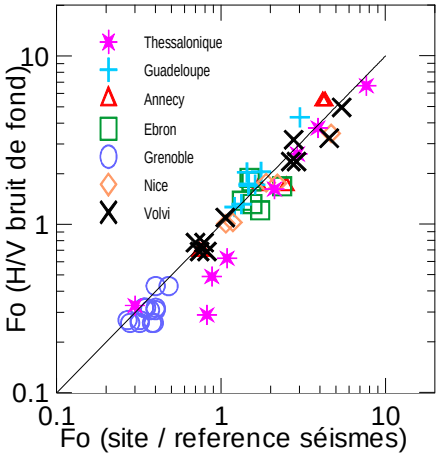


Figure 3.3—3: Fréquence du premier pic des fonctions de transfert séisme et du premier pic du rapport "H/V séisme" pour les 44 sites étudiés dans la synthèse [Duval, 2001a].

3.3.3 Application sur la ville de Nice

Comparaison avec des enregistrements de séismes

Des enregistrements de séismes réels en différents points de la ville ont permis d'établir des fonctions de transfert réelles montrant des amplifications d'un facteur 10 pour des séismes modérés et associées à un allongement des signaux.

La ville de Nice est un terrain d'expérience privilégié pour l'"ERA Risque Sismique". Les méthodes de détermination des effets de site ont été appliquées depuis 1983 [Bard, 1983] sur des sites tests, sur lesquels sont d'ailleurs installés aujourd'hui des stations du RAP. Les résultats qui suivent illustrent les nombreux travaux réalisés entre 1991 et 2004 pour évaluer les possibilités de la méthode "H/V bruit de fond".

Le premier concerne le remplissage alluvial d'un ancien lit de rivière débouchant sur la mer au sud entre deux collines. Cette vallée est comblée par des matériaux relativement meubles et hétérogènes par rapport à la base rocheuse. La connaissance de ce remplissage reste aujourd'hui encore imparfaite et fait d'ailleurs l'objet de nouvelles investigations. Sur la base d'interprétations géologiques et de l'analyse des sondages les plus profonds, il a toutefois été admis que son épaisseur croît en direction de la mer, depuis 15 mètres environ sur le site RAY au nord, 30 mètres environ pour le site LIB et jusqu'à une centaine de mètres au droit du site NALS au sud (repérage en (plan sur Figure 3.3—4).

Sur la base de ces informations, des simulations numériques (1D) ont permis de déterminer les fréquences de résonance associées à ces trois sites. Elles sont respectivement de 4.5 Hertz, 2.5 Hertz et 1Hertz du nord au sud (courbes bleues Figure 3.3—4).

Des stations sismiques ont enregistré la sismicité durant plusieurs mois sur ces sites. Les rapports spectraux effectués avec une station de référence au rocher calcaire (NBOR) ont été calculées courbes vertes de la Figure 3.3—4). Les rapports spectraux augmentent à des fréquences proches de celles trouvées numériquement (resp. 5 Hertz, 1.8 Hertz et 0.8 Hertz du nord au sud). On remarquera que le niveau important du bruit sur RAY masque la majeur partie de la fonction de transfert d'une part. D'autre part, le niveau d'amplification est très élevé (il atteint 20 sur NALS) et reste important dans les hautes fréquences, ce qui est sans doute à mettre en liaison avec le faible niveau d'excitation sismique des séismes exploités.

© 2008 Tous droits réservés.

Enfin, le bruit de fond ambiant a été enregistré sur ces sites. Les rapports moyens "H/V bruit de fond" de chacun des sites donnent bien des pics caractéristiques à des fréquences totalement compatibles avec les effets de résonance attendus : depuis 3,5 Hertz au nord (RAY), la fréquence décroît au centre (LIB) entre 1 et 2 Hertz, pour donner au sud, le pic le plus élevé à la fréquence la plus basse, 0,8 Hertz (NALS). Ces résultats encourageants nous ont incités à poursuivre l'application de la méthode sur un territoire plus vaste.

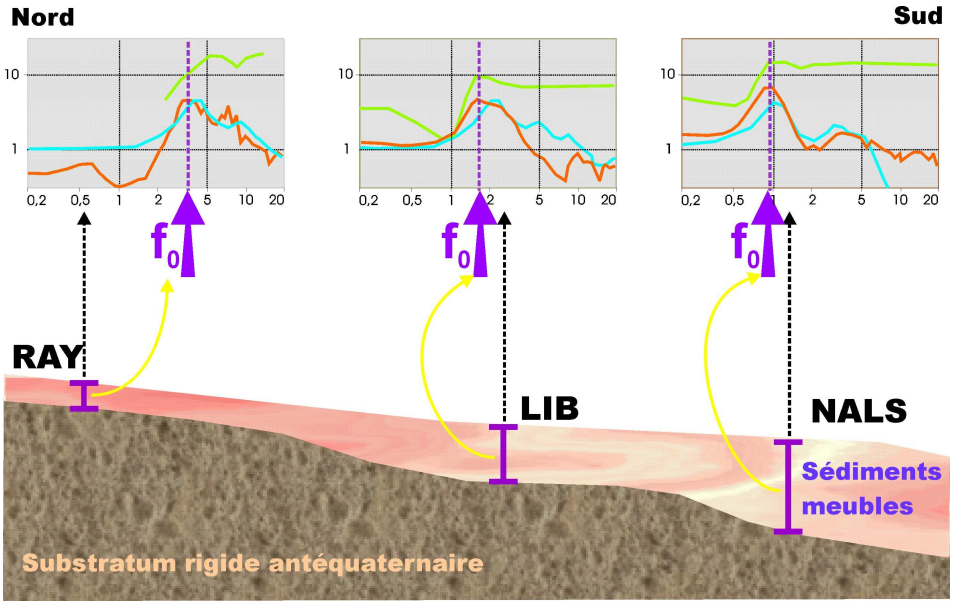


Figure 3.3—4: Nice, vallée centrale, en vert: rapports spectraux site/référence séisme, en orange: rapports spectraux H/V bruit de fond; bleu: fonction de transfert numérique (1D).

Distribution spatiale des mesures de bruit de fond

Les nombreuses campagnes de mesures de bruit de fond sur Nice ont abouti à un total de 687 points localisés sur le relief et le remplissage alluvial sur la Figure 3.3—5 et sur la géologie sur la Figure 3.3—6 [CETE, 2003]. La densité des points est plus élevée dans les zones alluviales que sur les collines de calcaire ou de poudingue.

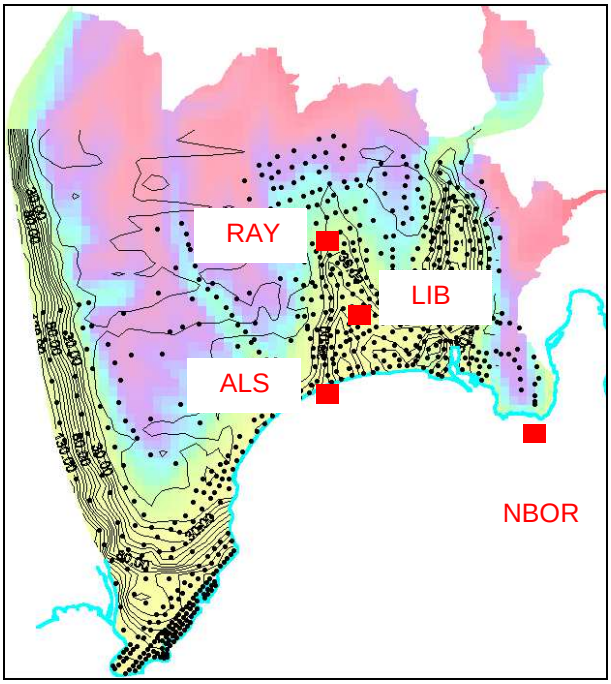


Figure 3.3—5: Localisation des points de mesures du bruit de fond (points noirs) sur relief (couleur) et remplissage sédimentaire (courbes de niveau).

© 2008 Tous droits réservés.

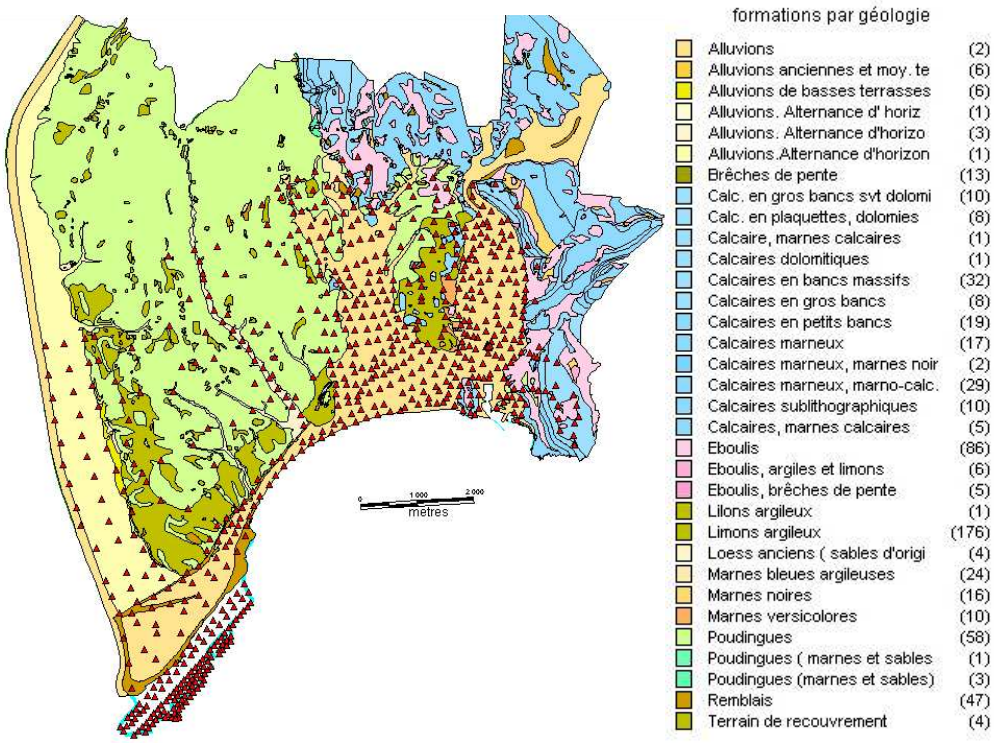


Figure 3.3—6: Nice - Localisation des points de mesures de bruit de fond de 1991 à 2005 (triangles rouges) sur les unités géologiques.

Interpolation des fréquences de résonance des sols

La méthode "H/V bruit de fond" a été appliquée sur ces enregistrements. La fréquence F_o du pic principale de chaque courbe H/V (entre 0.5 et 15 Hertz) a été interpolée pour produire la Figure 3.3—7.

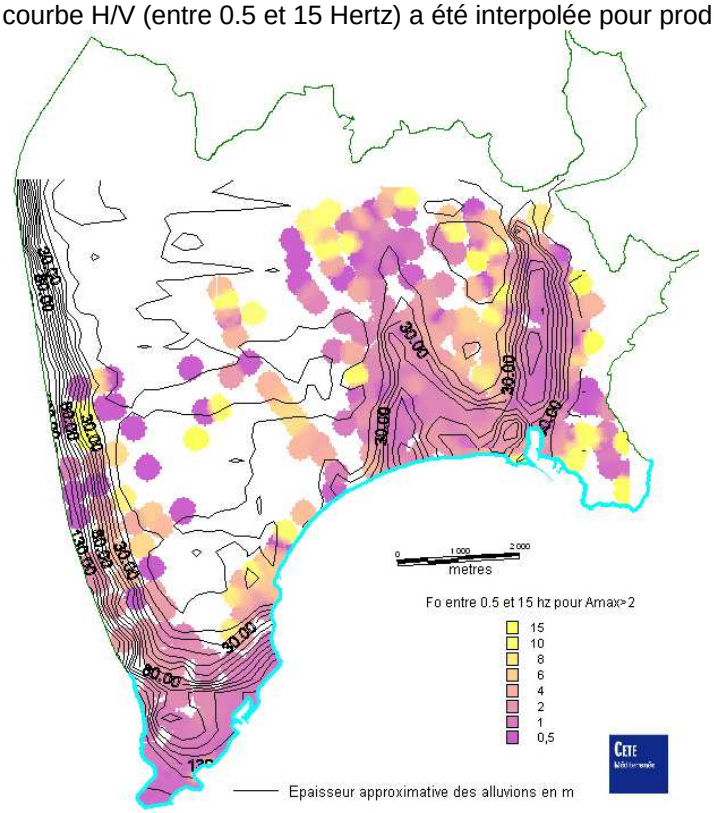


Figure 3.3—7: Nice - Fréquences F_o du pic maximale entre 0.5 et 15 Hertz sur les rapports "H/V bruit de fond" (en Hertz).

© 2008 Tous droits réservés.

L'analyse de cette figure conduit à plusieurs remarques:

- Les valeurs les plus élevées de F_o (supérieures à 10 Hz) se trouvent globalement bien en dehors des zones sédimentaires.
- Les zones de remplissage alluviale montrent des F_o inférieures à 2 Hz.
- De nombreux points au rocher (aussi bien sur les poudingues des collines de l'ouest, les gypses de la colline de Cimiez que les calcaires de l'Est de Nice) montrent des F_o également inférieures à 0.5 Hz.

Le niveau maximal A_o des rapports "H/V bruit de fond" a également été interpolé sur l'ensemble du territoire (Figure 3.3—8). Aucune des études numériques et des interprétations théorique des phénomènes réalisées jusqu'à maintenant ne permettent d'accorder de signification physique à cette valeur A_o. Il est néanmoins intéressant de constater que les rapports H/V ne sont censés révéler un effet de site que lorsqu'ils dépassent une valeur seuil (2 en général). Quelques exemples tendent aussi à suggérer que lorsqu'un site provoque des amplifications sismiques nettement plus élevées qu'un autre sur le même territoire, sa courbe "H/V bruit de fond" est également plus élevée. Mais cette suggestion reste à prouver par de nouvelles synthèses de microzonages.

Une étude réalisée dans la zone de Palos Grandes à Caracas a permis d'établir une corrélation entre la répartition des dommages lors du séisme de 1967, les fréquences de résonance des sols (par simulations numériques) et les fréquences F_o du maximum des rapports "H/V bruit de fond".

Cette étude confirme la possibilité de concordance des fréquences de résonance entre le sol de certaines zones et certains bâtiments détruits. D'autre part, de forts dégâts se sont concentrés dans une zone où les amplitudes A_o des courbes H/V étaient parmi les plus élevées comme le prévoient également les simulations numériques [Duval, 2001b], [Semblat, 2002]. L'apport de la Figure 3.3—8 n'est donc pas forcément à négliger. Les valeurs maximales de A_o sont relativement plus élevées sur l'aéroport (remplissage anthropique meuble), au centre de certains bassins et en bordure de bassin, ce qui correspond bien à des zones où des amplifications sont envisagées numériquement [Semblat, 2000].

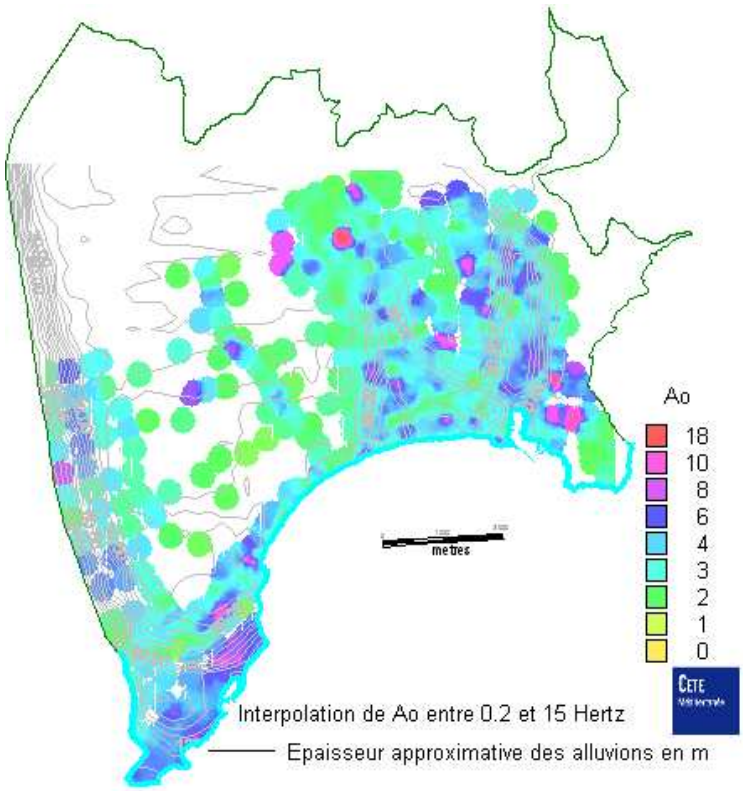


Figure 3.3—8: Nice - Amplitude A_o du pic maximale entre 0.5 et 15 Hertz sur les rapports "H/V bruit de fond" (en Hertz).

© 2008 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

Comparaison avec les simulations numériques à partir du modèle géotechnique 3D du sous-sol

Le modèle géotechnique 3D élaboré sur la commune durant l'étude GEM-GEP a été mis en œuvre pour associer à chaque point de mesure du bruit de fond l'épaisseur de la couverture sédimentaire [CETE, 2000]. Ce modèle a été réalisé en 1999 en collectant et analysant les sondages géotechniques disponibles afin de caractériser les 8 couches géotechniques caractérisant le remplissage sédimentaire à Nice. Chaque couche a été caractérisée par l'analyse des sondages géotechniques rassemblés. Leur extension spatiale a ensuite été réalisée (avec le logiciel GDM) en prenant en compte les éléments géologiques (cartogrphie au 1/5000^{ième}) et topographiques de surface et en exerçant un contrôle par des experts locaux.

Si la tendance générale et les épaisseurs maximales semblent cohérentes avec les connaissances actuelles, la précision de ce modèle est certainement limitée : sur 436 sondages de départ, 155 ont atteint le substratum (évidemment rarement dans les zones de remplissage important).

En effet, le modèle géotechnique 3D couvre un vaste territoire avec une géologie alpine complexe, en bord de mer. Les lentilles de sables par exemple n'y sont pas représentées. Dans les zones de remplissages sédimentaires profonds (de plus de 50 mètres) du centre ville ou de la plaine du Var la connaissance est limitée et l'interpolation est donc hasardeuse puisque aucun sondage n'a atteint le substratum. C'est pourquoi même si la profondeur des alluvions finalement adoptée dans le modèle actuel paraît plausible aux experts, le modèle reste en cours d'amélioration par l'apport de nouveaux sondages géotechniques ou géophysiques. La réalisation de profil de sismique réflexion en ville semblant irréaliste, la technique de "bruit de fond en réseau" (exposée plus loin) a été appliquée pour affiner l'estimation de l'épaisseur de recouvrement sédimentaire autour du site NALS en particulier.

La Figure 3.3—9 met en relation la fréquence du pic maximal des courbes "H/V bruit de fond" (lorsque le niveau Ao est supérieur à 2) et l'épaisseur du remplissage déduite du modèle en sommant les épaisseurs des couches sédimentaires. Cette figure montre globalement et comme on peut s'y attendre une décroissance des fréquences lorsque l'épaisseur du remplissage augmente. Il faut toutefois remarquer une dispersion assez forte.

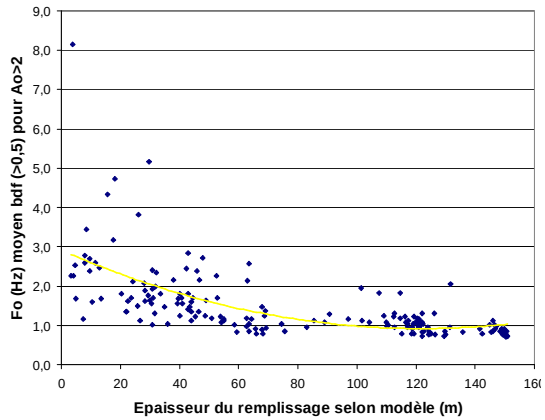


Figure 3.3—9: Nice - Fréquence F_o correspondant au maximum des courbes "H/V bruit de fond" entre 0.5 et 15 Hertz (lorsque ce maximum A_o >2) en relation avec épaisseur du remplissage (en m) dans modèle géotechnique 3D.

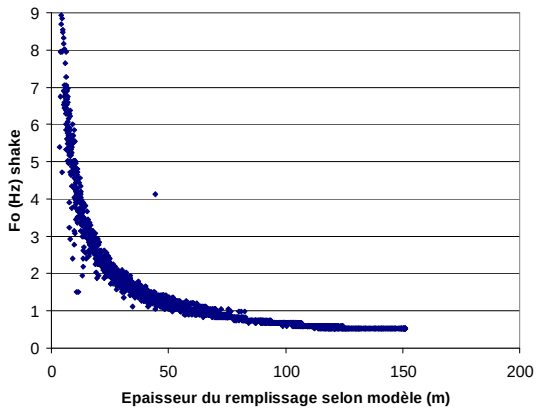


Figure 3.3—10:Nice - Fréquence F_o correspondant au maximum des fonctions de transfert (simulation 1D) en relation avec épaisseur du remplissage (en m) dans modèle géotechnique 3D.

Des simulations numériques ont été effectuées avec le logiciel Shake [Schnabel, 1972] dans des colonnes de sols issues du modèle géotechnique 3D. La propagation d'un signal sismique (séisme Californien) à travers les zones de remplissage sédimentaire a été simulée pour 1992 points repérés sur la Figure 3.3—11. Ces points sont calés sur la grille de calcul du modèle géotechnique.

© 2008 Tous droits réservés.

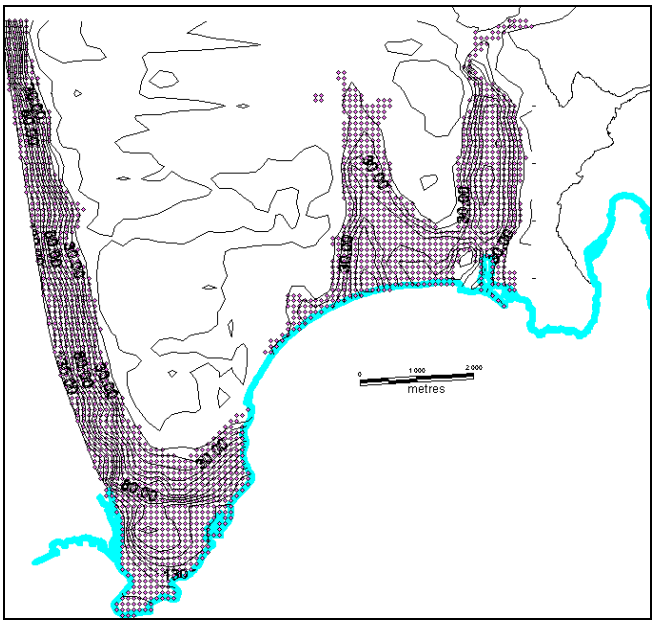


Figure 3.3—11: Localisation des points de simulation 1D (carrés violets). Les courbes de niveau représentent l'épaisseur approximative du remplissage alluvial.

Les **fonctions de transfert** de chaque point par rapport au rocher (référence) sont conservées. Ces courbes traduisent la modification du signal sismique (en fréquence) provoquée par chaque site. Les valeurs d'amplification maximale (F_o et A_o) entre 0.2 et 15 Hz ont été calculées comme pour le bruit de fond. Les fréquences F_o sont minimales au centre des bassins (1 Hz dans le centre ville, en dessous de 1 Hz pour la plaine du Var). Elles augmentent en s'éloignant du centre et sont maximales (au delà de 5 Hz) en bordure de bassin (Figure 3.3—12). De même, la Figure 3.3—10 illustre bien le fait que les fréquences de résonance issues de ces fonctions de transfert numériques 1D sont liées à l'épaisseur du remplissage.

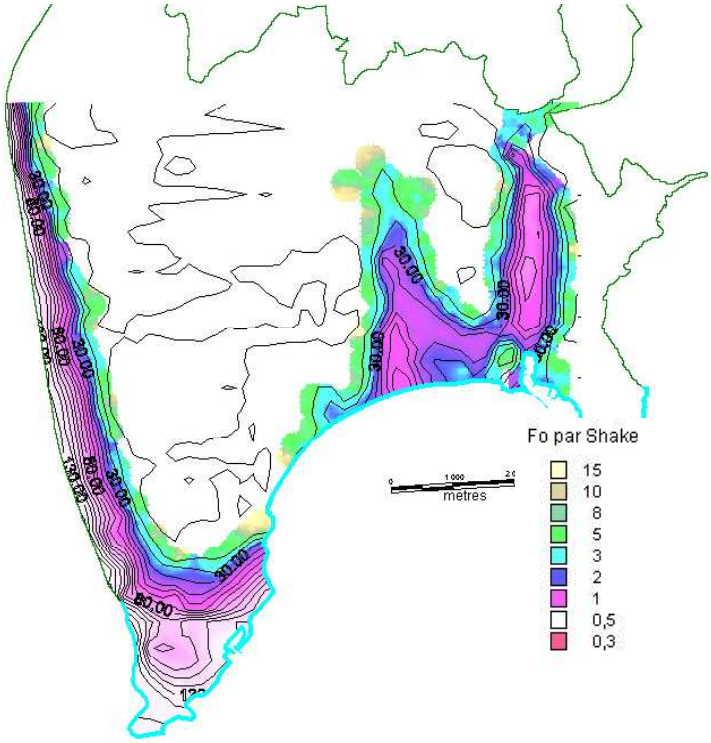


Figure 3.3—12: Nice - Interpolation des fréquences F_o des fonctions de transfert (simulations numériques 1D) entre 0.2 et 15 Hertz. Les courbes de niveau représentent l'épaisseur approximative du remplissage.

© 2008 Tous droits réservés.

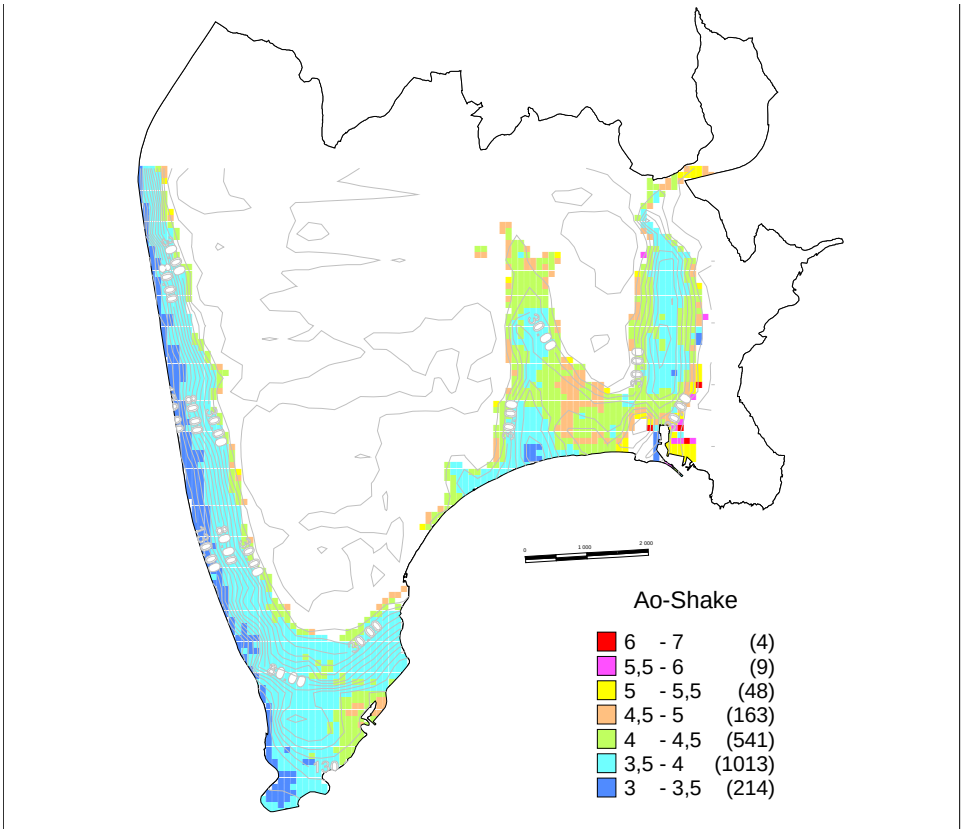


Figure 3.3—13: Nice - Interpolation des amplitudes maximale A_o des fonctions de transfert (simulations numériques 1D) entre 0.2 et 15 hertz. Les courbes de niveau représentent l'épaisseur approximative du remplissage.

Par contre, contrairement aux résultats issus du bruit de fond, le niveau A_o de l'amplification des fonctions de transfert numériques croît systématiquement du centre des remplissages vers l'extérieur (de A_o=3 à A_o=6,9) comme le montre la Figure 3.3—13.

Les calculs effectués à partir de ce modèle géotechique 3D, en prenant en compte non plus une colonne de sols, mais des profils (coupe 2D), semblent mieux refléter le niveau d'amplification réel comme cela est décrit dans le chapitre 3.6 du présente mémoire [Semblat, 2002].

3.3.4 Conclusion

L'application sur Nice de plusieurs techniques de détection des effets de site a permis de vérifier l'exitence d'effet de site, de confronter les résultats des différentes techniques et de vérifier leur complémentarité dans le cadre d'un microzonage:

- Les nombreuses campagnes d'enregistrements sismiques que nous avons conduites ces dernières années ont confirmé l'existence d'effets de site dans le centre de Nice. Ces phénomènes se traduisent amplifient par l'amplification des mouvements sismiques à des fréquences souvent fondamentales pour les immeubles et liées à la nature et à l'épaisseur des remplissages sédimentaires. Une meilleure maîtrise de la méthode "site sur référence sur séisme" et de ses limites a été acquise. Cinq des sites étudiés à Nice par le CETE sont devenus des stations permanentes du Réseau Accéléromètriques Permanent.
- La méthode "H/V bruit de fond" a été appliquée sur près de 700 point sur un territoire vaste et contrasté. Les résultats se traduisent par la cartographie des fréquences de résonance des sols qui correspondent à celles déduites de la méthode "site sur référence sur séisme" avec en particulier une férquence de résonance de l'ordre du Hertz autour du site NALS.
- Le modèle géotechnique en trois dimensions élaboré à partir d'une base de données de sondages et d'une cartographie fine de la géologie de surface constitue une première à cette échelle dans un microzonage. Ce modèle numérique a montré tout son intérêt dans ce type d'étude en permettant

© 2008 Tous droits réservés.

l'affectation d'une colonne de sol en chaque point du remplissage alluvial. La propagation d'accélérogrammes à travers des milliers de colonnes a alors été simulé. Les fréquences de résonance ont été cartographiés à partir de ces résultats.

Par ailleurs des simulations numériques en 2 dimensions ont également été réalisées et font l'objet du chapitre 3.6 du présent mémoire.

Les résultats des trois techniques ("site sur référence séisme"; "H/V bruit de fond"" et simulation numériques) confortent l'hypothèse d'effet de site préoccupants dans le centre des vallées alluviales. Plusieurs axes de recherche sont en cours d'investigation pour améliorer encore la compréhension et la prévision des amplifications sismiques. Parmi les points qui doivent être approfondis, citons: les effets de site topographiques (provoqués par des reliefs abrupts) qui forment encore un grand point d'interrogation, les effets de bassins qui compliquent la réponse des sites, ainsi que la transposition des fonctions de transfert issues de séismes faibles vers des mouvements forts (problème de non-linéarité de comportement des sols).

Sur le plan de la prévention des risques, la réalité des effets de site à Nice, combinée à l'importance de la vulnérabilité du bâti et à l'importance des enjeux, a été démontrée de manière parlante pour les acteurs de la gestion des risques, à travers le projet GEM-GEP notamment. Ainsi, la démarche scientifique prépare la prise en compte du risque à sa plus juste mesure et passe notamment par l'adaptation de la réglementation nationale aux conditions locales.

Références

[Aki, 1957] Aki K., "Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors", Bulletin Earthquake Research Institut, Tokyo Univ., 35, pp 415-456, 1957.

[Aki, 1993] Aki K., "Local site effects on weak and strong ground motion", Tectonophysics, 218, 93-111, 1993.

[Bard, 1983] Bard P.-Y., J.-P. Méneroud, M. Arnould, J.-L. Durville, G. Cartier, L. Coudercy, J.-L. Perez, "Évaluation des risques en cas de séisme, microzonage, étude méthodologique dans les Alpes-Maritimes", rapport CETE Méditerranée, Laboratoire de Nice au Conseil Général des Alpes Maritimes, affaire 81486,.113 pages + annexes, Juillet 1983.

[Bonnefoy-Claudet, 2006] Bonnefoy-Claudet S., F. Cotton and P.-Y. Bard, "The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review", in Earth-Sciences Review, 79, 205-227, 2006.

[Borcherdt, 1970] Borcherdt R. D. and J.F. Gibbs, "Effects of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake", in Bull. Seism. Soc. Am, 66, 467-500, 1970.

[Bard, 2004] Bard P.Y. and SESAME participants, 2004. The SESAME project: an overview and main results", in Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, August 2004, n°2207, 2004.

[Bard, 1995] P.-Y. Bard, M. Bour, A.-M. Duval, C. Martin, J.-P. Mèneroud, P. Mouroux, C. Thibault, M. Terrier and S. Vidal, "Seismic zonation methodology on the city of Nice Progress Report", 5th Int. Conf. on Seismic Zonation, Nice, Vol III, 36 pages, oct. 1995.

[CETE, 2000] Méneroud J.-P., A.-M. Duval, C. Michel, C. Thibault, S. Vidal, J.-L. Gastaut, A. Tortet, J. Delgado, T. Jessin, J.-F. Saillet et C. Tartar, "GEM-GEP Phase I - Risque sismique sur Nice - Etude de Scénarios de gestion de crise sismique - Définition de l'aléa, de la vulnérabilité et des enjeux", Rapport CETE Méditerranée, affaire n°98740 136,139 pages + annexes, fév. 2000.

[CETE, 2003] A.-M. Duval et S. Vidal, "Contribution à l'étude de l'aléa local à Nice: Complément d'analyse du bruit de fond sismique", Rapport CETE Méditerranée à la DRAST, affaire n°987400136/04, 41pages, fév. 2003.

[Duval, 1996a] A.-M. Duval, "Détermination de la réponse d'un site aux séismes à l'aide du bruit de fond - Evaluation expérimentale", Rapport Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°GT62, 264 p., LCPC, Paris, juillet 199 6a.

[Duval, 1996b] Duval A.-M., J.-P. Méneroud, S. Vidal, P.-Y. Bard, "Une nouvelle méthode d'évaluation des sols aux séismes par enregistrement du bruit de fond", Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°203, pp.75-90, mai-juin 1996b.

[GEMITIS, 1994] "Programme DIPCN/Méditerranée Projet GEMITIS/Nice (1993-1996) rapport 2ème année", rapport BRGM-CETE Méditerranée au Ministère de l'Environnement, document public BRGM R38241, 94H270, 72 pages + annexes, déc. 1994.

[Duval, 1998] Duval A.-M. et S. Vidal, "Microzonage de Tunis (Tunisie), Etude de l'aléa sismique local par enregistrement de séismes et de bruit de fond", Compte rendu de recherche du CETE Méditerranée n°97.740.6060 au LCPC dans le cadre de la coopération CETE/LCPC/ENIT, Thème 036, Sujet 1 36 01 7 Actions sismiques, 100 pages, juil. 1998.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

[Duval, 2001a] Duval A.-M., P.-Y. Bard, B. Le Brun, C. Lacave-Lachet, J. Riepl, D. Hatzfeld, "H/V technique for site response analysis synthesis of data from various surveys", in Bolletino di Geofisica teorica ed Applicata, Vol.42, N°3-4, pp.2 67-280, 2001a.

[Duval, 2001b] Duval A.-M., S. Vidal, J.-P. Méneroud, A. Singer, F. De Santis, C. Ramos, G. Romero, R. Rodriguez, A. Pernia, N. Reyes, C. Griman, "Caracas, Venezuela, Site effect determination with microtremors"; Pure and Applied Geophysics, PAGEOPH, Vol.158, n°12, pp.2513-2523, 2001b.

[Duval, 2004] Duval A.-M., J.-L. Chatelain, B. Guillier, SESAME WP02 team "Influence Of Experimental Conditions On H/V Determination Using Ambient Vibrations (Noise)", in Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, August 2004, n°306, 2004.

[GEM-GEP, 2005] Bard P.-Y., A.-M. Duval, E. Bertrand, J.-F. Vassiliades, S. Vidal, P. Foin, P. Guéguen, C. Thibault, B. Guyet, F. Dunand, S. Bonnefoy-Claudet, J.-P. Méneroud, G. Vettori, "Le Risque Sismique à Nice: apport méthodologique, résultats et perspectives opérationnelles, rapport final GEM-GEP", publication sous l'égide des Maîtres d'Ouvrage (LCPC, CGPC, METATTM, MEDD, CANCA), 52 pages, avril 2005.

[Kudo, 1995] K. Kudo, "Practical estimates of site response, state of the art report", in Proc. 5th Int. Conf. On Seismic Zonation, 1995, Nice, France, 3, pp. 1878-1907.

[Nakamura, 1970] Nakamura Y., "A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface", in Quarterly Report RTRI., 30, 25-33, 1989.

[Nogoshi, 1970] Nogoshi M. and T. Igarashi, "On the propagation characteristics of microtremor", in J. seism. Soc. Jpn., 23, 264-280, 1970.

[Semblat, 2000] Semblat J.-F., A.-M. Duval, P. Dangla, "Numerical analysis of seismic wave amplification in Nice (France) and comparisons with experiments", in Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.19, n°5, pp.347-362, 20 00.

[Semblat, 2002] Semblat J.-F., A.-M. Duval, P. Dangla, "Seismic site effects in a deep alluvial basin: numerical analysis by the boundary element method", in Computers and Geotechnics, COGE 812, 29(7), pp.573-585, 2002.

[Semblat, 2008] "Modélisation des effets de site", BLPC 2008.

[Singh, 1988] S.K. Singh, J. Lermo, T. Dominguez, M. Ordaz, J.-M. Espinoza, E. Mena, R. Quass, "The Mexico earthquake of september 19, 1985 - A study of amplification of seismic waves in the valley of Mexico with respect to a hill zone site", Earth. Spect., 4 (1988), P. 653-673.

[Schnabel, 1972] P.B. Schnabel, J. Lysmer and H. Bolton Seed, "SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontal layered sites", Report n° UCB/EERC-72/12, EERC, Univ. of California, Berkeley, Dec. 1972, 102p.

[RISKUE, 2004] P. Mouroux, B. Lebrun, S. Depinois, E. Bertrand, P. Mazure, "Projet européen RISK_UE: application à la ville de Nice", rapport final BRGM/RP-53202-FR, sept 2004.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

3.4 Résultats du projet européen Sesame

Ce chapitre 3-4 est issu d'un projet d'article soumis au BLPC en juillet 2007 dans le cadre d'un numéro spécial du bulletin sur les risques sismiques.
Titre de l'article: "Synthèse des travaux et résultats du projet européen Sesame"
Auteurs: Anne-Marie Duval, Pierre-Yves Bard

3.4.1 Introduction

Entre 2001 et 2004, le LCPC (via l'UMR LGIT) a conduit un projet de recherche européen (n° EVG1-CT-2000-00026). Ce projet, baptisé SESAME (Site EffectS assessment using AMbient Excitations) a regroupé 12 des principales équipes européennes concernées par les méthodes expérimentales de détection d'effet de site (voir liste page 39).

Le projet s'inscrivait dans le domaine de la gestion du risque sismique par la définition des effets de site, spécialement en milieu urbain. Il visait à éclaircir les conditions de mise en œuvre et les limites d'interprétation des méthodes d'investigation basées sur le bruit de fond sismique. Ces méthodes très rapides et économiques sont, depuis les années 2000, mises en oeuvre par un public de plus en plus large sans que leurs conditions d'utilisation ne soient reconnues unanimement par la communauté scientifique. Le but était donc de clarifier les possibilités concrètes de ces méthodes pour produire des informations utiles, directes ou indirectes sur les effets de site.

Les deux techniques concernées étaient « H/V bruit de fond » et la méthode dite « bruit de fond en réseau » consistant à obtenir une courbe de dispersion des ondes de surface et à l'inverser pour obtenir un profil de vitesse des ondes de cisaillement Le travail incluait une partie théorique et numérique pour mieux comprendre la nature du bruit sismique et pour développer des outils numériques capables de simuler du bruit sismique dans des environnements complexes. Il incluait également des approches expérimentales avec traitements de données réelles pour établir de manière consensuelle des bases communes de mise en oeuvre de ces méthodes. Ces travaux incluaient la stabilité et le fondement physique des résultats pour les deux techniques. Tous les résultats théoriques, numériques et analytiques ont été utilisés pour produire ensuite un guide de mise en œuvre de la méthode «H/V bruit de fond » et des recommandations pratiques d'utilisation des méthodes en réseau. Pour les deux méthodes, des logiciels ont également été développés et mis à disposition. Le projet a ainsi été articulé selon 4 axes:

- la technique H/V,
- les techniques de réseau,
- les fondements physiques et la simulation numérique pour croisement avec les données observées .
- la dissémination du savoir scientifique et des techniques de savoir faire à travers des ateliers spéciaux et des numéros spéciaux dans des revues internationales, la rédaction de guide de mise en œuvre et la réalisation d'un CDROM avec des logiciels de traitements validés pour la méthode H/V ainsi que des recommandations pour les techniques de réseau.

Les principaux moyens mis en œuvre et résultats de SESAME sont brièvement rappelés ici.

3.4.2 Simulations numériques du bruit de fond

Des avancées importantes ont été réalisées au cours du projet Sesame sur la compréhension de la nature du bruit et son utilisation grâce aux simulations numériques

Synthèse bibliographique

Une revue bibliographique approfondie a d'abord été réalisée notamment par S. Bonnefoy-Claudet au LGIT et à Bratislava sur la nature physique du bruit de fond (Délivrable 13.08). Le but était de synthétiser les évaluations portant sur les ondes composants le bruit ambiant: proportion d'onde de surface par rapport aux ondes de volume, proportion entre ondes de Rayleigh et ondes de Love, rapport entre modes fondamentaux et modes supérieurs. Les réponses trouvées sont rares et souvent partielles. Ce travail a donc conforté la démarche expérimentale entreprise d'une part (décrite dans les paragraphes suivants) et d'autre part la nécessité de mettre au point des techniques de simulation numérique du bruit ambiant, afin de progresser dans la compréhension des phénomènes en jeu dans l'interprétation des rapports H/V notamment.

© 2008 Tous droits réservés.

Outils de simulation

Pour générer numériquement du bruit de fond artificiel et simuler les rapports H/V, un ensemble de programme a été élaboré pour simuler du bruit provoqué par les activités anthropiques ("microtremor" en anglais) sur des sites avec des structures de sub-surface hétérogène. Deux modules ont été créés (Délivrable D02.09). Le premier (RANSOURCE) crée des sources aléatoires dans l'espace, le temps et l'amplitude selon des critères contrôlables. Les ondes sismiques générées sont ensuite propagées par un autre logiciel ("HISADA", Hisada, 1994) à travers une structure hétérogène 1D visco-élastique avec une surface libre plane. Le signal peut alors être analysé sur n'importe quel point récepteur prédéfini où l'on peut comparer les courbes H/V (calculé à partir des synthétiques) aux réponses théoriques 1D à une sollicitation d'onde de volume.

Simulations de l'application des techniques de bruit dans des structures 1D

La première application sur une structure 1D connue (fort contraste d'impédance entre une couche sédimentaire et un substratum) a montré que dans ce cas, la composante verticale du bruit est principalement contrôlée par des sources locales de surface. Le pic du rapport H/V autour de la fréquence de résonance du site est alors principalement lié aux ondes de Rayleigh (Délivrable 13-.08).

D'autres simulations numériques faites sur des modèles canoniques 1D ont montré que la composition physique du champ d'onde composant le bruit ambiant (et donc les rapport H/V) dépend principalement du contraste d'impédance acoustique entre substratum et sédiments et de la répartition des sources. Ainsi le pic H/V peut-être engendré par l'ellipticité des ondes de Rayleigh, la phase d'Airy des divers modes des ondes de Love ou la résonance des ondes de volume S. Mais ***quelle qu'en soit l'origine, la fréquence de ce pic donne toujours une bonne estimation (à 20% près) de la fréquence fondamentale de résonance du site***. Les mêmes simulations montrent en revanche que le niveau de ce pic ne doit pas être assimilé à l'amplification obtenue dans le mêmes simulations de propagation 1D.

Les données synthétiques de bruit engendré pour les différents modèles canoniques 1D ont été traités avec les techniques de réseau (CVFK et Capon, commentées plus loin). Dans la plupart des cas, les profils de Vs des modèles ont pu être retrouvés, lorsque les contrastes de Vs sont supérieurs à 50%. Par contre, pour le substratum, les vitesses obtenues sont beaucoup moins proches du modèle initial.

La poursuite des travaux engagés par D. Fäh [Fäh et al, 2002] a montré qu'une analyse en ondelette des rapports H/V issus de données synthétiques pour des structures 1D, permettait d'extraire les ondes de Rayleigh et d'inverser un profil de vitesse à partir de leur ellipticité.

Simulations de l'application des techniques de bruit dans des structures 2D ou 3D

Du bruit synthétique a ensuite été propagé numériquement dans différents modèles canoniques de structures 2D et 3D. La fréquence de résonance donnée par la technique H/V sur-estime dans ces cas la fréquence de résonance théorique 1D (donnée par une simple colonne de sol) d'environ 20%. En bordure de vallée, l'adéquation est encore moins évidente. De la même façon, la simulation de l'application des techniques de réseau délivre des résultats d'autant plus précis (proche du modèle initial) que les variations latérales de vitesse sont faible (et donc proche d'une structure 1D).

Des simulations ont également été réalisées sur la base de bassins réels (profond à Grenoble et plus superficiel à Colfiorito) pouvant être considérés comme des structures 3D. La confrontation avec des données réelles a montré que le bruit simulé est très proche du bruit réel, ce qui conforte le parti pris de simuler des sources de surface. Par ailleurs les résultats confirment la possibilité d'utiliser les rapports spectraux H/V pour produire des cartes d'épaisseur de sédiment, que les sédiments soit superficiels (fréquence de résonance réelle expliquée par une propagation 1D, Colfiorito) ou plus complexe (fréquence de résonance réelle expliquée par une propagation plus complexe, Grenoble). Sur les deux sites, l'application des techniques de réseau sur données synthétiques et réelles délivre également des résultats satisfaisants (même si l'épaisseur totale de sédiments est un peu sous-estimée sous le réseau à Grenoble). Ces simulations ont également permis de vérifier que le bruit ambiant enregistré dans une vallée par un réseau pouvait être exploité pour mettre en évidence les diffractions causées par les bords de la structure aux ondes sismiques.

Ces simulations ont donc permis de montré l'utilité des méthodes H/V et en réseau dans l'études des vitesses d'onde S en sub-surface.

© 2008 Tous droits réservés.

3.4.3 Avancées réalisées pour la technique "H/V bruit de fond"

La technique "H/V bruit de fond" a également été étudiée de manière à établir des conditions de mise en œuvre basées sur des études rigoureuses et contrôlables. Ainsi, les différents aspects de cette mise en œuvre ont fait l'objet de programmes communs de travail aussi rigoureux que possible dans leur conception et leur réalisation. Les aspects expérimentaux garantissant la stabilité et la reproductibilité des résultats ont été testés pour aboutir à des recommandations sur les mesures et les traitements. Un logiciel de traitement a été mis au point. Enfin une évaluation empirique de la méthode a été conduite sur la base de nombreuses données réelles de bruits, de séismes ainsi que de distributions spatiales des dommages occasionnés lors de séismes récents en Europe.

Recommandations techniques pour la mise en oeuvre

Le but des nombreuses équipes impliquées de ce travail était d'évaluer l'influence des conditions expérimentales dans la stabilité et la reproductibilité des résultats de la méthode "H/V bruit de fond. Une série d'études expérimentales paramétriques a été réalisée pour tester l'influence de plusieurs types de paramètres à la fois sur la fréquence et sur l'amplitude des pics remarquables dans les rapports H/V.

Les premiers tests ont concernés le matériel d'enregistrement lui même. Durant une semaine en octobre 2001, les équipes du projet SESAME ont comparé au Laboratoire de l'UiB à Bergen en Norvège, les capacités des dispositifs d'enregistrements disponibles (Figure 3.4—1). La plupart des capteurs et de nombreux numériseurs utilisés dans le monde ont pu ainsi être testés. Une des conclusions importantes de ce travail est que pratiquement tous les capteurs peuvent détecter des amplifications au moins dans les bandes de fréquences auxquelles ils sont censés répondre correctement, mis à part quelques accéléromètres très peu sensibles à proscrire. Les capteurs ayant une fréquence propre inférieure à 1 hertz sont particulièrement recommandés surtout pour des sites basse fréquence et spécialement à l'intérieur des continents ou l'énergie transportée par les ondes océaniques est faible (voir Délivrable D01.02).

Figure 3.4—1: Illustrations des travaux effectués lors du workshop de Bergen en octobre 2001 par les équipes SESAME. Comparaison des capacités de la plupart des instruments de mesure du bruit de fond.

© 2008 Tous droits réservés.

Bien d'autres paramètres expérimentaux capables de perturber la stabilité et la reproductibilité des résultats ont ensuite été testés. Chaque équipe a effectué ses propres tests dans son pays suivant une procédure commune afin que toutes les données puissent être intégrées dans une seule base et traitées de la même façon. 58 paramètres ont ainsi été énumérés et répartis dans trois grandes classes :

- Paramètres relatifs au système d'acquisition: matériel et paramètres d'enregistrement
- Paramètres relatifs aux caractéristiques du site lui-même: le type de sols, le couplage « naturel » entre le sol et le capteur, les interfaces éventuellement placées entre le sol et le capteur, les structures proches du site ou souterraines …
- Paramètres indépendants du site comme la météo, le niveau piézomètrique, l'heure ou les sources de bruit.

Parallèlement, des protocoles expérimentaux rigoureux furent fixées pour chaque test. Des formulaires de renseignements à remplir pour chaque test furent également constitués afin que les données collectées puissent être utilisées par tous avec la meilleure maîtrise possible (Figure 3.4—2). Chaque paramètre devait être testé au moins par deux équipes différentes. Le test consistait à réaliser plusieurs enregistrements en faisant varier uniquement le paramètre à tester lorsque cela était possible. Les campagnes de mesures réalisées par 8 équipes se sont étalées sur 2 ans. Elles ont permis de rassembler 596 tests.

identification of the record:	12.P7-1.T2.R1
SESAME Partner	12
test performed by (organisation)	CETE Méditerranée
Operator	Sylvain Vidal
Location of test /town/Country	Nice/France
Test site name or number (or geographical location)	Nice site global : CGE Point de mesure :28 Stations de pompage en eau potable pour la ville de Nice en rive gauche du Var dans son delta
date	25/09/2002
Local time	14:21
hour (UTC)	12:21
Nature of test:	Influence of level's water
n° of parameter to test	P7-1
n° of test	T2
n° of record in this test	R1
Name of the records in the same test	12P71T2R1 12P71T2R2
explanations about the whole test	Enregistrement du bruit de fond à proximité d'un puits (puits n° 07) la nappe étant à 4,50m de profondeur sous le capteur (R1) puis après une nuit de pompage intensif sur les puits n°06 07 et 08 la nappe étant alors rabattue de 1,10m et se situant à 5,60m sous le capteur (R2)
Main different parameter between this record and the other of the same test	Le niveau de la nappe phréatique sous le capteur. La nappe se situe à 4,50 m de profondeur
Other different parameters between this record and the other of the same test	Le moment de l'acquisition donc le bruit de fond
Site seismic response	
geology caracteristics	Alluvions profondes du Var
geotechnical data	
Records of earthquake (vs rock)	not available
Wz	not available
river, sea distance and azimuth	sea at 1000 m south
topography	plane
Information on noise sources and level	
identified sources during the record	Circulation routière et autoroutière intense
distance to nearest identified sources	100 à 200 m de la nationale et de l'autoroute
near structures	Immeubles à 80 m
trees	à 20 m
underground structure	puits de pompage
identification of instrument:	
Digitizer type (Bergen classification)	Lennartz MarsLite
Digitizer serial number	
Dynamic range of Digitizer	120db
Natural frequency of sensor	0,2 hertz
Sensor type (Bergen classification)	L5
Sensor serial number	152
Other specifications on sensor position, cable …	Cable 5m not winded
Information on coupling	Capteur directement posé sur la margelle en pierre de taille (calcaire) du puits (voir photos)
Record parameters:	
synchronism (GPS, DCF, internal clock)	Internal clock
analogic gain	SCA : 2
numerical gain	
Sample rate	125
Duration in sec	900 sec.
total number of samples in this record	122500
value of one count in m/sec in the ascii file taking into account the gain and the output voltage	

Figure 3.4—2: exemple de fiche de renseignement SESAME par site rempli pour les tests expérimentaux de H/V bruit de fond

Pour permettre le partage des données, un nouveau format sismologique numérique (SAF: Sesame Ascii File) a été élaboré par le symposium. Cette "création" commune (dans un univers où les nombreux formats de données constituent souvent des freins au partage) a contribué à l'ambiance chaleureuse de SESAME.

En parallèle avec les travaux de mise au point des outils logiciels évoqués plus loin, un traitement homogène a été réalisé sur ces données. La similarité des courbes entre un test et un enregistrement de référence a été quantifiée, à la fois pour la fréquence fondamentale et pour le niveau de la courbe au moyen du test de student (Délivrable D08.02). Pour chaque test, une fiche synthétisant les résultats a été créée (un exemple est fourni en Figure 3.4—3). A partir de des analyses statistiques effectuées, les paramètres ont été classés en trois grandes catégories:

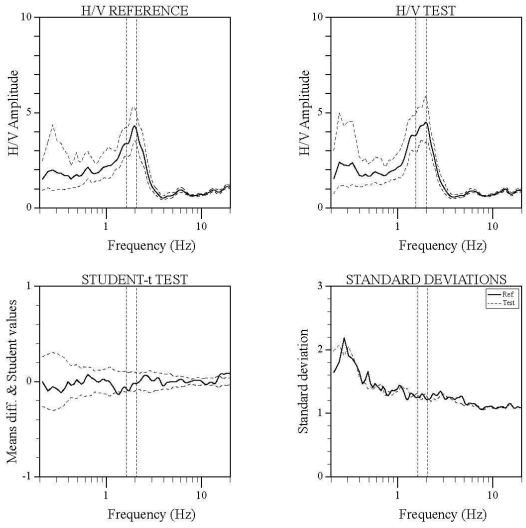
- Les paramètres qui n'influencent pas les résultats
- Les paramètres qui influencent les résultats et peuvent être contrôlés
- Les paramètres qui influencent les résultats et ne sont pas contrôlables

© 2008 Tous droits réservés.

Pour certains paramètres, les conclusions ne sont pas apparu clairement. C'est pourquoi le logiciel mis au point (voir plus loin) a été construit de manière à comparer facilement deux courbes (l'une testée et l'autre en référence). Ainsi, chaque utilisateur futur de la méthode est invité à tester tout paramètre de terrain (innombrables) ou de traitement dont l'effet ne serait pas décrit clairement dans les conclusions de la présente étude. Les très nombreux tests ont été commentés et souvent repris avant de pouvoir statuer sur l'importance du paramètre évalué. Les conclusions les plus importantes de l'analyse font apparaître que:

- Les paramètres de couplage sol-capteurs doivent être considérés avec soin: Le béton et l'asphalte donnent de bons résultats. Par contre les sols mous ou irréguliers, labourés, boueux, avec de hautes herbes (surtout en cas de vent), du gravier, de la glace, de la neige non compactée etc .. sont à éviter. La pose d'une interface entre les pieds du capteur et le sol ne doit se faire qu'en cas d'extrême nécessité, principalement pour compenser l'inclinaison du sol. Un bac de sable ou un trépied spécifique peuvent alors être utilisé.
- Il est recommandé d'éviter les mesures au voisinage de structures souterraines (parking, métro …) et même en surface (arbres, bâtiment). Lorsque ce paramètre ne peut être évité (en ville surtout), la mesure doit se faire sans vent fort.
- Les mesures sont à proscrire en cas de vent fort. En effet, il a été montré que le vent produit des perturbations en basses fréquences dans les rapports H/V.
- Les sources de vibrations proches sont à éviter: les pas, le trafic routier, les moteurs industriels, les souffleries … Les parades consistent d'une part et lorsque cela est possible à s'éloigner d'autant plus que la vibration est importante, d'autre part à rallonger la durée d'enregistrement et à bien calibrer l'anti-trigger pour que ces perturbations ne soient pas incluses dans les traitements.
- Les résultats sont stables avec le temps (pour autant que tous les autres paramètres restent également identiques)
- Quel que soit l'influence d'un paramètre sur l'amplitude du rapport H/V, la valeur du pic en fréquence n'est que très rarement affectée (sauf en cas de mesures proches de structures et avec du vent)

Cette étude s'est traduite par des recommandations de terrain et de traitement (délivrable D32.12) dont une fiche de terrain rappelant les points essentiels à retenir sur le terrain (Tableau 3.4—1).



	File name	f0 (H/V) (Hz)	Nb win	Sample rate (Hz)	Recording duration (s)	Frequency stastistics from individual windows			
						f0 (Hz)	Sigma (Hz)	Nb win	Student-t test
Ref.	09251220.saf	1.98	23	125	980	1.85	0.23	23	|dif| = 0.07 t = 0.23 Similar peak frequencies
Test	09260611.saf	1.98	29	125	1036	1.78	0.23	29	
	Conclusion	No influence inside the peak zone, negligible influence outside (9%)							

	Recorder	Sensor	Rec. type : sequential	Medium frequency site
Ref.	Mars Lite	5-second Lennartz LE3D	**P7-Nice-test1** Influence water table Ref : level at -4.5 m ; Test : level at -5.6 m	
Test	Mars Lite	5-second Lennartz LE3D		

Figure 3.4—3: Exemple de fiche de conclusion du test sur le paramètre P7: influence du niveau piézomètrique de la nappe sous le capteur.

© 2008 Tous droits réservés.

Figure 3.4—4: Photo du capteur sismologique durant le test correspondant à la Figure 3.4—3.

Type de paramètres	Recommandations principales	
Durée d'enregistrement	Fo (Hz) minimale attendue	Durée minimale recommandée pour l'enregistrement
	0.2	30 minutes
	0.5	20 minutes
	1	10 minutes
	2	5 minutes
	5	3 minutes
	10	2 minutes
Distance entre les mesures	- Microzonage: commencer avec une distance large (par exemple une grille de 500 m) puis en fonction de la variation des résultats, densifier les points de mesure avec un espacement de 250 m par exemple. - Réponse d'un site: Plusieurs point de mesures sont toujours nécessaires pour établir Fo sur un site.	
Paramètres d'enregistrement	- Niveler les capteurs en suivant les recommandations du constructeurs - Amplifier le signal au maximum sans atteindre la saturation.	
Couplage "in-situ" entre sol et capteur	- Poser le capteur directement sur le sol lorsque cela est possible. - Eviter les sols "mous": argiles, labours, herbes hautes …) ou les sols saturés en haut (après la pluie)	
Couplage artificiel entre sol et capteur	- Eviter les plaques faites de matériaux " mous" comme le caoutchouc mousse ou le carton. - Sur des pentes fortes qui empêche un bon nivellement du capteur, installer ce dernier sur un tas de sable ou dans une bassine de sable. - Sur la neige ou la glace, afin d'éviter le basculement du capteur du à la fonte, installer le capteur sur une plaque de métal ou de bois ou une bassine de sable	
Structures voisines	- Eviter d'enregistrer près de structures comme des immeubles, des arbres etc. en cas de fort vent (plus de 5 m/sec environ). Cela peut induire des basses fréquences dans les résultats. - Eviter les mesures sur des structures enterrées comme les parkings, les conduites, les plaques etc.	
Conditions météorologiques	- Vent: protéger le capteur du vent (à partir de 5 m/s environ) est utile seulement lorsqu'il n'y a pas de structures voisines - Pluie: éviter les mesures par forte pluie (une pluie légère n'a pas d'influence) - Température: suivre les instructions du fabricant pour l'ensemble de la chaîne d'enregistrement.	
Perturbations	- Sources monochromatique: éviter les mesures près des engins de chantiers, moteurs industriels, pompes, générateurs … - Signal transitoire: en cas de signal transitoire (voiture, pas …) augmenter la durée d'enregistrement pour permettre de disposer de suffisamment de signal calme sans transitoire.	

Tableau 3.4—1: Fiche de terrain synthétisant les principales recommandations de mise en oeuvre de la technique H/V bruit de fond.

© 2008 Tous droits réservés.

Logiciels de traitement du signal pour H/V : JSESAME

Le logiciel J-SESAME a été réalisé par le consortium SESAME et mis à disposition gratuite de tout public, avec le guide de mise en œuvre de la méthode"H/V bruit de fond". Cette application Java (pour permettre sa portabilité vers les plate formes informatiques sous MS Windows, Linux, Unix et Macintosh) permet un traitement rapide et homogène des données recueillies. Son interface graphique a été particulièrement soignée pour permettre le traitement des données par des non-spécialistes du domaine technique. Il propose ainsi de réaliser très facilement un traitement standard ou bien de s'en écarter plus ou moins en modifiant un plusieurs paramètres.

JSESAME est basé sur une architecture modulaire comprenant:

- un module principal de choix des actions,
- un module de sélection des fenêtres à traiter, un module de traitement spectral,
- un module de visualisation des résultats.

Les fonctionnalités principales sont intégrées par une interface utilisateur graphique, qui fait partie du module de survol. Le module d'affichage est également étroitement relié au module principal grâce au développement intégré sous Java. Par contre les modules de sélection des fenêtres et de traitement spectral ont été écrits dans d'autres langages (Fortran et C). Ils sont appelés par le module principal avec un jeu de paramètres de traitement modulables. JSESAME supporte deux formats de données sismologiques d'entrée : GSE et SAF.

La sélection des fenêtres de données à traiter peut se faire automatiquement ou manuellement. L'objectif est de conserver pour le traitement la partie la plus "stable" du signal sismique enregistré. L'appréciation de la stabilité d'un signal vibratoire composé de bruit de fond dépend très largement de la largeur de la fenêtre de visualisation et surtout de critères propres à chaque opérateur. Pour rendre plus systématique et reproductible cette sélection, JSESAME propose l'automatisation de la sélection grâce à un principe déjà mis en œuvre par nombres de spécialistes: l'anti-déclencheur. Les algorithmes permettant de repérer automatiquement un séisme dans un signal sismique (afin de "déclencher" un processus d'enregistrement par exemple) sont utilisés en sens inverse. Il s'agit alors de repérer les fenêtres dans lesquelles le signal ne dépasse pas une certaine proportion de la valeur maximale enregistrée. Il est possible de jouer sur les paramètres de ces algorithmes pour moduler la sélection automatique des fenêtres et d'exclure certains types de signaux considérés comme des parasites. Un jeu de paramètres par défaut assure la standardisation du processus.

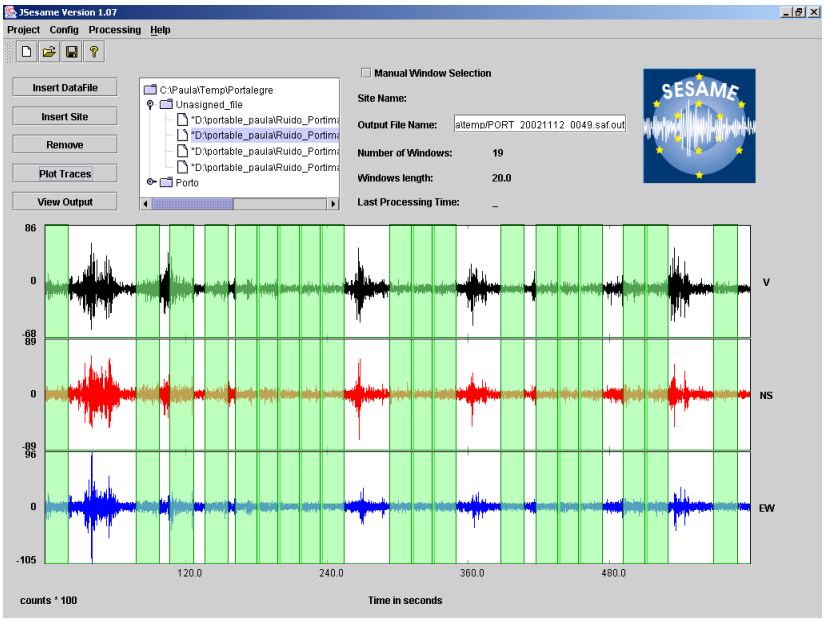


Figure 3.4—5: Interface graphique de JSESAME avec les fenêtres de signal sélectionnées en vert.

Le module central de JSESAME calcule les rapports spectraux H/V de chaque fenêtre ainsi que la moyenne par enregistrement. La fenêtre de signal sélectionnée subie d'abord une apodisation (de forme et d'intensité réglable) et éventuellement une correction de décalage (offset). Puis le signal est décomposé en séries de Fourier par un algorithme FFT (Fast Fourier Transform). Enfin le rapport des spectres des voies horizontales sur vertical est effectué. Ce traitement s'accompagne de nombreuses

© 2008 Tous droits réservés.

options comme le filtrage préalable du signal, le lissage des courbes résultantes, diverses possibilités de combinaison des composantes horizontales, le traitement d'un ou plusieurs fichiers de signaux simultanément grâce au traitement par lot. La réponse instrumentale (capteur et numériseur) est censée être déconvoluée du signal avant l'analyse spectrale La plupart du temps cependant, cette réponse peut être considérée comme similaire pour les voies horizontales et verticales et cette déconvolution n'est donc pas nécessaire.

Le module d'affichage permet alors de visualiser et de sauver les résultats du traitement par une série de graphes qui peuvent être configurés par l'opérateur.

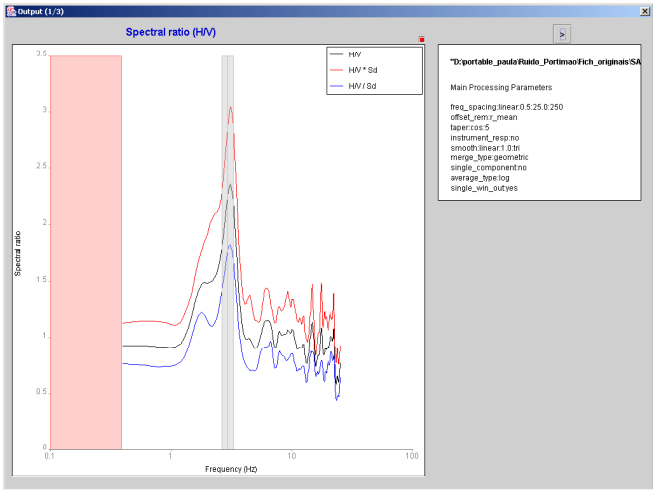


Figure 3.4—6: Rapport H/V ou H correspond à une combinaison des voies horizontales (moyenne en noir, moyenne multipliée et divisée par 10 a(logH/V), en rouge et bleu).

Sur l'exemple de la Figure 3.4—6, le bandeau rose indique automatiquement la bande de fréquence où le taux d'échantillonnage et la largeur des fenêtres utilisées rendent les données inexploitables. Le bandeau gris permet lui de visualiser la fréquence du pic principal du rapport H/V (fo) plus ou moins un écart-type. Celui-ci est calculé à partir des fréquences fo de chaque fenêtre individuelle.
La Figure 3.4—7 présente elle les spectres et rapports spectraux moyens obtenus à partir d'un fichier en considérant séparément les voies Nord-Sud et Est-Ouest. Chacun des graphes de ce module de visualisation peut être sauvegardé en tant qu'image pour une utilisation ultérieure.

Les spécificité du logiciel JSESAME peuvent être consultées en détail dans le délivrable D09.03.

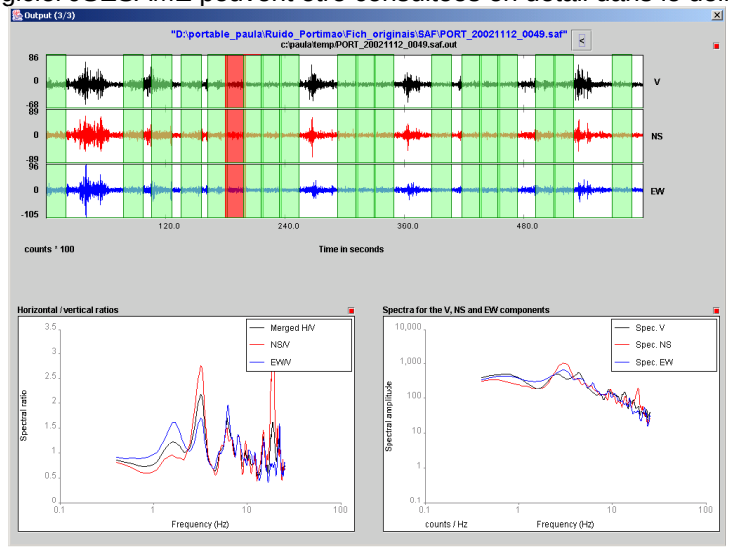


Figure 3.4—7: Résultats pour des fenêtres individuelles: les rapports H/V (en bas à gauche) et les spectres moyens (en bas à droite) proviennent du traitement des fenêtres de signaux surlignées en vert en haut.

© 2008 Tous droits réservés.

Evaluation empirique de la technique H/V

L'évaluation empirique de la méthode a consisté à confronter les courbes H/V à d'autres résultats expérimentaux:

- o des fonctions de transfert "classiques" expérimentales (à partir d'enregistrement de séismes rassemblées dans une base de données commune) d'une part
- o et des dommages observés durant plusieurs séismes européens récents d'autre part.

a. Comparaison avec des fonctions de transfert "classiques"

Chacune des équipes du consortium SESAME a fourni des données de nombreuses campagnes de terrain de détermination des effets de site recueillies dans le monde. Une base de données (Access) regroupant 211 sites a été créée (Tableau 3.4—2). 1227 séismes de magnitude comprise entre 0.1 et 8.2 ont été enregistrés par ces sites, ce qui se traduit par 5194 enregistrements . Les fichiers d'enregistrement de séismes (mouvements forts et plus modérés) et de bruit de fond ont été intégrés au format SAF. Pour chaque site et chaque évènement une feuille standard d'information (SIS pour Standard Information Sheet) a été créée par les fournisseurs de données. Cette feuille contient des informations qualitatives et quantitatives sur les données enregistrées, les conditions de site et les paramètres d'enregistrement.

Pour faciliter la sélection de données par critère, un outil informatique de gestion de la base de données SESAME a été élaboré. Cette base de données est maintenant diffusée par le consortium afin de permettre tout type d'analyse.

INSTITUTS	Nom des sites	Feuilles d'informations (SIS)	Evènements	Energistrements
ITSAK	S.M. NETWORK	63	288	492
	EUROSEISTEST	7	56	247
INGV	BENEVENTO	6	42	188
	CATANE	3	31	85
	CITTA-CASTELLO	15	10	140
	VERCHIANO	9	15	122
	COLFIORITO	3	23	69
CNR	FABRIANNO	6	81	326
	PREDAPPIO	18	128	1230
	ROVETTA	4	14	44
CETE Méditerranée	NICE	5	16	57
	EBRON	4	16	67
	GUADELOUPE	7	17	85
LGIT	TEHERAN	14	149	1347
	LOURDES	10	21	149
	GRENOBLE	15	31	208
ETHZ	S-M NETWORK	22	62	115
TOTAL		211	1227	5194

Tableau 3.4—2: Liste des données intégrées dans la base de données "mouvements forts - bruit ambiant" de SESAME avec feuilles d'information (SIS).

Durant SESAME, cette base de données a permis la comparaison des courbes H/V avec les fonctions de transfert "classiques" issues de séismes. Toutes les données disponibles ont été traitées avec une procédure standardisée à l'aide du logiciel JSESAME (mêmes techniques de lissage et de calcul de moyennes) pour obtenir les valeurs remarquables des courbes issues des différentes méthodes. Les fonctions de transfert expérimentales issues de deux enregistrements du même séisme (site test et référence) ont été comparées aux rapports spectraux H/V pour les enregistrements de bruit (et de séismes) en terme de fréquence fondamentale et de niveau d'amplification. L'analyse statistique des résultats montre que:

- Pour la majorité des sites examinés (90%), une bonne corrélation a été constatée entre ces deux types de courbes entre la fréquence fondamentale (pic de la fonction de transfert) et la fréquence du pic maximal de H/V (Figure 3.4—8). Pour les 10 % des sites ne donnant pas une bonne corrélation, l'explication physique de l'écart entre les courbes n'est pas évidente. Ces sites correspondent à des colonnes de sols rigides et épaisses sans contraste d'impédance notable en profondeur.
- Pour la majorité des sites examinés (90%), l'amplitude du pic maximale sur la courbe H/V est plus faible que celle constatée sur la fonction de transfert à la fois pour la fréquence fondamentale (pic de la fonction de transfert) et pour la fréquence du pic maximal de H/V (Figure 3.4—9). Cette observation empirique n'est pas encore expliquée. Elle motive en partie les travaux qui se poursuivent

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

après SESAME sur les données de mouvements forts (réseau japonais KIK-NET) au LGIT et au CETE Méditerranée (Thèse H. Cadet) pour savoir si ce phénomène doit être considéré comme général.

- La forme générale des courbes H/V et des fonctions de transfert diffère sur la plupart des sites, ce qui confirme que les rapports H/V ne doivent pas être confondus avec une fonction de transfert d'une onde Sh: l'amplitude et la largeur de bande amplifiée sont plus importantes sur la fonction de transfert.
- La comparaison des rapports H/V issus de bruit ambiant et de séismes (fonctions récepteurs) conduit aux mêmes conclusions: similarité des fréquences pointées mais amplitude plus modérée pour les rapports issus du bruit ambiant.

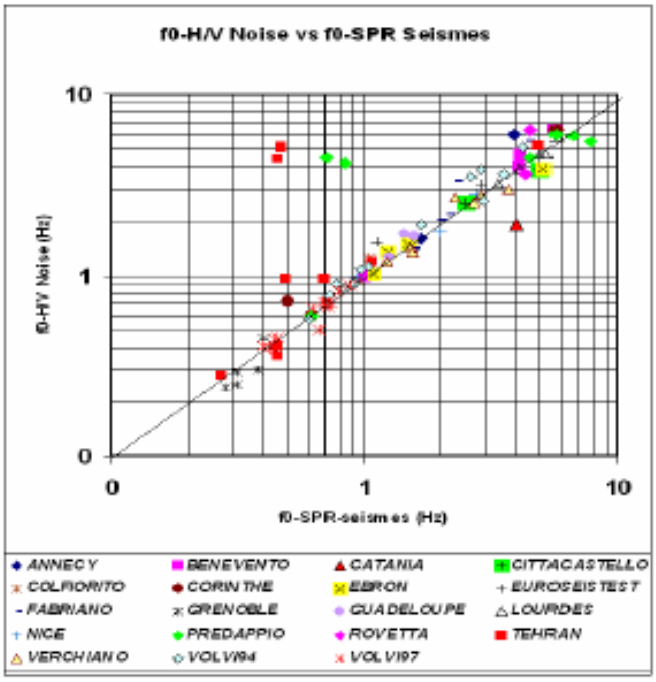


Figure 3.4—8:Comparaison de la fréquence fondamentale Fo détectée avec la méthode « H/V bruit de fond » et la méthode classique "site/référence" par enregistrement de séismes.

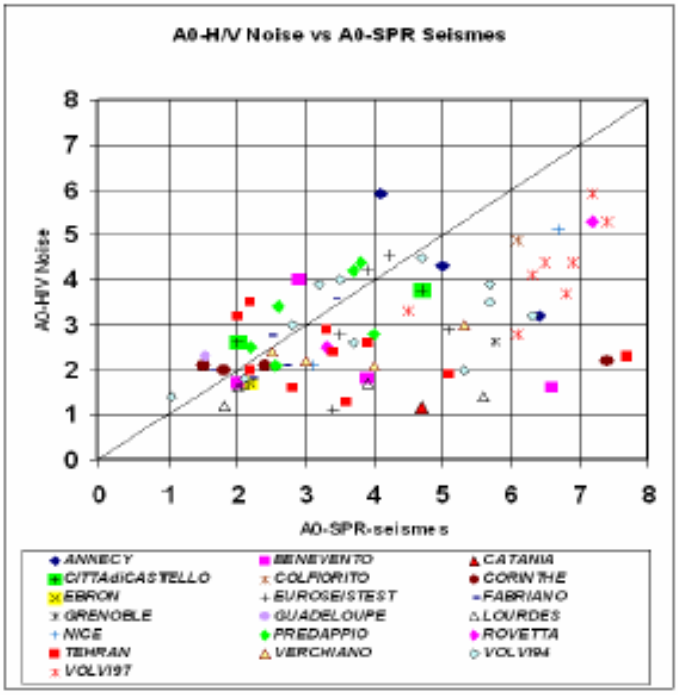


Figure 3.4—9: comparaison du niveau d'amplification Ao détectée avec la méthode « H/V bruit de fond » et la méthode classique "site/référence" par enregistrement de séismes

© 2008 Tous droits réservés.

b. Comparaison avec les dommages observés durant plusieurs séismes européens récents.

Les rapports spectraux H/V bruit de fond ont été comparés à la distribution des dommages constatées dans six villes modernes d'Europe: Thessalonique et Kalamata (Grèce), Rome, Fabriano et Palerme (Italie) et Angra-do Heroismo (Portugal). Pour ces villes, la répartition des dommages était accessible sous la forme de carte d'intensité selon l'échelle MSK64 ou EMS98, ou selon des échelles locale de dommage complétées de cartes géologiques. Des campagnes de mesures de bruit de fond ont été conduites. Les données ont été traitées de manière à produire des cartes de fréquence et d'amplitude du pic maximal des rapports H/V.

La plupart des comparaisons entre les deux types de cartes ont été qualitative (visuelle). Quelques essais de comparaison quantitative ont également été tentés ([Theodulidis N. et al, 2004], [Cultrera G., 2004], [Teves-Costa, 2004]).

La corrélation des résultats s'avère très variable : de convaincante en certains sites, les liens entre dommages et rapports H/V s'avèrent très difficiles dans d'autres zones. Le nombre des paramètres en cause (en dehors mêmes des aspects sismologiques) et la complexité de leur liens participent certainement à la difficulté de corrélation, voire à son absence. Le lien entre les rapports H/V "bruit de fond" et la géologie de couverture est beaucoup plus facilement mis en évidence.

Guide européen de mise en œuvre de la méthode

L'ensemble des travaux évoqués ci dessus a permis de dresser des conclusions importantes sur la mise en œuvre, le traitement et l'interprétation des données "H/V bruit de fond". Ces conclusions, présentées dans le détail dans le "guide SESAME de mise en œuvre de la méthode H/V" sont le fruit d'analyses compréhensibles et détaillées réalisées par les participants au projet durant plus de quatre ans. A cet égard, le guide représente l'état de l'art des connaissances actuels sur la méthode et ses applications. Les recommandations sont issues du plus large consensus entre participants. Il reflète la synthèse d'un volume considérable de données, leurs analyses et leurs interprétations.

De manière générale, vue le caractère expérimental de la méthode, toutes les valeurs obtenues sur un site requièrent un examen méticuleux. Dans ce sens, l'examen visuel des données durant l'acquisition et le traitement est nécessaire. L'analyse critique est spécialement demandée au cours de la phase d'interprétation dans le choix des paramètres de traitement.

Les recommandations du guide sont données dans le cas où la méthode est utilisée pour des études locales d'effet de site (voir un microzonage) sans autre information sur la fréquence propre des sites, ce qui explique la rigidité des critères d'interprétation. Il est toutefois largement recommandé d'utiliser la méthode H/V en la combinant à d'autres approches géophysiques et géotechniques et avec une compréhension satisfaisante des conditions géologiques locales. Dans ce cas, l'interprétation des résultats de H/V peut amélioré significativement la détermination des effets de site en compléments des autre données.

Le guide est organisé en deux parties principales et deux annexes:

- La première partie est composée des fiches synthétiques de terrain et d'un guide d'interprétation. Elle résume les facteurs les plus sensibles qui peuvent influencer la collecte des données, leur analyse et leur interprétation (sous forme de schémas simplifiés)
- La seconde partie recèle les recommandations techniques détaillées concernant les conditions de mise en œuvre, le traitement et l'interprétation
- Les parties 1 et 2 évoquent de nombreux exemples de critères qui sont développés en détail dans l'annexe A
- L'annexe B présente les principales explications physiques disponibles actuellement sur la base de considérations théoriques

Ce guide constitue le délivrable D23-12 du projet SESAME.

3.4.4 Avancées réalisées pour les techniques de réseau

Comme cela a déjà été mentionné, l'un des besoins pressants pour la prédiction numérique des effets de site est d'établir les modèles sur la base de valeurs vraisemblables concernant la géométrie et les caractéristiques mécaniques en sub-surface. De nombreux outils géophysiques existent, mais sont rarement utilisés pour des projets courants. De plus, leur utilisation dans des zones urbanisées est limitée soit parce qu'ils nécessitent l'installation de matériels lourds ou de tirs impossibles en ville,

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

soit parce qu'ils ne fournissent des informations que dans les couches les plus superficielles (au dessus de 30-50 mètres). Les techniques d'investigations profondes (comme la sismique réflexion ou les sondages mécaniques) sont très rarement utilisées en Europe ou dans les pays en voie de développement à cause de leurs coûts considérés comme prohibitifs.

Ce besoin de développement d'outils "urbains" d'exploration géophysique, permettant des investigations profondes (plusieurs centaines de mètres) et complémentaires d'outils de géophysique très superficiels, peut être comblé par les mesures de bruit ambiant en réseau. De fait, plusieurs équipes japonaises ont travaillé sur la possibilité de retrouver la courbe de dispersion des ondes de surface à partir de mesures en réseau, soit par une analyse de type fréquence-nombres d'ondes, soit par une technique d'auto-corrélation spatiale [Aki, 1957], puis d'inverser le profil de vitesse des ondes P et S jusqu'à de grandes profondeurs (plusieurs km pour des ouvertures de réseau de 2 à 4 km). Ceci requière l'hypothèse d'une structure stratifiée horizontale pas toujours rencontrée dans la réalité.

Lorsque le projet SESAME a démarré, seules quelques équipes japonaises utilisaient ces techniques de bruit en réseau et aucune en Europe ou aux Etats Unis (où quelques tentatives avaient pourtant été faites avec des signaux très particuliers, les vibrations volcaniques). Notre objectif était donc d'acquérir quelque expérience sur ces techniques et d'étudier leur capacité à délivrer des informations utiles sur les conditions de site les plus simples (1D) mais aussi pour des structures géologiques plus complexes (2D, 3D). En plus des développements sur la théorie et le traitement de signal, une composante importante de notre travail était dévolue à l'utilisation d'autres sources d'information que les mesures de bruit en réseau, c'est à dire l'introduction d'information "à priori" dans l'inversion des courbes de dispersion. Cette information peut provenir de campagnes de géophysique superficielle et/ou d'investigations géotechniques souvent nombreuses en ville.

Dérivation des courbes de dispersion WP06

Plusieurs techniques de traitement de réseau sont disponibles pour estimer les vitesses de phase et les courbes de dispersion: CVFK, CVFK2, Capon, Music et SPAC. Les quatre premières sont dédiées à la détection des ondes planes traversant le réseau (vitesse de phase et back-azimut), tandis que la dernière (SPAC) est basée sur l'hypothèse que le champs d'onde est stochastique et stationnaire dans le temps et dans l'espace et permet de retrouver seulement la vitesse de phase.

- CVFK, d'après [Kvaerna, 1986] est une méthode classique fréquence nombre d'onde, basée sur un calcul de semblance sur des fenêtres de temps glissantes et des bandes de fréquences étroites.
- CVFK2 est aussi une estimation classique de la fréquence-nombres d'onde basée sur l'évaluation de la matrice $R(\omega)$ de corrélation spectrale.
- L'approche en fréquence nombre d'onde haute résolution de Capon [Capon, 1969] est également basée sur la matrice $R(\omega)$ de corrélation spectrale. Cette technique F-K est largement utilisée dans le contexte d'analyse de bruits ambiant (voir [Tokimatsu, 1997], [Tokimatsu, 1992], [Arai, 2004]).
- "MUSIC" est une autre méthode en fréquence-nombre d'ondes haute résolution introduite par [Schmitt, 1986] basée sur la décomposition de la matrice de corrélation en sous-espace de signal et de bruit.
- SPAC (pour "SPatial AutoCorrelation method"), d'abord introduite par [Aki, 1957] a été développée plus tard par différents auteurs pour des applications aux volcans. Sa formulation d'origine demande de nombreuses paires de capteurs selon une distribution azimutale uniforme et une distance inter-capteur constante. Récemment, une modification a été permettre des configurations de réseau moins "idéales" [Bettig, 2001].

Pour tester parfaitement les méthodes et établir leurs avantages et inconvénients, elles ont été implémentées dans un logiciel unique (CAP, [Ohrnberger, 2004]) et appliquées à une série de données synthétiques bien contrôlées, ainsi qu'à des données réelles. L'objectif était de déterminer dans quelles circonstances l'analyse du champs d'onde de bruit ambiant peut délivrer une bonne caractérisation de la dispersion des ondes de surface liée au site.

Une première série de test sur des ondes simulant du bruit ambiant a permis d'évaluer l'influence combinée de la configuration du réseau (nombre de capteurs, géométrie et distance inter stations), des effets de la distribution des sources et de la propagation, et des techniques de réseau sur l'évaluation des courbes de dispersion. Pour des champs d'ondes réels, avec des sources distribuées de manière aléatoire, l'interprétation directe des valeurs en fréquence-lenteur n'est pas immédiate. La

© 2008 Tous droits réservés.

première explication de cette difficulté tient à un défaut de résolution dû à la configuration géométrique du réseau induisant un biais dans les valeurs de lenteur. La deuxième explication est liée à la contribution des modes supérieures des ondes de Rayleigh dont les caractéristiques se mêlent au fondamental. L'inversion des ondes de cisaillement requière alors des stratégies fines et non standardisées pour essayer de "deviner" le nombre de modes à chaque fréquence.

Les tests réalisés montrent que la bande de fréquence dans laquelle la technique F-K fournit une bonne estimation de la courbe de dispersion est limitée:

- En basses fréquences, l'origine de la limite est double: insuffisance de résolution due à la géométrie du réseau ou énergie spectrale trop faible sur la composante verticale des ondes de Rayleigh.
- En hautes fréquences, la limite est souvent contrôlée par le recouvrement fréquentiel (aliasing) du à des distances entre les stations trop grandes.
- Comparée au méthode F-K, la technique SPAC donne une bonne estimation des caractéristiques de dispersion sur des bandes de fréquence plus larges et permet de plus une reconnaissance plus aisée des modes supérieurs à partir d'oscillations "suspectes" des courbes de corrélation.

Comme cela est décrit dans [Ohrnberger, 2004], ces résultats ont permis de déduire des recommandations pratiques pour la dérivation des courbes de dispersion:

- la première consiste à utiliser non pas une seule technique, mais une combinaison des méthodes pour déterminer une bande de fréquence valable et obtenir des limites d'incertitudes.
- la seconde consiste à accentuer l'une de ces techniques. Bien que toutes les méthodes F-K fonctionnent raisonnablement bien en général, deux sont spécialement recommandée: CVFK et Capon. La technique classique F-K s'est montré la plus stable et la plus robuste. Elle permet en outre une évaluation raisonnable des incertitudes, ce qui compense largement ces faibles capacités de résolution. Une information supplémentaire valable peut alors être fournie par la technique haute résolution de Capon, grâce à des estimations moins biaisées et à une meilleure efficacité face au recouvrement (aliasing) en hautes fréquences. En complément de ces techniques F-K, la méthode SPAC est aussi recommandée pour des vérifications croisée des résultats et pour détecter d'éventuels modes supérieurs. Des résultats contradictoires issus de ces méthodes peuvent indiquer le manque de fiabilité des courbes de dispersion.
- la troisième est une recommandation de terrain pour la mise en œuvre de stratégie de déploiement de réseau adaptée, partant des petites longueurs d'ondes (petits réseaux) et allant vers les grandes longueurs d'onde (réseaux à large ouverture). L'optimisation de telles stratégies de terrain adaptées demande toutefois un logiciel de terrain en temps quasi réel qui n'est pas encore réalisé.

Inversion des profiles de vitesse

Considérant la non-linéarité élevée et la non-unicité des solutions, une nouvel algorithme d'inversion a été écrit [Wathelet, 2004] à partir de l'algorithme "de voisinage" proposé initialement par Sambridge ([Sambridge, 1999a] et [Sambridge, 1999b]. Cette approche permet d'accélérer significativement les processus d'inversion, de prendre en compte les incertitudes de la courbe de dispersion et d'incorporer des informations à priori (par exemple la fréquence du pic H/V, ou, sur la base d'estimations indépendantes, l'épaisseur de sédiment et/ou la vitesse des ondes P). Les résultats ne forment pas un profil de vitesse unique mais un jeu de profiles jugés compatibles avec les données (c.a.d. à l'intérieur d'un intervalle de confiance définie par la fonction d'erreur). En plus d'un mode de définition très souple des gammes de valeur des paramètres à inverser, elle permet une inversion directe des courbes de corrélation (sautant directement des courbes de corrélation aux profiles de vitesse), une inversion automatique multi-mode, une inversion combinée des courbes de dispersion et des courbes H/V, ainsi qu'un calcul des fonctions de transfert pour l'ensemble des modèles.

L'inversion multi-mode automatique constitue en elle-même une avancée significative: pour certains sites, les courbes de dispersions issues des méthodes f-k ne correspondaient pas toujours au modes fondamentaux des ondes de Rayleigh, en particulier en hautes fréquences pour lesquelles la courbe de dispersion peut également être mesurée par des sources actives. Les tests effectués sur des modèles synthétiques de 2 à 4 couches ont clairement montré qu'une mauvaise interprétation d'un mode, même sur une bande de fréquence limitée, peut changer radicalement les résultats finaux, spécialement pour la profondeur des interfaces. Il était donc important de développer un schémas d'inversion qui prenne en compte cet aspect.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Dans l'approche classique, pour chaque fréquence, le calcul d'erreur est basé sur la différence entre la vitesse calculée pour le mode fondamental et la vitesse mesurée. Si plusieurs modes sont identifiés, chaque vitesse mesurée est comparée à sa valeur correspondante calculée. Si les modes ne sont pas clairement identifiés mais seulement suspectés, l'écart pour une fréquence particulière est alors définie comme l'écart minimum parmi les écarts calculés entre la vitesse mesurée et les vitesses calculées pour tous les modes (le nombre maximal de modes est fixé à priori par l'utilisateur). Pour éviter les oscillations entre modes dans la bande de fréquence, une règle spécifie que le numéro d'ordre du meilleur mode ne doit pas augmenter quand la fréquence décroît. Ce schémas d'inversion amélioré du "mode à deviner" conduit à des résultats satisfaisants: la non-unicité de la solution au problème n'est pas trop augmentée, alors qu'on peut être certain de ne pas "oublier" un mode ou de mal interpréter une valeur de vitesse de phase. D'un autre côté, étant donné que les courbes H/V sont principalement liées au temps de trajet entre la surface et le toit du substratum, inclure ces résultats dans l'inversion est un excellent moyen de s'affranchir des modèles qui débouchent sur de fausses épaisseurs de sédiments. L'inversion combinée des courbes H/V et des courbes de dispersion pour des modes mixtes a été testée et s'est révélée capable de contraindre parfaitement les profile de Vs dans les couches sédimentaires et même dans le substratum.

Ce logiciel d'inversion a été connecté avec celui d'analyse de réseau (CAP) et avec une base de données de signaux sismiques, et constitue aujourd'hui un outil puissant et commode pour analyser des données de réseau (bruits synthétiques ou enregistrements réels).

3.4.5 Conclusions

Les chapitres ci dessus ne présentent qu'un bref résumé des actions conduites dans le cadre du projet SESAME et des résultats obtenus en 4 ans par le consortium. Pour de plus amples informations, de nombreuses publications sont disponibles en commençant par les nombreux rapports techniques diffusés sur le site du projet (http://sesamefp5.obs.ujf-grenoble.fr.) ainsi que les articles décrivant chaque axe du projet et présentés lors de la session spéciale "SESAME" du 13^{ième} congrès international de génie parasismique de Vancouver en 2004.

Au début du projet, la plupart des participants étaient intéressés par la technique H/V et tous étaient mobilisés par l'objectif clef de SESAME: la diffusion libre et gratuite d'un "colis H/V" incluant un logiciel de traitement multi-plateforme et un guide de mise en œuvre. Cet objectif a été atteint grâce à un réel et intense travail d'équipe. Simultanément, les efforts de recherche consentis autour des techniques de réseau ont dissipé beaucoup de scepticisme dans nos rangs, vérifiant ainsi les assertions de nos collègues japonais. De nombreuses équipes dans le monde travaillent sur ces données de bruit de fond. SESAME a été reconnu au niveau mondial comme le premier projet de consensus international sur la technique H/V.

Ces travaux ont largement contribué à montrer la capacité de la technique "bruit de fond en réseau" en tant qu'outil d'investigation géophysique urbain. Les nouveaux algorithmes prochainement diffusés contribueront, nous l'espérons à approfondir la maîtrise de cet outil et à éviter certaines mauvaises utilisations des logiciels classiques. L'une des améliorations à envisager est la prise en compte les mouvements horizontaux, alors que nos développements ne concernaient que les mouvements verticaux.

L'ensemble des résultats est disponible dans des rapports rendus à l'UE et disponibles sur le site du projet SESAME: http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/.

Bibliographie

Arai H. and K. Tokimatsu, "S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum". Bull. Seism. Soc. Am., 94-1, 53–63, 2004.

Bard P.Y. and SESAME participants, 2004. The SESAME project: an overview and main results", in Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, August 2004, n°2207, 2004.

Bettig B., P-Y. Bard, F. Scherbaum, J. Riepl, F. Cotton, C. Cornou, and D. Hatzfeld,. "Analysis of dense array noise measurements using the modified spatial auto-correlation method (SPAC): application to the Grenoble area", in Boletino di Geofisica Teorica ed Applicata, 42, 281-304, 2001.

Bonnefoy-Claudet S., F. Cotton and P.-Y. Bard, "The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review", in Earth-Sciences Review, 79, 205-227, 2006.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Borcherdt R. D. and J.F. Gibbs, "Effects of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake", in Bull. Seism. Soc. Am, 66, 467-500, 1970.

Capon J., "High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis", in IEEE Proceedings, 57, 1408-1418, 1969.

Cultrera G., R. Azzara, F. Cara, R. d'Anna, G. Di Giulio, M. S. Giammarinaro, G. Passafiume, A.Rovelli and P. Vallone, "Microtremor Measurements in Palermo, Italy: a comparison with macroseismic intensity and earthquake ground motion", n°915, 13t h World Conf.on Earthquake Eng., Vancouver, 1-6 août, 2004.

Duval A.-M., J.-L. Chatelain, B. Guillier, SESAME WP02 team "Influence Of Experimental Conditions On H/V Determination Using Ambient Vibrations (Noise)", in Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, August 2004, n°306, 2004.

Konno K. and T. Ohmachi,. "Ground motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor", in Bull. seism. Soc. Am., 88-1, 228-241, 1998.

Kvaerna T. et F. Ringdahl, "Stability of various f-k estimation techniques", in Semiannual technical summary, 1 october 1985 - 31 march 1986, NORSAR Scientific Report, 1-86-87, Kjeller, Norway, 29-40. 1986.

Langston C. A., "Structure under Mount Rainier, Washington, Inferred from Teleseismic Body Waves", J. Geophys. Res., 84, 4749-4762, 1979.

Lermo J. and F. J. Chavez-Garcia, "Site effects evaluation using spectral ratios with only one station", in Bull. seism. Soc. Am., 83, 1574-1594, 1993.

Nakamura Y., "A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface", in Quarterly Report RTRI., 30, 25-33, 1989.

Nogoshi M. and T. Igarashi, "On the propagation characteristics of microtremor", in J. seism. Soc. Jpn., 23, 264-280, 1970.

Ohrnberger M, E. Schissele, C. Cornou, S. Bonnefoy-Claudet, M. Wathelet, A. Savvaidis, F. Scherbaum and D. Jongmans,. "Frequency wavenumber and spatial autocorrelation methods for dispersion curve determination from ambient vibration recordings", in Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, August 2004, n°946, 2004.

Sambridge M.,. "Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm –I. Searching a parameter space", in Geophys. J. Int., 138, 479-494, 1999a.

Sambridge M.,. "Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm – II. Appraising the ensemble", in Geophys. J. Int., 138, 727-746, 1999b.

Schmidt R.O., "Multiple source DF signal processing: an experimental system", in IEEE Trans. Ant. Prop., AP-34(3), 281-290, 1986.

Teves-Costa P., L. Senos and C.S. Oliveira, "Correlation between damage distribution and soil behaviour estimated with ambient vibrations", in Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, August 2004, n° 1004, 2004.

Theodulidis N., G. Cultrera, A. Tento, D. Faeh, K. Atakan, P.-Y. Bard, A. Panou and the SESAME Team, "Empirical evaluation of the horizontal-to-vertical spectral ratio technique: results from the SESAME project", in Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, August 2004, n°2323, 2004.

Tokimatsu K., 1997. Geotechnical site characterization using surface waves. Earthquake

Tokimatsu K., K. Shinzawa, and S. Kuwayama, 1992. Use of shortperiod microtremors for VS profiling. J. Geotech. Eng., 118(10), 1544–1588.

Wathelet M, D. Jongmans D, and M. Ohrnberger, Surface wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibrations measurements. Near Surface Geophysics,in press, 2004.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

3.5 Utilisation combinée des méthodes basées sur le bruit de fond

Ce paragraphe 3-5 est constitué par un article qui relate l'application en 2006 des méthodes de bruit de fond en réseau par H. Cadet au droit d'un site (l'Ebron en Isère) sur lequel j'avais analysé des séismes et du bruit de fond en 1995.

Référence de l'article : H. Cadet, A.-M. Duval, E. Bertrand and P.-Y. Bard, " Case study of noise array measurements in soft clay at l'Ebron, Trièves, Isère, France", 10 pages, 7ème Colloque National de Génie Parasismique (AFPS), Ecole Polytechnique, Palaiseau, 6-9 Jul. 2007.

3.5.1 Introduction

Characterizing a site in order to evaluate the site effect is a major step in seismic hazard assessment. Indeed each new catastrophic earthquake gives some evidence of capacity of site effects to increase damages. Consequently site seismic response has to be taken into account by seismic engineers. It implies that seismologists are able to describe correctly each site response. Many efforts have been devoted to obtain relevant soil characteristics based on cheap and rapid methods such as the analysis of ambient noise. The analysis of noise with combined methods can be a useful tool to answer this issue. As the noise array measurements become more and more attractive, it is of main importance to test this method for well-known in-situ sites to calibrate and improve the methodology in case of site effect study. The site over reference method used until now consists in recording seismic events at several points and comparing soil vibration with respect to a reference. But its application can raise several problems as the lack of a "reference site" near the studied area. Or else in urban area, and especially in low seismicity rate country, signal over noise ratio can be very poor. This prevents from obtaining reliable transfer function in all frequency domain of interest (from about 0.1 to 20 Hertz). With these bad conditions, time necessary to obtain enough data can be very long. That is why microtremor methods are so attractive, allowing a rapid and low-cost characterization. In our report both methods were used and will be compared.A protocol was realized for the measurements and analysis of ambient noise for a one dimensional area in order to estimate the shear wave velocity profile and an on going study aiming at using the mean Vs over the first 5 to 30 meters and the resonance frequency to evaluate the site effect. In order to validate, in one hand, the protocol of noise and in the other hand, the estimation of site effect, we were looking for a test-site with available geotechnical data and seismic recordings on soil and rock. A seismic study with seismic recordings, local noise recordings, cross-hole was made in 1995 on the site called l'Ebron, localized on soft clay typical from the Trièves area, France. This site corresponds to an adapted test-site.

The first aim of this paper is to show the reliability of noise array analysis to provide shear wave profile of the first 5 to 30 meters using the set-up protocol. For that purpose we realized a noise array measurements with 16 to 18 sensors located at l'Ebron. With an on going study based on the mean velocity and the resonance frequency the site effect is estimated. The second aim is to test this on-going study.

3.5.2 Summary of the previous studies

The 1995-survey consists of earthquake recording, punctual microtremor recording for H/V analysis, and numerical simulation of transfer function thanks to borehole data (cross-hole measurements were realized). On this summary we will focus on two stations AVA and AMO where the noise array measurement was done. JUL is the rock reference station. A complete description can be found in the report “Franchissement de l’Ebron”, [CETE 1995].

Geotechnical and geological study of the area

Figure 3.5—1: velocity measurements from cross-hole near AVA and AMO stations

Depth [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Geological formation
0 – 5	165	673	Sandy beige clay
5 – 10	193	1400	Soft sandy gray clay
10 – 17	305	1625	Stiff sandy gray clay
17 – 23	339	1625	

© 2008 Tous droits réservés.

The studied area is located on soft clay from glacier origin, typical of the Trièves region. The thickness can be larger than 100 meters. The bedrock is mainly shale and limestone. Two cross-hole profiles were realized in the area of interest. The cross-hole near the seismological stations AVA and AMO reaches 23 meters depth with the values of velocities in Figure 3.5—1.

Earthquakes recordings and analysis

Five seismological digital recorders were installed at the Ebron, during 3 months. 19 weak motion events were recorded: 16 teleseismes and 3 regional earthquakes (epicenters nearer than 200 km). The more important regional earthquake was, the 21st of April 1995, the Ligure earthquake with a magnitude of 4.7 200 km away from the Ebron site. The maximum amplitude of S waves for Ligure earthquake is more important at stations located above clays (AVA, AMO) than at the close rock station BOR (Nice Mont Boron) 20 km away. Figure 3.5—2 shows the time records of the Ligure event at clay stations AMO and AVA, and at rock stations JUL at the Ebron site and BOR at Nice. A clear amplification in the clay layers compare to a rock sites is visible, even though the rock site is more than 80 km closer to the event than the clay sites.

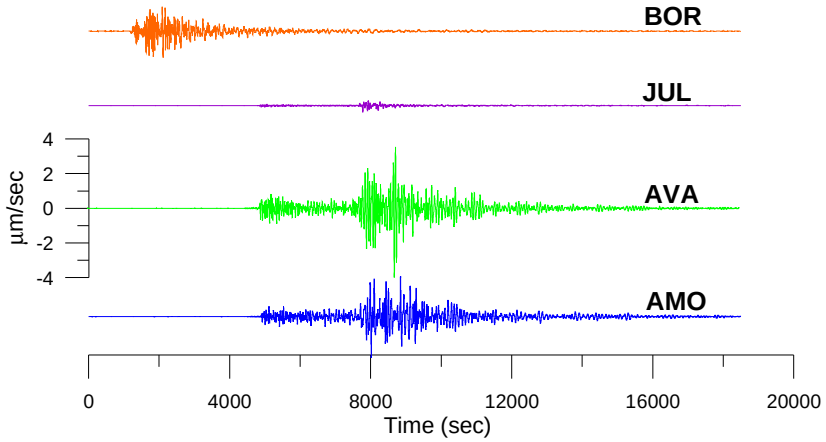


Figure 3.5—2: The Ligure event recorded at (from the top to the bottom): Nice, Mont Boron, station BOR; rock station JUL at the Ebron and soft soil stations AVA and AMO.

The difference between the vibration at rock sites and at clay sites has to be interpreted as an effect of signal resonance in clay layer. Clays multiply the maximum velocity as compared to rock. Mean site over reference (JUL station) ratio of the Fourier spectra or standard spectral ratio (SSR), were computed with the 19 earthquake records. These curves correspond to the seismic response of each site. The result was kept only for frequencies where signal to noise ratio (SNR) was higher than 3, both at the station and at the reference. The numerous events allow to obtain a good idea of mean SSR. The mean curves for stations AVA and AMO are represented in Figure 3.5—3 in bold line. At the station AVA, the amplification goes from 1.5 until 5 Hz at least. The level of this amplification reaches 20. AMO, which is also located on clays, produces the same kind of transfer function with a maximal amplitude around 14. The Fourier spectra ratio of the horizontal over the vertical component of the seismic event (H/Vs) is also computed (thin line in Figure 3.5—3). This ratio determines the resonance frequency but does not give the site effect amplification.

Microtremors recording and H/V analysis

The micro tremors, or seismic noise, represent all the ambient vibration from natural or anthropic origin. A punctual method, horizontal over Vertical spectral ratio from noise (H/Vn), was used for this first campaign. The H/V ratio provides the fundamental frequency (frequency of the first peak, Cf. SESAME project reports).

Numerous points of noise measurement were recorded as at the stations AVA, AMO, and JUL. In clays, amplification is visible and forms a peak between 1 and 2 Hz with a level between 5 and 10. The amplification level is significantly inferior to the one observed in the SSR (14 to 20) as can be seen on Figure 3.5—3. The resonance frequencies from the three methods, H/Vn, H/Vs and SSR, are really close for stations AVA and AMO (Figure 3.5—3) and between 1.25 and 2 Hz

© 2008 Tous droits réservés.

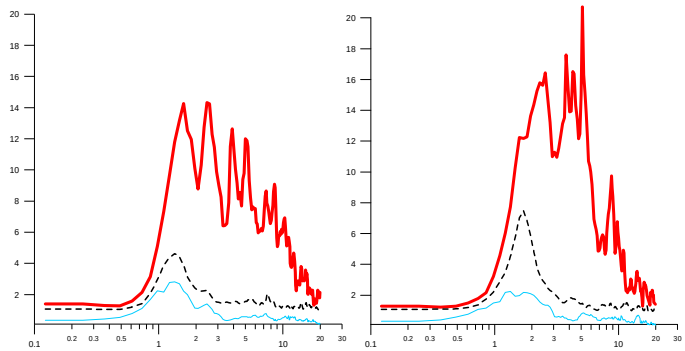


Figure 3.5—3: left) AMO station, right) AVA station. For both stations: thick line: mean SSR, dashed line: mean H/V of noise measurements, thin line: mean H/V of seismic events.

Reference geotechnical Vs profile

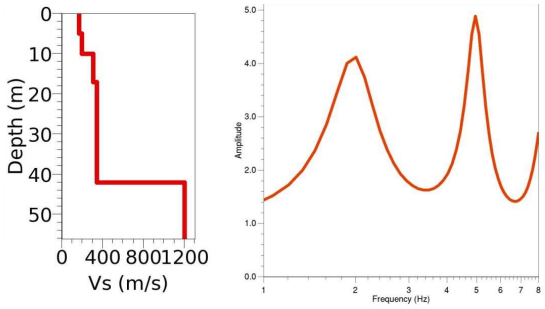


Figure 3.5—4 : right) shear wave velocity profiles model from borehole measurements; left) 1D numerical SH response of the model.

With all the previous information, we evaluated a Vs profile to the bedrock combining the cross-hole data (Cf. Figure 3.5—1) and the resonance frequency estimated by H/V and SSR. The cross-hole data provides information of the first 25 meters. In a simple 1D case the resonance frequency, fo, is linked to the mean velocity, Vs, and the thickness of the resonating layer, h, with the formula: fo=Vs/4h. The frequency of 1.8 Hz, considering a mean shear wave velocity of 300 m/s estimated with the cross-hole data, corresponds to a layer thickness of 42 m (Figure 3.5—4). We propose a Vs bedrock with an impedance contrast of 4 that corresponds to a visible peak (Bonnefoy-Claudet, 2004) that is to say 1200m/s. This Vs profile will be our “reference geotechnical profile”. It will be compared with the Vs profiles obtained with the noise array technique in the following part.

With the evaluated Vs profile, using a 1D calculation, we compute the response of the soil column to a SH wave. This numerical transfer function shows a peak around 2 Hz (Figure 3.5—4, b).

3.5.3 Array measurements: strategy and analysis

To determine the shear velocity of the first 5 to 30 meters with noise array measurements we will follow a protocol described in Cadet *et al.* 2006.

Protocol summary

This chapter will follow the protocol consisting of 8 steps summarized below:

1. H/V measurements *to select a 1D area with a non-negligible contrast (2points)*
2. Choice of the array aperture
3. Comparison of FK and SPAC analyses *(fit estimated over 2 points)*
4. Extension of the dispersion curve over the largest frequency band [f_{min} f_{max}] combined both analyses *(score estimated with log(f_{max})-log(f_{min}) points)*
5. Flatness of the dispersion curve to characterize the 1st layer *(1point if A(f_{max})-A(f_{max}/1.3)<25% of A(f_{max}))*
6. Comparison of the fundamental frequency of the H/Vn and the 1D SH response of the models *(2points)*
7. Comparison with geotechnical data *(fit estimated over 1 point)*

© 2008 Tous droits réservés.

8. Estimation of a confidence level *(sum of all the scores)*

Arrays deployment, steps 1 and 2

Step 1: We selected an area between the station AMO and AVA where the resonance frequency is stable, around 1.8 Hz, and the amplitude higher than 5. The H/V ratios show a constant sharp peak with high amplitude so we are confident on the 1D property of the area *(2/2 points)*

Step 2: a reasonable array aperture (radius lower than 150 meters) could be enough to describe the soft layer of the soil described on the evaluated Vs profile. We deployed two arrays with two geometries circular with 16 vertical sensors and triangular using 18 sensors. The maximum distance between the sensors was 130 meters.

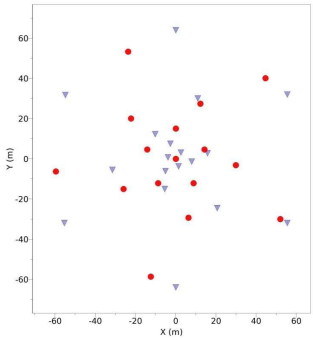


Figure 3.5—5: Geometry of the arrays, circular dots for the circular shape array, triangular dot for the triangular shape array.

Arrays analysis, steps 3 to 7

Two analyses were used: conventional frequency-wave number analysis (CVFK, Lacoss et al. 1969) and the SPatial Auto Correlation analysis (SPAC, introduced by Aki in 1957) Software from the European program SESAME was used for the two analyses.

Figure 3.5—6: Initial parameters space for the inversion

Thickness [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]
1 to 100	200 to 3500	100 to 2000
∞	800 to 4000	400 to 3000

We first calculated the dispersion curve of the vertical components mainly composed of Rayleigh waves with the CVFK analysis. The array with a triangular shape for CVFK analysis was selected because it provides a larger frequency band. On the other hand the autocorrelation curves from SPAC are better defined with the circular array so we will only look at the autocorrelation curves from the circular array only.

Then both curves, dispersion curve and autocorrelation curves, are inversed using different parameter spaces, the parameters space with a power law gradient for the sediment layer (Figure 3.5—6) is selected because it provides close results of Fk and SPAC inversion that it is not the case without gradient.

Step 3 consists in comparing both analyses: firstly, both resulting profiles from FK and SPAC inversion are close, Figure 3.5—7, *(1/1 point)*. Secondly the dispersion curve from CVFK (with a frequency band from 3 to 22 Hz) and the direct computation of dispersion curves of the profiles from SPAC inversion are compatible and complementary, as shown by Figure 3.5—8. *(1/1 point)*

Step 4: This compatibility allows to extend the dispersion curve from CVFK, with the dispersion curves from the SPAC profiles, until 1.8 Hz. Notice that this limit corresponds to the natural limit given by the resonance frequency, below this frequency the Rayleigh waves do not have enough energy. *(log22-log1.8=1/2 points)*

© 2008 Tous droits réservés.

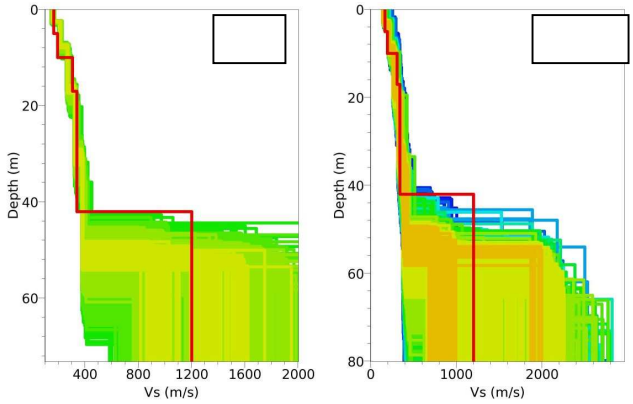


Figure 3.5—7 : Inversion, with an initial parameters space of one layer overlaying a bedrock with a power law gradient: left) profiles from the dispersion curve inversion with a standard deviation less than 0.7; right) profiles from SPAC inversion with a standard deviation less than 0.5. Thick line: estimated Vs profile from borehole measurements.

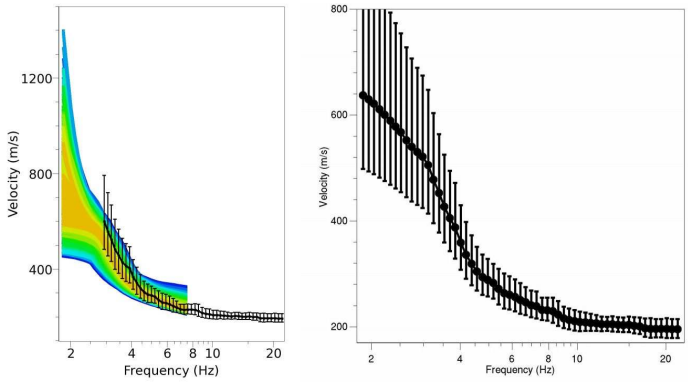


Figure 3.5—8: left) Comparison of the dispersion curve calculated with FK (black curve) and the dispersion curve of the soil models obtained by SPAC inversion (gray curves); right) extended dispersion curve from 1.8 Hz to 22 Hz with FK and SPAC analyses.

Step 5: This extended dispersion curve is flat for the high frequencies to characterize subsurface *(1 point).*

Step 6: The extended dispersion curve is inverted with a parameter space of a simple model of one layer overlaying a bedrock with a power law gradient (Figure 3.5—6). The resulting profiles were selected with a standard deviation smaller than 0.8, Figure 3.5—9. The resonance frequency of the SH response of the models is the same as the resonance frequency defined with the H/V noise (2 points, Figure 3.5—9).

Step 7: Results are represented in Figure 3.5—9, showing a good correlation with the reference Vs profile for surface layers but an important difference for the deepest part (0.5 point, Figure 3.5—9).

© 2008 Tous droits réservés.

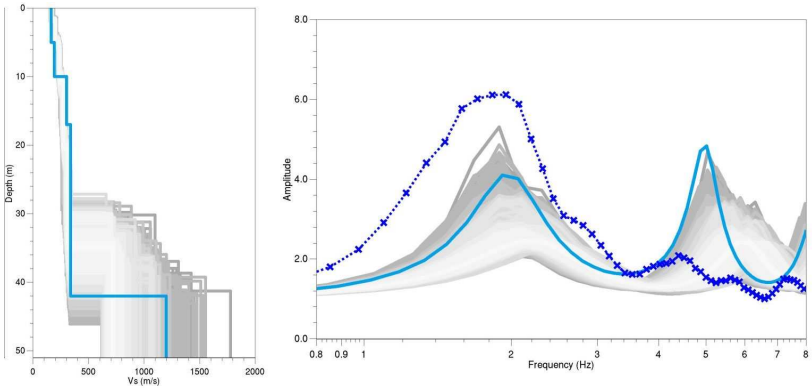


Figure 3.5—9: left) In gray scale (according to the error value) Vs profiles from the inversion of the elongated dispersion curve with an initial parameter space of one layer with a power law gradient over a bedrock; bold line: Vs from the borehole. Right) SH response from the borehole model (thick blue line), H/Vn of the AVA station (dot cross line) and the SH response of the models obtained by the inversion of the long dispersion curve in gray scale.

To conclude on the interpretation of array measurements, the resulting profiles, Figure 3.5—9, are close to the reference Vs profile from the borehole for the soft layers. The mean Vs over the first 30 meters is approximately 270 m/s from the noise array results and 280 m/s from the cross-hole measurements. For noise analysis we should not forget to go through some stages: using both methods FK and SPAC to improve the results; trying different initial parameters spaces, starting with simple models; keeping the one that gives SPAC and FK Vs profiles the closest. If SPAC and FK provide close results, then we should combine the dispersion curve from FK and the dispersion curve of the inverted SPAC models; and finally we should determine the reliability score.

Summing up the scores of the protocol we can estimate the confidence level at 8.5/10, which corresponds to reliable results. In that case, as we can believe on the surface Vs value, a site effect estimation can be made based on the mean velocity over the first 30 meters and the resonance frequency.

3.5.4 Site effect estimation with the empirical function determined with the Japanese network Kik-Net

With a resonance frequency fo and a mean velocity Vs over 5 to 30 meters, a recent study, based on the Japanese network Kik-Net by H Cadet, provides an estimation of the site amplification function. This study consists in computing the ratio of a surface station over a bedrock down-hole station of Fourier and response spectra of strong motion measurements, then normalizing them toward a reference rock with Vs(30) = 800 m/s; and finally observing the mean trend according to the mean Vs and fo. The final result should be a function, depending on Vs mean over the first 5 to 30 meters and fo, to correct the regulation spectra from rock to soil site.

With Vs30=280 m/s and fo=1.8 Hz the estimated borehole spectral ratio corresponds to the thin curve in Figure 3.5—10, called KikNet curve. The site effect for stations AMO and AVA was estimated with the standard spectral ratio method with the station JUL as a rock reference site. The difference of amplitude between the KikNet curve based on Vs(30) and fo and the spectral ratio of AMO and AVA is high. Different explanations can be discussed. First of all no velocity is known for the rock reference station JUL. If Vs(30) at JUL is higher than 800 m/s, that we suspected, the spectral ratio provides higher amplitude than with a reference rock with Vs(30)=800 m/s. This puts forward the issue of defining a reference site. Secondly, there is a possibility of two-dimensional effects. Thirdly, the smoothing for the KikNet curve is a Konno-Homachi smoothing with a parameter b=20 whereas the ratio of AMO and AVA were smoothed with a sliding window. Finally the clays of the Ebron can have a low damping that enhances the amplitude value.

© 2008 Tous droits réservés.

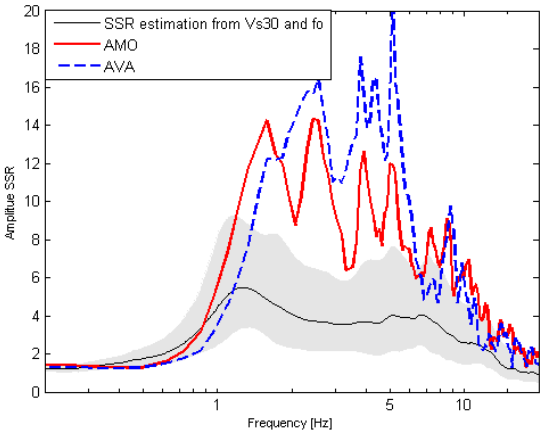


Figure 3.5—10: In thin line the expected site over reference ratio for a Vs(30) between 180 m/s and 360 m/s and a fundamental frequency between 1 and 2 Hz, the standard deviation of this estimation are in gray; mean standard ratio site over reference from earthquake records: thick line: for AMO; dashed line: for AVA.

3.5.5 Conclusions

Following the methodological steps of the protocol, noise array analysis provides a shear wave velocity profile precise enough to give information coherent with borehole measurement in the surface layer. But noise method is faster and cheaper than a borehole that is a primordial advantage. Moreover, the high density of measurement points permitted by the economic aspect of the method, allows to obtain information about spatial spreading of site effect. The two parameters, Vs, the mean velocity of the first 5 to 30 meters and fo, the fundamental frequency are confidently estimated with noise measurements. These parameters can help to estimate the site effect using the Vs(30)-fo based estimation of spectral ratio.

This conclusion is valid for a site with a tabular structure in a clay context. More experiences should be done in other geological contexts to confirm the availability of noise array analysis. We should pay attention not to interpret the Vs profiles obtained with noise analysis too deeply but only to consider the first layer. An indicator of the available depth could be the spread of the Vs profiles.

The empirical KikNet curve estimated with Vs(30) and fo is an ongoing study that should be more constrained. The main advantage is to precise the site effect with two parameters Vs and fo whereas the classical regulations as Eurocode 8, use only the Vs30 parameter. Moreover this approach does not need a reference site neither event recordings, which is a main advantage for economical issue.

Bibliography:

Aki K., « Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to micro tremors », Bull. Earth. Res. Inst., vol. 35, 1957, p 415-456

Bonnefoy-Claudet S., Nature du bruit de fond sismique : implications pour les études des effets de site, Thèse de doctorat, University of Joseph Fourier de Grenoble, December 2004.

Cadet H., Bard P.Y., Gueguen P., Cornou C., « Rapid screening of site effects through micro tremor surveys in view of microzonation studies», in Proc.of the first European conference on earthquake engineering and seismology ECEES, Geneva, 3-8 September 2006, ID 1431.

CETE, Méneroud J.P., Duval A.M., Vidal S., Fréchet J., Gamond J.F., Bard P.Y., “Franchissement de l’Ebron, étude de l’aléa sismique local », internal report n° 93/95666/74, May 1995, CETE méditerranée, laboratoire de Nice.

Lacoss R.T., Kelly E.J. and Toksöz M.N., «Estimation of seismic noise structure using array », Geophysical Journal International, vol. 163, 1969, p 169-182

http://SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr

© 2008 Tous droits réservés.

3.6 Méthode de simulation numérique

Ce chapitre 3-6 est constitué d'un article référencé:
J.-F. Semblat, A.-M. Duval, P. Dangla*, "Numerical analysis of seismic wave amplification in Nice (France) and comparisons with experiments",* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.19, *n*°5, pp.347-362, 2000.

L'ensemble des travaux numériques présentés ici ont été réalisés et interprétés par J.-F. Semblat et Patrick Dangla au LCPC avec le logiciel CESAR-LCPC. Ma propre contribution concerne les résultats expérimentaux qui servent ici de support de comparaison aux modèles numériques.

Titre : "**Numerical Analysis of Seismic Wave Amplification in Nice (France) and comparisons with experiments"**

Abstract: The analysis of site effects is very important since the amplification of seismic motion in some specific areas can be very strong. In this paper, the site considered is located in the center of Nice on the French Riviera. Site effects are investigated considering a numerical approach (Boundary Element Method) and are compared with experimental results. The experimental results are obtained thanks to real earthquakes (weak motion) and microtremor measurements. The investigation of seismic site effects through numerical approaches is interesting because it shows the dependency of the amplification level on such parameters as wave velocity in surface soil layers, velocity contrast with deep layers, seismic wave type, incidence, damping...
In this specific area of Nice, experimental measurements obtained for weak motion lead to strong site effects. A 1D-analytical analysis of amplification does not give a satisfactory estimation of the maximum reached levels. A boundary element model is then proposed considering different wave types (SH, P, SV) as the seismic loading. The alluvial basin is successively assumed as an isotropic linear elastic medium and an isotropic linear viscoelastic solid with Zener type behaviour (standard solid). The influence of frequency and incidence is analyzed. The thickness of the surface layer, its mechanical properties, its general shape as well as the seismic wave type involved have a great influence on the maximum amplification and the frequency for which it occurs. For real earthquakes, the numerical results are in very good agreement with experimental measurements for each motion component. The boundary element method leads to amplification values very close to the actual ones and much larger than those obtained in the 1D case. Two dimensional basin effects are then very strong and are well reproduced numerically.

3.6.1 Seismic wave propagation and site effects

Seismic site effects

The amplification of seismic waves in some specific sites can be very important. Reflections and scattering of seismic waves near the surface, at layers interfaces or around topographic irregularities often strengthen the consequences of earthquakes [4,32]. It was the case for the terrific Mexico 1985 earthquake : maximum acceleration was around 0.28 g at sixty kilometers from the source and 0.2 g in some specific areas in Mexico city (lake deposits) located much further (400 kilometers). In the town itself, seismic motion was amplified up to a factor of 60 compared to the bedrock because of the soft clay deposit under the city.

Caracas 1967 earthquake has also been amplified in the center of the city because of an alluvial filling [16,38]. The resonance frequency of the basin is around 0.6 Hz in the most destroyed blocks of Caracas : the buildings that felt down in this area had 14 storeys and their resonant frequencies were very close to 0.6 Hertz. The damages are then much larger on buildings having resonant frequencies close to that leading to the stronguest site effects in the surface soil layers. It is therefore very important to avoid, in the design of structures, buildings involving resonant features close to that of the soil surface layers if it corresponds to a strong motion amplification. The local seismic response of soils must be analyzed to precisely determine the characteristics of the reference earthquake used for the design of structures.

Analysis of seismic wave propagation

Seismic wave propagation can be investigated using different kinds of experimental techniques or numerical methods. Experimental investigations are generally made at full or reduced scales :

© 2008 Tous droits réservés.

– real earthquakes or microtremor measurements [10,14,15,16,19,34,44],
– in situ, laboratory or centrifuge experiments for soil characterization [18,22,25,26,36,39,42],

There are also various numerical methods :

– finite element method [1,5,7,20,24,27,35,37,41,45],
– boundary element method [2,6,8,13,31,38] well-adapted to the analysis of wave propagation in infinite media,
– many other types of analytical and numerical methods (spectral elements, discrete wave-number, Aki-Larner...) [4,9,17,28].

This paper investigates the local amplification of seismic waves (site effects) through a numerical model based on the boundary element method and experimental measurements (real earthquakes and microtremors). Some simple analytical results are also given to make some comparisons with experimental and numerical ones.

Seismic measurements in Nice

Nice areas having a high population density, like in many other towns, are located on alluvial soil layers. A first survey (1984) has given an estimation of the regional seismic hazard and a determination of different geological areas with potential seismic amplification. Seismicity was recorded for one year (1992) on four sites where seismic amplification is expected to be important. Experimental measurements of site effects [15] have been performed above an alluvial filling corresponding to an old valley of North-South direction axis (Figure 3.6—1). Microtremor recordings stability has also been studied in both time and frequency domains. It has given the spectral variations during the day and enlightened the surprising stability with time of the spectral ratios between the horizontal and vertical components [14,15]. This ratio allows the determination of the resonant frequency of the soil surface layers.

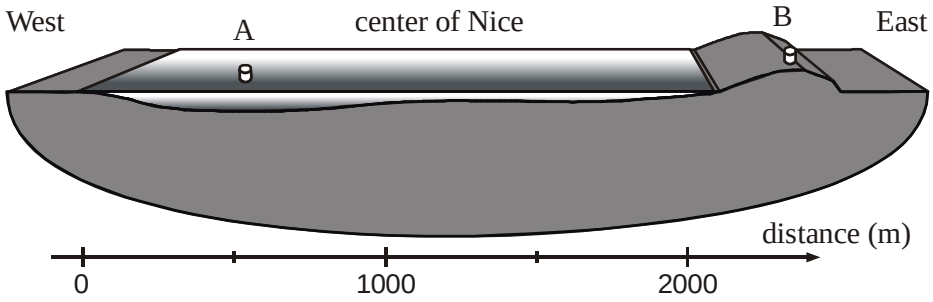


Figure 3.6—1. 2D geological profile in the center of Nice

The curves of Figure 3.6—2 give transfer functions, between alluvial site (point A) and reference bedrock site (point B), for real earthquake measurements considering vertical, North-South and East-West (weak) motions. The experimental study [14,15] includes several seismic events. There are 7 regional earthquakes of minimum magnitude 2 among which the one leading to the largest velocity at the reference site has a magnitude of 4.6 at approxinately 100 km. In the weak earthquake measurements, 4 far-field earthquakes located at more than 1000 km are also considered. Curves of Figure 3.6—3 give horizontal to vertical motion ratios estimated from microtremor measurements considering both North-South and East-West horizontal motions.

Earthquake measurements, as well as microtremor analysis (Figure 3.6—2 and Figure 3.6—3), clearly indicate that the amplification of seismic motion occurs between 1 and 2 Hz at the center of the alluvial filling. The values of resonant frequency determined by both methods are very close. The amplification factor estimated from microtremor measurements is however smaller. It is not the purpose of this article to discuss the discrepancy between the amplification values obtained with both experimental methods. Some various explanations and several complete studies on microtremor techniques have already been proposed and consider both theoretical aspects as well as field observations [10,12,14,15,19,33].

Above the thickest part of the alluvial basin, the amplification factor determined by seismic spectral ratios (site/reference) reaches a maximum value of 20 around a frequency of 2.0 Hz for vertical motion, 1.0 Hz for North-South motion and 1.3 Hz for East-West motion. For the East-West component, the amplification is not negligible for low frequencies and this is due to two near field earthquakes. Comparing the measurements performed on various sites, corresponding transfer functions show a strong dependency of resonant frequency on the thickness of the alluvial surface layers [14,15].

© 2008 Tous droits réservés.

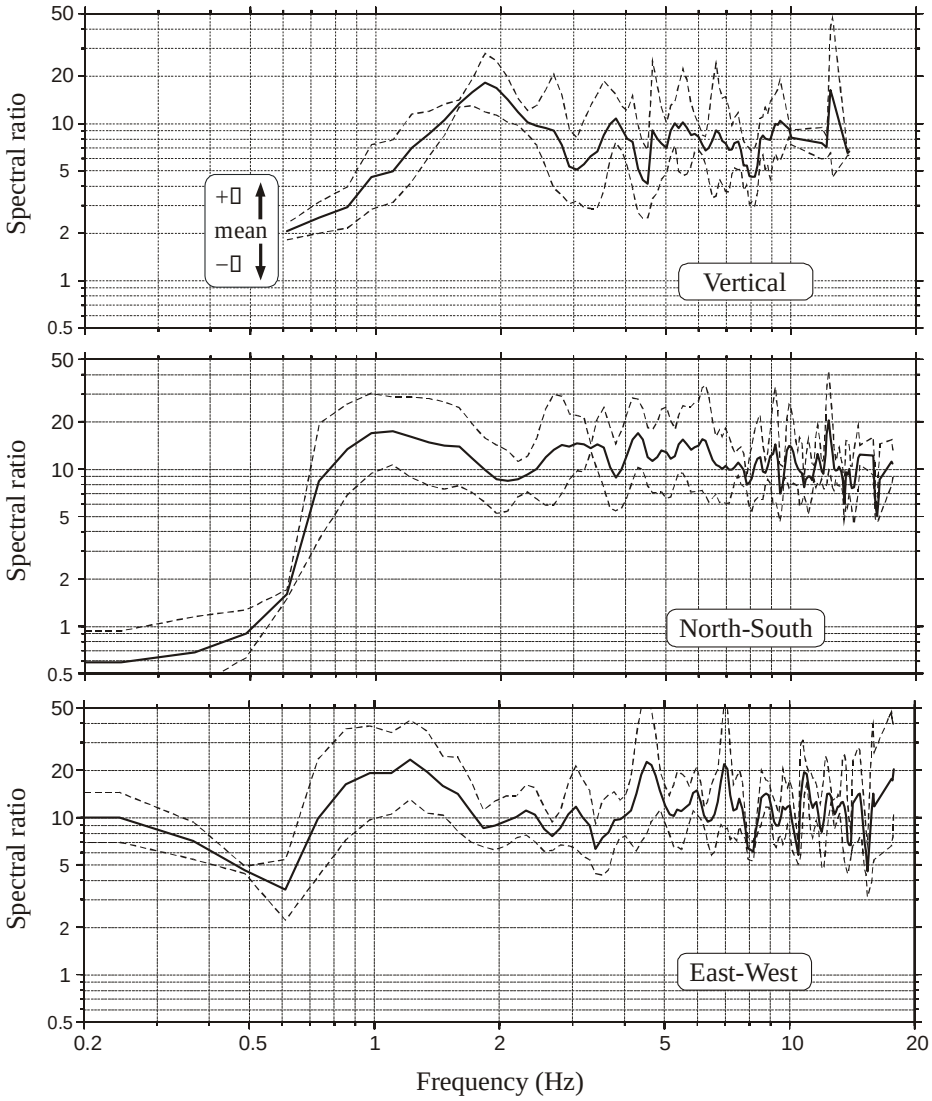


Figure 3.6—2: Experimental spectral ratios (site/reference) estimated from real earthquakes measurements (weak motion).

Strong motion and non linear effects

Various experimental studies investigate the nonlinear effects in soils and strong motion responses [21,22,25,42,44] . Concerning numerical models, the finite element method [1,5], the finite difference method [22] and even the boundary element method [8] , can be used to analyze nonlinear problems. Since no strong motion recordings are available for the city of Nice, the experimental results presented in this article correspond to weak seismic motion and the numerical analysis considered in the following sections is linear. Nonlinear effects generally lead to a lower frequency content and can make the amplitude of the dynamic response decrease significantly. The main difficulty for the analysis of nonlinear dynamic effects is that they can strongly vary from one earthquake to another and from one site to another since the nonlinear dynamic properties of soils are influenced by many different parameters (strain amplitude, initial state, loading history...) [21,22,25, 42,44]

© 2008 Tous droits réservés.

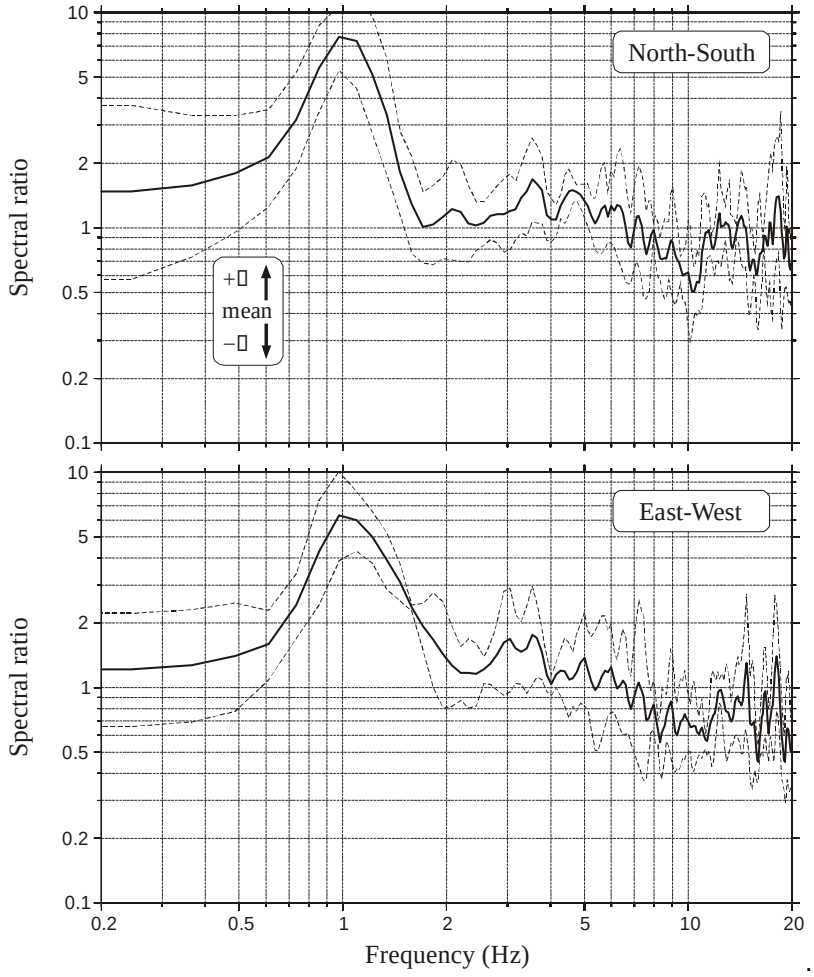


Figure 3.6—3: Experimental spectral ratios (H/V) estimated from microtremors measurements.

3.6.2 Preliminary analytical Results

A first estimation of the amplification of the seismic motion is made considering an horizontal infinite alluvial layer of constant thickness above an elastic half-space. For this analytical and the following numerical models, an East-West geological contour is considered. For the surface layer, the velocity is chosen as a mean value of the velocities in the seven different layers of the site (above the bedrock). From different types of experimental investigations, these velocities are found to range from 170 m/s to 400 m/s [14,15]. We consequently chose the following mechanical characteristics for both media :

- alluvial layer : ρ_1=2000 kg/m^3, μ_1=180 MPa giving C_1=300 m/s,
- elastic bedrock : ρ_2=2300 kg/m^3, μ_2=4500 MPa giving C_2=1400 m/s.

where ρ is the mass density, μ the shear modulus and C is the shear wave velocity.

Considering a plane SH-wave with incidence α_2 on the surface layer, the determination of the transfer function through the surface layer can be calculated analytically (Figure 3.6—4). The thickness of the alluvial filling is successively : h=64 m and h'=32 m, which are the thicknesses of the two main parts of the real geological contour depicted in Figure 3.6—1 (western part (thickest) and eastern part (thinnest)).

© 2008 Tous droits réservés.

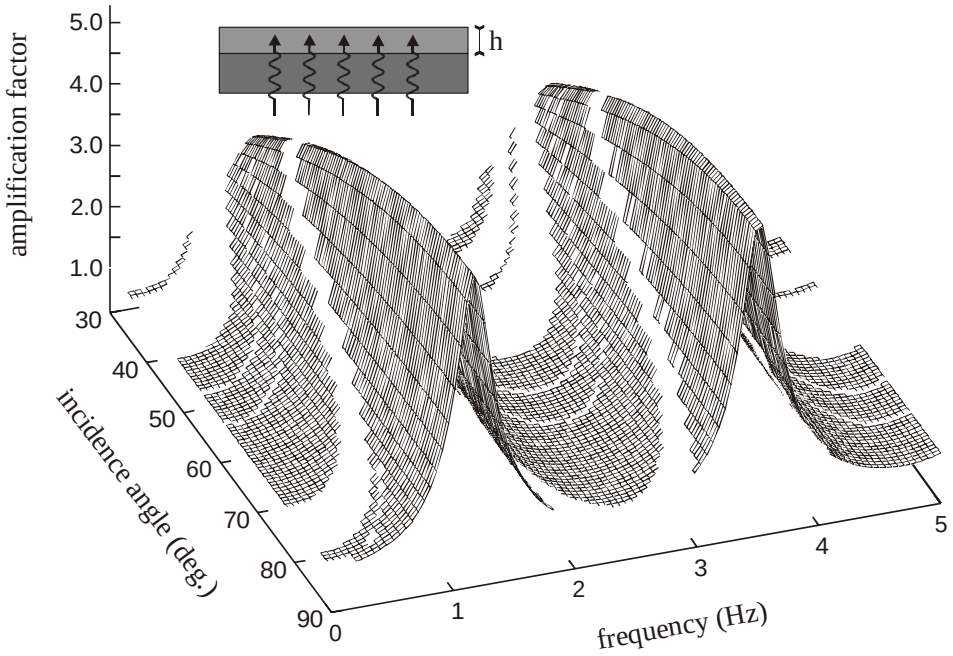


Figure 3.6—4. Amplification factor versus incidence and frequency for a single layer of constant thickness h=64m (analytical transfer function).

Analytical expression of the transfer function of a plane SH-wave through an elastic layer of thickness *h* above an elastic half-space is very simple [30] :

$$\left|T^{*}_{1,2}(\omega)\right| = \left[\cos^2 p_1 h + q^2 \sin^2 p_1 h\right]^{-1/2} \qquad (1)$$

$$\text{with } p_1 = \frac{\omega \cos\alpha_1}{C_1} \text{ et } q = \sqrt{\frac{\rho_1\mu_1}{\rho_2\mu_2}}\,\frac{\cos\alpha_1}{\cos\alpha_2}$$

where ω is the circular frequency, α_1 and α_2 are the angles of incidence (with respect to the vertical direction) in the layer and in the half-space (respectively).

Expression (1) directly gives the amplification factor of the seismic motion. The amplitude above the alluvial basin is already divided by the amplitude above the elastic half-space in the case there is no surface layer. From the curve of Figure 3.6—4, amplification factor is around 5.5 for h=64m and normal incidence (α_2=90°). The same value is obtained for h'=32m and the resonant frequencies are respectively :

- for the thickest part (h=64 m) : f=1.2 Hz,
- for the thinnest part (h'=32 m) : f'=2.3 Hz.

As shown by Figure 3.6—4, the amplification factor decreases with decreasing incidence (from normal incidence of 90° down to 30°). Compared to experimental results of Figure 3.6—2, the amplification factor estimated analytically is much lower (approximately four times) whereas occuring frequency values are rather good. The amplification of seismic motion in surface soft layers is not only due to the impedance ratio between elastic half-space and the alluvial deposit (considered in the analytical approach). The discrepancy between experimental and analytical results indicates that the geometrical features of the basin must have a strong influence on seismic site effects. It raises the need for a more accurate approach and in the following we will consider the boundary element method to model seismic wave propagation and amplification in the site. Other numerical or analytical methods allow the analysis of seismic wave amplification using modal approaches, finite element method, spectral element method, discrete wavenumber... [1,3,4,9,17,27,28,29,40,41,45] .

© 2008 Tous droits réservés.

3.6.3 Boundary element formulation

The boundary element method

The main advantage of the boundary element method is to avoid artificial truncation of the domain in the case of infinite medium. For dynamic problems, this truncation leads to artificial wave reflections giving a numerical error in the solution. The boundary element method can be divided into two main stages [6,8] :

- solution of the boundary integral equation giving displacements and stresses along the boundary of the domain,
- a posteriori computation for all points inside the domain using an integral representation formula.

The boundary element method arise from the application of Maxwell-Betti reciprocity theorem leading to the expression of the displacement field inside the domain Ω from the displacements and stresses along the boundary $\partial\Omega$ of the domain [2,6,8,13] .

Elastodynamics

We consider an elastic, homogeneous and isotropic solid of volume Ω and external surface $\partial\Omega$. In this medium, the equation of motion can be written under the following form :

$$(\lambda+2\mu)grad(div\,u)-\mu rot(rot\,u)+\rho f=\rho\ddot{u} \qquad (2)$$

where σ is the stress tensor, u the displacement field and f a volumic density of force.

In this article, the problem is supposed to have an harmonic dependence on time of circular frequency ω. The equation of motion for a steady state ($u(x)$, $\sigma(x)$) can then be written as follows :

$$(\lambda+2\mu)grad(div\,u(x))-\mu rot(rot\,u(x))+\rho f(x)+\rho\omega^2 u(x)=0 \qquad (3)$$

The alluvial basin is firstly considered as a linear elastic undamped medium. Damped mechanical properties are included afterwards in the previous equation through the complex modulus of the medium.

Integral representation

For steady solutions of harmonic problems, the reciprocity theorem between two elastodynamic states ($u(x)$, $\sigma(x)$) and ($u'(x)$, $\sigma'(x)$) takes the following form [13] :

$$\int_{\partial\Omega} t^{(n)}(x)\,u'(x)\,ds(x)+\int_{\Omega}\rho f(x)\,u'(x)\,dv(x)=$$
$$\int_{\partial\Omega} t'^{(n)}(x)\,u(x)\,ds(x)+\int_{\Omega}\rho f'(x)\,u(x)\,dv(x) \qquad (4)$$

The integral formulation is obtained through the application of the reciprocity theorem between the elastodynamic state ($u(x)$, $\sigma(x)$) and the fundamental solutions of a reference problem called Green kernels. The reference problem generally corresponds to the infinite full space case in which a volumic concentrated force at point y acts in direction e. In the harmonic case, the Green kernel of the infinite medium corresponds to a volumic force field such as :

$$\rho f'(x)=\delta(x-y)\,e \qquad (5)$$

In this article, the model involves the Green functions of an infinite medium [8,13] or semi-infinite medium (in the case of SH-waves). The Green kernel is denoted $U_{ij}^{\omega}(x,y)$ and characterizes the complex displacement in direction j at point x due to a unit force concentrated at point y along direction i. The corresponding stress for a surface of normal vector $n(x)$ is denoted $T_{ij}^{(n)\omega}(x,y)$. The application of the reciprocity theorem between the elastodynamic state ($u(x)$, $\sigma(x)$) and that defined by the Green kernel $U_{ij}^{\omega}(x,y)$ gives the following integral representation :

$$I_{\Omega}(y)\,u_i(y)=\int_{\partial\Omega}\left(U_{ij}^{\omega}(x,y)\,t_j^{(n)}(x)-T_{ij}^{(n)\omega}(x,y)\,u_j(x)\right)ds(x)$$
$$+\int_{\Omega}\rho U_{ij}^{\omega}(x,y)\,f_j(x)\,dv(x) \qquad (6)$$

© 2008 Tous droits réservés.

where $I_\Omega(y)$ is 1 when $y \in \Omega$ and 0 in other cases.

Numerical solution of equation (6) can be performed by collocation method or by an integral variational approach [8] . When the domain Ω is infinite and there is no source at infinite distance, it is necessary to give restrictive conditions on the behaviour of the displacement field $u(x,t)$ at infinity. These assumptions are called outgoing Sommerfeld radiation conditions. When there are some sources at infinity (denoted by the field u^{inc}), the Sommerfeld conditions are applied to the diffracted displacement field $u^{diff} = u - u^{inc}$.

Regularization and discretization of the problem

The integral representation defined by equation (6) is generally not valid for $x \in \partial\Omega$. The formulation of the boundary integral equation along $\partial\Omega$ is then not very easy to obtain as the Green kernels have singular values when $x \in \partial\Omega$. It is then necessary to regularize expression (6) to write the boundary integral equation [2,8] .

The problems presented in this article are analyzed in two dimensions (plane or anti-plane strains). Two dimensional Green kernels of the infinite space are written using Hankel's functions [8,13] . The regularized solution of equation (6) is estimated by classical boundary finite elements discretization and then by collocation method, that is application of the integral equation at each node of the mesh.

3.6.4 Model for a plane SH-wave

Modelling of the geological contour

The East-West geological section depicted in Figure 3.6—1 is now considered for the numerical simulation. The exact contour of the alluvial basin is described precisely with boundary elements (Figure 3.6—5). The alluvial layer is supposed to be homogeneous and its mechanical characteristics (and those of the bedrock) are identical to the analytical case (see §2). The excitation is a plane SH-wave with vertical incidence (α=90°, first) and various incidences (afterwards). For a plane SH-wave, the motion is anti-plane with respect to the direction orthogonal to the model plane (only one DOF in each node of the mesh).

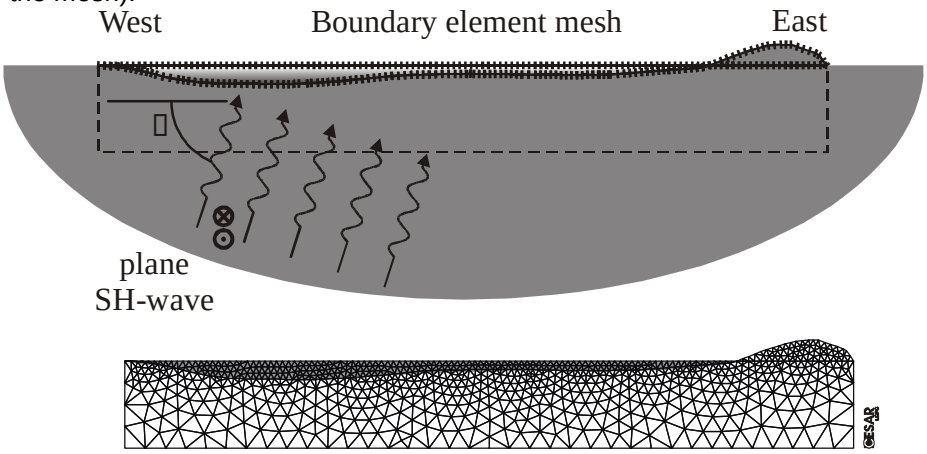


Figure 3.6—5. Boundary element mesh for a plane SH wave and points for a posteriori estimation of the solution.

In Figure 3.6—5, the boundary element mesh is depicted (top) for the solution of the integral equation and a complete mesh (created with a finite element mesh generator, bottom) gives some additional points for the computation of the a posteriori solution inside the domain. This model uses Green's functions of an infinite domain for the alluvial layer and the mount. It involves Green's functions of a semi-infinite domain (easy to determine for SH-waves) to precisely model the bedrock as a subdomain of an infinite half-space [8,13]. The numerical solution is estimated in the frequency domain with the finite/boundary element software CESAR-LCPC [23] .

© 2008 Tous droits réservés.

Amplification factor for a vertical incidence

Considering the two-layered model, the boundary element method allows for the determination of displacement (and amplification factor) in all points of the boundary element mesh. The solution is determined afterwards in all points inside the domain (Figure 3.6—5).

The Figure 3.6—6 gives the isovalues of the amplification factor in the alluvial layer and the bedrock for various frequency values (for a plane SH-wave with vertical incidence). Amplification obviously occurs at the surface of the basin and reaches a maximum value of 15.0 for a frequency value of 1.6 Hz. The maximum amplification appears in the thickest part of the deposit. However, for higher frequencies (f=2.0 Hz and 2.4 Hz), the amplification factor in the thinnest part of the alluvial layer increases slightly or strongly (respectively). For the highest frequencies, results of Figure 3.6—6 clearly show that maximum amplification occurs in several small areas. This is due to the shorter wavelengthes involved at these frequencies than at lower ones. Maximum amplification areas have therefore a quite limited extent and their experimental determination could be difficult.

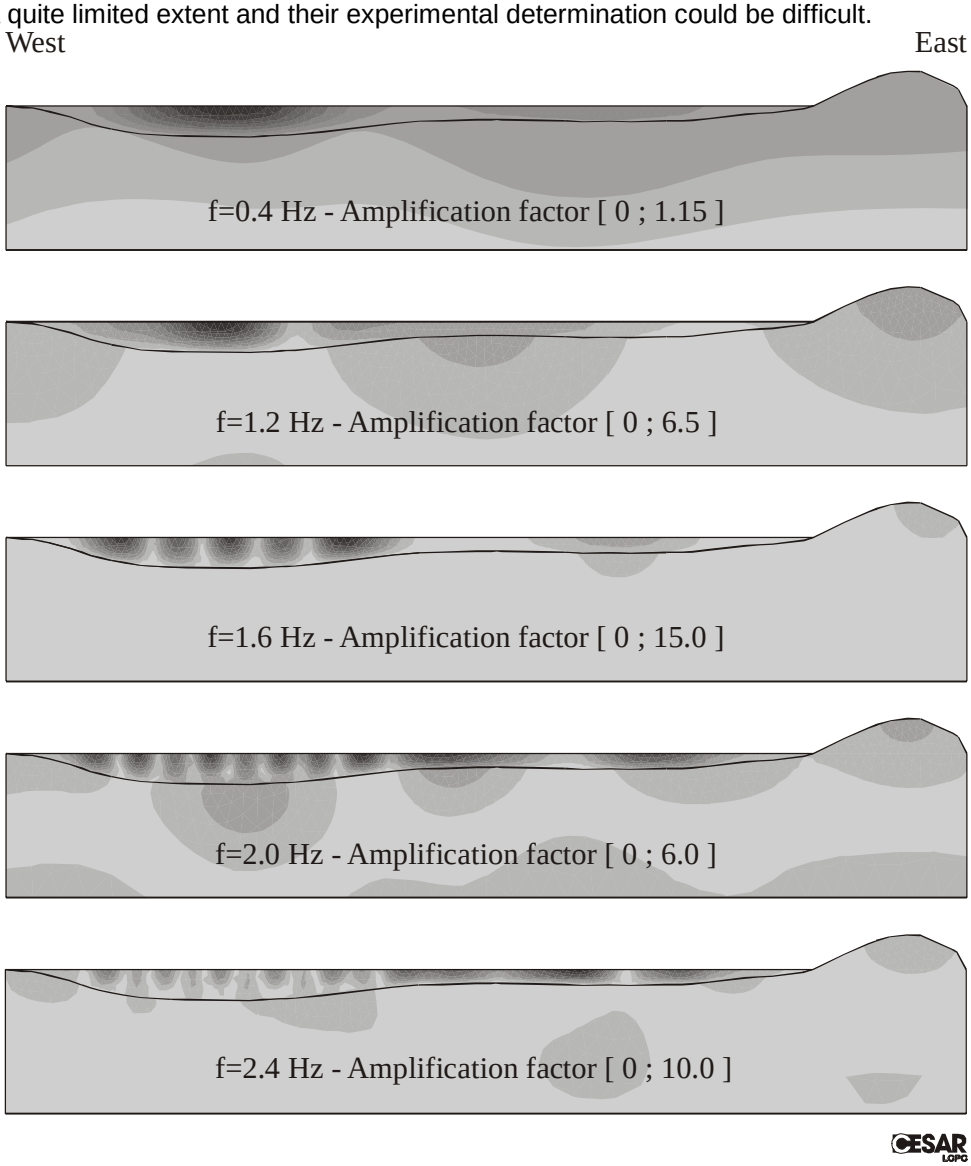


Figure 3.6—6. Computation of the amplification factor for a vertical SH-wave at different frequencies (variable scale, maximum in black).

Three-dimensional graph of Figure 3.6—7, and corresponding isovalues plot, give the variations of the amplification factor on the surface of the alluvial basin versus location and frequency. It is then possible to estimate the amplification level at each frequency as well as the location and extent of the corresponding maximum amplification area. In Figure 3.6—7, the amplification factor is low for frequencies under 0.8 Hz. Above this frequency value, an area of important amplification appears in the

© 2008 Tous droits réservés.

thickest part of the alluvial deposit (West). For higher frequencies, several areas of high amplification factor are detected always in the western part of the deposit. Above 1.5 Hz, the amplification factor in the thinnest part of the alluvial basin (East) increases progressively. Between 2.0 and 2.5 Hz, the amplification decreases in the thickest part of the deposit whereas it strongly increases in the thinnest part. As indicated by right part of Figure 3.6—7, the amplification factor reaches 15.0 or more in the thickest part of the valley for frequencies 1.4 and 1.6 Hz and is between 11.0 and 15.0 in the thinnest part for 2.4 Hz.

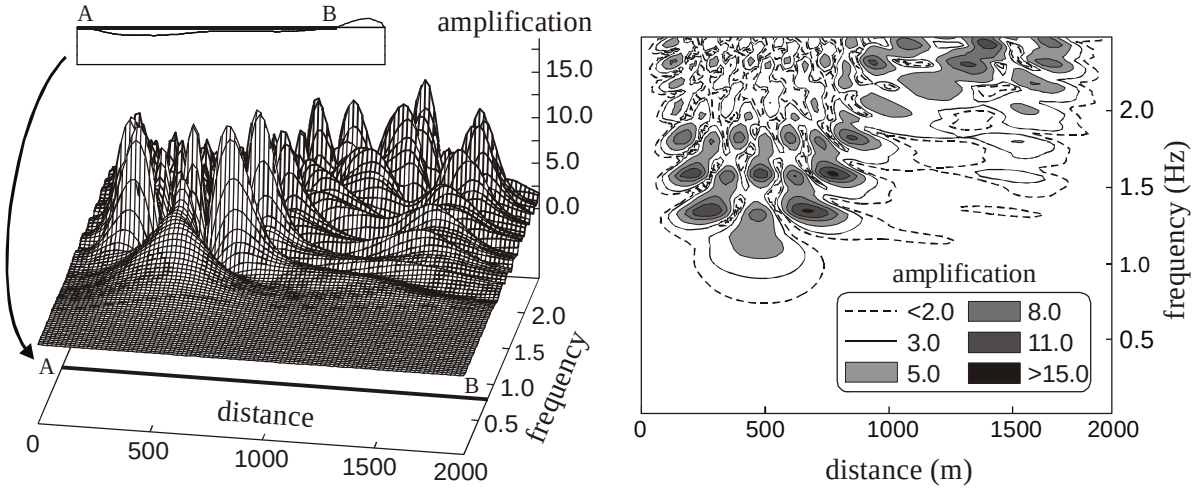


Figure 3.6—7. Amplification on the surface versus distance and frequency.

Results of Figure 3.6—6 and Figure 3.6—7 indicate that the amplification of the seismic motion reaches a maximum value of 15 for frequencies between 1.4 and 1.6 Hz. The highest amplification firstly occurs in the thickest part of the deposit for moderate frequencies, and then in the thinnest part around 2.4 Hz. These results are in good agreement with the frequency values determined analytically in section 2 (Figure 3.6—4). Considering an horizontal infinite surface layer appears to be a good assumption for the analytical estimation of the resonant frequencies of the alluvial filling. It is probably because the real alluvial deposit is rather flat with two parts of nearly constant depths (western part : 64 m, eastern part : 32 m).

The amplification level computed with the boundary element model is much higher than that estimated analytically. The numerical estimation of the amplification factor is three times higher than in the analytical case. The numerical model allows an accurate description of the geometry of the deposit leading to a real imprisoning of seismic waves and consequently to stronger site effects. For the fundamental mode, this result is in good agreement with experimental seismic measurements displayed in Figure 3.6—2. Complete comparisons between experimental and numerical results (in the three directions of space) are proposed in the last section of the article.

Overall maximum amplification

In Figure 3.6—8, the curve displays the overall maximum amplification, that is the maximum amplification factor at each frequency. The location of the maximum amplification is not considered in this curve but is still changing from one frequency to another. As shown in next section, it is not possible to detect all maximum amplification peaks considering the results in only one point of the deposit versus frequency. From the 3D plot of Figure 3.6—7, we build the curve of overall maximum amplification versus frequency (given in Figure 3.6—8). The analysis of overall maximum amplification values is necessary to investigate the whole site effects versus frequency.

From the curve given in Figure 3.6—8, there is no site effects below 0.5 Hz. Between 0.5 and 1.0 Hz, the amplification of seismic motion is limited (less than 4.0). Above 1.0 Hz, the amplification factor increases fastly to reach its maximum value at 1.4 and 1.6 Hz. Site effects are not very strong around 2.0 Hz as the amplification factor is below 7.0. Another strong amplification (around 13.0) is found at 2.4 Hz and was previously shown to appear in the thinnest part of the basin. Weaker site effects also occur around 3.5 Hz but the overall maximum amplification factor decreases progressively with frequency. This global result is compared with experimental ones in the last of the paper as well as for other wave types.

© 2008 Tous droits réservés.

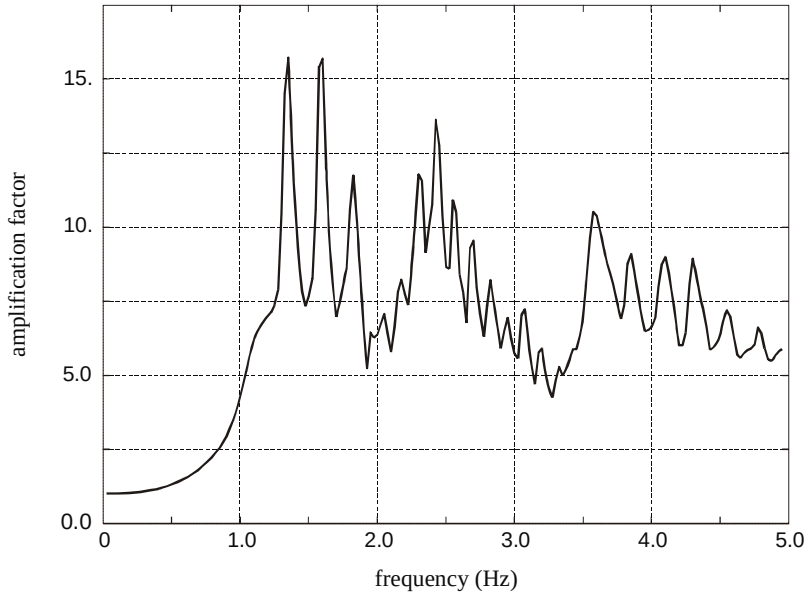


Figure 3.6—8. Overall maximum amplification factor versus frequency for a plane SH-wave (variable location).

3.6.5 Influence of incidence

As the bedrock is described using Green's functions of an infinite half-space, seismic amplification can be determined, in the case of plane SH-waves, for every values of incidence (no truncation effect). To analyze the effect of incidence, results are firstly given in a specific point versus frequency. Afterwards, the amplification factor is studied all along the surface for several values of frequency.

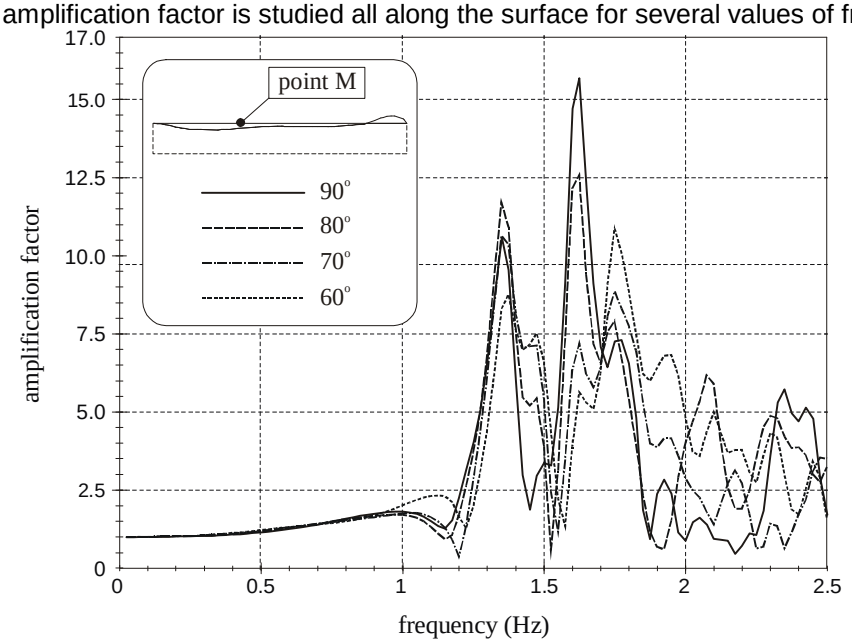


Figure 3.6—9. Amplification factor versus frequency for different incidences at the point M of maximum amplification (plane SH-wave).

Results of Figure 3.6—9 correspond to the point *M* for which amplification is maximum at frequency 1.6 Hz (see Figure 3.6—6 and Figure 3.6—9). This point *M* is located at distance d_M=860 m of the western edge of the basin. From these curves, amplification is obviously very low for frequencies under 1.2 Hz. Above this frequency value, amplification factor strongly increases (between 10 and 12 depending on incidence). Around 1.5 Hz, amplification decreases and increases once more up to its

© 2008 Tous droits réservés.

maximum value for an approximate frequency of 1.6 Hz. For this specific frequency, amplification factor decreases when incidence angle is low. Point *M* corresponds to the maximum amplification for a normal incidence but is probably not the point of largest amplification for other incidences. When comparing Figure 3.6—9 and Figure 3.6—8, it can be noticed that seismic site effects are strongly underestimated in Figure 3.6—9 for frequencies below or above 1.6 Hz. That is why the estimation of the overall maximum amplification is needed. The location of the maximum amplification factor is different from one frequency to another. The following results will allow comparison of the locations of site effects for various incidences.

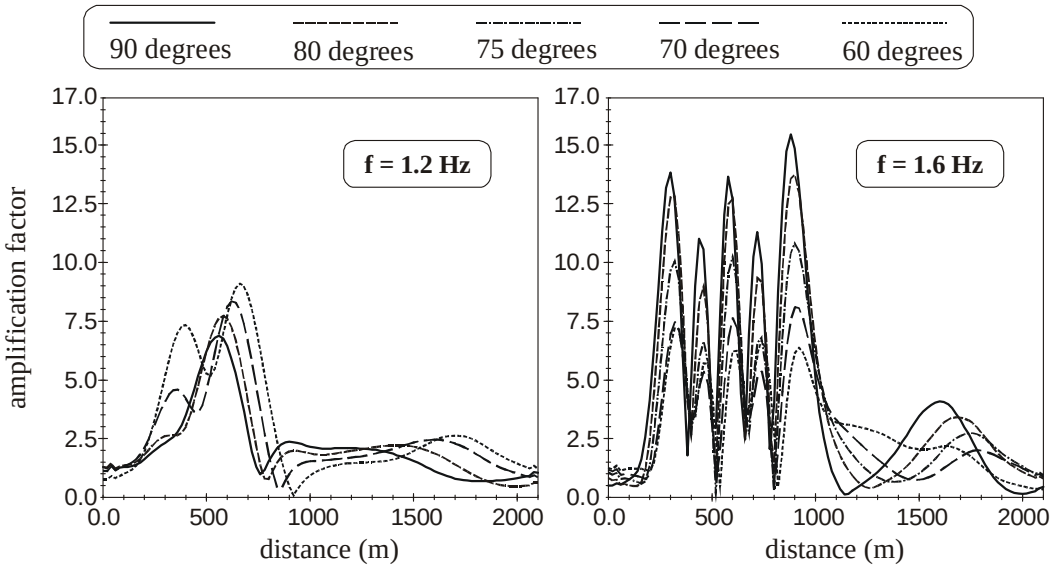


Figure 3.6—10. Dependency of amplification factor on incidence angle.

Results of Figure 3.6—10 give the values of the amplification factor in all points of the basin surface for two specific frequency values. It is then possible to investigate the influence of incidence on site effects and their location. From Figure 3.6—10, it can be seen that the amplification factor at 1.2 Hz increases with decreasing incidence : it has a value of 7.0 for a normal incidence (90°) and reaches 9 .0 for a 60° incidence. The location of the maximum am plification area has significant changes : it is at a distance of 500 m from the western edge of the deposit for a normal incidence and at 700 m for a 60° incidence (Figure 3.6—10). The numerical modelling gives an interesting estimation of spatial variability of site effects [12,33].

For a frequency of 1.6 Hz (Figure 3.6—10), the amplification factor decreases when incidence is lower. Its value is 15.5 for a normal incidence but is under 7.0 for a 60° incidence. It is also inter esting to notice that, for a 60° incidence, seismic site e ffects are stronger at 1.2 Hz than at 1.6 Hz. The resonant frequency of the surface layer is still changing from one incidence to another. The differences between results corresponding to various incidences are due to the dependence of horizontal and vertical wavenumbers on incidence. The deposit « appears » thicker for decreasing incidence and the amplification factor for low frequencies is then higher for lower incidences. Furthermore, both basin edge and focusing effects [42] are certainly affected by the incidence angle and then modify the spatial variability of site effects.

3.6.6 Amplification in a damped medium

Damping properties of the model

The boundary element model presented previously does not involve any damping. In this section, the numerical model is supposed to have a linear viscoelastic behaviour. The formulation of damping corresponds to a Zener model or standard solid [11,35,36] . This rheological model is depicted in Figure 3.6—11 for shear response and the expression of the inverse of the quality factor Q^{-1} (i.e. attenuation) is given as a function of frequency. The variations of Q^{-1} with frequency are also drawn in this figure showing a peak corresponding to the maximum value of attenuation. Considering this rheological

© 2008 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

model, the complex shear modulus of the medium $\mu^*=\mu_R+i.\mu_I$ can be written as a function of frequency, short term (instantaneous) μ_{st} and long term μ_{lt} shear moduli as follows :

$$\begin{cases} \mu_R = \dfrac{\mu_{lt}\mu_{st}^4 + \omega^2\zeta^2\mu_{st}\left(\mu_{st}-\mu_{lt}\right)^2}{\mu_{st}^4 + \omega^2\zeta^2\left(\mu_{st}-\mu_{lt}\right)^2} \\ \mu_I = \dfrac{\omega\zeta\mu_{st}^2\left(\mu_{st}-\mu_{lt}\right)^2}{\mu_{st}^4 + \omega^2\zeta^2\left(\mu_{st}-\mu_{lt}\right)^2} \end{cases} \quad (7)$$

where ζ is the viscosity coefficient of the Zener's model (Figure 3.6—11), μ_R and μ_I are the real and imaginary parts of the complex shear modulus and the long term shear modulus is such as :

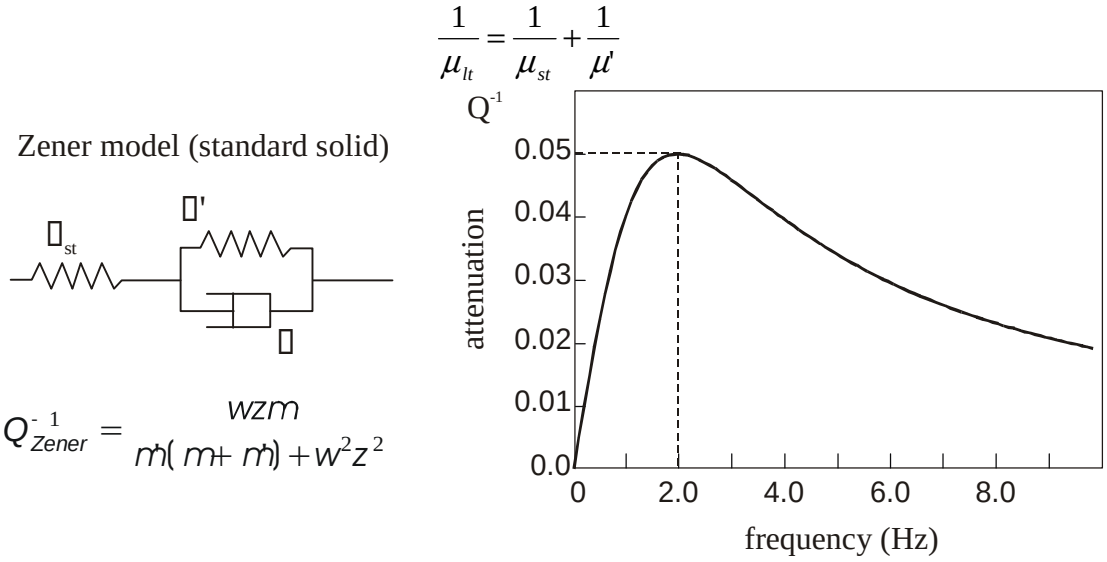


Figure 3.6—11: Zener's model (standard solid) and corresponding attenuation vs frequency dependency.

For the computation of wave amplification in the damped surface layer, the characteristics of Zener model are chosen such as the maximum attenuation value is reached at a frequency of 2.0 Hz. The elastic bedrock is supposed to be undamped. The values of attenuation Q^{-1} and of corresponding damping ratio ξ ($Q^{-1}=2\xi$) for the basin are given in Figure 3.6—12 for the three cases studied.

Figure 3.6—12: Maximum values of the inverse of the quality factor and the damping ratio.

	undamped	case 1	case 2	case 3
max. Q^{-1}(at 2 Hz)	0.00	0.02	0.04	0.06
damping ratio ξ		1 %	2 %	3 %

Amplification and damping

The amplification factor along the basin surface is firstly studied. Figure 3.6—13 gives its values at several frequencies and for different attenuations. For the four frequencies considered, the values of attenuation Q^{-1} can be computed from the expression given in Figure 3.6—11. For 2.0 Hz, attenuation values are already given in table I. For the other frequencies, its values are the following for the case of highest damping (No.3) : Q^{-1}(1.0 Hz)=0.048, Q^{-1}(1.4 Hz)=0.056 and Q^{-1}(1.6 Hz)=0.059. For 1.0 Hz, the amplification level is rather low and the influence of damping is not very strong. At this frequency, there is no effect of damping on the location of maximum amplification. For 1.4 and 1.6 Hz, site effects are much stronger and the influence of damping on amplification factor values can be large since, for the highest attenuation value, they are divided by a factor of 2 at 1.4 Hz and by a factor of 3 at 1.6 Hz.

© 2008 Tous droits réservés.

However, for the lowest attenuation value, the discrepancy between damped and undamped curves is not very large. Near the so-called resonance of the basin, the influence of damping on amplification can be very strong for high attenuation values. For both frequencies, there is still no significant effect on the location of the peaks. For 2.0 Hz, that is the frequency giving the maximum value of attenuation (Q^{-1}=0.06), the influence of damping on amplification is lower than for 1.4 and 1.6 Hz. The location of maximum amplifications is however significantly modified between the undamped case and the case of highest damping.

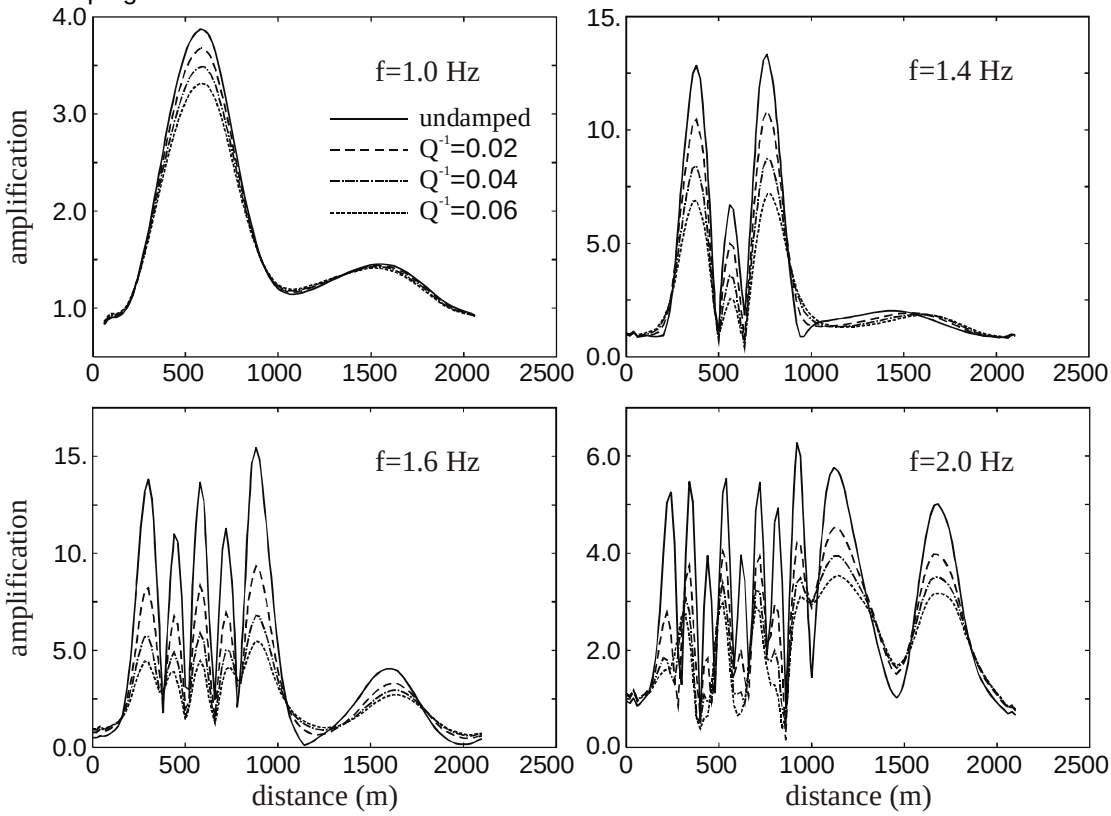


Figure 3.6—13. Amplification factor along the basin surface in damped and undamped cases for different frequencies.

It is interesting to investigate the variations of the overall maximum amplification vs frequency for different values of damping. The Figure 3.6—14 gives the maximum amplification factor for the undamped case and for the three damped cases presented in Figure 3.6—12. From these curves, the overall maximum factor appears to have significant differences between damped and undamped cases. The relative decrease of the amplification factor in the three damped cases (No.1, 2 and 3) compared with undamped case is respectively -28 %, -45 % and -54 %. For the highest attenuation value (Q^{-1}=0.06), the difference is very large between damped and undamped cases but it appears smaller than in Figure 3.6—13 since there is a significant shift in the amplification peaks. As far as the amplification level is concerned, the comparisons made in Figure 3.6—13 are not completely satisfactory since the amplification peaks are not related to the same frequencies. Concerning the frequency dependency of the amplification factor, similar amplification types are observed in the undamped cases, that is three main amplifications around 1.4/1.6 Hz, 2.4 Hz and between 3.5 and 3.8 Hz. The frequency shift of the amplification peaks in the damped cases is much larger for the third main amplification. The curves of Figure 3.6—13 and Figure 3.6—14 show the strong effect of damping on amplification level but a very slight influence on occuring frequencies. It is therefore very important to perform, in the specific site considered, reliable measures of the damping properties of the surface soil layers.

© 2008 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

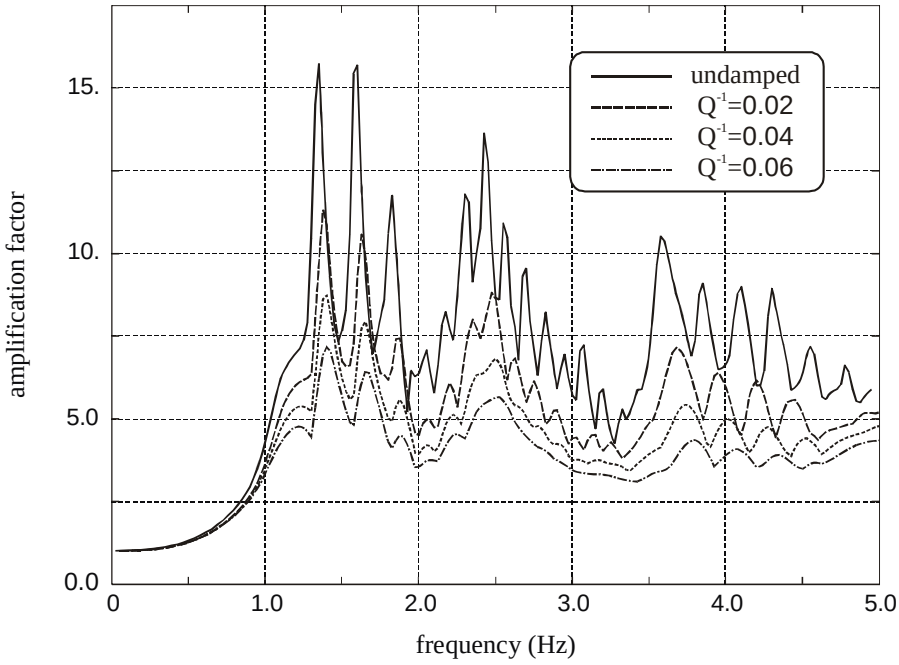


Figure 3.6—14. Overall maximum amplification factor vs frequency for a damped and undamped surface layer.

3.6.7 P and Sv-waves

For pressure and shear waves (P and SV), the motion is in the propagation plane. It is not possible to use Green's functions of an infinite half-space (as for SH-waves) and one needs to extend the boundary element mesh on both sides of the deposit. The boundary element mesh considered in the case of P and SV waves is given in Figure 3.6—15. To avoid numerical errors due to the truncation of the mesh, it has to be sufficiently extended to model correctly the infinite wideness of the bedrock. P and SV waves computations are performed using several punctual sources at a 500 m depth. The amplitude of these sources is arbitrary. The amplification factor is estimated in reference to preliminary computations only involving an homogeneous half-space.

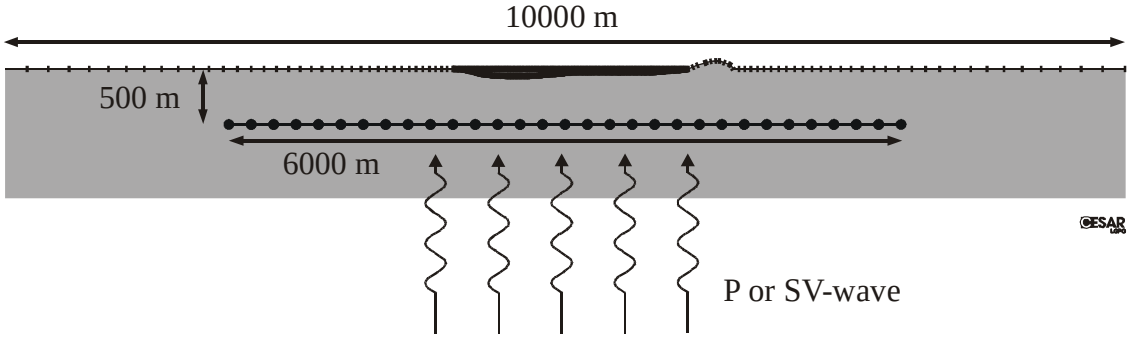


Figure 3.6—15. Boundary element mesh for P and SV waves.

Curves of Figure 3.6—16 give the amplification factor values in every point of the surface for various frequencies and for three different wave types (SH, P and SV). For these simulations, mechanical characteristics of the deposit and of the bedrock are the same as in sections 2 and 4.

© 2008 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

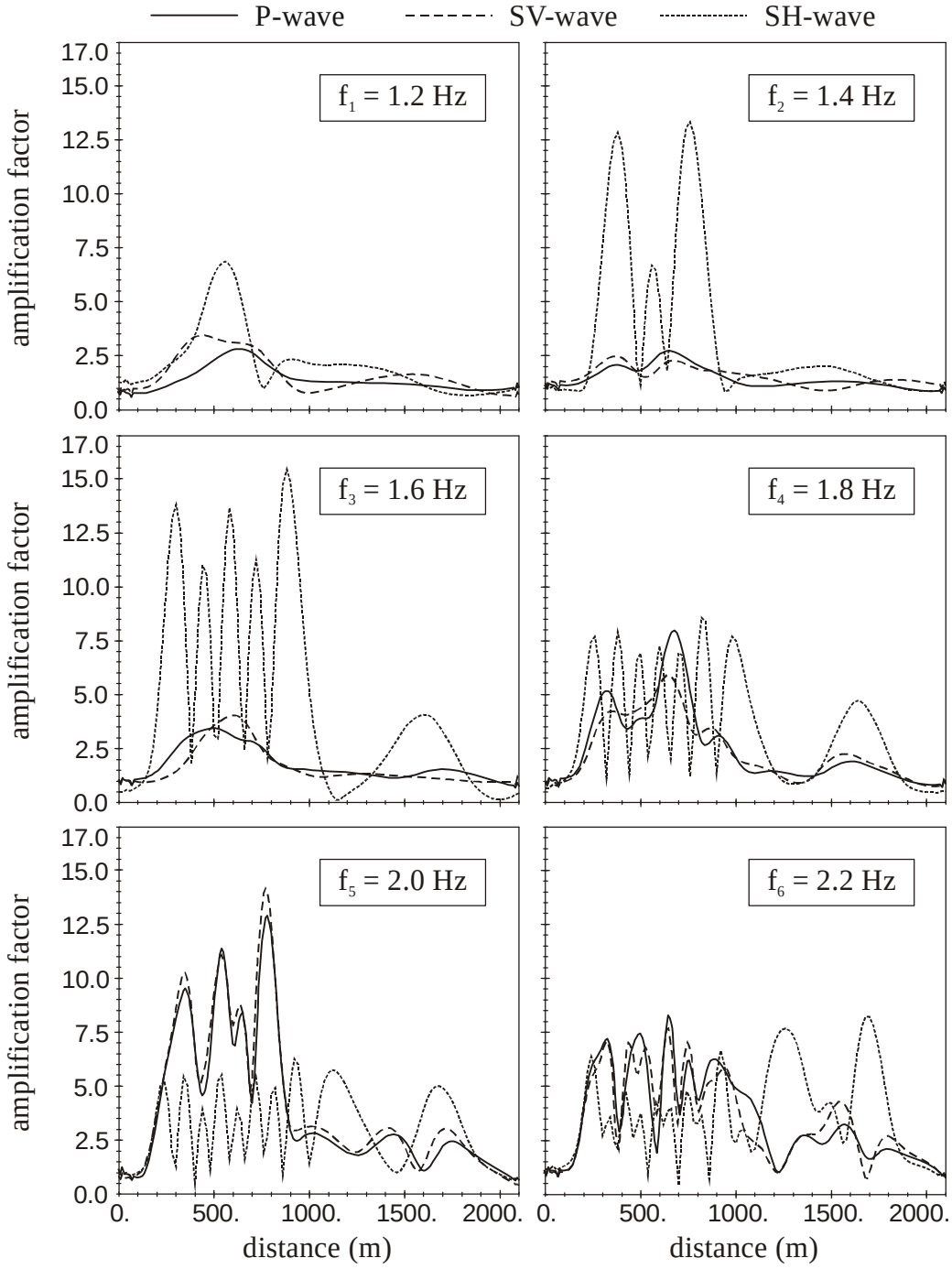


Figure 3.6—16. Amplification factor for different wave types at various frequencies.

For low frequencies (1.2 and 1.4 Hz,Figure 3.6—16), P and SV-wave amplification is very low whereas SH-waves amplification is significant (between 7.0 and 8.0), and even stronger at 1.4 Hz (13.0). The maximum amplification always occurs in the thickest part of the alluvial deposit.

For higher frequencies (1.6 and 1.8 Hz, Figure 3.6—16), seismic amplification of SH-waves is maximum (15.5) for 1.6 Hz whereas it is below 4.0 for P and SV-waves. At 1.8 Hz, site effects are rather equivalent for the three wave types and the amplification factor is between 6.0 and 8.0. The highest amplification factor is always reached in the western (thickest) part of the deposit. Nevertheless, the number and extent of maximum amplification areas depend on the wave type. Around 2.0 Hz, P- and SV-waves give strong amplification (13.0 and 14.0 respectively) but for SH-waves, the amplification factor is under 6.0. At 2.2 Hz, the amplification in the thinnest part of the

© 2008 Tous droits réservés.

deposit increases for SH-waves (7.5). In the thickest part of the deposit, the amplification factor is always under 8.0 for all wave types.

For all frequencies, the maximum amplification factor is then between 13.0 for P-waves and 14.0 for SV-waves. The highest amplification factor is reached for SH-waves at 1.6 Hz (16.0). It is always reached in the thickest part of the deposit, whereas the thinnest part has lower amplification at higher frequencies.

3.6.8 Comparison between numerical and experimental results

Mechanical parameters of the alluvial filling

As the alluvial deposit is assumed to be an homogeneous layer of constant shear modulus, it is easy to analyze the influence of the mechanical characteristics of the basin on the amplification process. In the next section, this preliminary analysis will enable a complete comparison between numerical and experimental results. Three different values of the shear modulus of the basin are considered in this section : μ_1=180 MPa as for the previous computations, $\mu_2=2\mu_1/3$=120 MPa and $\mu_3=\mu_1/2$=90 MPa. The corresponding shear wave velocities are the following : C_1=300 m.s^{-1}, C_2=245 m.s^{-1} and C_3=212 m.s^{-1}.

The curves given in Figure 3.6—17 show the amplification levels along the basin surface for these values of shear modulus at two different frequencies. At 1.2 Hz, the number of amplification peaks is larger for lower shear moduli since the corresponding wave velocities are lower and lead to smaller wavelengthes. Values of amplification factor are different in the three cases and it ranges from 7.0 in the first case (μ_1) to 10.0 in the third case (μ_3). Furthermore, the maximum values are not reached at the same places along the basin surface. At 1.8 Hz, the discrepancy between the three curves is even larger since the maximum amplification ranges from 8.5 in the first case to 15.0 in the third case. The location of maximum amplification areas is also very different : in the first case, amplification is maximum in the western part, in the second case, amplification is maximum in the middle of the basin and in the third case, amplification is maximum in the eastern part. These results show the importance of in situ measurements to estimate geometrical and mechanical characteristics of the surface layers. These characteristics are mean parameters estimated experimentally. The numerical model allows the analysis of sensitivity to these parameters. These different numerical results are compared hereafter with experimental ones.

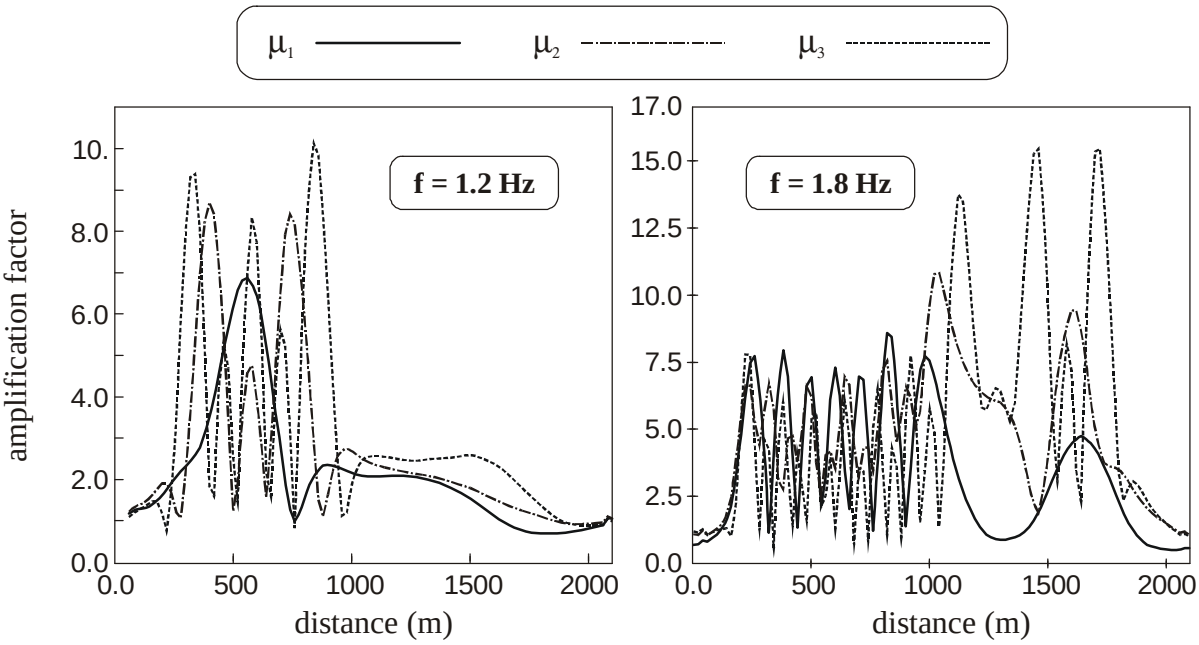


Figure 3.6—17. Amplification factor versus distance for three values of shear modulus of the alluvial basin at two different frequencies.

Model/experiments comparisons in the three directions of space

The numerical results are now compared with experimental measurements of seismic site effects in the case of real earthquakes (weak motion). We consider the experimental results displayed in Figure

© 2008 Tous droits réservés.

3.6—2 giving the spectral ratios (site/reference) for the three motion components : vertical, North-South, East-West. Spectral ratios of the three different components of the seismic motion are respectively compared to numerical results with P-wave, SH-wave and SV-wave loading (with normal incidence). Since the geological profile is along East-West direction (Figure 3.6—1), vertically incident P-wave gives vertical motion, SH-wave corresponds to anti-plane motion in North-South direction and vertically incident SV-wave is related to East-West motion.

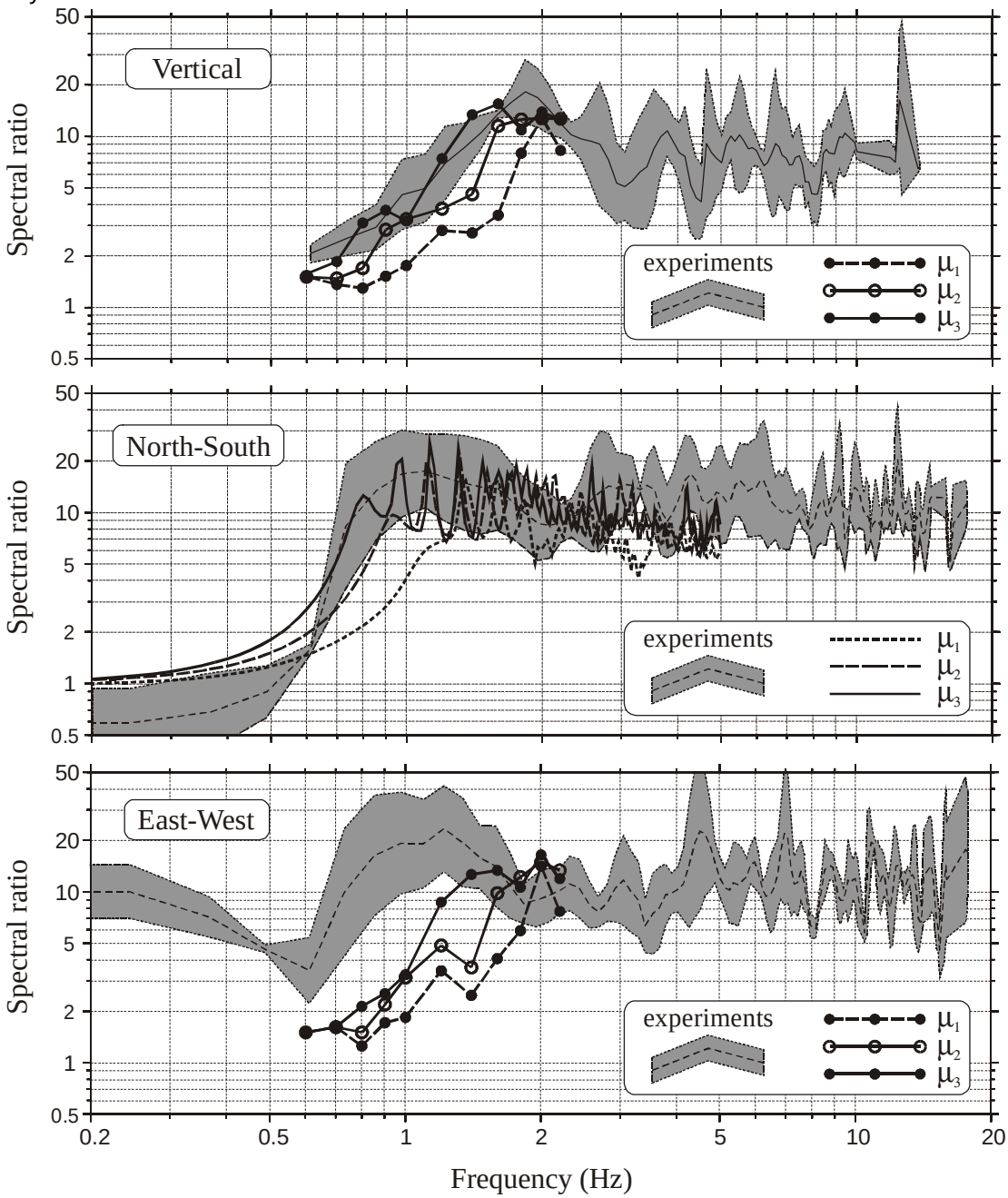


Figure 3.6—18. Comparisons between experimental measurements (real earthquakes) and numerical results in the three motion components.

The Figure 3.6—18 gives both numerical and experimental results : numerical results correspond to the overall maximum amplification and, for experimental ones, the dotted line gives the mean value and the shaded area the standard deviation interval. The comparisons for each motion component lead to the following conclusions :

- *vertical component* : the numerical results are computed for eleven frequency values between 0.6 and 2.2 Hz (the number of frequencies is limited since one has to estimate both amplitudes in the case involving the alluvial basin and in the case of an infinite half-space). For the vertical motion component, that is P-wave excitation for boundary element model, the three numerical results are

© 2008 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

not far from the experimental curves. The third case (lowest shear modulus) leads to a very good agreement with the experimental spectral ratio since all ratios estimated numerically are within the standard deviation range of the experiments (at the same frequencies),

- *North-South component* : the numerical results are computed for 200 different frequency values. For the North-South motion component, that is SH-wave excitation for boundary element model, the three numerical results are rather close to the experimental curves. The third case (μ_3) gives very good numerical results concerning maximum amplification levels when compared to the experimental spectral ratios. The two main amplification in the thickest part of the deposit (above 1.0 Hz) and in the thinnest part (above 2.5 Hz) are detected with both approaches. These frequencies are not far from those determined analytically (§2) assuming an infinite alluvial layer of constant depth. Nevertheless, for all three numerical cases, the experimental spectral ratios are smaller than numerical amplification factors for low frequencies (below 0.6 Hz),
- *East-West component* : the numerical results are computed for eleven frequency values between 0.6 and 2.2 Hz. For the East-West motion component, that is SV-wave excitation for boundary element model, the three numerical results are not very close to the experimental curves. The third case (μ_3) leads to the best agreement with the experimental spectral ratios but the discrepancy is rather significant since it is about 0.4 Hz in terms of frequency shift. Nevertheless, for all three numerical cases, the numerical amplification factors are of the same order than the experimental spectral ratios but for higher frequencies.

For vertical and North-South motion components, numerical results are in very good agreement with experimental ones giving close amplification levels at same frequencies. For both components, the best agreement is obtained in the third case, that is the lowest shear modulus ($\mu_3=\mu_1/2=90$ MPa) or wave velocity ($C_3=212$ m.s^{-1}). In the case of SV-waves (East-West component), the maximum amplification factor estimated numerically is as high as the experimental spectral ratio but there is a frequency shift of approximately 0.4 Hz. For this motion component, the assumption of a homogeneous alluvial basin is perhaps not appropriate and one has probably to precisely model the velocity distribution with depth.

3.6.9 Conclusions

Site effects lead to a local amplification of seismic motion. They are significant in the highly builded areas of the center of Nice. In situ experiments performed by the CETE-Méditerranée show that the seismic motion should be strongly amplified between 1 and 2 Hz. The amplification levels are around 20 and cannot be recovered considering a simple analytical model involving an infinite surface layer of constant depth.

Numerical simulations based on the boundary element method allows a precise description of the site as well as an accurate analysis of seismic wave propagation within the alluvial basin. Amplification levels and occurring frequencies are of the same order as the experimental values. As also shown by the experiments, the maximum amplification estimated numerically is located in the thickest part of the alluvial basin for lower frequencies and in the thinnest part for higher frequencies.

Site effects quantified numerically are sensitive to incidence. It changes the maximum amplification factor, the frequency at which it occurs and the corresponding location. The influence of damping on amplification is also large. Two types of interpretation of this strong influence could be proposed : the first one in terms of vibration and resonance considering that the influence of damping near the resonance of a system is large, the second one in terms of wave propagation taking into account the multiple wave reflections in the alluvial layer increasing consequently the effect of damping.

Finally, for the various wave types considered (SH, P, SV), seismic motion amplification is very different but always reaches a high level (between 13.0 and 16.0). Shear waves lead to the strongest site effects. The location of maximum amplification areas is also depending on the features of the seismic loading. The mechanical characteristics of the deposit have a significant influence on these numerical results. For SH-waves, the amplification factor ranges from 16.0 at 1.35 and 1.60 Hz (for the highest shear modulus) to 25.5 at 1.12 Hz (for the lowest modulus). The lowest shear modulus leads to numerical results in very good agreement with experimental ones for P- and SH-waves (vertical and North-South components respectively).The boundary element method seems to be efficient to analyze site effects from a qualitative as well as quantitative points of view.

To improve the numerical boundary element model, two main points would have to be emphasized : the description of the different surface layers with variable shear modulus and the influence of their respective damping features. These two points may lead to a better understanding of seismic site effects and allow more detailed comparisons between experimental and numerical results. Nevertheless, the experimental determination of *dynamic* mechanical properties is often difficult (costly,

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

many different methods (cyclic, dynamic...), scattered values) especially when analyzing their distribution with both depth and distance along a complete geological profile.

References

1. Anandarajah, A., Rashidi, H., Arulanandan, K. 1995. Elasto-plastic finite element analyses of a soil-structure system under earthquake excitation, *Computers and Geotechnics*, 17 : 301-325.
2. Aubry, D., Clouteau, D. 1991. A regularized boundary element method for stratified media, *1st Int. Conf. on Mathematical and Numerical Aspects of Wave Propagation*, SIAM.
3. Bard, P.Y. & Bouchon, M. 1985. The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys, *Bull. Seismological Society of America*, 75(2) : 519-541.
4. Bard, P.Y. 1994. Effect of surface geology on ground motion : recent results and remaining issues, *10th European Conf. on Earthquake Engineering*, Vienna, Austria, 1 : 305-323.
5. Belytschko, T.B., Bazant, Z.P., Hyun, Y.W., Chang, T.P. 1986. Strain-softening materials and finite element solutions, Computers and Structures, 23 : 163-180.
6. Beskos, D.E. 1997. Boundary element methods in dynamic analysis, Part. II (1986-1996), *Applied Mechanics Rev.*, 50 : 149-197.
7. Bisch, P., Langeoire, A., Prat, M., Semblat, J.F. 1999. *Finite element methods in civil engineering - Structures in interaction*, Chap.7 : Modelling of structures in seismic areas (in French), pp.467-562, Hermes Science ed, Paris.
8. Bonnet, M. 1999. Boundary integral equation methods for solids and fluids, Wiley, 391 p., Chichester.
9. Bouchon, M. 1973. Effects of topography on surface motion, *Bull. Seismological Society of America* 63: 615-622.
10. Bour, M., Fouissac, D., Dominique, P., Martin, C. 1998. On the use of microtremor recordings in seismic microzonation, *Soil Dynamics and Earthquake Eng.* 17(7-8): 465-474.
11. Bourbié, T., Coussy, O., Zinszner, B. 1987. Acoustics of porous media, Technip, 334 p., Paris.
12. Chávez-García, F.J., Raptakis, D.G., Makra, K., Pitilakis, K.D. 2000. Site effects at Euroseistest-II. Results from 2D numerical modelling and comparison with observations, *Soil Dynamics and Earthquake Eng.* 19(1): 23-39.
13. Dangla, P. 1988. A plane strain soil-structure interaction model, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16 : 1115-1128.
14. Duval, A.M., Méneroud, J.P., Vidal, S., Bard, P.Y. 1994. Usefulness of microtremor measurements for site effect studies. *10th European Conf. on Earthquake Engineering*, Vienna, Austria.
15. Duval, A.-M. 1996. *Determination of the seismic site response with microtremors. Experimental analysis* (in French), PhD thesis (University Paris VI), Etudes et Recherches des LPC, GT62, LCPC, Paris.
16. Duval, A.M., Méneroud, J.P., Vidal, S.and Bard, P.Y. 1998. Relation between curves obtained from microtremor and site effects observed after Caracas 1967 earthquake, *11th European Conf. on Earthquake Engineering*, Paris, France.
17. Faccioli, E., Maggio, F., Quarteroni, A., Tagliani, A. 1996. Spectral-domain decompostion method for the solution of acoustic and elastic wave propagation, *Geophysics*, 61 : 255-260.
18. Fiegel, G.L., Kutter, B.L., Idriss, I.M. 1998, Earthquake-induced settlement of soft clay, *Int. Conf. Centrifuge 98*, Tokyo, Japan : 231-236.
19. Frischknecht, C., Gonzenbach, M., Rosset, P., Wagner, J.J. 1998. Estimation of site effects in an alpine valley. A comparison between ground ambient noise response and 2D modeling, *11th European Conf. on Earthquake Engineering*, Paris, France.
20. Guéguen, P., Bard, P.Y., Semblat, J.F. 2000. From soil-structure to site-city interaction. 12th World Conf. on Earthquake Eng., Auckland, New Zealand.
21. Hardin, B.O., Drnevich, V.P. 1972. Shear modulus and damping in soils : measurement and parameter effects, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (A.S.C.E)*, 98 : 603-624.
22. Heitz, J.F. 1992. *Wave propagation in non linear medium* (in french), PhD thesis, Grenoble University.
23. Humbert, P. 1989. CESAR-LCPC : a general finite element code (in french), *Bulletin des Laboratoires des Ponts & Chaussées*, 160: 112-115.
24. Joly, P., Lohrengel, S., Vacus, O. 1999. Existence and uniqueness results for the Helmholtz equation with second order absorbing boundary conditions, *C.R. Acad. Sci. Paris*, t.329, Série

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

I : 193-198.
25. Kokusho, T. 1999. Effect of nonlinear soil properties on seismic amplification in surface layers, *2nd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Eng.*, Lisbon, Balkema ed.: 913-918.
26. Luong, M.P. 1995. Centrifuge simulation of Rayleigh waves in soils using a drop-ball arrangement, *Dynamic Geotechnical Testing II*, ASTM STP 1213, ed. R.J. Ebelhar, V.P. Drnevich & B.L. Kutter.
27. Modaressi, H., Benzenati, I. 1992. An absorbing boundary element for dynamic analysis of two-phase media, *10th World Conf. on Earthquake Engineering*, Madrid, pp.1157-1163.
28. Moeen-Vaziri, N., Trifunac, M.D. 1988. Scattering and diffraction of plane SH-waves by two-dimensional inhomogeneities, *Soil Dynamics and Earthquake Eng.* 7(4): 179-200.
29. Paolucci, R. 1999. Fundamental vibration frequencies of 2D geological structures, *2nd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Eng.*, Lisbon, Balkema ed.: 255-260.
30. Pecker, A. 1984. *Soil dynamics* (in french), Presses de l'ENPC, 259 p., Paris.
31. Pedersen, H.A., Campillo, M., Sanchez-Sesma, F.J. 1995. Azimuth dependent wave amplification in alluvial valleys, *Soil Dynamics and Earthquake Eng.* 14(4): 289-300.
32. Pitilakis, K.D., Raptakis, D.G., Makra, K.A. 1999. Site effects : recent considerations and design provisions, *2nd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Eng.*, Lisbon, Balkema ed.: 901-912.
33. Raptakis, D.G., Chávez-García, F.J., Makra, K., Pitilakis, K.D. 2000. Site effects at Euroseistest-I. Determination of the valley structure and confrontation of observations with 1D analysis, *Soil Dynamics and Earthquake Eng.* 19(1): 1-22.
34. Rodriguez-Marek, A., Bray, J.D., Abrahamson, N.A. 2000. A geotechnical seismic site response evaluation procedure, *12th World Conf. on Earthquake Eng.*, Auckland, New Zealand.
35. Semblat, J.F. 1997. Rheological interpretation of Rayleigh damping, *Jal of Sound and Vibration* 206(5): 741-744.
36. Semblat, J.F. & Luong, M.P. 1998a. Wave propagation through soils in centrifuge testing, *Jal of Earthquake Engineering* 2(10): 147-171.
37. Semblat, J.F. 1998b. Damping and dispersion of waves : physical and numerical points of view (in french), *Revue Française de Génie Civil*, 2(1): 91-111.
38. Semblat, J.F., Dangla, P., Duval, A.M. 1999a. BEM analysis of seismic wave amplification in Caracas, *7th Int. Symposium on Numerical Models in Geomechanics (NUMOG)*, Graz, Austria, Balkema ed.: 275-280
39. Semblat, J.F., Luong, M.P., Gary, G. 1999b. 3D-Hopkinson bar : new experiments for dynamic testing on soils, Soils and Foundations, 39(1): 1-10.
40. Semblat, J.F., Duval, A.M., Dangla, P. 2000a. Analysis of seismic site effects : BEM and modal approach vs experiments, *12th World Conf. on Earthquake Eng.*, Auckland, New Zealand.
41. Semblat, J.F. & Brioist, J.J. 2000b. Efficiency of higher order finite elements for the analysis of seismic wave propagation, *Jal of Sound and Vibration* 231(2): 460-467.
42. Somerville, P. 2000. Seismic hazard evaluation, *12th World Conf. on Earthquake Eng.*, Auckland, New Zealand.
43. Stokoe, K.H., Darendeli, M.B., Andrus, R.D., Brown, L.T. 1999. Dynamic soil properties: Laboratory, field and correlation studies, *2nd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Eng.*, Lisbon, Balkema ed.: 811-845.
44. Theodulidis, N.P., Bard, P.Y. 1995. Horizontal to vertical spectral ratio and geological conditions: an analysis of strong motion date from Greece and Taiwan (SMART-1), *Soil Dynamics and Earthquake Eng.* 14(3): 177-197.
45. Wolf, J.P., Song, C. 1997. *Finite-element modelling of unbounded media*, 331 p., Wiley, Chichester.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

3.7 Conclusion sur la détection des effets de site

Depuis 1991, j'ai travaillé sur les méthodes expérimentales de détermination des effets de site. Les nombreuses campagnes d'enregistrement de séismes m'ont permis d'affiner les contraintes de mises en œuvre (et la relativité de la station de référence) ainsi que les traitements destinés à obtenir la meilleure information possible à partir de mouvements plus ou moins importants. Ainsi les fonctions de transfert obtenues entre un site et une référence doivent être interprétées en tenant compte des éventuels effets de non-linéarité de comportement des sols pouvant induire un "glissement" de la fréquence fondamentale du site et une modération du niveau d'amplification.

De nombreux sites étudiés ont également fait l'objet de simulation numérique de propagation des ondes à travers une colonne de sol (cas 1D). La collaboration avec le LCPC a permis de faire progresser les techniques numériques de simulations plus sophistiquées (éléments finis, les éléments de frontière) en 2 voire 3 dimensions.

Dès le début de mon implication sur les effets de site, j'ai mis en œuvre la méthode "H/V bruit de fond" en "tâtonnant" et en élaborant chacune des procédures de terrain, de traitement et d'interprétation. En effet, cette technique n'était pas connue en France et la diffusion de l'article de son promoteur japonais M. Nakamura a provoqué de nombreuses discussions. Dès les premiers essais réalisés dans le centre de Nice, cette technique s'est révélée très prometteuse: les mesures de bruit de fond effectuées sur un site sédimentaire "amplificateur" montrent des pics qui pointent sur la fréquence de résonance du site. Les résultats obtenus lors des multiples campagnes mises en oeuvre ont été confirmés par le travail commun de nombreuses équipes européennes réunies dans le consortium européen SESAME. Cette méthode économique et rapide est maintenant pourvue de bases communes de mise en œuvre, de traitement informatique et d'interprétation destiné à tous les utilisateurs potentiels.

Les méthodes de bruit de fond en réseau ont également été testées au cours du projet SESAME. Le sujet de thèse proposé en 2004 au LCPC visait à améliorer et uniformiser les procédures d'études dans le cadre des microzonages et des PPR sismiques. Un protocole a été mis en place avec des outils concrets de mise en oeuvre. Une formule analytique a été proposée pour modifier le spectre de réponse établi au rocher (réglementaire ou autre) à partir de la fréquence Fo et des vitesses Vs établies à partir de l'enregistrement de bruit de fond. Cette formule, issue de l'analyse des enregistrements du réseau japonais Kiknet, doit être testée sur d'autres sites et éventuellement affinée en fonction du niveau de sollicitations envisagé. La formule et le protocole d'obtention de Fo et Vs forment une avancée intéressante dans le domaine des techniques de microzonage en permettant une homogénéisation des pratiques des bureaux d'études français.

Même si la maîtrise des phénomènes peut paraître encore limitée, il semble tout de même évident que la recherche sur les effets de site a largement progressé ces quinze dernières années en France comme à l'étranger. La mise au point d'outils de mesure de ces effets et leur application sur des territoires sensibles par mon équipe a contribué à la prise de conscience des enjeux de recherche auprès des pouvoirs publics ainsi qu'au sein même de la communauté scientifique. Aujourd'hui le microzonage et la détection des effets de site forment une discipline reconnue de la sismologie en France, ce qui permet de croire que les moyens affectés permettront à terme de résoudre les grandes questions qui restent ouvertes comme les effets de site topographiques, les effets de bassin ou la non-linéarité de réponse des sols par exemple.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

4 Effets de site et dommages sismiques

4.1 Introduction

L'observation des dommages provoqués par un séisme est à la base de la prise de conscience des effets de site. Les trois principales études de cas auxquelles j'ai participé m'ont apportées des enseignements très différents. Leur point commun est de comparer les résultats d'analyse des effets de site à une éventuelle aggravation des dommages provoqués par des séismes.

Le premier cas concerne la ville de **Caracas au Venezuela** où la campagne de mesure de bruit de fond que j'ai conduite avec mes collègues de l'ERA6 et de la FUNVISIS en 1995 a conforté et précisé les explications sur la répartition des dommages du séisme de 1967. Ce séisme avait provoqué de graves dommages à certains bâtiments allant jusqu'à la destruction totale dans certains quartiers de Caracas. Ces dommages avaient été répertoriés sur carte après le séisme. Des profils de sismique réflexion avaient permis de reconnaître la géométrie du bassin sédimentaire qui compose un des quartiers les plus affectés (Palos Grandes). Les calculs effectués à l'époque indiquaient une probable mise en résonance des ondes sismiques dans la partie la plus profonde du bassin. En 1995, l'ERA6 et la FUNVISIS ont réalisé 184 mesures de bruit de fond sismique. Le paragraphe 4.2 présente les résultats des calculs "H/V" confrontés à l'épaisseur de ces sédiments et à la répartition des dommages.

Un autre cas d'analyse post-sismique a été réalisé à **Nice. Le 25 février 2001**, un séisme de magnitude 4.7 en mer Ligure était ressenti dans le sud-est de la France. L'intensité de ce séisme a été estimée par le BCSF à V (selon l'échelle EMS98) au maximum à Nice. Il a semblé intéressant de corréler finement la perception du séisme à Nice avec les études expérimentales et numériques d'effet de site en cours. Cette corrélation s'est appuyée sur l'analyse de près de 4000 réponses individuelles envoyées par la population niçoise suite à la diffusion d'un questionnaire par voie de Presse. Ce travail réalisé pour le compte du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable [EE28] a permis de construire une échelle de perception des effets de la secousse par chaque observateur et de concevoir des outils méthodologiques pouvant être repris lors d'études post-sismiques. L'étude présentée dans le paragraphe 4.3 met en relation les limites du microzonage, la profondeur du remplissage sédimentaire, l'étage d'observation, l'époque de construction du bâtiment et les valeurs moyennes de perception.

Enfin, la dernière campagne d'observation post-sismique à laquelle j'ai participé s'est déroulée aux Antilles. Le 21 novembre 2004, un séisme de magnitude 6,3 a secoué le sud de la **Guadeloupe**, déjà éprouvée par de fortes intempéries. Les deux îles appelées "Les saintes", situées à 15 km de l'épicentre ont subi les plus forts dommages. Quelques semaines après le séisme, le CETE Méditerranée organisait une mission post sismique visant à créer des synergies entre ses experts en aléa (ERA Risque sismique) et une nouvelle équipe d'experts en vulnérabilité en appliquant diverses méthodes d'analyse, y compris des enregistrements sismiques. La confrontation entre les approches résultantes, analyse des fréquences de résonance des sols et répartition des dégâts, fait l'objet du paragraphe 4.4.

4.2 Caracas, Venezuela, séisme de 1967

Ce chapitre 4-2 est constitué par un article publié sous la référence: A.-M. Duval, S. Vidal, J.-P. Méneroud, A. Singer, F. De Santis, C. Ramos, G. Romero, R. Rodriguez, A. Pernia, N. Reyes, C. Griman, *"**Caracas, Venezuela, Site effect determination with microtremors**";* Pure and Applied Geophysics, PAGEOPH, Vol.158, n°12, pp.2513-2523, 2 001.

Il présente les résultats d'un travail réalisé avec l'appui de mes collègues de la FUNVISIS (Fundacion Venezolana de Investigaciones sismologicas) à Caracas, Venezuela en 1995.

4.2.1 Introduction

Caracas is built on a typical alluvium basin. The 6.4 magnitude earthquake that occurred in 1967, July the 29th at 56 km on the north, caused the loss of over 200 lives and strong damages in the town. The maximum ground acceleration was estimated of the order of 0.06 to 0.08 g in east Caracas. It was pretty obvious, that the importance of damages was linked to site effects. After the earthquake a very important work was made by American soil specialists [Bolton Seed H., Idriss I.M., Dezfulian H., 1970], [Weston Inc., 1969], [Whitman R. V., 1969] and [Bolton Seed et al, 1972]. A good correlation between the frequencies of damaged buildings themselves and the calculated frequencies of the sites was demonstrated. The Caracas 1967 earthquake was one of the firsts for which the importance of site

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

effects was noticed. For this reason, we have tested at the same place, with the collaboration of FUNVISIS, the method based on microtremor measurement, developed during the last years. This method called " H/V on microtremors " was applied in Caracas downtown in 1995. In this paper results around Los Palos Grandes district are discussed.

4.2.2 Damages dues to 1967 earthquake in Los Palos Grandes district

Caracas basin is about 17 km long, and 4.8 km wide. The topography of the fill is almost flat but it is surrounded by mountains. The Rio Guaire runs in the length of this basin, and an important tributary " La sierra da Avila " meets the Rio Guaire. These rivers deposed alluvium soils like sand, gravel and hard clay. Numerous studies (seismic refraction, geophysical bore-hole) were conducted after the 1967 earthquake ([Bolton Seed H., Idriss I.M., Dezfulian H., 1970], [Weston Inc., 1969] and [Whitman R. V., 1969]). These surveys allow good descriptions of Caracas geological conditions. The most important zone of alluvium is called " Los Palos Grandes ". Sediment fill can reach 300 meters in the center of this area. The shear wave velocity is less than 500 m/s until 75 meters depth for Palos Grandes.
. The aim of the present study is to provide experimental resonance frequency of soil in this basin.

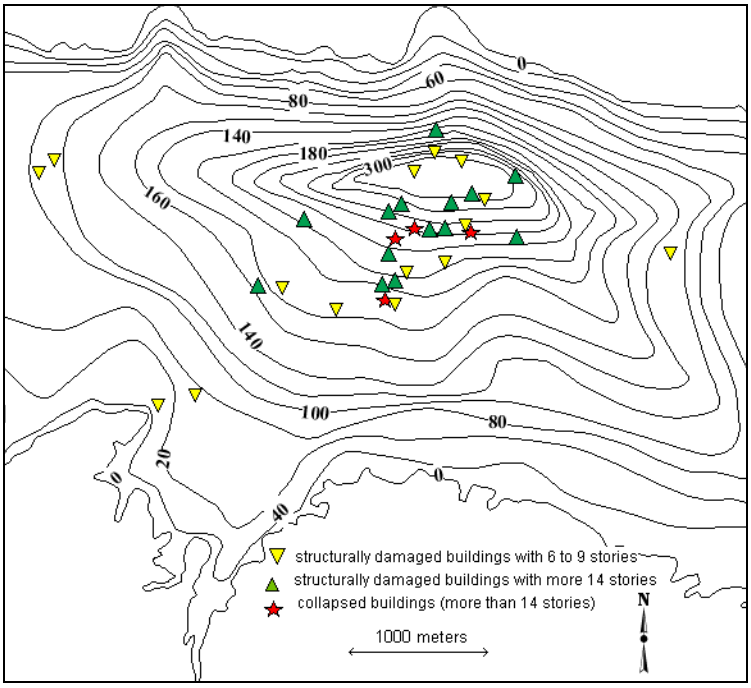


Figure 4.2—1: East part of Caracas basin including Los Palos Grandes area. Level curves represent alluvium thickness above bedrock (from 0 to 300 m). Damaged buildings due to the 1967 earthquake are located : squares are for structurally damaged buildings with 6 to 9 storeys, triangles are for structurally damaged buildings with more than 14 storeys, stars are for collapsed buildings (10-12 storeys). All those data are from [Bolton Seed. H., Idriss I.M., Dezfulian H., 1969].

A map of alluvium thickness all over the city was produced after the 1967 earthquake [Bolton Seed H., Idriss I.M., Dezfulian H., 1970]. The Figure 4.2—1 and Figure 4.2—2 are partly extracted from it and show soft sediment thickness under Palos Grandes district and the surrounding rock outcrop. The main interesting feature of the 1967 earthquake in Caracas was the geographical distribution of damage. About 550 buildings between 10 and 25 storeys were distributed at that time throughout the city and about 750 more in the 5 to 9 storeys range [Bolton Seed H., Idriss I.M., Dezfulian H., 1970]. Structural damages to high buildings (10 to 12 storeys) were concentrated in Palos Grandes. Four of these buildings collapsed. While structural damages from 1 to 2 storeys buildings were specially recognised in the north-western part of Caracas, around San Bernardino district, where alluvial deposit is less important. Structural damages to intermediate buildings (from 6 to 9 storeys) were regularly spaced over the basin. It was also stated that while there were certainly differences among the degree of earthquake resistance in various buildings, and while structural details were important in damage development for particular structures, design practice appeared to have been generally similar throughout the city.

© 2008 Tous droits réservés.

This damage distribution strongly suggests a link between sediment thickness and damaged building height. The more or less sophisticated computations that produce the first mode of the building vibrations clearly confirmed this link. In Los Palos Grandes specially, numerical simulations showed that the earthquake produced resonance phenomena at particular frequencies (closed to 0.6 Hertz). Buildings with natural frequency closed to that soil frequency were more seriously shacked and damaged. Main structural damages in Los Palos Grandes are reported in Figure 4.2—1. As far as now, the resonance frequency in Caracas was only estimated by means of numerical models

4.2.3 « H/V on microtremors » methodology

The method consists in recording vertical and horizontal component of microtremors. Transient signals (caused by few meter far sources) are avoided as much as possible because it has been experimentally proved that they could disturb results. Spectral ratio between horizontal and vertical component (H/V) should point out the natural frequency of the soil. This technique was initially proposed by M. Nogoshi and T. Igarashi [Nogoshi M. and Igarashi T., 1971]. Then Y. Nakamura applied it in urbanized area of Japan [Nakamura Y., 1989]. Some positive points were clearly demonstrated experimentally: at least for sites where soft sediments cover hard rock, « H/V ratio » forms a peak. This peak is stable in time and its frequency can be taken as resonance frequency [Duval A.-M., Méneroud J.-P., Vidal S. et Bard P.-Y., 1994], [Duval A.-M., 1996].

Before the use of microtremor, the only experimental way to know the resonance frequency of a site was to measure seismicity at that site in the same time than at a reference site. Deduced transfer function provides this frequency. With the microtremor method, only a few minutes of record on site are enough to state the same in terms of frequency. Some numerical simulations gave explanation to involved phenomena [Lachet C. and Bard P.-Y., 1994]. Microtremor is supposed to be produced by superficial sources that mainly give out Rayleigh waves. In an horizontal structure, the polarisation of these waves is totally dependent on the frequency and is maximum for the resonance frequency of the structure.

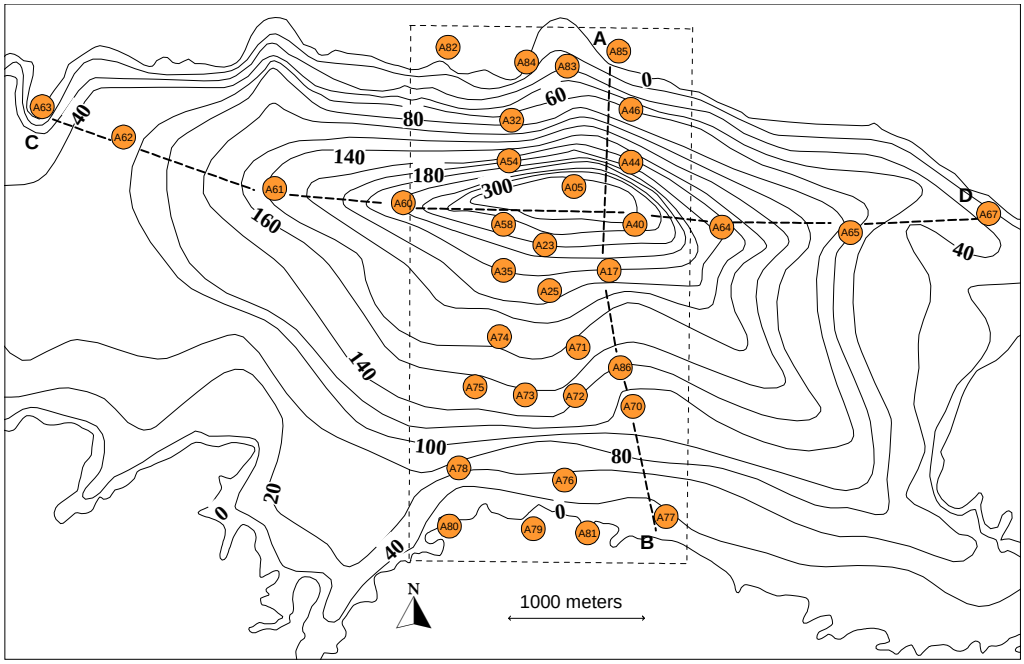


Figure 4.2—2: East part of Caracas basin including Los Palos Grandes area. Some of the 184 microtremor recording points are located in circles. Profiles AB and CD are studied inFigure 4.2—4, 5, 6 and 7. Area studied in Figure 4.2—8 is surrounded with thin dashed lines.

4.2.4 Field operation

Measurement operations took place in 1995 from June to October. As Caracas downtown is very populated, it was not possible to set recording material in streets during the day. So, most of the records were performed during the night under police protection. As a whole, 184 measurement points were carried out over the city. Figure 4.2—2 shows location of some of these points in Palos Grandes

© 2008 Tous droits réservés.

district (A05 for instance). A digital seismic recorder was linked to a three component velocimeter (5 seconds period). At each point, 10 to 15 minutes of microtremors were recorded with the highest gain. So that the smallest recorded vibration could be of 0.3 nm/s. The sampling rate was 125 Hertz.

4.2.5 H/V ratio computation

Microtremor data were processed in two stages. The first stage consists of processing data of each point to obtain « H/V ratio ». For each microtremor record, 5 windows of 16 seconds duration were selected among the most quiet part of the signal. A 30% taper window is applied to these data. Then an amplitude spectrum is computed over the 2048 points and smoothed. For each track, 5 spectra are available, from which an average spectrum is performed : the north-south or east-west average spectrum of a site are called respectively NS, EW (or H when equivalent), the vertical one is called V. The horizontal over Vertical spectral ratio (H/V) from microtremor is performed and plotted versus frequency for each site. For each curve, the maximum amplitude in a given frequency window will be called Ao. The frequency relative to Ao will be called Fo (Figure 4.2—3). The second step consists of interpolation between former values Ao and Fo.

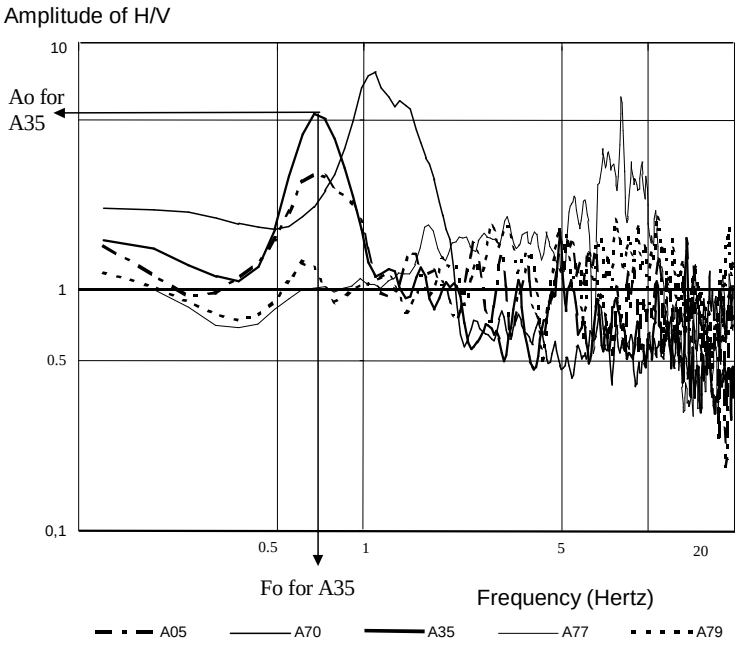


Figure 4.2—3: H/V on microtremor spectral ratios versus frequency for five points of Los Palos Grandes (A05, A35, A70, A77 and A79). North-south component are used (NS/V). Fo and Ao for A35 are underlined.

4.2.6 Results in Los Palos Grandes

Results observed along two profiles

All points near Palos Grandes were processed to obtain Ao and Fo. A north-south section (AB section in Figure 4.2—1) crossing the deepest part of the basin was studied by Weston Inc [Weston Inc., 1969]. This crossing section (reported in Figure 4.2—4) shows several geophysical units with their shear wave velocities deduced from seismic measurements. For this section, from south (B) to north (A), the fill grows slowly until more than 300 meters thickness. Then it decreases with a steeper slope until it vanishes. The microtremor measurement points that were near AB profile were studied more specially in Figure 4.2—5. Ao and Fo are computed between 0.1 and 15 Hertz and projected along an axe with respect the coordinates of the measurement point. Figure 4.2—5 shows that Ao is minimum on the northern bedrock and increases toward the point A86 (Parque del este) and A70 (south Carlotta airport). The frequency Fo relative to Ao on each point is high above bedrock on the north (A85) and in the south (see results for A79 in Figure 4.2—3). Fo is around 0.6-0.7 Hertz above the deepest part of alluvium fill and remains constant on a large part of the basin. But the amplitude Ao of the peak is higher in the south part of the deep basin. This fact is also illustrated in Figure 4.2—3. A05 is located in

© 2008 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

the deepest part of the basin. For A05, Fo is equal to 0.7 Hertz and Ao is only 3. While A35, which is more southern, with thinner alluvion thickness, shows the same Fo but with a higher amplitude of 5. Then in the south, Fo increases when sediment thickness decreases.

Figure 4.2—2 also shows that alluvium thickness increases towards the basin center in the east-west direction. The studied profile along this west-east direction is located with the points C and D in Figure 4.2—2. Figure 4.2—6 is a basic illustration of the alluvion thickness above bedrock along CD profile. Now for Figure 4.2—7, the frequency Fo is also relative to the basin shape as for Figure 4.2—5: it decreases from values higher than 2 Hertz, towards the middle of the basin to reach 0.6 Hertz and increases when alluvion thickness decreases. The amplitude Ao does not show such obvious behaviour : from 5 on the west side, it will reach 6 and then 3 in the deepest parts of the basin.

The different section that can be studied from microtremors recorded in Los Palos Grandes do not provide exactly the same results. This is due to variability of geophysical parameters and thickness of sediment layers that compose the basin. Those parameters are available only on few points where seismic refraction profiles were performed. To check the variability of « H/V method » all over the basin, its results are interpolated.

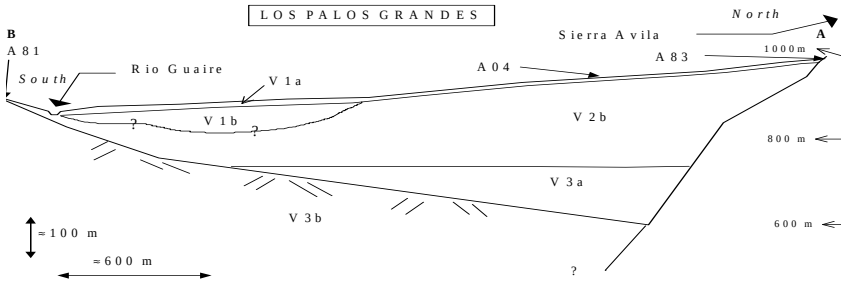


Figure 4.2—4: North-south section of Los Palos Grandes from [Weston, 1969] located with AB line in Figure 4.2—2. V are shear wave velocities for several geophysical units. V1a: 400 to 500 m/s (soft soil); V1b: 900 m/s (soil); V2b: 1700 m/s (satured soil); V3a: 2400 m/s (sedimentary rock); V3b: 4000 m/s (hard rock). Some microtremor measurement points are located with their number.

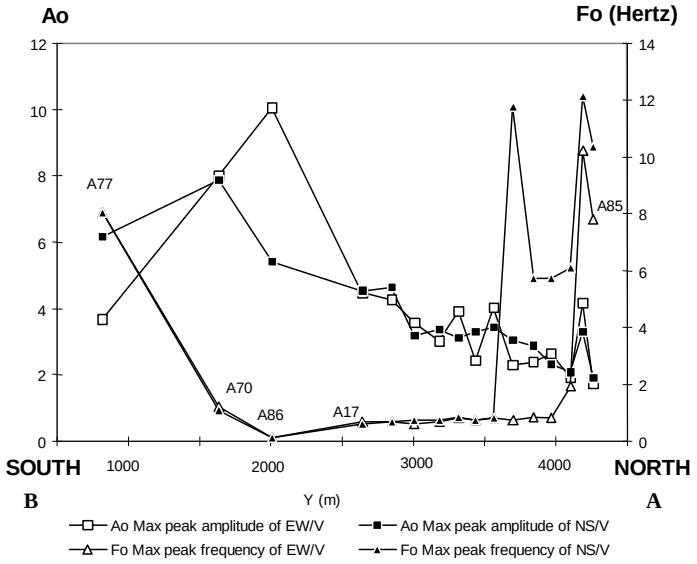


Figure 4.2—5: H/V ratios results on microtremor, for points located along AB profile (location in Figure 4.2—2 and crossing section in Figure 4.2—4). Amplitude (Ao) and frequency (Fo) of the maximum peak observed in H/V ratios established from microtremor between 0.1 and 15 Hertz.

© 2008 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

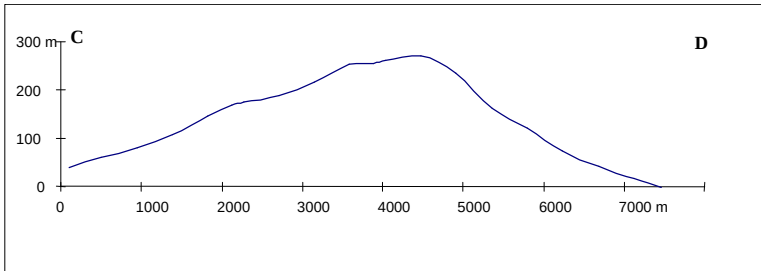


Figure 4.2—6: East-west section of Los Palos Grandes located with CD line in Figure 4.2—2. Vertical axe : alluvium thickness (in meter) above bedrock from [Weston, 1969]. Horizontal axe : distance (in meter) from the point C.

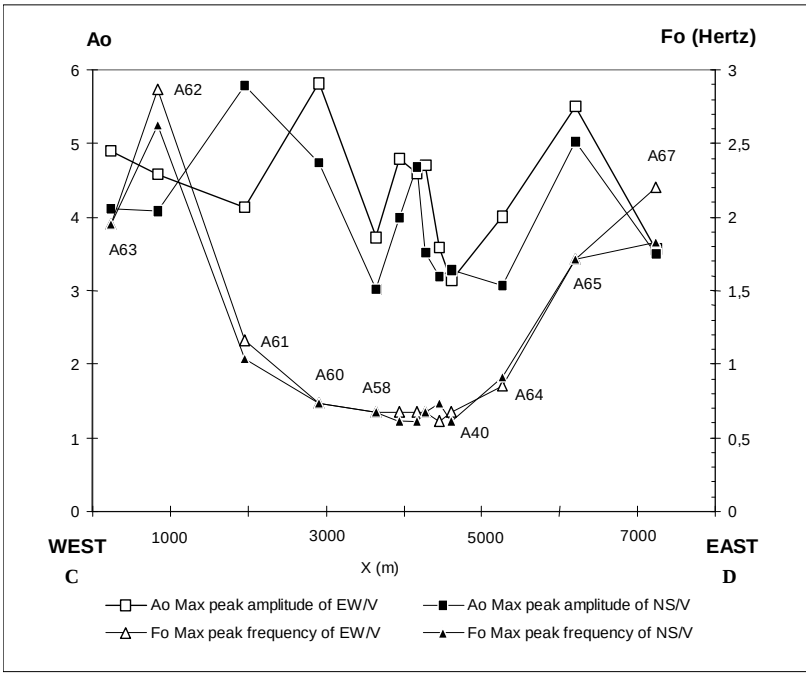


Figure 4.2—7: H/V ratio results on microtremor, for points located along CD profile (location in Figure 4.2—2 and crossing-section in Figure 4.2—6). Amplitude (Ao) and frequency (Fo) of the maximum peak observed in H/V ratios established from microtremor between 0.1 and 15 Hertz.

Interpolation maps of Ao and Fo

Ao and Fo are computed for each measurement points between 0.1 and 15 Hertz. These values are interpolated and extrapolated over the area of interest. It is an obvious fact that results that are not well constrained (far from investigated sites) can not be taken as reliable data. Spatial interpolations of Fo and Ao, with 20 meters step, are represented in Figure 4.2—8. Except some particular points, the tendency is the same for the north-south and east-west component used to perform H/V ratio. That is why only NS/V is represented here. The area concerned with the Figure 4.2—8 is surrounded with dashed line in Figure 4.2—2. Figure 4.2—8 shows interpolation of Fo on the lower map. Level curves and grey gradation are for the maximum peak frequency Fo. Above this Fo map is plotted a map of Ao interpolation with amplitude relative to shaded relief. These superimposed maps allow a better approach of the importance of each peak in H/V ratio. The spatial interpolation of Ao shows that H/V ratios do not generally reach significant value above rock around Los Palos Grandes. It must be noticed that Ao is higher than 5 in an area ranging from A35 (middle of the figure) to A76 in the south. Results around A35 and A25 must be examined with special care because of the vicinity of the collapsed high buildings. Ao is maximum at the point A76 with a level of 12 at 5 hertz. After this zone, the level of Ao decreases quickly towards southern rock.

On the contrary, Fo decreases from values higher than 10 on the edge of the basin towards very low values in the deepest part of the basin. The frequency Fo above the major part of the basin is between 0.5 and 1 hertz.

© 2008 Tous droits réservés.

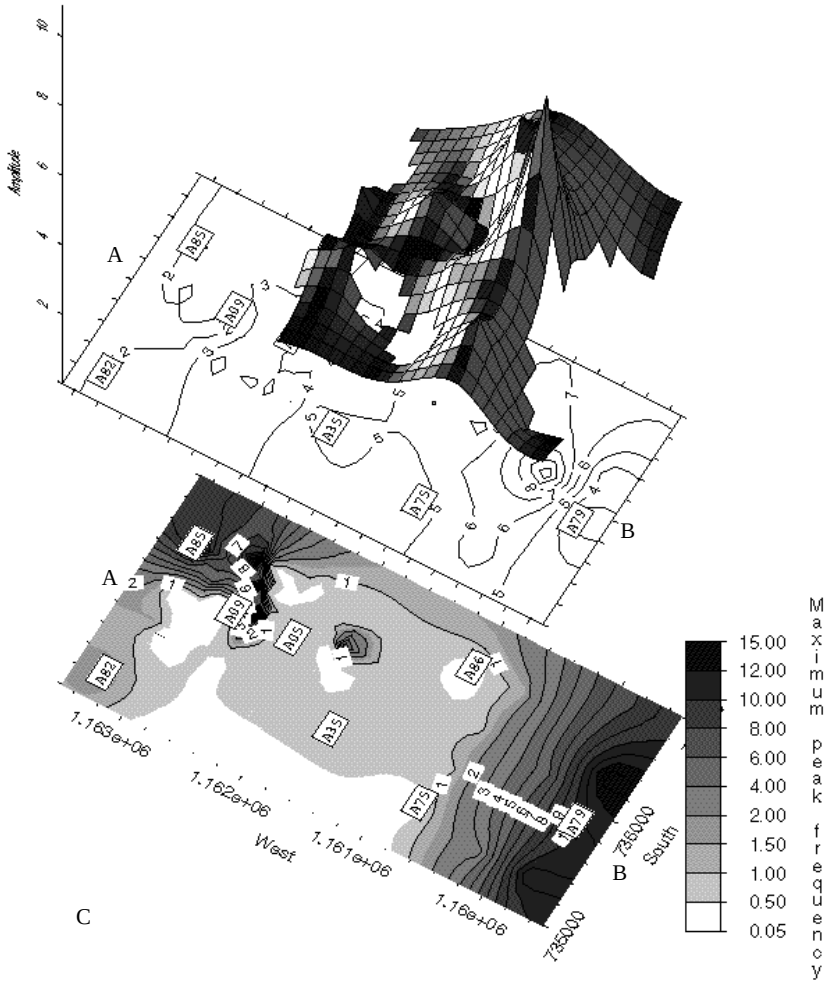


Figure 4.2—8: Spatial interpolation of Fo and Ao in the center of Los Palos Grandes between 0.1 and 15 Hertz. Ao is interpolated and represented as shaded relief in the upper map when it is higher than 4.5. Ao level curves are projected on horizontal plan below. Fo is interpolated and represented with grey gradation in the lower map. For both maps, some measurement points are located with their number inside a white rectangle. Coordinates are in meters.

4.2.7 Comparison with geology, earthquake damages and with numerical simulation

The maps resulting in H/V method are deeply correlated with the geology of the basin : on the rock, Fo is high, but Ao is also generally low. On the contrary, inside the basin, Fo is low and Ao is higher. A similar observation was made by Bolton Seed *et al* with amplification level when they simulated ground shaking (maximum acceleration values), taking into account site effect, with finite element technique [Bolton Seed H., Idriss I.M., Dezfulian H., 1970]. These simulations, together with damages analyses, confirm that soil resonance frequency in the central part of the fill is about 0.6 Hertz. Now, the first vibration mode of the collapsed buildings should be of the same order too. Besides, all collapsed buildings were located in area where, on the one hand, Fo obtained from « H/V on microtremor » fits with buildings frequency and expected soil resonance frequency and, on the other hand, where Ao is higher than 4-5. Maximum Ao occurs above the city airport (north of A76). Of course no structure was present on this site during the 1967 earthquake to validate or invalidate the influence of Ao in damage seriousness.

© 2008 Tous droits réservés.

4.2.8 Conclusions

The application of « H/V on microtremor » in Los Palos Grandes is very encouraging for the method possibilities. Results obtained by other teams and with different approaches are used for comparison : geological and geophysical knowledge of the valley, numerical simulation of ground motion and first vibration modes of collapsed buildings. All these results showed that high buildings collapsed in an area where soil resonance frequency fits with estimated building response frequency. H/V curves totally agree with these results. In the basin center, the maximum amplitude of the ratio occurs to the expected frequency Fo of 0.6 Hertz, which is the soil resonance frequency. As it is a very economic, easy and rapid method, many measurements are allowed. Spatial interpolations of Fo are very interesting tools for seismic risk management. Moreover, the amplitude Ao of the ratio is maximum in area where major damages occurred, or where no structure was built in 1967. So that this microtremor experiment, compared with 1967 earthquake damages, lead to think that the maximum level of H/V ratio (Ao) could be an indication of relative signal amplification in case of strong motion. This notion of « relative amplification » seems strictly necessary : one site may amplify the signal more than the other one. But no definite level of amplification in case of strong motion can be inferred from « H/V on microtremor », as far as other case studies and complete theoretical explanations allow it.

References :

Reports for Republic of Venezuela, under the planning and supervision of the Presidential Commission for the study of the Earthquake :

[Bolton Seed H., Idriss I.M., Dezfulian H., 1970] Relationships between soil conditions and building damage in the Caracas Earthquake of july 29, 1967 in Report N°EERC 70-2, College of Engineering University of California, Berkeley, Californie, Feb. 1970.

[Weston Inc., 1969] Seismic investigations in the valley of Caracas and the litoral central, by Weston Geophysical Engineers International, Inc. Weston, Massachusetts, Aug. 1969.

[Whitman R.V., 1969] Effect of soil conditions upon damage to structures - Caracas Earthquake of 29 July 1967, by Robert V. Whitman, Massachusetts Institut of Technology, nov. 1969.

Others references :

[Bolton Seed et al, 1972] Relationships between soil conditions and building damage in the 1967 Caracas Earthquake ; by H. Bolton Seed, R. V. Whitman, H. Dezfulian, R. Dobry and I. M. Idriss in Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Aug., 1972.

[Duval A.-M., Méneroud J.-P., Vidal S. et Bard P.-Y., 1994] Usefulness of microtremor measurements for site effect studies. In Proc. Tenth European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, Austria, EAEE , Aug. 1994, vol 1, pp521.

[Duval A.-M., 1996] Détermination de la réponse d'un site aux séismes à l'aide du bruit de fond, Evaluation expérimentale, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Série Géotechnique - GT 62- LCPC, ISBN 2-7208-2480-1, in french, 264 p, 1996.

[Lachet C. and Bard P.-Y., 1994] Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique, Journal Physics of the Earth, 42, pp 377-397.

[Nakamura Y., 1989] A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. QR of RTRI, 30 (1989), p. 25-33.

[Nogoshi M. and Igarashi T., 1971] On the amplitude characteristics of microtremor (Part 2), Journal of Seismological Society of Japan, Vol 24, pp 26-40.

© 2008 Tous droits réservés.

4.3 Nice, France, séisme de 2001

Ce paragraphe 4-3 est issu d'un projet d'article soumis au BLPC en juillet 2007 dans le cadre d'un numéro spécial du bulletin sur les risques sismiques.

Titre de l'article: "**Effets de site et dommages sismiques: étude de la perception du séisme du 25 février 2001 à Nice**"

Auteurs: Anne-Marie Duval, Etienne Bertrand, Sylvain Vidal, Jean-Pierre Méneroud.

Résumé

Le 25 février 2001, la côte d'Azur ressentait un séisme de magnitude 4.7 engendré à 30 km en mer Ligure. De nombreuses études numériques et expérimentales étaient alors en cours pour déterminer le risque sismique dans cette ville. Après cette secousse minime, d'intensité V à Nice, la question du rôle respectif des effets de site et de la vulnérabilité des structures a très vite surgi. Pour tenter d'y répondre, un formulaire d'enquête a été lancé par voie de presse. L'analyse de près de 4000 réponses a confirmé que cette secousse n'a provoqué que des effets très légers. De nombreux croisements de données ont été effectués pour vérifier l'impact des conditions d'observation (étage, époque du bâtiment, nature du sol). Une échelle de perception individuelle des effets de la secousse a été mise au point. Les niveaux de perception résultants ont été cartographiés et comparés aux informations disponibles. Bien que les données de départ imposent des limites sévères à l'interprétation (faible niveau de la secousse et répartition irrégulière des réponses) l'analyse confirme toutefois une perception des effets plus importante dans les zones alluviales que sur le substratum rocheux. Sur le plan méthodologique, l'échelle de perception individuelle et l'analyse par zone carrée semblent particulièrement adaptées à l'approche des effets de site.

4.3.1 Introduction

La sismicité en France est réputée forte aux Antilles et modérée en métropole. Mais les études récentes montrent que les amplifications provoquées par les configurations géologiques locales peuvent aggraver les dégâts provoqués par des vibrations, même pour des séismes de magnitude modérée. Les efforts se sont donc multipliés ces dernières années pour approfondir la connaissance de ces phénomènes et pour mettre au point des techniques de reconnaissance permettant d'en prévoir les paramètres fondamentaux. Parallèlement, des approches plus ou moins sophistiquées sont testées pour déterminer la vulnérabilité des structures existantes et prévoir leur type de comportement sous séisme. Ainsi, la ville de Nice a été le lieu depuis 1991 de plusieurs projets de scénarios de crise sismique (Gemitis, RISKUE et GEM-GEP) faisant tous progresser la connaissance du risque local et les méthodes d'études. Pour valider en France ces techniques, il semble important d'effectuer un retour d'expérience à partir de chaque événement sismique notable.

Le séisme du 25 février 2001 de magnitude 4,7 a été ressenti assez modérément sur la côte d'Azur. L'épicentre de ce séisme, en mer Ligure, à une trentaine de kilomètre au sud-est de Nice, correspond à la zone source choisie par les experts pour établir un scénario de crise sismique sur cette ville dans le cadre du projet GEM-GEP [GEM-GEP, 2005]. Les vibrations subies dans la commune sont néanmoins beaucoup plus faibles puisqu'elles n'ont atteint que 0.16 m/s^2 sur la station NALS quand la réglementation impose pour le bâti courant neuf une protection pour des vibrations de 2,5 m/s^2 (Les enregistrements de ce séisme sont présentés dans [Duval, 2008]). Ni victime, ni dégât important liés à cette secousse n'ont été signalés. Toutefois cet évènement sismique était le plus important ressenti depuis une dizaine d'années sur la commune. L'enquête du Bureau Central Sismologique Français a montré que l'intensité macrosismique maximale de V a été atteinte dans les Alpes Maritimes notamment à Nice [BCSF, 2001]. Les jours suivants le séisme de multiples témoignages ont fait surgir des questions sur l'influence des effets de site et de la vulnérabilité du bâti sur l'effet de la secousse: Les effets de site suggérés par les études en cours pour les mouvements forts ont-ils agi sur cette petite secousse ? Les différences de perception sont-elles plutôt dues à la vulnérabilité de certains bâtiments?

Pour donner des éléments de réponse à ces questions, une enquête a été lancée auprès de la population niçoise par voie de presse. Cet article rassemble les principaux résultats du traitement des données de l'enquête. Le contexte et les moyens de l'étude font l'objet du premier chapitre. Les réponses individuelles sont présentées dans le chapitre 2. Le protocole d'enquête macro-sismique ne peut conduire qu'à une estimation unique de l'intensité macrosismique sur l'ensemble de la commune. Pour affiner la recherche, il faut comparer les formulaires en les quantifiant. Une nouvelle échelle basée sur la notion de "perception individuelle" des effets de la secousse est donc proposée dans le

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

chapitre 4-2-3. Les chapitres 4-2-4 et 4-2-5 présentent l'analyse individuelle et cartographique des niveaux de perception en les comparant à diverses données. Enfin, les principaux enseignements à tirer de cette étude sont résumés.

4.3.2 Objectifs et moyens de l'enquête

Nature des résultats d'étude du risque sismique à Nice

Les résultats évoqués ici ont été obtenus soit par l'expertise local du Laboratoire de Nice du CETE Méditerranée, soit à travers les projets de recherche GEMITIS, RISK-UE et GEM-GEP.

Nice présente des enjeux importants au regard d'un aléa régional ressenti comme préoccupant depuis les années 1970. Sa population d'environ 345 000 habitants peut doubler durant l'été et ses voies d'accès sont limitées au sud par la Mer et au nord par les montagnes. La réglementation parasismique place Nice dans la zone de plus fort aléa en métropole. Les études récentes ont retenu comme scénarios plausibles un séisme de magnitude 6,5 à 30 km en Mer et un séisme de magnitude 5,7 à 17 km au nord. Les informations collectées ou produites lors des projets successifs de scénarios sismiques sont variées.

Sur le plan géographique, la commune de Nice recouvre 72 km^2. Elle est formée de collines séparées par les lits de petits fleuves côtiers orientés Nord-sud. A l'ouest, la commune est bordée par la plaine d'un fleuve plus important (le Var). Les importantes variations d'altitude ont été prises en compte dans le projet GEM-GEP grâce à des modèles numériques de terrain dont le pas atteint aujourd'hui 2 mètres.

Au plan géologique, trois types de formations prédominent: les alluvions anciennes et récentes qui correspondent aux lits successifs des petits fleuves côtiers dans le centre ville notamment; les épaisses formations de poudingues d'âge pliocène qui constituent les collines de l'ouest et sur lesquelles se développe le tissu urbain et résidentiel le plus récent; et enfin le soubassement rocheux plus ancien, essentiellement calcaire, marno-calcaire et gypseux d'âge triasique à jurassique qui forme les reliefs et falaises des corniches en limite Est de la ville. Dans le cadre des études d'aléa sismique local (effets de site, liquéfaction et mouvements de terrain sous séisme) cette géologie complexe a été levée au 1/5000^{ième} et intégrée dans un système d'information géographique. Sur la base de cette cartographie, de l'analyse de tous les sondages géotechniques disponibles et de l'avis d'experts locaux, un modèle géotechnique en trois dimensions du sous-sol a été réalisé. Ce modèle comprend 9 couches sédimentaires dont l'épaisseur peut atteindre une centaine de mètres au-dessus du substratum rocheux dans le centre ville. Il a permis de réaliser des simulations numériques de la propagation des séismes en sub-surface sur près de 4000 points dans les zones alluviales. Des enregistrements de séismes réels et de bruit de fond sismique ont également été mis en œuvre pour préciser l'aléa local. Ces études montrent que les remplissages alluviaux sur lesquels se concentre l'urbanisation présente des effets de site sismologiques qui peuvent être très préoccupants. Ainsi, les rapports spectraux établis entre certains sites du centre ville et le substratum rocheux à partir de séismes montrent des amplifications de niveau 20 pour des fréquences proches de 1 Hertz.

Sur le plan de l'urbanisation, la plus grande densité d'immeubles s'insère dans les zones alluviales, tandis que les collines sont moins densément peuplées de maisons individuelles majoritairement. La localisation et la forme de chacun des bâtiments niçois sont disponibles sous forme de couches d'informations géographiques. La vulnérabilité du bâti existant au séisme a été étudiée de manière sommaire pour les locaux d'habitation et de bureaux et pour certains bâtiments publics. Pour cela une typologie des bâtiments, reliant leur type constructif à leur résistance reconnue aux séismes dans le monde a été appliquée sur des échantillons et reportée statistiquement par quartier. Ainsi le quartier du vieux Nice par exemple a été classé parmi les plus vulnérables au séisme. Mais d'autres quartiers moins homogènes présentent également des types constructifs reconnus comme assez vulnérables.

Toutes ces informations sont intégrées dans un système d'informations géographiques qui permet un traitement cartographique complexe. Leur combinaison aboutit à une cartographie de zones en fonction du taux de dommages possibles selon le séisme (exemple en Figure 4.3—17). Ces scénarios ont été établis pour mettre au point des méthodes sommaires de combinaison d'informations et ne sauraient pour l'instant représenter une prévision fiable des conséquences d'un séisme. Pour améliorer cette crédibilité, les méthodes devront être affinées et les données de base précisées et complétées.

L'ensemble de ces résultats est présenté dans divers rapports d'études et publications [GEMITIS, 1994] [Bard, 1995] [Duval, 1996] [CETE, 2000] [GEM-GEP, 2005] [Duval, 2008].

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Objectifs et spécificité de l'enquête

L'enquête effectuée par le CETE Méditerranée suite au séisme du 25 février 2001 ne doit pas être confondue avec une enquête macrosismique. Ses objectifs et ses moyens en différent largement. Son but premier est de corréler la perception du séisme sur Nice avec les résultats des études mentionnées plus haut qui précisent l'aléa et la vulnérabilité du bâti à l'échelle de la ville. Il s'agit pour cela d'obtenir le plus grand nombre possible de témoignages sur la commune sans pouvoir les vérifier, sans contrôle de leur répartition géographique ou de leur qualité. L'objet d'étude tiendra plus de la « perception des effets » que de « l'effet du séisme » lui-même. Enfin, différence majeure avec une enquête d'intensité macrosismique : Les contenus de tous les témoignages doivent pouvoir être comparés et donc quantifiés. Une échelle de mesure de la perception des effets du séisme sera donc mise au point et appliquée à chaque formulaire. Ainsi, même s'il existe de forts liens, l'application de cette échelle ne devra pas être confondue avec le calcul de l' « intensité macro-sismique ». Celle-ci au contraire vise à « lisser » les informations contenues dans les témoignages et à globaliser les effets. Etant donné la faiblesse de la secousse sismique du 25 février 2001, cette analyse a été réalisée à partir d'observations très minces et peu variées comme on le verra.

Formulaire d'enquête

Dans les jours suivant le séisme, un formulaire d'enquête a été soumis par le CETE Méditerranée au quotidien régional « Nice-Matin ». Ce formulaire a été rédigé dans l'urgence en s'inspirant très largement de précédentes enquêtes réalisées par le LGIT dans les Alpes suite aux séismes du Grand Bornand en 1994 [Sikanic, 1994] et de Laffrey en 1999 [Sikanic, 1999]. Il aborde 13 sujets (avec des réponses proposées à cocher) permettant dans un autre contexte de définir une intensité macrosismique. Son dépouillement devait permettre d'abord de localiser géographiquement l'observation. Il s'agissait ensuite de définir les conditions d'observations sur l'observateur lui-même (activité, état d'éveil) et sur son milieu (caractérisation du bâtiment, étage …). Enfin, les observations possibles étaient regroupées selon 3 catégories: perception physique du séisme par l'observateur (différentes sensations sont proposées comme les vertiges), perception de l'effet sur les objets durant la secousse (comme des vibrations de meuble), observations des dégâts sur le bâti (comme des fissures ou des chutes de tuile). Après trois mois, le CETE Méditerranée a reçu près de 4000 réponses. Un codage numérique de l'information a été réalisé pour les 3847 questionnaires provenant de Nice, dont 2852 ont pu être exploités. Beaucoup de fiches ont du effectivement être écartées par manque d'informations.

4.3.3 Analyse des réponses individuelles

Observations générales

D'une manière logique, le nombre de formulaire reçu au kilomètre carré est maximal dans la zone la plus fortement urbanisée proche de la mer (Figure 4.3—1). La majorité des répondants se trouvaient dans un immeuble (88%) contre 12% dans une maison individuelle. Toutes les réponses ont été numérisées et intégrées dans un système d'information géographique (exemple en Figure 4.3—2). Les formulaires ont été triés en fonction de l'étage d'observation: 44% concernent les étages bas (RDC, 1, 2) et 55% des étages 3 à 20. L'ensemble des questions du formulaire appelle un taux de réponses positives croissant avec le nombre d'étages: la secousse a été ressentie plus fortement dans les étages élevés.

L'étude des observations faites dans les étages inférieurs à 5 indique que la plupart des témoins ont ressenti physiquement la secousse (87%). La sensation éprouvée majoritairement est celle d'une légère vibration ou du passage d'un gros camion. Peu de personnes (3%) disent avoir été effrayées ou paniquées. Une personne sur 10 environ dit avoir ressenti des vertiges ou des pertes d'équilibre. Les observations rapportées sur les objets suspendus, les vitres et les portes sont assez restreintes. Toutefois 21% des observateurs notent des déplacements d'objets lourds et 10% des chutes d'objets lourds. Les très rares dommages rapportés concernent des fissurations ou des chutes de plâtres.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

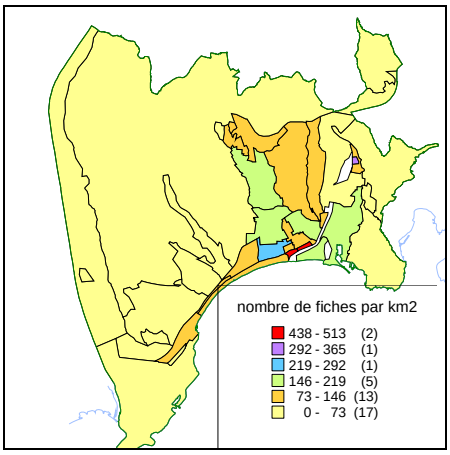


Figure 4.3—1: Nombre de formulaires par km2 par quartier

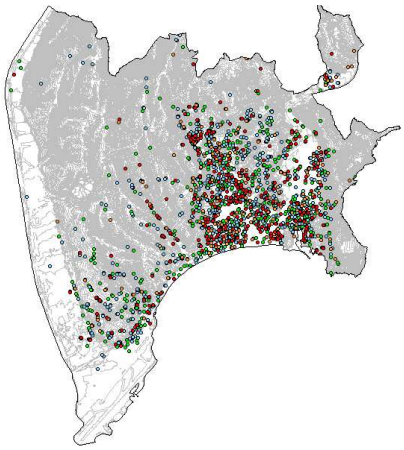


Figure 4.3—2: Répartition dans Nice des réponses à la question 10A du formulaire d'enquête: Vous avez ressenti le séisme plutôt comme : explosion (rouge), objet lourd dégringolant (orange); gros camion (bleu) ; chute d'objets lourds (jaune), vibration légère (vert).

Influence du remplissage sédimentaire

Seulement 16% des formulaires utilisés proviennent de zones rocheuses, tandis que 84 % proviennent de zones sédimentaires. La répartition statistique, si elle suit la densité d'habitat, n'est donc pas équilibrée. Pour chaque formulaire, une épaisseur du remplissage sédimentaire a pu être affectée automatiquement grâce au modèle géotechnique 3D. L'analyse indique souvent une très légère augmentation des sensations physiques sur les alluvions. Cette augmentation est moins systématique pour les effets ressentis sur les objets et les dommages mais se retrouve pour plusieurs questions (Figure 4.3—3). Les taux de réponses positives semblent quelquefois atteindre un palier sur les zones recouvertes de 30 à 40 mètres d'alluvions. Deux interprétations au moins sont envisageables: soit le signal sismique a été amplifié à une fréquence liée à cette épaisseur d'alluvions; soit les structures qui reposent sur cette zone alluviale (30-40m) sont plus vulnérables. Une combinaison des deux hypothèses est également recevable.

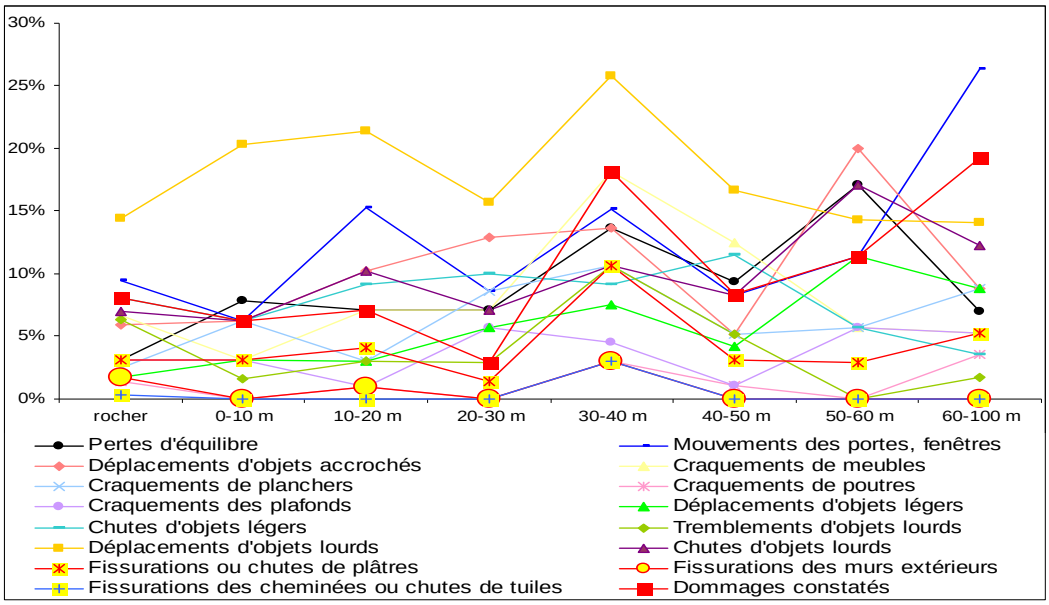


Figure 4.3—3: Taux de réponses positives à quelques questions du formulaire par classe d'épaisseur de sédiment en mètre (par rapport à l'effectif de chaque classe) dans les étages 0-1-2.

© 2008 Tous droits réservés.

Influence du bâtiment d'observation

La base de données constituée lors des études de risque sismique à Nice inclut une information sommaire sur l'époque et le type de construction pour chaque bâtiment: bâti avant 1800 (vieux Nice), entre 1800 et 1945, bâti collectif après 1945 et pavillons après 1945. Cette information est issue d'une étude statistique et la précision de l'affectation est très variable. Par ailleurs, l'affectation d'un bâtiment à un formulaire est elle-même soumise à une incertitude. Malgré les réserves qui s'imposent donc, il est apparu intéressant de comparer les réponses à l'enquête selon ce codage de bâtiment. Pour limiter les paramètres à prendre en compte dans la comparaison, seules les observations faites dans les étages bas sont présentées en Figure 4.3—4. L'analyse montre qu'il n'y a pas de lien entre les taux de réponses brutes positives et le code par type constructif.

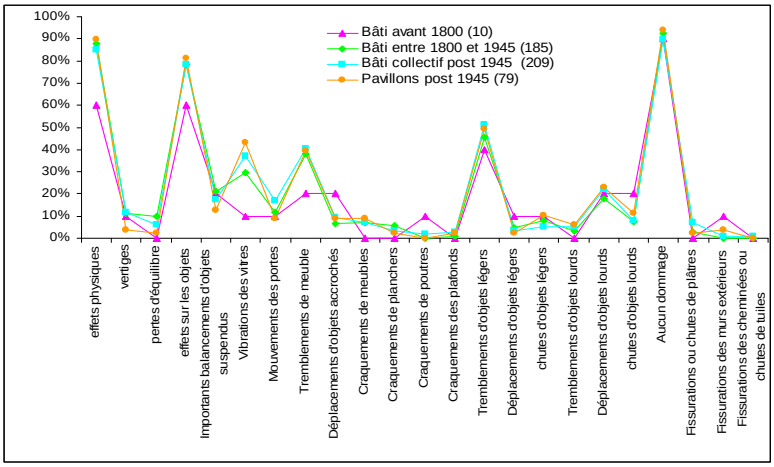


Figure 4.3—4: Taux de réponses positives à certaines questions du formulaire selon le codage du bâtiment d'observation; étage 0, 1 et 2; effectif par classe donné entre parenthèse.

4.3.4 Mise au point d'une échelle de perception individuelle des effets d'un séisme

Cette échelle vise à quantifier l'importance de la perception de la secousse par chaque observateur sur la seule base du formulaire rempli sans aucun contrôle. Cette échelle de perception, déjà abordée dans des études du LGIT suit la logique de classification des effets d'un séisme formulée dans le cahier européen [EMS98]. Mais l'unicité même du témoignage, déconnecte cette nouvelle échelle de l'échelle d'intensité macrosismique EMS98. Les cartes résultantes ne devront donc en aucun cas être tenues pour des cartes d'intensités macrosismiques. Un autre aspect de l'échelle mise en place est qu'elle doit s'appliquer ici à des vibrations très faibles induisant peu d'effets.

Les observations (et donc les réponses aux questions du formulaire) sont réparties en trois groupes selon le degré de subjectivité induit: le premier concerne les effets sur la personne (P), le second les effets sur les objets (O), le troisième les dommages aux constructions (D). A chaque réponse possible est affecté un niveau de base correspondant à l'intensité macrosismique minimale pour laquelle est mentionnée l'observation par les observateurs les plus réceptifs (au repos dans un étage élevé) selon l'échelle EMS98. Pour les observations relatives aux effets sur les personnes et sur les objets, ce niveau sera augmenté éventuellement pour prendre en compte des conditions d'observation moins favorables. Ainsi on rajoutera 1 point si l'observateur était en activité et un autre s'il était dans des étages bas ou en extérieur. Par défaut le phénomène mentionné est considéré comme "faible". Si l'observateur a coché la case "léger" pour son ampleur, un point sera rajouté (deux si la case "fort" est cochée). Par exemple, la question 11A de l'enquête traite du balancement d'objets suspendus. Si l'observateur répond positivement, le niveau de base vaut 2. Si ces balancements sont jugés "forts", le niveau augmente de 2 points et vaut 4. Le niveau sera encore augmenté de 1 point si l'observateur est actif et d'un autre point s'il était dans un étage bas ou à l'extérieur.

Dans chacune des trois catégories d'observation, le niveau finalement retenu correspond au maximum du niveau calculé pour chaque réponse. On obtient ainsi pour chaque fiche le niveau de perception maximal sur les objets (Omax), sur la personne (Pmax) et les dommages aux structures (Dmax). Il faut noter que par la nature même des éléments qu'il représente (lié à la rédaction du questionnaire) Dmax sera soit nul soit supérieur à 6. Pour chaque fiche, une valeur moyenne de Pmax, Omax et Dmax (notée POD) est calculée.

© 2008 Tous droits réservés.

4.3.5 Analyse des niveaux moyens de perception

Sur l'ensemble du territoire

Pmax, Omax et Dmax calculés à partir des formulaires disponibles dans cette étude ont atteint la valeur maximale de 8. Leur moyenne sur l'ensemble du territoire est de 3,67 pour la perception sur les personnes (moyenne des Pmax), 3,92 pour les objets (moyenne des Omax) et 0,27 pour les dommages (moyenne des Dmax). La moyenne de la perception globale (POD) est de 2,62. La Figure 4.3—5 montre la répartition des effectifs selon les valeurs.

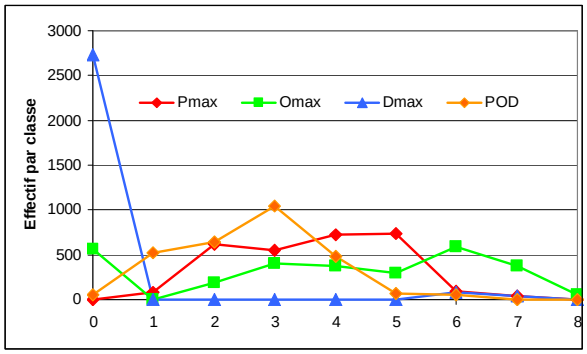


Figure 4.3—5 : Effectifs par classe des niveaux de perception (Pmax, Omax, Dmax, POD) sur un total de 2852 formulaires.

Influence de la nature du sol

Contrairement à l'analyse brute des réponses, l'ensemble des formulaires peut être pris en compte pour analyser l'influence de l'épaisseur d'alluvions puisque l'échelle est censée corriger de l'effet des étages. Les niveaux moyens ont d'abord été calculés sur le rocher et sur l'ensemble de la couverture sédimentaire.

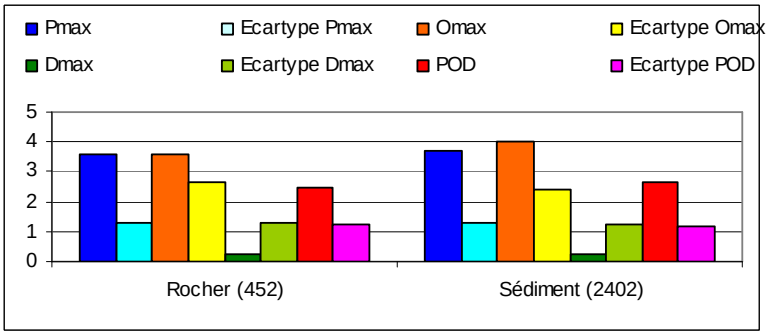


Figure 4.3—6: Valeurs de Pmax, Omax, Dmax et POD (moyenne et écart-type) au rocher et sur sédiment. Effectif par classe donné entre parenthèse.

La Figure 4.3—6 confirme que l'effet sur les objets (Omax) est légèrement plus important sur les sédiments, ce qui augmente la perception moyenne (POD).

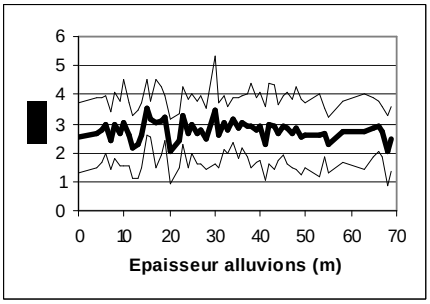


Figure 4.3—7 : Valeurs moyennes de la perception globale (POD) selon l'épaisseur d'alluvions en mètre.

En affinant l'analyse, les valeurs moyennes ont été calculées pour chaque épaisseur d'alluvions. La Figure 4.2—7 illustre la moyenne globale (POD) jusqu'à 70 mètres seulement. En effet la moyenne des

© 2008 Tous droits réservés.

valeurs de perception n'est prise en compte que lorsque le nombre de fiche par classe d'épaisseur est supérieur à 10. La courbe oscille autour de la moyenne avec un écart-type toujours important.

Une analyse a ensuite été conduite en prenant en compte la lithologie: calcaires, poudingues, alluvions, remblais, éboulis ou limons argileux. La Figure 4.3—8 montre les valeurs moyennes de perception selon ces unités. Les maximums sont atteints sur les alluvions pour Omax, sur les remblais pour Pmax et sur les calcaires pour Dmax (avec un écart-type 4 fois supérieur à la valeur moyenne). On remarquera que les alluvions représentent un effectif de formulaires très largement supérieur à toutes les autres unités (2007). Les remblais ne sont représentés que par 8 formulaires et les calcaires par 76. Cette analyse tend à confirmer la tendance à l'augmentation de la perception sur les sédiments et précise l'unité géologique principalement concernée (alluvions). Les écart-types et les différences d'effectifs sont très importants, tandis que les valeurs moyennes sont très proches.

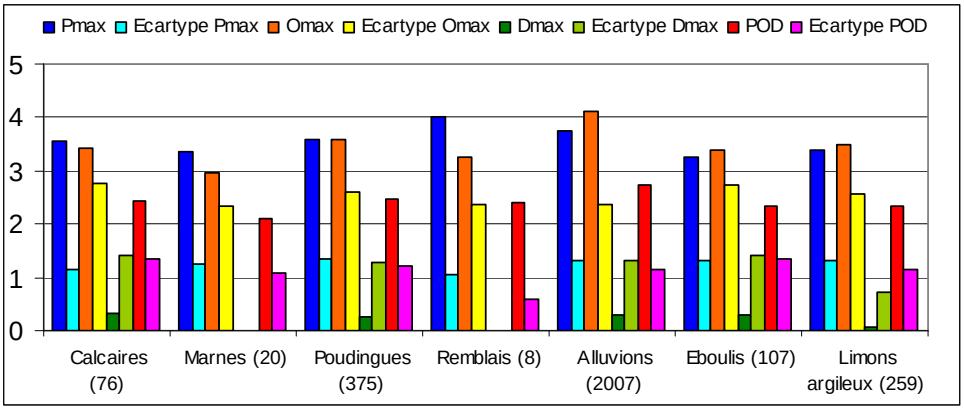


Figure 4.3—8 : Valeurs de Pmax, Omax, Dmax et POD (moyenne et écart-type) par unité géologique. Effectif par classe donné entre parenthèse.

Influence du bâtiment d'observation

Les valeurs moyennes de perception ont été évaluées selon le type de bâtiments d'observation. En moyenne, les 2526 immeubles donnent des valeurs de Omax légèrement plus élevées que les 326 villas, alors que Pmax est équivalent (Figure 4.3—9). Par contre Dmax est plus légèrement plus élevé dans les villas. Encore une fois, les écarts sont minimes par rapport aux écarts-type.

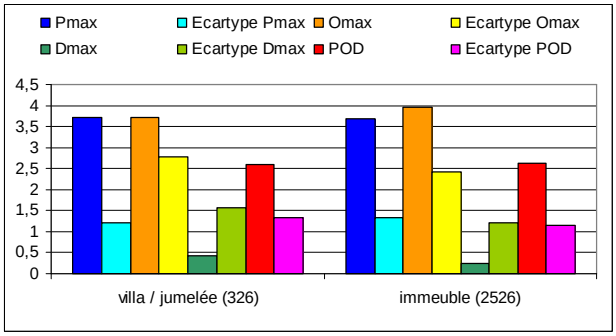


Figure 4.3—9 : Valeurs de Pmax, Omax, Dmax et POD (moyenne et écart-type) pour les observations faites dans des villas et dans des immeubles. Effectif par classe donné entre parenthèse.

Une autre question du formulaire permet de classer les bâtiments d'observation selon qu'ils sont construits en maçonnerie (brique, pierre taillée, maçonnerie et bois) ou en béton armé. Les moyennes des niveaux de perception illustrées sur la Figure 4.3—10 montrent une sensibilité plus importante pour la maçonnerie que pour le béton armé.

© 2008 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

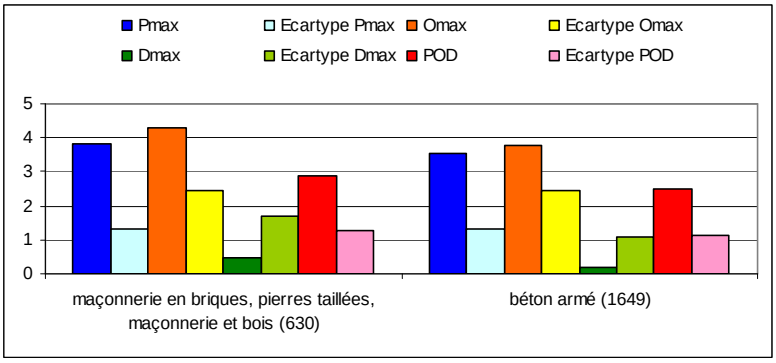


Figure 4.3—10 : Valeurs de Pmax, Omax, Dmax et POD (moyenne et écart-type) selon les matériaux de construction du bâtiment d'observation. Effectif par classe donné entre parenthèse.

Enfin l'analyse a été conduite selon l'époque de construction en rappelant les incertitudes d'affectation de cette caractéristique. Les valeurs sont sensiblement équivalentes. Les seules petites variations concernent les immeubles construits avant le 19ième siècle qui donnent des moyennes de Pmax légèrement moins importantes tandis que Dmax est plus élevé. Ces variations sont minimes et la différence d'effectif par classe doit également être notée.

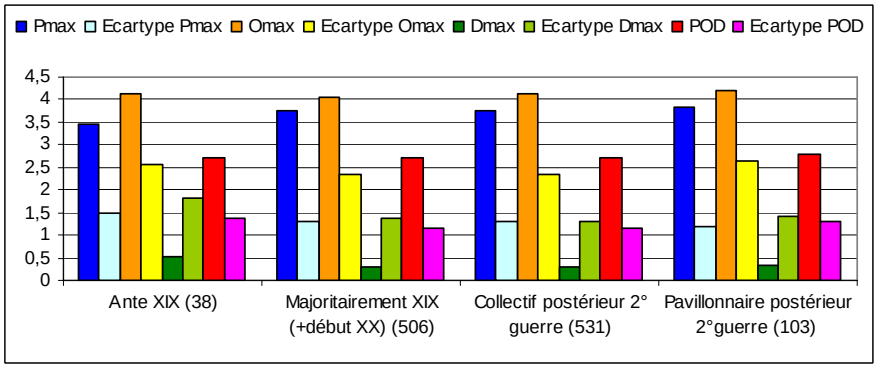


Figure 4.3—11: Valeurs de Pmax, Omax, Dmax et POD (moyenne et écart-type) selon l'époque de construction du bâtiment d'observation. Effectif par classe donné entre parenthèse.

Enfin, l'analyse a été conduite en fonction de la hauteur présumée des bâtiments. Celle-ci est calculée à partir de l'altitude du sol et de l'altitude des toits des immeubles avec une marge d'erreur non négligeable. La Figure 4.3—12 montre l'évolution de valeur moyenne de perception (POD) en fonction de cette hauteur présumée de l'immeuble. Les écart-types autour de la moyenne sont très importants. D'après les estimations, la majorité des formulaires utilisés provient d'immeubles de 18 à 30 m de haut, gamme de hauteur qui ne montre pas de variation du POD. Les variations aux extrêmes (sous 5 m et au-delà de 30 m) ne peuvent pas être prises en compte étant donné le peu de formulaires disponibles.

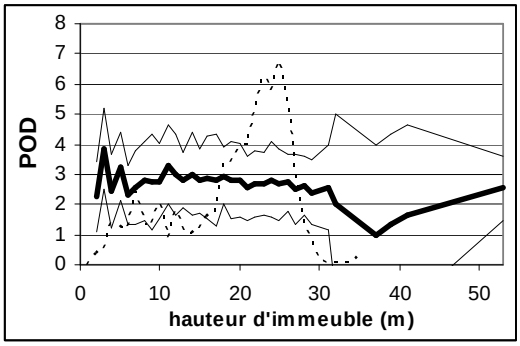
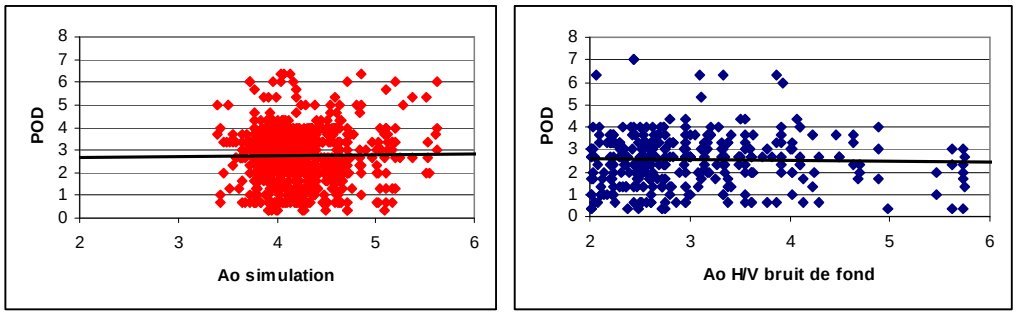


Figure 4.3—12 : Valeurs moyennes de perception globale (POD) selon la hauteur présumée du bâtiment d'observation. Traits gras : POD moyen, traits fins : moyenne + et – écart-type, pointillés : nombre de formulaires utilisés divisés par 20.

© 2008 Tous droits réservés.

Comparaison avec l'amplification du signal simulé

Les comparaisons qui suivent visent à vérifier si le niveau de perception peut avoir un lien avec les niveaux d'amplification du signal sismique dus aux effets de site. Des simulations numériques de propagation du signal ont été réalisées avec le logiciel SHAKE [Schnabel, 1972] sur près de 4000 points (colonnes de sols issues du modèle géotechnique 3D) régulièrement espacés sur les sédiments [CETE, 2000]. Cette simulation d'un séisme réel donne l'amplification maximale (Ao simulation) du signal entre 0,5 et 15 hertz provoquée par les couches meubles. Pour chaque formulaire d'enquête le point de simulation le plus proche a été recherché et mis en relation s'il est à moins de 50 m, ce qui est le cas pour 740 formulaires. Leur valeur de perception moyenne (POD) ont été mise en relation avec la valeur d'amplification dans la Figure 4.3—13(a). Les niveaux de POD s'étalent de 3.6 à 7 et semblent déconnectés de l'amplification des sols simulée à l'intérieur de la zone alluviale. Plusieurs explications peuvent être avancées. La plus vraisemblable est que le niveau très faible de la secousse ne permet pas de distinguer des différences assez nettes de perception qui sont peut-être plus liées à la vulnérabilité (de la personne et du bâti) qu'à l'aléa local. Autre explication possible: ces valeurs d'amplification simulée dans des colonnes de sols 1D ne reflètent pas les phénomènes complexes des milieux réels qui nécessitent des modèles 2D voire 3D.



(a) (b)

Figure 4.3—13: POD en fonction de l'amplification maximale des sols obtenus par simulation numérique (a) et en fonction de la valeur maximale du rapport "H/V bruit de fond" (b) pour des points situés à moins de 50 mètres de l'observation. Courbes de tendance en noir.

Comparaison avec la valeur maximale des rapports "H/V bruit de fond"

Le même type de comparaison que précédemment est fait avec les résultats issus de la méthode "H/V bruit de fond". Le bruit de fond a été enregistré sur 687 points sur la commune. Les signaux ont été traités pour obtenir des courbes "H/V" qui pointent la fréquence de résonance des sols [Duval, 2008]. Leur maximum entre 0,5 et 15 Hz est mis en relation avec le POD calculé pour un formulaire établi à moins de 50 mètres. 336 corrélations sont disponibles pour la plupart localisées dans le remplissage sédimentaire. La Figure 4.3—13(b) montre qu'aucune tendance claire ne peut être établie entre les deux types de valeurs. Les courbes "H/V bruit de fond" ne sont pas censées informer sur le niveau absolu de l'amplification sismique. Mais il est possible (cela reste à montrer) que dans un même microzonage, elles permettent de distinguer les sites qui amplifient le plus. Ce jeu de données en tout cas ne donne pas d'indice dans ce sens.

4.3.6 Analyse cartographique des niveaux de perception

Niveaux de perception moyens par zone d'aléa homogène

Le microzonage effectué durant la première phase de GEM-GEP a conduit à définir 8 niveaux d'aléa homogène. Un même niveau concerne des territoires indépendants. Les analyses conduites indiquaient notamment que l'accélération maximale devrait être plus élevée dans les zones bordant les vallées [CETE, 2000]. Ce microzonage est en cours de révision. La valeur moyenne du POD des formulaires a été calculée pour chaque zone. La Figure 4.3—14 suit globalement la logique du microzonage dans le sens où la perception du séisme est plus élevée dans les zones ou l'aléa devrait être aggravé par des effets de site. En effet, selon ce découpage, le POD croît avec les amplifications attendues lors d'un séisme et décroît avec la rigidité des formations géologiques: Des calcaires du Mont Boron (zone 7 de la Figure 4.3—14), aux poudingues des collines de l'ouest (zone 8), on passe aux marnes, éboulis et brèches de pente (zones 5 et 6) puis aux alluvions (zones 4,3,2,1). Le POD

© 2008 Tous droits réservés.

(comme l'amplification sismique simulée) est maximal sur les remplissages alluviaux et particulièrement en bordure de vallée.

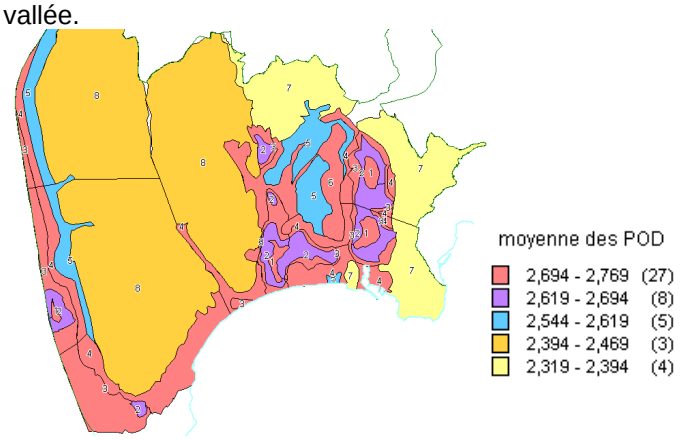


Figure 4.3—14: Moyenne du POD dans chaque zone d'aléa (n°) du microzonage du projet GEM-GEP [CETE, 2000].

Niveaux de perception moyens par maille géographique

Comme cela a été montré auparavant, les réponses ont été concentrées dans certaines zones de la ville ce qui induit des biais dans l'analyse. Pour mieux répartir l'information sur le territoire, les valeurs moyennes de perception ont été calculées selon un maillage géographique régulier juxtaposant des carrés de 280 m de côté. Les résultats sont reportés sur des cartes indiquant le niveau moyen de perception. Cette approche permet d'observer par exemple que la perception des effets sur les objets (Omax) parait plus importante sur les pourtours des zones alluviales (Figure 4.3—15). Mais ces moyennes élevées ne sont établies qu'à partir de 6 et 3 formulaires, alors que dans le centre ville, le nombre de formulaires utilisés peut atteindre 30, ce qui constitue un effet de lissage plus important.

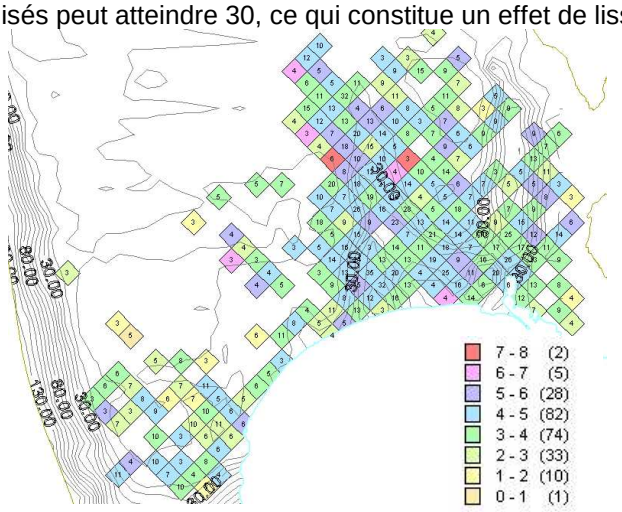


Figure 4.3—15: Moyenne des Omax par maille géographique (voir echelle couleur); Les courbes de niveau représentent l'épaisseur du remplissage alluvial (en m).

Niveaux de perception moyens par quartier

Les POD ont également été moyennés par quartier (Figure 4.3—16). Les quartiers qui montrent les niveaux les plus élevés sont dispersés aux extrémités des zones alluviales. Ce résultat obtenu avec un séisme très faiblement ressenti diffère largement de la répartition des taux de dommages estimée dans le projet GEM-GEP (Figure 4.3—17). Cette estimation a été réalisée en prenant en compte la vulnérabilité du bâti courant (analyse statistique par quartier), un séisme d'intensité VII (au rocher) modulé par des effets de sites en prenant en compte la fréquence de résonance des sols et celle du bâti par quartier. Il faut rappeler ici le caractère méthodologique du scénario issu du projet GEM-GEP dont les données méritent d'être complétées

© 2008 Tous droits réservés.

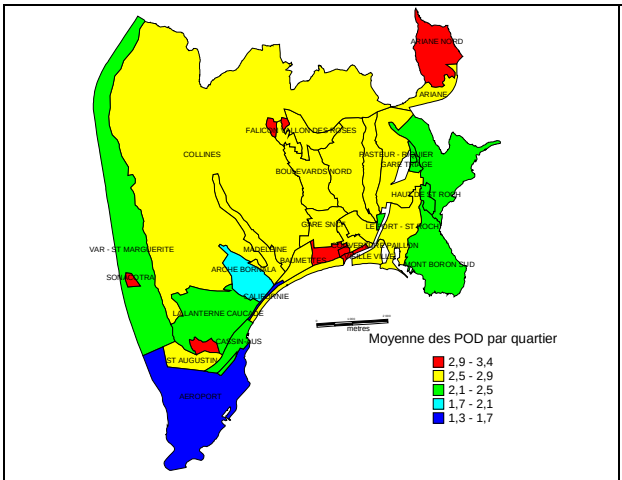


Figure 4.3—16: Moyenne des POD par quartier

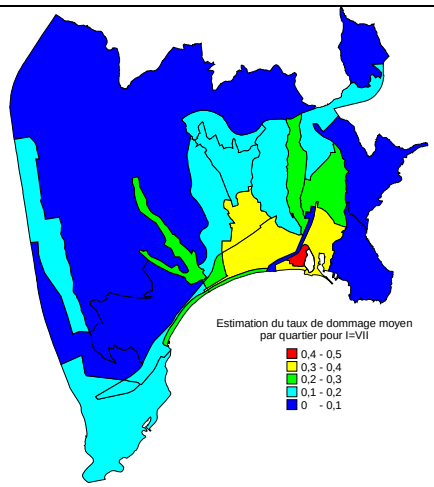


Figure 4.3—17: Estimation des dommages provoqués par un séisme d'intensité VII [Gem-Gep, 2005]

4.3.7 Les enseignements de cette étude

Le travail présenté ici implique de nombreux traitements et la gestion de données différentes. La multiplicité des croisements opérés a été rendue possible grâce à la concentration sur Nice d'importants efforts de recherche depuis plus d'une décennie. Les enseignements issus de ce travail concernent d'une part la connaissance du risque sismique à Nice et d'autre part l'amélioration de la précision et de la portée des enquêtes post-sismique.

Si la secousse a été finalement faible, l'analyse des formulaires d'enquête semble tout de même indiquer que la nature des sols peut avoir influencé la perception du séisme. En effet, cette perception est légèrement plus importante sur les alluvions que sur le rocher. Quelques indices de corrélation tendraient même à montrer que le maximum de perception a été atteint en bordure de vallée ou sur 30 à 40 mètres d'épaisseur d'alluvions. Par ailleurs, quelques indices confirment que le type constructif influe sur la perception. Les formulaires émis depuis des structures en béton armé débouchent sur des niveaux de perception plus faible que celles en maçonnerie.

Ces quelques indices de corrélation sur l'aléa et la vulnérabilité étant notés, il faut insister sur les limites sévères à imposer à ces interprétations. En premier lieu, les valeurs moyennes varient très peu d'un groupe à l'autre et les variations à l'intérieur d'un groupe sont toujours très importantes. Les très nombreux essais de corrélation se heurtent aux limites des données de l'enquête: niveau très faible de la secousse, peu de variété dans les effets observés, concentration des formulaires dans certaines zones. La caractérisation des conditions d'observation est très souvent incertaine et incontrôlable. Enfin, la concentration de la population dans les zones alluviales et dans des immeubles rend difficile l'analyse du rôle respectif des conditions de sol (aléa) et de celle de l'habitat (vulnérabilité).

Le deuxième type d'enseignement concerne les avancées méthodologiques. Les analyses ont montré la variété et la richesse des comparaisons possibles. La formulation originelle du questionnaire et son formatage à la diffusion pourront être améliorés pour une application plus efficace de la méthode, en diminuant les incertitudes liées à l'interprétation du formulaire par l'observateur et par l'analyste. Mais l'interprétation des réponses brutes seule ne permet pas de conclure. L'échelle qui a été mise au point permet de quantifier les effets perçus sur les personnes, les objets et les dommages de combiner les différentes réponses en prenant en compte la situation d'observation individuelle. Elle semble adaptée à la problématique des variations très locales de perception, même si l'application au cas présent n'a pas donné de résultats très significatifs sans doute à cause du faible niveau de la secousse. Cette technique d'enquête et l'échelle liée permettent de multiplier les points d'analyse et de réaliser des cartes de perception par quartier, par zone d'aléa homogène ou par maille géographique régulière ce qui semble le plus adapté. Elle complète et précise l'enquête macrosismique à l'échelle d'une ville en fournissant des arguments sur l'importance relative de la réponse des sols et de la vulnérabilité des structures lors d'un séisme modéré. Ces analyses ont donc leur place dans le dispositif d'analyse et de prévention du risque sismique, d'autant plus qu'elles favorisent l'implication individuelle et donc l'information des citoyens. Ce travail a fait l'objet d'un rapport au Ministère de l'Environnement et du Développement Durable [CETE, 2002].

© 2008 Tous droits réservés.

Références :

[BCSF, 2001] BCSF, « Note préliminaire du séisme de Nice du 25 février 2001 », 2001.

[Bard, 1995] P.-Y. Bard, M. Bour, A.-M. Duval, C. Martin, J.-P. Mèneroud, P. Mouroux, C. Thibault, M. Terrier and S. Vidal, "Seismic zonation methodology on the city of Nice Progress Report", 5th Int. Conf. on Seismic Zonation, Nice, Vol III, 36 pages, oct. 1995.

[CETE, 2000] Méneroud J.-P., A.-M. Duval, C. Michel, C. Thibault, S. Vidal, J.-L. Gastaut, A. Tortet, J. Delgado, T. Jessin, J.-F. Saillet et C. Tartar, "GEM-GEP Phase I - Risque sismique sur Nice - Etude de Scénarios de gestion de crise sismique - Définition de l'aléa, de la vulnérabilité et des enjeux", Rapport CETE Méditerranée, affaire n°98740 136, 139 pages + annexes, fév. 2000.

[CETE, 2002] Duval A.-M., A. Milliard, C. Fleury, A. Tortet, S. Vidal, P. Munier, J.-L. Gastaud, J.-P. Méneroud et V. Rémy, "Etude de la perception du séisme du 25 février 2001 à Nice ; Exploitation de l'enquête lancée par voie de presse auprès de la population niçoise", Rapport du CETE Méditerranée à la Direction de la Prévention des Risques du Ministère de l'Environnement, affaire n°017401274, 69 pages + 53 cartes en annexe, juil. 2002.

[Duval, 2008] Observations et mesure des effets de site, BLPC n° spécial synthèse Opération "Risque sismique".

[Duval, 1996] A.-M. Duval, "Détermination de la réponse d'un site aux séismes à l'aide du bruit de fond - Evaluation expérimentale", Rapport Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°GT62, 264 p., LCPC, Paris, juillet 199 6.

[EMS, 1998] Echelle Macrosismique Européenne, EMS 1998, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 19, , sous la direction de G. Grünthal, édition française A. Levret. Luxembourg 2001.

[GEMITIS, 1994] "Programme DIPCN/Méditerranée Projet GEMITIS/Nice (1993-1996) rapport 2ème année", rapport BRGM-CETE Méditerranée au Ministère de l'Environnement, document public BRGM R38241, 94H270, 72 pages + annexes, déc. 1994.

[GEM-GEP, 2005] Bard P.-Y., A.-M. Duval, E. Bertrand, J.-F. Vassiliades, S. Vidal, P. Foin, P. Guéguen, C. Thibault, B. Guyet, F. Dunand, S. Bonnefoy-Claudet, J.-P. Méneroud, G. Vettori, "Le Risque Sismique à Nice: apport méthodologique, résultats et perspectives opérationnelles, Rapport final GEM-GEP", 52 pages, avril 2005.

[Sikanic, 1994] M. Sikanic, A. Levret, P.-Y. Bard et F. Cotton, Rapport LGIT-IRSN, « séisme du Grand Bornand, 1994 », 1994.

[Sikanic, 1999] M. Sikanic, A. Levret, P.-Y. Bard et F. Cotton, Rapport LGIT-IRSN, « Enquête macrosismique et effets de site dans le bassin grenoblois suite au séisme de Laffrey le 11 janvier 1999 », 1999.

[Schnabel, 1972] P.B. Schnabel, J. Lysmer and H. Bolton Seed, "SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontal layered sites", Report n° UCB/EERC-72/12, EERC, Univ. of California, Berkeley, Dec. 1972, 102p.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

4.4 Les Saintes, Antilles françaises, séisme de 2004

Ce chapitre 4-4 est constitué par un article publié sous la référence:
A.-M. Duval, E. Bertrand, G. Verrhiest, G. Jacquet and H. Nahornyj, *"Combined survey of site effect and damage distribution in "Les Saintes" island (French West Indies) after the Guadeloupe 6.3 earthquake in 2004",* 3rd Int. Symp. on the Effects of Surface Geology on seismic motion, ESG 2006, Grenoble, n°029, pp939-949, 29 août - 01 sept. 2006 .

ABSTRACT - In November 2004, a 6.3 earthquake shook the south of the French West Indies, la Guadeloupe archipelagos. Two islands called "Les Saintes", located only 15km from the epicenter suffered the most severe damage. The maximal EMS98 intensity was estimated around VIII. Few weeks after the event, a multidisciplinary team conducted a field survey mainly to evaluate the relative importance of possible site effects and building vulnerability in damage distribution. Experts in seismic vulnerability observed several types of damage according to building categories and mapped their observations over the main villages of the two islands. Their observations first confirmed the warnings of several experts before the crisis, concerning some local uses in construction: damage should be partly due to the poor observance of building code and not proper choices in the building design. Next, the geophysicists assessed local seismic hazards by means of available geological data and ambient vibration recordings. Dense array of measurements were installed on two major sites to better constrain soil model (S waves velocity profiles). Microtremor "H/V technique" was also applied to determine site effect frequency over numerous places. These two methods were applied following recommendations and tools issued from SESAME, a European research project. Results of this multidisciplinary survey showed that major damage took place on sites where the 2004 earthquake was undoubtedly amplified by site effect. Moreover, a first sign of correlation between soil and structure frequencies was detected: they all should be higher than 2Hz. Nevertheless, it appears that, even in areas where site effects were expected to be homogeneous according to the experiment, damage level can vary notably without clear evidence of vulnerability variation. Finally, this rapid analysis and comparison between hazard and damage illustrate one of the many points that could be investigated to better mitigate seismic risk.

4.4.1 Introduction

In 2004, the 21st of November, an earthquake shook the archipelago of Guadeloupe, in the French West Indies. One person died and about fifty were injured. Severe damage occurred in "Les Saintes" and on the neighbor island La Dominique. A multidisciplinary team was being set up at that time in CETE Méditerranée[7]. The hope was to improve scientific links between several existing skills in different laboratories of the Centre. A field mission in Guadeloupe was decided for this team to study the consequences of the 2004 earthquake by combining different analysis (Duval, 2006). One of the aims of this 8-day mission was concerned with phenomena forecasting and prevention. Damage typology and distribution had first to be studied in relation with previous surveys concerning French Caribbean building vulnerability. Afterwards, some efforts were to be undertaken to compare the observed damage and possible site effects. The portable seismic recorders of the team were taken into the field, allowing many measurements during this mission. Ambient noise vibrations were recorded to assess soil resonance frequency (with H/V technique) on many damaged sites but also to deduce S wave velocity profiles on specific sites.
This paper presents the main results of this approach in Terre de Haut and Terre de Bas (the two islands of Les Saintes). After a brief description of the event and its context, the experimental techniques based on ambient vibrations applied for site effect assessment are evoked. Then, for each island, the results of damage observations and soil frequency analysis are commented on.

4.4.2 Event summary

The Guadeloupe archipelagos is located on the Caribbean plate. These volcanic islands are a part of the archipelago of the Antilles Arc, a chain of active volcanoes**.** To the west and north of the archipelagos, the American plate sinks under the Caribbean one with a velocity estimated around 2cm per year (Feuillet, 2000). This area of subduction is naturally supposed to generate strong earthquakes

[7] CETE Méditerranée: Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement, a public planning department, research and engineering centre of French Equipment Ministry.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

about 50 km from the main island of Guadeloupe. In 1843, such an event caused many deaths and a lot of damage. But the 21rst of November 2004 an earthquake occurred in the intra plate domain of the Caribbean plate, just off the north coast of Dominica, 30 km south of Guadeloupe and 14 km south-east of Les Saintes islands. Its focal depth was estimated to 14 km, with a magnitude of 6.3 (Bertil, 2004). it caused structural damage in Dominica and Les Saintes and one death in Guadeloupe. Officially referred to as the "Les Saintes earthquake", this event is the largest one felt in French territory in the last 50 years. More than 20,000 aftershocks (with more than 50 with a magnitude higher than 4) were produced during the following year (Bertil, 2004). The intensity map performed by the Bureau Central Sismologique Français showed a maximal intensity of VI to VIII in the closest zone of the epicenter (BCSF, 2005).

For the French seismic zonation, the highest grade (III) is assigned to the French Caribbean islands. This requires, following the French seismic code, to take into account the most severe seismic actions as input for new structure design. But many existing buildings in this area hardly conform to the rules, mainly because of local uses in construction (Michel, 2003). The maximum acceleration generated by the main aftershock reached 0.7g in Terre de Bas, which is larger than the building code requirement. Nevertheless, a large part of the traditional houses resisted ground motion, including some built on pilotis, when previous investigations warned about their high vulnerability (AFPS, 2005).

When the main shock occurred on Sunday, the 21rst of November at 7h41 (local time), Guadeloupe had already faced continuous downpour for 3 days. Many roads were already cut by floods and landslides. Of course, the seismic motion increased this confusing situation in the south of Guadeloupe. This context explains many of the difficulties encountered during crisis management. What's more, the population was much more trained to face hurricanes and had partly forgotten the seismic risk which resulted in a heavy psychological impact of the event.

4.4.3 Site effect assessment tools

A significant part of the damage during ground shaking is currently associated with local site effects due to recent deposits. Detailed assessment of site effects and the predominant frequencies on which significant amplification occurs can be obtained using empirical or analytical techniques. The two empirical techniques used in this survey are based on ambient vibration analysis: the very simple H/V technique and the more advanced array technique. They offer many advantages, especially in urban areas. Their physical basis and actual relevancy for site effect estimates have been largely explored during a recent project named SESAME (Site EffectS assessment using AMbient Excitations).

H/V spectral ratio on ambient vibrations

The H/V spectral ratio on the ambient vibrations (microtremors) gained popularity among the international community fifteen years ago. It has been since widely used in microzonation studies because of its cost effective nature. It consists in recording ten minutes of ambient noise with a tri-directional sensor on each site following some recommendations (Duval, 2004). Then the spectrum of the horizontal component is divided by that of the vertical component for quiet windows of signal. The software and parameters used were produced by SESAME project (SESAME, 2004). After several years of investigation, it is now admitted that when a site effect can be expected on a site, the resulting H/V curve points out a peak. The significance of the peak level in itself is not so clear. But when it is higher than 3 a site effect can be expected and the peak frequency corresponds to the soil natural resonance frequency. An example of such curves is shown in Figure 4.4—1. While Figure 4.4—2 is related to a site with no amplification. The colored curves are for H/V on individual windows. The black curves are for the mean H/V ratio of the site (plus and minus standard deviation as dotted lines).

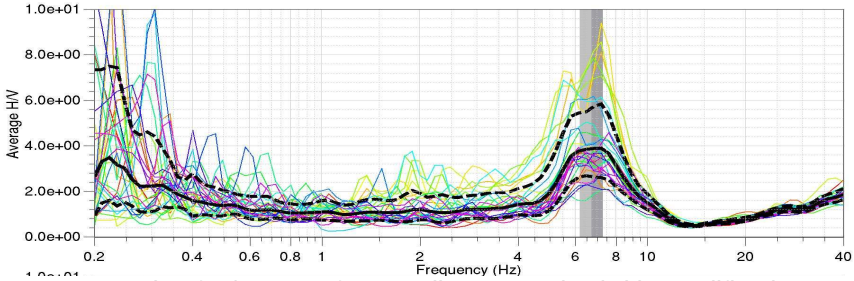


Figure 4.4—1 : Example of H/V curve for a sedimentary site (with amplification around 7Hz). Site n°13 Terre de Haut.

© 2008 Tous droits réservés.

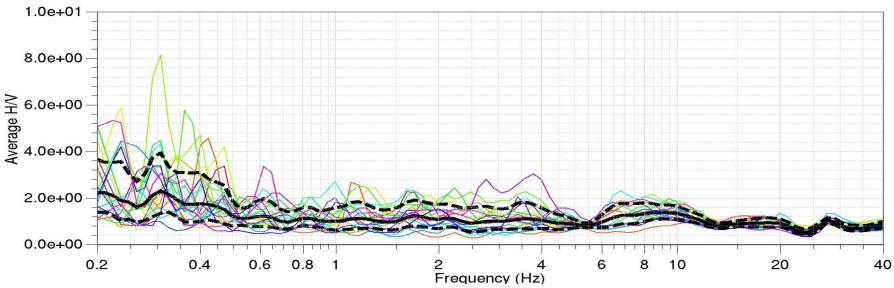


Figure 4.4—2 : Example of H/V curve for a rock site (with no amplification). Site n°14 Terre de Haut.

Ambient vibration array method

Array measurements consist in recording the seismic noise at the same time in different places. In Guadeloupe, a special seismic recorder was used (Cytishark II) linked to 6 tri-directional velocity sensors (Lennartz LE3D, 5 seconds period). Based on different methods such as correlation and frequency-wave number analysis, the dispersion curve of the surface waves (main waves of seismic noise) can be obtained, together with autocorrelation curves. These curves contain information on physical soil parameters such as the shear wave velocity (Vs) and the compressional wave velocity (Vp) profiles. The dispersion curve (or autocorrelation curves) is inversed to obtain a family of models of shear (and compressional) wave profiles. These models can then be used to simulate earthquake propagation in the soil column taking into account site effects. The software SESARRAY (Wathelet, 2005), developed in the SESAME project is used to analyze the data. These techniques and their applications are also presented in (Cadet, 2006).

4.4.4 Terre de Haut

Terre de Haut and Terre de Bas are the only inhabited islands that compose the string of rocky islands of "Les Saintes" archipelagos. Their permanent population is around respectively 1700 and 1200 persons. But many tourists increases this number. The year 1648 witnessed the arrival of the islands' first settlers. Terre-de-Haut is six kilometers long and three kilometers wide at its largest point. Its irregular shape is rendered uneven by sandy coves, sharp points and volcanoes ranging from 40 to 300 meters.

Site effect expected from geological context

Terre de Haut is a volcanic island covered by quaternary reefal calcareous. During Pliocene, several layers of volcanic rocks were deposited over this base. A regional assessment of site effect was performed at scale 1/100000 (BRGM, 2000). According to this zonation, the major part of the island should be considered as hard bedrock (corresponding to S0 site according to French seismic code). Moderate site effects could be expected over weathered rock (S1 site). Four other zones were identified. The first one is formed by the sandy beach east of the village (also S1 site). The three other zones are classified as anthropic and superficial fillings (corresponding to S3 sites): the local airport, an ancient brackish lagoon and a back-shore.

Observed damage

The observed damage range from degree 2 to 4 of European Macroseismic scale (EMS98). The major ones are concerned with individual masonry houses build with uncut stones (with a large part of cement) or with non attached hollow blocks. Figure 4.4—3 illustrates the location of the observed damage, mainly located of course in the only village of Terre de Haut. None of the damaged buildings had more than two floors. They can be considered as rigid according to their building type and height.

© 2008 Tous droits réservés.

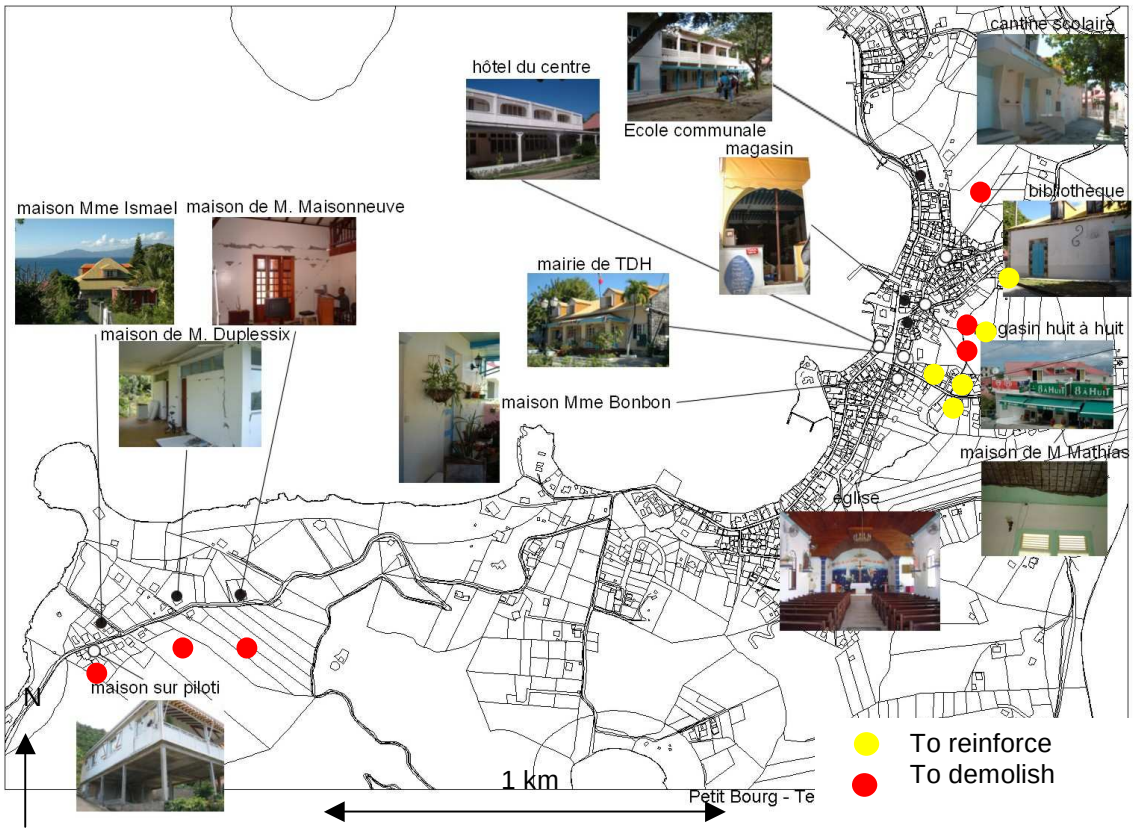


Figure 4.4—3: Main damage in west part of Terre de Haut island, Les Saintes. Red dots are for severely damaged structures, yellow dots are for slightly damaged structures.

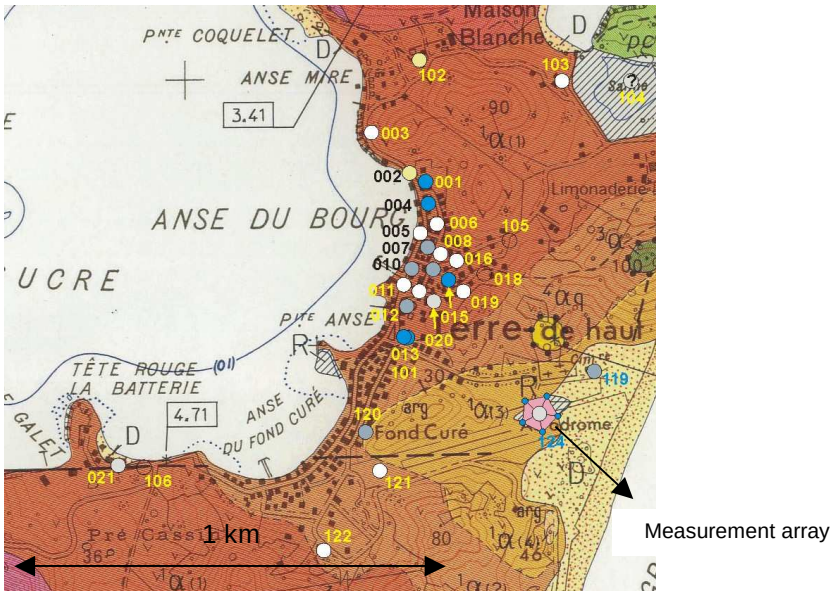


Figure 4.4—4 : H/V results for Terre de Haut, Les Saintes. Base map is for geology (Jacques, 1988), round colors are relative to H/V peak frequency: slight grey is for 2-3 Hz, dark grey for 4-5 Hz, blue for 7-8 Hz and yellow for 11-15 Hz. A white round means that no peak was found.

Soil resonance frequency analysis from ambient vibration measurements

For two days, ambient noise was successively measured over 32 locations on Terre de Haut island, mainly on the constructed zones. The Figure 4.4—4 summarizes the results obtained. For each measurement point, a colored circle indicates the frequency pointed out by the H/V curve: slight grey is

© 2008 Tous droits réservés.

for 2-3 Hz, dark grey for 4-5 Hz, blue for 7-8 Hz and yellow for 11-15 Hz. A white circle means that no peak was found. A peak around 2-3 Hz is detected over the airport fillings. For other points, when a peak occurs, its frequency is generally 4-5 Hz near the sea shore. Peak frequency increases for points closer to the hills (7-8 Hz). Finally no peak was generally found above hills. This distribution of peak frequency may be relative to the thickness of soft layers that decreases towards hard volcanic outcrop. Local variation may be due either to human intervention to build the village or to weathered zones at the bottom of the hills. Globally, this experiment shows a clear site effect near the sea-shore that decreases towards the hills. Most of the constructions are built in this zone. The soil resonance frequencies are rather high for Terre de Haut (mainly between from 4 to 8 Hz), which may correspond to the resonance mode of rigid structures.

Vs profile from ambient vibration measurements on the airport

As can be seen in Figure 4.4—4, H/V peak frequency for the airport is around 2-3 Hz, which seems low for superficial layer as was previously stated. As this site a proposal was made to install a station of the national permanent accelerometric national network (RAP), it seemed interesting to investigate its geophysical nature. That is why another experiment took place to record ambient noise simultaneously with 6 recorders. Several circles with various diameters were designed over the runways. For each one, 30 minutes of microtremor measurement was recorded with one station on the center and the 5 other regularly set on the circle. The data was then analyzed to produced shear wave velocity (Vs) profiles. First results did not fit either observed site effect frequency (because resonant layer of the model was too thin) or the given depth of 10 meters.

During the measurements, a witness of the airport construction insured that the runway was built around 30 years ago by filling a volcanic depression with successive layers of volcanic debris and then beach sand, with a total thickness that could reach 30 meters locally.

A new model was then produced taking into account two layers of 10 and 25 meters with a respective Vs of 250 m/s and 850 m/s. This model fits in with the H/V curves and the remarks of the witness. Figure 4.4—5 illustrates this model: P (resp. S) wave velocity profile (left, resp. center) as a function of depth and associated dispersion curves (right) with calculated dispersion curves in black dots (from FK analysis).

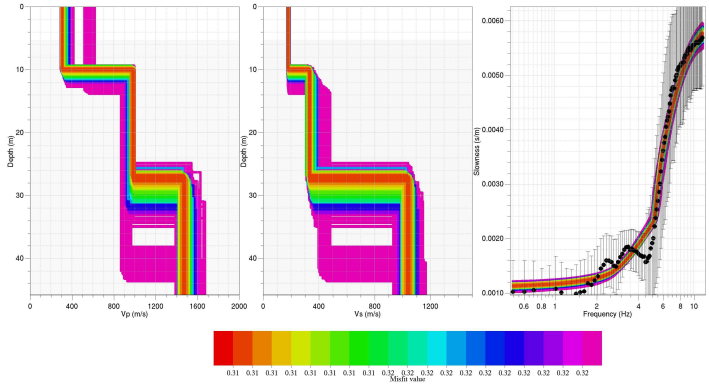


Figure 4.4—5 : Terre de Haut Airport, ambient noise array, result of the inversion (Vp, Vs, dispersion curve), two layers model. Color scale is for misfit values.

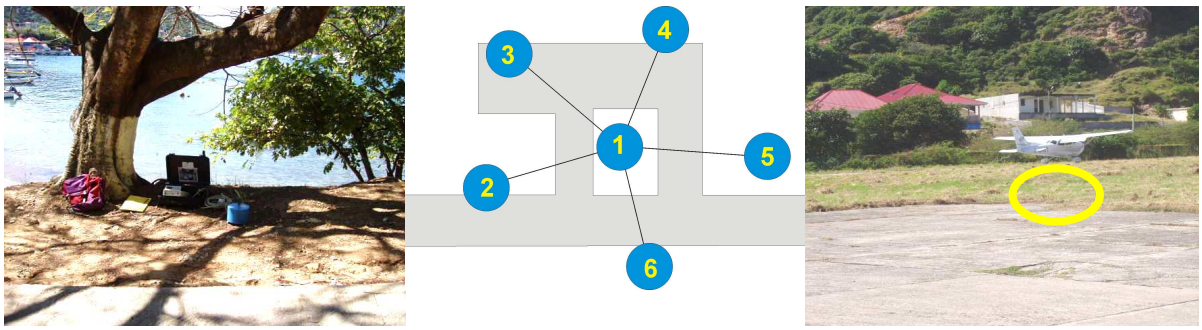


Figure 4.4—6 : Left: example of noise measurement in Terre de Haut (point 2); Middle: plan of the sensors for ambient vibration array measurement on the airport runway; Right: runways and one sensor after the measurements.

© 2008 Tous droits réservés.

4.4.5 Terre de Bas, Petites-Anses

Terre de Bas, the other habited island of "Les Saintes" is 9.5 km^2. Its topography is more abrupt than Terre de Haut one. Petites-Anses, the village, is the only inhabited part of it.

Site effect expected from geological context

Terre de Bas is a massive island with large rectilinear cliffs that often correspond to recent faults. The basic calcareous plate is overlapped by volcanic deposits, more recent than those of Terre de Haut. These deposits are mainly composed of a thick accumulation of massive or self brecciated andesitic lava flows with quartz and hornblende. The main part of Petites-Anses is built in a basin filled with black hornblende ash layers. The layers are at least 15 meters thick and the most superficial ones may be locally redeposited (Jacques, 1988). According to the regional zonation (BRGM, 2000) Terre de Bas territory should correspond either to S0 (hard rock) or S1 sites (soft rock) of the French seismic code.

Observed damage

The damage observed in Terre de Bas are more dense and severe than those of Terre de Haut. Several buildings had to be demolished before our field mission (as the municipal hall). Others needed strong reinforcement (the church). Most of the damaged buildings are concentrated in the centre of the village (Figure 4.4—8). As for Terre de Haut, the structures of Terre de Bas have only two floors at maximum. They can also be considered as rigid according to their height and building type.

Soil resonance frequency analysis from ambient vibration measurements

The field experiment lasted one day. Eleven sites were successively equipped to record ambient noise vibrations. Results are summarized in Figure 4.4—7. In the centre of the village, the H/V curves often reveal a peak of 2 Hz (red stars), when no clear peaks are observed for points located farther from the basin centre (grey stars). This result tends to confirm that the ash filling provokes a site effect on the village centre, which could (partly at least) explain the damage concentration in this area.

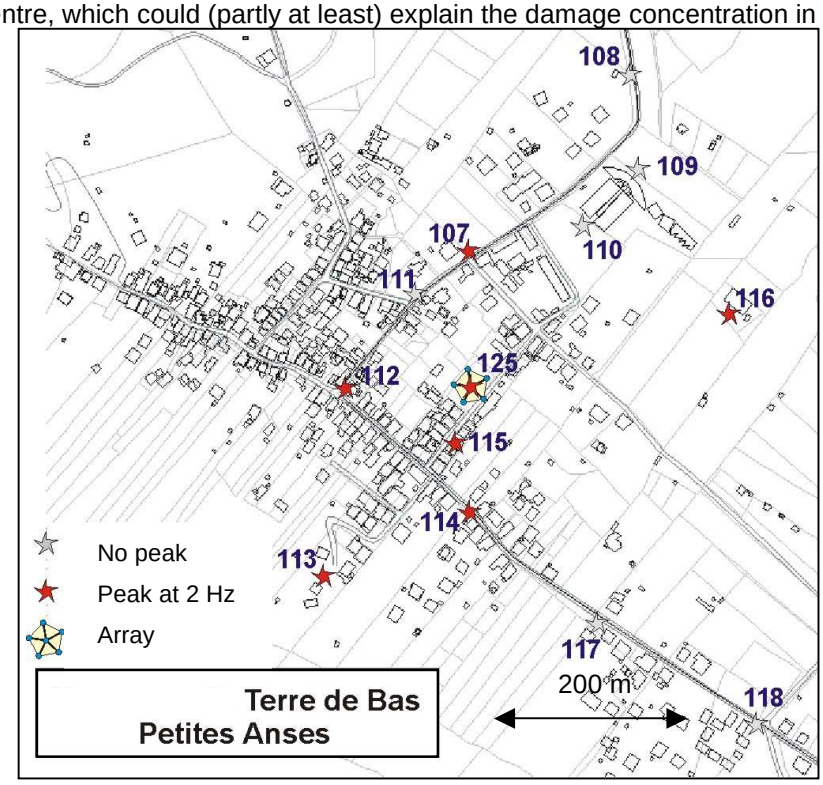


Figure 4.4—7 : H/V results for Petites-Anses, Terre de Bas island, Les Saintes.

© 2008 Tous droits réservés.

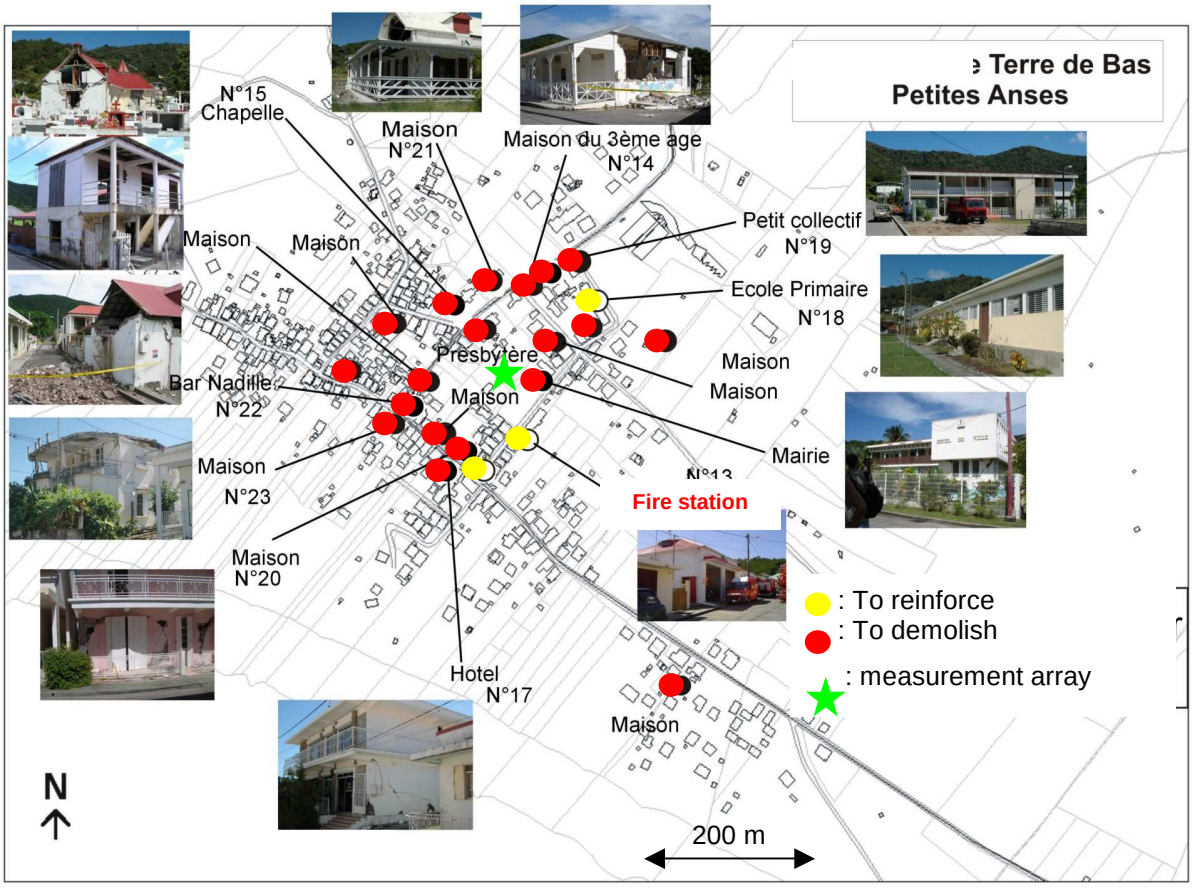


Figure 4.4—8: Main damage in Petites-Anses, Terre de Bas island, Les Saintes. Red dots are for severely damaged structures, yellow dots are for slightly damaged structures.

4.4.6 Vs profile from ambient vibration measurements

As for Terre de Haut, an accelerometric station (part of the national network RAP) was planned in the centre of Petites-Anses. The fire station (that severely suffered from the earthquake) was the proposed site. To better understand site effect phenomena that seems to have occurred during the 2004 earthquake, we performed microtremor array measurement. The experiment took place on the municipal square, very closed from the fire station. Two successive arrays of 5 and 20 meters were deployed. Ambient noise records lasted 30 minutes for each one. One of the best model issued from the data analyse is presented in Figure 4.4—10. This model is composed of two layers above bedrock: the first layer is 19 meters thick with Vs of 290 m/s, the second is 40 m thick with Vs of 500 m/s. The Vs for bedrock is 1000 m/s. This model fit in with the geological description of the basin. Based on this data a simple numeric simulation of S wave resonance characteristics indicates a first vibration mode at 2Hz. Therefore, this model can be considered as consistent with H/V curves that produce the same soil resonance frequency. As for Terre de Haut, this soil resonance frequency should be carefully compared to the first resonance mode of the damaged structures, which are effectively claimed to be rigid.

© 2008 Tous droits réservés.

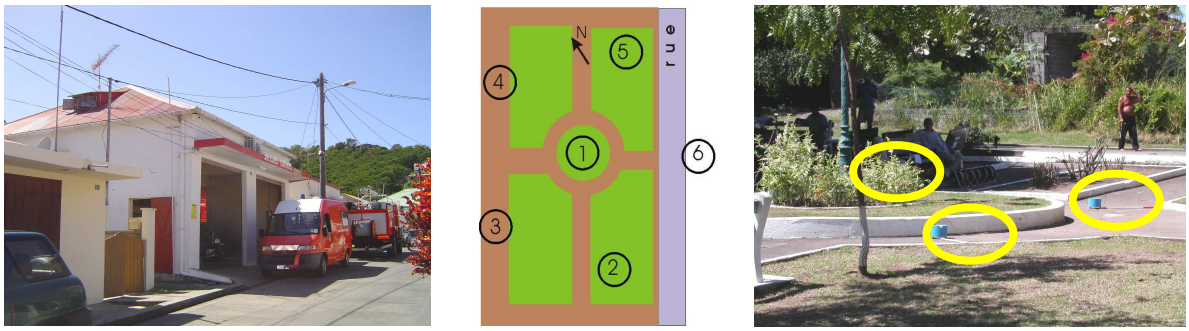


Figure 4.4—9 : Left: Fire station of Petites-Anses; Middle: plan of the sensors for ambient vibration array measurement on the Municipal square; Right: some of the sensors of the array measurement.

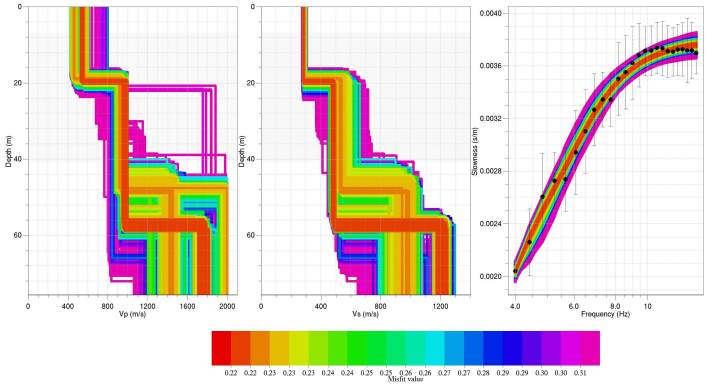


Figure 4.4—10 : Petites-Anses, Municipal square, ambient vibration array, result of the inversion (Vp, Vs, dispersion curve), two-layer model. Color scale is for misfit values.

4.4.7 Comments and conclusion

The rapid field experiments and damage observation conducted during this mission suggest that the 2004 earthquake was almost surely amplified by site effects in some areas where damage is concentrated. The H/V method based on microtremor produces clear peaks in many points that tend to confirm this assumption.

Microtremor array measurements allow us to propose soil models (Vs profile) that fit in with the geology. These models may also explain the soil frequency measured with H/V technique. As concerns the correlation between resonance frequencies of soil and damaged structures, it is only possible to note that both of them seem to be rather high. If the soil frequencies are generally higher than 4 Hz for Terre de Haut, it is around 2 Hz for Petites-Anses centre, whereas all the damaged buildings can only be qualified of "rigid". One hypothesis could be proposed: Assuming that the building's natural frequency is around 2-4 Hz, structures should have been more trembled in Petites-Anses centre than in Terre de Haut, because of the coherence between structure and site effect frequencies. This could explain the damage concentration in the village, while the same type of structure seems to have suffered less on other parts of the island. To verify the reliability of this assumption, dynamic behaviour of all structures should be carefully investigated.

But the correlation between site and structure frequencies (if it exists) is undoubtedly not the only explanation for damage occurrence. As a matter of fact, neighbouring buildings suffered very differently from the earthquake while their structures looked similar (at first glance) and while site effect frequencies are expected to be the same according to our experiments. What's more, the obvious poor building quality certainly played a major role in what occurred. As mentioned by the AFPS mission (AFPS, 2005), if the vibrations had been slightly more energetic, the damage would have been much more catastrophic. That is why this event must be considered as a warning for the French West Indies concerning building quality, seismic code observance and crisis management.

This field mission and the rapid experiments presented here show us that such technical investigations, mixing two different skills (hazard and vulnerability), which are traditionally separated in France, may improve the understanding of seismic phenomena and should be further developed.

© 2008 Tous droits réservés.

References:

AFPS (2005). Le séisme des Saintes (Guadeloupe) du 21 novembre 2004, Rapport de mission, *printed by la région Guadeloupe, informations: www.afps-seisme.org*, 80 pages.

BCSF (2005). Séisme des Saintes (Guadeloupe) du 21 novembre 2004, BCSF2005-NP3, 62p.

Bertil D., Bazin S. and Beauducel, F.(2004). Séisme des Saintes, Rapport de Synthèse, *Rapport Interne, CDSA*, 8 déc., 36 pages.

Cadet H., P.-Y. Bard, P. Guéguen and C. Cornou (2006). Rapid screening of site effects through microtremor surveys in view of microzonation studies, *First European Conf. on Earthquake Engineering and Seismology* , Genève, Suisse, 3-8 sept.

Duval A.-M., E. Bertrand, S. Vidal, H. Nahornyj, G. Verrhiest and G. Jacquet (2006). Compte-rendu de mission en Guadeloupe suite au séisme des Saintes du 21 novembre 2004, *rapport CETE Méditerranée à DRAST et DGUHC, affaire n°057422937/ 01/02*, 287 pages.

Duval A.-M., J.-L. Chatelain, B. Guillier, SESAME WP02 team (2004). Influence Of Experimental Conditions On H/V Determination Using Ambient Vibrations (Noise), *n°306* , *13th World Conf. on Earthquake Eng*., Vancouver, 1-6 august.

Feuillet N. (2000). Sismotectonique des petites Antilles. Liaison entre activité sismique et volcanique. *Thèse, Univ. Paris 7,* 283 pages.

Jacques D. and R.C. Maury (1988). Notice explicative de la carte géologique au 1/20000, département de la Guadeloupe, Les Saintes, *éditions BRGM service géologique National*, 28 pages.

Michel C., H. Nahornyj (2003). Les Difficultés d'application de la réglementation parasismique : Analyse des causes et propositions d'amélioration en France métropolitaine et aux Antilles, *rapport GETE Méditerranée au MEDD*, 76 pages.

SESAME (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations, measurements, processing and interpretation", deliverable D23.12 for EC, 61 pages, http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/SES_TechnicalDoc.htm.

Wathelet, M. (2005). Array recordings of ambient vibrations: surface wave inversion, *PhD. Thesis, Liège Univ.,* May 12, 161 pages

4.5 Conclusions sur ces études post-sismiques

L'étude de bruit de fond réalisée à Caracas a contribué à montrer que cette technique permet de caractériser facilement les fréquences de résonance des sols. En effet, dans le bassin de Palos Grandes, les fréquences mises en évidence correspondent à celles issues des modélisations numériques de propagation d'ondes. Ces fréquences ont ensuite été mises en relation avec la hauteur et le premier mode de résonance des immeubles les plus endommagés soit 0.6 Hz au centre du bassin. La valeur maximale du rapport H/V entre 0.5 et 15Hz a été ensuite étudiée. Les rapports H/V sont relativement faibles sur le rocher entourant le bassin sédimentaire. Par contre, les zones montrant les pics les plus élevés (supérieur à 5 dans l'étude) correspondent à des zones de grande épaisseur du bassin où se sont effondrés 4 bâtiments élevés. Plusieurs points montrent des pics encore plus élevés sur une zone qui n'était pas bâtie à l'époque du séisme (autour de l'aéroport de Caracas). **Sur la base de cette étude, il est tentant de suggérer un lien entre niveau relatif de dégâts (à vulnérabilité équivalente) et niveau relatif des rapports « H/V », ce lien étant d'autant plus solide que la fréquence naturelle du sol est proche de la fréquence fondamentale des bâtiments, toutes deux accessibles par mesure de bruit de fond.** Mais, d'une part cette suggestion n'est basée que sur une seule étude de cas, d'autre part il semble très difficile de trouver une explication physique à une correspondance éventuelle entre ce maximum des courbes et un niveau "relatif" d'amplification spectral du signal sismique qui reste encore à vérifier ailleurs. Pour statuer sur l'interprétation de ces niveaux relatifs des pics "H/V", il faudra sans doute avancer dans deux directions: D'une part réaliser d'autres campagnes post-sismiques en ayant mesuré au préalable les fréquences de résonance des bâtiments. D'autre part, il faudra progresser dans la compréhension physique de la propagation du bruit de fond sismique.

L'étude réalisée suite au séisme du 25 février 2001 à Nice s'est nourri de ces premières interrogations. Là aussi, les fréquences de résonance issus du bruit de fond ont été confrontées aux "effets" du séisme. Toutefois le niveau de vibration était d'un ordre de grandeur très largement inférieur, les dommages à peine perceptibles et la collecte de l'information entachée de subjectivité, ce qui a conduit à travailler uniquement sur la notion de "perception des effets". Ce travail réalisé pour le

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

compte du MEDD [EE28] a en effet permis de construire une échelle de perception des effets de la secousse par chaque observateur et de concevoir des outils méthodologiques pouvant être repris lors d'études post-sismiques. La mise en relation entre les limites du microzonage, la profondeur du remplissage sédimentaire, l'étage d'observation, l'époque de construction du bâtiment et les valeurs moyennes de perception indiquent des corrélations faibles mais notables: Bien que les données de départ imposent des limites sévères à l'interprétation (faible niveau de la secousse et répartition irrégulière des réponses) **l'analyse confirme toutefois une perception des effets plus importante dans les zones alluviales que sur le substratum rocheux**. Sur le plan méthodologique, l'échelle de perception individuelle et l'analyse par « zone carrée » semblent particulièrement adaptées à l'approche des effets de site en site urbain. Cette étude a été l'occasion d'une réflexion avec les organismes concernés par les futures enquêtes macro-sismiques qui devraient bénéficier d'aménagements, afin de pouvoir tirer de ces actions l'information la plus riche possible en matière de prévention.

Enfin la mission post-sismique réalisée en Guadeloupe après le séisme du 21 novembre 2004 a été l'occasion pour le CETE de favoriser des synergies entre les techniciens de l'aléa et ceux de la vulnérabilité en appliquant diverses méthodes d'analyse, y compris des enregistrements sismiques. L'approche pluridisciplinaire mise en œuvre montre que certains **les principaux dommages avaient sans doute été accentués lors du séisme par des effets de site dus à des remplissages de cendres volcaniques et par l'adéquation entre la réponse des sols et celles des bâtiments**. **L'observation de la gestion de crise a également mis en évidence la nécessité de préparer à l'avance l'inspection post-sismique des bâtiments dans l'urgence.**

Ces trois exemples d'analyse post-sismique forment une contribution aux travaux qui se multiplient dans le monde suite à chaque séisme et qui démontrent l'importance des effets de site. Le chapitre précédent illustrait la capacité de la méthode "H/V" a déterminer les fréquences de résonance des sols. Ce type d'études post-sismique illustre le lien possible entre "fréquences de résonance des sols" et "fréquence de résonance" des bâtiments, source probable d'aggravation du sinistre mais qui semble pour être détecté par simples mesures de bruit de fond avant toute catastrophe. Selon les travaux conduits par F. Dunand (thèse F. Dunan, UJF, 2004) il serait même possible de détecter des modifications structurales importantes sur la base des même mesures de bruit de fond en analysant les variations de modes propres sur certains structures (en béton armé) avant et après le séisme. Ces avancées scientifiques pourraient bien trouver rapidement une traduction concrète en terme de prévention d'une part (cartographie des fréquences des sols et des structures) et de gestion de crise d'autre part (analyse de l'état de dégradation structural d'un bâtiment dans l'immédiat après séisme pour statuer sur l'évacuation des locaux).

.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

5 Scénarios de risque sismique

5.1 Introduction

Après avoir décrit dans les chapitres précédents les méthodes de caractérisation des effets de site, puis leur incidence éventuelle sur le niveau de dommages relatif, le présent chapitre a pour ambition d'illustrer mes contributions dans le domaine des scénarios sismiques qui découlent de la combinaison entre aléa et vulnérabilité.

Jusqu'à récemment si quelques organismes mettaient en œuvre des simulations sur des installations spécifiques, aucune méthode n'était disponible en France pour décrire les effets d'un séisme sur un territoire dans sa globalité. Comme pour d'autres risques naturels, prévoir les conséquences d'un événement sismique majeur fait aujourd'hui partie des outils de prévention et d'aménagement du territoire. De nombreux documents d'urbanisme et de gestion de crise sont susceptibles d'être enrichis par ces procédés: Plans de Prévention des Risques Sismiques, des Plans Communaux de Sauvegarde, plan ORSEC…

Il est important de noter que le terme scénario peut recouvrir des notions et des produits très divers selon l'objectif à atteindre et le cadre de la commande. En France on distingue aujourd'hui les scénarios de "risque" qui débouchent sur une vision plus ou moins précise des dégâts aux structures, des scénarios de "crise" qui incluent d'autres dimensions de la crise tout aussi importantes (sociale, psychologique, économique) et qui peuvent être établis à différents moments de la crise pour simuler son évolution.

Les scénarios de "risque" évoqués dans ce chapitre ne concernent "que" les conséquences « physiques» sur le territoire (les dommages et éventuellement les pertes humaines ou le coût). Pour autant ces conséquences, évaluées par des outils liés aux sciences de la terre (pour l'aléa) et de l'ingénieur (pour la vulnérabilité), sont le résultat d'un enchaînement de facteurs dont l'identification et la qualification dépendent largement des moyens mis en œuvre et donc de l'échelle d'étude. Dans le cas des approches sommaires présentées ici, il est bien évident que les produits finaux ne reflètent qu'une tendance générale des effets prévisibles, ce qui constitue le premier défi à relever. En effet, une petite portion du territoire peut s'avérer source de graves problèmes: effondrement d'un bâtiment ou blocage d'un itinéraire routier par exemple. L'autre grand défi à relever pour mettre au point ces concepts de scénarios consiste à lier l'évaluation de l'aléa à celle de la réponse dynamique des structures. Ainsi, comme on le verra dans les 3 exemples qui illustrent ce chapitre, la conception de scénarios implique de mettre au point des relations entre l'évaluation de l'aléa et celle de la réponse des structures (leur vulnérabilité).

Le premier exemple de mes travaux dans le domaine des scénarios (chapitre 5-2) est à placer dans le cadre des efforts européens pour mieux prévoir les dommages subis par le bâti urbain. Des bases de données européennes (% de dommage en fonction de l'intensité par type de bâtiment) sont en cours de montage sur la base des expériences grecques et italiennes. Le projet européen RiskUE (2001-2004) a largement contribué à étendre cette thématique dans plusieurs laboratoires européens (dont le BRGM et Geoter en France). Dans la lignée de ces travaux, le projet GEM-GEP (1998-2005) développé à Nice par le LCPC et le CETE Méditerranée, visait à développer des méthodes de scénarios de risque sismique dans l'objectif d'identifier les zones les plus fragiles des systèmes urbains. Le chapitre 5-2 extrait du rapport final GEM-GEP [EE1], illustre l'une des tentatives méthodologiques auxquelles j'ai participé pour lier au mieux aléa et vulnérabilité à grande échelle. La proposition évoquée ici vise à mettre en correspondance la fréquence des sols et celle des bâtiments pour évaluer les dégâts par quartier.

J'ai ensuite participé à la conception de l'outil SISROUTE dont les principes sont présentés dans le chapitre 5-3. Ce concept global de scénario le long d'itinéraires routiers a été commandé par le SETRA (et la DGR) dès 2005 dans un soucis de prévention, pour cibler les zones les plus sensibles d'un itinéraire. Le résultat des scénarios établis constitue l'un des critères de sélection des tronçons de route méritant des diagnostics sismiques approfondis avant confortement éventuels. La conception de SISROUTE est très largement conditionnée par le fait que les utilisateurs finaux (tout les services des routes non spécialisés) doivent pouvoir l'adapter sur leurs itinéraires. Ceci implique simplicité et économie de moyens dans la reconnaissance propre à chaque itinéraire avec des protocoles clairs et adaptés à toutes les configurations. Les solutions présentées ici tentent de répondre à ces critères en essayant de prendre en compte le niveau de vibration, mais aussi les aléas induits par la secousse (la

© 2008 Tous droits réservés.

liquéfaction, glissements, chutes de blocs). Tous les éléments constitutifs d'une route ont été pris en compte avec leur vulnérabilité lié à chacun des aléas : tronçon « libre » mais aussi ouvrages d'art, mur de soutènement.

Enfin le chapitre 5-4 présente l'étape suivante de la conception de scénario de risque à l'échelle d'un territoire. Ces travaux réalisé au cours du projet européen FORESIGHT s'inspirent largement de ceux réalisés durant GEM-GEP pour le bâti et SISROUTE pour les routes en combinant les protocoles d'appréciation, des aléas et des vulnérabilités propres à chaque élément. La principale proposition innovante faite ici est lié à l'introduction de facteurs de sécurité sur les risques d'évènements induits qui voisinent avec des taux de dommages par secteur de bâti.

5.2 Scénario urbain : Gem-gep

Ce chapitre 5-2 est extrait du rapport final GEM-GEP: *"Le Risque Sismique à Nice: apport* méthodologique, résultats et perspectives opérationnelles, rapport final GEM-GEP", par P.-Y. Bard, A.-M. Duval, E. Bertrand, J.-F. Vassiliades, S. Vidal, P. Foin, P. Guéguen, C. Thibault, B. Guyet, F. Dunand, S. Bonnefoy-Claudet, J.-P. Méneroud, G. Vettori, publication présentée et diffusée lors de la conférence du 7 avril 2005 sous l'égide des Maîtres d'Ouvrage (LCPC, CGPC, METATTM, MEDD, CANCA), 52 pages, avril 2005.

5.2.1 Objectif de l'exercice

La combinaison des résultats en termes d'aléa et de vulnérabilité donne accès au risque, ce qui se traduit, pour les séismes de scénario, par des estimations de dommages et de leur distribution spatiale. Il est utile de rappeler encore une fois que ces estimations sont entachées d'énormes incertitudes, et que leur intérêt essentiel réside dans leur ordre de grandeur, ainsi que dans leur variabilité spatiale.

Nous avons fait cet exercice d'évaluation du dommage moyen essentiellement pour le bâti B et à deux échelles, celle de la ville dans son ensemble et celle des 27 secteurs homogènes. A cette dernière échelle, il devient possible de prendre en compte les variabilités spatiales de l'aléa (effets de site) et de la vulnérabilité, ainsi que l'information croisée sur le positionnement relatif des fréquences du bâti et du sol. Un tel croisement peut donner accès à des avancées très significatives, que nous avons essayé de commencer à explorer, tout en gardant à l'esprit cependant le besoin de calibration sur d'autres sites où seraient disponibles à la fois les mêmes informations et des observations détaillées de dommages: Nous nous sommes donc surtout attachés à déterminer, via une petite étude de sensibilité, si ce croisement peut conduire à des effets significatifs, méritant des travaux ultérieurs pour mieux les cadrer, ou au contraire ne produit que des variations marginales.

5.2.2 Bâti B, Échelle globale

Lorsqu'on moyenne la vulnérabilité de l'ensemble du bâti de la ville (en pondérant les indices de chaque secteur soit avec le nombre de bâtiments, soit avec la population), on obtient, pour le bâti B, un indice de vulnérabilité moyen de l'ordre de 0,6.

Si l'on ne prend pas en compte les effets de site dans les zones alluviales, on aboutit alors aux estimations suivantes:

- Pour un événement d'intensité moyenne VI-VII comme le séisme "de Bouyon", le taux de dommage moyen sur la ville serait de 7 à 8 %,
- pour un événement d'intensité moyenne VII comme le séisme "ligure", le taux de dommage moyen sur la ville tournerait donc autour de 10 à 11 %.

5.2.3 Bâti B, Échelle du secteur

A cette échelle, si l'on ne prend en compte, dans un premier temps, que les variations spatiales de la vulnérabilité, on voit apparaître une forte différenciation des taux de dommages d'un secteur à l'autre : de 2% à 25% pour le séisme "de Bouyon", de 3% à 33% pour le séisme ligure. La carte des dommages (Figure 5.2—1) reproduit alors la carte des indices de vulnérabilité, avec des dommages maxima dans le secteur "Vieille-Ville" et minima dans le secteur "Paillon". Le taux de dommage moyen à l'échelle de la ville entière reste cependant du même ordre de grandeur.

© 2008 Tous droits réservés.

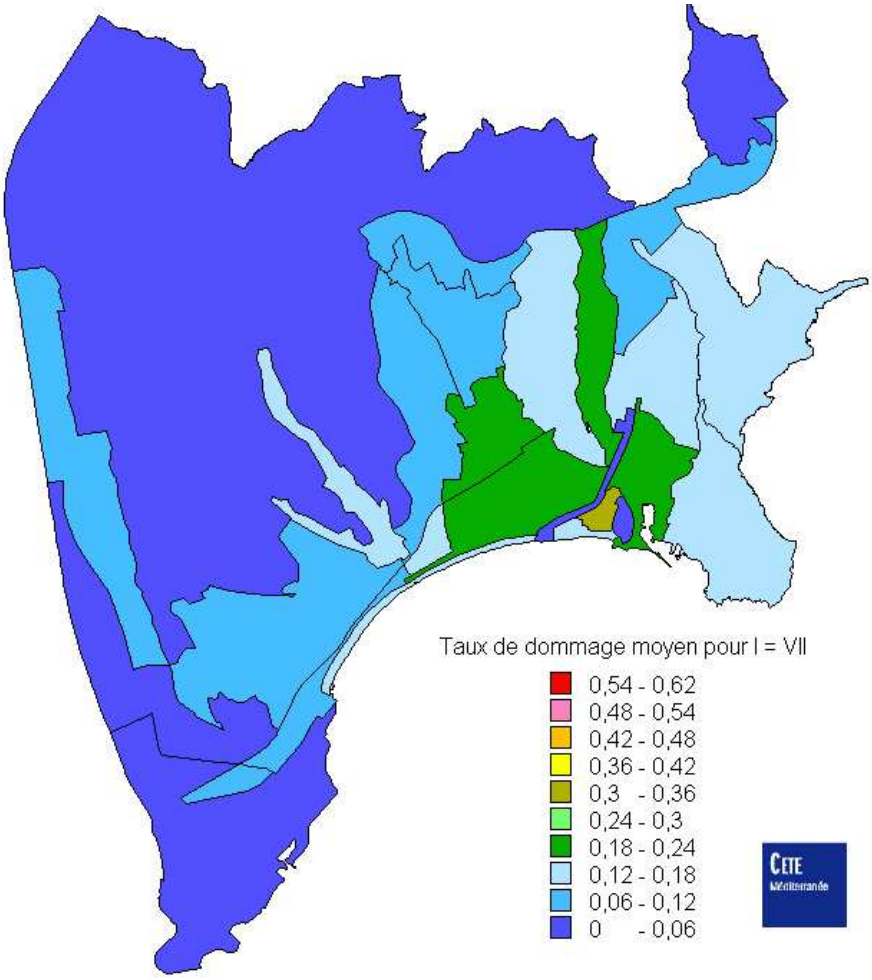


Figure 5.2—1: Carte des taux de dommages moyens pour le bâti B (échelle de 0 à 1) pour le séisme Ligure (Intensité de référence VII).

Par contre, la prise en compte supplémentaire des effets de site conduit à des évolutions beaucoup plus significatives tant en terme de dommages moyens qu'en terme de variabilité spatiale. En l'absence de calibration réelle pour la prise en compte de ces effets locaux, nous avons essayé plusieurs cas, qu'il serait sans doute trop fastidieux de développer ici. En bref, les options libres concernent l'amplitude de l'incrément local d'intensité ΔI_{max} attribué aux effets de site et la prise en compte ou non de l'information croisée sur les fréquences du sol et des bâtiments. Les résultats principaux en sont résumés dans le Figure au 5.2—1, où nous avons fait varier l'incrément local d'intensité ΔI_{max} de 0 à 3, cette dernière valeur étant compatible avec les amplifications de 10 mesurées à la station Alsace Lorraine. Un exemple de résultats, pour le cas du séisme "ligure" et ΔI_{max} = 2 est illustré sur la Figure 5.2—2 et la Figure 5.2—3.

© 2008 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

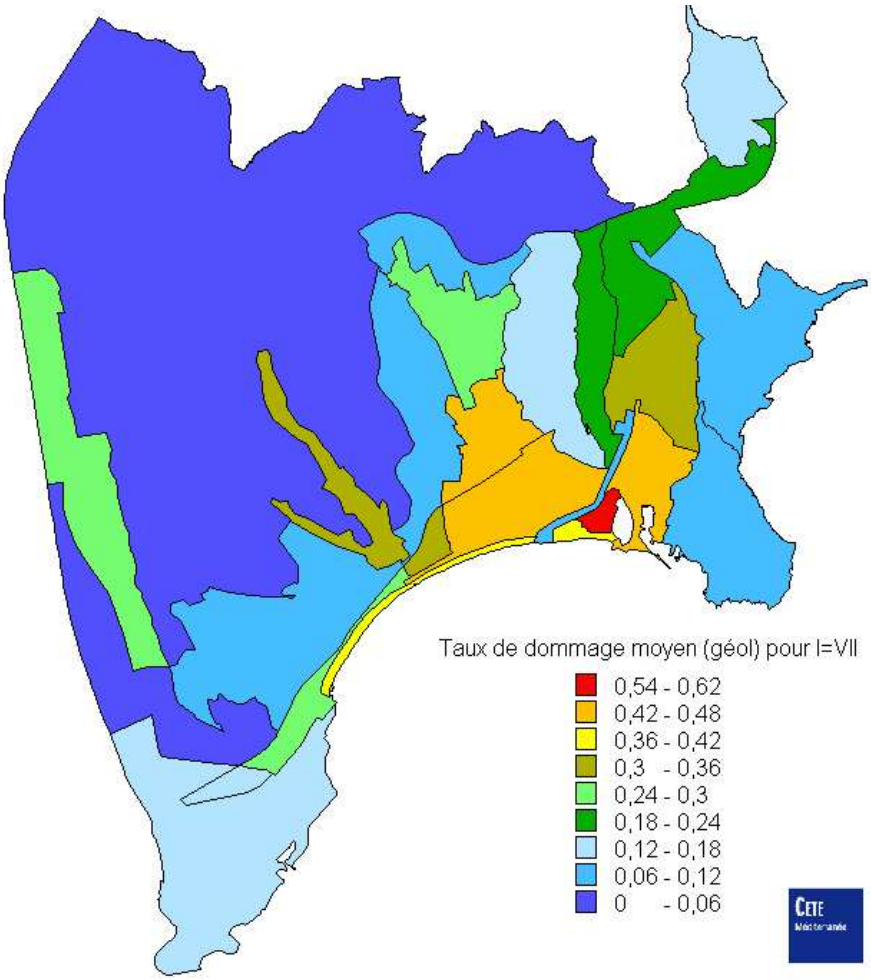


Figure 5.2—2:Carte des taux de dommages moyens pour le bâti B (échelle de 0 à 1) pour le séisme Ligure (Intensité de référence VII). Prise en compte avec ΔI_{max} = 2 (+1.33 sur remplissage alluvial, -0.67 sur rocher calcaire Est et Nord-Est), sans information fréquentielle.

Par-delà les chiffres, toujours à considérer avec recul, plusieurs éléments essentiels s'en dégagent:

- La prise en compte des effets de site augmente systématiquement les dommages moyens: cela résulte de la localisation des bâtiments les plus vulnérables (en gros, les plus anciens), dans les vallées centrale et du Paillon sujettes à amplification.
- La variabilité de secteur à secteur augmente considérablement avec le niveau des effets de site. Certains secteurs apparaissent comme systématiquement plus exposés (Vieille Ville, Mairie, Centre, Port-Riquier et Gare-du-Sud). D'autres au contraire apparaissent plus sûrs à cause d'un aléa moins élevé (Mont-Boron, Observatoire, Collines, Fabron-la Lanterne…) ou d'un bâti plus récent et de moindre vulnérabilité (Paillon par exemple) Dans le détail, la prise en compte ou non de l'information fréquentielle amène cependant à des images de distributions de dommage légèrement différentes, suivant la coïncidence ou non des fréquences du bâti et du sol.
- Les estimations semblent plus réalistes (moins élevées) lorsqu'on prend en compte l'information fréquentielle : cela constitue une forte incitation à développer plus avant cette approche seulement ébauchée dans le cadre de cette étude, en s'attachant d'abord à la calibrer, et ensuite à la coupler avec la magnitude du séisme.

© 2008 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

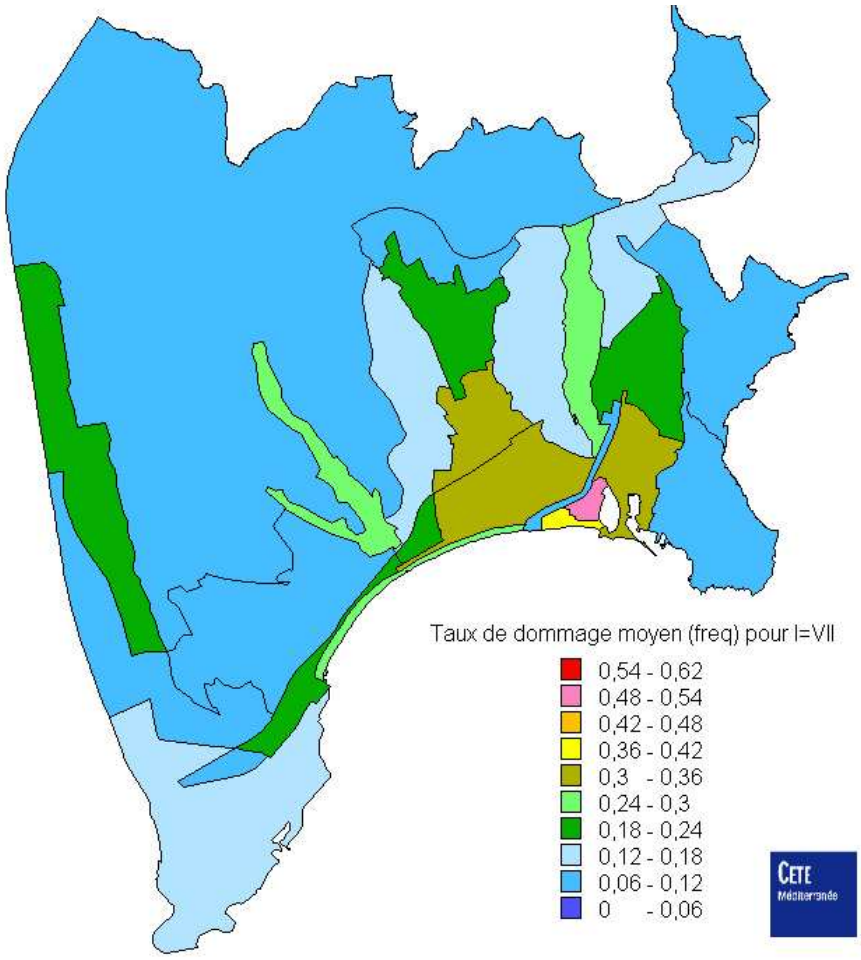


Figure 5.2—3:Carte des taux de dommages moyens pour le bâti B (échelle de 0 à 1) pour le séisme Ligure (Intensité de référence VII). Prise en compte des effets de site avec ΔI_{max} = 2 avec croisement de l'information fréquentielle sol / bâtiment.

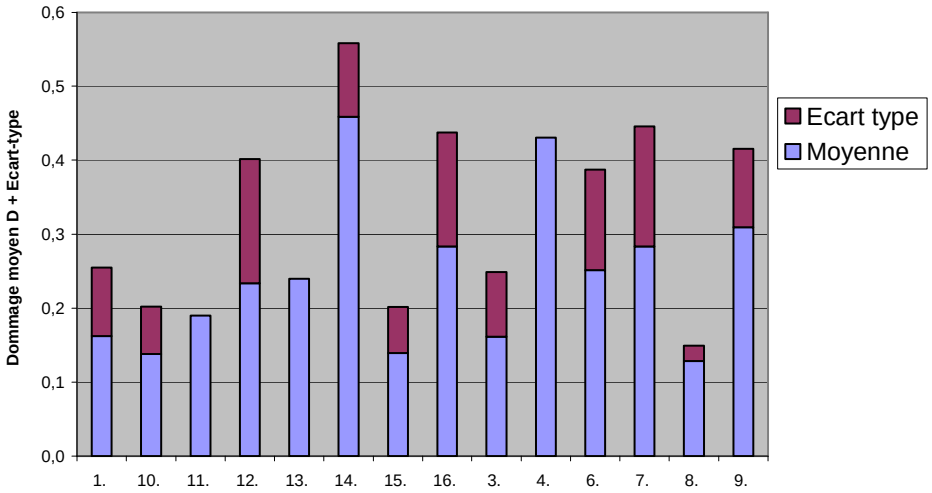
Variation d'intensité maximale site / rocher	Taux moyen de dommage sur toute la ville de Nice		Variabilité maximale sur le territoire municipal	
	Aucun croisement fréquentiel	Croisement fréquences site / bâtiments	Aucun croisement fréquentiel	Croisement fréquences site / bâtiments
Séisme "de Bouyon" I = VI-VII				
ΔI_{max} = 0	8 %	9 %	2% à 25%	2% à 25%
ΔI_{max} = 1	11 %	11 %	3% à 37%	3% à 32%
ΔI_{max} = 2	14 %	12 %	3% à 51%	4% à 39%
ΔI_{max} = 3	19 %	14 %	3% à 65%	4% à 47%
Séisme "ligure" I = VII				
ΔI_{max} = 0	12 %	14 %	3% à 33%	3% à 34%
ΔI_{max} = 1	15 %	15 %	5% à 47%	5% à 42%
ΔI_{max} = 2	20 %	17 %	5% à 62%	6% à 49%
ΔI_{max} = 3	25 %	19 %	5% à 74%	7% à 57%

Figure au 5.2—1: Sensibilité des dommages aux effets de site et à leur mode de prise en compte.

© 2008 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

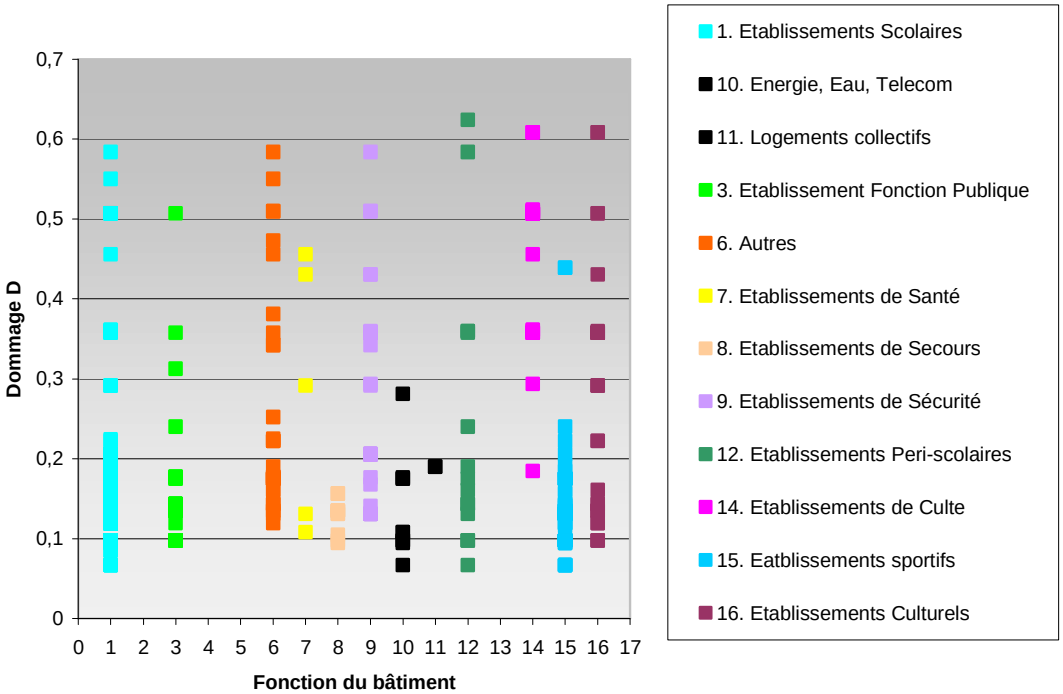
5.2.4 Bâti C-D

Pour le bâti C-D, les délais associés à l'enquête n'ont pas autorisé, à ce jour, la prise en compte des effets de site. Les dommages estimés pour une intensité VII correspondant au séisme ligure restent limités (de l'ordre de 15 à 20% dans l'ensemble), comme l'indique la Figure 5.2—4.



1. Etablissement scolaire
3. Etablissement Fonction Publique
4. Etablissement Public
6. Autres
7. Etablissement de Santé
8. Etablissement de Secours
9. Etablissement de Securité
10. Energie, Eau, Telecom
11. Logement Collectif
12. Etablissement péri-scolaire
13. Etablissement Industriel
14. Etablissement de culte
15. Etablissement sportif
16. Etablissement culturel

(a) Moyenne et écart-type des dommages obtenus pour chaque catégorie d'établissement C-D



(b) Estimations individuelles de dommage pour chacun des bâtiments de chaque catégorie: la dispersion est très importante, de sorte que plusieurs dizaines de bâtiments ont des estimations de dommage supérieures à 30%.

Figure 5.2—4: taux de dommages moyen GNDT pour le bâti C-D pour le séisme "ligure" (I=VII, la localisation du bâtiment, le type de sol, les effets de site et l'information fréquentielle ne sont pas pris en compte).

© 2008 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

On retrouve évidemment des variations significatives d'une catégorie d'établissement à l'autre (les plus touchées étant les églises et chapelles anciennes), mais on peut cependant noter qu'au sein de chaque catégorie, il existe certains bâtiments très différents de la moyenne, et assez vulnérables pour mériter un examen plus approfondi: une quarantaine d'entre eux seraient en effet endommagés à plus de 30 %.

La retranscription de ces "taux de dommages" en nombre de victimes (nombre de morts, nombre de blessés à différents degrés de gravité) et en coût économique, est très délicate et imprécise. Outre une méconnaissance des "taux de victimisation", les premières dépendent de nombreux facteurs aléatoires comme l'heure ou la saison à laquelle surviendrait le séisme; le second dépend de l'estimation financière du patrimoine immobilier niçois, des coûts de réparation associés à ces "taux de dommage moyen" et des pertes indirectes. Nous rappellerons simplement les estimations effectuées dans l'étude RISK-UE pour le séisme "ligure", qui donnent les ordres de grandeur "raisonnables" dans l'état actuel des connaissances: quelques dizaines à quelques centaines de morts, un nombre légèrement supérieur de blessés nécessitant hospitalisation et de 1 à 7 Milliards d'Euros pour les pertes économiques directes.

5.2.5 Remarques finales sur les enseignements de l'étude Gem-gep

De nombreuses questions restent en suspens à l'issue de cette étude : il n'est par exemple pas encore possible de répondre aux attentes des services de secours et de santé avec des estimations précises du nombre de victimes et l'identification des immeubles sérieusement endommagés; il n'est pas plus possible de fournir aux gestionnaires de parc immobilier un diagnostic détaillé de leurs bâtiments et des indications techniques sur leur renforcement éventuel… Peut-être certains en concevront-ils une certaine frustration... Cependant, cet exercice méthodologique n'a pas été inutile, loin s'en faut: il a apporté des résultats nouveaux sur lesquels il est possible de capitaliser, il a permis de développer des méthodes et des compétences qui sont maintenant applicables à d'autres villes, et, localement, il a permis d'engager une sensibilisation en profondeur de l'ensemble des acteurs, sans laquelle rien de durable ne pourra se faire.

Parmi ces acquis, on peut rappeler quelques éléments essentiels:

- ✓ Compilation de données éparses (géotechnique notamment), acquisition de données nouvelles (vulnérabilité), élaboration de cartes d'aléa et de vulnérabilité, et archivage commun sous un seul SIG,

- ✓ Développement de nouvelles méthodologies pour les études d'aléas et de risques :
  - o Procédures d'enquêtes de vulnérabilité à différents niveaux de précision pour de grands parcs immobiliers,
  - o Prise en compte de l'aléa local dans les études de risque par croisement des informations fréquentielles, avec notamment l'utilisation intensive de l'outil "bruit de fond sismique" tant au sol que dans les bâtiments,

- ✓ Identification de thématiques où les connaissances ou données locales font cruellement défaut et où des efforts spécifiques et volontaristes devraient être engagés pour combler les lacunes actuelles.

L'ensemble de ces résultats sur l'aléa et la vulnérabilité locales, joint à l'importance des enjeux humains et économiques sur l'agglomération niçoise, militent en faveur de la réalisation d'un PPR sismique, instrument qui permettrait l'appropriation par l'ensemble de la population et des acteurs de la construction de résultats déjà très riches mais dont l'énoncé reste pour le moment techniquement complexe. L'intégration de toutes les informations sous SIG ouvre aussi la voie à des scénarios "interactifs" permettant à la fois d'évaluer la robustesse des résultats et de préparer les services concernés (équipes de secours, inspections et diagnostics d'urgence, …) à différents scénarios de crise.

Mais, par delà ces résultats techniques – préalables indispensables mais non suffisants -, l'acquis le plus déterminant est certainement l'établissement d'échanges constructifs et durables entre les différents partenaires de la prévention. Ces échanges ont permis d'élaborer un programme d'action pour avancer efficacement dans une prévention active, dont la présentation fait l'objet de la section suivante et dont la mise en œuvre devrait être facilitée par la montée en puissance du Programme National de Prévention du Risque Sismique annoncé par le MEDD..... fin de l'extrait du rapport final GEM-GEM

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

5.3 Scénario sismique routier: Sisroute

Ce chapitre 5-3 est composé d'un article référencé: A.-M. Duval, E. Bertrand, C. Renou, P. Marchand, D. Davi and D. Criado, ***"SISROUTE : Earthquake scenario generation along roads : hazard assessment principles and global concept of the system"***, First European Conf. on Earthquake Engineering and Seismology , Genève, Suisse, n°516, 10 pages, 3-8 sept. 2006.

SUMMARY:
SISROUTE is a tool developed for the French Ministry of Transportations to roughly assess road failures due to earthquakes. The system will be delivered to road manager services to provide local decision-makers a first series of pertinent information that will help them anticipating seismic crisis by reinforcing some elements of the road or by pointing substitution itinerates. The concept developed consists in linking, for each road element, "vulnerability" values together with "hazard" values, in order to produce for a given scenario, "risk" values relative to road failure. SISROUTE concept had to overpass two antagonistic specifications of linear infrastructure scenario: the scale of survey should be large enough to be economic and simple, but a very small element can be responsible for road failure. Hazard is expressed in terms of maximum horizontal acceleration of soil, or Peak Ground Acceleration (PGA), starting point of the risk analysis. Induced phenomena (liquefaction, landslide and rock fall) occurrence are evaluated only from basic soil classifications and expressed in term of minimum PGA value that can trigger it. For each of these hazards and for each road element, a simple constant vulnerability value is evaluated (partly described in 2 other papers). A standard geographical information system, gathering these data, is set to be adapted for any road. Its preparing for a new road consists in integrating constant hazard and vulnerability data. When a new scenario is generated, PGA is evaluated all along the road according to one of the three patterns: French seismic zonation, probabilistic zonation, or any earthquake defined by its location and magnitude. For each element of the road, hazard values are updated and combined with the corresponding vulnerability values. Resulting "risk" values are relative to road failure. Maps are produced, pointing out road failure possibilities and their causes.

5.3.1 Aims of Sisroute

Seismic risk assessment along existing French roads is one of the objective of the Directorate of Roads of the French Ministry of Public works and transportation since 1997. Two teams of this Ministry (CETE Méditerranée et SETRA) took charge of method develpment to produce simplified earthquake risk scenarios along roads. Is it important to note that the level of sismicity is moderate in metropolitan part of France while it is important French West Indies. The aim of SISROUTE[8] is to localise on a map road failure risk for a given road. The method should be delivered to road manager services to provide local decision-makers with a first series of pertinent information that will help them anticipating seismic crisis by reinforcing some elements of the road or by pointing substitution itinerates.

The first method set aimed to estimate the vulnerability of existing bridges under seismic actions from geometrical and typological criteria that can be easily provided (SISMOA method, described in [Davi D. et al, 2006]). Then, the same type of approach was used for existing retaining walls (SISMUR method, described in [Thibault C. et al, 2006]).
To assess failure risk along all road sections for any seismic scenario, hazard should also be taken into account (both vibration and induced phenomena) and all sections of the road should be considered. SISROUTE, a global concept of seismic scenario along road is developed in this frame. The final product should be a system that generates map showing the failure risk along a road as a result of any selected earthquake scenario. SISROUTE development result in a standard Geographical Information System to be adapted to any French road. A user guidelines will also be provided that will clearly describe how to adapt this GIS to a particular road and how to use resulting maps. As this final product will be distributed to non-specialist, its setting-up and use must be simple, economic and based on data available on all French territory.

To design this tool, many aspects must be clearly defined: scenario choice, link between hazard and vulnerability, adapted hazard assessment method, failure risk definition. These numerous developments will refer as much as possible to existing approaches for particular points (such as

[8] "route" means "road" in French language.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

hazard parameters assessment) but also to close systems (like Hazus99 in USA) to take advantage of the experience of the best specialists of the different domains. These experiences should be adapted to SISROUTE context: final user non-specialist, French specific road fittings, national seismic building code and mountain region.

This paper described the present state of SISROUTE. If the global concept is now fixed, many points still need to be further improved. After explaining the 3 types of proposed scenario, the choices operated to build the global concept are described: link between hazard and vulnerability, resulting value of risk. The resulting GIS layer architecture is mentioned. Finally a map illustrates SISROUTE first test on a road in south Alps.

5.3.2 Tree kinds of scenario

When the final product will be set and prepare on a given road, it will allow to simulate the consequence of any seismic event on this road. Three very different kinds of scenario are now available in SISROUTE and described in this chapter. As will be justified in the chapter 3, the Peak Ground Acceleration (*PGA*), resulting maximal horizontal acceleration of soil, is the expected output data of all these scenarios.

Scenario based on French seismic zonation (part of the present French seismic building code)

The French seismic code [NFP06-013] is based since 1991 on a zonation derived from a deterministic approach [Despeyroux et Godefroy, 1986]. For each part of the territory, a seismicity class from I to III (III is only for French west Indies) is assigned to each part of the territory. The input motion that has to be considered to design current buildings or bridges in France is represented by a normalized horizontal acceleration response spectrum (with 5% damping) as a function of period. For each seismicity class, this response spectrum, is multiplied by the "normal acceleration" A_n (m/s^2) shown in the table of Figure 5.3—1. A_n, corresponds to the maximum horizontal acceleration of rock soil (*PGA*). SISROUTE includes for each point of the territory the seismicity class and the corresponding values of A_n (*PGA*) as a function of the structure importance. This allow to build scenarios according to the seismic code to check the road element conformity level of all road section.

Seismic class		A_n (g) for "normal risk" structures		
		for "current" structures (type B)	for "public" structures (type C)	for "crisis management" structures (type D)
I	Ia	0,10	0,15	0,20
	Ib	0,15	0,20	0,25
II		0,25	0,30	0,35
III		0,35	0,40	0,45

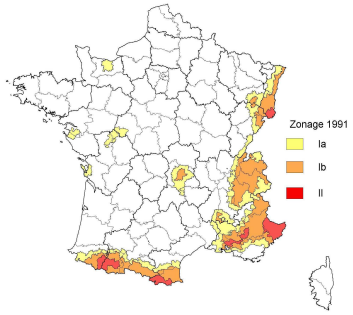


Figure 5.3—1: Hazard reference data of French seismic code [NFP06-013]: extract of the zonation map and table of A_n (g) as a function of seismicity class for the three different classes of normal risk structures.

Scenario based on probabilistic zonation

French seismic rules upgrade towards European seismic Code (EC8) is in progress. A new national zonation will be based on probabilistic hazard assessment. Based on many tectonic, seismic and economic analyses, this zonation will provide for each point of the territory, a maximum acceleration of soil (*PGA*) for different return periods of earthquake: 100, 475 or 975 years. For instance for a return period of 475 yr, the probability to exceed the *PGA* is estimated to 10% over 50 yr. As no probabilistic zonation has been yet officially approved, SISROUTE includes data issued from one of the survey ordered by French authorities to build the final zonation [Geoter, 2002] (Figure 5.3—2). These data will be updated as soon as an official zonation will be published. The *PGA* for each return period, gathered in SISROUTE system, allow to simulate "probabilistic" scenario.

© 2008 Tous droits réservés.

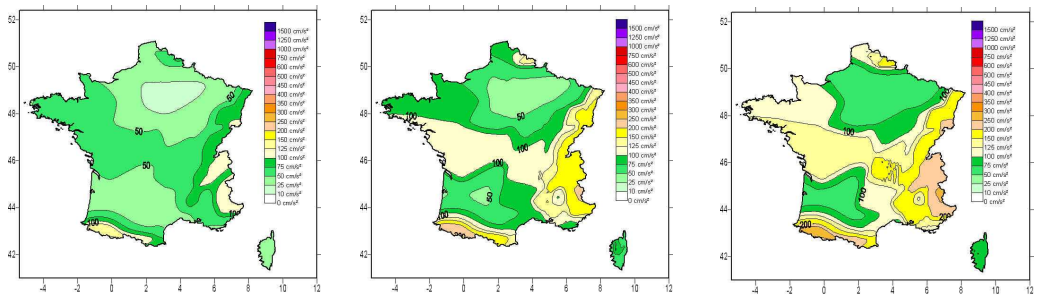


Figure 5.3—2: Example of France probabilistic zonation (extract), PGA *for earthquake return period 100 , 475 et 975 years [Geoter, 2002].*

2.3 Scenario based on any particular earthquake

Beside the two previous scenario types, SISROUTE is designed to be able to roughly and quickly assess the effect of any earthquake. Parameters that characterize this seismic event are only its location and magnitude, following the principle of simplicity of the whole system. *PGA* values are propagated all over the investigated area thanks to empiric laws, such as the one developed by [Ambraseys, 1996] and described on chapter 4-1. Only few of the possible earthquake simulations are of interest as regards to seismic risk mitigation. The final users of SISROUTE are often not familiar with seismic risk. A guide is in construction to give some technical recommendations to define reference earthquake for an area of interest. Of course, other considerations (such as social or political) have also to be taken into account. Following this approach; the selected earthquake is the historical one that is supposed to have generate the largest vibrations ever felt along the road. A seismicity file (SISFRANCE by BRGM and EDF France) gathering all earthquakes felt in France since year 550 has to be used.

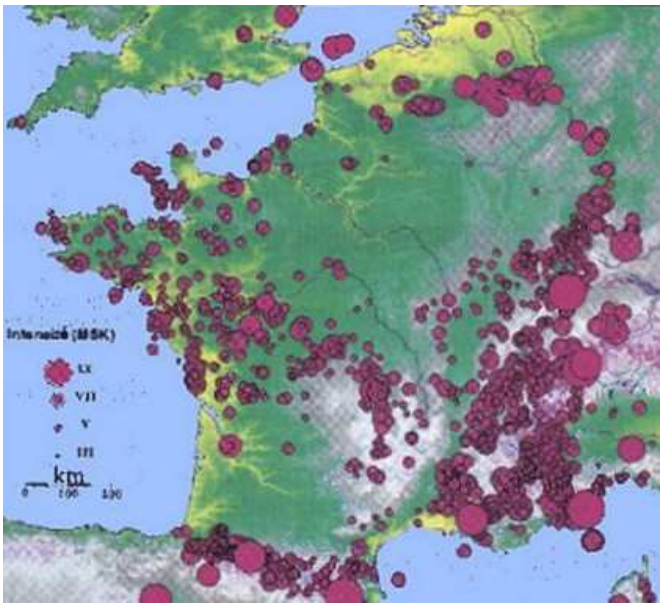


Figure 5.3—3: Past earthquake in France (source: Bureau Central Sismologique Français).

5.3.3 Global concept of Sisroute

Road failure risk assessment

SISROUTE development requires a concept gathering practical application simplicity, low price surveys but also assessment of several phenomena and survey scale varying according to the stake of the road section. The following description of the concept will be partly reviewed in latter stage. But the global concept which consist "*to see everything through PGA* " is now fixed.

© 2008 Tous droits réservés.

At the present stage of SISROUTE development, the road is considered as the addition of tree element types: bridge, road with retaining walls and other part of the road. Of course the complex situations that exist in mountain roads of the Alps and Pyrenees for instance will have to be simplified to fit in this frame.

Moreover, several parameters resulting from ground shaking are assessed on each element: vibration in it selves (including amplification due to lithologic site effect), liquefaction; landslide and rock fall. Many other phenomena induced by earthquake are not yet taken into account like tsunamis, roof collapsing, scouring of slope … They are less likely in France and/or even less known than the others phenomena.

SISROUTE architecture is built on the evaluation of the consequence of the seismic vibration (represented by the *PGA*) on the road elements. Simple behaviour laws, resulting from many earthquake observations, are requested to assess hazard phenomena occurrence as a function of this *PGA*.

At this very simple scale of survey, it was not possible to characterise precisely enough geotechnical conditions and relief to determine phenomena occurrence probability. Therefore, a simple classification of field conditions is used to assign for each road element: a coefficient of soil amplification (*coeff*) and the minimum value of *PGA* that can trigger induced phenomena. These limit values can be regarded as threshold (noted *T*).

In the specific site conditions of each element, when *PGA* reaches the threshold value, some case histories show that the concerned induced phenomenon can occur. On the contrary, under this limit and for these site conditions, no report was found of such phenomenon.

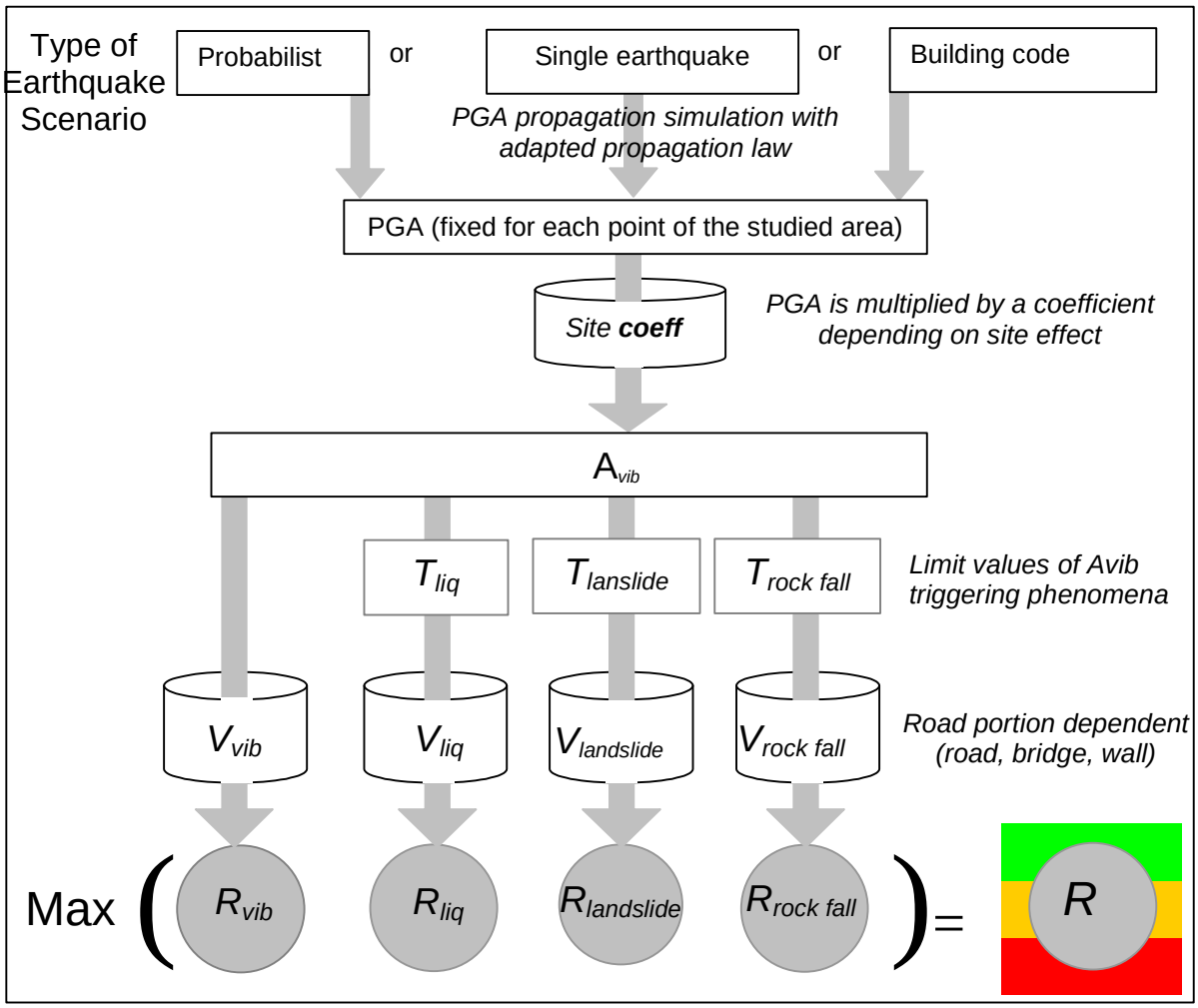


Figure 5.3—4: Global concept of SISROUTE.

© 2008 Tous droits réservés.

Taking into account this concept , applying SISROUTE to a new road implies :

1) System preparing for a new road:

- Localisation of the different road elements (bridges, walls, other sections)
- Preliminary geotechnical study to define homogeneous zones. Site condition characterisation allows to assign:
  - a seismic signal amplification coefficient depending on soil conditions (*Coeff*=1 if no site effect is expected, *coeff*>1 if amplifications are expected)
  - Limit or threshold value of *PGA* for liquefaction (T_{liq})
  - Limit or threshold value of *PGA* for landslide ($T_{landslide}$),
  - Limit or threshold value of *PGA* for rock fall ($T_{rock\ fall}$),
  - A method to evaluate these values is proposed in chapter 4
- Road element vulnerability assessment for all implied phenomena. For each element will be quantified:
  - Vulnerability to the vibration in itselves (V_{vib})
  - Vulnerability to liquefaction (V_{liq})
  - Vulnerability to landslide ($V_{landslide}$)
  - Vulnerability to rock fall ($V_{rock\ fall}$)

2) System activation to produce scenario map (illustrated in Figure 5.3—4**)**

- A type of scenario and eventually an earthquake are first selected following the procedure previously defined: a *PGA* value is assigned for each element of the road.
- *PGA* value is multiplied by a factor depending on site effect (*coeff*) which defers from the one prescribed by the French regulation code: resulting value is A_{vib}.
- For each hazard phenomenon, A_{vib} is compared to the threshold value *Ti*.
- For each road element, 4 road failure risk values are computed has function of: soil vibration level (A_{vib}), hazard phenomena thresholds (T) and the relative element vulnerability value (V).

  $R_{vib} = f(A_{vib}; V_{vib})$ $\quad$ $R_{liq} = f(A_{vib}; T_{liq}; V_{liq})$

  $R_{landslide} = f(A_{vib}; T_{landslide}; V_{landslide})$ $\quad$ $R_{rock\ fall} = f(A_{vib}; T_{rock\ fall}; V_{rock\ fall})$
- For each phenomenon and each element type, f is designed so that resulting R_i values have the same meaning:
  - $R_i = 0$ road failure risk due to this phenomenon is null
  - $R_i = 0.5$ road failure risk due to this phenomenon is medium
  - $R_i = 1$ road failure risk due to this phenomenon is very high
- For each road element, the maximum value of R_i will be illustrated on the resulting map (example in Figure 5.3—11). The color scale is fixed : green when $R_i < 0.4$, orange when $0.4 < R_i < 0.6$ and red for $R_i > 0.6$. A symbol indicates which phenomenon provokes this risk value.

Geographic Information System (GIS) organisation

In parallel with the elaboration of the global concept, a GIS was elaborated. This GIS has to be carefully organised since its elements (basic data, layer format, link between layers) will be the standard for future uses of SISROUTE. When SISROUTE will be applied to a new road, the GIS will be adapted to produce local map of road failure risk. The GIS software selected is Mapinfo© because most of the final users of SISROUTE own to the same ministry that imposes it as a standard. Following are described the 4 major tables of the standard GIS.

.

figure A : base map

The main skate of the resulting map is the road in it selves. But to better understand hazard influence, it seams also pertinent to illustrate at least the vibration level on the area surrounding the road. To achieve this goal, a grid is performed on the selected rectangular area. In each grid mesh, the *PGA* resulting from the selected scenario and site effect are evaluated according to methods described in chapters 4-1 and 4-2.

figures B, C and D: road elements

In the GIS, the road is formed by 3 tables: table B is concerned with bridges, table C the retaining walls and table D the others section of the road. The format of these 3 tables is the same. Each line is for one road elemen and columns contain the following information:

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Constant values from element listing	1. Element nature (bridge, retaining wall, other road section) 2. Element name if any (specially for bridge) 3. Element location: distance from km 0 of the road for the element start and end	
Constant values issued from preliminary survey	4. *Coeff* 5. T_{liq} 6. $T_{landslide}$ 7. $T_{rock\ fall}$	
	8. *PGA*	(this value is updated during each new scenario activation)
	9. A_{vib} = *PGA* x *Coeff*	(this value is updated during each new scenario activation)
Constant values from: SISMOA (bridge) SISMUR (walls) SISROUTE (other)	10. V_{vib} 11. V_{liq} 12. $V_{landslide}$ 13. $V_{rock\ fall}$	
	14. R_{vib}	(this value is updated during each new scenario activation)
	15. R_{liq}	(this value is updated during each new scenario activation)
	16. $R_{landslide}$	(this value is updated during each new scenario activation)
	17. $R_{rock\ fall}$	(this value is updated during each new scenario activation)
	18. R_{max}	(this value is updated during each new scenario activation)

Values from n°1 to n°7 and n°10 to n°13 are assigne d during the system preparing phase for each new road. When the system is activated for a new scenario, a new *PGA* (value n°8) is assigned for each element. The maximum length of each element is supposed not to be larger than 50 meters to insure that soil vibration does not vary too much inside the element. Longer elements are then divided into 50 m long elements.

PGA is combined with constant values (*coeff*, T_i , V_i, i is for induced phenomena) to finally produce A_{vib} (value n°9), R_i (values 14 to 17) and then R_{max} (value n°18) as follow:

$$A_{vib} = PGA \times Coeff \quad (1)$$

$$R_i = f(A_{vib}; T_i; V_i) \quad (2)$$

$$R_{max} = \max(R_{vib}; R_{liq}; R_{landslide}; R_{rock\ fall}) \quad (3)$$

figure s B, C and D allow to map all the element along the road to show the failure risk level and the implied hazard phenomenon.

5.3.4 Quantitative tools selected for hazard assessement

The base map produced by SISROUTE only aims to illustrate vibration level around the road. But along the road, as has been explained, several induced phenomena should also be considered. A preliminary survey must be conducted during the preparing phase for each new road. This survey must be standardised, economic and simple. No specific geotechnical test or geophysical campaign can be planned to assess hazard phenomena. Site characterisations are based only on the geological map (scale: 1/50000) and on a rapid field survey. Road elements are recognised during this survey. A pre-formatted field file allows to evaluate *coeff* and T_i from simple field observations. This specific file was build after phenomena hazard assessment methods were defined, sometimes thanks to existing laws as is developed in this chapter. When no method was found, some have been suggested. This chapter briefly exposes how hazard assessment is performed today in SISROUTE, that is to say which information is needed from field and how it is processed. To understand the approach difficulties, it is enough to say that the field survey should not exceed 10 days long for 100 km of very complex alpine road, when only 5 meters of this road can provoke its failure.

Peak Ground Acceleration (PGA) on bedrock

In case of probabilistic scenario or scenario based on French zonation, *PGA* on bedrock is already assigned for each point of the French territory. The basic tables furnished with SISROUTE will contain these data.

In case of a particular earthquake, the user will have to click on the epicentre location and to precise the magnitude of the event. The induced *PGA* will be computed from these information thanks to one of

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

the existing empirical attenuation laws already published and summarized in [Douglas, 2001]. All these law are issued from different *PGA* propagation observation data base. They are valuable in specific conditions depending on source distance, dimension and mechanism. Their application, even when these conditions seam fulfilled, is submitted to large and often unknown uncertainties. This must be reminded during map analyse. [Ambraseys et al, 1996] defined such law on the base of many European strong motion records (equation 4). It is claimed to be one of the most adapted to French context. It is valuable only for M>= 4 (M: magnitude); d <260 km (d is the distance to the projection of rupture plane on surface for M>6; or epicentral distance for M<6), focal depths less than 30 km.

$$PGA(g) = 10\text{^}\left(-1{,}48 + 0{,}266 * M - 0{,}922 * \mathrm{LOG}_{10}\left(\sqrt{d^2 + 3{,}5^2}\right)\right) \quad (4)$$

For each mesh of the base map grid and each element of the road, the distance (d) to the earthquake is measured. The *PGA* is then computed from this distance (d, even if it does not fit exactly the law definition) and the magnitude (M).

Coeff: PGA soil amplification factors

The aim is to take into account site effect due to soft layers above bedrock (like alluvial basin) which may increase *PGA* and damages. As already said, no special investigation can be conducted to characterise geotechnical conditions. A low grade approach is used. Soil type is assigned according to the French building code soil classification [NFP06-013]. For each category (depending on the geotechnical characteristics) an amplification factor (*coeff*) is proposed in Figure 5.3—5, in relation with existing tables proposed for other soil classification ([Borcherdt et al, 1991],[TC4, 1999]). The evaluation of these values and their uncertainties is still in progress for SISROUTE. During the rapid field inspection, the soil category underlying the road is recognized, automatically pointing a coefficient for each element.

For the base map, the geological unit crossing the road that could induce site effect are first digitalized and the most relevant coefficient of Figure 5.3—5 is assigned. This step has to be clarified for SISROUTE, even if it has no influence on the resulting damage scenario map. Both for base map (table A) and for road elements (table B , C and D) the estimated *PGA* will be multiplied by the relative *coeff* to produce A_{vib}.

Soil type		Proposed *Coeff*	N SPT	Relative density (%)	Modulus (Mpa)	Vs (m/s)
Bedrock	Hard bedrock and hard chalk	1			>100	>800
Soil with good to very good geotechnical characteristics	Compact granular soil	1,2	>30	>60	>20	>400
	Soil with good coherence (clay or hard marl)				>25	
Soil with medium geotechnical characteristics	Weathered or fractured rock	1,5			50 to 100	300 à 800
	Granular soil with medium compaction		10 à 30	40 à 60	6 to 20	150 à 400
	Soil with good coherence and medium consistency + soft chalk				5 to 25	
Soil with weak geotechnical characteristics	Loose granular soil	2,5	<10	<40	<6	<150
	Soft coherent soil (soft clay or mud) and altered chalk		<2		<5	

Figure 5.3—5: Proposed coeff each category of soil - classification extract form [NFP06-013]

PGA threshold for induced phenomena: Ti

As for *coeff* determination, *PGA* threshold for induced phenomena (T_i) can only be inferred from geological map (scale 1/50000) or field survey. When the scenario is activated, if A_{vib} is greater than the assigned T_i, the phenomenon is likely to appear on the road object. When the phenomenon can clearly not appear (for instance concerning $T_{rock\ fall}$, if there is no rock around the road), the corresponding T_i value is fixed to a very high value that will never be reached by A_{vib} (10g).

© 2008 Tous droits réservés.

PGA threshold for liquefaction T_{liq}

Liquefaction is a rapid phenomenon that can occur when some specific superficial sand layers lose their shear strength and act as liquid due to the seismic action. SISROUTE approach to assign *PGA* threshold for liquefaction is based on a famous study of susceptibility to liquefaction as a function of age and nature of the sediment deposits [Youd and Perkins, 1978].

Figure 5.3—6 shows for each of the susceptibility category, a *PGA* Threshold corresponding to zero probability of liquefaction. These threshold values are based on [Hazus99TM].

	Proposed T_{liq} by Age of deposit			
Type of deposit	< 500 ya Modern	< 11 Ka Holocene	11 Ka –2 Ma Plesitocene	>2 Ma Pre-pleistocene
Continental deposits				
River channel	0.09	0.12	0.21	0.26
Flood plain	0,12	0,15	0,21	0,26
Alluvial fan and plain	0,15	0,21	0,21	0,26
Marine terrace and plain	-	0,21	0,26	0,26
Delta and fan delta	0,12	0,15	0,21	0,26
Lacustrine	0,12	0,15	0,21	0,26
Colluvium	0,12	0,15	0,21	0,26
Talus	0,21	0,21	0,26	0,26
Dune	0,12	0,15	0,21	0,26
Loess	0,12	0,12	0,12	-
Glacial fill	0,21	0,21	0,26	0,26
Tuff	0,21	0,21	0,26	0,26
Residual soils	0,21	0,21	0,26	0,26
Costal areas				
Delta	0,09	0,12	0,21	0,26
Estuarine	0,12	0,15	0,21	0,26
Beach: High wave enrergy	0,15	0,21	0,26	0,26
Beach: Low wave enrergy	0,12	0,15	0,21	0,26
Lagoon	0,12	0,15	0,21	0,26
Fore shore	0,12	0,15	0,21	0,26
Artificial embakement				
Uncompacted fill	0,09	-	-	-
Compacted fill	0,21	-	-	-

Figure 5.3—6: Proposed $\mathbf{T_{liq}}$ *(g), PGA threshold for liquefaction (g) as a function of age and nature of the sediment deposits. Based on [Youd and Perkins, 1978] and [Hazus99].*

PGA threshold for landslide: $T_{landslide}$

In the Alps, landslides can be one of the major cause of earthquake damages. The method proposed by [Keefer, 1984] and [Wilson and Keefer, 1985] is used to estimate the *PGA* threshold for this hazard ($T_{landslide}$). From the analyse of many earthquake effect, they build a table (Figure 5.3—7) that provides the minimum PGA triggering landslide as a function of the geologic nature, the slope angle and water saturation (Wet: ground-level at ground surface, Dry: groundwater below level of sliding). During the field survey, in case of slope along the road, the field file has to indicate these three characteristics that will lead to $T_{landslide}$ thanks to Figure 5.3—7.

© 2008 Tous droits réservés.

		Slope Angle (degrees)					
		0°-10°	10°-15°	15°-20°	20°-30°	30°-40°	>40°
Strongly cemented rocks (crystalline rocks and well-cemented sandstone, calcareous)	Wet		0,4	0,25	0,2à	0,15	0,15
	Dry			0,6	0,5	0,35	0,25
Weakly cemented rocks and soils (sandy soils and poorly cemented sandstone, rock slide)	Wet	0,30	0,15	0,10	0,10	0,10	0,05
	Dry		0,40	0,35	0,30	0,25	0,20
Argillaceous rocks (shales, clayey soil, existing landslides, slump, poorly compacted fills)	Wet	0,20	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05
	Dry	0,30	0,25	0,20	0,10	0,10	0,10

Figure 5.3—7: Proposed $\mathbf{T_{landslide}}$ *(g), PGA threshold for landslide depending on geology, slope angle and groundwater level. Extract from [Wilson et Keefer, 1985].*

PGA threshold for rock falls : $T_{rock\ fall}$

Rock fall are linked to numerous parameters like lithology, slope, fractures. Estimating their potentiality during an earthquake implies to assess it before in static domain. But this often needs precise surveys, mainly based on an expert appreciation. Taking into account ground motion is an additional difficulty. For SISROUTE, during the field survey, areas that seam able to generate rock fall on the road will be located. The volume of rock that may fall is estimated. First propositions of *PGA* threshold depending on this rock volume is presented in Figure 5.3—8.

Active falls (unit volume<1dm^3)	0.3g
Rock falls, crumbling in mass (unit volume >1dm^3 or total volume > 100 m^3)	0.4g

Figure 5.3—8: PGA *threshlod for rock fall,* $T_{rock\ fall}$ *(g), depending on rock volume*

5.3.5 Vulnerability and damage assessment for simple road element

For bridges and retaining walls, vulnerability and risk formula are developed in two other papers with dedicated tools respectively called SISMOA [Davi D. et al, 2006] and SISMUR [Thibault C. et al, 2006]. The following formula (evaluation still in progress) are only concern with simple road section.

Vulnerability V_i

Vulnerability values are set as follow:
- Vulnerability to vibration (V_{vib}) = 0 ;
- Vulnerability to liquefaction (V_{liq}) = 1 ;
- Vulnerability to landslide ($V_{landslide}$) = 1 ;
- Vulnerability to rock fall ($V_{rock\ fall}$) = 1.

For the two last phenomena, if the road section is protected, the corresponding *V* value can decrease.

Risk values R_i

The risk purely due to vibration is considered as null (R_{vib} = 0).

For induced phenomena, Figure 5.3—9 sums up critical values of R_i as function of A_{vib} and road failure significance.

R_i	Induced phenomenon occurence	Road failure risk	A_{vib}	A_{vib}/T_i
R_i = 0	The phenomenon can not appear	road failure risk due to this phenomenon is null	A_{vib} is much lesser than T_i	$(A_{vib}/T_i) \leq 0,5$
R_i =0.5	The phenomenon can appear	road failure risk due to this phenomenon is medium	A_{vib} is equivalent to T_i	(A_{vib}/T_i) =1
R_i = 1	The phenomenon is very likely to appear	road failure risk to this phenomenon is very high	A_{vib} is greater than T_i	(A_{vib}/T_i) =2

Figure 5.3—9: Critical values of Ri for simple road section and induced phenomena

© 2008 Tous droits réservés.

Based on such considerations, several propositions to define *f* (Remind: $R_i = f(A_i; T_i ; V_i)$) are presently evaluated to better fit risk representation in SISROUTE. One of these propositions corresponds to equation (5) and relative Figure 5.3—10.

$$R_i = V_i((0.703\ln(\frac{A_{vib}}{T_i})) + 0.5057) \qquad R_i \in [0;1] \qquad (5)$$

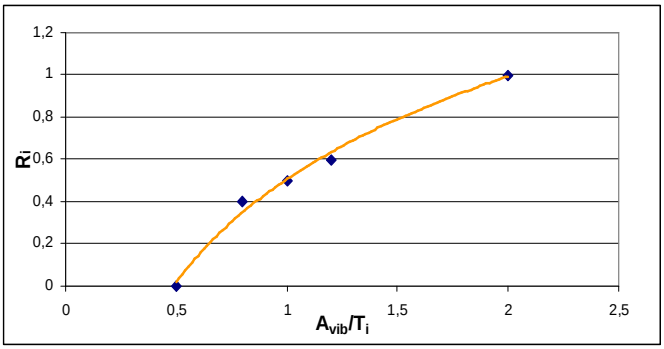


Figure 5.3—10: R_i *values as a function of* (A_{vib}/T_i) *for I= liquefaction, landslide and rock fall.*

5.3.6 First test of sisroute in the Alps

The first test of SISROUTE were conducted for a road located north of Nice in the French Alps. Figure 5.3—11 illustrates some of the information that can result from an earthquake scenario. During the preparing phase of SISROUTE for this road, a field survey allowed to set the characteristics of the road elements and relative hazard parameters. The standard field file was used. For each homogeneous section of the road (bridge, retaining wall or other road section) the operator qualified:

- ✓ Soils type (providing *coeff* according to Figure 5.3—5)
- ✓ Age and nature of saturated sand layer if any (providing T_{liq} according to
- ✓ Figure 5.3—6),
- ✓ Lithology and slope angle for potential landslide in case of earthquake (providing $T_{landslide}$ according to Figure 5.3—7)
- ✓ Potential rock fall in case of earthquake (providing $T_{rock\ fall}$ according to Figure 5.3—8)

Vulnerability values V_i for bridge and retaining walls were set by specialist.

The earthquake simulated in Figure 5.3—11 corresponds to the major local historical earthquake. The scenario shows the importance of site effect that induce irregularities in *PGA* mapping. Resulting risk values point out possible road failure.

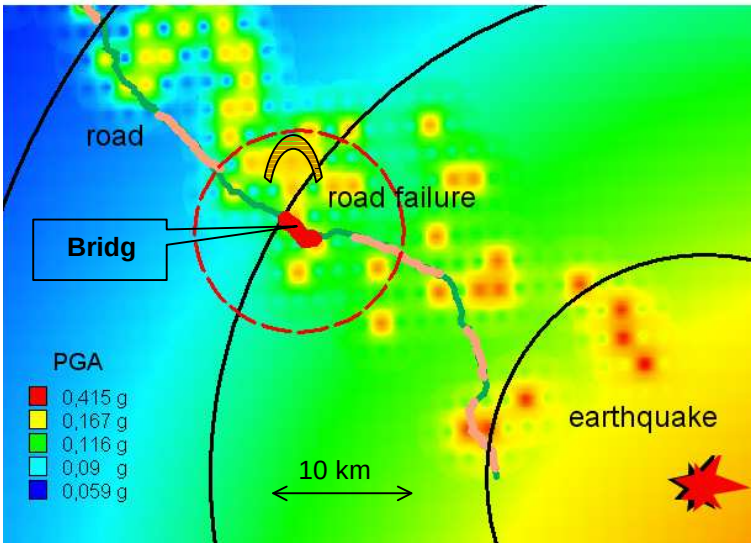


Figure 5.3—11: SISROUTE scenario illustration.

© 2008 Tous droits réservés.

5.3.7 Comments as temporary conclusion

SISROUTE building phase is still in progress. Its global concept development required approbation of hazard and vulnerability specialists. As matters stand, these teams work together on this common base, which already is a good point. As a result, the method to assess vulnerability of the different road elements fit in this concept. As concern with hazard assessment, amplification values (*coeff*) and *PGA* thresholds for induced phenomena (T_i) surely need more investigations before being definitely set in SISROUTE. A first version of the expected tools of SISROUTE have already been produced: files and procedures for field survey, standard Geographical Information System, basic common data, first guideline. Major part of the future efforts for SISROUTE will be dedicated to better evaluate uncertainties on damage risk assessment. It is indeed of crucial importance that the final users of scenario generation systems like SISROUTE take advantage of it but also pay attention to the limits of such scenario.

References:

Ambraseys, N. N., Simpson, K. A., & Bommer, J. J. (1996), Prediction of horizontal response spectra in Europe. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25(4), 371–400.

Borcherdt R., C.M. Wentworth, A. Janssen, T. Fumal and J Gibbs, (1991), Methodology for predictive GIS mapping of special study zones for strong ground shaking in the San Francisco bay region, CA, Fourth Int. Conf. on Seismic Zonation, Stanford, California.

Davi D., P. Schmitt and P. Marchand, Sismoa (2006), A simplified method to assess the seismic vulnerability of existing bridges, paper n°150, 1st ECEES, Geneva, Switzerland.

Despeyroux J. et Godefroy P. (1986), Nouveau zonage sismique de la France en vue de l'application des règles parasismiques de construction et de la mise en œuvre des plans d'exposition aux risques, La documentation Française, Paris.

Douglas, J. (2001), A comprehensive worldwide summary of strong-motion attenuation relationships for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 to 2000). Civil and Environmental Engineering Dept., Imperial College London, ESEE research report 01-1, 126 pages.

Geoter (2002), Révision du zonage sismique de la France, Etude probabiliste, rapport n°GTR/MATE/0701-150 synthèse, 39 pages.

Hazus99 (1999), Federal Emergency Management Agency, Washington DC, Earthquake loss estimation methodology, Hazus99 (SR2), Technical manual, Chapter 4, Potential Earth Hazards.

Keefer D.K. (1984), Landslides caused by earthquakes, Geol. Soc. Am. Bull., 95, pp. 406-421.

NFP06-013 (1995), Règles de construction parasismique applicables aux bâtiments, dites règles PS92, norme française, AFNOR, 217 pages.

TC4 (2003), Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering of the International Society for soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Manual for zonation on seismic geotechnical hazards, published by the Japanese Geotechnical Society, dec 2003 revised 1999.

Thibault C. and D. Criado (2006), SISMUR, Tool for evaluation of the seismic risks on the existing retaining walls, 1st ECEES, Geneva, Switzerland.

Wilson R.C. and D.K. Keefer, (1985), Predicting aerial limits of earthquake-induced landsliding, in J.I. Ziony (ed.), Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region, An Earth-Science perspective, USGS Professional paper 1360, pp. 316-345.

Youds T.L. and D. M. Perkins (1978), Mapping of liquefaction induced ground failure potential, J. GED, ASCE, Vol.104, n°4, pp. 433-446.

© 2008 Tous droits réservés.

5.4 Scénario sismique territorial: Foresight

Ce chapitre 5-4 est composé d'un article référencé : E. Bertrand, A.-M. Duval and A. Saad, "Assessment of seismic risk in the upper Tinée valley, southeastern France" , in International Symposium on Seismic Risk Reduction, Romanian Academy, Bucharest, 10 pages, 26-29 Apr. 2007.

SUMMARY:
Seismic risk scenario has already been established for major urban centre by the past, but it is of importance to assess also the seismic risk in wide areas with sparse dwelling centres and few connecting roads. The concept developed consists in linking, for each element at risk, vulnerability values together with hazard values, in order to produce for a given scenario, risk values relative to road failure or building damage. We had to overpass two antagonistic specifications of wide area scenario: the scale of survey should be large enough to be economic and simple, but a very small element can be responsible for road failure or building collapse. Hazard is expressed in terms of maximum horizontal acceleration of soil, starting point of the risk analysis. Induced phenomena (liquefaction, landslide and rock fall) occurrence are evaluated from basic soil classifications and expressed in terms of minimum PGA value that can trigger it. For each of these hazards and for each element at risk, a simple vulnerability value is evaluated. A standard geographical information system allows gathering these data in order to produce maps pointing out road failure and building damage distribution. The paper presents the important features of a comprehensive study, highlights the methodology, discusses the results and provides insights to the future developments.

5.4.1 Introduction

Earthquakes are among the most deadly and destructive of natural hazards, killing more than 2 millions people during the last century, and destroying many valuable cities. Not only great earthquakes such as the 2004 Sumatra one lead into tremendous human and economic losses but also an intermediate earthquake can cause destructive damage to a city. It is thus essential for risk reduction to focus on prevention and preparedness. For this reason, several research projects such as RADIUS (Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas Against Seismic Disasters, in the frame of the International Decade for Natural Disaster Reduction) or RISK-UE (An advanced approach to earthquake risk scenario with applications to different European towns, European project EVK4-2000-00513) have been conducted in order to provide decision-makers with methodologies for creating earthquake-risk scenarios. These scenarios have already been established for major urban centre by the past, but it is of importance to assess also the seismic risk in wide areas with sparse dwelling centres. It is also crucial to analyse the impact of the earthquake on an enclosed valley with few connecting roads.

The Tinée valley is part of the Alpes Maritimes department in southeastern France. This department is one of the metropolitan regions the most concerned by seismic risk. The seismic activity in the region is linked to the ongoing convergence between Africa and Europe that creates shortening structures in both the Alpine continental crust and the Ligurian oceanic crust (Bethoux *et al*., 1992; Augliera *et al*., 1994; Fontaine 1996; Laurent 1998). The Tinée valley separates two distinct geological fields. The metamorphic ante-triasic basement outcrops out of left bank and overlaps the triasic cover on the other riverside. Both sides present quaternary glacial and river erosive features. Recent colluviums cover locally the slopes. Ravines and valleys are filled with detrital deposits. Active tectonics in the Western Alps is revealed by a moderate level of seismic activity and geological evidences for Quaternary deformation (Thouvenot, 1996; Eva *et al.*, 1997; Maddedu *et al*., 1997; Calais *et al.*, 2000). Nevertheless, the southern part of Western Alps is seismically one of the most active part of the Alpine range. The seismicity is mostly concentrated on the northeastern side of the Argentera massif along the Pennic front (Calais *et al.*, 2000). The largest instrumental earthquakes in the region, however, occurred along the northern margin of the Ligurian basin. A number of historical earthquakes are also reported in the Alpes Maritimes, some of them associated with severe casualties, such as the 1887 Ligurian earthquake, that reached a macroseismic intensity (MSK) of X and a magnitude estimated close to 6.4 (Levret *et al*., 1994). This event affected most of the French Riviera between Nice and Menton. The occurrence of such events represents a serious threat to this densely populated and highly touristic area ans has been already considered has an earthquake scenario in seismic risk study concerning the city of Nice (RISK-UE, GEMITIS projects for instance).

Relief, weather condition and geological context support natural phenomenon development like: rock fall, landslide and liquefaction. These phenomenons take place there every year, even without any

© 2008 Tous droits réservés.

seismic triggering, due to recent tectonic movements combined to important erosion activity. For instance the Roquebillière slide which caused the death of 19 people in 1926, the 1952 Menton debris slide where 11 people died or the La Clapière landslide, now threatening the village of Saint-Etienne de Tinée. Moreover, the region experienced during prehistoric times some very large rockslides which probably occurred during earthquake (Meneroud and Durville, 1992) and a few hamlets suffered badly from seismic induced rockfalls during the 1564 earthquake that struck the Vésubie area, a valley nearby the Tinée one. The seismic risk scenario was carried out on a part of the Tinée valley, between the villages of St Etienne de Tinée and Isola. The mountainous relief is stiff and there is a very important risk of landslide such as for example the Clapière landslide, which is one of the largest near European road. Some liquefaction phenomenon could however appear in the quaternary alluvium deposit of the Tinée river under strong seismic solicitation.

5.4.2 Methodology overview

The main goal of the work presented here is to evaluate the seismic risk level, in terms of building damages and road cutting, to which the Tinée valley is subject. This evaluation needs two kinds of information: seismic hazard including induced phenomena and seismic vulnerability of elements at risk. The proposed methodology is built on the evaluation of the consequence of the seismic ground shaking (expressed by the PGA) on both building stocks and soil (Figure 5.4—1). A simple classification of field conditions is used to assign for each area element: both a soil amplification coefficient (*coeff*) due to lithological site effect and the PGA threshold values that can trigger induced phenomena. A field survey allows assessing the building vulnerability towards ground shaking. The survey helps to attribute a vulnerability index to specific building leading in a mean index in homogenous urban zones.

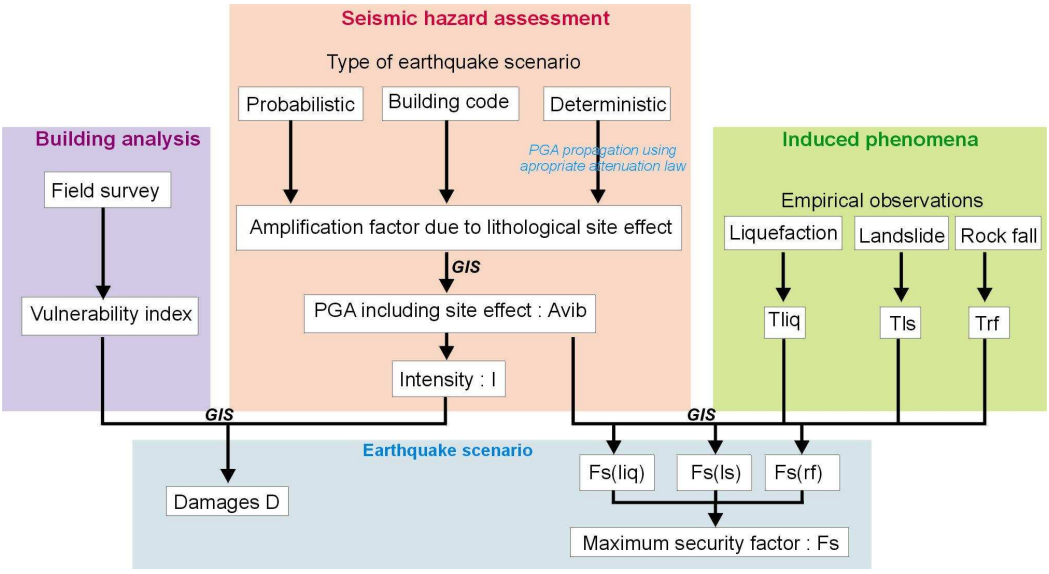


Figure 5.4—1 : Global concept of the method.

The PGA are computed from the selected earthquake scenario over the studied area thanks to one of the existing empirical attenuation laws already published and summarized in (Douglas, 2001). *PGA* values are then multiplied by the factor depending on site effect to result in the maximum ground shaking values (A_{vib}). For each hazard phenomenon, a security factor is computed by the comparison of A_{vib} with the threshold value *Ti* to express the phenomenon occurrence probability. Finally, a mean damage grade is computed by crossing the vulnerability index and a EMS98-intensity value derived from A_{vib}.

A low-grade approach is used to infer the site effect amplification. Soil type is assigned according to the French building code soil classification [NFP06-013]. For each soil category an amplification factor (*coeff*) is proposed in Figure 5.4—2, in relation with existing tables proposed for other soil classification (TC4, 1999 and EC8).

The approach used to assign *PGA* threshold for liquefaction is based on a famous study of susceptibility to liquefaction as a function of age and nature of the sediment deposits (Youd and Perkins, 1978). The

© 2008 Tous droits réservés.

Figure 5.3—6 (page 151) shows for each of the susceptibility category, a PGA threshold corresponding to zero probability of liquefaction. These threshold values are based on [Hazus99TM]. The method proposed by (Keefer, 1984) and (Wilson and Keefer, 1985) is used to estimate the PGA threshold for landslide (T_{ls}). From the analyse of many earthquake effect, they build a table (Figure 5.3—7 page 152) that provides the minimum PGA triggering landslide as a function of the geologic nature, the slope angle and water saturation. Rock falls are linked to numerous parameters like lithology, slope, fractures. A field survey allows to locate the areas that seem able to generate rock fall. The volume of rock that may fall is also estimated. A first proposition of PGA threshold depending on this rock volume is presented in Figure 5.3—8 (page152). For each induced phenomena we define a security factor that tells us if the hazard is likely to be triggered or not during the earthquake. This factor is obtained by the comparison of the PGA (including site effect) with the specific threshold value corresponding to the given phenomena and the site conditions. The factor is arbitrarily ranged between 0 and 1 and is defined in Figure 5.4—3.

The method we apply in the present study for the building vulnerability assessment is based on a statistical correlation between the macroseismic intensity and the apparent (observed) damage from past earthquakes. It is derived starting from the European Macroseismic Scale (EMS-98) – the modern macroseismic scale that implicitly includes a vulnerability model, although defined in an incomplete and qualitative way. This vulnerability model has been improved in several studies (GNDT, Risk-UE, VULNERALP ...).

We are using here the vulnerability evaluation criteria partly developed in the frame of the VULNERALP project and already used for Nice city in GEMGEP project. This approach, derived from the one developed by the GNDT group in Italy, is adapted to the French building stock. A standardized survey and inventory form for data collection and rapid vulnerability assessment is used. The building's vulnerability is assessed in terms of its typology and of aggravating factors (height, irregularities in shape, position with respect to other buildings etc.), and is assigned in a vulnerability index V_i. This index generally ranges between 0 (not vulnerable, which is impossible) and 100 (exceedingly vulnerable).

The vulnerability index makes it possible to define a vulnerability (or fragility) curve for the building. This curve links the seismic event, expressed in terms of macroseismic intensity, with a mean damage index, *d*, which enables the probabilities corresponding to different levels of damage to be defined. This distribution is obtained by means of a probability law having parameters scaled on the basis of actual observations of damage during various earthquakes, essentially Italian and Greek. From the vulnerability index obtain by the field survey, it is possible to compute the associated mean damage rate (*d*) for a given EMS98-intensity by the formula of Giovinazzi and Lagomarsino (2003). This equation gives us the fragility function associated to each vulnerability index. The mean damage rate is correlated with the damage grade defined in the EMS-98 (Figure 5.4—4) but allows also to compute the building distribution into the 5 EMS-98 damage grade by a binomial formula (Giovinazzi and Lagomarsino, 2003).

Soil type		*Coeff*	N SPT	Relative density (%)	Modulus (Mpa)	Vs (m/s)
Bedrock	Hard bedrock and hard chalk	1			>100	>800
Soil with good to very good geotechnical characteristics	Compact granular soil	1.35	>30	>60	>20	>400
	Soil with good coherence (clay or hard marl)				>25	
Soil with medium geotechnical characteristics	Weathered or fractured rock	1.35			50 to 100	300 to 800
	Granular soil with medium compaction	1.5	10 to 30	40 to 60	6 to 20	150 to 400
	Soil with good coherence and medium consistency + soft chalk				5 to 25	
Soil with weak geotechnical characteristics	Loose granular soil	1.8	<10	<40	<6	<150
	Soft coherent soil (soft clay or mud) and altered chalk		<2		<5	

Figure 5.4—2: Proposed amplification factors for each defined soil category.

© 2008 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

Fsi (security factor)	A_{vib}/T_i	Induced phenomenon occurrence
0	Below 0.5	The phenomenon can not appear
Between 0 and 0.4	Between 0.5 and 0.8	The phenomenon is not very probable
Between 0.4 and 0.6	Between 0.8 and 1.2	The phenomenon is probable
Between 0.6 and 1	Over 1.2	The phenomenon certainly appear

Figure 5.4—3: Security factor for induced phenomenon.

Damage grade	**Damage grade label**	**Description**	**Mean damage rate, *d***
D0	None	No damage	0
D1	Slight	Negligible to slight damage	Inf. 0.20
D2	Moderate	Slight structural, moderate nonstructural	0.21 to 0.40
D3	Substantial to heavy	Moderate structural, heavy nonstructural	0.41 to 0.60
D4	Very heavy	Heavy structural, very heavy nonstructural	0.61 to 0.80
D5	Destruction	Very heavy structural, total or near total collapse	0.81 to 1.00

Figure 5.4—4: EMS-98 damage grading and corresponding damage rate range.

5.4.3 Results

Hazard assessment

The deterministic seismic hazard assessment consists in defining a reference earthquake called scenario earthquake. Following this approach, the selected event is the historical one that is supposed to have generated the largest vibrations in the studied area. Here, the historical earthquake selected is located 35 km far from the zone. It is located by SISFRANCE in Roquebilière (year 1564, Epicentral intensity: VIII, deduced magnitude: 5.9) (Figure 5.4—5). Peak Ground Acceleration is estimated around 0.04g in Saint Etienne de Tinée and 0.06g in Isola . The Figure 5.4—6 presents the modification of the acceleration estimated on bedrock by lithological site effects. As the soil in the valley is mainly composed of recent quaternary alluvial deposits, the largest PGA are distributed along this valley and thus the road between St Etienne de Tinée and Isola.

Using geological data we define homogenous zones where induced phenomena could occur. Three threshold values corresponding to the three types of induced hazard are attributed at each zone. Several landslides have been detected on the slopes that border the Tinée valley. The analysis of the associated slope angle, geology and hydrological conditions allow evaluating the landslide threshold between 0.25 and 0.5 g. Active rock falls have been also pointed out near the villages of Saint Etienne and Isola.

The associated triggering threshold values are respectively 0.3 g and 0.4 g. Lastly, liquefaction could occur in the Tinée alluvium if the acceleration reaches 0.09g and in the main alluvial fan of the valley if the ground shaking comes to 0.15g. The first value, derived from table 2, seems nevertheless to be slightly underestimated because alluvium of the river are rather composed of coarse gravel and there are only a few small and isolated sand lens. Regarding the PGA values derived in the chosen scenario, liquefaction presents a non-null security factor between Saint Etienne and Isola. Liquefaction is thus probable along several road sections of the valley but any slope movement will obviously cut the road between Isola and Saint Etienne.

© 2008 Tous droits réservés.
http://www.univ-lille1.fr/bustl

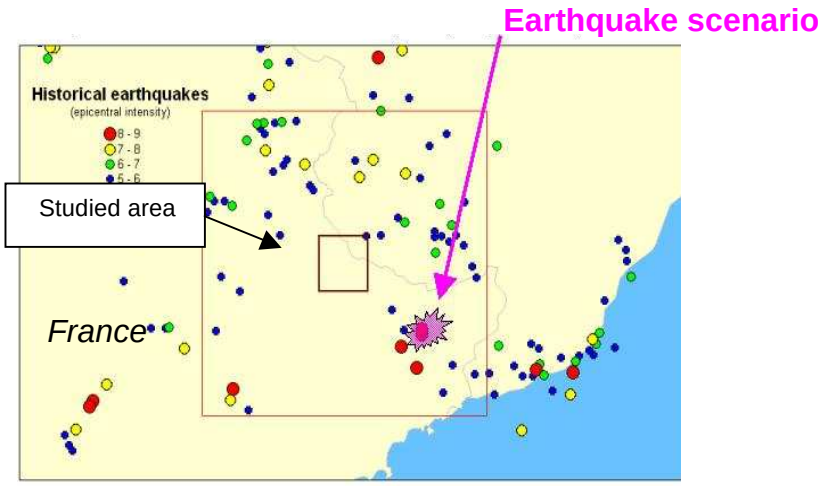


Figure 5.4—5: Illustration of a scenario earthquake: Roqueblliére 1564.

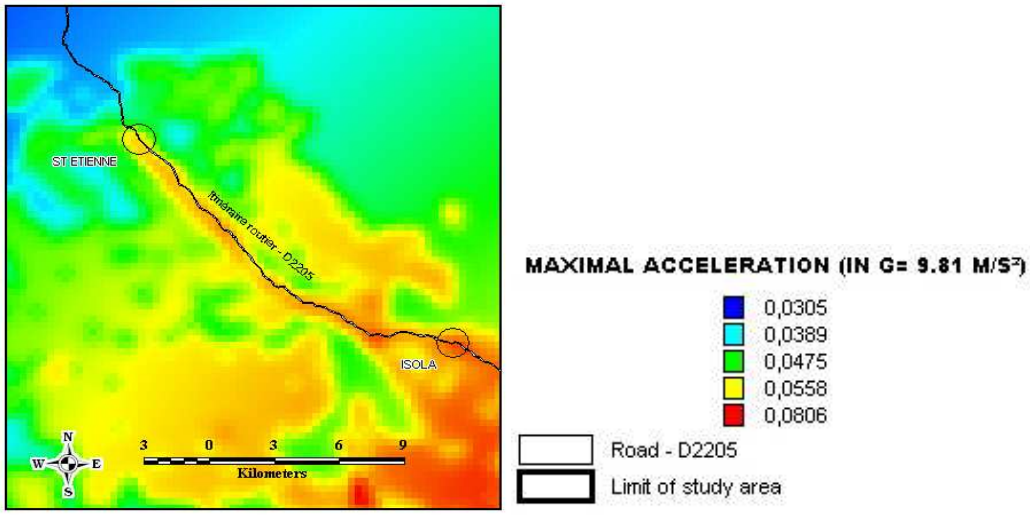


Figure 5.4—6: acceleration modified by geological site effects.

Building vulnerability estimation

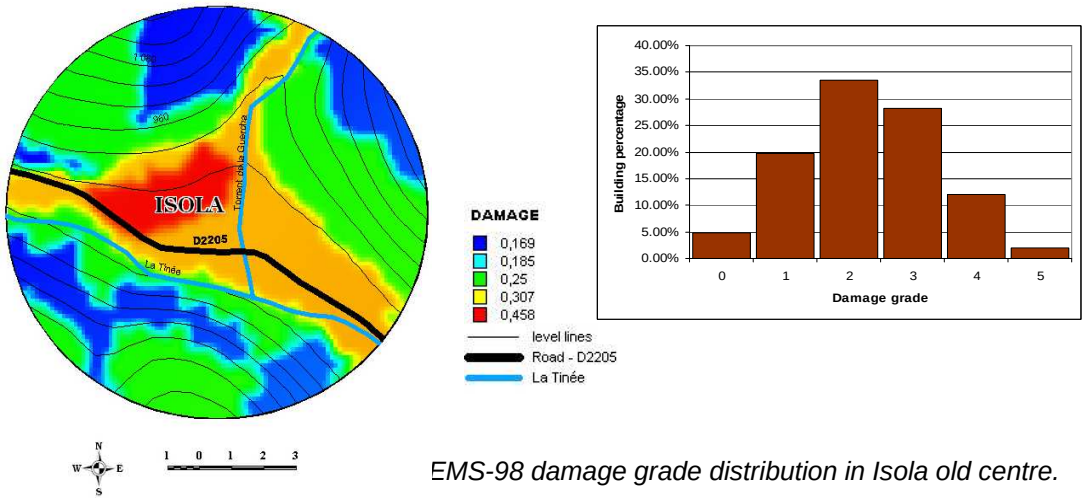
Four zones were defined for Saint-Etienne village. The first one corresponds to the medieval centre town, the second to a quarter re-built in 1928, the third border the old town and the forth is composed by the outside hamlets. In all, there are 24 buildings for which the vulnerability was assessed individually. The old centre town presents the worst vulnerability index of Saint Etienne. But index are rather almost similar from a zone to another: there are ranging between 51 and 65. As regards Isola, the village is split into two zones: the old hamlet and the surroundings composed of more recent constructions. The mean vulnerability index is equal to 67 in the oldest part of the village and 58 for the constructions that border it. There are only a few houses between Isola and Saint Etienne de Tinée villages. Construction characteristics of this dispersed habitat are similar to the ones observed in the hamlet of Saint Etienne. Thus, the vulnerability index defined for the hamlet is spread over the entire zone between the two villages

Damage evaluation

By linking the PGA to the vulnerability index we define for the homogenous zones, we are able to evaluate the mean damage rate over the upper Tinée valley. These rates are ranging between 0.076 and 0.348. Because of the lithological site effect and the distance to the epicentre (located 35 km at the south-east of the area we are interested in), the greatest mean damage rates are located in Isola and along the Tinée river. Nevertheless there are only few constructions that border the river, most of the houses being concentrated in the villages. Isola and St Etienne de Tinée are the most important residence centre in the valley, it is thus interesting to study more finely the damage that could occur at these places. We find maximal values in the centre of the village. We notice also that damage

© 2008 Tous droits réservés.

decrease by going far from this area reaching the value of 0.169. The damage grade distribution in the old part of Isola village is computed taking into account the mean damage rate of 0.458 we found in the present scenario (figure 5.4—7). A large third of the dwellings suffers from moderate damages (EMS-98 degree 2). Only a minority of buildings are either severely touched or destroyed. Like Isola, most important damage in St Etienne de Tinée are centred on an area skirting the river (Figure 5.4—8). Nevertheless, we notice that damage levels are more important in Isola than in Saint Etienne. This rise of the damage level is not only due to the vulnerability index which are more important here than in Saint Etienne, but also to the fact that Isola is closer to the epicentre, leading in PGA values greater than at the very end of the valley. The damage distribution in the medieval centre of Saint Etienne village shows that most of the buildings suffer to slight damages (degree 1 on EMS-98 scale).



figu *EMS-98 damage grade distribution in Isola old centre.*

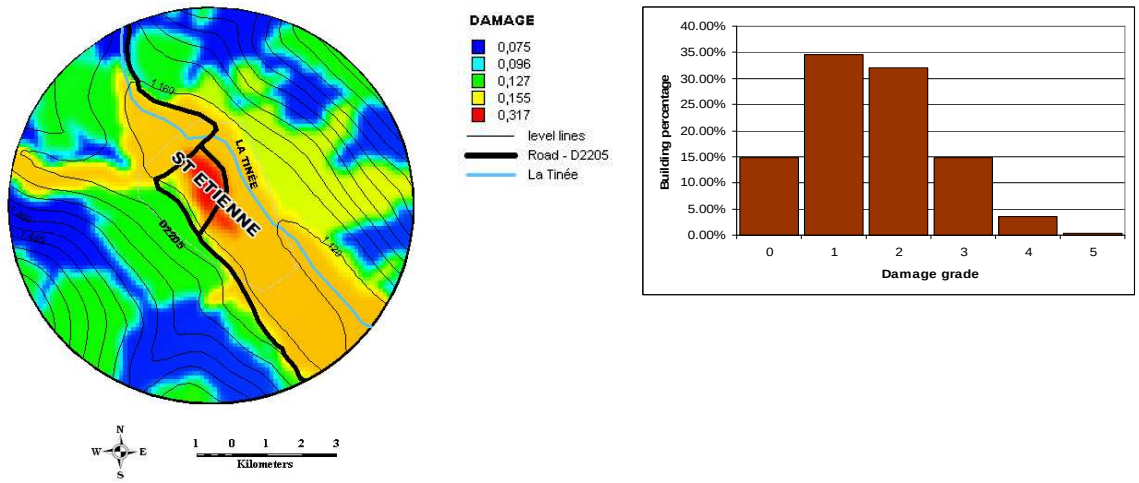


Figure 5.4—8: Mean damage rates and EMS-98 damage grade distribution in Saint-Etienne old centre.

5.4.4 Conclusion

In order to build an earthquake risk scenario we develop a modular methodology that concentrates on the distinctive features of the valley. One of the key points is that the scenario needs only basic inputs such as geology at 1/50000 scale and few field surveys. Because of this inputs, the scenario is rapidly achieved. However the methodology certainly leads in strong uncertainties but it gives at least a first overview of the possible impact of seismic events on the valley. To reduce the uncertainties due to the natural phenomenon description it is possible to focus on a better estimation of the PGA amplification

© 2008 Tous droits réservés.

factors and induced hazards threshold values. Meterorological conditions should also taken into account because rain could aid the triggering of slope movement. Nevertheless, for this first approximation, the road should not be cut by any landlsides or rock falls during a 1564-type earthquake. The proposed scenario is mainly given in terms of building damages. A further analysis could lead in the economic cost evaluation and life losses figuring. Even if the number of death would be reasonably low in the studied zone regarding the expected damage level, the potentially injured people as well as the homeless could be numerous. If the number of homeless is very large, it will call for a full-fledged re-housing or emergency shelter plan. It is accordingly important to assess, over and above physical damage and human harm, the economic and financial cost of the events for the local communities affected, but also for private individuals. This cost refers not only to direct damage (physical destruction or the cost of repairs to damaged structures) but also to the indirect effects of possible seismic episodes in economic (loss in production, employment, and commercial exchanges) and financial (public and private indebtedness) terms, as well as in regional status. These potential intermediate- to long-term impacts are not assessed in the scope of this preliminary study but should be studied in its follow-up. This is all the more crucial that the area is almost isolated and endures currently serious economic difficulties.

References:

Ambraseys, N. N., Simpson, K. A., & Bommer, J. J. (1996), Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25(4), 371–400.

Bard, P.Y. and GEMGEP Team (2005). GEMGEP final report. Le risque sismique à Nice. Apport méthodologique, Résultats et perspectives opérationnelles. METATM, MEDD, CANCA.

Calais E., Galisson L., Stéphan J.-F., Delteil J., Deverchère J., Larroque C., Mercier de Lépinay B., Popoff M. and M. Sosson (2000). Crustal strain in the Southern Alps, France, 1948-1998. *Tectonophysics*, 319, 1-17.

Douglas, J. (2001), A comprehensive worldwide summary of strong-motion attenuation relationships for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 to 2000). Civil and Environmental Engineering Dept., Imperial College London, *ESEE research report* 01-1, 126 pages.

European Macroseismic Scale 1998. Conseil de l'Europe. Cahiers du centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Vol. 15. G. Grünthal Editor.

Eva E., Solarino S. and C. Eva (1997). Stress tensor orientation derived from fault plane solutions in the southwestern Alps. *J. Geophys. Res*., 102, n°B4, 8171-8185.

Giovinazzi S. and S. Lagomarsino (2003), Seismik risk analysis: a method for the vulnerability analysis of built-up areas, European Safety and Reliability *Conf. ESREL*, june, Maastricht, The Netherlands.

Hazus99 (1999), Federal Emergency Management Agency, Washington DC, Earthquake loss estimation methodology, Hazus99 (SR2), Technical manual, Chapter 4, Potential Earth Hazards.

Keefer D.K. (1984), Landslides caused by earthquakes, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95, pp. 406-421.

Maddedu B., Béthoux N. and J.-F. Stéphan (1997).Champ de contrainte post-pliocène et déforamtions récentes dans les Alpes sud-occidentales. *Bull. Géol. Fr*. 167, 797-810.

Mouroux P., Bour M., Bertrand E., B. Le Brun and the RISK-UE Team (2004). From geology and seismology to earthquake-risk scenarios: the RISK-UE project. *Proccedings of the 13th world conference on earthquake engineering*, Vancouver B.C., Canada.

RADIUS : Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas against Seismic Disasters. Final Reports, United Nations Initiative towards Earthquake Safe Cities, 1999, 37 pp.

TC4 (2003), Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering of the International Society for soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Manual for zonation on seismic geotechnical hazards, published by the Japanese Geotechnical Society, dec 2003 revised 1999.

Thouvenot, F. (1996), Aspects géophysiques et structuraux des Alpes occidentals et de 3 autres orogènes (Atlas, Pyrénées, Oural). *PhD Thesis, Univ. Joseph Fourier*, Grenoble, France.

Wilson R.C. and D.K. Keefer (1985), Predicting aerial limits of earthquake-induced landsliding, in J.I. Ziony (ed.), Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region, An Earth-Science perspective, *USGS Professional paper* 1360, pp. 316-345.

Youds T.L. and D. M. Perkins (1978), Mapping of liquefaction induced ground failure potential, *J. GED, ASCE*, Vol.104, n°4, pp. 433-446.

5.5 Conclusion sur les scénarios

Jusqu'à très récemment, les sismologues et mécaniciens des sols travaillaient sur l'aléa sismique d'un côté, les ingénieurs sur la dynamique des structures de l'autre. La connexion entre ces deux univers, déjà réalisée dans de nombreux pays sismiques, est en train de s'établir en France où les approches et les codes de chaque métier sont peut être plus différenciés qu'ailleurs. Les travaux évoqués dans ce chapitre illustrent cette volonté de rapprochement tout en pointant les difficultés techniques à surmonter par les différentes communautés. En effet, la conception de scénario de risque

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

sismique implique un dialogue entre experts qui doivent s'accorder sur les objectifs et la contribution de chacun. Si le "fil rouge" généralement choisi est le niveau de vibration du sol, son impact au niveau du sol et des structures implique une vision transversale qui recoupe les différents domaines techniques.

Dans les scénarios sommaires présentés ici la combinaison entre le PGA et l'indice de vulnérabilité des bâtiments détermine le niveau de dommage d'une part. Le même paramètre (PGA) est comparé d'autre part à des valeurs seuils susceptibles de déclencher des phénomènes induits. Si ce paramètre a été choisi, c'est qu'il est le plus accessible aujourd'hui en sismologie et en calcul de structure. Mais il est sans doute possible de baser un scénario sismique sur d'autres paramètres que le PGA, pour réduire la variabilité des résultats (comme la phase d'Airy par exemple).

L'indice de vulnérabilité est également par nature porteur de grande approximation puisqu'il implique d'affecter à chaque bâtiment un type de comportement et une courbe de dommage. Or ces courbes de dommages délivrent un niveau de dommage selon l'intensité macrosismique (ce qui implique de traduire l'accélération en intensité …). De plus ces courbes ont été construites de manière empirique sur la base d'observation post-sismique en Italie, en Grèce et en Macédoine principalement. Si un recensement du bâti et un classement par type de comportement sismique a bien été réalisé dans ces pays, la France n'en est qu'au début du processus d'analyse de son parc immobilier et manque (heureusement) de retour d'expérience. Des efforts devront être réalisés pour disposer à terme de courbes de dommages en accélération d'une part et par régions françaises d'autre part.

La première source d'erreur ou de variabilité des résultats est donc lié aux choix des paramètres d'entrée (PGA et Indice de vulnérabilité). Une approche plus précise a déjà été testée notamment dans le projet européen RiskUE. Elle consiste à croiser la demande sismique (représentée par un spectre de réponse inélastique) avec le point de performance de la structure (calculée par la méthode push-over). Cette approche devrait permettre de calculer des courbes de dommages pour différents types de bâtiments et notamment pour ceux construits en maçonnerie à la fois répandus et au comportement sismique peu modélisé.

La seconde source d'imprécision découle de l'échelle d'étude et des moyens utilisés pour évaluer le PGA et l'indice de vulnérabilité:

- Les lois de propagation du PGA ont été établies dans des contextes sismo-tectoniques différents. De plus elles ne prennent en compte que certains paramètres du séisme. Les enregistrements réels montrent souvent des écarts de 50 % avec ces lois.
- Dans SISROUTE et FORESIGHT, ce PGA est "modulé" sur la base de données extrêmement sommaires par affectation d'un coefficient d'amplification selon l'âge géologique des terrains. De même, la caractérisation des potentiels de liquéfaction et de chute de blocs est simplifiée à l'extrême et doit être affinée.
- Enfin, l'affectation d'un indice de vulnérabilité est réalisée sur la base d'éléments très sommaires ce qui entraîne une incertitude élevée.

Les expériences auxquelles j'ai pu contribuer ces dernières années montrent bien la difficulté d'utiliser des données très sommaires pour évaluer un risque de dommage. La route semble évidemment encore longue pour affiner ces approches sommaires: Comment, avec des moyens de reconnaissance "frustres", prévoir des phénomènes qui sont encore souvent l'objet de recherches extrêmement pointues et discutées par des équipes spécialisées disposant d'importants moyens d'études ?

Les solutions envisagées ici sont économiques et exigent de simplifier souvent à l'extrême ces phénomènes dont la complexité reste largement inexplorée. Puisque les sources d'incertitudes sont nombreuses, variées et se combinent jusqu'au résultat final, la prochaine étape consistera sans doute à quantifier au mieux ces incertitudes, ce qui dissipera le malaise ressenti par les scientifiques quand à l'interprétation des produits de leur recherche.

Pour rendre plus crédibles ces scénarios, des spécialistes des différents aléas mais aussi des ingénieurs de structures devront se mobiliser. Dans ce cadre les observations post-sismiques sont primordiales de même que les simulations combinées des phénomènes avec des études paramétriques numériques.

Les projets évoqués ici illustrent donc le balbutiement de concepts transversaux et de techniques individuelles qui évolueront, espérons-le, assez vite.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

6 Bilan et perspectives

Cette synthèse de mes activités permet de porter un regard sur mon travail selon au moins trois angles de vue.

☞ Le premier angle de vue est scientifique. Il consiste à relever mes **contributions à l'amélioration de la détermination du risque sismique** sur le plan des méthodes d'une part et de la connaissance du risque sur certains territoires d'autre part.

☞ Le deuxième angle est lié à **l'animation de la recherche**: les problématiques liés au risque sismique sont complexes et font appel à des compétences très variées. Pour avancer dans ces domaines, il faut mettre en place des projets avec d'autres scientifiques disposant de compétences complémentaires.

☞ Enfin l'équipe que je dirige depuis 2001 occupe une place tout à fait spéciale dans le dispositif de recherche français. Cette place favorise la **valorisation des résultats de la recherche** par la diffusion à travers le réseau scientifique et technique de l'équipement et la confrontation directe avec les problématiques des maîtres d'œuvre publics ou privés.

Les paragraphes qui suivent évoquent le bilan et les perspectives de mon travail selon ces trois angles de vue.

6.1 Vers une meilleure appréciation du risque

La sismologie est une science relativement jeune si l'on se rappelle que les partisans de la tectonique des plaques n'ont eu gain de cause que dans la seconde moitié du vingtième siècle !. Pourtant il semblerait que plusieurs observateurs aient eu "l'intuition" de l'existence et de l'importance des effets de site, comme Montessus de Ballore à la fin du XIXième siècle. D'important travaux largement conduits ou inspirés par le Professeur K. Aki au Japon et en Californie ont permis d'avancer dans la compréhension des phénomènes. Un pas notable a été franchi depuis une vingtaine d'année dans la prise de conscience de l'importance de ses effets. D'une part parce que des scientifiques se sont attachés à trouver dans les catastrophes sismiques la trace d'éventuels effets de site après le séisme de Mexico en 1985. D'autre part grâce à la diffusion à partir de 1990 des techniques numériques d'enregistrements des séismes qui a conduit à l'amélioration et à la multiplication des bases de données sismiques.

Ma première contribution, si modeste soit-elle, s'inscrit dans cette histoire du développement scientifique par l'instrumentation sismologique. Depuis 1990, en effet j'ai participé à un grand nombre d'expérimentations qui ont souvent montré concrètement l'importance des modifications du signal sismique selon de la configuration géologique des terrains. L'acquisition par mon équipe d'un réseau de stations sismiques portables destiné aux microzonages m'a conduite à mettre en place des méthodes expérimentales d'évaluation des effets de site originales à cette époque en France. Ces travaux ont contribué à:

- ✓ Définir les principes, les outils et les limites d'interprétation de la méthode "site / référence", basée sur l'analyse comparée d'enregistrements de séismes en divers points d'un territoire.
- ✓ Evaluer la méthode "H/V" basé sur l'enregistrement de bruit de fond sismique qui est maintenant utilisée de manière régulière pour détecter les fréquences de résonance des sols.
- ✓ Comprendre les mécanismes de ces effets de site en fournissant des données expérimentales qui ont servi de base de comparaison à différents types de simulations numériques de la propagation des ondes dans le sol.

Outre ces aspects méthodologiques, les études conduites ont permis une **meilleure connaissance de l'aléa sur de nombreux sites**. Ainsi les effets de site ont été décrits dans des grandes villes (Nice, Caracas, Tunis, Beyrouth en cours) ou sur des territoires plus restreints dans le cadre de Plans de Prévention des Risques ou d'études ponctuelles d'ouvrages.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

J'ai tenté de contribué avec mon équipe à l'amélioration des connaissances du contexte sismo-tectonique des Alpes du sud en mettant en œuvre notre capacité d'enregistrement ou en participant à la mise en place et à la gestion du Réseau Accéléromètrique Permanent.

Le projet GEM-GEP portant sur le risque sismique à Nice m'a conduite à ouvrir mes thématiques vers les aspects complémentaires conduisant à la détermination du risque. Ainsi j'ai participé à la mise en place de méthodes d'approche sommaire de la **vulnérabilité des bâtiments** au séismes avec mes collègues du LCPC. Puis nous avons établi le lien entre vulnérabilité et aléa en proposant de nouvelles approches prenant en compte la possibilité de mise en résonance des immeubles avec les fréquences de résonance des sols. Les résultats de ces combinaisons sont restitués en cartes **scénarios de dommage par quartier**.

Par la suite, mon équipe a proposé des concepts de **scénarios sismiques le long d'itinéraires routiers** qui prennent en compte la vulnérabilité d'ouvrage d'art et d'autres tronçons de route par des approches sommaires (SISROUTE). Les points clefs de la conception de ces scénarios résident dans deux aspects: d'une part la simplicité des approches (l'économie de moyens d'étude permet de couvrir plus de territoire), d'autre part le fait que les aléas induits (liquéfaction, chutes de blocs mouvement de terrain) sont autant pris en compte que la vibration sismique elle même. Cette conception découle d'observations post-sismique qui associent un grand nombre de ruptures d'itinéraire à ces effets induits surtout dans un contexte de sismicité modéré.
Le dernier type de scénario construit par mon équipe dans le cadre du projet européen FORESIGHT combine les aspects urbains et infrastructures de transport pour établir des cartes de dommages sur un territoire. La notion de facteur de sécurité lié au déclenchement de chaque aléa induit a été introduite.

Au regard de ces développements, on constate une progression des thématiques de l'aléa vers les scénarios en passant par la vulnérabilité. Si l'évaluation des dommages en cas de séismes doit rester une des finalités motivantes pour toutes les compétences techniques impliquées, il reste que chaque élément de la chaîne du risque présente aujourd'hui des incertitudes préoccupantes, sinon de grandes inconnues, qui doivent être levées.
L'aléa régional (quel séisme ?) et l'aléa local (quelles vibrations au niveau du sol ?) n'échappent pas à cette constatation.

Aussi, même si la conception de scénario nous conduits à motiver nos collègues ingénieurs de structures ou géotechniciens à préciser leurs propres évaluations concernant respectivement la vulnérabilité des structures ou les caractéristiques des phénomènes géotechniques induit par les séismes, nous restons aujourd'hui principalement mobilisés par l'affinement de nos propres propositions en matière d'aléa. Dans les années à venir, nous tenterons donc d'éclaircir plusieurs points clefs pour évaluer l'aléa sismique de manière plus juste. Les premiers axes de recherche envisagé sont liés aux travaux en cours:

- La recherche devra d'abord s'attacher à définir les procédures de combinaison des informations pour établir de manière fiable, reproductible et consensuelle des spectres de réponse par zone d'aléa homogène. **L'affectation d'une courbe d'amplification standardisée** à un site donné sera liée à la caractérisation de la fréquence fondamentale (Fo) et de la vitesse moyenne des ondes S dans les premiers mètres. Ces deux paramètres peuvent être déduits de l'application des méthodes basées sur le bruit de fond. Par son travail de thèse Héloïse Cadet propose des courbes d'amplification par rapport au rocher, basées sur des enregistrements de nombreux séismes forts au Japon. La transposition d'enregistrement de fond de puit en données de surface a nécessité la mise au point d'un processus de calcul et d'hypothèses qui forment en eux même un sujet à approfondir (dont celui de la définition du "rocher standard" et celui de la "surface libre"). Les courbes d'amplification qu'elle obtient aujourd'hui devront être confrontés à d'autres approches et validés pour être mises en œuvre dans des microzonages en France.

- Les **effets de site liées aux variations de reliefs** constituent un axe de recherche incontournable puisqu'une grande majorité des zones les plus sismiques françaises se situent en zone montagneuse. Il paraît important de mieux comprendre les phénomènes de reflection et diffraction des ondes selon les reliefs et d'évaluer l'implication des variations rhéologiques et de la teneur en eau. C'est l'objectif de la thèse d'Emeline Mauffroy. Un autre objectif poursuivi dans le cadre de la thèse d' Aiham Saad est de produire des courbes d'amplification standard en fonction de la forme du relief.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

A côtés de ces travaux déjà entamés, plusieurs autres pistes de recherche sont envisagées :

- **Non-linéarité de réponse des sols**: Les fonctions de transfert des sols peuvent évoluer avec l'ampleur de la vibration sismique. Or pour l'instant, les modifications spectrales proposées d'un site à l'autre ne prennent pas en compte cette non-linéarité. Dans la poursuite du travail d'Héloïse Cadet, il est envisagé d'établir des fonctions d'amplification prenant en compte cet aspect sur la base d'enregistrements de séismes de différents niveaux.

- **Effet de basin** : La propagation des ondes dans des remplissages de vallées à 2 ou 3 dimensions fait l'objet d'importants travaux de simulation numériques pour comprendre et prévoir les amplifications et les allongement de signaux en surface. Ces modèles devront être validés par l'analyse de données réelles. Pour cela il faudra repérer et caractériser des territoires ayant des configurations de terrain différentes d'un point de vue géométrique et rhéologique. Des campagnes de terrain seront alors mises en œuvre afin d'enregistrer et d'analyser les séismes en différents points stratégiques du territoire.

- **Approche probabiliste des effets de site**: Le zonage sismique français actuel est basé sur une analyse déterministe de la sismicité. Le nouveau zonage, qui devrait être officialisé en 2007, repose sur une analyse probabiliste. Le spectre de réponse affecté à chaque zone homogène présentera des valeurs ayant la même probabilité d'apparition quelque soit la période considérée. Ce changement d'approche pourrait être appliqué à l'aléa local : soit en appliquant au spectre probabiliste au rocher une fonction d'amplification à définir, soit en intégrant l'effet de site au départ de l'analyse probabiliste. Cette quantification probabiliste de l'aléa local est souhaitable pour comparer le niveau du risque sismique à celui d'autres risques dans le cadre de la prévention.

- **Définition d'un séisme de référence pour un territoire donné**: La construction de scénario de crise sismique nous conduit à nous interroger sur la définition même de "séisme de référence" qui ne fait l'objet d'aucune formalisation aujourd'hui. Pour définir le ou les séismes les plus utiles à modéliser dans une région en terme de prévention parasismique, il faut bien entendu prendre en compte la finalité du scénario à établir. Mais une fois ce cadre fixé, le sismologue doit "choisir" la localisation et la magnitude du séisme. Actuellement, le choix de ces séismes découlent parfois de l'analyse de la sismicité historique (cas des installations nucléaires). Les limites sont alors importantes puisque les témoignages sont récents (à l'échelle géologique), leur répartition géographique et leur qualité incontrôlables et leur interprétation difficile. D'autres séismes de référence sont proposés sur la base des connaissances sismo-tectoniques. Or ces connaissances sont très variables et souvent seulement liées aux traces laissées en surface par une rupture tectonique. Cette question de la justification du choix du séisme de référence est encore plus problématique dans des régions de sismicité modéré. C'est pourquoi nous prévoyons de nous impliquer avec d'autres équipes sur cette thématique pour définir un cadre commun au moins pour les futurs scénarios de crises départementaux.

6.2 Projets et collaborations

Les projets de recherche conduits au sein de l'ERA "Risque sismique" suivent son programme quadriennal établi avec le LCPC. Le programme en cours a été validé en 2006. Il a pour axe principal l'évaluation de l'aléa sismique avec des retombées en terme de conception de scénario de crise. Les programmes antérieurs ont conduits aux résultats scientifiques rappelés dans le paragraphe précédents. Beaucoup de ces travaux sont le fruit de collaborations avec d'autres équipes. Ils résultent de la mise en place de cadres de collaborations à différents niveaux : au sein même du CETE Méditerranée, dans le réseau du LCPC et avec d'autres organismes français et étrangers.

Le CETE Méditerranée dispose depuis longtemps de compétences reconnues en matière de risques naturels et géotechniques notamment dans les Laboratoires d'Aix en Provence et de Nice. Le projet GEM-GEP a montré pour la première fois en France la faisabilité et l'intérêt d'un travail transversal concernant l'ensemble de la chaîne du risque. Le CETE a alors décidé de mobiliser des départements peu impliqués jusqu'à présent afin de renforcer et de compléter l'éventail de ces compétences sur le domaine du risque sismique (domaine qui occupe d'ailleurs une place de plus en plus importante dans son positionnement stratégique). Ainsi, pour compléter l'ERA "Risque sismique", une nouvelle équipe en charge de la vulnérabilité sommaire des bâtiments aux séisme, ainsi que d'autres ingénieurs spécialistes de la dynamique des structures et de mécaniques des sols ont été rassemblés autour de la thématique du risque sismique. Ces collaborations transversales ont permis la réalisation de

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

plusieurs projets et étude: mission et étude post-sismique en Guadeloupe (2005), études préalables au Plan de Prévention des Risques, conception de l'outil SISROUTE (avec le SETRA).

Le second cadre de collaboration de l'ERA réside dans l'organisation de la recherche du LCPC. Jean-François Semblat et moi-même avons déjà proposé deux opérations de recherche de 4 ans concernant le risque sismique. Celle que nous animons actuellement s'intitule "Aléa et risque sismique". Elle comprend 3 volets concernant respectivement l'aléa, la vulnérabilité et les scénarios. Elle vise globalement à une amélioration des connaissances et une mise au point des techniques de reconnaissance du risque. Cette opération permet un travail concerté entre les unités du LCPC et des LRPC. Les liens les plus solides sont établis avec les équipes parisienne (LCPC/MSRGI/DOV) et grenobloise (LGIT/LCPC) ainsi que cela apparaît dans nombre de sujets évoqués dans ce document.

Enfin, en dehors du ministère de l'équipement, nous avons collaboré avec de nombreux instituts français et étrangers à l'occasion de plusieurs projets. Le projet européen SESAME a débouché sur un guide d'utilisation de la méthode H/V bruit de fond. Le projet européen FORESIGHT nous a permis de progresser sur la conception de scénarios de crise sismique.

Un autre projet vient d'être accepté par le GIS RAP (IMAGINE): En collaboration avec l'IRSN et le BRGM, il vise à progresser sur l'approche probabiliste des effets de site. D'autres projets sont soumis ou en cours de montage avec différents organismes ou bureaux d'étude. Tous visent une meilleure estimation de l'aléa régional ou local

Chacune des collaborations établies renforce le potentiel d'action de notre petite équipe.

6.3 Valorisation de la recherche en sismologie de l'ingénieur

"Un résultat de recherche a été valorisé lorsque l'on a constaté que des acteurs de la société ont modifié leur comportement en utilisant ce résultat"[9]*.*

Les ERA ont justement pour vocation de faire passer dans la pratique les résultats de la recherche.

Mes contributions à la rédaction de divers guides ou recommandations de bonnes pratiques concernant la réalisation de microzonages et de méthodes de détermination de l'aléa, de même que ma participation à diverses instances concernant la mise au point de la réglementation nationale ou locale entrent dans le champs de la valorisation.

L'activité de conseil et d'expertise est évidemment une autre forme de valorisation de la recherche qui met le chercheur en face de problèmes pratiques qui peuvent être difficiles à résoudre et qui peuvent fournir de nouveaux sujets de recherche. La détermination de l'aléa sismique sur un territoire, quelque soit la destination de l'étude, constitue effectivement une donnée importante pour de futurs actions de recherche autour du site ou sur un plan méthodologique. Dans le domaine du risque sismique, la frontière est souvent mince entre recherche et étude. Nombres des études réalisées sont ainsi considérées comme des études "pilotes", dans le sens ou un nouveau processus d'analyse découlant de la recherche est proposé. Cela a été le cas par exemple pour des études réalisées dans le cadre de Plan de Prévention des risques sismiques dans certaines communes (pour les DDE) ou pour des ouvrages d'art (Conseil généraux ou DRE). J'ai également souvent travaillé dans le cadre d'étude dites "méthodologiques" dans le cadre de contrats avec un service de l'état pour mettre au point des concepts nouveaux qui nécessitent des actions de recherche (SISROUTE pour le SETRA ou GEM-GEP pour l'Etat et la mairie de Nice).

Ainsi, comme tout chercheur dans une ERA, ce statut m'a conduite à réaliser des va et vient entre deux milieux : celui de la recherche et celui des donneurs d'ordre avec des objectifs, des valeurs et parfois des vocabulaires différents ! L'intérêt de cette double immersion s'est traduit entre 2003 et 2005 par le projet PASSERELLE dont la finalité était la rencontre de ces deux milieux dans les Alpes Maritimes. Il se concrétise régulièrement par ma participation à plusieurs instances concernant le risque sismique: club risque, MIRNAT, COSRIS, PCS, …

Enfin, l'une des formes de valorisation des plus évidentes des travaux conduits par mon équipe ces dernières années tient au lancement du "Plan National Séisme" lancé par l'Etat à la suite du projet

[9] Définition proposée dans le cadre du comité d'évaluation des chercheurs de l'équipement.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

GEM-GEP. L'objectif est le même: réduire la vulnérabilité au risque. Sa stratégie consiste à favoriser une prise de conscience des citoyens, des constructeurs et des pouvoirs publics, mais aussi à mettre en œuvre "avec fermeté" des dispositions déjà adaptées et de poursuivre l'amélioration des savoir-faire. Plusieurs actions d'informations, de formations, d'expertise et de recherche sont en cours ou en prévision dans ce cadre.

Les propos alarmants d'Haroun Tazzief il y plus de 30 ans, appuyés par des catastrophes récurrentes comme celle de Sumatra en 2004, ont durablement marqué la société française (quiconque se promène avec un sismomètre dans une rue provençale vous le confirmera !). L'état de la terre et ses humeurs préoccupe aujourd'hui chacun de nous. Les médias interrogent régulièrement des scientifiques même lorsque le dernier séisme meurtrier est oublié en France. Si la diffusion du savoir à des fins pédagogiques et préventives fait partie des missions d'un chercheur, sa responsabilité peut être engagée bien au-delà s'il choisit de prendre une part active dans l'évaluation de la chaine du risque et dans sa prévention. Les sismologues assumant ces missions réalisent l'importance de transmettre l'essentiel de leur connaissance de l'aléa vers d'autres communautés scientifiques et techniques, voire des responsables politiques. Ils pèsent également beaucoup mieux le poids de leurs approximations !

Au côté des sismologues de mon équipe et du LCPC, je perçois ainsi régulièrement les implications concrètes de nos travaux de recherche. La transmission de nos résultats à différentes instances décisionnelles contribue à élaborer des politiques de prévention que nous espérons toujours mieux ajustées au risque réel, mais aussi à l'attente de nos concitoyens en terme de sécurité et d'information.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

7 Glossaire

AFPS : Association Française de Génie Parasismique

AGU : American Goephysical Union

BCSF: Bureau Central Sismologique Français

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière

CANCA : Communauté d'Agglomération Nice Côte d'Azur

CEA : Commissariat à l'Energie Atomique

CERMES : Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols(ENPC - LCPC) composante de l'Institut Navier

CERTU : centre d'Etudes sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (Service techique central du réseau scientifique et technique du Ministère en charge de l'Equipement)

CETE : Les 8 Centres d'études techniques de l'Equipement (CETE) sont des services d'ingénierie publique dépendant du MEDAD. Ils ont vocation à réaliser sur le territoire de leur zone d'activité (voir carte du réseau des CETE page 170) des prestations d'études et d'expertises pour les services de l'Etat (STC, DDE …), les collectivités locales dans tous les domaines de compétence du Ministère, et plus particulièrement dans ceux de l'urbanisme et de l'habitat, de l'aménagement des territoires et des risques, des déplacements et des infrastructures de transport. Ils mettent à disposition d'organismes publics ou privés des compétences expertes en tant que référence technique territoriale en adaptant leurs compétences aux besoins des territoires et en assurant des études et des prestations d'appui spécialisées qui assurent leur fonctionnement. Les CETE font partie du réseau scientifique et technique de l'équipement (RST) dont une partie de l'activité scientifique est pilotée par le LCPC (une des têtes de réseau du RST).

CETE Méditerranée : Il intervient depuis 1968 sur les régions Provence-Alpes-Côte d'Azur, Languedoc-Roussillon et Corse. Il est organisé en quatre départements d'études, deux Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées (Aix et Nice) et une agence de proximité sur Montpellier. Il est composé de 570 agents dont 140 ingénieurs ou experts. Il a une production annuelle de 33 M Euros et 2000 études. Son siège est à Aix en Provence.

Les Risques naturels au CETE Méditerranée: "Les risques naturels et technologiques sont devenus un enjeu majeur dans l'aménagement et la gestion des territoires. Le CETE Méditerranée dont la zone d'intervention est particulièrement concernée par différents types de risques (inondation, sismique, mouvements de terrains, chutes de blocs, feux de forêts, ...) a pour objectif de poursuivre le développement de ses compétences reconnues sur la connaissance et la prévention de ces risques pour protéger et défendre la qualité de l'environnement, assurer la sécurité des personnes, des infrastructures et des biens. Le CETE Méditerranée participe ainsi à la mise en œuvre des politiques publiques prioritaires destinées à prévenir les risques et à en limiter les conséquences, notamment par la participation à l'élaboration des PPR et plus généralement par la prise en compte des risques dans la planification (SCOT et PLU) et au travers : de la connaissance de l'aléa, de la réalisation d'ouvrages de protection, de la connaissance des enjeux, de la réduction de la vulnérabilité, du développement d'outils destinés à la gestion de la crise"

CETMEF : Centre d'Etudes techniques et maritimes et Fluviales (Service technique central du réseau scientifique et technique du Ministère en charge de l'Equipement)

CETU : Centre d'Etudes des Tunnels (Service technique central du réseau scientifique et technique du Ministère en charge de l'Equipement)

Chercheur: Un chercheur est une personne qui travaille à la frontière de la connaissance et dont le travail consiste à élargir cette frontière.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

CGPC : Conseil Général des Ponts et Chaussées (MEDAD)

CNAM : Conservatoire National des Art et Métiers

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (MEDAD)

DCEDI : Conception et Exploitation Durables des Infrastructures (département d'études du CETE Méditerranée)

DDAF : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Foret

DDE : Direction Départementale de l'Equipement

DGUHC : Direction Générale de L'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction (MEDAD)

DHACE : Habitat, Aménagement, Construction, Environnement (département CETE Méditerranée jusqu'en 2007)

DIACT : Délégation Interministérielle à l'Aménagement et à la Compétitivité des Territoires

DIDPC : Direction Interministérielle de Défense et de Protection Civiles, un des services du Cabinet du Préfet (chargée d'assister le Préfet dans la prévention et la gestion des crises de sécurité et de défense civiles)

DIREN : Direction Régionale de l'Environnement (MEDAD)

DPPR : Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques (MEDAD)

DPRM: Direction des Programmes du LCPC , section des Modèles Numériques

DRAST : Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques (MEDAD)

DRE :Direction Régionale de l'Equipement

DREC : Département Risque Eau Construction (département d'études du CETE Méditerranée)

DRIRE : Délégation Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement

EGS : European Geophysical Society

EGU : European Geoscience Union

ENIT :Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis

ENPC : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

ENTPE : Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat

ERA : Les ÉRA sont des équipes de recherche des centres d'études techniques de l'équipement associées au LCPC (pour 17 d'entre elles). Le rôle du LCPC vis-à-vis des ÉRA est une composante de leur action de tête de réseau des CETE. Les domaines de recherche des ÉRA s'inscrivent dans ceux du LCPC (les infrastructures et leurs usages, la géotechnique, les ouvrages d'art, le génie civil, le génie urbain et leurs conséquences sur l'environnement). Intégrées au programme de recherche du LCPC, les ÉRA le nourrissent des problématiques de terrain, rendent possible des expérimentations grandeur nature et permettent une valorisation directe des résultats de recherche. Elles constituent en outre un lien avec les acteurs régionaux de la recherche. Composantes des Cété, elles participent à la mission de ces derniers d'élaboration d'une doctrine technique publique dans le champ des infrastructures, au profit des services centraux et déconcentrés des ministères chargés de l'équipement et des transports, des autres administrations et des organismes qui leur sont rattachés, des collectivités territoriales, des professionnels. Chaque équipe est associée à une unité de recherche du LCPC, avec laquelle elle partage un champ scientifique, et fait l'objet d'évaluation périodique de la part du conseil scientifique du LCPC.

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

Au nombre de 18, les ÉRA totalisent 150 personnes dont près de 100 chercheurs et techniciens. Elles sont réparties sur l'ensemble du territoire français.

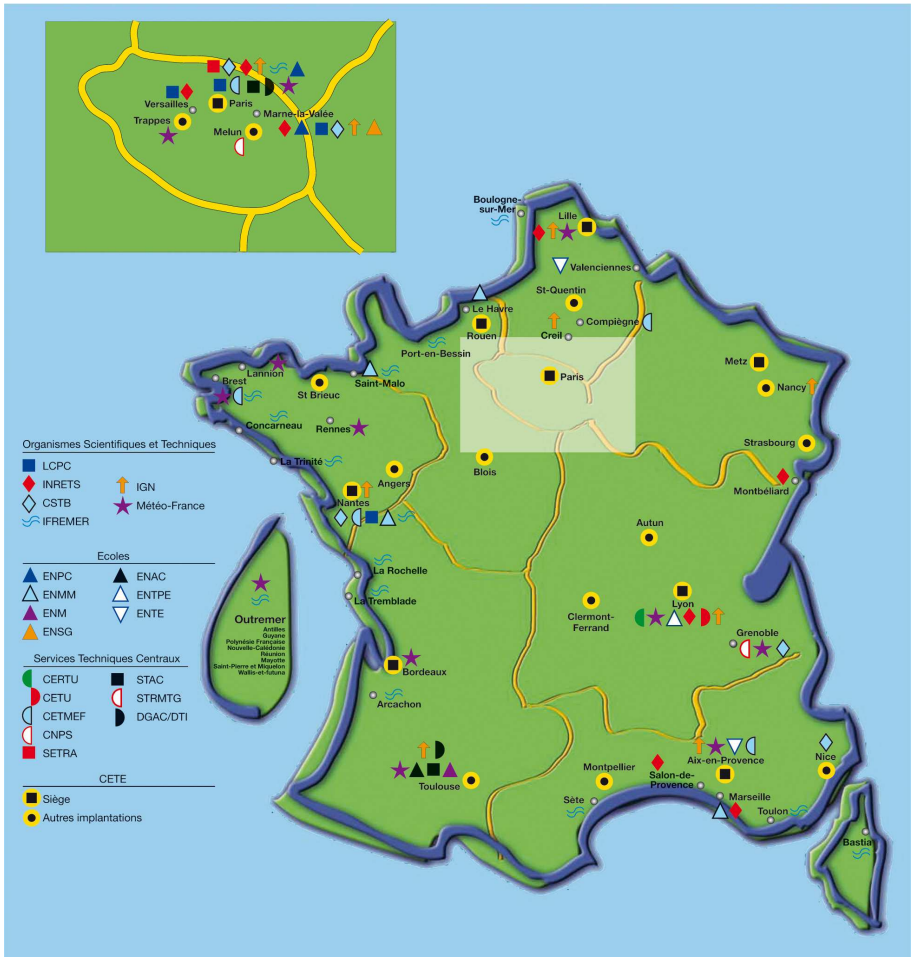


figure 6.3—1: Carte du RST en 2007

FUNVISIS : FUNdacion Venezonala de Investigaciones SISmologicas

GEMGEP : étude du risque sismique de Nice, de GEMitis et GEPp

GEMITIS : étude du risque sismique sur Nice, de GE (terre) et MITIgare (réduire)

GEPP : Groupe d 'Études et de Propositions pour la Prévention des risques sismiques du Conseil Général des Ponts et Chaussées. Ce groupe concerne plusieurs Ministères.

GIP : Groupement d'intérêt Public

GIS : Groupement d'intérêt Scientifique

IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

IGN : Institut National Géographique

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriels et des Risques

INSEE : Institut National des Statistiques et des Etudes Economiques

INSU : Institut National des Sciences de l'Univers

IRD : Institut de Recherche pour le Développement (ex ORSTOM)

© 2008 Tous droits réservés.

IRSN : Institut de Radio Protection et de sureté Nucléaire (ex IPSN)

LAGOVEN : Société pétrolière vénézuélienne

LAMI : Laboratoire d'Analyse des Matériaux et Identification (ENPC - LCPC)

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Paris, Nantes, Marne la Vallée, Satory-Versaille, Grenoble)

LRPC : Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (sous tutelle Technique du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), les 17 LRPC répartis en métropole française sont aujourd'hui intégrés dans des Centres d'Etudes Techniques de l'Equipement.

MATE : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (jusqu'en 1998 ?)

MEDAD : Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durable (à partir de 2007). Les principaux services de l'Etat partenaires de l'ERA Risque Sismique, dépendant jusqu'en 2007 de deux ministères, ont été regroupés en mai 2007 au sein du MEDAD. Sont notamment concernés:

- ✓ des directions centrales de l'ex METATM::
  - o la Direction Générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction (DGHUC)
  - o la Direction Générale des Routes (DGR)
  - o la Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques (DRAST)
- ✓ la Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques (DPPR) de l'ex MEDD
- ✓ ainsi que leurs services déconcentrés respectifs (Directions Régionales de l'Environnement, Directions Régionales / Départementales de l'Equipement).

MEDD: Ministère de l'Ecologie te du Développement Durable (de 1998 à 2007 ?)

METATM : Ministère de l'Equipement, du Transport, de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de la Mer (jusqu'en 2007)

MIRNAT : Mission Inter ministérielle Risques Naturels

MSRGI: Division Mécanique des Sols et des Roches et Géologie de l'Ingénieur du LCPC

NF : Norme Française

PACA : Région Provence Alpes Côte d'Azur

PLU : Plan Local d'Urbanisme

POS : Plan d'Occupation des Sols

PPR :Plan de Prévention des Risques

RAP : Réseau Accélérométrique Permanent français (www-rap.obs.ujf-grenoble.fr)

RRR : Réseau Régional Risque Naturel ou « club risque »

RST : Le Ministère en charge de l'Equipement bénéficie de l'existence du « Réseau Scientifique et Technique », dit RST qui rassemble près de 15 000 personnes. Il est composé d'une trentaine d'organismes d'études, de contrôles, d'expertise, de recherche et d'enseignement, établissements publics ou services de l'Etat. Ces organismes ont pour vocation de produire les connaissances scientifiques et techniques nécessaires à l'action publique, dans les champs d'action traditionnels du ministère (transport, urbanisme, aménagement, génie civil, habitat), mais aussi en matière d'environnement, de prévention des risques, de connaissance de la terre, et dans les domaines des espaces marins et littoraux et des phénomènes météorologiques. Ils sont présents sur l'ensemble du territoire national mais aussi sur la scène européenne. Au sein du ministère de l'Equipement le pilotage de ces organismes est assuré par la DRAST (Direction de la Recherche et de l'Animation Scientifique et Technique), placée au sein du Secrétariat Général, en liaison avec la

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

DGPA (Direction Générale du Personnel et de l'Administration) et avec les directions sectorielles concernées" (source : www.recherche-innovation.equipement.gouv.fr).

SALAM :Sismologie et ALéa dans les Alpes Maritimes (projet de recherche UMR GA - CETE Méditerranée)

SCOT :Schéma de Cohérence Territorial

SDAU : Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme

SDIS : Service Départementale Incendie et de Secours

SETRA : Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (Service techique central du réseau scientifique et technique du Ministère en charge de l'Equipement)

SIG : Système d'Information Géographique

SIRES : Système d'Information Rapide sur les Effets des Séismes

STC : Services Techniques Centraux (du MEDAD)

UMR GA : UMR Géosciences Azur (Université Nice Sophia Antipolis, IRD, CNRS, Université Pierre et Marie Curie)

UMR LGIT : Laboratoire de Géophysique Interne et de Tectonophysique, Unité Mixte de Recherche (CNRS, Université J. Fourrier, Université de Savoie, IRD, LCPC), Grenoble.

UPMC : Université Pierre et Marie Curie (Paris VI)

USTL : Université des Sciences et Technologie de Lille

© 2008 Tous droits réservés. http://www.univ-lille1.fr/bustl

© 2008 Tous droits réservés.

http://www.univ-lille1.fr/bustl

Résumé de mes missions professionnelles

Mesurer les effets de site: Les effets de site sont des modifications du signal sismique liés à la configuration géologique de surface et qui conduisent souvent à une aggravation des dégâts. Dès mon arrivée dans l'ERA "Risque sismique" en 1991, la prévision des effets de site a constitué mon thème central de recherche. Des méthodes d'évaluation devaient être développées pour réaliser des microzonages. J'ai d'abord mis au point les processus de traitement pour obtenir la fonction de transfert par séisme d'un site en comparant des enregistrements de séismes d'une station à une autre. Puis j'ai testé une méthode japonaise ("H/V bruit de fond") ce qui constituait une première en France au moins. En 1994, j'ai soutenu une thèse de doctorat sur la détermination de la réponse d'un site aux séismes à l'aide du bruit de fond sismique. De nombreuses études, toujours basées sur l'enregistrements de séismes et de bruit en France comme à l'étranger ont suivi ces premiers développements. Cette technique a été proposée dans les premières études préalables aux plans de prévention des risques sismiques ou dans d'autre type d'étude comme des avant projet d'ouvrages d'art. J'ai parallèlement participé au projet européen SESAME qui a permis d'établir des bases communes de cette technique et mis à disposition des futurs utilisateurs de la méthode (notamment dans les pays en voie de développement) des outils gratuits et validés par la communauté scientifique internationale. Pour fiabiliser les microzonages en France, un travail de thèse a été conçu en collaboration avec le LGIT : il s'agit de définir une procédure fiable et reproductible permettant d'adapter le spectre de réponse réglementaire de référence aux conditions locales de site en se basant sur des mesures de bruit de fond.

Evaluer d'autres maillons de la chaîne du risque sismique: Les problématiques soumises à l'ERA par l'Etat ou les collectivités territoriales se limitent rarement aux seuls effets de site. Etablir des propositions de contenu technique pour les Plans de Prévention des Risques sismique nécessite par exemple d'identifier et de lier entre eux les éléments qui constituent le risque. Ce nécessaire élargissement des domaines de compétence a motivé ma participation à des actions de recherche variées: depuis la sismo-tectonique (la campagne SALAM a permis de découvrir une faille active dans la région niçoise) jusqu'à l'analyse dynamique d'ouvrage d'art et de bâtiments (par l'enregistrement de vibrations ambiantes. Mais mon expérience la plus solide et la plus étendue sur la chaîne du risque est sans doute ma participation au pilotage et la réalisation d'études liées au projet GEM-GEP à Nice. L'objectif était de mettre au point des méthodes conduisant à l'estimation des dommages envisageables en cas de séisme. Cette expérience pilote devait être reproductible dans toute ville française. L'accent était mis sur la vulnérabilité du bâti existant et le repérage des structures de gestion de crise les plus fragiles. L'intérêt de ce projet tient à la fois des développements scientifiques à la mesure de l'importance des moyens mis en œuvre, mais aussi à ces retombées sur le plan de la politique de gestion des risques en France (concertation des acteurs institutionnels, communication envers le public, préparation du Plan National Séisme).

Etablir des scénarios de crise sismique: Après cette première expérience de réalisation de scénario de crise sismique à Nice, diverses applications basées sur les mêmes principes ont été réalisées par l'ERA (notamment pour des PPRs). Par ailleurs, nous développons depuis d'autres concepts pour produire des scénarios de dommages sismiques tenant compte de divers aléas et de la vulnérabilité correspondante des éléments qui constituent les infrastructures routières (projet SISROUTE pour la Direction des Routes du Ministère de l'Equipement) ou l'ensemble d'un territoire (projet européen FORESIGHT).

Animer la recherche: Je dirige depuis 2002 l'Equipe de Recherche Associée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées « ERA Risque Sismique » du Laboratoire de Nice, équipe dans laquelle je travaille depuis 1991. Depuis 2002 également, je partage avec Jean-François Semblat (LCPC) la responsabilité d'une Opération de Recherche qui permet de coordonner les programmes de recherche concernant le risque sismique des unités du LCPC, des unités mixtes LCPC - Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et des Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées. Mon implication à différents niveaux dans le montage, la gestion, le suivi ou l'encadrement de projets scientifiques et de groupes de travail m'a permis de découvrir plusieurs aspects de l'animation de la recherche. Ces missions complètent mon expérience de chargée d'études et renforcent les liens tissés avec les autres services du Ministère de l'Ecologie du Développement et de l'Aménagement Durables, les organismes de recherche français et étrangers préoccupés comme mon équipe par les séismes et leurs conséquences.

© 2008 Tous droits réservés.