



HAL
open science

Détection des effets de site sismiques : Mise au point de méthodes expérimentales et application à Nice

Anne Marie Duval, Etienne Bertrand, Sylvain Vidal, José Delgado

► To cite this version:

Anne Marie Duval, Etienne Bertrand, Sylvain Vidal, José Delgado. Détection des effets de site sismiques : Mise au point de méthodes expérimentales et application à Nice. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2013, 279, pp 3-20. hal-00850952

HAL Id: hal-00850952

<https://hal.science/hal-00850952>

Submitted on 9 Aug 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Détection des effets de site sismiques : mise au point de méthodes expérimentales et application à Nice

Anne-Marie DUVAL

*Équipe de Recherche Associée à l'IFSTTAR
« Risque sismique », CETE Méditerranée, Nice*

Etienne BERTRAND

*Équipe de Recherche Associée à l'IFSTTAR
« Risque sismique », CETE Méditerranée, Nice*

Sylvain VIDAL

*Équipe de Recherche Associée à l'IFSTTAR
« Risque sismique », CETE Méditerranée, Nice*

José DELGADO

*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 l'élaboration 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.

Detection of seismic site effects: Development of experimental methods and application to the city of Nice

■ Abstract

Site effects represent a critical challenge in the field of earthquake prevention since these effects are capable of seriously exacerbating damage whenever an earthquake strikes. Knowledge of the soil response to seismic activity allows adapting earthquake protection regulations to better incorporate these constraints during the process of defining microzones and producing the Risk Prevention Plan. The experimental methods employed to determine site effects seek to obtain seismic amplification parameters by means of measuring earthquakes or seismic background noise. This article presents the main set of results derived until 2005 by the "Seismic risk" ERA research team during development of these techniques as well as their comparative application to Nice, a city that has constituted the main field application site thanks to its hosting of multiple seismic recording campaigns. For starters, many earthquakes have been analyzed according to the transfer function method. The "Horizontal/Vertical background noise" method was in particular applied to over 600 points, with results being spatially interpolated. A geotechnical model of the subsoil then served to compare the results output with both the geology and numerical simulations of wave propagation. The complementarity of methods and their respective advantages are highlighted in this seismically-active setting.

INTRODUCTION

■ 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 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 et al., 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).

La **figure 1** illustre les modifications provoquées localement 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.

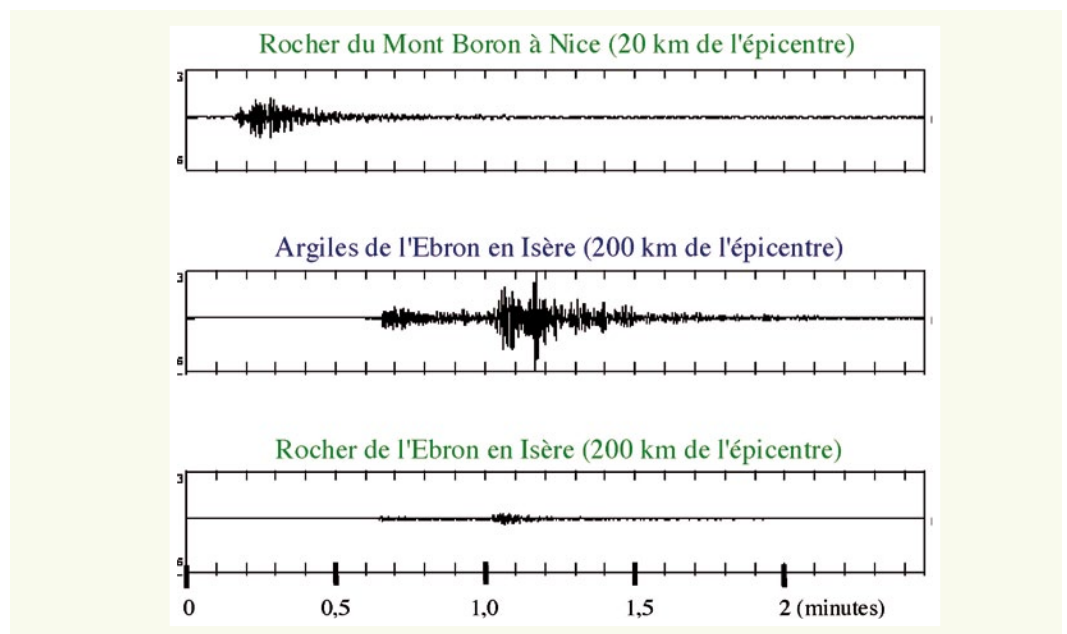


figure 1
Enregistrement
d'un séisme de mer
Ligure à Nice (20 km)
et dans l'Isère (Ébron,
200 km). Même échelle
pour les 3 traces.

Sans effet de site, seule la distance au séisme influencerait 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_0 est donnée par $F_0 = V_s / (4H)$ 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.

■ 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_0) des sites doit être 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, Eurocode 8) soit au niveau local (dans le cadre des Plans de Prévention des Risques).

Les recherches conduites dans les années 1990 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 (Vénézuéla, 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'Ébron 1995, tunnel de Tende 1996) ou d'installations spécifiques (centraux téléphoniques, immeubles, installations nucléaires).

■ Les différentes approches de l'effet de site

La **figure 2** illustre les différentes approches de l'effet de site qui ont été explorées au cours des dernières années.

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

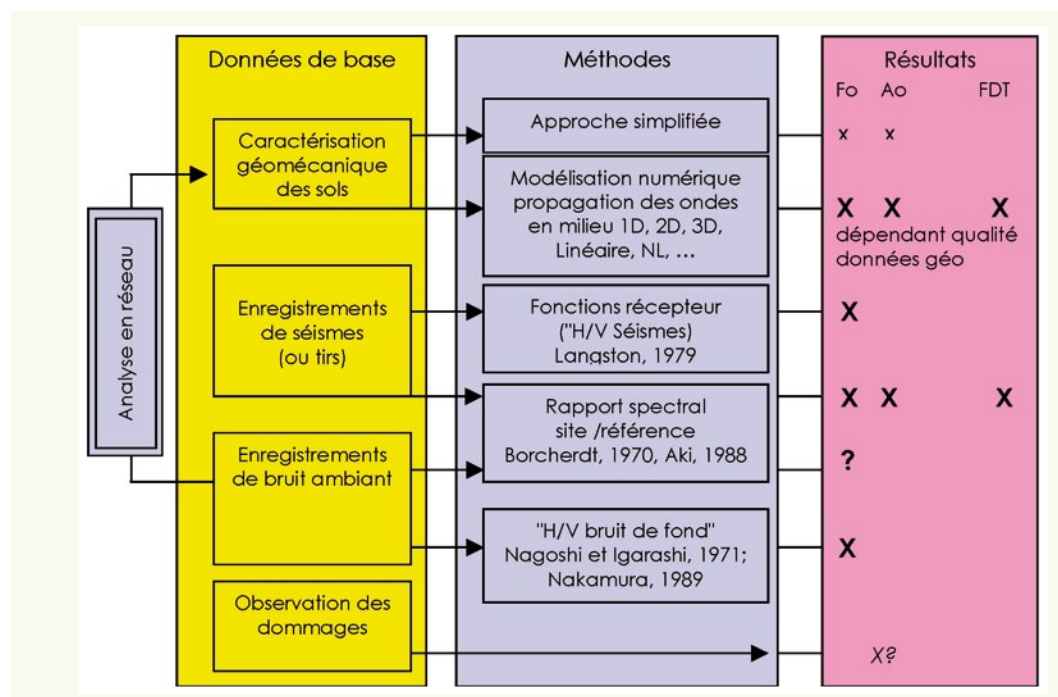


figure 2
Différentes méthodes de détermination des effets de site.

les effets de site qu'on cherche à déterminer sont à minima la fréquence de résonance (F_0) des sites et l'amplification correspondante provoquée par le site à cette fréquence (A_0). Pour être plus précis, on cherche également à déterminer la fonction de transfert du site donnant l'amplification attendue pour toutes les fréquences (FDT sur la **figure 2**).

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 par Semblat et al. (2012). 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, 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 de la partie 2 de cet article. À partir de 1991, l'ERA a testé une autre approche : celle du rapport spectral vertical/horizontal sur des enregistrements de séismes (méthode de la fonction récepteur) mais aussi et surtout sur du bruit de fond ambiant (méthode dite « 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. La partie 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 et al., 1995), RISK-UE (Mouroux et al., 2004) et GEM-GEP (Méneroud et al., 2000 ; Bard et al., 2005).

1. MÉTHODE BASÉE SUR L'ENREGISTREMENT DE SÉISMES

■ 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 ; Borchardt et Gibbs, 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 :

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

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 subsurface, $I_i(f)$ la réponse instrumentale du matériel d'acquisition et f la fréquence considérée.

Si la distance site-référence est faible par rapport à la distance épicycle-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 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 « 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.

■ Illustration sur Nice

À titre d'illustration, la **figure 3** présente les accélérogrammes obtenus sur les sites du Réseau Accélérométrique Permanent (RAP) à Nice pour deux séismes :

- celui du 25 février 2001 (dont les effets à Nice ont été évoqués plus haut), 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 (**tableau 1**).

figure 3
Nice : Enregistrements accélérométriques (voies Est-Ouest) de 2 séismes par les stations RAP. L'échelle verticale est différente pour les deux séismes.

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

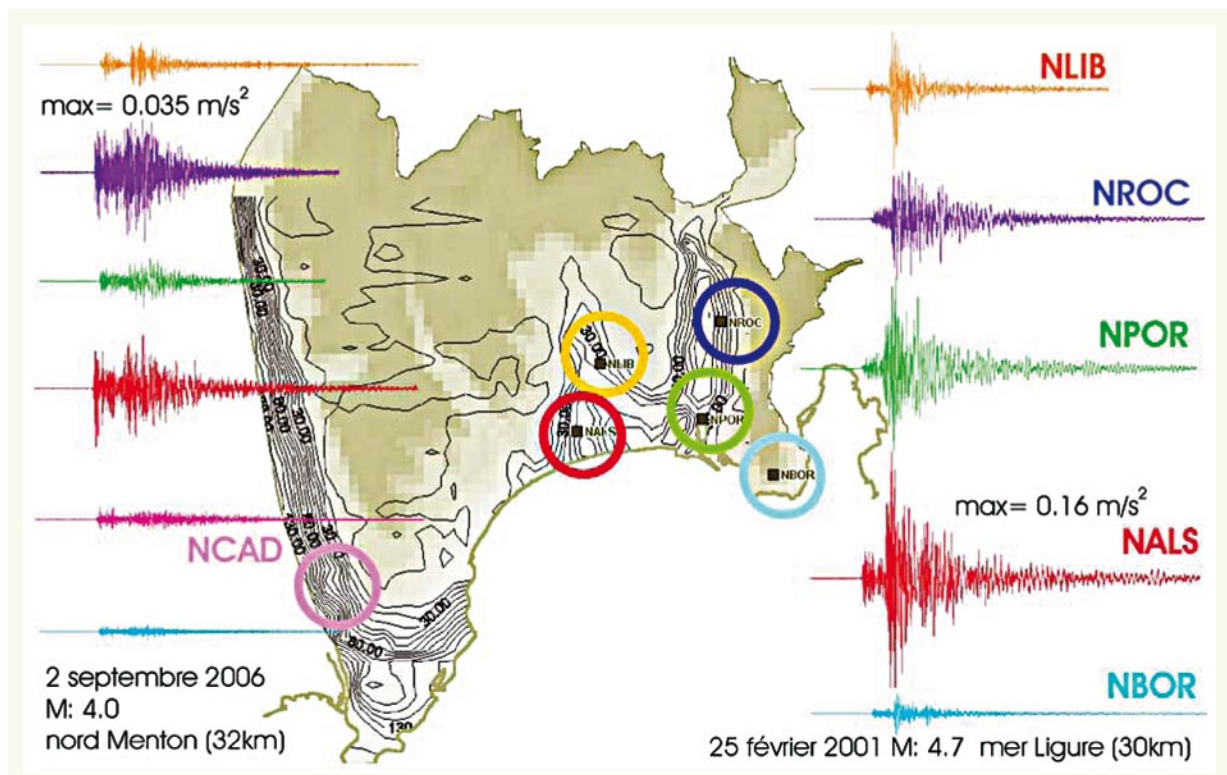
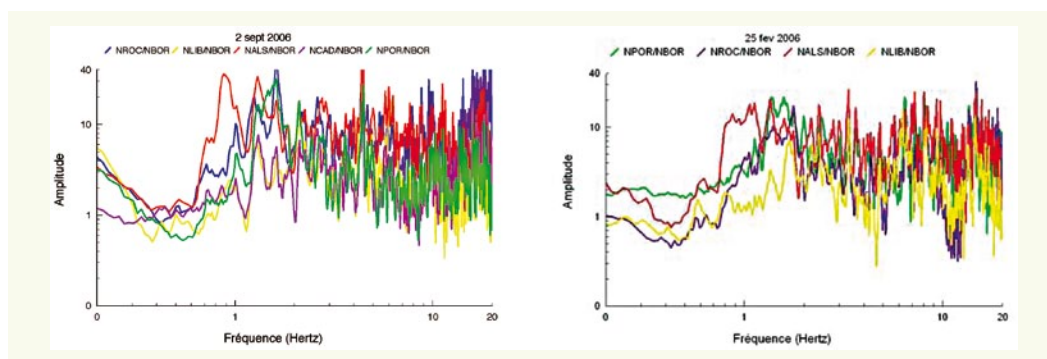


tableau 1
Valeurs maximales de l'accélération (Peak Ground Acceleration, PGA) enregistrée sur les voies E-O pour deux séismes régionaux à Nice et rapport avec la valeur à NBOR.

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		$4,4 \cdot 10^{-3}$	
NCAD			$5,24 \cdot 10^{-3}$	1
NALS	0.16	6	$2,94 \cdot 10^{-2}$	7
NLIB	0.1	4	$1,14 \cdot 10^{-2}$	3
NPOR	0.11	4	$1,31 \cdot 10^{-2}$	3
NROC	0.07	3	$3,46 \cdot 10^{-2}$	8

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 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 4**. Ils mettent en 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 4
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 2.



■ Contraintes de mise en œuvre 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 les 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 circulation, soumis au vent, à la houle ou à toute 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. À Nice ou à Grenoble par exemple, 6 mois ont été nécessaires pour obtenir une quinzaine d'évènements très faibles. La **figure 5** illustre les conséquences de ces restrictions pour le microzonage réalisé dans la ville de Tunis (Duval et Vidal, 1998) : les télé-séismes (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. 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.

- **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

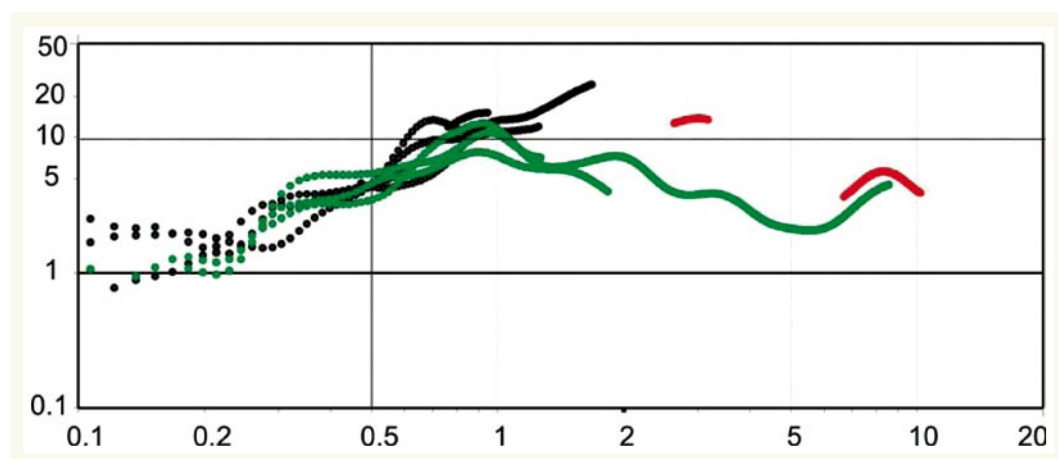


figure 5
Microzonage de Tunis
(Tunisie). Rapports
spectraux MEDI / REF
pour séismes régionaux
(vert), lointains (noir)
et tir (rouge).

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 accélérométriques 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 6** illustre le cas d'un site en zone montagneuse, agricole et en plein hiver.



figure 6
*Exemple de dispositif
de protection
d'un enregistreur
sismique en région alpine*

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

MÉTHODE « H/V BRUIT DE FOND »

■ 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, 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 et Igarashi, 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 et al., 2004 ; Duval et al., 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.

■ 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 et al., 2004). Le bruit sismique ambiant (microtremor en anglais) est constitué par des ondes de volumes et des ondes de surface produites :

- 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 (vertical, longitudinal et transversal) 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 7**).

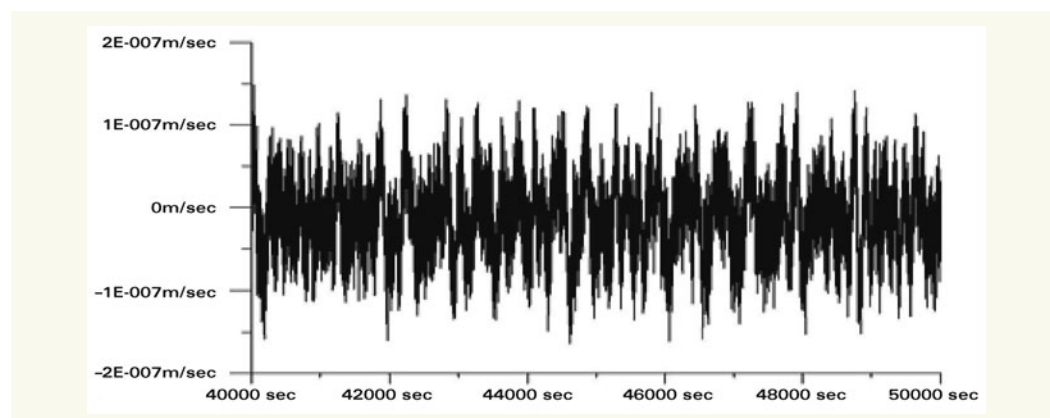


figure 7
Exemple
d'enregistrement de bruit
de fond sismique (vitesse
de vibration du sol en
mètre par seconde)

Le traitement des trois 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 8**, issue de nombreux enregistrements en France et à l'étranger, montre 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).

Comme cela a été montré par les travaux réalisés dans le cadre de SESAME (Bard et al., 2004), 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 cisailantes (S) (Bonneyfoy-Claudet et al., 2006).

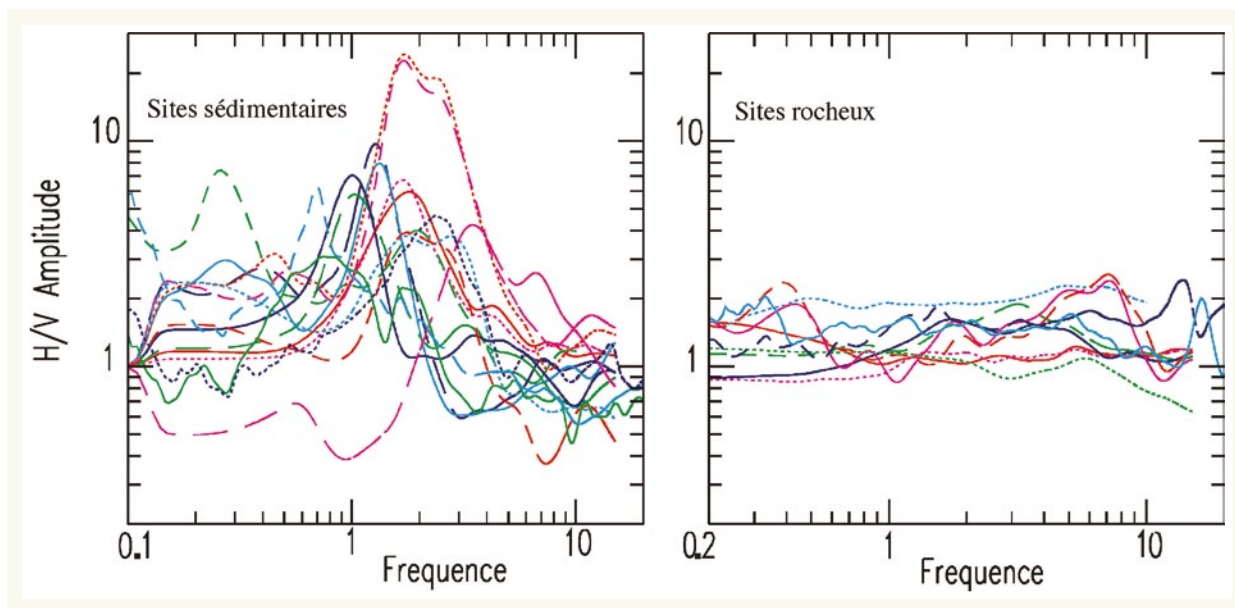
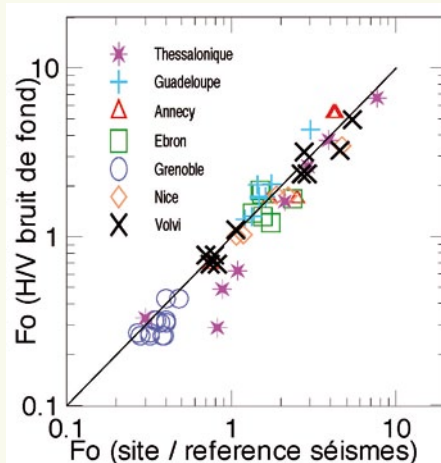


figure 8
Exemples de rapports
« H/V bruit de fond »

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 et al., 1996). Une synthèse de plusieurs études réalisées par l'ERA et le LGIT (Duval et al., 2001a) a ensuite abouti aux conclusions suivantes :

- 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 9) ;
- 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 si une zone ne présente pas d'effet de site (zone rocheuse).

figure 9
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 et al., 2001a).



■ Application à la ville de Nice

› Comparaison avec des enregistrements de séisme

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 et al., 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 la **figure 10**).

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 1 Hertz du nord au sud (courbes bleues sur la **figure 10**).

Des stations sismiques ont enregistré la sismicité durant plusieurs mois sur ces sites. Les rapports spectraux déterminés avec une station de référence au rocher calcaire (NBOR) ont été calculés (courbes vertes de la **figure 10**). 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 majeure partie de la fonction de transfert et que 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.

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

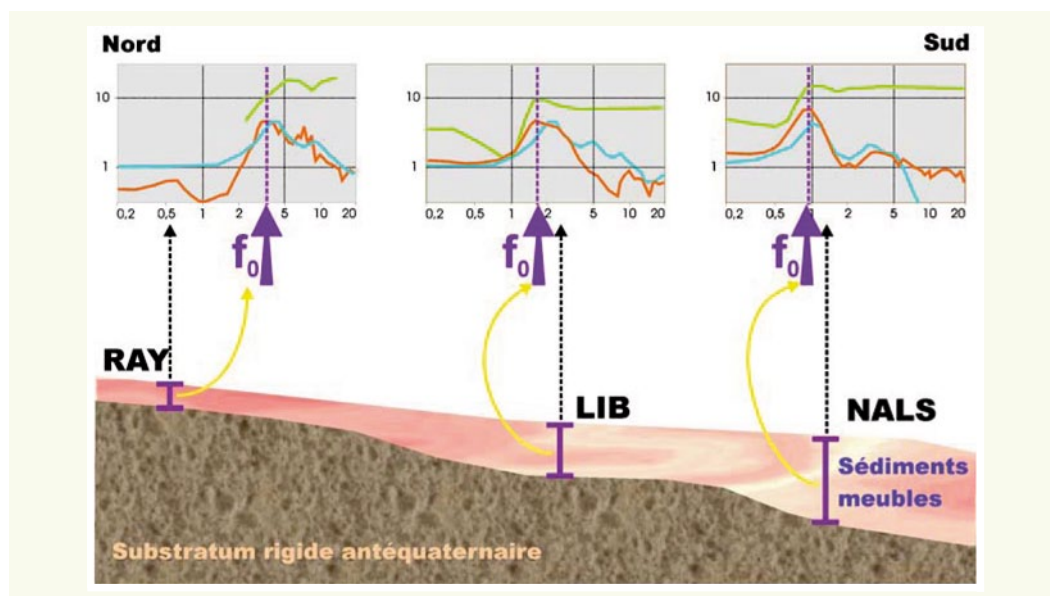


figure 10
Nice, vallée centrale, en vert : rapports spectraux site/référence séisme, en orange : rapports spectraux H/V bruit de fond ; en bleu : fonction de transfert numérique (1D).

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.

► 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 11** et sur la géologie sur la **figure 12**

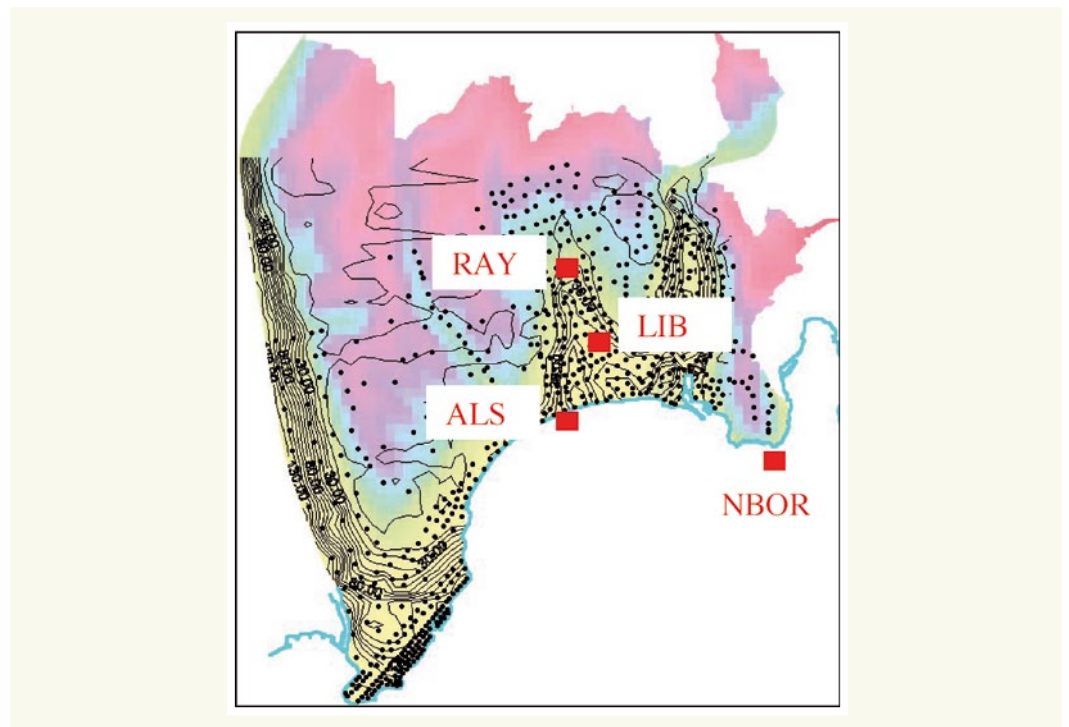


figure 11
Localisation des points de mesures du bruit de fond (points noirs) sur relief (couleur) et remplissage sédimentaire (courbes de niveau).

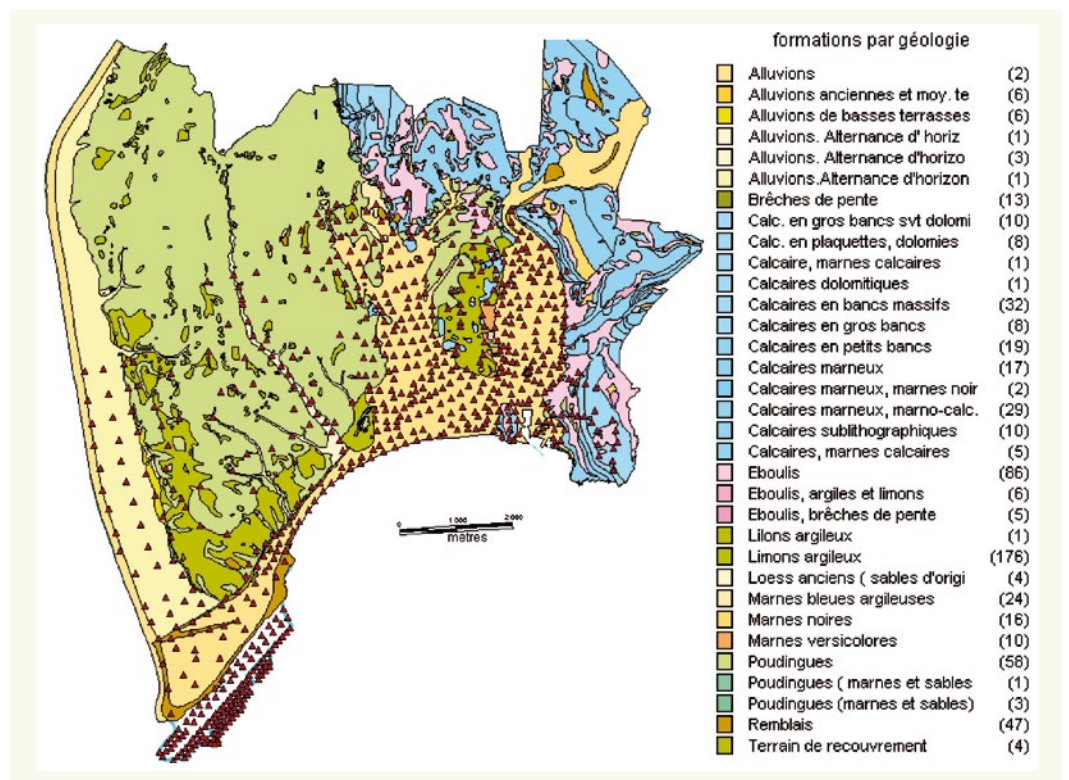


figure 12
Nice - Localisation des points de mesures de bruit de fond de 1991 à 2005 (triangles rouges) sur les unités géologiques.

(Duval et Vidal, 2003). La densité des points est plus élevée dans les zones alluviales que sur les collines de calcaire ou de poudingue.

› Interpolation des fréquences de résonance des sols

La méthode « H/V bruit de fond » a été appliquée à ces enregistrements. La fréquence F_0 du pic principal de chaque courbe H/V (entre 0,5 et 15 Hertz) a été interpolée pour produire la **figure 13**.

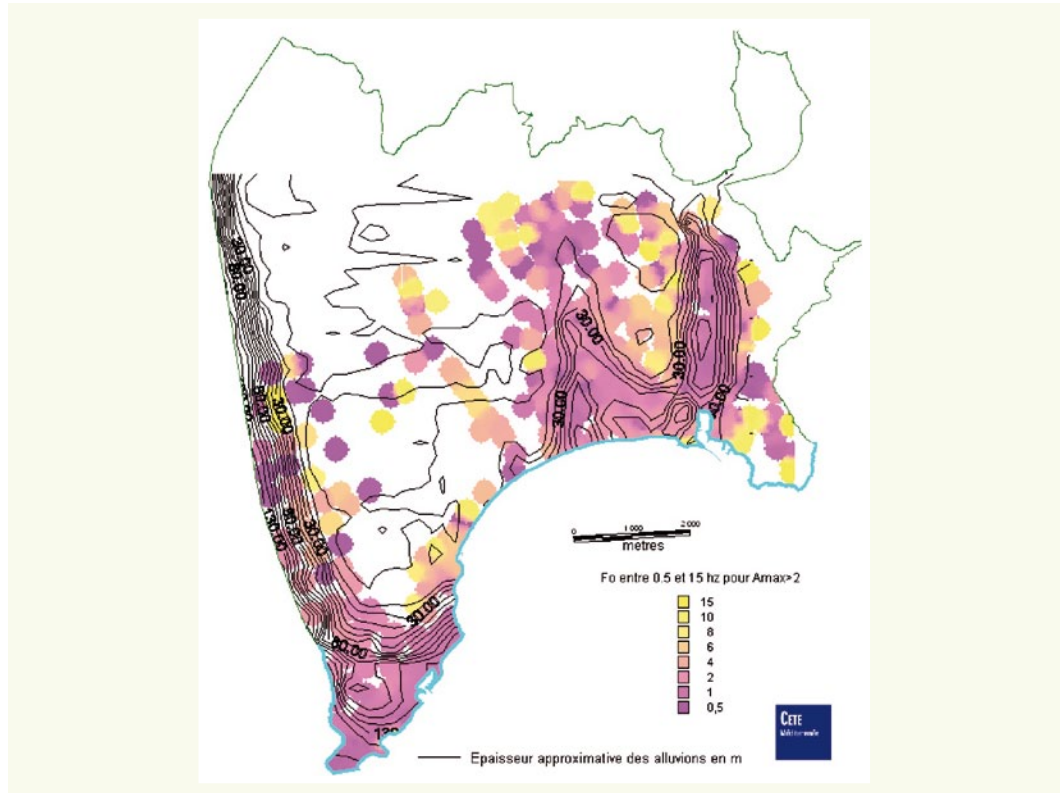


figure 13
Nice - Fréquences F_0
du pic maximal entre
0,5 et 15 Hertz sur les
rapports « H/V bruit de
fond » (en Hertz).

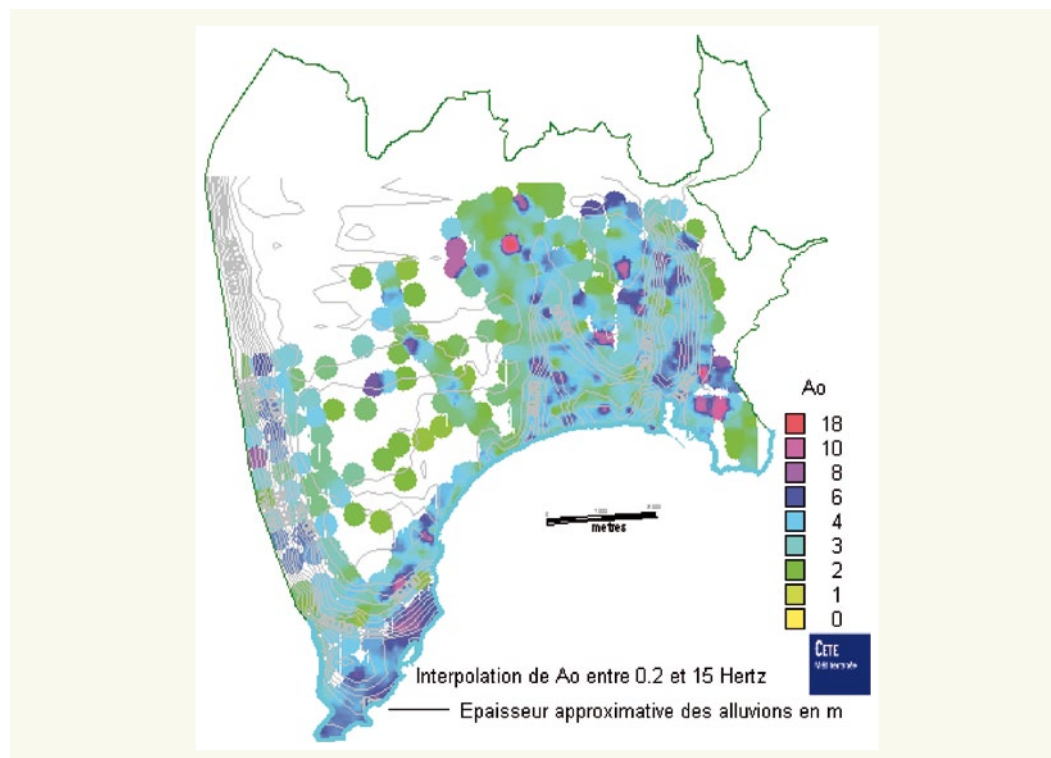
L'analyse de cette figure conduit à plusieurs remarques :

- ✓ les valeurs les plus élevées de F_0 (supérieur à 10 Hz) se trouvent globalement bien en dehors des zones sédimentaires ;
- ✓ les zones de remplissage alluvial montrent des F_0 inférieurs 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_0 également inférieurs à 0,5 Hz.

Le niveau maximal A_0 des rapports « H/V bruit de fond » a également été interpolé sur l'ensemble du territoire (**Figure 14**). Aucune des études numériques et des interprétations théoriques des phénomènes réalisées jusqu'à maintenant ne permettent d'accorder de signification physique à cette valeur A_0 . 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_0 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

figure 14
Nice - Amplitude A_0
du pic maximal entre
0,5 et 15 Hertz sur les
rapports « H/V bruit de
fond » (en Hertz).



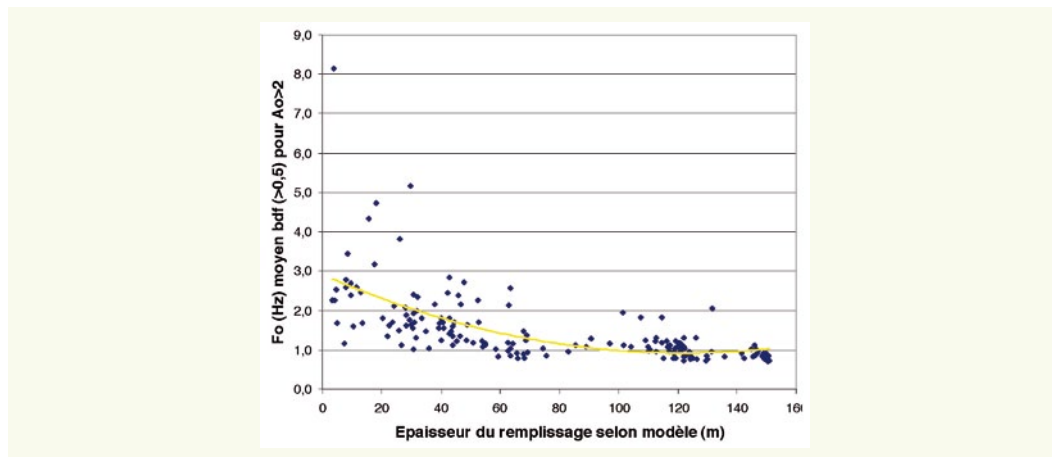
zones et certains bâtiments détruits. D'autre part, de forts dégâts se sont concentrés dans une zone où les amplitudes A_0 des courbes H/V étaient parmi les plus élevées comme le prévoient également les simulations numériques (Duval et al., 2001b ; Semblat et al., 2002). L'apport de la **figure 14** n'est donc pas forcément à négliger. Les valeurs maximales de A_0 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 et al., 2000).

› 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 (Ménéroud et al., 2000). Ce modèle a été réalisé en collectant et analysant les sondages géotechniques disponibles afin de caractériser les neuf couches géotechniques caractérisant le remplissage sédimentaire à Nice. Leur extension spatiale a ensuite été réalisée en prenant en compte les éléments géologiques et topographiques de surface et en exerçant un contrôle par des experts. Il faut rappeler ici que, 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). Le modèle développé couvre un vaste territoire, une géologie alpine complexe, en bord de mer. Les lentilles de sables, par exemple, n'y sont pas représentées. Dans les zones les plus profondes (autour du site NALS, par exemple), la connaissance est très limitée et l'interpolation est donc hasardeuse puisqu'aucun sondage n'a atteint le substratum. Si la profondeur finalement adoptée dans le modèle actuel paraît plausible aux experts, le modèle est en cours d'amélioration, notamment grâce à la technique du « bruit de fond en réseau » exposée plus loin.

La **figure 15** met en relation la fréquence du pic maximal des courbes « H/V bruit de fond » (lorsque le niveau A_0 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 15
Nice - Fréquence F_0 correspondant au maximum des courbes « H/V bruit de fond » entre 0,5 et 15 Hertz (lorsque ce maximum $A_0 > 2$) en relation avec l'épaisseur du remplissage (en m) dans le 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) dans les zones de remplissage sédimentaire a été simulée pour 1992 points repérés sur la **figure 16**. Ces points sont calés sur la grille de calcul du modèle géotechnique.

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_0 et A_0) entre 0,2 et 15 Hz ont été calculées comme pour le bruit de fond.

Les fréquences F_0 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 17**). De même, la **figure 18** illustre bien le fait que les fréquences de résonance issues de ces fonctions de transfert numériques 1D sont liées à l'épaisseur du remplissage.

Par contre, contrairement aux résultats issus du bruit de fond, le niveau A_0 de l'amplification des fonctions de transfert numériques croît systématiquement du centre des remplissages vers l'extérieur (de $A_0 = 3$ à $A_0 = 6,9$) comme le montre la **figure 19**. Les calculs effectués en prenant en compte non plus une colonne de sols mais des profils (2D) semblent mieux refléter le niveau d'amplification réel (Semblat et al., 2002).

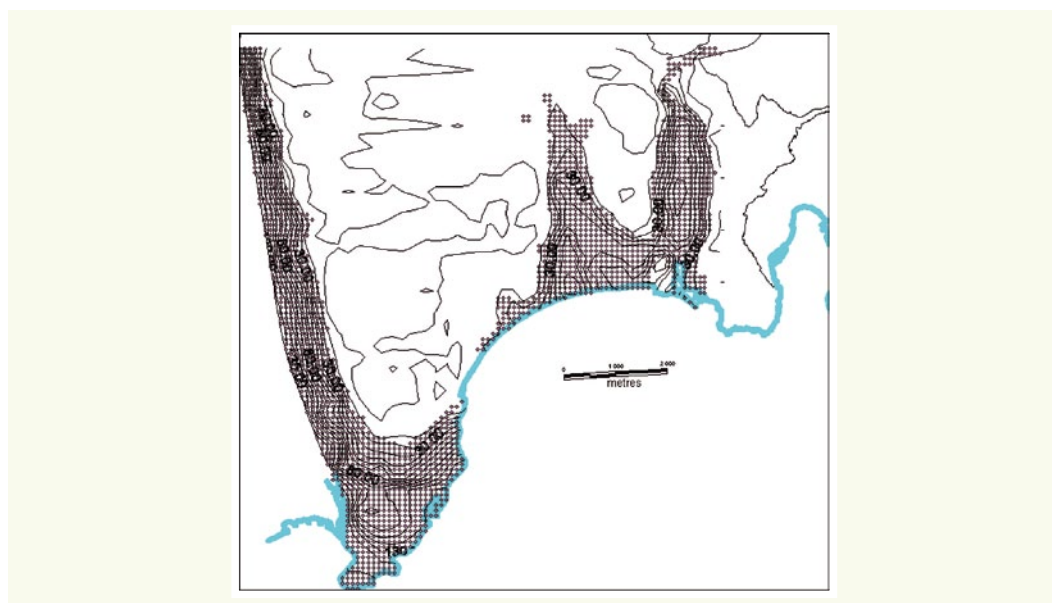


figure 16
Localisation des points de simulation 1D (carrés violets). Les courbes de niveau représentent l'épaisseur approximative du remplissage alluvial.

figure 17
 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.

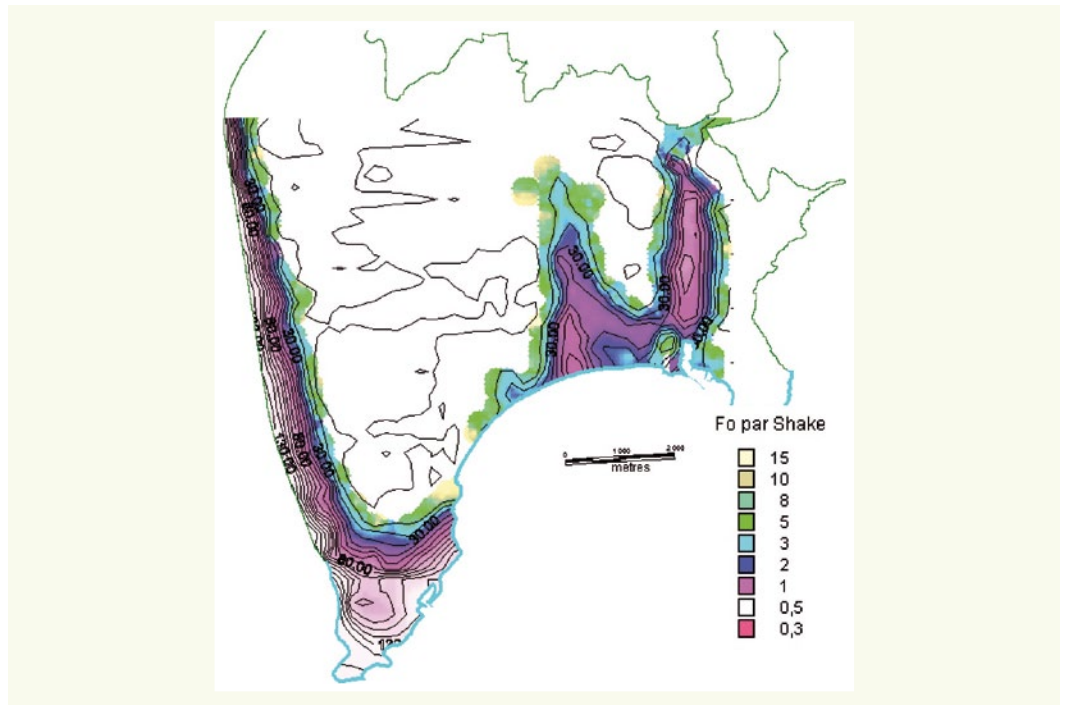


figure 18
 Nice - Fréquence F_o
 correspondant au
 maximum des fonctions
 de transfert (simulation
 1D) en relation
 avec l'épaisseur du
 remplissage (en m) dans
 le modèle géotechnique
 3D.

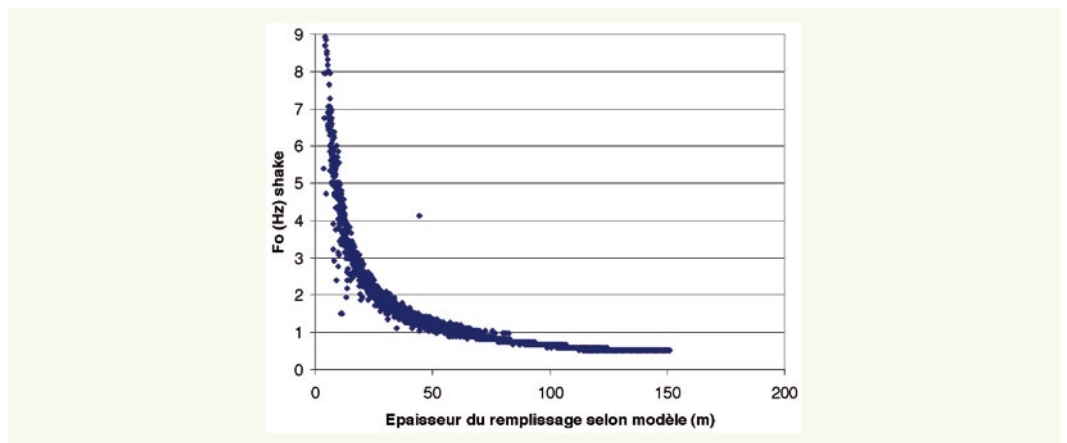
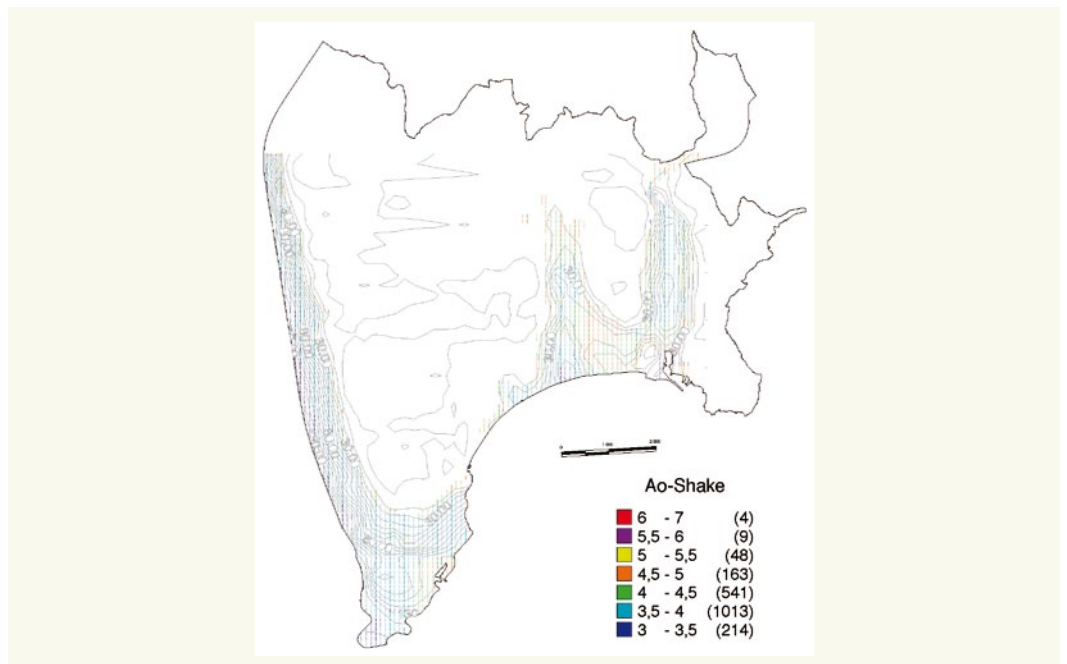


figure 19
 Nice - Interpolation des
 amplitudes maximale A_o
 des fonctions de transfert
 (simulations numériques
 1D) entre 0,2 et 15 hertz.
 Les courbes de niveau
 représentent l'épaisseur
 approximative du
 remplissage.



CONCLUSION

L'application à Nice de plusieurs techniques de détection des effets de site a permis de vérifier l'existence de phénomènes d'amplification, 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 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 Accélérométrique Permanent ;
- la méthode « H/V bruit de fond » a été appliquée sur près de 700 points 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 fréquence 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 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 simulée. Les fréquences de résonance ont été cartographiées à partir de ces résultats.

Par ailleurs des simulations numériques en 2 dimensions ont également été réalisées.

Les résultats des trois techniques (« site sur référence séisme » ; « H/V bruit de fond » et « simulation numérique ») confortent l'hypothèse d'effets 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 K.** (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors. *Bulletin Earthquake Research Institute, Tokyo Univ.*, 35, pp. 415-456.
- AKI K.** (1993). Local site effects on weak and strong ground motion. *Tectonophysics*, 218, pp. 93-111.
- BARD P.-Y. ET AL.** (2004). The SESAME project : an overview and main results. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, August 2004*, n° 2207.
- BARD P.-Y., BOUR M., DUVAL A.-M., MARTIN C., MÉNEROUJ J.-P., MOUROUX P., THIBAUT C., TERRIER M., VIDAL S.** (1995). Seismic zonation methodology on the city of Nice *Progress Report, 5th International Conference on Seismic Zonation, Nice, Vol III*, 36 pages.
- BARD P.-Y., DUVAL A.-M., BERTRAND E., VASSILIADES J.-F., VIDAL S., FOIN P., GUÉGUEN P., THIBAUT C., GUYET B., DUNAND F., BONNEFOY-CLAUDET S., MÉNEROUJ J.-P., VETTORI G.** (2005). 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, METATM, MEDD, CANCA), 52 pages, avril 2005.
- BARD P.-Y., MÉNEROUJ J.-P., ARNOULD M., DURVILLE J.-L., CARTIER G., COUDERCY L., PEREZ J.-L.** (1983). 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 S., COTTON F., BARD P.-Y.** (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review. *Earth-Sciences Review*, 79, pp. 205-227.
- BORCHERDT R.D., GIBBS J.F.** (1970). Effects of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am*, 66, pp. 467-500.
- DUVAL A.-M.** (1996). Détermination de la réponse d'un site aux séismes à l'aide du bruit de fond - Évaluation expérimentale. LCPC, Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°GT62, 264 pages.
- DUVAL A.-M., VIDAL S.** (1998). Microzonage de Tunis (Tunisie). Étude 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.
- DUVAL A.-M., VIDAL S.** (2003). 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, 41 pages.
- DUVAL A.-M., BARD P.-Y., LE BRUN B., LACAVE-LACHET C., Riepl J., Hatzfeld D.** (2001a) H/V technique for site response analysis synthesis of data from various surveys. *Boletino di Geofisica teorica ed Applicata*, Vol.42, N°3-4, pp. 267-280.
- DUVAL A.-M., CHATELAIN J.-L., GUILLIER B. ET AL.** (2004). Influence of experimental conditions on H/V determination using ambient vibrations (noise). *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, August 2004, n° 306.
- DUVAL A.-M., MÉNEROUJ J.-P., VIDAL S., BARD P.-Y.** (1996). 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.
- DUVAL A.-M., VIDAL S., MÉNEROUJ J.-P., SINGER A., DE SANTIS F., RAMOS C., ROMERO G., RODRIGUEZ R., PERNIA A., REYES N., GRIMAN C.** (2001b) Caracas, Venezuela : Site effect determination with microtremors. *Pure and Applied Geophysics, PAGEOPH*, Vol.158, n° 12, pp. 2513-2523.
- GEMITIS** (1994). Programme DIPCN/Méditerranée - Projet GEMITIS/Nice (1993-1996) : rapport 2^e année. Rapport BRGM-CETE Méditerranée au Ministère de l'Environnement, document public BRGM R38241, 94H270, 72 pages + annexes.
- KUDO K.** (1995). Practical estimates of site response, state of the art report. *Proceedings of 5th International Conference on Seismic Zonation*, 1995, Nice, France, 3, pp. 1878-1907.
- MÉNEROUJ J.-P., DUVAL A.-M., MICHEL C., THIBAUT C., VIDAL S., GASTAUT J.-L., TORTET A., DELGADO J., JESSIN T., SAILLET J.-F., TARTAR C.** (2000). GEM-GEP Phase I - Risque sismique sur Nice - Étude de scénarios de gestion de crise sismique - Définition de l'aléa, de la vulnérabilité et des enjeux. Rapport CETE Méditerranée, affaire n° 98740136, 139 pages + annexes.
- MOUROUX P., LEBRUN B., DEPINOIS S., BERTRAND E., MAZURE P.** (2004). *Projet européen RISK_UE : application à la ville de Nice* », rapport final BRGM/RP-53202-FR.
- NAKAMURA Y.** (1970). A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface. *Quarterly Report RTRI, Japan*, 30, pp. 25-33.
- NOGOSHI M., IGARASHI T.** (1970). On the propagation characteristics of microtremor. *Journal Seismological Society Japan*, 23, pp. 264-280.
- SCHNABEL P.B., LYSMER J., SEED H. BOLTON** (1972). SHAKE : a computer program for earthquake response analysis of horizontal layered sites. Report n° UCB/EERC-72/12, EERC, Univ. of California, Berkeley, 102 pages.
- SEMBLAT J.-F., KHAM M., PAOLUCCI R., DUVAL A.-M., BARD P.-Y.** (2012). Modélisation numérique des effets de site sismiques par approches modale et propagative. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (même numéro que le présent article).
- SEMBLAT J.-F., DUVAL A.-M., DANGLA P.** (2000). 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.
- SEMBLAT J.-F., DUVAL A.-M., DANGLA P.** (2002). 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.
- SINGH S.K., LERMO J., DOMINGUEZ T., ORDAZ M., ESPINOZA J.-M., MENA E., QUASS R.** (1988). 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. *Earthquake Spectra*, 4 (1988), pp. 653-673.