

# Une nouvelle méthode d'évaluation de la réponse des sols aux séismes par enregistrement du bruit de fond

## RÉSUMÉ

L'observation des séismes destructeurs montre que la violence du mouvement sismique peut varier selon le type de sols. La détermination de ces effets de site est l'un des éléments essentiels de la prévention parasismique, au travers du microzonage. La méthode classique pour mesurer expérimentalement les effets de site est basée sur l'enregistrement de séismes. Elle est certes fiable, mais sa lourdeur conduit à tester de nouvelles approches. La méthode originale, qui est évaluée ici, consiste à enregistrer quelques minutes de bruit de fond sismique sur un site et à effectuer le rapport spectral de la voie horizontale sur la voie verticale. Les résultats des différentes approches expérimentales et numériques ont été comparés sur de nombreux sites. La méthode « H/V bruit de fond » s'est avérée capable de fournir de précieuses indications sur les fréquences d'amplification, au moins pour les remplissages sédimentaires. Cette évaluation purement expérimentale de la méthode « H/V bruit de fond » a mis en évidence de nombreux atouts : rapidité, donc densité des mesures, faible coût en matériel et précision de la détermination des fréquences propres. Il s'agit donc d'une méthode économique pour mieux connaître l'aléa sismique dans les bassins sédimentaires, pouvant permettre l'obtention d'une cartographie des fréquences de résonance.

**MOTS CLÉS :** Sol - Évacuation - Essai - Séisme - Enregistrement - Bruit de fond - Séismologie - Effet de site - Microzonage sismique - Rapport spectral H/V.

**Anne-Marie DUVAL**

Docteur de l'université Pierre et Marie Curie

**Jean-Pierre MENEROUD**

Chef du groupe Géologie sols

**Sylvain VIDAL**

Technicien supérieur

Chargé du matériel sismologique

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Nice

**Pierre-Yves BARD**

Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées

Charge de mission Risques sismiques

Division Mécanique des sols et géologie de l'ingénieur

Laboratoire central des Ponts et Chaussées

## Objectifs

Les récents séismes meurtriers qui ont frappé Los Angeles en 1994 et Kobe en 1995 ont à nouveau illustré le fait que la prédiction des séismes est loin d'être effective. Le Japon et la Californie sont pourtant parmi les zones les plus étudiées par les sismologues. Pourtant, si on ne peut toujours pas prévoir quand aura lieu un séisme, différentes études permettent aujourd'hui de mieux connaître le mouvement sismique auquel on peut s'attendre en un endroit donné. Les recherches exposées ici s'inscrivent dans cette perspective.

L'observation des séismes a souvent montré que l'agressivité sismique peut être amplifiée par les conditions géomorphologiques locales (Aki, 1993 ; Steidl et al., 1995). Ces effets de site peuvent être liés à des phénomènes de résonance des ondes entre des formations de couverture meubles surmontant des terrains rigides. Le cas le plus célèbre est celui du centre de la ville de Mexico, construit sur un bassin argileux. Le séisme de Michoacan en 1985 a été considérablement amplifié dans cette zone par rapport aux terrains rocheux situés à proximité (Singh et al., 1988).

D'autres configurations géomorphologiques peuvent provoquer des amplifications des vibrations, comme des reliefs très accentués dans lesquels le signal sismique subit de fortes modifications. Quelle que soit la cause, ces amplifications se manifestent dans des gammes de fréquence propres à chaque site. Cette fréquence ainsi que le niveau de l'amplification par rapport au substratum sont des éléments très importants à connaître dans le cadre de la prévention parasismique. Leur connaissance permet une meilleure définition du mouvement attendu sur un site et donc une meilleure adaptation de la résistance des structures.

Diverses approches existent pour définir un effet de site. L'approche théorique nécessite une bonne connaissance de la nature et de la géométrie des terrains qui n'est pas toujours possible. La modélisation vient donc souvent en renfort d'une étude expérimentale qui consiste à « mesurer » sur le terrain la modification du signal sismique. Il s'agit d'enregistrer les vibrations provoquées par de petits séismes en différents points, puis de comparer la réponse des sites en choisissant un site de référence. Ces mesures sont nécessaires dans des zones vulnérables et donc souvent très urbanisées. Les nombreuses études effectuées aujourd'hui dans différentes villes du monde menacées par le risque sismique, y compris celle réalisées par le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Nice, mettent en évidence les difficultés rencontrées (exposées plus loin) et le coût de telles entreprises. Une nouvelle technique, beaucoup plus rapide à mettre en œuvre, a été récemment proposée. Il s'agit d'enregistrer quelques minutes de bruit de fond sismique et d'effectuer le rapport spectral de la composante horizontale par la composante verticale. La courbe résultante, appelée ici H/V, est censée mettre en valeur les caractéristiques de la modification du signal sismique par un site : la bande de fréquence concernée et, de façon plus hypothétique, le niveau atteint par l'amplification. Cette méthode, à la fois très attractive et controversée, nécessitait d'être évaluée.

Notre démarche, depuis 1991, a été de réaliser une comparaison expérimentale des résultats obtenus, d'une part, avec la méthode « H/V bruit de fond » et, d'autre part, avec les autres méthodes, dans des conditions très différentes. Les études de microzonage de Monaco, des bords du lac de Maracaibo et d'El Vigia 7(Venezuela), de Benevento (Italie) et de Nice (France) nous ont servi de base de comparaison.

Un bref survol des méthodes usuelles de détermination des effets de site est d'abord présenté ici. Puis, la méthode « H/V bruit de fond » est abordée. Une première étude de stabilité du bruit et des rapports H/V est ensuite présentée. Puis, des comparaisons de résultats sont établies pour

les effets de site les plus courants. Un nouveau type d'étude est proposé avec des interpolations spatiales des résultats obtenus à Nice. Enfin, des conclusions sont tirées à partir de l'ensemble des résultats acquis en quatre ans de recherche.

## Méthodes usuelles de détermination des effets de site

### Modélisations numériques

La modification du signal vibratoire par les dernières quelques dizaines à quelques centaines de mètres de la croûte terrestre a été l'objet de nombreuses études par des sismologues et des géotechniciens. Différents modes de calcul 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 plupart des types de phénomènes peuvent aujourd'hui être modélisés de façon plus ou moins satisfaisante. Cependant, la validité des résultats numériques dépend complètement de la qualité et de la quantité des paramètres géophysiques utilisés ; ce qui 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 les coûts relatifs à leur obtention rendent le plus souvent indispensable la mesure directe de l'effet de site sur le terrain. De plus, les résultats d'une expérimentation sont, de façon générale, mieux accueillis dans la pratique que ceux provenant des calculs.

### Méthode classique par enregistrement de la sismicité

L'autre approche pour déterminer les effets de site utilise donc la voie expérimentale. La méthode classique consiste à enregistrer des séismes sur différents sites représentatifs et à comparer les résultats avec une station de référence (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 et 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 (noté  $O_{ij}$ ) du séisme  $j$  sur le site  $i$  peut ainsi être présenté dans le domaine spectral par :

$$O_{ij}(f) = S_j(f) \cdot P_{ji}(f) \cdot H_i(f) \cdot I_i(f)$$

où  $S_j(f)$  contient l'effet de la source sismique elle-même,  $P_{ji}(f)$  l'effet de la propagation et  $H_i(f)$  la modification recherchée du signal en subsurface.  $I_i(f)$  correspond à la réponse instrumentale du matériel d'acquisition et  $f$  à la fréquence considérée.

Si la distance site/référence est faible par rapport à la distance épicentre/référence (au moins cinq fois plus faible), on considère que les effets de source  $S_j(f)$  et de propagation  $P_{ji}(f)$  sont identiques entre les stations. 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 directement l'effet de site au site  $i$ . La figure 1 donne un schéma de ce type d'étude.

Ce rapport spectral site/référence donne la signature spectrale du site. En fait, dans la pratique, on observe une dispersion notable de ce rapport spectral d'un séisme à l'autre (effet d'azimut, de source, de distance, de magnitude) : il faut donc obtenir un grand nombre de rapports et calculer un rapport moyen appelé la fonction de transfert du site. Cette fonction de transfert (sans dimension) sera ensuite appliquée au spectre du séisme de référence pour l'adapter aux conditions locales. La figure 2 montre, à titre d'exemple, les enregistrements effectués, en différents points de Nice (France), d'un séisme du golfe de Gênes. L'amplification du site ALS par rapport aux autres sites (surtout celui de référence) est évidente. Pour toutes les études de séismes et de bruit de fond qui sont évoquées ici, le matériel d'acquisition des données du LRPC de Nice est constitué par des enregistreurs numériques à supports magnéto-optiques, dotés d'une dynamique

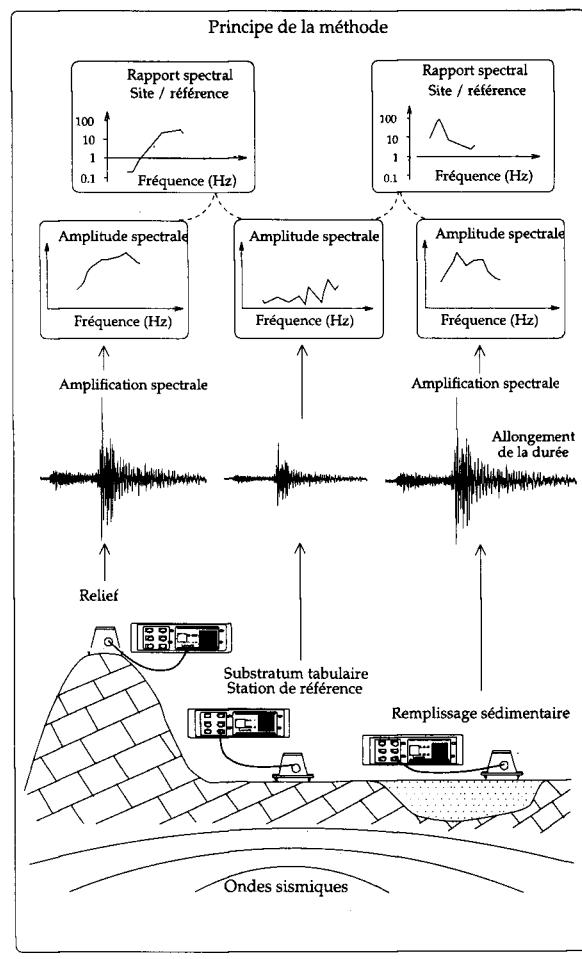


Fig. 1 - Principe de la méthode classique. Établissement des fonctions de transfert à partir de l'enregistrement de séismes en différents points. Les rapports spectraux ne sont retenus que lorsque les rapports signal/bruit sont supérieurs au moins à 3, à la fois sur le site et à la référence.

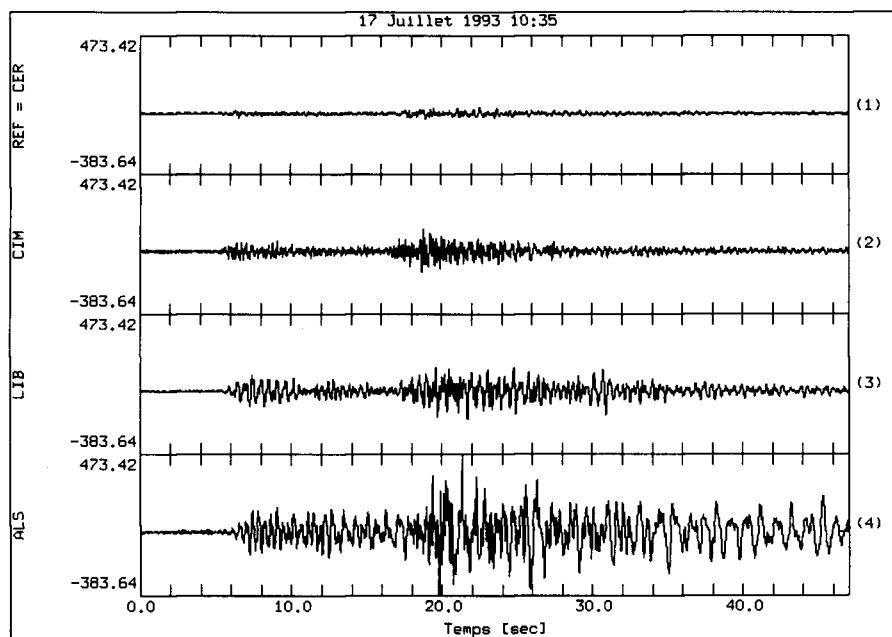


Fig. 2 - Voiles nord-sud des stations disposées à Nice, enregistrement du séisme du golfe de Gênes (17 juillet 1993,  $M=4.4$ ) distant de 100 km. La même échelle est appliquée à toutes les traces : ordonnées en micromètres par seconde, abscisses en secondes. La trace 1 est celle enregistrée à la station de référence au rocher sur le Mont Boron (CER ou BOR de la figure 3). La trace 4 provient d'un site sédimentaire du centre ville (ALS).

de 120 dB et liés à des capteurs de vitesse sismique. Ces capteurs sont des géophones tridirectionnels (vertical, nord-sud et est-ouest), de fréquence propre 0,5 ou 1 Hz. La plus petite vibration enregistrable est de l'ordre de 0,3 nm/s, la plus grande autour de 10 mm/s.

### **Limites de la méthode d'enregistrement de la sismicité**

Ce type d'opération d'enregistrement de la sismicité a longtemps été et est toujours considéré comme le moyen le plus fiable physiquement de déterminer les effets de site. Son application pratique appelle pourtant de nombreuses remarques dont les plus notables sont les suivantes.

**❶** Prévoir un mouvement fort à partir des relations établies en mouvement faible fait appel à une hypothèse de linéarité de comportement des sols. Cette hypothèse, souvent remise en cause, a été vérifiée, par exemple, lors du séisme de 1985 à Mexico (Bard, 1994). Elle semble, en général, plus valide pour des argiles plastiques, par exemple, que pour des sables lâches.

**❷** Les informations recueillies sont valables « ponctuellement » sur le site d'étude. Il faut de nouveau une bonne connaissance de la zone et des phénomènes en jeu pour étendre les résultats à des sites non instrumentés.

**❸** En ville, le rapport signal sur bruit peut être très pénalisant. Dans des zones dont la sismicité est modérée (comme l'ensemble du territoire métropolitain français), il est nécessaire de réaliser des enregistrements pendant une longue durée qui peut être encore allongée à cause du niveau de bruit. À Nice ou à Grenoble par exemple, six mois ont été nécessaires pour obtenir une quinzaine d'événements. Certaines bandes de fréquence peuvent être totalement polluées par ce bruit.

Ces inconvénients de la méthode expérimentale classique nous ont amené à tester, par comparaison, une nouvelle méthode basée sur l'enregistrement de bruit de fond sismique.

### **Méthode « H/V bruit de fond »**

La nature du bruit de fond sismique est une question posée depuis longtemps. Les perturbations atmosphériques sur les océans se propageant sur la surface de la croûte terrestre sont vraisemblablement à l'origine des longues périodes qui composent le bruit jusqu'à 5 s environ, tandis que les vibrations dues à l'activité humaine et industrielle forment la partie plus haute fréquence, appelée « microtremor » en anglais.

Des enregistrements de bruit en réseau (Aki, 1957) ont montré que ces vibrations plus hautes fréquences étaient composées d'ondes de surface (Rayleigh et Love).

Au Japon surtout, de nombreuses tentatives sont effectuées pour utiliser le bruit de fond comme moyen de détection des effets de site. Historiquement, la première méthode a consisté à interpréter directement le spectre de Fourier du bruit enregistré sur un site et à réaliser une classification (Kanaï et al., 1954). Le signal d'entrée est alors considéré comme un bruit blanc modifié par les terrains de surface. Le deuxième type d'utilisation du bruit de fond consiste à diviser le spectre du bruit obtenu sur un site quelconque par celui atteint sur une station au rocher. Dans ce cas, le signal au rocher est considéré comme le signal d'entrée (cf. revue dans Aki, 1993). Mais le problème de la nature et de l'identité des sources entre stations limite considérablement ces études. En fait, il semble difficile de séparer les effets de source des effets de site dans les résultats. De plus, certaines études montrent des désaccords entre les courbes issues du bruit de fond et les effets de site réellement observés (Udwadia et Trifunac, 1973).

La méthode originale d'utilisation du bruit de fond qui est étudiée ici a d'abord été proposée par Nogoshi et Igarashi (1970 et 1971). Cette méthode a été reprise et appliquée plus tard dans des zones urbanisées du Japon (Nakamura, 1989). En effectuant le rapport spectral des composantes horizontales de l'enregistrement de bruit sur la composante verticale (H/V), la fréquence de résonance des sites est censée être mise en évidence. La justification de la méthode par Nakamura peut être ainsi résumée : la division spectrale de la vibration horizontale par la voie verticale sert à éliminer l'effet des ondes de Rayleigh qui masquent l'information utile apportée principalement par des ondes de cisaillement.

Cette explication, très controversée, se place dans le contexte d'un milieu tabulaire simple. Elle implique plusieurs hypothèses souvent discutées. Donc selon Nakamura, le bruit est composé d'ondes de volume ayant des incidences proches de la verticale (qui entreront en résonance, principalement sur les voies horizontales) et d'ondes de Rayleigh dont les variations avec la profondeur sont supposées identiques sur toutes les voies. Pour obtenir une image de la modification du signal sismique, il suffit donc de « supprimer », dans la voie horizontale, la part du signal à la base due aux ondes de volume non réfléchies et celle résultant des ondes de Rayleigh, soit les deux parties qui composent le signal de la voie verticale en surface. Cette suppression se fait simplement par division des spectres correspondants.

De récents modèles numériques permettent une autre interprétation des phénomènes en jeu et se rapprochent beaucoup plus des premières explications fournies par Nogoshi et Igarashi. Le bruit de fond a été modélisé à partir des sources

en surface distribuées de façon aléatoire. Les rapports H/V qui en découlent mettent bien en évidence la fréquence de résonance du site, mais, pour des raisons tout autres que celles évoquées précédemment : les ondes émises par les sources superficielles sont essentiellement des ondes de surface, dont les ondes de Rayleigh pour la composante verticale. Dans un milieu tabulaire, la polarisation (rapport H/V) de ces ondes de Rayleigh dépend de la fréquence. En particulier, la composante verticale s'annule à proximité de la fréquence de résonance. Toutefois, cette explication conduit à un niveau théoriquement infini pour le pic du rapport H/V à cette fréquence, ce que dément l'expérimentation. Ces études numériques concluent finalement que le bruit de fond utile pour cette méthode est composé d'ondes de surface (Field et Jacob, 1993 ; Lachet et Bard, 1994). Par ailleurs, les comparaisons numériques et expérimentales effectuées dans trois villes du Mexique confirment la similitude entre les fonctions de transfert classiques et les rapports « H/V bruit de fond » (Lermo et Chavez Garcia, 1994).

Compte tenu de ces controverses, l'objet de notre travail a donc été une comparaison expérimentale entre les résultats des différentes méthodes. Trois paramètres ont été testés sur différents sites : la stabilité, la fréquence du pic et l'amplitude des rapports « H/V bruit de fond ».

## Étude de la stabilité du bruit de fond

La première condition de validation de la méthode « H/V bruit de fond » concerne sa stabilité. Les résultats doivent être identiques lorsque l'on répète les mesures sur un même point (stabilité dans le temps). En outre, des points de mesure disséminés dans une zone homogène doivent donner des résultats identiques (stabilité dans l'espace).

## Stabilité dans le temps

Depuis plusieurs années, de nombreuses campagnes de mesure de bruit ont été menées par le LRPC de Nice. Les conditions de toutes les études évoquées ici sont décrites dans Duval (1994).

La première d'entre elles, effectuée en 1991 à Nice, avait, entre autres objectifs, celui de l'étude de la stabilité du bruit. Un ensemble de onze stations d'enregistrement sismologiques numériques a été posé successivement sur treize sites (fig. 3). Le bruit de fond était enregistré régulièrement au moyen de capteurs de vitesse tridirectionnels, durant 40 s, simultanément par toutes les stations sur un même site, à différents moments du jour ou de la nuit. La fréquence d'échantillonnage de l'acquisition était de 125 Hz. Les stations étaient espacées de quelques dizaines de mètres dans un même site. La période de fonctionnement de l'ensemble du réseau variait de 1 à 3 j par site. Les sites étudiés sont volontairement très différents d'un point de vue géotechnique, comme on le verra plus loin. Mais les différences sont aussi notables en ce qui concerne le niveau d'exposition au bruit, ainsi que sa nature (selon la proximité du trafic routier ou le degré d'exposition à la houle, par exemple).

L'amplitude spectrale a été calculée pour chaque enregistrement par transformée de Fourier rapide. Sur un même point (une station sur un site), l'ensemble des spectres successifs montre des variations qui peuvent être importantes, notamment entre les périodes diurnes et nocturnes. L'exemple du lycée Masséna (site LYC) est très caractéristique. Les variations spectrales pour une même composante sont importantes, aussi bien de jour que de nuit (fig. 4 a et b). Les voies nord-sud donnant les mêmes résultats que les voies est-ouest, seuls les résultats est-ouest sont montrés ici.

Le niveau moyen du spectre varie du simple au triple entre les deux périodes. Pourtant, aucun bruit n'était généré à moins de 50 m pour ce site.

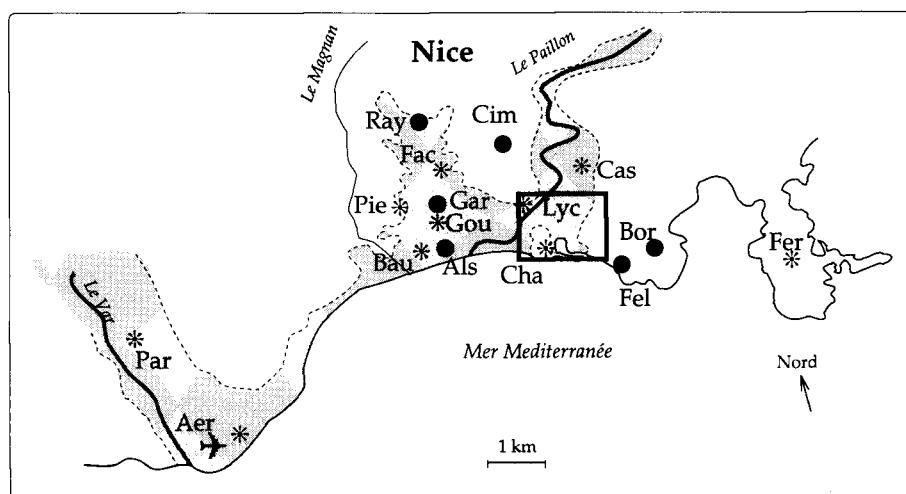


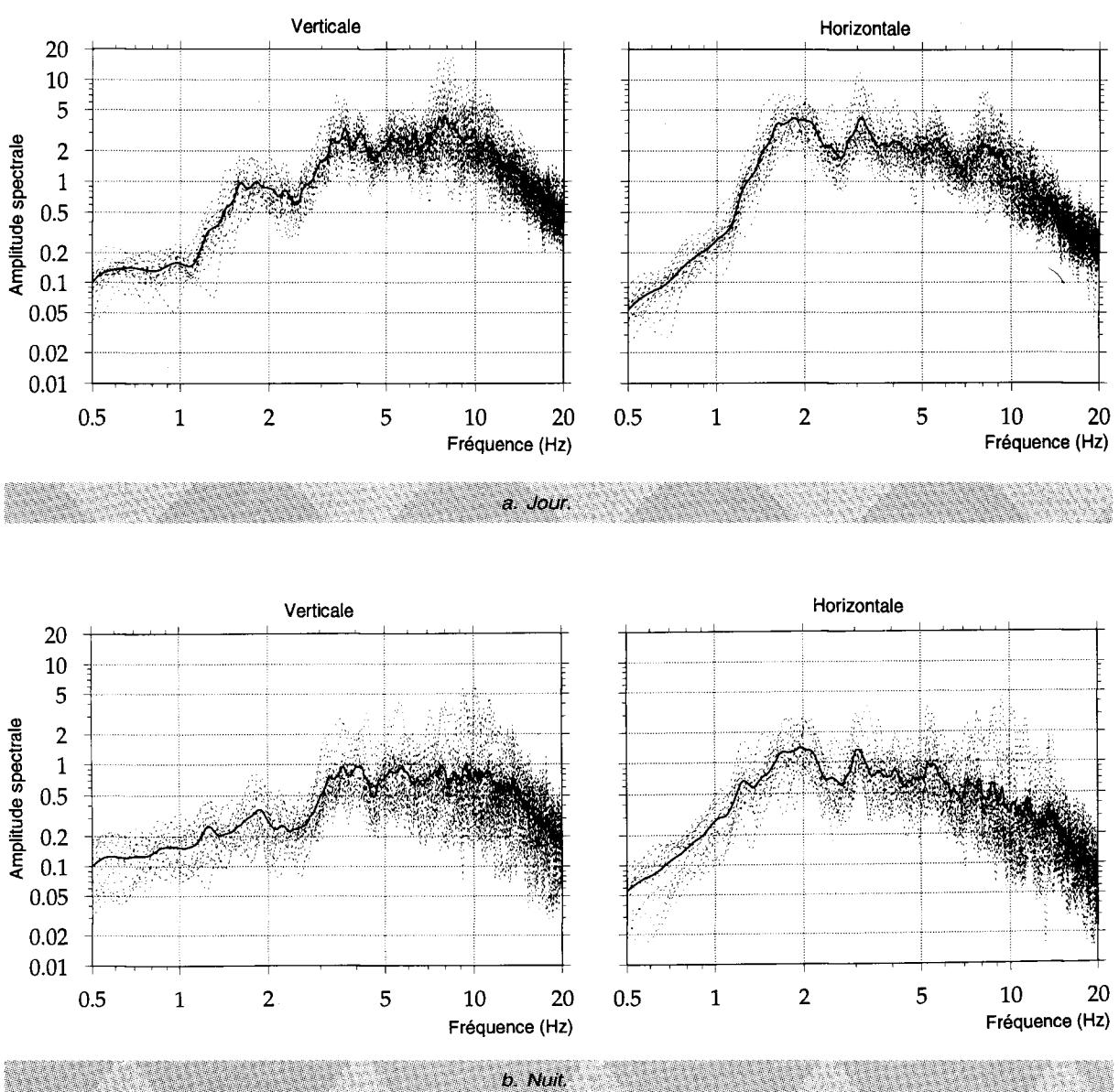
Fig. 3 - Sites explorés à Nice par bruit de fond ou sismicité. La couverture sédimentaire est en grise.

\* : enregistrements du bruit de fond en 1991-1992.

● : bruit de fond + sismicité 1993-1994.

Le rectangle limite l'aire géographique de l'étude du quartier du port décrite dans le paragraphe « Interpolations spatiales ».

**Fig. 4 - Bruit de fond sur le site LYC. Spectres pour vingt enregistrements du bruit.  
Moyenne en gras. Données pour un seul enregistreur**



Par contre, les rapports H/V (H étant une moyenne des spectres des voies horizontales et V des voies verticales) effectués à partir de ces spectres donnent des résultats qui peuvent être considérés comme particulièrement stables, jusqu'à 10-15 Hz (fig. 5 a et b). Un pic se détache spécialement à 1,7 Hz dans les rapport H/V issus de ce site (la fréquence à laquelle se distingue ce pic varie avec les sites). La différence entre les résultats de jour et de nuit disparaît.

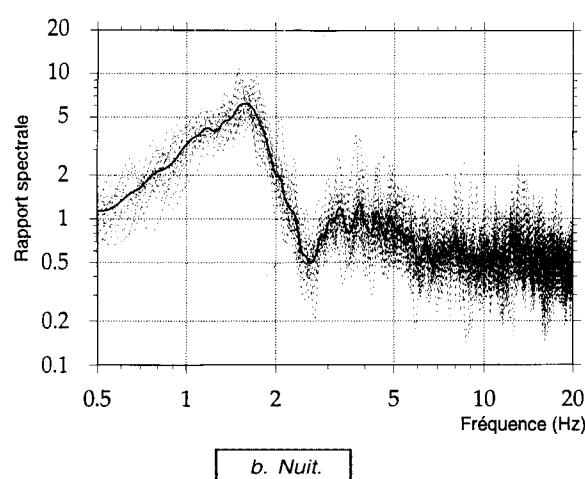
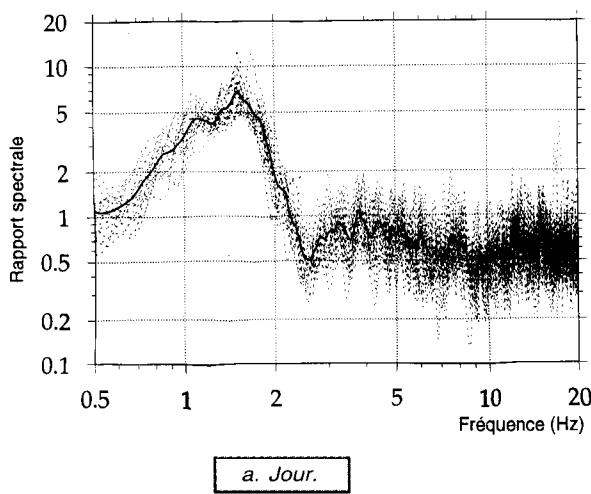
Ce résultat tend donc à montrer que le rapport « H/V bruit de fond » est relativement stable dans le temps, même lorsque le spectre lui-même varie (c'est-à-dire le niveau de bruit).

### Stabilité dans l'espace

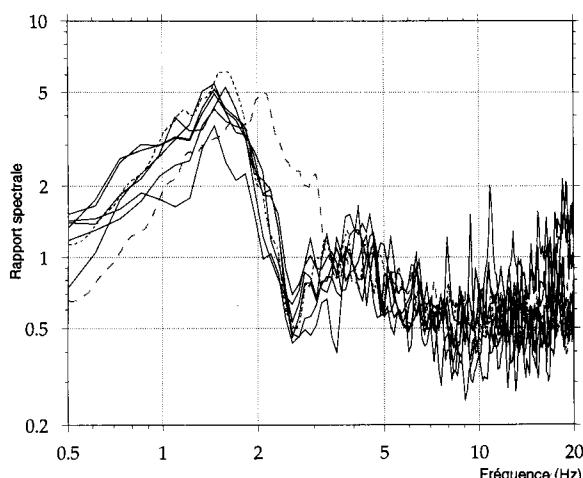
Pour étudier la stabilité spatiale, plusieurs stations ont été disposées le long de la cour intérieure du lycée, à intervalle croissant de 5 à 15 m depuis la station centrale. Un rapport H/V moyen est calculé par station d'enregistrement à partir de nombreux enregistrements (fig. 6).

Les rapports H/V de la figure 6 donnent des pics semblables, à la même fréquence précisément, sauf pour une station qui pointe une fréquence un peu plus haute (2,1 Hz). Il est intéressant de remarquer que cette station était la plus éloignée des autres dans l'alignement : les conditions géotechniques, communes pour les autres stations, sont peut-être légèrement différentes pour celle-là.

### Bruit de fond sur le site LYC



**Fig. 5 - Rapports H/V (sans dimension) pour vingt enregistrements du bruit. Moyenne en gris. Données pour un seul enregistreur.**



**Fig. 6 - Chaque courbe représente le rapport « H/V bruit de fond » moyen calculé pour un enregistreur. Les rapports en pointillés et en trait viennent de stations de facture différente et éloignées des autres.**

Pour chacun des autres sites sédimentaires étudiés à Nice, lorsque les conditions géotechniques de surface sont homogènes, la courbe « H/V bruit de fond » s'est avérée stable dans l'espace sur des distances de l'ordre de 100 m (Duval, 1994).

### Les différentes approches sur des sites caractéristiques

Nous avons voulu, dans cette phase de validation expérimentale, vérifier la méthode sur trois types de sites simples.

- Sur les sites de type sédimentaire à fort contraste mécanique, on attend une amplification du signal à une fréquence particulière (dépendant à la fois de l'épaisseur et de la rigidité des sédiments). Les remblais anthropiques sont propres à provoquer de telles amplifications.
- La deuxième catégorie est celle des sites qui ne modifient pas le signal.
- La troisième regroupe les sites rocheux dont le relief provoque des modifications de signal.

### Terrains meubles sur substratum rigide

Cette catégorie regroupe des sites d'origine et de composition très diverses, ayant pour point commun, un contraste d'impédance mécanique important entre les terrains de couverture et le substratum.

Sur pratiquement tous les sites de cette catégorie étudiés à Nice et à Monaco, un pic net dans les rapports « H/V bruit de fond » a été mis en évidence. La plupart du temps, des calculs simples ont permis de confirmer que la fréquence concernée correspondait à la fréquence à laquelle l'amplification du signal sismique était attendue. Ainsi, sur le site du lycée Masséna examiné auparavant, une cinquantaine de mètres de remplissage alluvial recouvre un substratum plus rigide et forme le lit du Paillon (fleuve qui traverse Nice). Les calculs simples de fréquence de résonance conduisent, pour des valeurs plausibles de la vitesse des ondes de cisaillement (environ 300 m/s), à la même valeur que celle observée dans les rapports H/V autour de 1,5 Hz. De même, sur le site de la caserne de gendarmerie (CAS), où le remplissage est plus profond, la fréquence de résonance estimée par calcul autour de 1 Hz correspond bien au pic trouvé dans les rapports « H/V bruit de fond ». Ces comparaisons sont encourageantes. Mais les données géotechniques disponibles ne sont pas suffisamment précises pour assurer des estimations théoriques fiables de la fréquence de résonance et pour valider ainsi la méthode « H/V bruit de fond ».

Aussi, les résultats les plus significatifs ont-ils été obtenus après enregistrement de la sismicité (Duval et al., 1994).

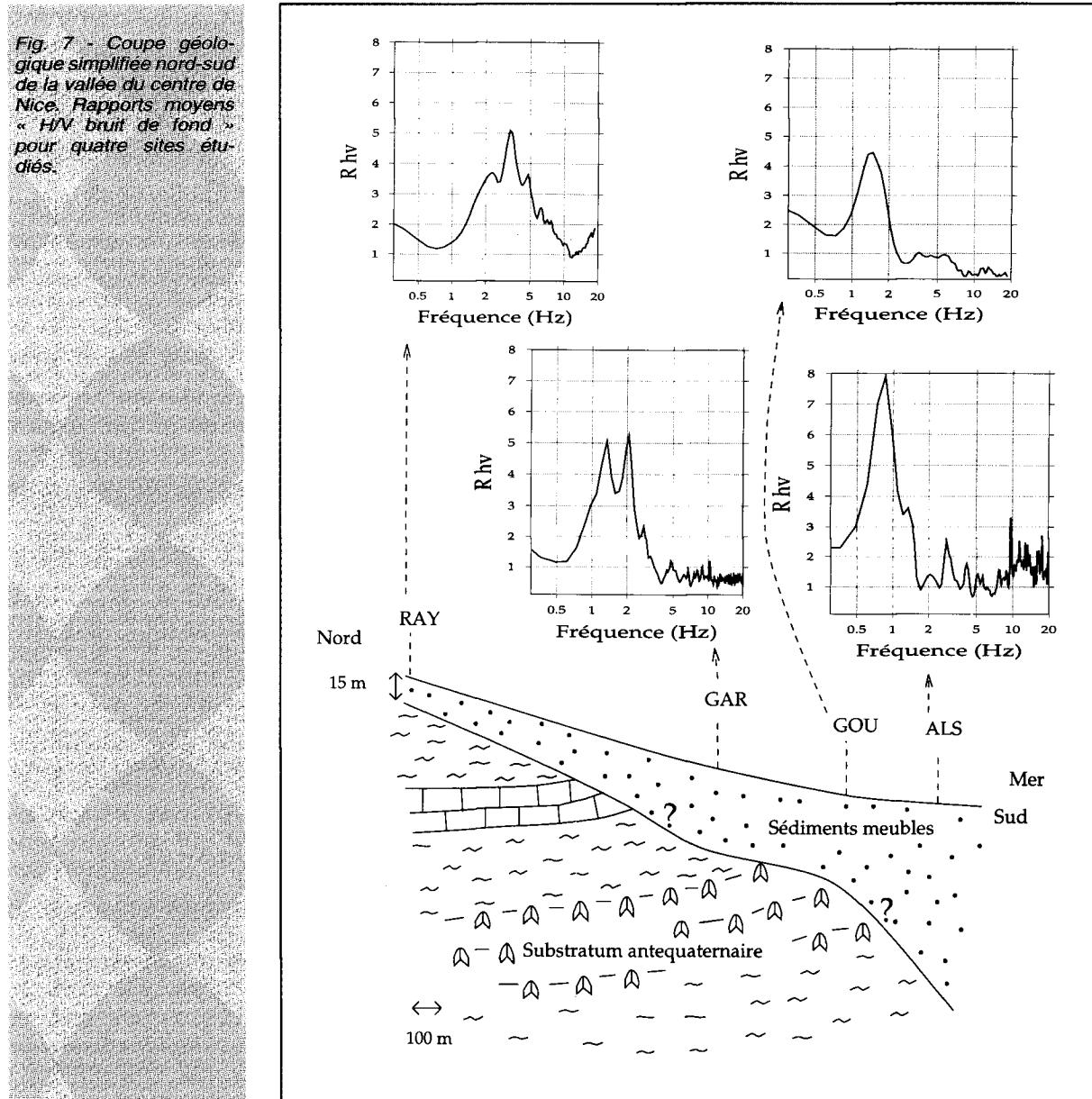
Le bruit de fond a d'abord été enregistré sur les trois sites RAY, GAR et ALS qui sont alignés selon l'axe nord-sud de la vallée du centre de Nice. Cette vallée est comblée par des matériaux relativement meubles par rapport à la base rocheuse (fig. 7). L'épaisseur de ce remplissage croît en direction de la mer, depuis 15 m environ (sur le site RAY) jusqu'à une centaine de mètres (selon les estimations géologiques concernant le site ALS au sud).

La figure 7 permet de vérifier que les rapports moyens « H/V bruit de fond » de chacun des quatre sites étudiés sur le profil donnent des pics caractéristiques. La fréquence à laquelle se produit ce pic est totalement compatible avec l'effet de résonance attendu : depuis 3,5 Hz au nord

(RAY), la fréquence décroît au centre (GAR) entre 1 et 2 Hz pour donner, au sud, le pic le plus élevé à la fréquence la plus basse 0,8 Hz (ALS). Ces résultats ont paru si intéressants qu'une étude de la sismicité sur cette zone a été réalisée à partir de 1993 et durant plus d'un an, afin de déterminer les fonctions de transfert obtenues par enregistrement de séisme suivant la méthode classique. Une station de référence a été choisie au rocher (site BOR sur la figure 3). La figure 2 montre l'un des événements enregistrés sur ces stations et souligne l'importance de l'amplification exercée par le site ALS sur le signal sismique par rapport aux autres sites et surtout par rapport à la référence. Le rapport entre les vitesses maximales enregistrées est supérieur à 10.

Sur la figure 8 sont tracés les rapports spectraux, par rapport à la référence, issus de tous les séismes enregistrés pour les voies nord-sud de trois sites examinés (ALS, GAR et RAY).

*Fig. 7 - Coupe géologique simplifiée nord-sud de la vallée du centre de Nice. Raports moyens « H/V bruit de fond » pour quatre sites étudiés.*



L'amplification est effectivement la plus importante sur le site ALS, où elle commence autour de 1 Hz. Par contre, contrairement aux rapports H/V provenant du bruit de fond, le niveau de l'amplification des fonctions de transfert issues de la sismicité reste élevé au-delà de cette fréquence. On peut avancer le principe que cette fréquence est bien celle qui correspond à la fréquence principale de résonance du site, mais que des phénomènes de diffraction des ondes, dus aux bordures est-ouest du bassin, prolongent cette amplification dans les hautes fréquences. En attendant l'enregistrement de mouvements forts dans cette vallée, l'hypothèse d'une amplification large bande sera retenue. Au point central du profil (GAR), l'amplification commence à 1,5 Hz, comme pour la méthode « H/V bruit de fond ». Le site où les alluvions sont les plus superficielles

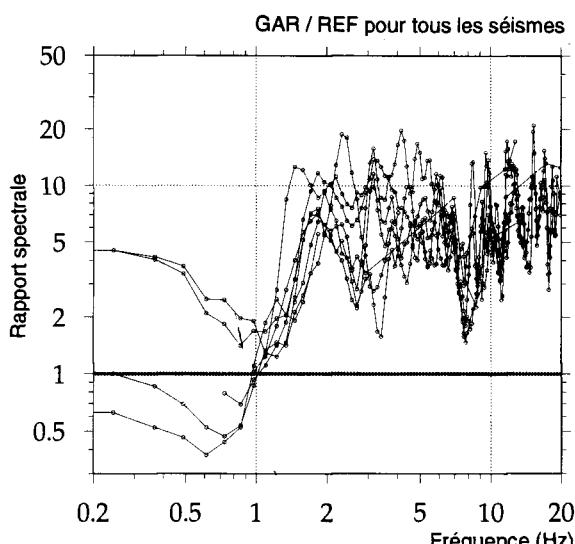
(RAY) présente les caractéristiques d'un site « bruité » et illustre bien les inconvénients de la méthode classique : sur la figure 8, les points correspondant aux rapports spectraux site/référence ne sont tracés que lorsque le rapport signal sur bruit est supérieur à 5. Seuls trois séismes sont visibles sur ce site et peu de points y sont disponibles, surtout en basse fréquence. Un des événements permet toutefois d'avancer la possibilité d'une amplification du signal à partir de 3-4 Hz, conformément aux résultats du bruit de fond.

### Remblais anthropiques

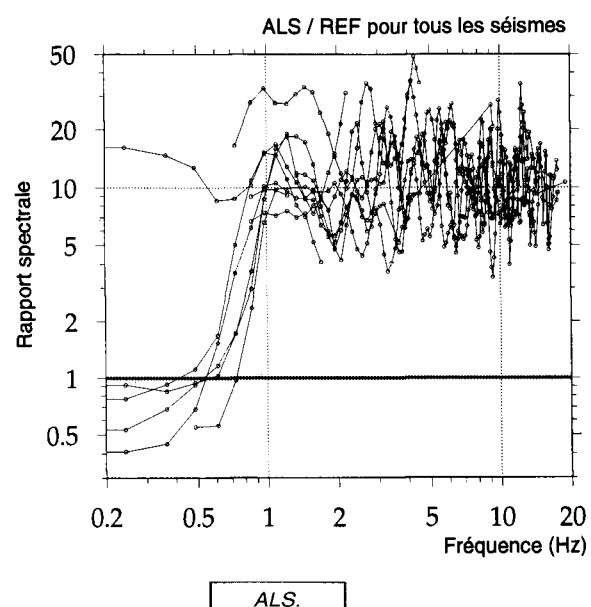
Lors du microzonage effectué à Monaco en 1991 (Duval, 1994), un site a été spécialement étudié : le terre-plein de Fontvieille. Cette zone est constituée par des remblais (concassés, galets, sables)

**Fig. 8 - Rapports spectraux issus des enregistrements de séismes sur trois stations de la vallée du centre de Nice**

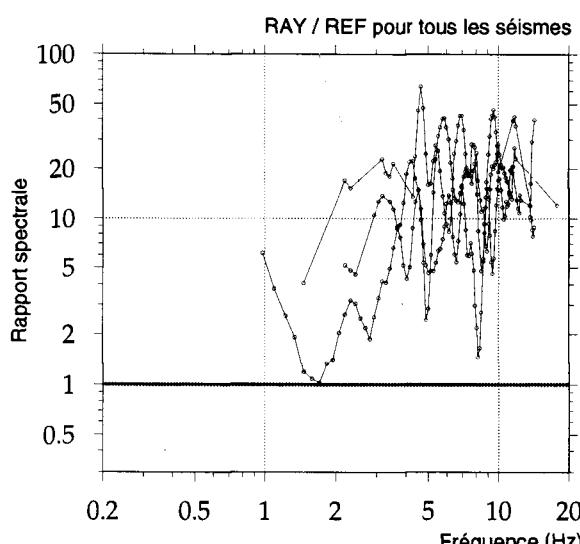
Les rapports spectraux des voies nord-sud sont calculés par rapport à la référence pour tous les séismes enregistrés. Les points ne sont tracés que lorsque le rapport signal/bruit est supérieur à 5 sur le site et à la référence.



GAR / REF pour tous les séismes



ALS.



RAY.

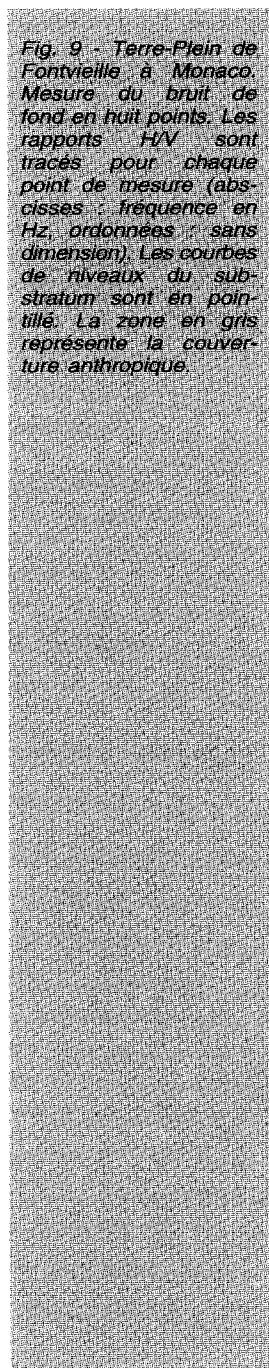
gagnés sur la mer (fig. 9). Le contraste mécanique avec le substratum est connu et quantifié de manière satisfaisante. On dispose à cet endroit de données géophysiques permettant des modélisations fiables.

Les simulations numériques réalisées, tant unidimensionnelles que bidimensionnelles, ont mis en évidence une fréquence de résonance autour de 2 Hz. Le niveau de l'amplification par rapport au rocher atteindrait 5 à 10 sur la partie la plus épaisse du remblai (site 1 de la figure 9).

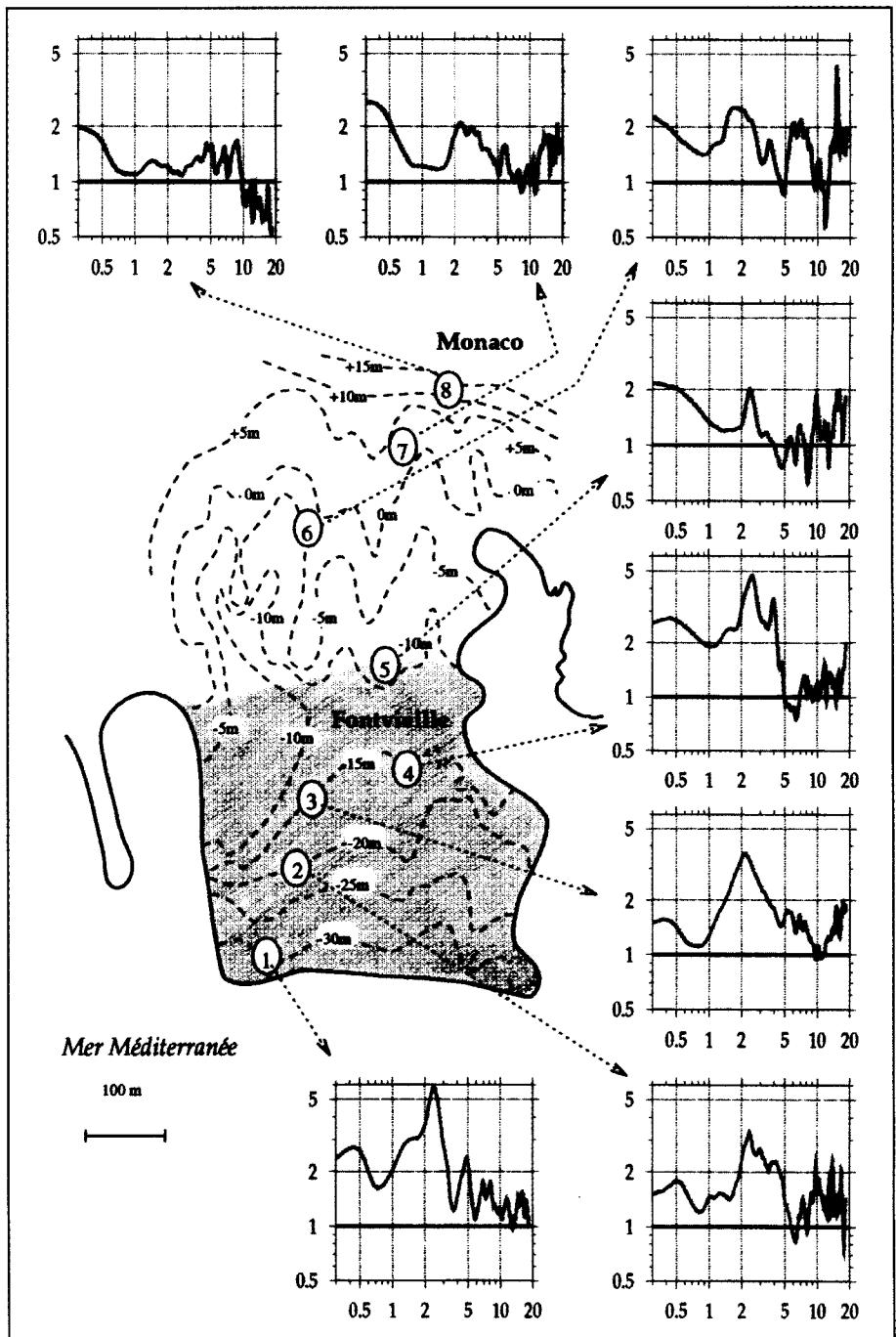
La sismicité a été enregistrée sur ce site et les rapports spectraux ont été effectués par rapport à une référence au rocher. Les résultats sont assez dispersés et bruités, toutefois, l'ensemble des courbes montre une amplification en basse fréquence.

Le bruit de fond a été mesuré en plusieurs points du même remblai. Les rapports H/V obtenus confirment tout à fait les effets de site prévus par la modélisation et l'enregistrement de séismes. Sur le site 1 de la figure 9, un pic très net se détache à 2 Hz avec un niveau voisin de 6. Tant que les points de mesure se situent sur le remplissage anthropique (zone en grisé), ce pic apparaît plus ou moins nettement (sites 1, 2, 3 et 4). Par contre, à partir du point 5, la couverture anthropique disparaît et, avec elle, le pic de résonance.

Cette série de mesures permet de se rendre compte des capacités de la méthode « H/V bruit de fond » pour ce type de configurations géotechniques : précision dans la définition du pic de résonance en fréquence, rapidité et économie.



*Fig. 9 - Terre-Plaine de Fontvieille à Monaco. Mesure du bruit de fond en huit points. Les rapports H/V sont tracés pour chaque point de mesure (abscisses : fréquence en Hz, ordonnées : sans dimension). Les courbes de niveaux du substratum sont en pointillés. La zone en gris représente la couverture anthropique.*



## Terrains sans amplification du signal

Pour valider la méthode « H/V bruit de fond », il faut s'assurer de ses résultats concernant la définition des pics d'amplification, ce qui vient d'être vu ; mais il faut également vérifier qu'aucun pic n'apparaît en l'absence d'effet de site. Les campagnes de mesure de la sismicité et du bruit, réalisées en 1992 au Vénézuela, se prêtent bien à cette vérification.

Les sites étudiés sur la côte orientale du lac de Maracaibo ne présentent pas de fort contraste mécanique entre, d'une part, le substratum géologiquement identifié sur lequel reposait la station de référence et, d'autre part, les terrains de couverture plus récents. L'ensemble des terrains est composé de grès sableux, plus ou moins argileux. Les séismes enregistrés délivrent des fonctions de transfert que l'on peut qualifier de « plates » par rapport à celles qui ont été montrées pour des sites à fort contraste mécanique. S'il a fallu plus d'un mois et un déploiement matériel et technique important pour obtenir ces informations, il a suffi d'une journée pour enregistrer le bruit de fond sur les mêmes sites. Les rapports « H/V bruit de fond » délivrent eux aussi des courbes plates sur les sites étudiés. La figure 10 montre les résultats d'un site représentatif de cette étude, puisque les courbes obtenues sont plates quelle que soit la technique employée. Les rapports « H/V bruit de fond » sont également autour de l'unité, en général, pour les sites rocheux plats pris comme référence à Nice et à Monaco. La conclusion de cette expérimentation est donc que les rapports « H/V bruit de fond » ne montrent pas d'amplification lorsque les fonctions de transfert par sismicité sont plates.

## Zones de relief

Le cas des zones de relief doit être traité à part. En effet, la justification théorique, quant à l'applicabilité de la méthode « H/V bruit de fond », peut sembler beaucoup moins claire pour les effets de la topographie que pour ceux dus aux simples contrastes de formations. Toutefois, même si on ne peut pas encore les expliquer définitivement, les quelques mesures comparées de bruit et de séismes effectuées jusqu'ici ne sont pas intéressantes. Les courbes obtenues sur ces sites ne sont pas tracées ici pour des raisons de place. Tous les résultats concernant les expérimentations dans la vallée de la Roya peuvent être vus dans Nechtschein *et al.* (1995) pour les enregistrements de séismes et dans Duval (1994) pour le bruit. Sur ce dernier site, l'enregistrement des séismes montrait une très forte amplification de la partie haute du relief par rapport aux stations disposées sur les flancs de la montagne, entre 3 et 5 Hz surtout. Les courbes « H/V bruit de fond »

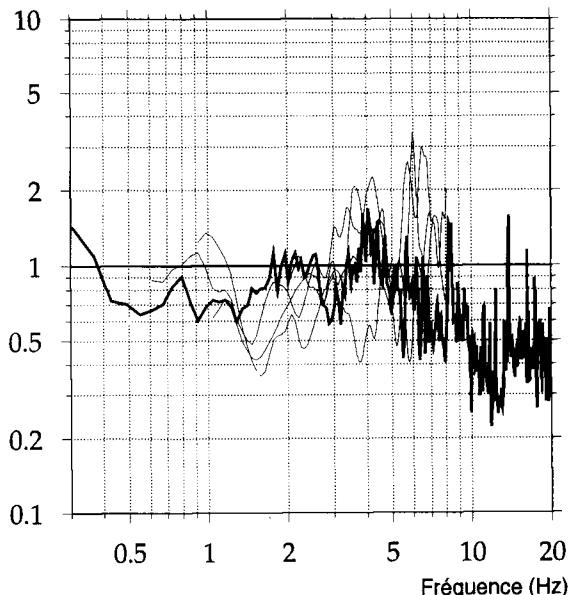


Fig. 10 : Exemple de résultats d'enregistrement de la sismicité et du bruit sur un site de la côte orientale du Lac de Maracaibo. En gras : « H/V bruit de fond » (donnée sans dimension). En traits fins : rapports spéciaux des voies est-ouest par rapport à la référence pour chaque séisme (donnée sans dimension), traces seulement lorsque le rapport signal/bruit est supérieur à 4 sur le site et à la référence.

sont effectivement plus élevées sur cette partie haute qu'ailleurs. Les fréquences d'amplification correspondent également assez bien (bien qu'une autre amplification à 12 Hz apparaisse avec H/V). Néanmoins, les niveaux atteints sont beaucoup plus importants dans les fonctions de transfert que dans la méthode « H/V bruit de fond ». L'absence de station de référence très fiable complique l'évaluation. Globalement, la comparaison entre les deux techniques demeure encourageante. La conclusion provisoire est que le bruit de fond semble bien contenir une partie au moins de l'information concernant l'amplification due aux sites topographiques, mais que de nouvelles évaluations sont nécessaires sur d'autres sites.

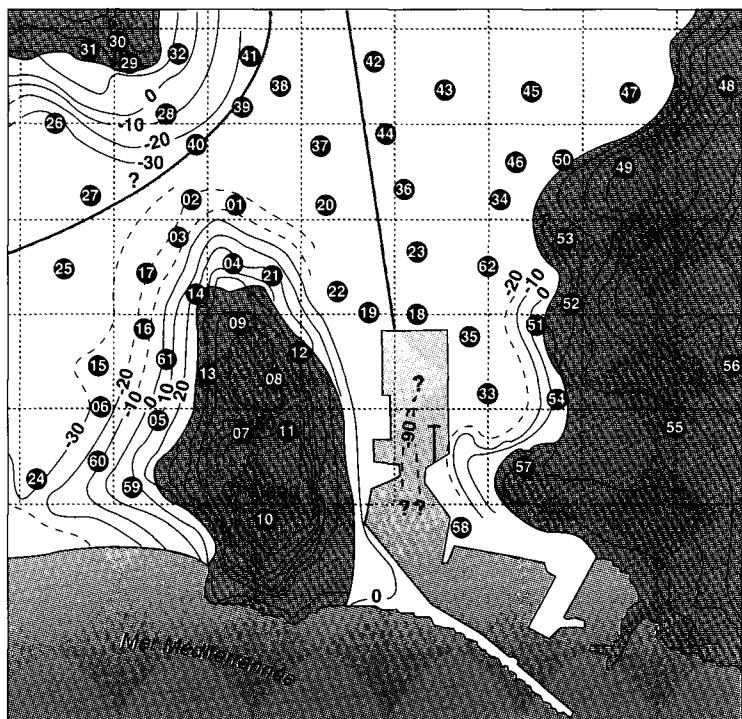
## Interpolations spatiales

Les exemples précédents montrent l'adaptation de la méthode aux besoins du génie parasismique, au moins pour définir la fréquence de résonance. Nous avons décidé de tirer partie de ses avantages pour mettre en place une nouvelle technique de microzonage. Ces avantages sont, d'une part, la rapidité d'exécution entraînant un faible coût et permettant d'effectuer un nombre important de mesures, aussi denses que souhaitées et, d'autre part, la précision en fréquence de la définition du pic de résonance.

## Quartier du port de Nice

**Fig. 11 -** Le substratum rocheux est affleurant sur les zones en gris (pratiquement toujours des reliefs). Courbes de niveaux connues du substratum en traits pleins, supposées en pointillés. Fond de plan d'après Pline (1990). Situation des points de mesure du bruit de fond dans les cercles blancs. Représentation approximative du cours actuel du Paillon en traits ondulés, cours ancien supposé en traits ondulés pointillés. Chaque carreau a 200 m de côté.

Fig. 11.



**Fig. 12 -** « EO/V bruit de fond ». Cartes d'interpolation. Rappel : l'interpolation « aveugle » n'est à considérer que dans les zones où la densité de mesures est importante. Les valeurs en bordure de carte ou dans le port, entre autres, ne doivent donc pas être prises en compte.

a. Carte d'interpolation de la fréquence à laquelle se produit la plus grande amplification entre 0,5 et 10 Hz dans les rapports « EO/V bruit de fond ».

b, c, d et e. Cartes d'interpolation de l'amplification maximale dans la bande de fréquence concernée dans les rapports « EO/V bruit de fond ».

Fig. 12a.

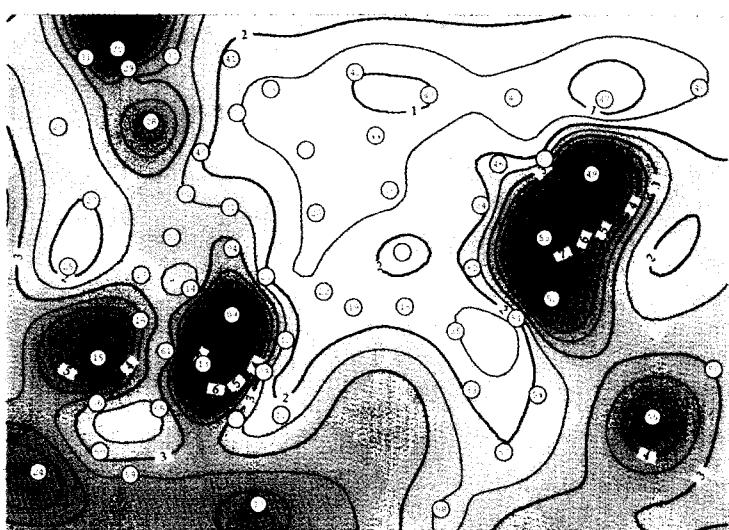
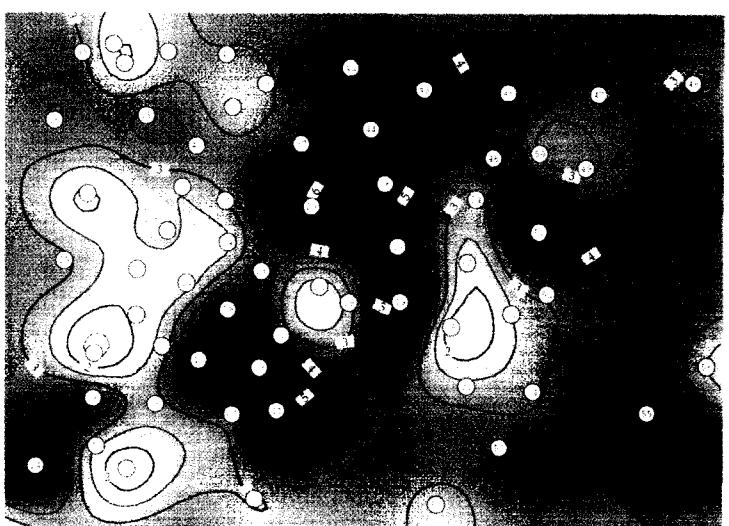
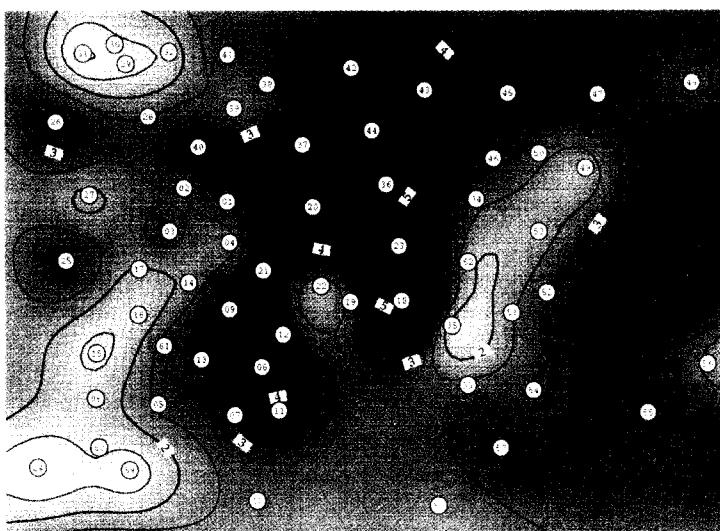


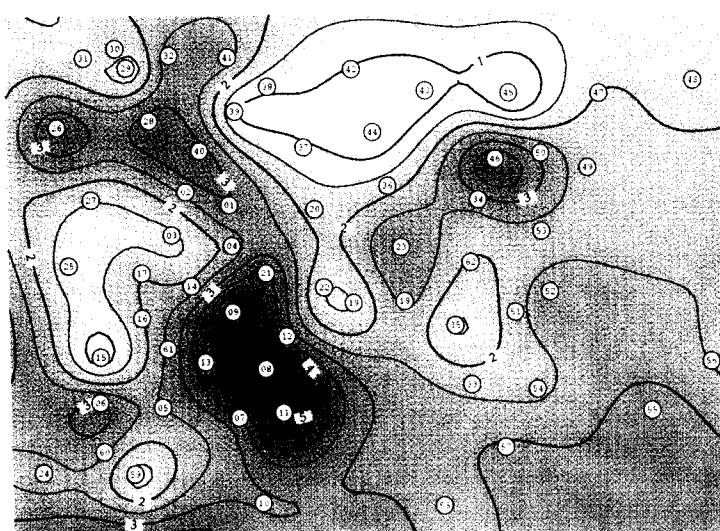
Fig. 12b.  
(entre 0,5 et 10 Hz).



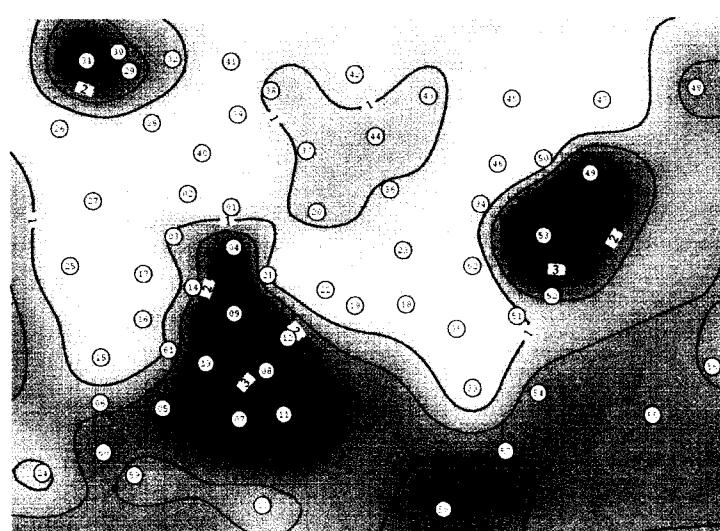


Quartier du port de Nice

**Fig. 12c.**  
(entre 0,5 et 2 Hz).



**Fig. 12d.**  
(entre 2 et 3 Hz).



**Fig. 12e.**  
(entre 8 et 10 Hz).

Le principe ici n'est plus de définir l'effet de site en un point et d'étendre cet effet par des études géotechniques, mais de mesurer la réponse individuelle de chaque point de façon suffisamment dense pour permettre une interpolation « aveugle ». Les logiciels utilisés pour réaliser ces calculs d'interpolation sont liés aux méthodes de Smith et Wessel (1990).

Le quartier situé au nord du port de Nice a été choisi comme « zone pilote » pour la mise au point de cette technique (zone encadrée dans la figure 3). En effet, ce quartier contient, dans moins de 3 km<sup>2</sup>, des conditions de subsurface très contrastées, devant amener des réponses aux séismes très variées, aussi bien en fréquence qu'en amplitude. La figure 11 donne une approche de la topographie du substratum. Les collines rocheuses bordent la zone à l'est et au nord-ouest. L'éperon rocheux du château au centre, aux parois abruptes, pourrait provoquer des amplifications topographiques. Les remplissages alluvionnaires liés à l'ancien et au nouveau cours du Paillon n'ont pas les mêmes épaisseurs selon les zones.

Le bruit a été mesuré en soixante-deux points durant une dizaine de minutes à chaque fois. L'ensemble des opérations de terrain s'est déroulé entre 21 h et 2 h du matin (pour éviter les bruits trop proches) et a nécessité quatre nuits.

Les rapports « H/V bruit de fond » moyens pour chaque site correspondaient, en général, bien aux fonctions de transfert attendues d'après les connaissances géologiques, sauf pour quelques exceptions au rocher. Les cartes commentées ci-dessous se rapportent aux rapports est-ouest/vertical. Chacun des rapports a été analysé d'abord entre 0,5 et 10 Hz. La fréquence F à laquelle se produit l'amplification maximale dans cette bande de fréquence est retenue. F est ensuite interpolée et extrapolée sur l'ensemble de la zone, donnant ainsi une carte de fréquence (fig. 12a). Sur les cartes de la figure 12, les sites sont toujours repérés dans les cercles blancs, les courbes de niveaux (avec les étiquettes dans des carrés blancs), ainsi que le dégradé de couleur indiquent la valeur de l'interpolation (en Hertz pour la figure 12a, en amplitude spectrale pour les autres). Plus la couleur est foncée, plus la valeur interpolée est élevée. Bien entendu, plus les points de mesure sont écartés, moins le résultat de l'interpolation est crédible. C'est, notamment, le cas dans le port de Nice et sur les bordures de la zone d'étude.

Sur la figure 12a, on note déjà que la fréquence F la plus basse correspond au centre du bassin (site 42), c'est-à-dire à l'endroit où effectivement le remplissage devrait être le plus important et donc la fréquence de résonance la plus basse. Les fréquences d'amplification deviennent de plus en plus élevées en direction du rocher (comparer avec la figure 11). Cette carte 12a

peut être lue, en fait, comme la carte des fréquences auxquelles sera amplifié le séisme. Mais il manque une information : le niveau de l'amplification atteint par ce maximum. En effet, le maximum du rapport ne forme pas forcément un pic net et la fréquence retenue n'est pas toujours significative. Il faut noter que, jusqu'à présent, le niveau du rapport H/V n'a pas pu être identifié au niveau atteint par la fonction de transfert en cas de mouvement fort, surtout dans les bandes de fréquence situées après la fréquence de résonance. Toutefois, pour tous les types de sites évoqués, un seuil minimal égal à 2 a été utilisé pour détecter un pic et donc une fréquence de résonance (*cf.* paragraphe « Les différentes approches sur des sites caractéristiques »). Les courbes « plates » peuvent ainsi être séparées des rapports montrant des pics. Le niveau maximal atteint par les rapports H/V permet donc de donner une signification aux valeurs de fréquence lues sur la carte de la figure 12a.

La carte suivante (fig. 12b) retrace l'interpolation du maximum de l'amplitude atteinte entre 0,5 et 10 Hz, toujours pour les rapports « H/V bruit de fond ». La zone du bassin dans laquelle les alluvions devraient être les plus profondes (sites 20, 36, 37, 42, 43, 44) est celle qui donne lieu aux pics H/V les plus prononcés (facteur 6), du moins entre 0,5 et 10 Hz. La lecture simultanée avec la carte de la figure 12a permet de comprendre que l'amplification est prévue ici entre 1 et 2 Hz. La partie nord de la colline du château (sites 08, 11, 13) donne aussi des pics élevés puisque le niveau dépasse 5. Toutefois, les fréquences en jeu sont plus élevées : de 4 à 8 Hz. L'objectif des cartes suivantes (fig. 12c, d et e) est de fournir la même information, mais dans des bandes de fréquence limitées pour faire apparaître la réponse à une portion limitée du spectre du séisme attendu.

Ainsi, pour la carte de la figure 12c, les courbes « H/V bruit de fond » ne sont considérées qu'entre 0,5 et 2 Hz et l'amplitude maximale observée dans cette bande est interpolée. Le centre du bassin est mis en évidence très clairement avec un pic de 6,2. Les cartes suivantes concernent des bandes de fréquence toujours plus élevées. Entre 2 et 3 Hz, le maximum du pic H/V (5,9) est localisé dans les zones d'alluvions moins profondes (fig. 12d). Enfin, dans les hautes fréquences, entre 8 et 10 Hz, le maximum n'est plus que de 4,5 et est atteint au substratum (fig. 12e). Ces valeurs sont assez cohérentes avec des observations récentes qui montrent que, dans certains cas, le rocher n'a effectivement pas une réponse neutre, soit en raison de son altération en surface, soit à cause du relief local.

Ces cartes ont une grande importance dans le cadre d'un microzonage, puisqu'elles permettent de visualiser, à l'intérieur d'une ville, les quartiers susceptibles d'amplifier le signal sismique et

de caractériser cette amplification en fréquence. Ces informations géographiques permettent une meilleure communication des résultats aux utilisateurs des microzonages. Il faut, cependant, rester encore très prudent sur la signification physique des courbes de niveau du pic H/V (fig. 12b à 12e) et considérer que les résultats les plus fiables restent, pour l'instant, ceux touchant à la fréquence de résonance fondamentale (fig. 12a).

## Conclusion

L'évaluation expérimentale de la méthode « H/V bruit de fond » nous a amené à effectuer de nombreuses études. Les comparaisons entre les résultats issus des différentes méthodes permettent de conclure sur certains points et de cerner ce qui reste à faire.

### Les points établis

- Le spectre du bruit de fond peut varier très largement dans le temps sur un site. Par contre, le rapport spectral « H/V bruit de fond » donne, sur les sites de type sédimentaire, une courbe stable dans le temps et propre à chaque site, pour peu qu'il soit le résultat de la moyenne de plusieurs mesures et que l'on évite les bruits trop proches.
- Pour les sites à fort contraste mécanique (sédiments meubles sur substratum rigide), le rapport spectral « H/V bruit de fond » délivre un pic net, centré à une fréquence propre à chaque site. Les modélisations et/ou les fonctions de transfert établies par enregistrement de la sismicité permettent d'identifier cette fréquence à la fréquence de résonance du site.
- Lorsqu'aucune modification du signal n'est attendue sur un site, le rapport spectral « H/V bruit de fond » reste en général proche de l'unité.
- Pour l'ensemble des sites étudiés (environ cinquante à Nice, Monaco et au Venezuela), on peut pratiquement toujours rapprocher les caractéristiques principales de la courbe « H/V bruit de fond » d'un site de sa réponse fréquentielle aux séismes.

### Les points à approfondir

- Le rapport spectral « H/V bruit de fond » sur les sites « topographiques » semble contenir au moins une partie de l'information sur la modification du signal sismique. Mais des incertitudes demeurent. Il faudrait renouveler l'évaluation sur de nouveaux sites.
- Les niveaux des courbes « H/V bruit de fond », quel que soit le type de site, semblent souvent comparables à ceux des résultats de modélisations (souvent mal contraintes), mais assez différents des valeurs atteintes par les

fonctions de transfert issues de la sismicité. Cependant, les sites présentant les plus fortes valeurs sont généralement les mêmes avec les différentes approches.

Cette remarque amène une question d'ordre plus général : l'intégration des résultats dans le cadre de la réglementation parasismique permet-elle aujourd'hui de tenir compte du niveau réel de l'amplification entre le rocher et chaque site ?

Si on multiplie le spectre de référence par la fonction de transfert réellement déduite des mesures de séismes entre le rocher et le sol, le spectre obtenu est souvent beaucoup trop pénalisant pour les études de structures. Pour l'instant, le spectre adopté pour chaque zone dans un microzonage est donc limité arbitrairement en pseudo-accélération avec une multiplication qui ne dépasse pas 1,6 fois le niveau maximal de référence. En effet, des coefficients de sécurité importants sont introduits à tous les niveaux, tant pour la définition du spectre de référence que dans les calculs de dimensionnement. Ces coefficients sont réputés prendre en compte les incertitudes sur le signal incident et les conditions locales. De ce fait, ils interdisent la prise en compte précise des effets de site.

### L'avenir de la méthode

Dans la mesure où les effets de site seront réellement pris en compte lors du dimensionnement des ouvrages, la méthode « H/V bruit de fond » pourra trouver de nombreuses utilisations dans l'avenir. Les mesures de bruit étant relativement peu coûteuses, elles peuvent être d'autant plus denses. La méthode peut donc être appliquée pour l'établissement des Plans de Prévention des Risques (PPR) pour préciser les fréquences de résonance des sites sédimentaires, ainsi que pour définir l'extension spatiale des phénomènes d'effet de site. Les interpolations spatiales proposées, ainsi que l'intégration des résultats dans des systèmes d'informations géographiques permettront une meilleure utilisation des études.

Par ailleurs, cette méthode peut avoir des applications dépassant largement le cadre du parasisme. En effet, sur les terrains à fort contraste de rigidité, à partir, d'une part, de la fréquence de résonance délivrée par la méthode « H/V bruit de fond » et, d'autre part, de la vitesse des ondes de cisaillement en surface, il paraît possible de calculer l'épaisseur du remplissage sédimentaire ou inversement. Cette méthode serait alors un moyen supplémentaire très économique d'investigation géotechnique, dont la « banalisation » pourrait conduire à une nouvelle classification des sites.

Cette application, en cours d'évaluation, conduirait la méthode vers le domaine de la prospection géophysique de subsurface.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AKI K. (1957), Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors, *Bulletin Earthquake Research Institut*, Tokyo university, **35**, pp. 415-457.
- AKI K. (1993), Local site effects on weak and strong motion, *Tectonophysics*, **218** (93), pp. 93-11.
- BARD P.-Y. (1994), *Effects of surface geology on ground motion : Recent results and remaining issues*, in proc. Tenth European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, Austria, EAEE, août 1994, **vol. 1**, p. 305.
- BORCHERDT R.D. (1970), Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, *Bulletin of Seismological Society of America*, **60**, pp. 29-61.
- DUVAL A.-M. (1994), *Détermination de la réponse d'un site aux séismes à l'aide du bruit de fond : Évaluation expérimentale*, Thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie, Paris 6, déc., 265 p.
- DUVAL A.-M., MÉNEROUD J.-P., VIDAL S., BARD P.-Y. (1994), *Usefulness of microtremor measurements for site effect studies*, in proc. Tenth European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, Austria, EAEE, août 1994, **vol. 1**, p. 521.
- FIELD E.H., JACOB K. (1993), The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise, *Geophysical Research Letters*, **20**, pp. 2925-2928.
- KANAI K. et al. (1954), Measurement of the microtremor, Part 1, *Bulletin of Earthquake Research Institut*, Tokyo university, **32**, pp. 199-208.
- LACHET C., 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.
- LERMO J., CHAVEZ GARCIA F.J. (1994), Are microtremors useful in site response evaluation ? *Bulletin of Seismological Society of America*, **84**, pp. 1350-1364.
- NAKAMURA Y. (1989), A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface, *Quarterly Report of Railway Technical Research Institut*, Tokyo, **30**, pp. 25-33.
- NECHTSCHEIN S., BARD P.-Y., GARIEL J.-C., MÉNEROUD J.-P., DERVIN P., CUSHING M., GAUBERT C., VIDAL S., DUVAL A.-M. (1995), *A topographic effect study in the Nice, France*, in proc. 5th International Conference on Seismic Zonation, Nice, France, oct. 1995, **vol. 2**, pp. 1067-1074.
- NOGOSHI M., IGARASHI T. (1970), On the propagation characteristics of microtremor, *Journal of Seismological Society of Japan*, **23**, pp. 264-280 (texte en japonais résumé en anglais).
- NOGOSHI M., IGARASHI T. (1971), On the amplitude characteristics of microtremor (Part 2), *Journal of Seismological Society of Japan*, **24**, pp. 26-40 (texte en japonais résumé en anglais).
- PLINE C. (1990), *Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et géotechnique de la basse plaine alluviale du Paillon* (Alpes-Maritimes, France), Thèse de doctorat, université de Nice-Sophia Antipolis, France, 200 p.
- SINGH S.K., LERMO J., DOMINGUEZ T., DOMINGUEZ M., ORDAZ M., ESPINOZA J.M., MENA E., QUASS R. (1988), The Mexican 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**, pp. 653-673.
- SMITH, W.H.F., WESSEL P. (1990), Gridding with continuous curvature splines in tension, *Geophysics*, **55**, pp. 293-305.
- STEIDL J.H., JAMISON H., BONILLA F., TUMARKIN A.G. (1995), *Seismic hazard in the San Fernando Basin, Los Angeles, CA : A site effects study using weak motion and strong motion data*, in proc. 5th International Conference on Seismic Zonation, Nice, France, oct. 1995, **vol. 2**, pp. 1149-1156.
- UDWADIA F.E., TRIFUNAC M.D. (1973), Comparison of earthquake and microtremor ground motions in El Centro, California, *Bulletin of Seismological Society of America*, **63**, pp. 1227-1253.

### ABSTRACT

**A new method of evaluating the response of soils to seismic tremors by recording background noise**

A.-M. DUVAL, J.-P. MÉNEROUD, S. VIDAL, P.-Y. BARD

The observation of destructive earthquakes shows that the violence of the seismic movement can vary depending on the type of soil. The determination of these zonal effects is one of the essential components of para-seismic prevention, having recourse to micro-zoning. The conventional method of measuring zonal effects experimentally is based on seismic recording. It is admittedly reliable, but it is laborious, and consequently new approaches have been investigated. The original method evaluated here consists of recording a few minutes of seismic background noise on a site and establishing the spectral ratio of the horizontal path to the vertical path. The results of the different experimental and numerical approaches were compared on numerous sites. The "H/V background noise" method has been shown to be able to provide valuable indications of amplification frequencies, at least in the case of sedimentary fillings. This purely experimental evaluation of the "H/V background noise" method has many advantages: rapidity (hence density of measurements), low cost of equipment, and accuracy of determination of natural frequencies. It is thus an economical method of mapping resonant frequencies and thereby gaining a better knowledge of seismic risk in sedimentation basins.