



**HAL**  
open science

## **Sollicitations sismiques dues aux exploitations minières : amplification des ondes en surface (et vibrations des structures)**

Nabila Lokmane, J.-F. Semblat, Guy Bonnet, Lynda Driad-Lebeau

### ► **To cite this version:**

Nabila Lokmane, J.-F. Semblat, Guy Bonnet, Lynda Driad-Lebeau. Sollicitations sismiques dues aux exploitations minières : amplification des ondes en surface (et vibrations des structures). Journées nationales de géotechnique et de géologie, Jun 2004, Lille, France. pp.485-492. ineris-00972461

**HAL Id: ineris-00972461**

**<https://ineris.hal.science/ineris-00972461>**

Submitted on 3 Apr 2014

**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.

# **SOLLICITATIONS SISMIQUES DUES AUX EXPLOITATIONS MINIERES : AMPLIFICATION DES ONDES EN SURFACE (ET VIBRATIONS DES STRUCTURES)**

## **SEISMIC LOADING DUE TO MINING: WAVE AMPLIFICATION (AND VIBRATION OF STRUCTURES).**

Nabila Lokmane<sup>1,2</sup>, Jean-François Semblat<sup>1</sup>, Guy Bonnet<sup>2</sup>, Lynda Driad<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France*

<sup>2</sup> *Laboratoire de Mécanique de l'Institut Navier (UMLV, ENPC, LCPC), Université de Marne la vallée, Champs sur Marne, France*

<sup>3</sup> *Ineris, Ecole des Mines, Nancy, France*

**RÉSUMÉ** - L'objectif de ce travail est d'analyser l'impact des secousses induites par les exploitations minières sur les structures situées en surface. Du fait des conditions géologiques locales, le mouvement créé par les secousses peut parfois être amplifié de façon importante en surface (effet de site). A partir d'une modélisation numérique du problème, l'amplification du mouvement est analysée pour différentes formes de remplissages sédimentaires et des contrastes de propriétés entre couches variables. Les valeurs de fréquences fondamentales (i.e amplification maximale) sont comparées à des résultats antérieurs.

### **1. Introduction**

L'exploitation des mines telles que les Houillères de Bassin du Centre et du Midi (HBCM) entraîne des vibrations qui sont régulièrement ressenties en surface. Les travaux d'extraction du charbon engendrent des secousses similaires à celles provoquées lors d'un séisme (type d'ondes et lois de propagation) mais de magnitude assez faible. En revanche, la formation des couches de surface et le caractère répétitif de ce type de vibrations peut les rendre nocives.

Dans cette communication, on s'intéressera à l'amplification du mouvement en surface due à la géométrie et aux caractéristiques mécaniques des couches de surface. Des modèles de remplissages elliptiques avec différentes valeurs de célérité sont étudiés afin d'analyser le niveau d'amplification correspondant et les domaines de fréquence concernés. Les fréquences fondamentales obtenues sont ensuite comparées avec les fréquences obtenues dans des travaux antérieurs.

### **2. Effets de site**

#### **2.1 Objectif**

La géologie de surface a souvent une forte influence sur les mouvements du sol engendrés par des tremblements de terre ou par d'autres types de sollicitations vibratoires. Dans le cadre du projet SisMines sur l'impact environnemental de la sismicité induite en contexte minier une étude est menée conjointement par l'INERIS, le Laboratoire Central des Pont et Chaussées et l'Université de Marne-la-Vallée. L'objectif de ce projet est d'analyser les vibrations induites par les mines à travers les mouvements engendrés en surface tant au sol que sur les structures. Dans le cadre de l'exploitation minière, on s'intéresse par conséquent à l'étude de l'influence des couches de surface sur l'amplification du mouvement dû aux secousses, classiquement appelée «effet de site»: les ondes se propagent dans le sol suivant des lois d'atténuation influencées par la structure du massif rocheux et des lois d'amplification influencées par les couches sédimentaires.

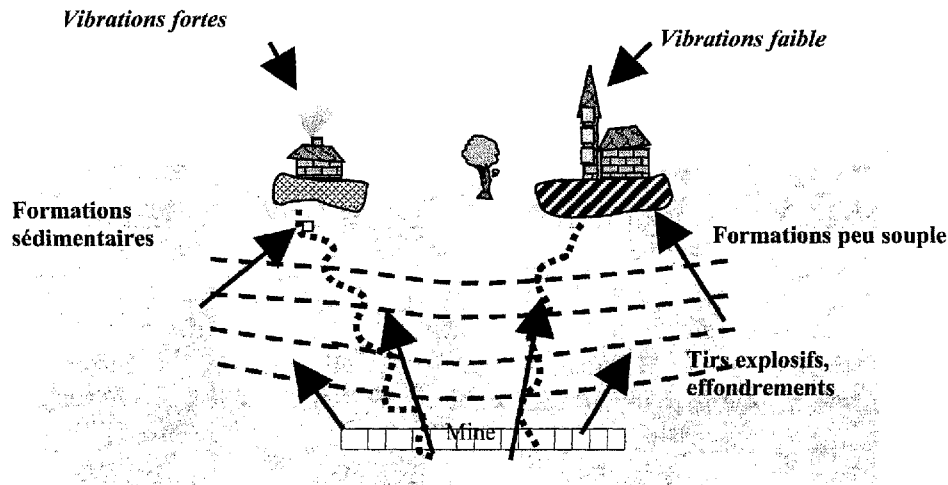


Figure 1. Vibrations dues à l'exploitation des mines et carrières.

## 2.2 Analyse de la propagation d'ondes sismiques

La propagation d'ondes sismiques peut être analysée grâce à des mesures expérimentales et/ou à l'aide de modélisations numériques plus ou moins complexes. Les méthodes expérimentales sont nombreuses : mesures *in situ* de séismes réels ou de bruit de fond [DUV 96a, 96b], expérimentations sur modèle réduit [SEM 98a]. Les méthodes numériques sont également variées : la méthode des équations intégrales [BON 95, DAN 89] est bien adaptée au traitement des problèmes en milieu semi-infini, on retrouve aussi la méthode des éléments finis [SEM 97, SEM 98b] ainsi que d'autres types de méthodes (nombre d'onde discret, méthode de Aki et Larner...) [BAR 83].

## 3. Mesures de bruit de fond sur le site de Gardanne

La méthode «H/V bruit de fond» a été mise en œuvre dans le bassin minier de Gardanne. Cette méthode est de plus en plus utilisée. Elle permet de caractériser les zones présentant de fortes amplifications sismiques et d'en dégager les fréquences de résonance [DUV 96]. Sur le plan de l'expérimentation, la méthode consiste à poser un capteur de vibration tri-directionnel sur le sol, à étudier et à enregistrer les vibrations ambiantes. Le capteur utilisé pour les mesures sur le site de Gardanne est un vélocimètre tridirectionnel, sa fréquence propre est de 0.2 Hertz (soit une période de 5 secondes).

Le traitement des trois traces sismiques (vertical, nord-sud et est-ouest) obtenues par enregistrement est le suivant : H représente l'amplitude spectrale moyenne lissée de l'une des composantes horizontales du bruit de fond sismique (en général une combinaison de l'amplitude spectrale des deux voies nord-sud et est-ouest), V représente l'amplitude spectrale lissée de la voie verticale du même enregistrement.

Le rapport entre ces amplitudes spectrales est calculé sur plusieurs fenêtres de temps (de l'ordre de la minute par exemple). Sa moyenne est notée «H/V». 21 points ont été désignés par l'INERIS et instrumentés par le CETE Méditerranée (Laboratoire de Nice). Chacune des mesures a conduit à une courbe «H/V bruit de fond». Dans cet article, on s'intéressera au site 11. La mesure concernant ce site comporte en particulier un pic notable entre 12 et 18 Hz (figure 2). Les courbes H/V résultantes confirment à proximité de la maison la possibilité d'un effet de site dû aux conditions géomorphologiques du terrain.

## Rapport H/V Bruit de fond : INERIS Gardanne

Site n°: 11 Fichier: 06271437.c0\*

12 fenêtres de 16 secondes (soit 2048 points) sont utilisées

Lissage :Konno-Omachi - Parametre: 40.00

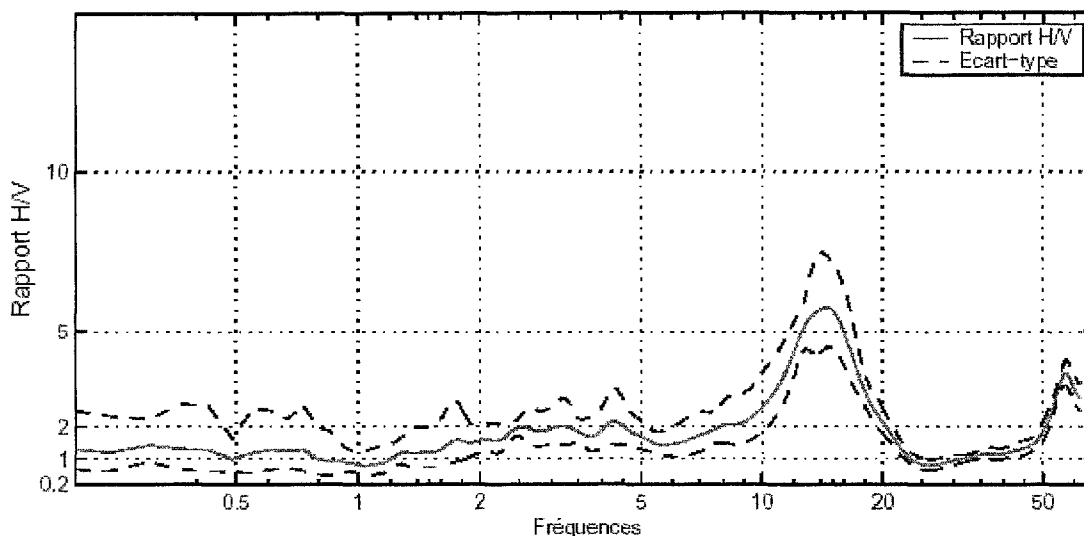


Figure 2. Rapport H/V bruit de fond correspondant au site 11.

Les résultats de ces mesures viennent compléter des enregistrements d'événements sismiques (en vitesse), qui s'étalent sur plusieurs années et représentent une base de données importante pour nos travaux de simulation. Ces enregistrements ont été réalisés en continu grâce à un dispositif permanent d'enregistrement placé dans différentes maisons de la région. La figure 3 présente les résultats de mesures correspondant à des événements sismiques en des emplacements situés au dessus de différentes formations géologiques (figure 3). Les mesures réalisées au-dessus de formations plutôt rigides (CAL) ne présentent aucune amplification, alors que les mesures réalisées au dessus de remplissages sédimentaires comme (LAG) indiquent une amplification plus importante.

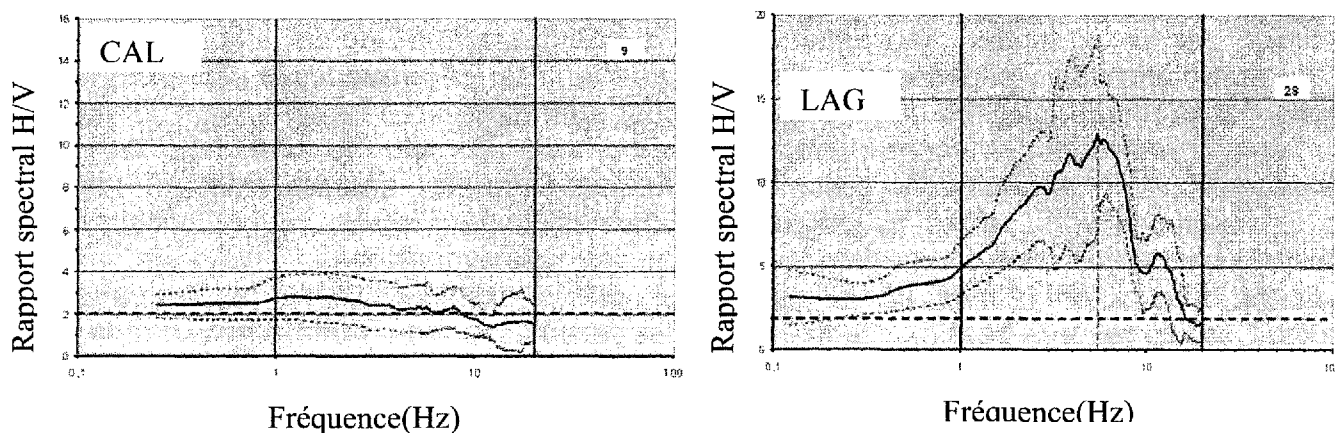


Figure 3 - a) remplissage sédimentaire, b) formation calcaire.

La prudence s'impose pour interpréter ces mesures en termes d'effet de site, car le contenu spectral des signaux correspondants est très différent d'un bruit de fond. L'énergie du signal est en effet concentrée dans une bande restreinte. Ces mesures semblent toutefois conforter la présence d'une amplification plus importante au-dessus des formations alluviales.

## **4. Modélisation par éléments de frontière**

### **4.1 La méthode des éléments de frontières**

La méthode des éléments de frontière découle de l'application du théorème de réciprocité de Maxwell-Betti qui permet d'exprimer le champ de déplacement à l'intérieur d'un domaine à l'aide des déplacements et des contraintes aux interfaces de ce domaine. La méthode des éléments de frontière procède en deux principales étapes [DAN 89, BON 95] : la résolution d'une équation intégrale de frontière (déplacements et contraintes en tout point de cette frontière) et le calcul a posteriori en tout point intérieur par application d'une formule de représentation intégrale. Par rapport à la méthode des éléments finis, le principal avantage de la méthode des éléments de frontière est d'éviter de tronquer artificiellement le domaine d'étude dans le cas d'un problème de propagation d'ondes dans des milieux infinis. En éléments finis, cette troncature provoque des réflexions d'ondes artificielles qui peuvent entacher la solution d'une certaine erreur.

### **4.2. Modélisation du profil géologique**

Le faible nombre de données géotechniques de proche surface sur le site de Gardanne et la nécessité d'une généralisation aisée des résultats obtenus nous a amenés à réaliser une étude paramétrique. Différentes géométries du remplissage ont été envisagées (remplissage régulier, circulaire, dissymétrique), avec des caractéristiques mécaniques estimées. La sollicitation sismique appliquée dans un premier temps, est une onde SH plane à incidence verticale. Dans un deuxième temps une source plus réaliste (vibrations minières) est prise en compte. Le calcul numérique est réalisé à l'aide du code de calcul CESAR-LCPC [HUM 89].

### **4.3 Analyse des paramètres prépondérants**

L'amplification des ondes sismiques dans les formations sédimentaires est fortement affectée par les caractéristiques mécaniques de celles-ci. En effet, les contrastes d'impédance entre couches (hétérogénéités verticales) influencent l'amplification du mouvement en surface.

La géométrie du remplissage est également un facteur prépondérant. Elle peut être caractérisée par sa profondeur moyenne ou par la géométrie détaillée du fond du bassin lorsqu'il s'agit d'un bassin sédimentaire. Dans ce dernier cas (hétérogénéités latérales), les ondes sismiques restent piégées dans le bassin ce qui renforce encore l'amplification. Dans le cas où seule la profondeur moyenne des couches est prise en compte (structure tabulaire), le facteur d'amplification du mouvement sismique peut être déterminé analytiquement (Pecker, 1984). En revanche, lorsque les hétérogénéités latérales sont marquées, il est nécessaire d'analyser la propagation des ondes sismiques en deux ou trois dimensions.

Plusieurs auteurs ont étudié l'amplification des ondes sismiques dans les formations alluviales. Dans le cas des bassins sédimentaires, les résultats montrent une augmentation de l'amplification du mouvement due aux réflexions des ondes de surface sur les bords du bassin (Bard, 1995, Bouchon, 1973, Chavez-Garcia, 2000, Sanchez-Sesma, 2000, Semblat, 2000). Dans nos travaux pour illustrer l'influence de la géométrie d'un bassin sur les effets de site, plusieurs cas ont été traités (figure 4).

Dans cette communication, seul le cas elliptique est présenté.

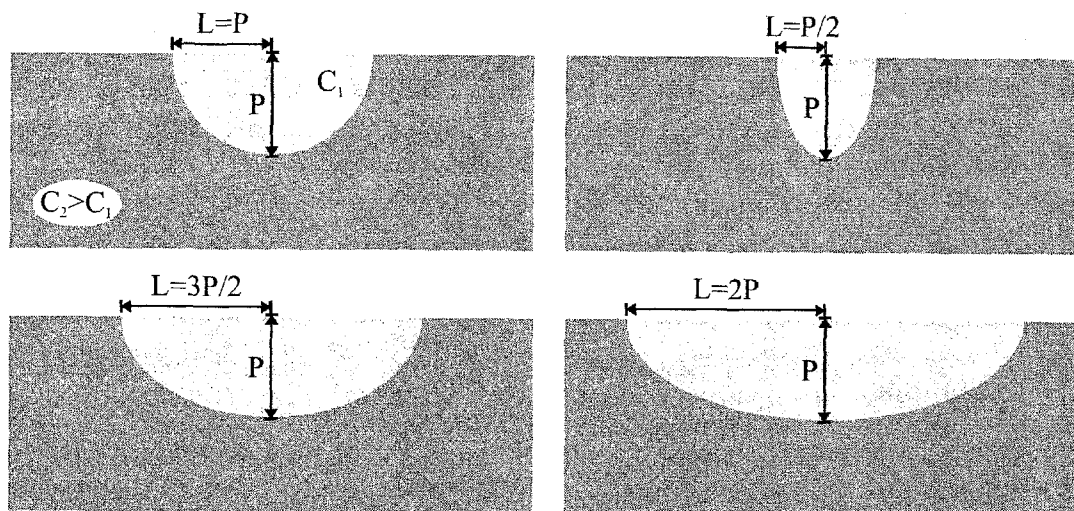


Figure 4. Vallées circulaires et elliptiques d'élongement  $\eta=L/P$  variable.

### Remplissage elliptique

Une étude paramétrique a été réalisée en considérant différents cas de remplissages sédimentaires elliptiques correspondant à différents élongements  $\eta=L/P$ , tel que  $\eta=0,5, 1, 2, 3, 4$  et  $6$ , sachant que la profondeur  $P$  est constante, égale à  $25$  m. Chaque courbe de la figure 5 correspond à un des élongements cités ci-dessus. Ces courbes représentent la valeur de l'amplification maximale calculée en surface et la fréquence correspondante, ceci pour différents rapports de célérité ' $r$ ' entre le remplissage et le rocher ( $2$  à  $8$ ). Les principaux résultats obtenus peuvent être résumés en deux points.

a/ Lorsque l'élongement est supérieur à  $1$ , la fréquence diminue ainsi que l'amplification maximale et on se rapproche du cas unidimensionnel.

b/ Lorsque le rapport de célérité ' $r$ ' augmente, la fréquence diminue et l'amplification maximale augmente.

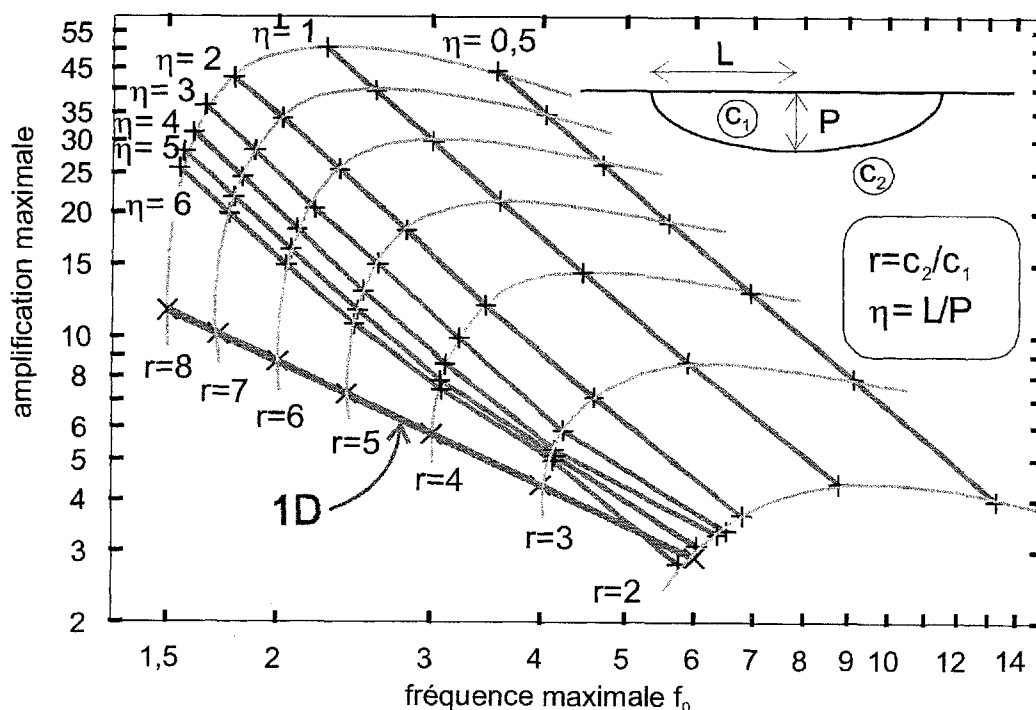


Figure 5. Valeurs d'amplification maximale et fréquences correspondantes pour un élongement  $\eta=L/P$  et un rapport de vitesses  $r=C_2/C_1$  variables.

Sur la figure 6, on a par exemple représenté le cas du cercle ( $\eta=1$ ) et le cas ( $\eta=2$ ). Pour tracer chacune de ces courbes, on a tout d'abord calculé les amplifications en surface en fonction de la fréquence pour chacun des rapports de vitesse (fonctions de transfert). A partir de là, on a sélectionné le maximum d'amplification et la fréquence correspondante pour chacun de ces rapports. Ces valeurs d'amplifications maximales ont ensuite été représentées sur la même courbe. Ce travail a été fait pour les 7 cas d'ellipses. Il a été constaté que plus le contraste de vitesse est grand, plus l'amplification est importante et ceci pour chaque valeur d'élanement.

Par exemple pour un élanement  $\eta=1,5$  (compris entre 1 et 2) et un rapport de célérité ( $r=4$ ), on peut retrouver une amplification de l'ordre de ( $A=15$ ) et une fréquence ( $f=3,8$  Hz) correspondant à ce cas (point b).

La comparaison entre ces différentes courbes montre que plus l'élanement ( $\eta$ ) est petit, plus on s'éloigne du cas unidimensionnel, c'est à dire plus l'effet bidimensionnel est marqué (augmentation du niveau d'amplification maximale et de la fréquence maximale). L'intérêt de la figure 5 (paramétrage en fonction de  $\eta$  et  $r$ ) est de permettre une estimation simplifiée des effets de site en 2D dans des cas très variés.

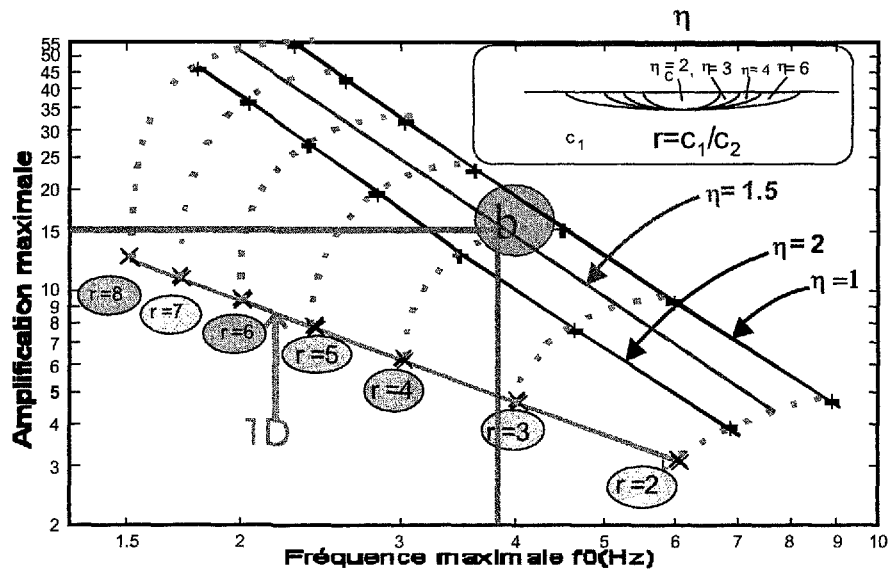


Figure 6. Amplification pour  $\eta=1,5$

### 5. Comparaison entre les fréquences numériques et analytiques caractérisant les vallées alluviales.

Afin de comparer nos résultats numériques dans le cas d'un remplissage elliptique à ceux, obtenus par Bard [BAR 83] pour une vallée sinusoïdale. Les fréquences issues du calcul numérique sont comparées aux fréquences calculées à partir de la relation analytique [BAR 83] ci-dessous :

$$f_{théo} = \frac{C_1 \sqrt{1 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}{4P}$$

Dans cette communication, on a choisi de représenter la comparaison entre le calcul numérique et la relation analytique fréquence, élanement pour les cas d'ellipse d'élanements ( $\eta=1$ ) et ( $\eta=2$ ).

Pour ces deux cas d'élongement, les courbes de rapport de vitesse en fonction des fréquences numériques et analytique ont été tracées. Les courbes en pointillé représentent le résultat du calcul numérique et les courbes en trait plein correspondent à la relation analytique. On constate que pour chaque rapport de vitesse et pour chaque élongement, les fréquences du calcul numérique et celle de la relation analytique sont très proches (les fréquences numériques sont légèrement plus élevées que les fréquences analytiques) et ceci est valable pour les différents cas d'ellipse.

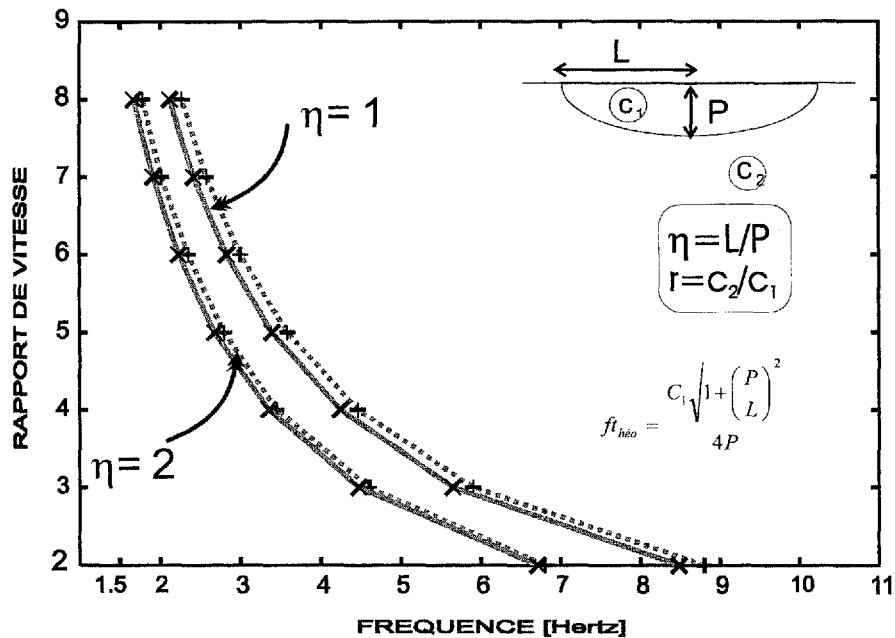


Figure 7. Comparaison entre les fréquences numériques et analytiques.

## 6. Conclusion

Les effets de site, qui se traduisent par une amplification localisée du mouvement vibratoire, dépendent largement de la géométrie du bassin et du contraste de vitesse existant entre le remplissage et le rocher. Les résultats présentés dans cette communication montrent que l'influence de la géométrie des couches de surface sur les effets de site est déterminante. Ces résultats (paramétrage en fonction de  $\eta$  et de  $r$ ) peuvent être utilisés ailleurs. Ils semblent cohérents avec les phénomènes d'amplification observés à Gardanne sur des signaux énergétiques.

Ces effets de site modifient fortement les caractéristiques des signaux sismiques et peuvent avoir un impact important sur les structures de surface.

## 7. Références Bibliographiques

- BARD P.Y. (1995). Effects of surface geology on ground motion : recent results and remaining issues, *10<sup>th</sup> Europ. Conf. Earthq. Eng.*, Vienna, August 1994, 1, 305-323.
- BARD P.Y. (1983) *Les effets de site d'origine structurale en sismologie : modélisation et interprétation*. Application au risque sismique, Thèse de Doctorat, Université de Grenoble.
- Bonnet M. (1995) *Equations intégrales et éléments de frontière*, CNRS Editions Eyrolles, 316 p., Paris.



- Dangla P. (1989) *Couplage éléments finis-équations intégrales en élasto-dynamique et interaction sol-structure*, Thèse de Doctorat, ENPC, Paris.
- Duval A.-M. (1996) *Détermination de la réponse d'un site aux séismes à l'aide du bruit de fond. Evaluation expérimentale*, Thèse de l'Université Paris VI, Etudes et Recherches des LPC, GT62, LCPC, Paris.
- Duval A.-M., Méneroud J.-P., Vidal S. et Bard P.-Y. (1996) Une nouvelle méthode d'évaluation de la réponse des sols aux séismes par enregistrement du bruit de fond, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 203, pp. 75-90.
- Humbert P.(1989), CESAR-LCPC: un code général de calcul par éléments finis, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 160, pp.112-115.
- Pecker A. (1984) *Dynamique des sols*, Presses de l'ENPC, 259 p., Paris.
- Semblat J.-F. (1997) Rheological interpretation of Rayleigh damping, *Journal of Sound and Vibration*, 206(5), pp.741-744.
- Semblat J.-F., Luong M.P (1998) Wave propagation through soils in centrifuge testing, *Journal of Earthquake Engineering*, 2(1), pp. 147-171.
- Semblat J.-F. (1998) Amortissement et dispersion des ondes: points de vue physique et numérique, *Revue Française de Génie Civil*, 2(1), pp.91-111.
- Semblat J.-F., Dangla P. et Duval A.-M. (2000) Amplification du mouvement sismique: effets de site dans le centre de Nice. *Revue Française de Génie Civil*. Vol.3 n°1