

Caractérisation mécanique des sols très hétérogènes avec les ondes de surface

Odile ABRAHAM*
Rabih CHAMMAS

LCPC, Bouguenais, France

Jean-François SEMBLAT

Université Paris-Est, LCPC, Paris, France

Philippe CÔTE

LCPC, Bouguenais, France

Helle PEDERSEN

LGIT, Grenoble, France

■ RÉSUMÉ

La caractérisation des sols très hétérogènes au moyen de méthodes géotechniques est souvent difficile, voire impossible quand la taille des hétérogénéités dépasse quelques décimètres. Les méthodes géophysiques fondées sur la propagation des ondes sismiques peuvent aider l'ingénieur à caractériser mécaniquement de tels milieux. Les ondes de surface et les ondes de compression réfractées sont utilisées ici pour déterminer les propriétés mécaniques d'un milieu homogène équivalent. Les résultats numériques obtenus par la méthode des éléments finis sont présentés. On montre que, quand les longueurs d'onde des ondes de surface sont supérieures à 7,5 fois le rayon des hétérogénéités, pour des concentrations d'inclusions inférieures à 50 %, leur propagation est régie par les équations de propagation dans un milieu homogène équivalent au sol hétérogène. Pour valider ces résultats, des expérimentations ont été effectuées sur des modèles physiques contrôlés à échelle réduite. Les courbes de dispersion des vitesses de phase sont inversées pour obtenir un profil vertical de vitesses des ondes de cisaillement. Les vitesses de propagation des ondes de compression sont obtenues par la méthode de sismique réfraction. Les vitesses des ondes de volume correspondent à celles calculées avec un modèle d'homogénéisation classique. Enfin, les résultats d'une expérimentation en vraie grandeur sont présentés.

Mechanical characterization of highly heterogeneous soils with surface waves

■ ABSTRACT

Characterizing highly heterogeneous soils by means of geotechnical methods often proves difficult, or even impossible, when the size of heterogeneities exceeds a few decimeters. Geophysical methods based on seismic wave propagation could help the engineer when it comes to mechanically characterizing such media. Surface waves and refracted compression waves will be used herein to determine the mechanical properties of an equivalent homogeneous medium; numerical results obtained with the finite element method will be featured as well. It will be shown that when surface wavelengths exceed 7.5 times the heterogeneity radius, for inclusion concentrations of less than 50%, wave propagation is governed by specific propagation equations within a homogeneous medium equivalent to the heterogeneous soil. In order to validate these results, a number of experimental campaigns have been conducted on reduced-scale controlled physical models. The phase velocity dispersion curves have been inverted to generate a vertical shear-wave velocity profile, and compression wave propagation velocities will be derived using the seismic refraction method. The volume wave velocities correspond with those calculated from a classical homogenization model. Lastly, this article will present the results from a full-scale experiment.

*AUTEUR À CONTACTER :

Odile ABRAHAM
odile.abraham@lcpc.fr

PROBLÉMATIQUE

La caractérisation mécanique des sols hétérogènes est impossible avec les essais classiquement utilisés en géotechnique quand la taille des hétérogénéités dépasse quelques dizaines de centimètres : obtenir un échantillon représentatif est irréalisable et les plus grosses cellules triaxiales sont limitées à des tailles d'inclusions inférieures à 0,2 m environ. Parmi les méthodes géophysiques, les méthodes sismiques présentent un grand intérêt car elles peuvent fournir des propriétés mécaniques moyennes, des concentrations d'inclusion, des zonages en taille,... C'est particulièrement le cas des ondes de surface qui présentent l'avantage, pour l'auscultation d'une profondeur donnée, de nécessiter des longueurs d'onde deux à trois fois plus grandes. La gamme de longueur d'onde de cette étude est fixée par le besoin et la réalité géologique : la reconnaissance des sols sur quelques dizaines de mètres avec des inclusions pluri-métriques.

La propagation des ondes dans ce type de sols est caractérisée par différents phénomènes [1] : dispersion, diffraction, amortissement, conversion de type d'ondes,... Ces phénomènes sont très complexes et il est nécessaire de recourir à des modélisations pour mieux les appréhender.

Plusieurs études ont essayé de quantifier l'effet de la taille des inclusions dans les milieux hétérogènes sur la propagation des ondes sismiques [2-4]. Il a été montré que, si les inclusions sont plus rigides que la matrice, les vitesses de propagation obtenues pour les longueurs d'onde λ telles que $\lambda/R < 1$ (R : rayon des inclusions) sont la plupart du temps beaucoup plus grandes que pour les grandes longueurs d'onde ($\lambda/R > 1$). Plus les longueurs d'onde sont petites, plus elles tendent à trouver des passages plus rapides selon le principe de Fermat [5]. Pour les grandes longueurs d'onde telles que $\lambda/R > 1$, la vitesse de phase n'est pas dispersive et se trouve proche des résultats obtenus pour les milieux effectifs. Dans le domaine de diffraction de Rayleigh ($\lambda/R = 2\pi$), la vitesse s'affaiblit un peu avant de remonter pour des longueurs d'onde telles que $\lambda/R < 10$. Quand $\lambda/R < 1$, la théorie des rais peut être appliquée et on obtient ainsi des vitesses de propagation non dispersives, avec une valeur assez élevée.

Pour l'étude des couches en surface dans un but d'application géomécanique, les profondeurs d'investigation sont de l'ordre de 30 m. La longueur d'onde de Rayleigh dépend de la profondeur d'investigation et sera automatiquement plus grande que la taille des inclusions. Les inclusions qui vont être étudiées auront un rayon R inférieur à 4 m. Toutefois, dans la modélisation numérique par éléments finis, la diminution de la taille des inclusions est limitée car, plus les inclusions sont petites, plus les mailles le sont également, ce qui augmente le temps de calcul. Ainsi, dans les simulations qui vont suivre, les longueurs d'onde seront choisies pour rester dans le domaine de diffraction de Rayleigh et dans le domaine où la théorie des milieux effectifs peut être appliquée ($\lambda_{dm}/R > 7,5$ avec λ_{dm} la longueur d'onde dominante).

Dans ce qui suit, une méthode d'homogénéisation auto-cohérente est utilisée [6] ; son principe est d'assimiler l'interaction de chaque inclusion avec toutes les autres à l'interaction entre cet élément et une matrice homogène. Cette dernière représente le comportement macroscopique à déterminer par la procédure d'homogénéisation. Elle permet d'obtenir, selon les caractéristiques du mélange, des valeurs pour des coefficients effectifs du comportement.

La méthode d'homogénéisation proposée par Christensen et Lo [6] donne, dans le cas d'un milieu 2D, le module d'Young (k^*) et le module de cisaillement (μ^*) du milieu effectif (ou milieu équivalent) en fonction :

- du module d'Young et du module de cisaillement de la matrice homogène (k_M, μ_M) et des inclusions (k_i, μ_i) ;
- de la concentration surfacique c des inclusions.

$$k^* = k_M + \frac{c(k_i - k_M)}{1 + \frac{4}{k_M + \frac{4}{3}\mu_M} (1 - c)(k_i - k_M)} \quad (1)$$

$$A \left(\frac{\mu^*}{\mu_M} \right)^2 + B \left(\frac{\mu^*}{\mu_M} \right) + C = 0 \quad (2)$$

où :

$$C = 3c(1-c)^2h + [t\eta_M + pc + 1] [t + \eta_i + (t\eta_M - \eta_i)c^3]$$

$$B = -6c(1-c)^2h + [t\eta_M + pc + 1] [(\eta_M - 1)(t + \eta_i) - 2c^3(t\eta_M - \eta_i)] + c(\eta_M + 1) p[t + \eta_i + (t\eta_M - \eta_i)c^3]$$

$$A = 3c(1-c)^2h + [t\eta_M + \eta_i\eta_M - (t\eta_M - \eta_i)c^3] [\eta_M cp - (t\eta_M + 1)]$$

$$\eta_M = (3-4\nu_M) \quad \eta_i = (3-4\nu_i) \quad t = \frac{\mu_i}{\mu_M} \quad p = (t-1) \quad h = p(t\eta_i)$$

où ν_M est le coefficient de Poisson de la matrice et ν_i celui des inclusions.

Pour vérifier que la propagation des ondes de surface est régie par les équations de propagation dans un milieu homogène équivalent au sol hétérogène, et ce en suivant des lois prédites par cette méthode d'homogénéisation, des modélisations par éléments finis ont été réalisées dans le cas d'inclusions rigides cylindriques de rayon R dans une matrice ($\lambda > 7,5R$). Ces inclusions sont choisies plus rigides que la matrice.

La grandeur mesurée est une série de vitesses ou d'accélération particulières en fonction du temps, recueillie en plusieurs points de l'espace (sismogramme). Le phénomène principal observé est la dispersion des ondes de surface : l'observable est alors une courbe de dispersion. La grandeur déduite est un profil vertical de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement V_s dans le milieu.

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU PROBLÈME DIRECT

■ Choix de la méthode

L'obtention de sismogramme synthétique dans un milieu de propagation hétérogène passe par une discrétisation du milieu. Il existe deux familles de méthodes numériques fondées sur la discrétisation du modèle étudié. La première consiste à discrétiser les frontières du milieu étudié et à résoudre les équations sur ces frontières. Ce type de méthode est plutôt adapté à des milieux où les frontières sont simples et bien connues. Dans le cas étudié, il est difficile d'appliquer une méthode de frontières car le nombre d'inclusions, et donc de frontières, est très grand et peut atteindre plus de 2 000 inclusions. La deuxième famille de méthodes est fondée sur la discrétisation de tout le milieu étudié (ex : différences finies, éléments finis). Dans ce cas, les équations à résoudre sont plus simples. Ces méthodes sont plus adaptées à un milieu qui présente de fortes hétérogénéités. Comme on dispose déjà d'un code de calcul en éléments finis (E. F.) qui a déjà été adapté à des études dynamiques (CESAR-LCPC), c'est cette méthode qui a été étudiée et adaptée à nos besoins.

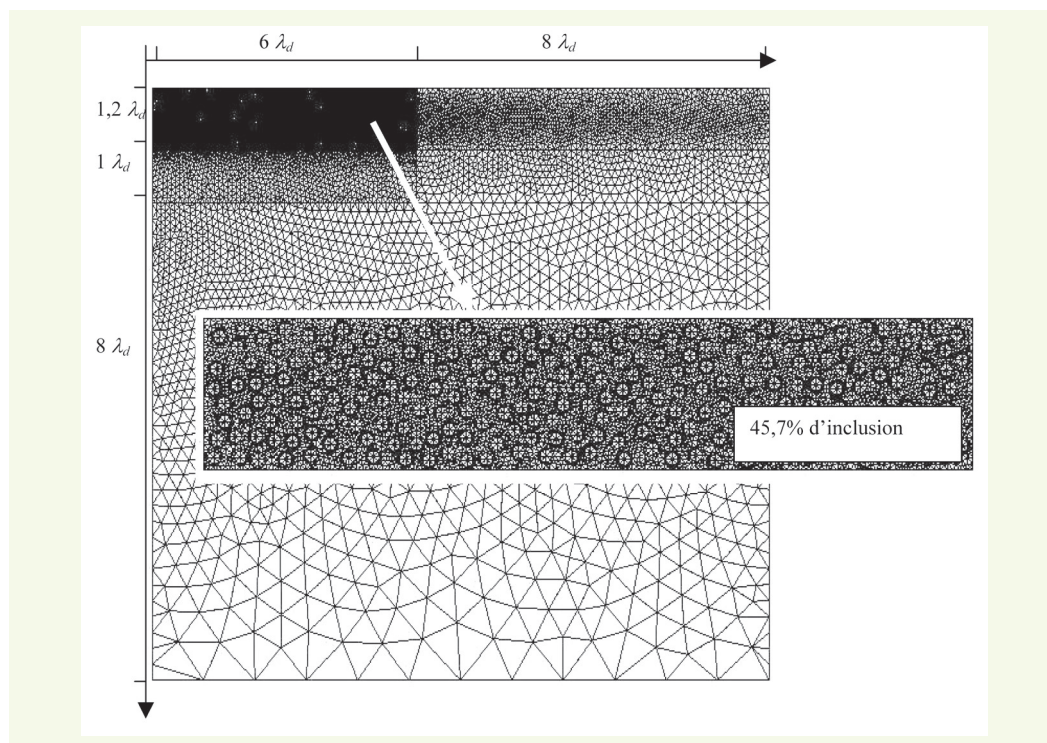
■ Description du modèle

Pour des raisons de temps de calcul, la modélisation est réalisée en 2 dimensions (déformation plane). Les éléments utilisés sont du type triangulaire à 6 nœuds (interpolation quadratique).

Comme il n'existe pas de bords absorbants adaptés dans CESAR-LCPC et comme les plus gros maillages de ce type acceptés ne dépassent pas 100 000 nœuds, un milieu homogène entoure le milieu hétérogène (figure 1). Il rejette hors de la fenêtre temporelle d'étude les réflexions des ondes de volume sur ses bords (figure 2). Les caractéristiques mécaniques de ce milieu homogène sont légèrement supérieures à celles du milieu hétérogène homogénéisé. Le mode fondamental des ondes de surface est dominant. Le problème inverse est ainsi bien conditionné.

La source utilisée est une pression qui évolue en fonction du temps comme une gaussienne et qui est exercée uniformément sur une longueur de $\lambda_d/10$ sur les nœuds en surface, où λ_d est la longueur d'onde dominante dans le milieu.

figure 1
Maillage d'éléments finis
complet et zoom sur la
zone hétérogène étudiée.



■ Validation du modèle

Une validation numérique des modèles en éléments finis a été réalisée [7]. Il est, à cette occasion, apparu qu'une validation numérique sur les observables eux-mêmes est recommandée. Par exemple, pour obtenir une précision donnée, il est nécessaire d'avoir un maillage plus fin pour les amplitudes spectrales que pour les vitesses de phase. Ceci peut conduire à des réajustements de maillage en cours d'étude si l'observable retenu n'a pas été envisagé au départ.

Des tests ont montré que le nombre de nœuds sur lesquels la contrainte est exercée n'influence pas les vitesses ni l'amortissement des ondes. La fréquence d'échantillonnage temporelle est égale à 30 fois la fréquence dominante de la source. Le pas d'espace sera 20 fois plus petit que la longueur d'onde dominante dans la matrice. Dans ce cas, la dispersion numérique sera, pour tous les calculs, même ceux effectués avec le milieu hétérogène, en moyenne inférieure à 0,5 % pour la vitesse de phase et 1 % pour la vitesse de groupe. L'erreur sur l'amplitude spectrale dans le domaine d'étude est inférieure à 2 %.

■ Résultats

La **figure 2** présente deux sismogrammes : milieu homogène et milieu hétérogène avec 46 % d'inclusions de rayon $R = 2$ m plus rigides que la matrice. Les signaux synthétiques sont exploités entre environ 3,5 et 5,5 longueurs d'onde en fenêtrant les ondes de Rayleigh (traits rouges sur la **figure 2**).

➤ Première observable : la dispersion des ondes de surface

La **figure 3** montre les courbes de dispersion des vitesses de phase obtenues par sommation oblique [8] pour trois concentrations (46 %, 23 % et 0 % avec $R = 2$ m). Cette vitesse augmente avec la concentration comme attendu. De plus, plusieurs calculs ont été effectués en faisant varier la taille des inclusions à concentration fixe. Ces calculs ont permis de conclure que, dans la gamme de taille d'inclusions utilisée et pour une concentration donnée, la taille des inclusions n'influence pas la vitesse de propagation des ondes dans le milieu hétérogène. Cependant, l'écart-type entre les résultats des différentes répartitions aléatoires d'inclusions permet d'avoir un ordre de grandeur de la taille des inclusions ; en effet, l'écart-type suit une fonction en R/λ et cette tendance ne dépend pas de la concentration.

figure 2

Sismogrammes obtenus par la méthode des éléments finis.

- a : pour un milieu homogène ;
- b : pour un milieu avec 46 % d'inclusions rigides.

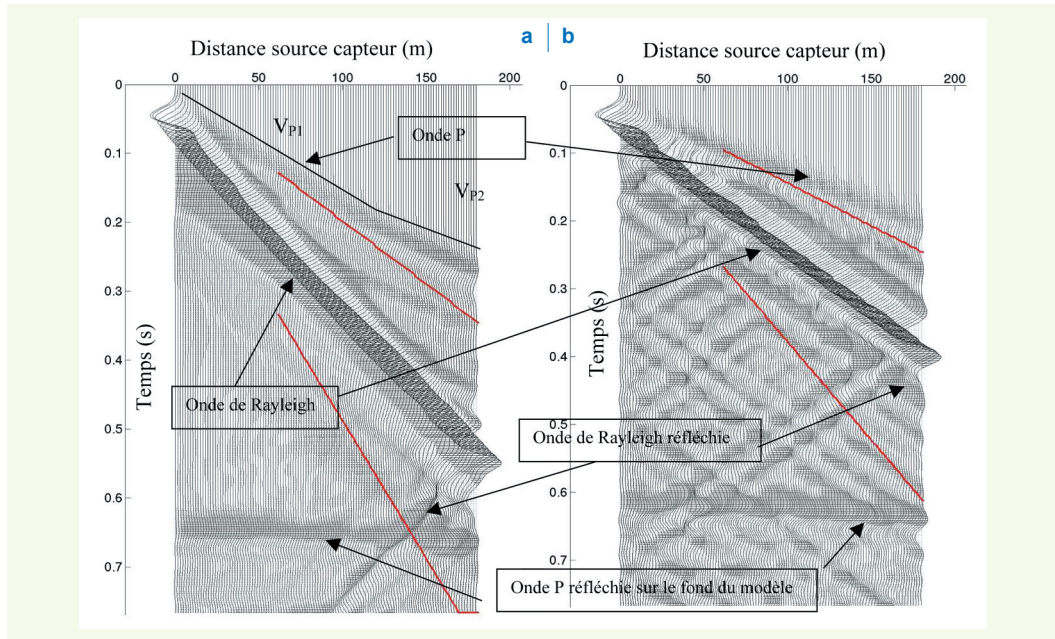
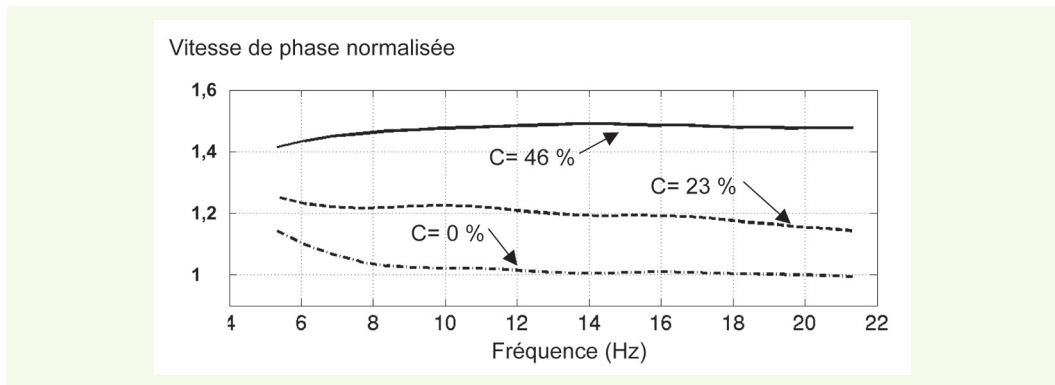


figure 3

Courbe de dispersion pour trois concentrations d'inclusions ($R = 2$ m).



Cet observable, après résolution d'un problème inverse, permet de remonter à la vitesse de propagation des ondes de cisaillement du milieu hétérogène.

► Deuxième observable : l'amortissement

L'amortissement géométrique de l'onde P a été identifié ainsi que celui de l'onde de Rayleigh. Ceci a permis de constater que, même dans un milieu bicouche (deux couches homogènes), l'amortissement de l'onde de Rayleigh n'est pas simple à calculer, en raison de la difficulté d'isoler l'onde de Rayleigh de l'onde S.

L'amortissement dû aux inclusions est très bruité par une multitude de diffractions sur les inclusions ; de plus, il est confondu avec l'amortissement géométrique, d'où la difficulté de travailler avec cet amortissement. On a plutôt choisi d'essayer de quantifier, dans le domaine temporel, l'effet de la diffraction multiple sur les inclusions. Ainsi, on a pu montrer que ces diffractions génèrent sur la coda (partie du signal après le passage de l'onde de Rayleigh directe) une loi de distribution de type Rayleigh dépendant d'un seul paramètre m_R qui évolue en R/λ .

Comme on ne dispose pas de moyen fiable pour séparer l'amortissement géométrique et l'amortissement dû aux diffractions, on a choisi de travailler avec l'amortissement global loin de la source, qui n'est autre que la somme de l'amortissement intrinsèque, de l'amortissement géométrique (qui est nul en 2D pour les ondes de surface en champ lointain) et de l'amortissement dû à la diffraction. L'amortissement global s'est avéré sensible à la taille des inclusions. En effet, quand la taille des inclusions devient importante devant λ , l'amortissement global pour les longueurs d'onde qui se propagent dans la couche supérieure semble être plus élevé que lorsque la taille des inclusions est faible devant λ .

RÉSOLUTION DU PROBLÈME INVERSE

■ Choix de la méthode

Le problème inverse dans cette étude consiste, à partir des courbes de dispersion, à remonter à un profil de vitesse de cisaillement du milieu. Le milieu est constitué d'un demi-espace, caractérisé par les vitesses de propagation des ondes de compression et de cisaillement V_{p2} , V_{s2} et la densité ρ_2 , surmonté d'une couche d'épaisseur e_1 et caractérisée par V_{p1} , V_{s1} , et ρ_1 . Dans cette étude, le milieu de propagation est choisi de telle sorte que le problème inverse soit bien conditionné ($V_{s1} < V_{s2}$). De plus, les informations *a priori* sont fortes : l'épaisseur e_1 est connue, les vitesses de propagation de l'onde de compression V_{p2} et V_{p1} sont déterminées par pointé des premières arrivées sur les sismogrammes. Le profil de vitesse de cisaillement est obtenu par inversion des courbes de dispersion du premier mode des ondes de surface avec le logiciel « Computer Programs in Seismology » [9]. Ce dernier repose sur une méthode aux moindres carrés pondérés.

■ Résultats et discussion

Une étude numérique paramétrique sur la concentration d'inclusions a été effectuée. Son but était de quantifier l'effet de ces inclusions sur la vitesse des ondes S dans le milieu équivalent V_{s1}^* . Pour cela, on a commencé par fixer la taille des inclusions et fait varier la concentration. On a ainsi pu obtenir l'évolution de la vitesse des ondes P et S dans le milieu équivalent en fonction de la concentration des inclusions.

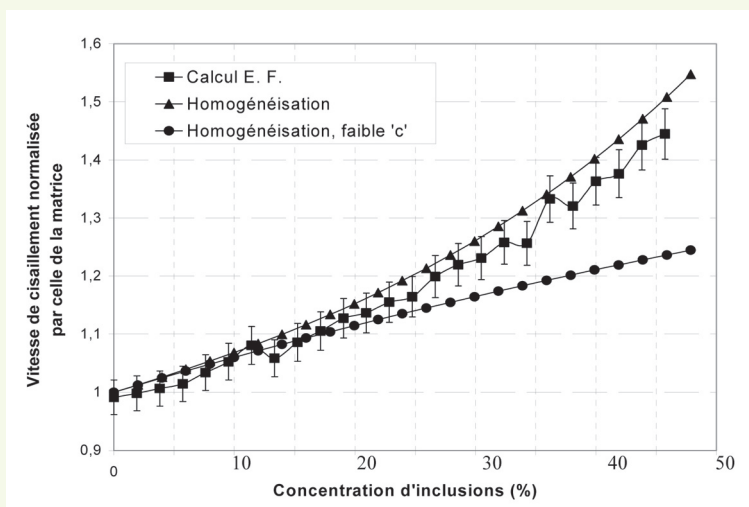
La **figure 4** montre que, pour un rayon de deux mètres, la vitesse des ondes de cisaillement obtenue par éléments finis coïncide, jusqu'à une concentration de 25 %, avec celle obtenue par homogénéisation avec l'hypothèse de faible concentration et jusqu'à 46 % avec le calcul d'homogénéisation. La barre d'erreur est de ± 3 %.

Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par la loi d'homogénéisation : les ondes de Rayleigh sont capables d'homogénéiser le sol jusqu'à des tailles d'inclusions qui peuvent atteindre $\frac{\lambda_{dM}}{15}$.

Les équations d'homogénéisation peuvent alors en principe être utilisées dans le problème inverse pour remonter par exemple à la concentration d'inclusions.

figure 4

Évolution de la vitesse des ondes de cisaillement dans le milieu hétérogène (moyenne de deux calculs avec $R = 2$ m) ;
(matrice : $\rho = 1\,800\text{ kg/m}^3$,
 $V_p = 773\text{ m/s}$ et
 $V_s = 413\text{ m/s}$) ;
(inclusion : $\rho = 2\,200\text{ kg/m}^3$,
 $V_p = 4\,284\text{ m/s}$ et
 $V_s = 2\,290\text{ m/s}$).



VALIDATION EXPÉRIMENTALE SUR MODÈLES CONTRÔLÉS

■ Description du modèle et du matériel expérimental

Le problème de la propagation d'ondes dans les sols hétérogènes a été modélisé avec une théorie d'homogénéisation et ensuite avec un modèle numérique. Il est toutefois intéressant d'utiliser aussi

une approche expérimentale, plus proche du terrain. Pour cela, on a procédé à la modélisation à échelle réduite d'un modèle type matrice/inclusions. Le modèle est bidimensionnel à l'échelle 1/60^e par rapport au modèle numérique d'éléments finis. Il présente une couche hétérogène sur un *substratum* supposé infini.

Le modèle a 14 m de longueur et 2 m de largeur (figure 6). En longueur, il est divisé en cinq parties : trois parties homogènes et deux parties hétérogènes ($c = 19\%$ et $c = 35\%$).

Le matériau utilisé comme matrice est un gravier 2/4 mm (sans fines). Les inclusions utilisées sont des rangées de briques dont la section est de 5,5 cm. La figure 5 donne les caractéristiques mécaniques des constituants de ce milieu, déterminées expérimentalement.

La figure 7 présente le dispositif expérimental, constitué d'une source (bille sur une enclume de granite enfouie avec un accéléromètre dédié) et de 31 accéléromètres Bruel et Kjaer N°4381V. Les signaux sont enregistrés sur un système d'acquisition de 32 voies synchrones (12 bits réels).

figure 5
Caractéristiques
mécaniques du modèle
physique réduit (masses
volumiques en kg/m³ et
vitesses en km/s).

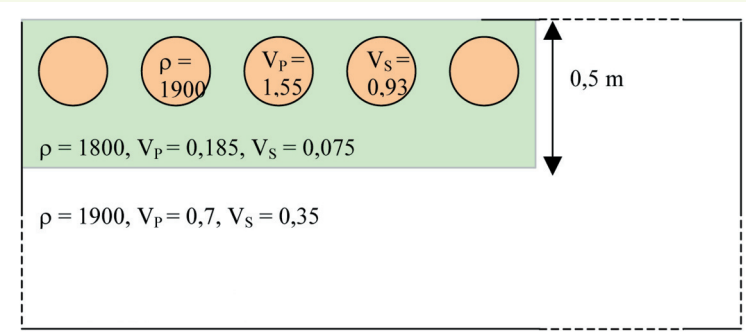


figure 6
- a : construction du milieu
hétérogène (19 %) ;
- b : construction du milieu
hétérogène (35 %) ;
- c : plan du modèle réduit.

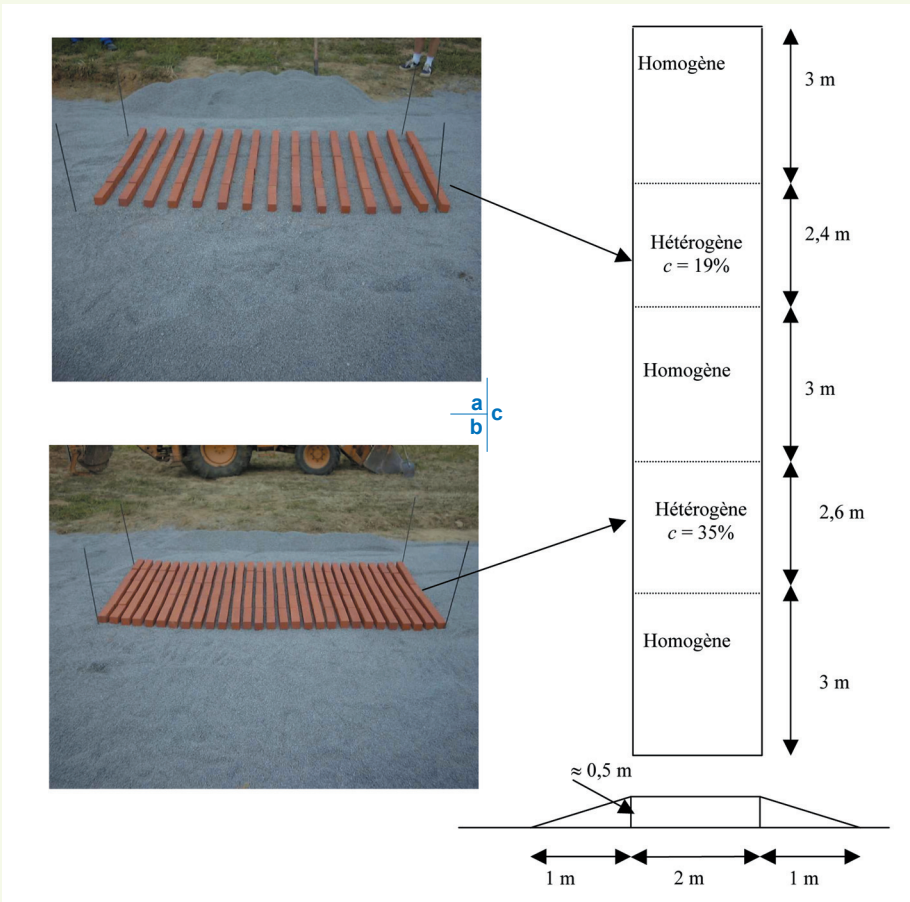
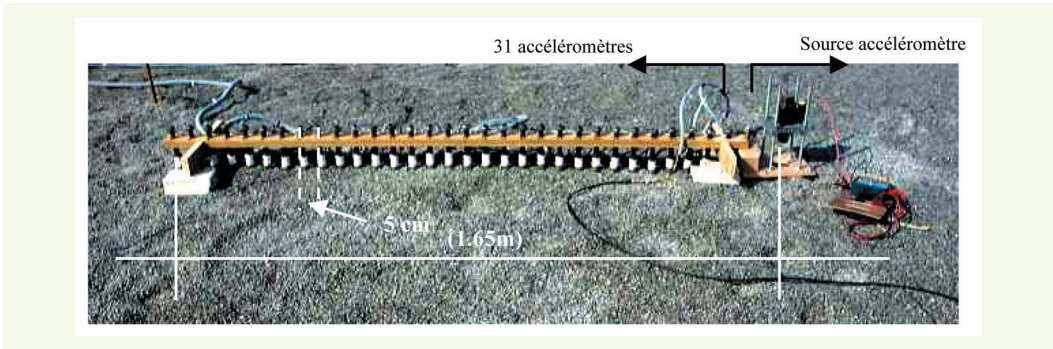


figure 7
Dispositif expérimental
pour le modèle réduit.



Résultats

La **figure 8** présente un sismogramme expérimental et la courbe de dispersion mesurée superposée à la courbe de dispersion du modèle solution du problème inverse. Le résultat de ce problème inverse donne la vitesse de l'onde de cisaillement dans la matrice qui, ici, est égale à $V_{s1} = 78 \text{ m/s}$.

La **figure 9** synthétise les résultats des trois modélisations réalisées (homogénéisation, éléments finis, modèle réduit) [10]. L'expérience sur modèle réduit confirme les résultats obtenus par la modélisation par éléments finis : les paramètres mécaniques moyens augmentent en fonction de la concentration des inclusions comme prévu numériquement. De plus, ces résultats sont conformes à ceux donnés par le modèle d'homogénéisation.

figure 8
- a : sismogramme
expérimental dans la zone
centrale sans inclusion ;
- b : courbe de dispersion
mesurée et inversée.

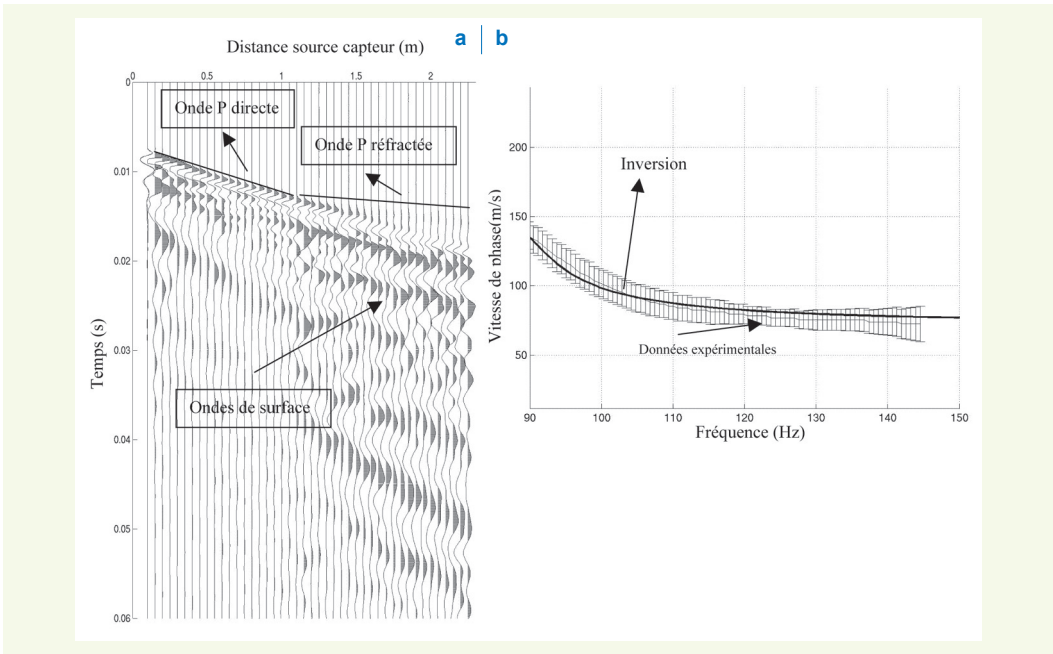
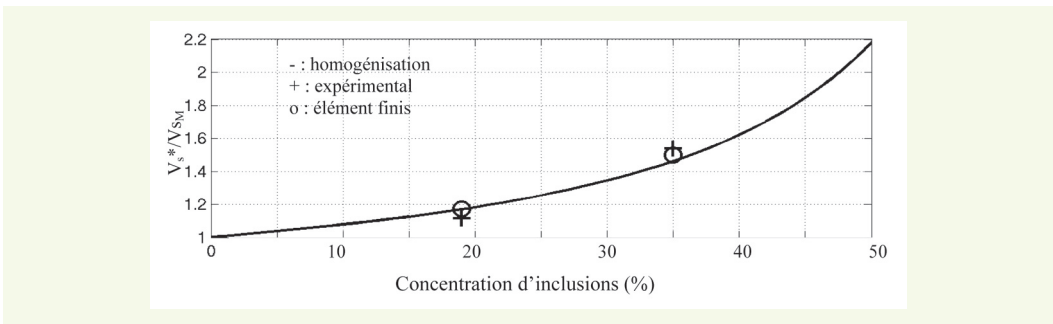


figure 9
Comparaison des
vitesses de cisaillement
obtenues par une méthode
d'homogénéisation, une
modélisation par éléments
finis et une modélisation
physique à échelle
réduite. Les vitesses sont
normalisées par celle de la
matrice.



APPLICATION IN SITU

Les sismogrammes utilisés ci-après ont été acquis par Étienne REY [11] dans le cadre de sa thèse au sein du Laboratoire interdisciplinaire de recherche impliquant la géologie et la mécanique (LIRIGM).

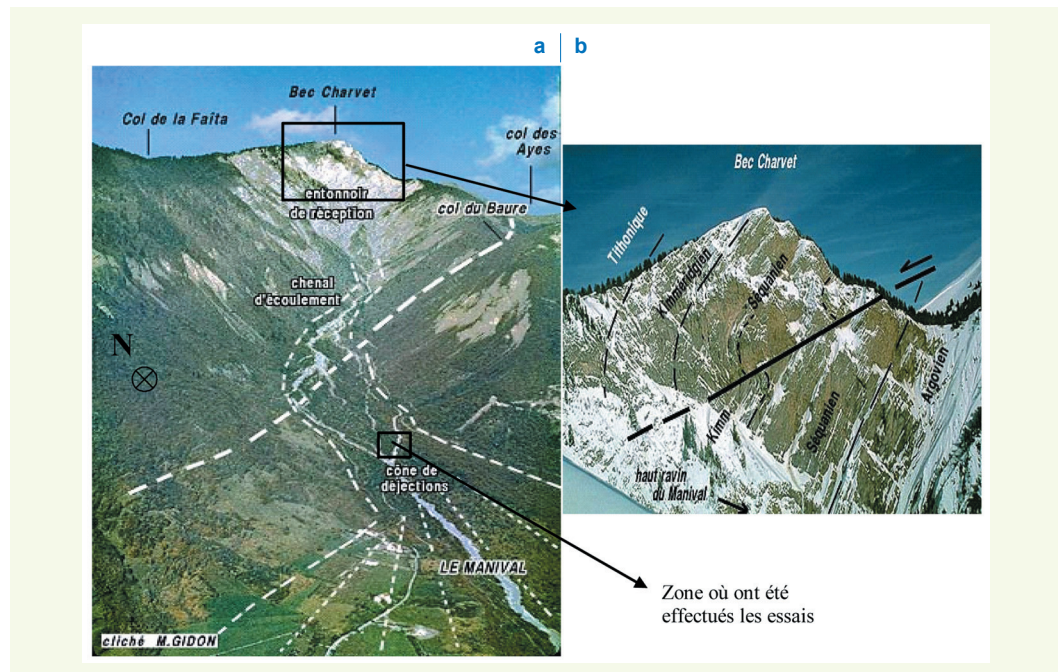
■ Description du site et du matériel

La zone d'étude se situe à une vingtaine de kilomètres au nord-est de Grenoble, à la limite entre les communes de Saint-Ismier et Saint-Nazaire-les-Eymes (Isère). Les mesures ont été réalisées sur le « cône de déjections » du torrent Manival (figure 10). Celui-ci incise par érosion régressive la bordure est du massif de la Chartreuse et rejoint l'Isère dans la vallée du Grésivaudan. Il a donné naissance par le passé à de nombreuses laves torrentielles, parfois dévastatrices, qui constituent son cône de déjection. Son cours est aujourd'hui stabilisé par de nombreux barrages de correction torrentielle qui « cassent » l'énergie de l'écoulement torrentiel et délimitent une succession de plages de dépôts. Des mesures ont été effectuées dans la plage principale de dépôts. De par leur origine et leur mode de mise en place (laves torrentielles), les matériaux dans la zone d'étude sont constitués de blocs calcaires plus ou moins marneux dans une matrice plus fine et argileuse. Le contraste de vitesse entre blocs et inclusions est donc important.

figure 10

Torrent Manival.

- a : vue globale du cours du torrent ;
- b : géologie de la « partie active » du bassin versant.



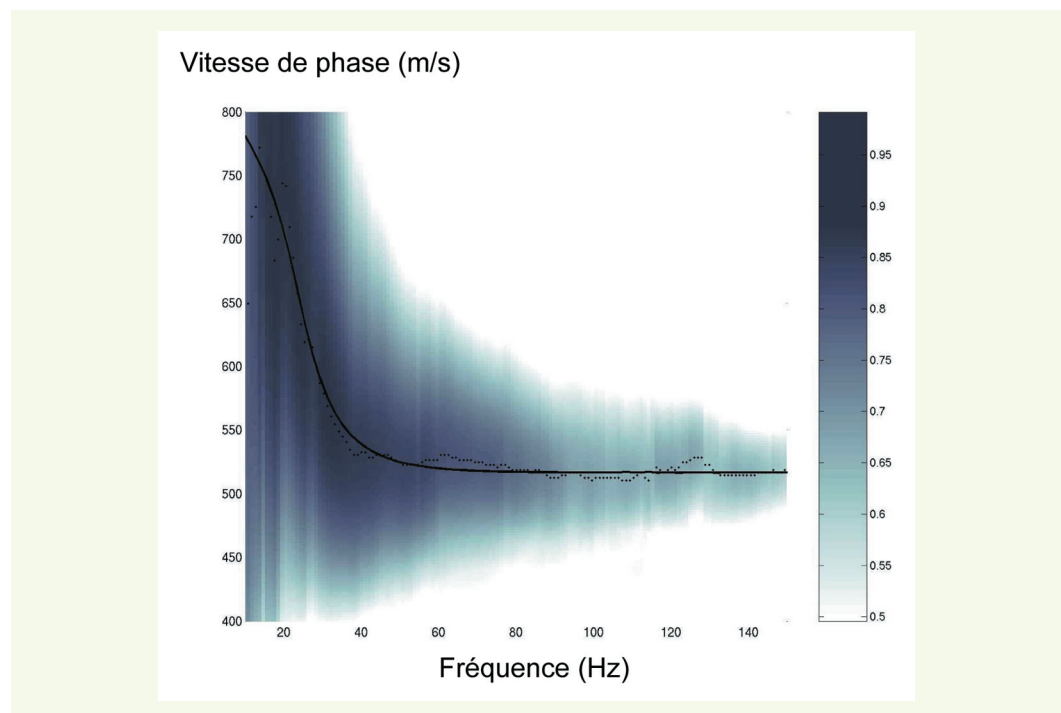
Les mesures ont été réalisées dans la plage de dépôt principale, dont le rôle est de stocker les matériaux des événements exceptionnels. Elle est curée régulièrement pour conserver un volume de stockage suffisant. Le fond de dimension 50 x 60 m² est plan et horizontal. Deux profils de 44 m de longueur ont été réalisés, soit 22 géophones verticaux 4,5 Hz espacés de 2 m. La source explosive (50 g de nitroglycérine enfouie à environ 0,8 m de profondeur) est localisée à plus de 20 m du premier géophone. Le profil 1 est situé au fond de la plage, le profil 2 en terrasse. Seuls les résultats du profil 1 sont présentés ci-après.

■ Résultats

Les résultats obtenus par la méthode de sismique réfraction par Étienne Rey [11] sont les suivants : $V_{p1} = 1\,000$ m/s, $V_{p2} = 1\,800$ m/s et e_1 de l'ordre de 6 à 9 mètres.

En procédant comme pour le modèle réduit, l'inversion de la courbe de dispersion (figure 11) donne avec $e_1 = 9$ m : $V_{s1} = 560$ m/s et $V_{s2} = 900$ m/s.

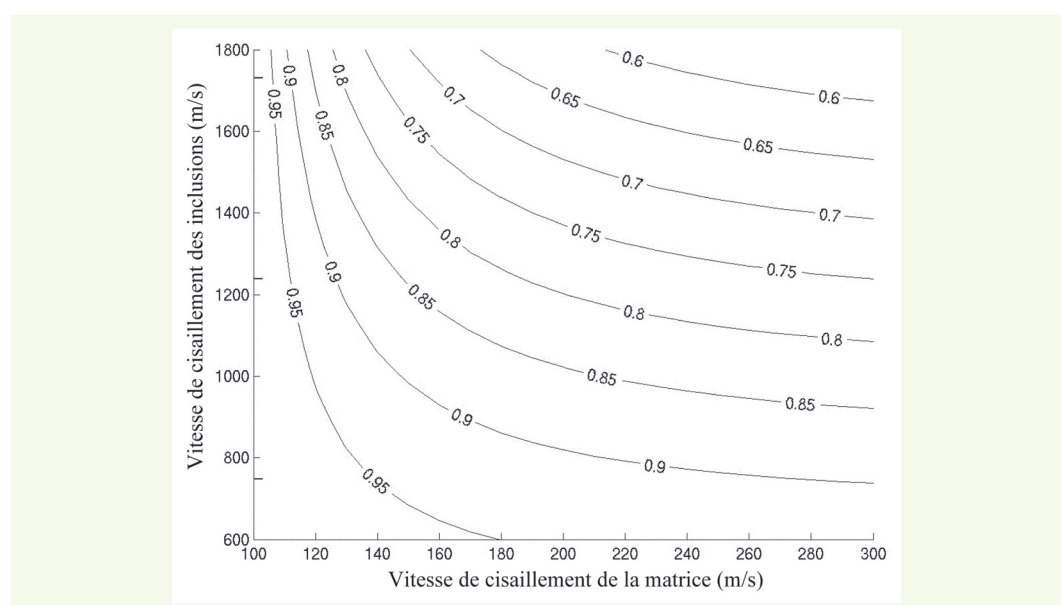
figure 11
Plan (vitesse de phase, fréquence) moyen. Courbe en pointillé : premier mode ; courbe en ligne : résultats de l'inversion.



Pour remonter à la concentration des inclusions à partir du modèle d'homogénéisation, on a besoin du module de cisaillement de la matrice et de celui des inclusions. Malheureusement, on n'a pas pu procéder à des essais qui donnent ces valeurs. De ce fait, on a été obligé d'estimer ces valeurs et ensuite de faire une étude paramétrique.

Une valeur type de V_s pour l'argile est $V_s = 200$ m/s, sa masse volumique étant estimée à $1\,800$ kg/m³. Une valeur type de V_s pour le calcaire marneux est $V_s = 1\,200$ m/s, sa masse volumique étant estimée à $2\,100$ kg/m³, et la vitesse de cisaillement V_s^* du milieu moyen équivalent mesurée est de 560 m/s. Avec ces valeurs, la concentration de calcaire est de l'ordre de 80% . Cependant, une étude paramétrique sur les valeurs de V_s de l'argile et des inclusions calcaires est nécessaire. La **figure 12** trace l'évolution de la concentration des inclusions calcaires pour différentes valeurs de vitesse de cisaillement de l'argile et du calcaire. Elle montre que, si la valeur V_s de l'argile varie entre 180 m/s et 300 m/s et si la valeur V_s du calcaire varie entre $1\,000$ m/s et $1\,600$ m/s, la concentration d'inclusions est comprise entre 70% et 90% . Ces valeurs sont proches de celles retrouvées dans le prélèvement effectué (de l'ordre de 80%).

figure 12
Concentration de calcaire en fonction des caractéristiques du calcaire et de l'argile.



CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le premier résultat de la thèse de Rabih Chammas [12] a été de montrer, numériquement avec les éléments finis et expérimentalement sur modèles, que les ondes de surface se propagent effectivement comme dans un sol homogénéisé pour des longueurs d'onde supérieures à 7,5 fois la taille nominale des inclusions. La vitesse de propagation des ondes de surface dans le milieu équivalent, obtenue grâce à l'étude de la propagation des ondes mécaniques dans le milieu discrétisé, est la même que celle calculée par combinaison des vitesses de propagation du milieu formé de la matrice et des inclusions avec une méthode d'homogénéisation auto-cohérente jusqu'à une concentration de 50 %. Les ondes de surface peuvent donc être utilisées pour effectuer un zonage en concentration. Il est important de noter qu'une fois la concentration déterminée par les ondes de surface, c'est-à-dire en petites déformations, elle peut être utilisée en grandes déformations pour remonter au module de cisaillement du sol équivalent par homogénéisation, dès lors que les caractéristiques de la matrice et des inclusions sont connues en grandes déformations.

Afin de remonter à des informations complémentaires comme la concentration ou la taille des inclusions, d'autres observables ont été recherchés. Ce fut l'occasion d'étudier l'amortissement des ondes de surface dans les milieux hétérogènes et de montrer que le facteur de qualité, déterminé avec les sismogrammes, ne correspond à sa définition mécanique que sous certaines hypothèses. Une difficulté rencontrée dans l'étude de l'amortissement intrinsèque du milieu hétérogène est liée à la correction de l'amortissement dû aux diffractions et à celle de l'amortissement géométrique. Dans le cas d'un milieu hétérogène ne présentant aucun contraste de modules mécaniques et de densité et où seul l'amortissement intrinsèque de la matrice et des inclusions diffère, celui des inclusions étant 10 fois plus faible que celui de la matrice, le facteur de qualité obtenu à partir des sismogrammes est du même ordre de grandeur que celui déterminé par la méthode d'homogénéisation utilisée pour les vitesses. Toutefois, les modélisations par éléments finis montrent que la taille des inclusions influence légèrement, mais systématiquement, cet amortissement intrinsèque tandis que la taille des inclusions n'intervient pas dans le calcul par homogénéisation dans l'approximation auto-cohérente. Aussi, une étude de l'amortissement global a été réalisée. Cet amortissement englobe l'amortissement dû à la diffraction sur les inclusions, l'amortissement intrinsèque et l'amortissement géométrique (nul en 2D pour les ondes de surface en champ lointain). Cet amortissement est sensible à la taille des inclusions : pour une concentration et une longueur d'onde données, il est plus important quand la taille des inclusions augmente. Il est confirmé dans cette étude que l'amortissement intrinsèque varie vraisemblablement avec la taille des inclusions. Ces premiers travaux sur l'amortissement intrinsèque ont ouvert de nombreuses pistes d'approfondissement.

La recherche d'observables robustes et sensibles par l'intermédiaire de modèles numériques dans des milieux élastiques homogènes et isotropes est parfois mise en défaut devant la complexité des milieux réels et par une minimisation excessive de l'influence de l'amortissement intrinsèque des matériaux. Il est donc stratégique de poursuivre et d'approfondir ces travaux de recherche sur la modélisation de l'amortissement intrinsèque des matériaux du génie civil.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **BOURBIE T., COUSSY O., ZINZER B.** : *Acoustics of Porous Media*, Editions Technip., Paris, **1986**.
- 2 **KELLER J.-B.**, Stochastic equations and wave propagation in random media, *Proceedings of Symposia in Applied Math. Phys.*, **1964**, vol. **16**, pp. 145-170.
- 3 **FRANKEL A., CLAYTON R.W.**, Finite difference simulations of seismic scattering : implications for the propagation of short-period seismic waves in the crust and models of crustal heterogeneity, *Journal of Geophysical Research*, **1986**, vol. **91**, n° **B6**, pp. 6465-6489.
- 4 **MÜLLER G., ROTH M., KORN M.**, Seismic-wave traveltimes in random media, *Geophysical journal international*, **1992**, vol. **110**, pp. 29-41.
- 5 **MUKERJI T., MAVKO G., MUJICA D., LUCET N.**, Scale-dependant seismic velocity in heterogeneous media, *Geophysics*, **1995**, vol. **60**, pp. 1222-1233.
- 6 **CHRISTENSEN R.M., LO K.H.**, Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **1979**, vol. **27**, pp. 315-330.

- 7 **CHAMMAS R., ABRAHAM O., CÔTE PH., PEDERSEN H.A., SEMBLAT J.-F.**, Characterization of heterogeneous soils using surface waves : homogenisation and numerical modeling, *ASCE International Journal of Geomechanics*, **2003**, vol. **3**, n° **1**, pp. 55-63.
- 8 **McMECHAN G.A., YEDLIN M.J.**, Analysis of dispersive waves by wave field transformation, *Geophysics*, **1981**, vol. **46**, pp. 869-874.
- 9 **HERRMANN R.B.**, *Computer programs in seismology*, **1985**, vol. **4** : surface wave inversion, Saint Louis University.
- 10 **ABRAHAM O., CHAMMAS R., CÔTE PH., PEDERSEN H.A., SEMBLAT J.-F.**, Mechanical characterisation of heterogeneous soils with surface waves : experimental validation on reduced-scale physical models, *Journal of Near Surface Geophysics*, **2004**, vol. **2**, pp. 249-258.
- 11 **REY E.**, *Caractérisation des sols hétérogènes par des méthodes géophysiques*, Thèse de doctorat de l'université de Grenoble I, **2005**.
- 12 **CHAMMAS R.**, *Caractérisation mécanique de sols hétérogènes par ondes de surface*, Thèse de doctorat de l'université de Nantes, École doctorale mécanique, thermique et génie civil, ED0367-059, **2002**.