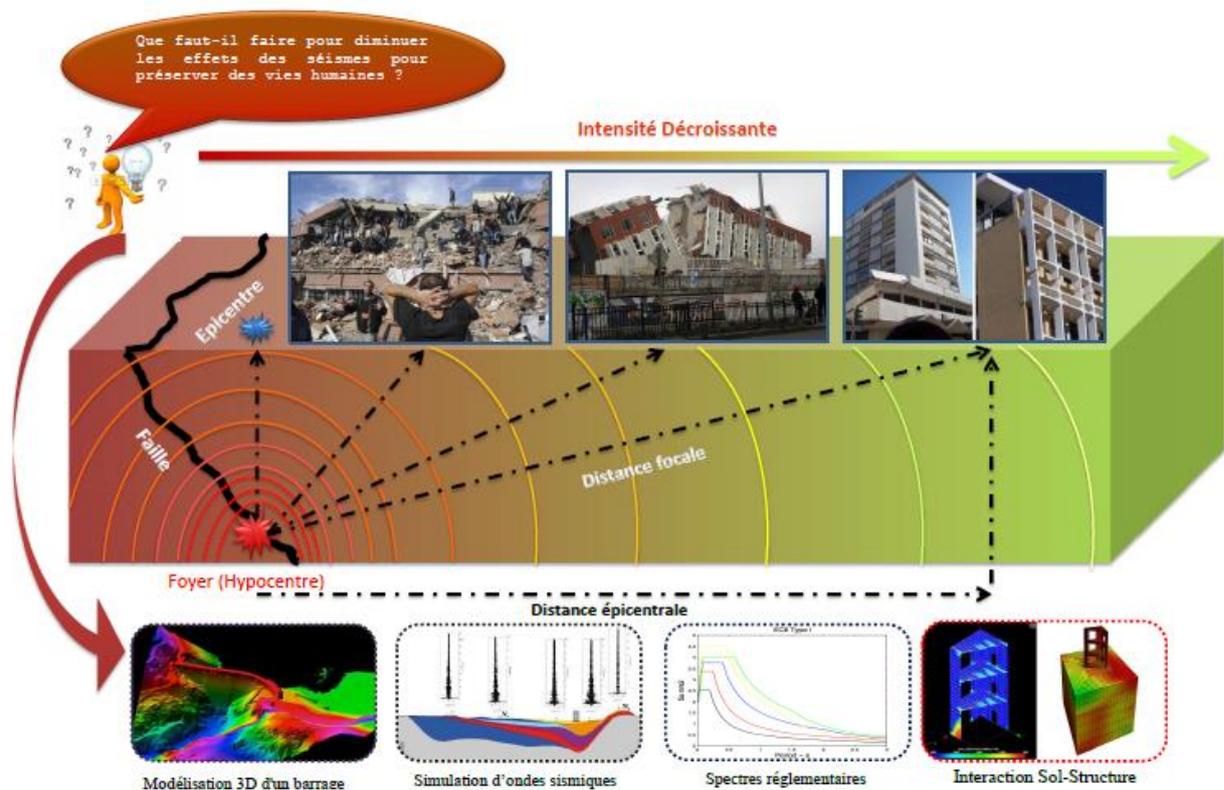




مختبر هندسة المواد

LABORATOIRE DE GÉOMATÉRIAUX

Journée d'étude sur la Dynamique des Sol et l'Interaction Sol-Structure



07 Novembre 2013

PRÉAMBULE

La sensibilisation aux risques liés aux séismes s'est largement accrue durant les dernières décennies notamment dans les pays à forte sismicité comme le Japon, la Turquie, l'Algérie, ... Le génie parasismique (prise en compte du risque sismique dans la conception des ouvrages) pose un défi ultime aux ingénieurs. Ces derniers doivent concevoir des bâtiments, des ponts et des barrages capables de résister aux forces dévastatrices engendrées par les tremblements de terre et doivent, de ce fait, s'associer à d'autres spécialistes (en géologie, en sismologie et en dynamique des sols) pour réaliser ces projets.

Il est connu que la lutte contre les dommages éventuels des tremblements de terre date du commencement de la civilisation humaine mais ces règles de construction se basaient plus sur l'intuition de l'ingénieur que sur des conceptions théoriques vérifiables. Malgré que le début de l'élaboration théorique du génie sismique se situe entre la fin du XIX et le début du XX siècle, en Algérie, l'importance du génie sismique pour la protection de la population et des biens matériels n'a été mise en relief qu'au début des années 70. Cependant, la survenue du séisme d'El Asnam (1980) a accéléré l'apparition des 1^{ères} Règles Parasismiques Algériennes (1981, version 1983), puis leur actualisation en 1988 (RPA88) pour combler certaines lacunes. Une nouvelle actualisation s'est faite suite aux leçons tirées des séismes survenues en Algérie: Oued Djer (1988), Tipaza (1989), Mascara (1994), ou à l'étranger: Spitak en Arménie (1988); Sanjan en Iran (1990), Loma Préita (1989) et Northridge (1994) en Californie, Kobé au Japon (1995), Izmit en Turquie (1999), ... Cette actualisation qui a bénéficié des grands progrès en la matière aux niveaux national et international a abouti aux RPA99. Puis suite au séisme de Boumerdes (2003), un addenda a vu le jour.

Ce développement rapide du Génie Parasismique s'est concrétisé par l'établissement de nouvelles Règles Parasismiques et aussi par l'admission que la Dynamique des Sols, qui permet de manière générale d'étudier le mouvement des terrains (ou des sols) sous l'effet des actions dynamiques (en particulier les séismes), est une composante fondamentale du Génie Parasismique.

D'autre part, l'analyse du risque sismique pour les ouvrages géotechniques ou pour les sols de fondation implique une modélisation pertinente des interactions sols structures sous sollicitations dynamiques et cycliques. Ces analyses permettent de rechercher des solutions de renforcement pour les sols. A cet effet, nos efforts doivent alors porter sur la modélisation des phénomènes dynamiques rapides et l'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages géotechniques. Aussi, les méthodes de prévision de la liquéfaction des sols doivent être complétées et améliorées à travers l'instrumentation de sites potentiellement liquéfiables, ou la prévision de la liquéfaction à partir d'essais in-situ, ou cas échéant, en menant des analyses sismiques de sites.

Dans ce contexte, l'objectif de l'organisation d'une journée d'étude sur la dynamique des sols et l'interaction sol-structure est de diffuser et transmettre à nos étudiants les connaissances acquises, qu'elles soient modestes, durant des années de recherche dans ce domaine. Notre but consiste aussi à transmettre les différents thèmes de recherches menées par l'équipe de recherche « Modélisation et Amélioration des Sols » au sein du laboratoire de Géomatériaux, à l'Université de Chlef, et aussi à poser des diagnostics, d'analyser les risques et de proposer des solutions géotechniques de remédiation.

PROGRAMME

- 09: 00 – 09: 20 Cérémonie d'ouverture
Présentation de l'Equipe de Recherche "*Modélisation et Amélioration des Sols* »
Z. Harichane, Professeur, Université de Chlef
- 09: 20 – 09: 40 Rôle des outils informatique en Génie parasismique
B. Boukhatem, Maître de Conférences (B), Université de Chlef
R. Rebouh, Maître Assistant (B), Université de Chlef
- 09: 40 – 10: 00 Pause-Café
- 10: 00 – 10: 30 Caractérisation sismique de sites à partir d'enregistrements accélérométriques en surface libre
M.A. Khellafi, Maître-Assistant (A), Université de Djelfa
Z. Harichane, Professeur, Université de Chlef
- 10: 30 – 11: 00 Modélisation du comportement non linéaire des sols par la méthode des éléments finis
A. Chehat, Maître-Assistant (B), Université de Khemis Méliana
Z. Harichane, Professeur, Université de Chlef
- 11: 00 – 11: 30 Etude stochastique de la variation spatiale du spectre de réponse
H. Djillali Berkane, Doctorante, Université de Chlef
Z. Harichane, Professeur, Université de Chlef
- 11: 30 – 12: 00 Utilisations pratiques de la propagation d'ondes dans l'étude de la réponse sismique des structures et milieux infinis
L. Bouaricha, F.Z. Hadj-Henni, Master, Université de Chlef
Z. Harichane, Professeur, Université de Chlef
- 12: 00 – 12: 30 Investigation stochastique de la réponse sismique des milieux poreux
A. Sadouki, Maître-Assistant (B), Université de Chlef
- 12: 30 – 13: 00 Modélisation stochastique de l'interaction dynamique sol-structure
M.E. Guellil, Maître-Assistant (B), Université de Chlef
- 13: 00 – 13: 30 Débat général et Clôture

Rôle des outils informatiques en génie parasismique

Bakhta BOUKHATEM¹, Redouane REBOUH²

¹Maître de Conférences, Université de Chel, b_boukhatem@yahoo.fr

²Maître Assistant, Université de Chel, redouane.dz@hotmail.com

Résumé

Le but de cette communication est de présenter les développements récents de la technologie de l'information et leurs influences en génie parasismique. Une attention particulière est portée à l'introduction de l'approche d'intelligence artificielle et ses techniques (réseaux de neurones, logique floue et algorithmes génétiques). Une telle approche devrait aider les étudiants et les ingénieurs à acquérir une meilleure compréhension de la nature et la flexibilité de l'application de ces techniques pour résoudre des problèmes complexes en dynamique des sols et des structures. Même si le développement des ordinateurs et des technologies de l'information de plus en plus puissants et très bénéfique pour le génie parasismique, il faut comprendre que cette complexité informatique ne peut se faire au détriment du jugement de l'ingénieur concepteur. La conception parasismique d'un ouvrage de génie civil reste et demeurera toujours aussi bien un art qu'une science.

Mots-clés: *Technologie de l'information, Intelligence artificielle, Génie parasismique.*

1. Introduction

L'évolution des ordinateurs et le développement des technologies de l'information fournissent des moyens pour l'accès rapide à une grande variété d'information et des méthodes pour modéliser des systèmes complexes. Les modèles de simulation, les bases de données, les systèmes d'aide à la décision, l'approche des systèmes virtuels et d'intelligence artificielle ont été rendus plus accessibles.

2. Génie parasismique et ordinateurs

En génie civil, il a été constaté que ces systèmes représentent un défi scientifique et ils ont été d'une grande importance [1-3]. En génie parasismique, il a été constaté que ces systèmes ont une grande puissance et aident les ingénieurs à acquérir une meilleure compréhension de la nature et la flexibilité de ces techniques pour résoudre des problèmes complexes en dynamique des sols et des structures. Les ordinateurs dotés de ces systèmes et des logiciels spécialisés (Fig.1) :

- permettent d'enregistrer et visualiser les mouvements du sol et aussi d'étudier et interpréter les données sismologiques (sol, structure) ;
- aident à la bonne conception parasismique, pour les ingénieurs, basée sur des outils de conception et de simulation ;
- facilitent la production et l'évaluation de cartes simplifiées d'aléa sismique ;
- participent à la diffusion des règlements parasismique pour la sécurité publique et la protection civile ;
- permettent la communication, la discussion et la collaboration dans un environnement virtuel

3. Techniques de l'informatique (Systèmes et IA)

Les techniques de l'approche d'intelligence artificielle (IA) telles que les Réseaux de Neurones (RN), la Logique Floue (LF) et les Algorithmes Génétiques (AG) sont actuellement devenues plus accessibles (Fig.2). Une telle approche devrait aider les étudiants et les ingénieurs à acquérir une meilleure compréhension de la nature et de la flexibilité de l'application de ces techniques comme des outils utiles et puissants pour résoudre des problèmes complexes en dynamique des sols et des structures [4-8].



Fig.1- Génie parasismique et ordinateurs.

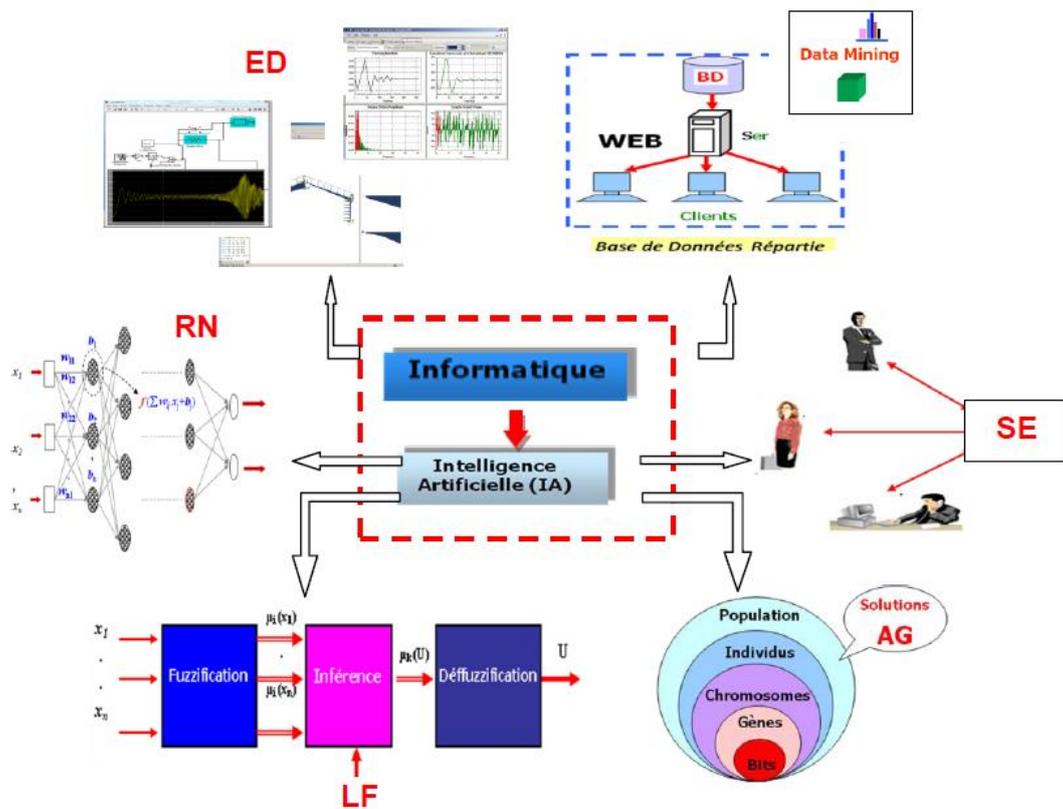


Fig.2-Techniques de l'informatique (Systèmes et IA).

4. Conclusion

Même si le développement des ordinateurs et des technologies de l'information notamment l'intelligence artificielle sont de plus en plus puissants et très bénéfiques pour le génie parasismique, il faut comprendre que cette complexité informatique ne peut se faire au détriment du jugement de l'ingénieur concepteur. La conception parasismique d'un ouvrage de génie civil reste et demeurera toujours aussi bien un art qu'une science.

Références bibliographiques

- [1] E. Lapointe, P. Paultre, J. Proulx, *LAS Langage d'analyse des structures*, 3^{ème} Colloque Château Bromo, Université de Sherbrooke, 2009.
- [2] MatlabR2013b, *Language of technical computing*, the Matworks.Inc.
- [3] V. A. Suarez, D. Irene, S. Quiñones, A. Ayala J. Hurtado, *VLEE : Virtual laboratory of earthquake engineering (VLEE)*, Earthquake Engineering Research, Centers Program of the National Science Foundation, Technical university of Loja, 2008.
- [4] Lignos, D. and Krawinkler, H. *Development and Utilization of Structural Component Databases for Performance-Based Earthquake Engineering*. Journal of Structural Engineering, Vol.139, SPECIAL ISSUE: NEES 2: Advances in Earthquake Engineering, pp.1382–1394, 2013.
- [5] A. Andalib, M. Zare, F. Atry, *A fuzzy expert system for earthquake prediction, case study: the zagros range*, Proceedings of the Third International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization Sharjah, U.A.E January, pp.20-22, 2009.
- [6] S. Niksarlioglu, and F. Kulahci, *An Artificial Neural Network Model for Earthquake Prediction and Relations between Environmental Parameters and Earthquakes*, International Journal of Environmental, Earth Science and Engineering Vol.7 No.2, 2013.
- [7] Z. Sen, *Supervised fuzzy logic modeling for building earthquake hazard assessment*, Expert System with Application, Vol.38, No.12, pp.14564-14573, 2011.
- [8] P-F Alvanitopoulos, I. Andreadis, A. Elenas, *A Genetic Algorithm for the Classification of Earthquake Damages in Buildings*, [Artificial Intelligence Applications and Innovations III](#), [IFIP International Federation for Information Processing](#), Vol. 296, pp 341-346, 2009.

Caractérisation sismique de sites à partir d'enregistrements accélérométriques en surface libre

Mourad Abdelwahab KHELLAFI¹, Zamila HARICHANE²

¹Maître Assistant, Université de Djelfa, khellafi_mourad@yahoo.fr

²Professeur, Université de Chlef, z_Harichane@yahoo.fr

Résumé

Nous présentons dans cette communication, une procédure inverse menant à l'identification de paramètres de profils de sol stratifiés horizontalement sous l'hypothèse de la propagation verticale des ondes de cisaillement de type SH en utilisant des enregistrements accélérométriques pris en surface libre de dépôts de sol. Cette approche est basée sur la formulation d'une fonction d'amplification théorique en fonction des différents paramètres des couches constituant les profils de sol (épaisseur, vitesse de l'onde de cisaillement, coefficient d'amortissement et masse volumique). Cette fonction est ensuite lissée avec celle définie expérimentalement à partir d'enregistrements en champ libre au moyen d'un algorithme de minimisation au sens des moindres carrés.

L'efficacité des algorithmes utilisés est étudiée en identifiant les paramètres inconnus considérés d'un profil de sol constitué d'une seule couche. Une procédure hybride est proposée afin d'améliorer la performance de l'identification

Mots-clés: Séisme, Accélérogramme, Analyse inverse, Rapport spectral, Fonction de transfert, Marquardt-Levenberg, Algorithme Génétique.

1. Introduction

Ce travail est consacré à l'identification des paramètres mécaniques de profils de sol et des structures géotechniques telles que les barrages en terre en utilisant des données accélérométriques enregistrées en surface libre, par une analyse inverse.

Dans l'analyse inverse, deux types d'algorithmes d'optimisation sont employés pour réduire au minimum la fonction erreur entre le rapport spectral mesuré et celui calculé par le modèle mécanique choisi, selon la technique de minimisation des moindres carrés. Le premier algorithme est basé sur la méthode classique d'optimisation par gradient de Marquardt-Levenberg (ML) et le second est basé sur un processus évolutionnaire d'optimisation par la méthode des Algorithmes Génétiques (AG). L'efficacité de chaque algorithme est étudiée en identifiant les paramètres inconnus considérés (épaisseur, coefficient d'amortissement, vitesse des ondes de cisaillement, et la masse volumique) de chaque couche d'un profil de sol stratifié horizontalement en considérant la propagation verticale des ondes SH.

Pour mettre en œuvre cette procédure, un logiciel a été réalisé. Une étude de l'efficacité du logiciel est étudiée, en premier temps sur un profil monocouche, pour évaluer ses capacités, sa faisabilité et prélever ses avantages et inconvénients avant de passer à un profil multicouches.

2. Description de la procédure d'identification

La méthode d'identification utilisée est basée sur la minimisation au sens des moindres carrés. La fonction erreur proposée χ^2 est définie par :

$$\chi^2(\{\gamma\}, v) = K \sum_{i=1}^{N_p} \int_{v_1}^{v_2} |y_{ei}(v) - y_{di}(\{\gamma\}, v)|^2 dv \quad (1)$$

où N_p est le nombre de points de mesure intégrés dans la minimisation. $\{\gamma\}$ est le vecteur des paramètres dont dépend la réponse du modèle, $y_{ei}(v)$ est la réponse mesurée au point i qui est dans notre cas fonction de la fréquence (forme complexe ou module de la fonction de transfert) et $y_{di}(\{\gamma\}, v)$ est la réponse du modèle au point i . v_1 et v_2 sont les bornes initiale et finale de l'intervalle d'identification. K est une constante de normalisation de l'erreur, définie ici par:

$$\mathbf{K} = \left(\sum_{i=1}^{\text{NP}} \int_{v1}^{v2} |y_{di}(v)|^2 dv \right)^{-1} \quad (2)$$

Les paramètres du modèle doivent être choisis afin de réduire au minimum la fonction d'erreur entre les réponses enregistrées et calculées en résolvant un problème d'optimisation non linéaire.

3. Formulation du problème

Ayant deux enregistrements des accélérations de sol, $\ddot{y}_{S_A}(t)$ et $\ddot{y}_{S_B}(t)$, en deux stations S_A et S_B , respectivement. Les amplitudes des spectres de Fourier, $\ddot{Y}_{S_A}(\omega)$ et $\ddot{Y}_{S_B}(\omega)$, sont obtenus par la transformée de Fourier rapide (FFT) de Cooley et de Tukey. Le rapport des deux amplitudes est utilisé pour définir la fonction d'amplification qui représente la fonction « mesurée » $Y_{ei}(\omega)$:

$$Y_{ei}(\omega) = \alpha \frac{\ddot{Y}_{S_A}(\omega)}{\ddot{Y}_{S_B}(\omega)} \quad (3)$$

Dans cette équation, α est un coefficient égal à 1 si S_A et le S_B sont, respectivement, une station en surface libre et une station en affleurement rocheux proche. Les paramètres du modèle $\{\gamma\}$ dans notre processus d'inversion incluent l'épaisseur, le coefficient d'amortissement, la vitesse de l'onde S et la masse volumique de chaque couche d'un profil de sol stratifié horizontalement. Les équations ont été obtenues en considérant la théorie de propagation unidimensionnelle des ondes SH. La fonction modèle proposée $Y_{di}(\{\gamma\}, \omega)$ est définie comme étant la fonction de transfert (ou d'amplification) qui est obtenu en prenant le rapport entre l'amplitude du déplacement sur la surface libre du profil de sol et celui sur l'affleurement rocheux.

Ainsi, la fonction de transfert prend la forme de l'équation suivante :

$$T_{1, N_S+1}^*(\{\gamma\}, \omega) = \frac{1}{\left(\frac{1}{2}\right)^{N_S} V(\{\gamma\}, \omega)} \quad (4)$$

où N_S est le nombre de couches dans le profil de sol et V est une fonction dépendant du vecteur des paramètres $\{\gamma\}$ et de la fréquence ω (Harichane et al., 2005).

4. Efficacité de la procédure d'identification

Pour examiner l'efficacité de la procédure de minimisation, nous proposons d'effectuer le processus de minimisation sur la courbe numérique, obtenue comme décrite précédemment, pour identifier les paramètres d'un profil de sol constitué d'une seule couche reposant sur un rocher rigide. Le logiciel élaboré « OptAGML » peut réaliser toutes ces tâches et fournir les résultats à la fois numériques et graphiques.

4.1. Identification de 3 paramètres

On suppose qu'un paramètre (épaisseur de la couche h_1) est connu et on essaye d'identifier les autres. Dans ce cas, l'utilisation de la méthode ML est intéressante, où seulement quelques itérations suffisent pour aboutir au résultat recherché (figure 1).

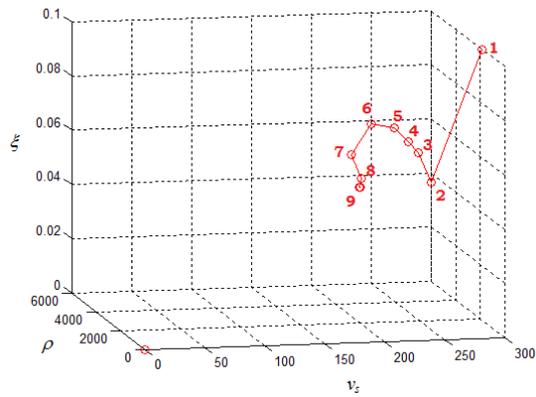


Fig. 1- Evolution de la solution recherchée avec la méthode ML seule.

L'utilisation de la méthode des AG seule apporte beaucoup au processus d'identification car elle permet d'effectuer une recherche sur un domaine large en donnant des résultats très proches de la solution recherchée (figure 2). Cependant, plus le domaine de recherche est large plus on a besoin davantage d'individus dans la population mais pas trop (tableau 1).

Tableau 1. Relation entre le domaine de recherche et la taille de la population dans une identification par AGs seuls.

Etendue du domaine de recherche par rapport aux valeurs recherchées	Nombre d'individus dans la population de recherche	Nombre de générations (itérations)	Erreur max. sur les valeurs retrouvées par rapport aux valeurs recherchées (%)
10%	300	20	2,5
50%	800	40	7
Valeurs possibles	1000	40	10

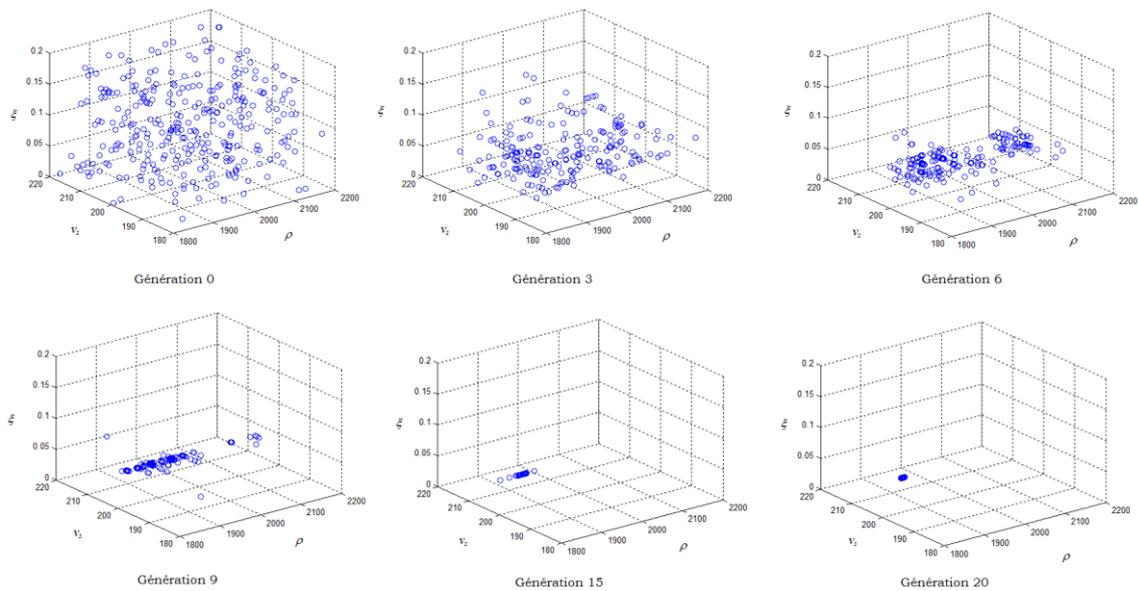


Fig. 2- Evolution de la population de recherche dans l'identification par AGs seuls.

Il est noté que l'utilisation des AG nécessite un temps de calcul énorme comparé à celui consommé par ML seule. Ainsi, on peut proposer d'utiliser une identification hybride. Ceci permettra d'atteindre l'objectif visé en améliorant les valeurs retrouvées initialement par AG avec ML pour atteindre des valeurs finales très proches des valeurs recherchées en moins de coût. Cette proposition est confirmée en reprenant les deux derniers tests du tableau 1.

Ainsi, en effectuant une optimisation hybride sur l'ensemble des valeurs possibles que peut prendre chaque paramètre, l'objectif est atteint en un nombre réduit d'itérations (tableau 2).

Tableau 2. Résultats de l'identification hybride.

Etendue du domaine de recherche / rapport aux valeurs recherchées	Nombre d'individus dans la population de recherche	Nombre de générations AG (itérations)	Valeurs des paramètres après AG seul	Nombre d'itérations ML	Valeurs finales après AG+ML
50%	800	8	$\rho_1=2271.2 \text{ kg/m}^3$ $V_{s1}=194.8 \text{ m/s}$ $\xi_1 = 0.06$	3	$\rho_1=2022.5 \text{ kg/m}^3$ $V_{s1}=197.5 \text{ m/s}$ $\xi_1 = 0.05$
Valeurs possibles	1000	10	$\rho_1 = 1603.9 \text{ kg/m}^3$ $V_{s1} = 195.0 \text{ m/s}$ $\xi_1 = 0.09$	4	$\rho_1=2025.9 \text{ kg/m}^3$ $V_{s1} = 197.2 \text{ m/s}$ $\xi_1 = 0.05$

3.2. Identification de 4 paramètres

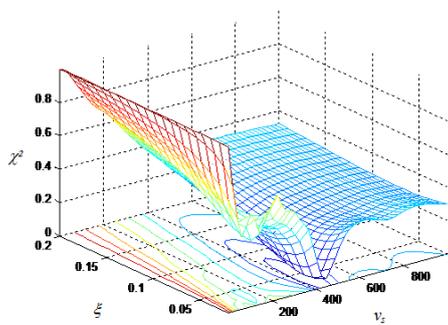
Maintenant, tous les paramètres du modèle sont à identifier. Dans ce cas, la minimisation est réalisée avec optimisation hybride en plusieurs essais. La méthode des AG est lancée au départ avec une population de 400 points évoluant en 20 générations sur l'espace de toutes les valeurs possibles pour chaque paramètre. Les valeurs obtenues seront améliorées ensuite avec la méthode ML. On trace quelques surfaces : $\chi^2=f(x_1, x_2)$, sachant que les deux autres variables x_3 et x_4 sont variables aussi (avec $x_{1,2,3,4}=h_1, \rho_1, \xi_1$ et V_{s1}).

En gardant à l'esprit que la fonction χ^2 dépend de 4 paramètres, les figures précédentes (figure 3) ne donnent pas une vue globale et définitive au problème mais fournissent des informations sur les relations entre χ^2 et les deux paramètres étudiés. La première remarque constatée est que le logiciel donne toujours des résultats à chaque exécution. L'inspection des figures montre toujours des surfaces accidentées avec une partie étendue et une partie concave. Dans plusieurs figures, le minimum global existe et perceptible sauf qu'il ne correspond pas aux valeurs recherchées à l'exception de celle ξ_1 . D'autre part, plusieurs minimums locaux sont constatés, ce qui oblige de faire plusieurs essais lors de la procédure d'identification pour s'assurer de ne pas se coincer dans l'un d'eux. Dans tous les résultats obtenus, la valeur finale $\xi_1 \approx 0,05$ est conforme avec les conclusions mathématiques plus haut, tandis que les autres paramètres sont variables. Seulement, il est noté que le rapport $h_1/V_{s1} \approx 0,1$ ($=20/200$) tandis que le produit $\rho_1 \cdot V_{s1}$ est très variable.

Ainsi, l'identification est plus complexe en y ajoutant la valeur de h_1 , sauf si le domaine de recherche est resserré aux valeurs recherchées.

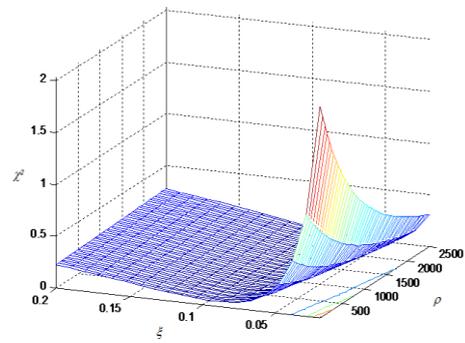
4. Conclusion

Les résultats obtenus de l'étude ci-dessus montre que la procédure proposée est prometteuse. Dans le cas général, l'identification de tous les paramètres ensemble reste encore difficile et doit être améliorée avec plus d'informations. Cependant, l'identification du coefficient d'amortissement est toujours possible par conséquence de son implication mathématique indépendamment des autres paramètres dans la fonction modèle. D'autre part, la connaissance préalable d'informations sur l'épaisseur de la couche a permis l'identification de tous les paramètres recherchés. Ceci constitue un moyen d'aide très intéressant pour la procédure proposée. Néanmoins, il est trop tôt d'en tirer des conclusions finales sans entamer une procédure d'identification des paramètres d'un profil de sol multicouche.



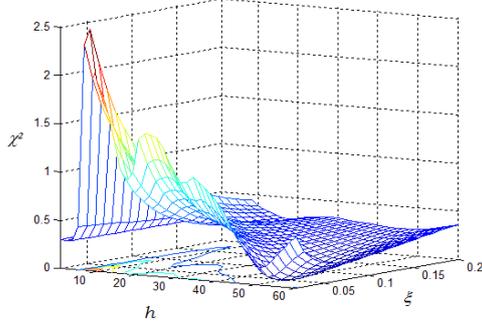
1^{er} essai, valeurs obtenus :

$$h_1 = 44.42 \quad \rho_1 = 1556.73 \quad V_{S1} = 443.37 \quad \xi_1 = 0.04$$



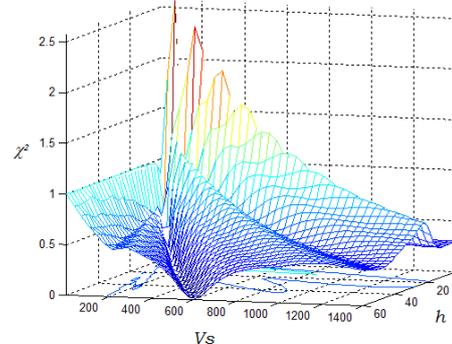
2^{ème} essai, valeurs obtenus :

$$h_1 = 10.48 \quad \rho_1 = 2291.53300 \quad V_{S1} = 102.64 \quad \xi_1 = 0.06$$



3^{ème} essai, valeurs obtenus :

$$h_1 = 50.97\text{m}, \rho_1 = 685.60\text{kg/m}^3, V_{S1} = 509.72\text{m/s}, \xi_1 = 0.05$$



4^{ème} essai, valeurs obtenus :

$$h_1 = 40.33\text{m}, \rho_1 = 571.04\text{kg/m}^3, V_{S1} = 408.52\text{m/s}, \xi_1 = 0.06$$

Fig. 3- Surface de la fonction d'erreur en fonction des paramètres recherchés deux à deux.

Références bibliographiques

Dakoulas P., Gazetas G. A class of inhomogeneous shear models for seismic response of dams and embankments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 1985;4(4):166-182.

Harichane Z, Afra H, Elachachi SM. An identification procedure of soil profile characteristics from two free field accelerometer records. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2005;5(8):431-438.

Levasseur S, Malécot Y, Boulon M, Flavigny E. Soil parameter identification using a genetic algorithm. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 2008; 32(2):189-213.

Oskay C, Zeghal M. A survey of geotechnical system identification techniques. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 20; 31(4):568-582.

Sadouki A, Harichane Z, Chehat A. Response of a randomly inhomogeneous layered media to harmonic excitations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2012;36(5):84-95.

Modélisation du Comportement non Linéaire des Sols par la Méthode des Eléments Finis

Azzedine CHEHAT¹, Zamila HARICHANE²

¹Maître Assistant, Université de Khemis Méliana, a_chehat@yahoo.fr

²Professeur, Université de Chlef, z_Harichane@yahoo.fr

Résumé

Par opposition à d'autres matériaux, les sols sont fortement non linéaires. Cette non linéarité cause la diminution de la rigidité du sol quand l'amplitude de la déformation de cisaillement augmente et peut être exprimée par une loi de comportement. D'autre part, la méthode des éléments finis connaît depuis plusieurs décennies un développement considérable dans l'étude du comportement des sols, sous différents types de sollicitations.

Ainsi, afin d'assimiler le comportement complexe des sols, le présent thème de recherche traite la modélisation du comportement non linéaire des sols. A cette fin, des relations de comportements élastoplastiques sont intégrées en conjonction avec la méthode des éléments finis. Des validations expérimentales sont menées. Une attention particulière est apportée au comportement des dépôts de sol et barrages en terre sous sollicitation sismiques.

Mots-clés: *Sollicitation sismique, Comportement non Linéaire, Loi de comportement Elastoplastique, Fonction de Charge, boucle d'Hystérique, Méthode des Eléments Finis.*

1. Introduction

La construction du modèle fait appel à un ensemble d'équations qui doivent ensuite être étalonnées pour un matériau donné à l'aide d'une base expérimentale constituée d'essais mécaniques, et, éventuellement, d'observations microstructurales.

Avec l'apparition de l'outil informatique, la résolution numérique s'est avérée comme un moyen incontournable pour les analyses post-sismiques. Elle constitue également un outil intéressant de simulation en vue de la prédiction de la réponse de dépôts de sol ou d'ouvrages en terre constitués avec l'apport des géomatériaux à des mouvements sismiques futurs.

Le premier modèle proposé par les chercheurs qui permet de quantifier l'effet de la variabilité spatio-temporelle est le modèle unidimensionnel en posant l'hypothèse d'une propagation verticale des ondes et une extension latérale infinie. La méthode la plus universelle est celle utilisant le modèle viscoélastique linéaire équivalente proposé par Seed et Idriss au début des années 70 qui a été largement utilisée pour sa simplicité et la qualité des résultats fournis. Cette méthode présente toutefois des limitations importantes surtout lorsque le sol se caractérise par de fortes non linéarités. De ce fait le recours aux méthodes non linéaires devient alors nécessaire.

L'objectif fixé par le présent thème est de prendre en compte le comportement non linéaire des sols par la méthode des éléments finis sous différents types de chargement entre autres, le chargement sismique. A cette fin, un modèle élastoplastique bidimensionnel basé sur les critères de Von Mises, Drucker-Prager, Mohr Coulomb et d'autres critères a été développé pour pouvoir simuler de manière acceptable le comportement des sols sous différents types de sollicitations.

2. Proposition d'une fonction de charge générale

Les géomatériaux présentent une forme deviatorique globale particulière, plutôt arrondie mais surtout présentant une différence du comportement entre l'extension et la compression. En effet, pour une même pression moyenne, on peut mesurer une différence significative sur la valeur de J_2 entre une configuration en compression ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$) (configuration de l'essai triaxial classique) et en extension ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) (essai d'extension, pour lequel on effectue une montée en pression hydrostatique, avant de relâcher une contrainte principale). Les valeurs ce rapport pour quelques critères courants sont produites (Tableau 1). On le notera L_s (Siegfried, 2006):

$$L_s = \frac{\sqrt{J_2(\theta=-\frac{\pi}{6})}}{\sqrt{J_2(\theta=\frac{\pi}{6})}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3 |_{\text{Extension}}}{\sigma_1 - \sigma_3 |_{\text{Compression}}} \quad (1)$$

θ est l'angle de Lode.

La fonction $g_p(\theta)$ définit une « fonction de forme » du critère. elle permet de raisonner sur un critère « normalisé » dans le plan déviatorique $g_p(\theta = \frac{\pi}{6}) = 1$.

Une forme générale d'une fonction de chargement est définie de la manière suivante:

$$f(\sigma) = \frac{3}{2}\sqrt{3}(1 - L_s)J_3 + (L_s^2 + 1 - L_s)\sigma^+ - \sigma^{+3}L_s^2 \quad (2)$$

Nous pouvons déterminer les caractéristiques suivantes pour la fonction de forme, après quelques simplifications:

$$g_p^3(\theta) \sin 3\theta (-1 + L_s) + (1 - L_s + L_s^2)g_p^2(\theta) - L_s^2 = 0 \quad (3)$$

Tableau 1- Valeurs du rapport L_s pour quelques critères courants (Siegfried, 2006).

Critères	σ^+	$g_p(\theta)$	L_s
Tresca	$\frac{R_c}{\sqrt{3}}$	$\frac{\sqrt{3}}{2 \cos \theta}$	1
Von Misès	K	1	1
Mohr-Coulomb	$\frac{2\sqrt{3} \sin \varphi (H - \sigma_m)}{3 - \sin \varphi}$	$\frac{3 - \sin \varphi}{2(\sqrt{3} \cos \theta - \sin \theta \sin \varphi)}$	$\frac{3 - \sin \varphi}{3 + \sin \varphi}$
Drücker-Prager	$3\alpha(H - \sigma_m)$	1	1

Dans le repère des contraintes principales planes (σ_1, σ_2), la fonction de charge s'exprime par (Mao-Hong Yu and al, 2006):

$$\left. \begin{aligned} F &= \sigma_1 - \frac{\alpha b}{1 + b} \sigma_2 = \sigma_t, \text{ Si } \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1}{1 + \alpha} \\ F' &= \frac{1}{1 + b} (\sigma_1 + b\sigma_2) = \sigma_t, \text{ Si } \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1}{1 + \alpha} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ou

$$\left. \begin{aligned} b &= \frac{(1 + \alpha)\tau_0 - \sigma_t}{\sigma_t - \tau_0} \\ \alpha &= \frac{\sigma_t}{\sigma_c} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

La figure (1), schématise les fonctions de charges pour $b=0$ à 1 dans le cas $\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_c} = 1$. La figure (2), schématise les fonctions de charges pour $b=0$ à 1 dans le cas $\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_c} = 1$, dans le repère des contraintes déviatorique spatiales.

3. Relations constitives élastoplastique

La forme mathématique de la fonction de chargement peut s'écrire par la relation suivante :

$$\left. \begin{aligned} F(\sigma_{ij}, k) &= 0 \\ F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, k) &= 0 \\ F(I_1, J_2, J_3, k) &= 0 \\ F(I_1, J_2, \theta, k) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

La dérivation de $F(\sigma_{ij}, k)$, nous donne :

$$dF = \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial F}{\partial k} dk = \frac{\partial F}{\partial \sigma_1} d\sigma_1 + \frac{\partial F}{\partial \sigma_2} d\sigma_2 + \frac{\partial F}{\partial \sigma_3} d\sigma_3 + \frac{\partial F}{\partial k} dk \quad (7)$$

On pose $A = -\frac{1}{\alpha \lambda} \frac{\partial F}{\partial k} dk$, L'expression du module tangent élastoplastique $[D]^{ep}$:

$$[D]^{ep} = [D] - \frac{[D]\{a\}\{a^T\}[D]}{A + \{a^T\}[D]\{a\}} \quad (8)$$

avec :

$$\{a^T\} = \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} = \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma_x}, \frac{\partial F}{\partial \sigma_y}, \frac{\partial F}{\partial \sigma_z}, \frac{\partial F}{\partial \tau_{xy}}, \frac{\partial F}{\partial \tau_{yz}}, \frac{\partial F}{\partial \tau_{xz}} \right\} \quad (9)$$

4. Resultats et interpretation

4.1. Implantations numériques

Un programme numérique en élément finis nommé « *PLASTE2* », à été élaboré en utilisant le langage de programmation « *FORTAN 90* ». Ce programme qui calcule les réponses statique et dynamique du point de vue déplacements, vitesses et accélérations à n'importe quel point de la structure se base sur une formulation élastoplastique isotrope basée sur différents critères standards.

4.2. réponse du site de Garner Valley

Dans cette application, nous allons déterminer la réponse d'un site en termes d'accélérations à la surface du profil de sol représentatif. Nous avons choisi le site de Garner Valley, qui se trouve à environ 7 km à l'est de San Jacinto. Le profil de sol est équipé par des accélérographes pour différents niveaux de profondeurs.

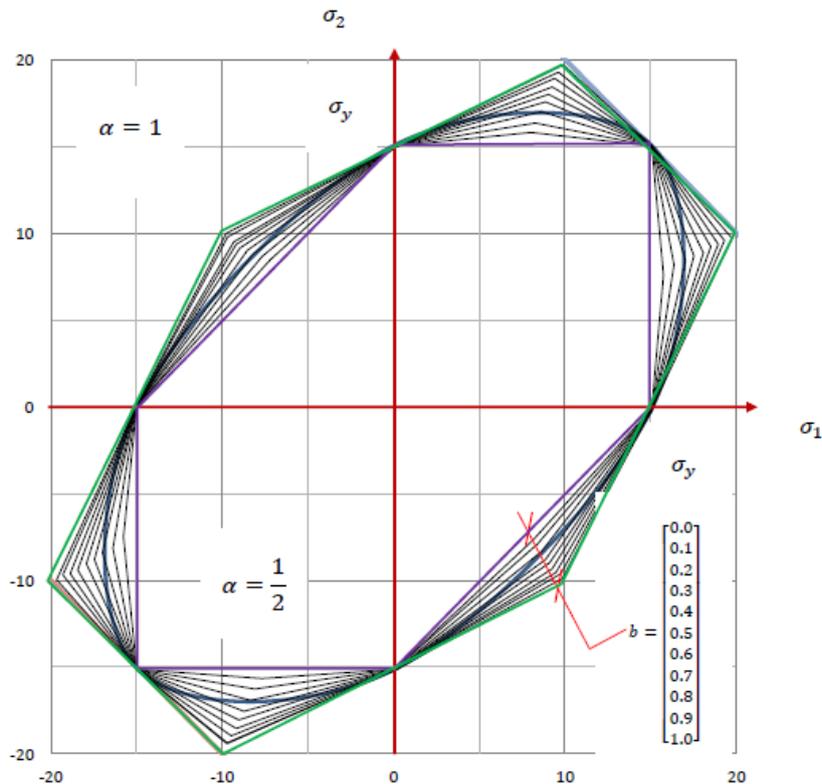


Fig. 1- Famille de fonctions de chargement $b \in [0,1]$ pour $\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_c} = 1$.

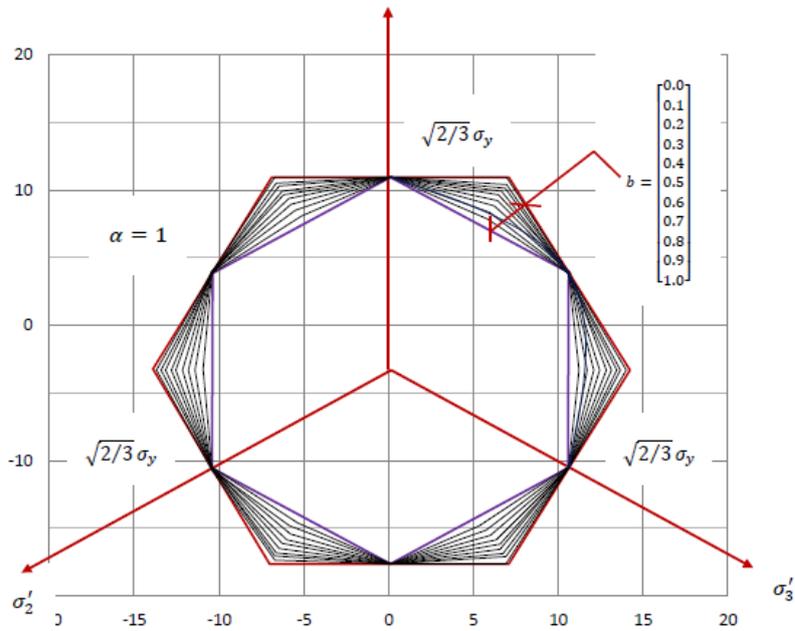


Fig. 2- Famille de fonctions de chargement $b \in [0,1]$ pour $\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_c} = 1$, dans l'espace des contraintes déviatoriques.

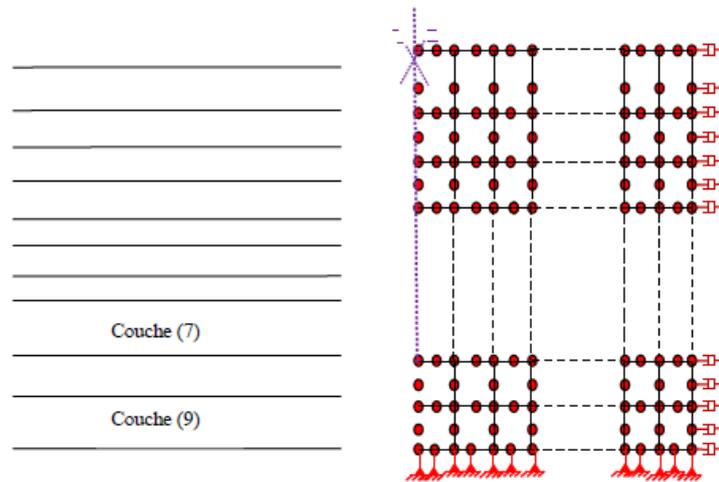


Fig. 3- Discrétisation spatiale du profil de sol à base rigide.

Les caractéristiques géotechniques sont récapitulées dans le tableau (2), suivant des données trouvées par différents chercheurs et la figure (3), schématise la modélisation du profil de sol à base rigide. La figure (4), exprime la comparaison entre l'accélération calculée viscoélastoplastique avec $\xi = 0.$, tandis que la figure (5), exprime la comparaison entre l'accélération calculée viscoélastoplastique et l'accélération enregistrée à la surface libre suivant la relation qui a comme expression $[C] = \omega_1 \xi [M] + \frac{\xi}{\omega_1} [K]$ (Zienkiewicz et al, 1999).

D'après la figure (4), le programme prédit des accélérations surestimées par rapport à celles enregistrées, tandis que pour la figure (5), il y'a une convergence des résultats calculés et enregistés pour un faible coefficient d'amortissement.

.. ...

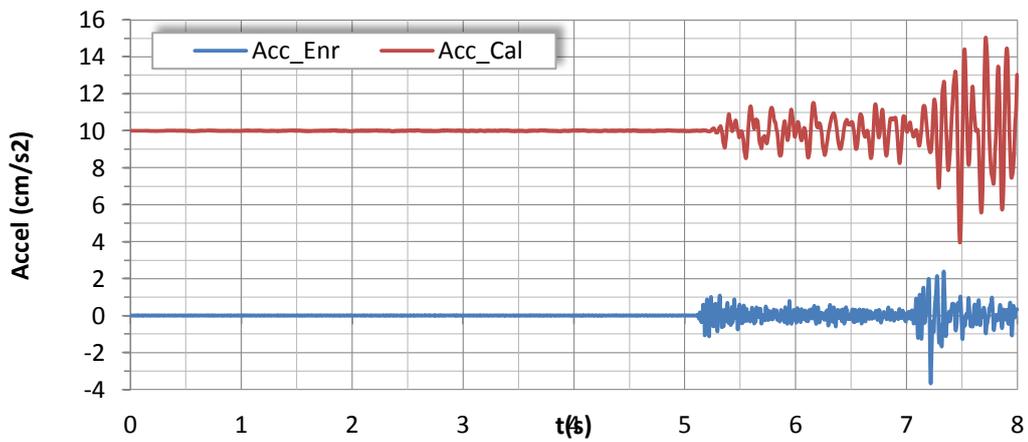


Fig. 4- Comparaison entre l'accélération viscoélastoplastique et l'accélération enregistrée à la surface libre du profil de sol de Garner Valley ($\xi = 0$).

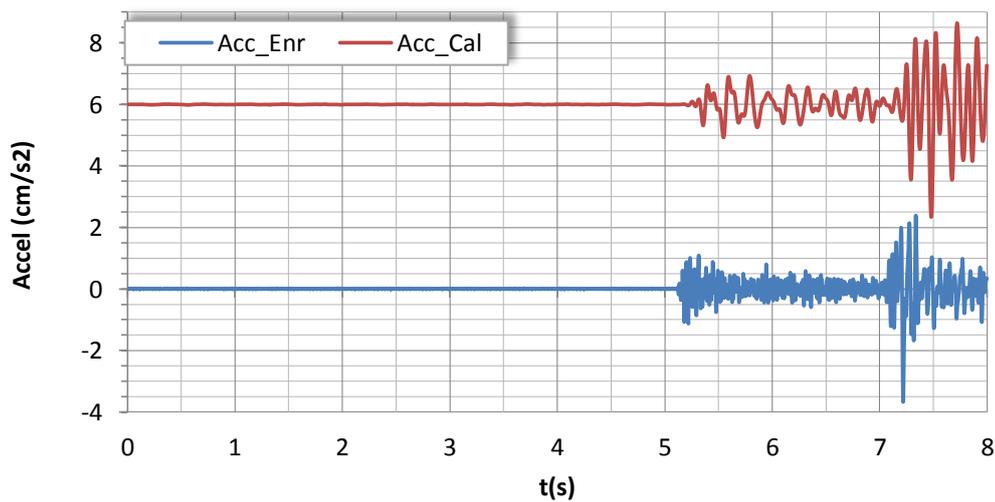


Fig. 5- Comparaison entre l'accélération viscoélastoplastique et l'accélération enregistrée à la surface libre du profil de sol de Garner Valley ($\xi = 0.02$).

6. Conclusion

Un programme en éléments finis qui traite le comportement non linéaire des sols dans le cas 2D a été élaboré. Pour prendre la variabilité spatiale des données géotechniques, l'injection de l'effet stochastique dans le programme devient nécessaire.

La validation de la réponse statistique et dynamique de profils de sol et des barrages en terre est en cours.

Références bibliographiques

Mao-Hong Yu, Guo-Wei Ma, Hong-Fu Qiang and Yong-Qiang Zhang (2006), Generalized Plasticity, Springer Berlin Heidelberg New York, 461p.

Siegfried Maiolino (2006), Fonction de charge générale en géomécanique : application aux travaux souterrains Soutenu, Thèse de Doctorat, 'École Polytechnique, 245p.

Zienkiewicz O. C., Chan A.H., Pastor, M., Schrefler B. A., Shiomi T. (1999), Computational Geomechanics with Special Reference to Earthquake Engineering, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 375p.

Etude stochastique de la variation spatiale du spectre de réponse

Hakima DJILLALI BERKANE¹, Zamila HARICHANE²

¹Doctorante, Université de Chlef, dbhakima@yahoo.fr

²Professeur, Université de Chlef, z_Harichane@yahoo.fr

Résumé

La variation spatiale du mouvement sismique du sol signifie les différences dans l'amplitude et la phase des mouvements sismiques enregistrés sur de larges surfaces. Cette variation a un effet important sur la réponse des ouvrages tels que les ponts, les pipelines, ... Puisque ce type d'ouvrages s'étend sur une grande superficie de sol, leurs supports reçoivent différents mouvements durant un séisme. Cette variation peut augmenter leur réponse au-delà de celle prévue si le mouvement incident est supposé identique au niveau de tous les supports. D'autre part, l'aspect aléatoire des propriétés de sol peut avoir comme conséquence de plus grands mouvements de sol que ceux basés sur les propriétés déterministes, selon l'approche des vibrations aléatoires. La variation spatiale des propriétés de sol pourrait causer la réflexion et la réfraction de certaines formes d'onde, qui a comme conséquence différentes caractéristiques du mouvement de sol à la surface du sol. Ainsi, la variabilité spatiale du mouvement en surface de sol résulte d'une part de la variation spatiale du mouvement incident et d'autre part de la variation aléatoire des propriétés des couches de sol constituant le milieu étudié.

L'objectif du présent travail, est d'étudier la variabilité spatiale du mouvement sismique en surface de sol en tenant en compte de la variation spatiale du mouvement incident et de la variation aléatoire des propriétés des couches de sol constituant le milieu hétérogène étudié. L'étude est menée en terme du spectre de réponse.

Mots-clés: *Incohérence, variabilité spatiale, Spectre de réponse, mouvement sismique, structures multi-support.*

1. Introduction

La Stochasticité des propriétés du sol peut causer l'amplification du mouvement en surface du sol plus importante que lorsque les propriétés sont supposées déterministes (Zerva et Stephenson, 2011 ; sadouki et al., 2012). En outre, la variation spatiale du mouvement de sol est associée de l'effet de passage d'onde, l'effet de la perte de cohérence et l'effet de site local est généralement obtenue à partir de l'analyse des enregistrements sismiques d'un même événement à plusieurs endroits à la surface du sol. Ainsi, dans les zones avec ou sans enregistrements denses de mouvement de sol, la théorie des vibrations aléatoires (TVA) est la principale méthode utilisée pour estimer les mouvements du sol et permet un calcul rapide pour estimer les caractéristiques à partir des modèles sismologiques (Liu et Pezeshk, 1999).

Dans ce contexte, la présente étude propose une approche analytique pour tenir compte de la stochasticité des couches de sol sur la variation spatiale des mouvements sismiques du sol. La méthode de calcul commence par le calcul de la densité spectrale croisée du déplacement total en surface du sol (DSP) due aux ondes incidentes aléatoires frappant le rocher. Ensuite, le spectre de réponse en champ libre est obtenu à partir de la fonction de densité spectrale de puissance. Des exemples numériques sont menés afin d'illustrer l'efficacité de cette approche. Deux types de sol (meuble et ferme) s'étendant latéralement à l'infini sont choisis. Pour des raisons de simplicité, il est supposé que la stochasticité dans les caractéristiques du sol est due à la variabilité dans la profondeur des couches (Zerva et Harrada, 1997).

2. Conversion de la fonction de densité spectrale de puissance en spectres de réponse

Pour un processus aléatoire Gaussien stationnaire, il existe une relation entre le spectres de réponse en pseudo-vitesse $S_v(\omega_0, \xi)$ et la DSP (Sharma et al., 1996 ; Liu et Pezeshk, 1998 ; Afra et Pecker, 2002):

$$S_v(\omega_0, \xi) = \omega_d \sigma_q \sqrt{g + \frac{\gamma}{g} + 2\gamma} \quad (1)$$

Où σ_q est l'écart type du processus de sortie de fréquence ω_0 (rad/sec) et d'amortissement ξ au processus d'entrée de DSP $S_{uu}(\omega)$:

$$\sigma_q^2(\omega_0, \xi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega_{max}} H^2(\omega) S_{uu}(\chi, \omega) d\omega \quad (2)$$

où $H(\omega)$ est la fonction de transfert harmonique d'un oscillateur à un degré de liberté de fréquence ω_0 et d'amortissement ξ , et $S_{uu}(\chi, \omega)$ est la densité spectrale croisée du déplacement total en surface du sol qui représente la stochasticité des couches de sol et s'écrit (Zerva et Harada, 1997):

$$S_{uu}(\chi, \omega) = [(\omega_0^4 + (2\beta + 4\xi_0^2 - 2)\omega_0^2\omega^2 + (\beta - 1)^2\omega^4) \times |H(\omega)|^2 + 4\beta^2\omega_0^4\omega^2 R_{\omega\omega}(\chi) \times |H(\omega)|^4] S_{u_b u_b}(\chi, \omega) \quad (3)$$

où $S_{u_b u_b}(\chi, \omega)$ est la fonction de densité spectrale croisée du mouvement incident, et $R_{\omega\omega}(\chi)$ est la fonction de corrélation de la pulsation $\omega(x)$ représentant ses fluctuations dans la couche de sol autour de sa valeur moyenne et est spécifique à chaque profil de sol (Harada et Shinozuka, 1987). Dans l'équation (1), $g = 2 \ln(2f_q T_q)$, $\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$ et γ est la constante d'Euler égale à 0.577216. T_q est la durée du processus stationnaire de sortie :

$$f_q = \frac{1}{2\pi} \left(\sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \right) \quad (4)$$

3. Résultats numériques

Le spectre de réponse en pseudo-vitesse dérivé de l'équation (1) est représenté dans la figure 1 pour chaque type de sol, pour les coefficients de variation (Cv) de la pulsation fondamentale (ω_0) allant de 0 à 20 %. Cette figure montre que le spectre de pseudo vitesse augmente lorsque le coefficient de variation augmente pour les deux types de sol. Ce qui indique que, lorsque l'hétérogénéité du milieu augmente les amplitudes spectrales sont plus importantes. Ce résultat signifie que cette hétérogénéité pourrait affecter la réponse sismique des structures puisque les spectres de réponse peuvent être utilisés comme des mouvements d'entrée à leurs supports lors de leur analyse sismique.

Ensuite, des spectres de réponse pour différentes distances de séparation sont représentés sur la figure 2. Cette figure montre que l'amplitude spectrale s'atténue lorsque la distance de séparation augmente (200, 300, 400 m) pour les deux types de sol. Cette variation spatiale des mouvements sismiques de sol peut induire des forces supplémentaires importantes dans les structures multi-supportées à celles obtenues si on suppose que les mouvements à tous les supports sont identiques.

4. Conclusions

Nous avons étudié dans ce travail, l'effet de la stochasticité du sol sur le mouvement sismique en surface en termes du spectre de réponse et la contribution de cette stochasticité dans la variation spatiale de la réponse de sol. Nous concluons que la stochasticité du sol a une grande importance sur la réponse des structures puisque les spectres de réponse étudiés peuvent être utilisés comme entrée aux supports.

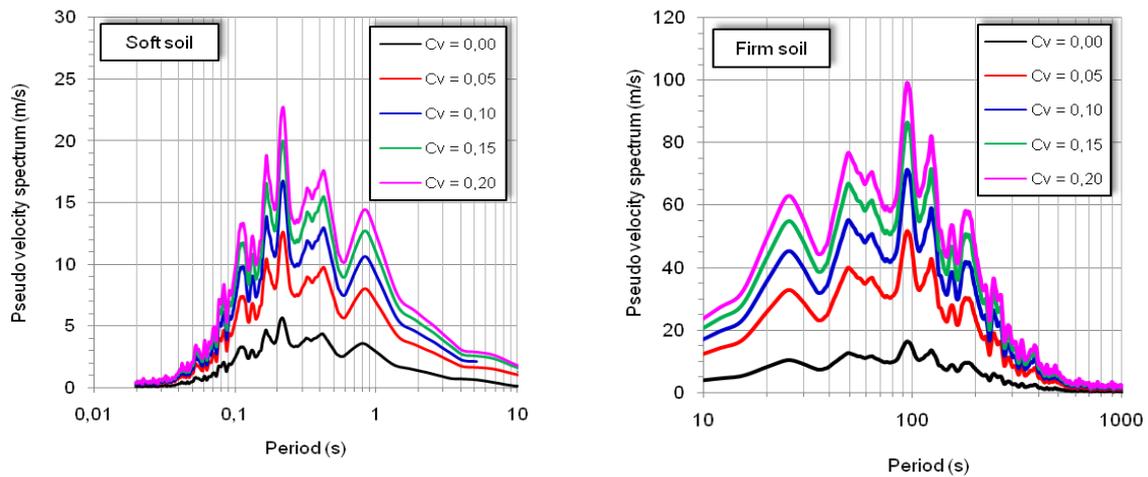


Fig.1- Effets de stochasticité du sol sur le spectre de pseudo vitesse.

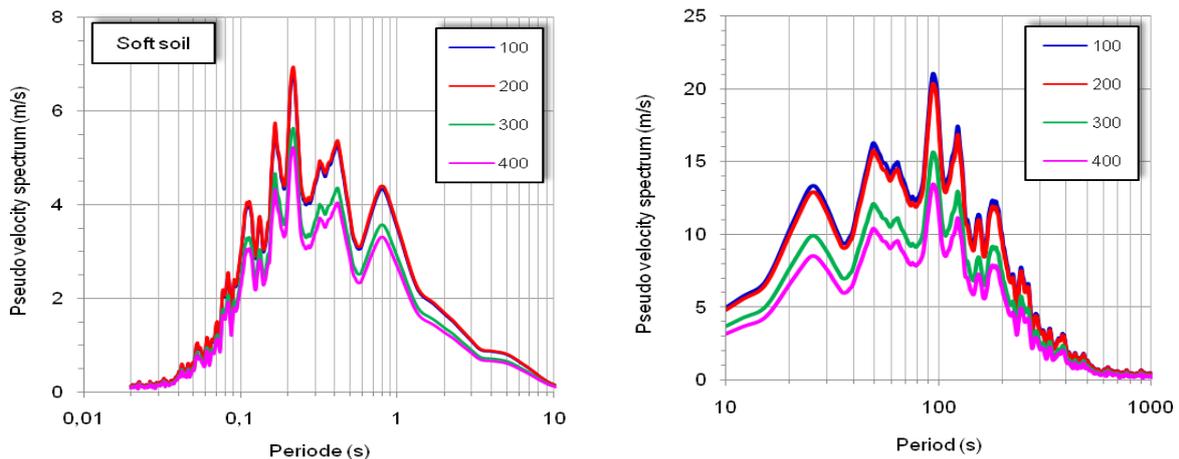


Fig. 2- Variation spatiale du spectre de pseudo vitesse.

Références bibliographiques

- Afra H, Pecker A (2002) "Calculation of free field response spectrum of a non-homogeneous soil deposit from bed rock response spectrum", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22:157-165
- Harada T, Shinozuka M (1987) "stochastic analysis of spatial variability of seismic ground deformation", in: Ariman T., Hamada M., Singhal A.C. & Cakmak A.S. (Eds.), *Recent advances in lifeline earthquake engineering*, Elsevier, Amsterda,.
- Liu L, Penzeshk S A (1998) "stochastic approach in estimating the pseudo-relative spectral velocity", *Earthquake spectra*, 14:301-317
- Sharma RD, Kumer S, Gupta S (1996) "Use of power spectral density in deriving response spectral shapes for aseismic design", *Nuclear engineering and design*, 165:151-160.
- Sadouki A, Harichane Z, Chehat A (2012) "Response of a randomly inhomogeneous layered media to harmonic excitations", *Soil dynamics and earthquake engineering*, 36:84-95.
- Zerva A and Stephenson WR (2011) "Stochastic characteristics of seismic excitations at a non-uniform (rock and soil) site", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31:1261-1284.
- Zerva A and Harada T (1997) "Effect of surface layer stochastically on seismic ground motion coherence and strain estimates", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 16:445-457.

Utilisations Pratiques de la Propagation d'Ondes dans l'Etude de la Réponse Sismique des Structures et Milieux Infinis

Leila BOUARICHA¹, Tatma-Zohra HADJ HENNI², Zamila HARICHANE³

¹Master en Génie Civil, Université de Chlef, lila_happy17@hotmail.fr

²Master en Génie Civil, Université de Chlef, hadj-henni02@hotmail.fr

³Professeur, Université de Chlef, z_Harichane@yahoo.fr

Résumé

L'étude de la propagation des ondes sismiques dans les milieux infinis et semi-infinis fournit les ingrédients nécessaires à la mise en œuvre d'une analyse dynamique des structures. Pour cela des équations d'ondes sont formulées et résolues. Pour résoudre l'équation d'onde relative à la propagation verticale d'une onde de cisaillement de type SH, nous avons choisi de suivre deux méthodes. Une méthode déterministe, en premier lieu, puis une méthode stochastique basée sur les simulations de Monté Carlo de manière à varier le champ d'applications de la propagation d'ondes. Ensuite, nous avons élaboré un programme numérique en langage Fortran « Stoch-Onde », basé sur les méthodes de Monté Carlo, pour l'évaluation de la réponse sismique à la surface d'un dépôt de sol qui est représenté par une couche de sol homogène s'étendant latéralement à l'infini à caractéristiques déterministes ou aléatoires reposant sur un demi-espace.

La réponse à la surface de ce dépôt de sol, en termes de spectres de réponse, est injectée dans le logiciel SAP2000 pour estimer la force sismique à appliquer à la base d'une structure lors d'un éventuel calcul dynamique. L'effet de la variabilité spatiale des propriétés de sol est capturé en représentant ces propriétés par des variables aléatoires suivant une distribution Gaussienne de la densité de probabilité.

Mots-clés: *Onde, sol, structure, Monté Carlo, stochastique, programme numérique, force sismique.*

1. Introduction

La définition de l'excitation sismique à appliquer à l'ouvrage relève du domaine de la dynamique des sols et dépend essentiellement de la nature du sol. Celle-ci est en fait la réponse sismique d'un dépôt de sol en surface libre soumis à une onde sismique générée au niveau du substratum rocheux c-à-d à sa base.

La procédure d'étude de l'amplification des mouvements sismiques s'appuie sur le principe de la Transformée de Fourier et se résume dans les trois étapes suivantes:

- Calcul de la fonction de transfert du profil de sol étudié.
- Transformation de l'excitation (accélérogramme) du domaine temporel au domaine fréquentiel au moyen de la Transformée de Fourier.
- Multiplication de la transformée de Fourier de l'excitation par la fonction de transfert du profil de sol (convolution) pour obtenir la réponse en domaine fréquentiel en surface. L'obtention de la réponse en domaine temporel se fait au moyen de la Transformée de Fourier Inverse (Presse et al., 1992).

La réponse du profil de sol du site étudié en termes d'accélération et spectres de réponse peut être obtenue en utilisant le programme Stoch-Onde élaboré dans le présent travail d'initiation à la recherche.

2. Détermination de la réponse du profil de sol

Dans le but d'obtenir la réponse sismique d'un profil de sol modélisant un dépôt de sol, en termes d'accélération, spectre de Fourier et spectre de réponse nous avons excité un profil de sol meuble dont les caractéristiques sont montrées dans le tableau 1 par l'accélérogramme enregistré à la station rocheuse de Keddara (rocher) durant le séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003. Le profil de sol est supposée ici constitué d'une seule couche homogène.

Tableau 1- Caractéristiques déterministes de la couche de sol homogène.

	$H(m)$	$\rho (kg/m^3)$	$Vs (m/s)$	$\xi(\%)$
Couche	30	2000	300	7
Rocher	/	2400	1500	0

2.1. Analyse de Fourier

Ayant obtenu la fonction d'amplification de la couche de sol et le spectre de Fourier de l'excitation (Bouaricha et Hadj Henni, 2013), nous déterminons par convolution le spectre de Fourier en surface de ce monocouche. Puis, au moyen de la transformée de Fourier Inverse (Presse et al., 1992), nous obtenons l'accélérogramme en surface du sol, c-à-d la réponse en domaine temporel (Fig. 1).

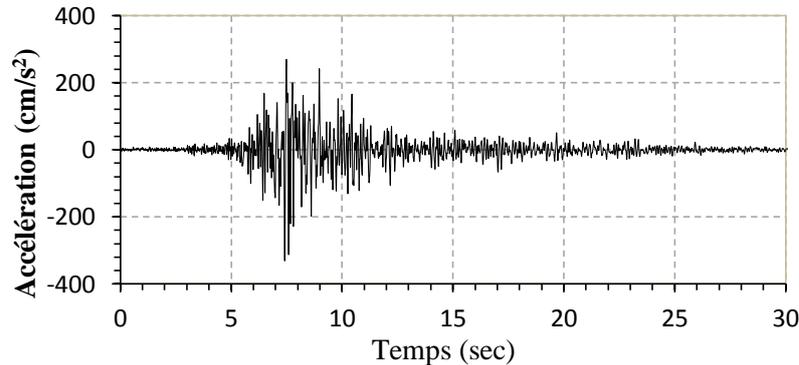


Fig. 1- Accélération en surface de la couche de sol étudiée.

2.2. Spectre de réponse

Le spectre de réponse permet de faire intervenir la notion de contenu en fréquence du mouvement. Son but est de caractériser un séisme d'après la réponse d'une structure simple.

L'accélérogramme obtenu à la surface de la couche de sol est injecté dans un programme élaboré dans le cadre d'un travail de magister (Merabet, 2010) pour obtenir le spectre de réponse en pseudo accélération normalisé par l'accélération maximale en surface libre. Ce spectre de réponse est représenté sur la figure 2.

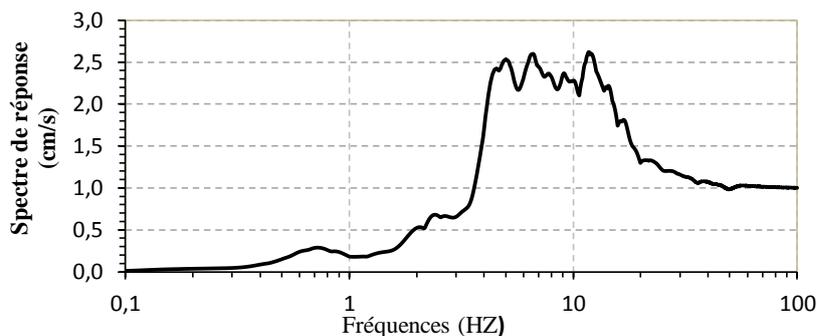


Fig. 2- Spectre de réponse à la surface de la couche de sol.

3. Force sismique à la base de la structure

3.1. Identification de la structure

La structure étudiée est un bâtiment à usage d'habitation implanté en zone de forte sismicité (zone III) (RPA99, 2003). Il est composé d'un RDC et de quatre étages dont la géométrie 2-D est décrite dans la figure 3. Elle est composée d'une ossature mixte (voile-portiques) en béton armé. Les planchers sont composés de poutrelles et corps creux (16+4), le remplissage des façades est en maçonnerie. Le bâtiment est supposé fondé sur un sol meuble.

Les dimensions en plan, typiques à tous les planchers, sont de $18,4 \times 11,00 \text{ m}^2$, avec une hauteur de 3,91 m pour le rez de chaussée et 3,06 m pour les autres étages.

Les dimensions des sections de tous les poteaux et les poutres porteuses et non porteuses sont, respectivement, $35 \times 35 \text{ cm}^2$, $30 \times 40 \text{ cm}^2$ et $30 \times 35 \text{ cm}^2$. Les voiles sont d'une épaisseur de 15 cm.

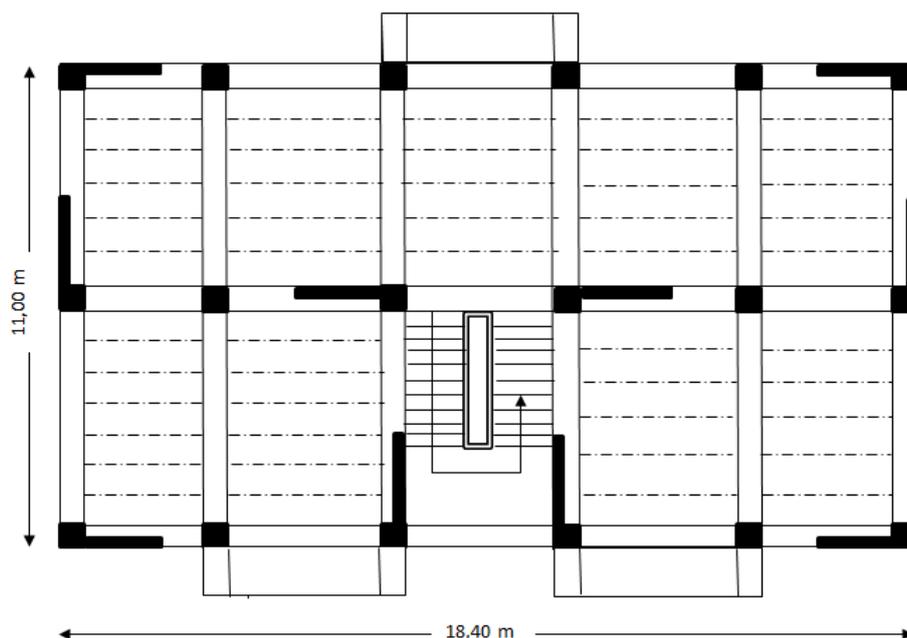


Fig. 3- Vue en plan du bâtiment considéré.

3.2. Calcul de la charge sismique

La charge sismique à appliquer à la base du bâtiment choisi est évaluée, selon la méthode spectrale. En premier lieu, nous avons calculé cette force selon le RPA99 (version 2003) en appliquant le logiciel SAP2000, V.14.2, pour trois types de sol, cette force de cisaillement est montrée sur la figure 4.

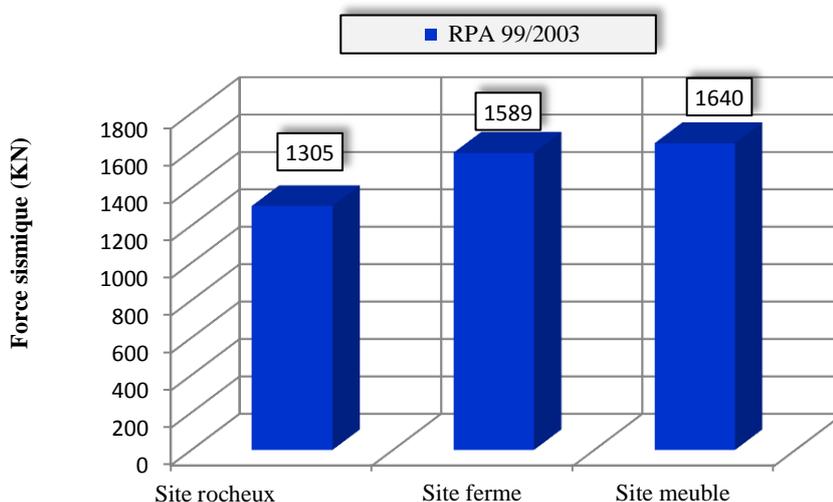


Fig. 4- Force de cisaillement à la base de la structure pour les trois types de sols.

3.3. Effet des variations stochastiques du module de cisaillement sur la force sismique

Parmi les paramètres de sol qui sont affectés par les incertitudes, la masse volumique et le module de cisaillement. En effet, ces paramètres sont le plus souvent déterminés au laboratoire et il n'est pas possible reproduire les mêmes conditions régnant sur place au laboratoire. Cependant, il a été montré que la variation de la masse volumique est insignifiante sur la fonction d'amplification tandis que les variations du module de cisaillement exerce une grande influence (Sadouki et al, 2012). De ce fait, nous avons choisi ici d'étudier l'effet des variations stochastiques du module de cisaillement sur la force sismique que nous représentons sur la figure 4.

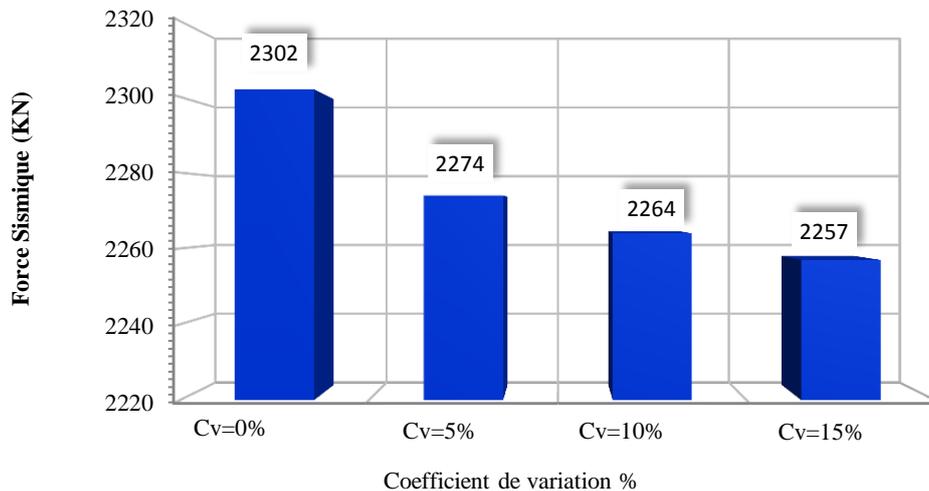


Fig. 5- Effet des variations stochastiques du module de cisaillement du sol sur la force de cisaillement à la base de la structure.

Nous constatons que, pour le présent exemple, l'influence de la variabilité du module de cisaillement sur la force sismique est présente malgré qu'elle soit relativement faible. Ceci est due aux faibles valeurs du coefficient de variance (0% à 15%). Des variations plus importantes seront étudiées au futur selon l'ordre de grandeur admis dans la littérature.

4. Conclusion

Nous nous sommes intéressés ici à une étude paramétrique sur les effets des variations stochastiques des paramètres du sol sur la force sismique à appliquer à la base de la structure obtenue par l'analyse spectrale. Une comparaison est effectuée entre la force sismique obtenue par les Règles Parasismiques Algériennes et la valeur calculée.

Dans le cadre d'une étude dynamique complète de la propagation des ondes dans les sols et les hypothèses pratiques on a montré la nécessité de tenir compte de la variabilité spatiale des paramètres de sol dans le calcul sismique des structures.

Références bibliographiques

- Bouaricha L., Hadj Henni F.Z. (2013), "*Utilisations Pratiques de la Propagation d'Ondes dans l'Etude de la Réponse Sismique des Structures et Milieux Infinis*", Mémoire de Master en Génie civil, Université de Chlef, 173p
- Merabet H., (2010), "*Identification des caractéristiques de profils de sol de sites à partir d'enregistrements accélérométriques en surface libre*", Mémoire de Magister en Génie civil, Université de Chlef, 173p.
- Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., (1992), "*Numerical recipes: the Art of Scientific Computing*", New York, USA: Cambridge University Press.
- RPA 99, (2003), "*Règles Parasismiques Algériennes*", Document technique réglementaire DTR BC 248, Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (C.G.S), Alger.
- Sadouki A., Harichane Z., Chehat A., (2012), "*Response of a randomly inhomogeneous layered media to harmonic excitations*", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 36, N° 1, pp.84-95.
- SAP2000 (V.14.2). "*Linear and nonlinear static and dynamic analyses and design of 3D structures, Computers and Structures*", Inc. Berkeley, California.

Investigation Stochastique de la réponse sismique des milieux poreux

Amina SADOUKI

Maitre-Assistant, Université de Chlef, amina_sadouki@yahoo.fr

Résumé

L'objectif de cette étude est de présenter la méthode générale de formulation d'un problème de propagation d'onde dans un milieu poreux saturé. Une attention particulière est donnée à la prise en compte du caractère stochastique des propriétés de sol souvent requises dans les analyses sismiques par des champs aléatoires. La solution générale d'un milieu poreux aléatoirement inhomogène est donnée sous la forme de l'équation intégrale de Fredholm qui s'apprête à un calcul par les méthodes de Monte Carlo.

Mots-clés: Sol, Milieux poreux, Analyses sismiques, Investigation stochastique, Simulation de Monte-Carlo.

1. Introduction

Les conditions locales de sol ont une profonde influence sur la réponse du sol durant les tremblements de terre. Des observations des dommages causés par nombreux tremblements de terre historiques (El Asnam, 1980; Mexico, 1985; Loma Prieta, 1989; Northridge, 1994; Kobe, 1995 ; Boumerdes, 2003) ont montré que les aspects géotechniques peuvent fortement influencer la performance des structures durant un tremblement de terre. De ce fait, la connaissance précise et la modélisation des propriétés du sol environnant, sont requises pour décrire le comportement dynamique complet vis-à-vis d'une excitation donnée du sol.

La détermination de certains paramètres de sol aux laboratoires se fait sur des échantillons de faible épaisseur par rapport au dépôt de sol étudié alors que cette variation est importante particulièrement dans la direction verticale et la précision dans la reconnaissance se révèle parfois insuffisante. Alors, la représentation aléatoire de ces propriétés pourrait apporter une précision dans l'évaluation de la réponse du site étudié.

D'autre part, il est prouvé que le degré de saturation qui est influencé par la teneur en eau au site étudié affecte significativement la propagation des ondes à travers les différentes couches. Alors, l'étude de l'amplification des mouvements sismiques due à la variation spatiale des propriétés du sol ne serait complète sans la prise en compte du caractère bi-phasique du milieu sol.

2. Propagation des ondes sismiques dans les milieux bi-phasiques

Classiquement, la propagation des ondes dans les milieux naturels (terrestres) est étudiée en considérant l'approximation de l'élastodynamique linéaire (Pecker, 1984). A partir des équations des ondes élastiques, Gassmann (1951) et Biot (1956) ont déterminé les équations dynamiques en milieux poreux ;

$$\rho\omega^2 u_i + \rho_f \omega^2 w_i + \tau_{ij,j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_f \omega^2 u_i + q\omega^2 w_i - p_i = 0 \quad (2)$$

où τ_{ij} est le tenseur des contraintes, p la pression interstitielle, u_i le déplacement moyen des grains solides et w_i le déplacement relatif solide/fluide, défini par:

$$w_i = \varphi(U_i - u_i) \quad (3)$$

avec le déplacement du fluide.

Pour obtenir les équations de propagation d'onde on fonction de u_i et w_i , on complète les équations du mouvement avec les relations contrainte-déformation pour un milieu poroélastique isotrope (Biot, 1962) :

$$\tau_{ij} = G[u_{i,j} + u_{j,i} - 2\delta_{ij}u_{j,j}] + \delta_{ij}[Hu_{j,j} + Cw_{j,j}] \quad (4)$$

$$P = -Cu_{j,j} - Mw_{j,j} \quad (5)$$

avec G le module de cisaillement du matériau poreux et H le module non drainé des ondes P à basses fréquences donné par l'équation de Gassmann (Gassmann, 1951):

$$H = P_d + \alpha^2 M \quad (6)$$

Avec

$$M = [(\alpha - \phi)/K_g + \phi/K_f]^{-1} \quad (7)$$

$P_d = K_d + 4/3\mu$ est le module de l'onde P de la phase drainée.

$\alpha = 1 - K_d/K_g$ est le coefficient de Biot-Willis,

$C = \alpha.M$, et K_g , K_d , et K_f désignent les modules d'incompressibilité de la phase solide, drainée et la phase liquide, respectivement.

Les paramètres physiques macroscopiques utilisés dans les équations de la poroélastodynamique sont:

1. Quatre paramètres mécaniques: les modules liés à l'élasticité du solide, le module d'incompressibilité du milieu non drainé KU et le module de cisaillement de la matrice solide G , le module lié à l'interaction entre les phases fluides et solides appelé module de Biot C et le coefficient de rétention fluide M .
2. Trois termes de densité : la masse volumique du fluide ρ_f , la masse volumique moyenne du milieu ρ et le terme complexe et fréquemment dépendant de résistance à l'écoulement $\tilde{\rho}$.

La définition de ces paramètres résulte d'un processus d'homogénéisation des phases fluides et solides pour construire un milieu équivalent, défini par ces sept paramètres uniquement. Ce processus d'homogénéisation est résumé dans un cas simple par la figure 1. D'un côté, on combine les grains des minéraux constitutifs pour former une matrice solide ou milieu drainé. De l'autre côté, on considère une phase fluide définie par trois paramètres. Enfin, par association de la phase fluide équivalente avec le squelette solide, on construit le milieu poreux non drainé. C'est pour ce milieu équivalent, biphasique, qu'est étudiée la propagation des ondes.

La résolution des équations de propagation d'onde pour un milieu poroélastique isotrope à paramètres physiques macroscopiques de sol déterministes est largement traitée. Les équations peuvent être formulées selon Muller et al (2008):

$$\begin{bmatrix} u_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{ik}^F & G_{ik}^f \\ G_{ik}^f & G_{ik}^W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_k^0 \\ f_k^0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Avec G_{ik}^F, G_{ik}^f et G_{ik}^W désignent les tenseurs de Green.

Le champ d'onde peut être exprimé par une équation de convolution de la forme:

$$\begin{bmatrix} u_i(r) \\ w_i(r) \end{bmatrix} = \int_{V'} \begin{bmatrix} G_{ik}^F(r-r') & G_{ik}^f(r-r') \\ G_{ik}^f(r-r') & G_{ik}^W(r-r') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_k(r') \\ f_k(r') \end{bmatrix} \quad (9)$$

Avec les tenseurs de Green :

$$G_{ik}^f(r-r') = \frac{1}{4\pi\rho\omega^2} \left([k_s^2 \delta_{ij} + \partial_i \partial_j] \frac{e^{ik_s R}}{R} - \partial_i \partial_j \frac{e^{ik_p R}}{R} \right) - \frac{C^2}{H^2} \frac{1}{4\pi q \omega^2} \partial_i \partial_j \frac{e^{ik_p R}}{R} \quad (10-a)$$

$$G_{ij}^f(r-r') = \frac{C}{H} \frac{1}{4\pi\rho\omega^2} \partial_i \partial_j \frac{e^{ik_p R}}{R} \quad (10-b)$$

$$G_{ij}^w(r-r') = -\frac{1}{4\pi\rho\omega^2} \partial_i \partial_j \frac{e^{ik_p R}}{R} \quad (10-c)$$

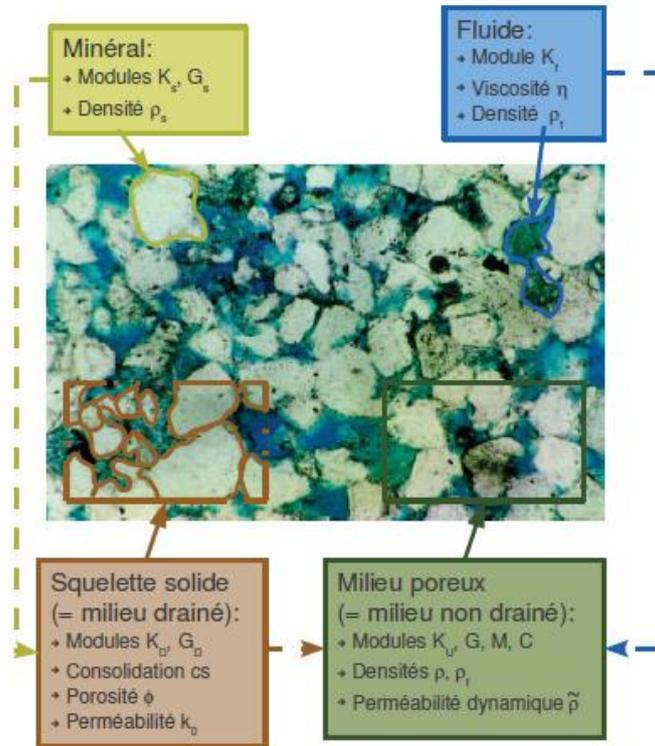


Fig. 1- Schématique des différentes phases d'un milieu poreux (Bastien, 2011)

3. Investigation stochastique d'un milieu poreux

Les approches qui sont souvent utilisées pour les problèmes impliquant des milieux aléatoires sont basées soit sur des solutions numériques de type éléments de frontières (Burczynski, 1993) ou éléments finis (Kleiber et al, 1992) ou des solutions approchées par les méthodes de Monté Carlo ou bien sur des solutions analytiques (Klyatskin, 2005). Cependant les méthodes analytiques nécessitent beaucoup d'attention dans leurs formulations mais restent fiables, notamment dans certaines configurations géométriques assez simplifiées. D'autre part, la modélisation de la propagation des ondes sismiques dans des milieux hétérogènes et multiphasiques est assez complexe. Aussi, le choix du domaine de résolution des équations d'onde est crucial. Dans un domaine temporel, comme utilisé classiquement pour les modélisations acoustiques ou élastiques, la prise en compte des phénomènes fréquentiels est sujette à des approximations (basse fréquence) ou oblige à considérer des pas de temps très petits et donc, une complexité et un coût numérique prohibitif. Le choix s'est donc naturellement porté sur une modélisation dans le domaine fréquence-espace. Les erreurs inhérentes à la modélisation numérique ne dépendent que de la discrétisation spatiale,

A cet effet, les simulations de Monte Carlo sont considérées comme des méthodes très efficaces pour les analyses concernant les milieux hétérogènes. Elles conviennent aussi pour les cas impliquant plusieurs variables aléatoires corrélées. Les simulations de Monte Carlo utilisent un nombre très important d'échantillons pour approcher convenablement la distribution de probabilité de la fonction étudiée.

La solution générale d'un milieu poreux aléatoirement inhomogène est de la forme:

$$\begin{bmatrix} u_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_i^0 \\ w_i^0 \end{bmatrix} + \int_V dV \begin{bmatrix} G_{ik}^F & G_{ik}^f \\ G_{ik}^f & G_{ik}^W \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{L}_{jk}^{(1)} & \tilde{L}_{jk}^{(2)} \\ \tilde{L}_{jk}^{(2)} & \tilde{L}_{jk}^{(3)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_k \\ w_k \end{bmatrix} \quad (11)$$

Qui est de la forme de « *Fredholm integral equation* »:

$$y(x) = f(x) + \int_V K(x', x)y(x')dx', \quad x \in V \quad (12)$$

Qui peut être approchée par une équation algébrique linéaire (Dunn et Shultis, 2012):

$$y(x_i) = f(x_i) + \sum_{j=1}^M w_j K(x_j, x_i)y(x_j), \quad i = 1, \dots, M \quad (13)$$

et ensuite résolue par la méthode de Monte Carlo.

Références Bibliographiques

Dupuy B., Propagation des ondes sismiques dans les milieux multiphasiques hétérogènes : modélisation numérique, sensibilité et inversion des paramètres poroélastiques, Thèse de doctorat d'Etat, université de grenoble, 2011.

Biot M., Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. Low-frequency range, II. Higher frequency range, J. Acoust. Soc. Am. 28: 1956, p. 168–191.

Biot, M.A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. J. Appl.Phys. 33, 1962, p. 1482–1498.

Gassmann F., Über die elastizität poröser medien, Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich 96: 1951, P.1–23.

Klyatskin V.I., *Dynamics of stochastic systems*, Elsevier, 2005.

Kleiber M., Hien T.D., *The stochastic finite element method*, New York, Editions Wiley, 1992.

Muller M., Gurevich B. and Shapiro S. A., attenuation of seismic waves due to wave-induced flow and scattering in randomly heterogeneous poroelastic continua, advances in geophysics, vol. 50, chapter 5, 2008.

Pecker A., Dynamique des sols. Ed. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1984, 262p.

Dunn W.L., Shultis J. K., Exploring Monte Carlo Methods, Elsevier, 2012, 391p.

Modélisation stochastique de l'interaction dynamique sol-structure

Mohamed Elhebib GUELLIL

¹Maitre-Assistant, Université de Chlef, mghebib@yahoo.fr

Résumé

L'interaction sol-structure joue un rôle important dans la réponse sismique des structures massives, des barrages ainsi que des bâtiments reposant sur des sols meubles. D'autre part, le champ d'ondes induit par un mouvement sismique est à caractère aléatoire. En plus, les dépôts de sol sont naturellement hétérogènes et l'amplitude et la densité des perturbations des paramètres y régnant et qui sont nécessaires à mener des études dynamiques des sols et des structures affectent la variabilité spatiale du champ d'ondes.

Le problème revient alors à étudier la propagation des ondes sismiques dans les milieux aléatoires. Ce problème peut être traité par différentes méthodes (éléments finis spectraux, éléments de frontière, simulations de Monte-Carlo, ...) où le champ d'ondes et/ou les paramètres de sol sont représentés par des champs stochastiques.

Ainsi, l'objectif du présent thème de recherche consiste à modéliser le champ d'ondes ainsi que l'hétérogénéité naturelle des dépôts de sol par des champs stochastiques et à incorporer cette variabilité aléatoires dans l'étude de l'interaction dynamique sol-structure et son impact sur la réponse et le comportement des sols et structures

Mots-clés: *Interaction Sol-Structure, Réponse sismique, propagation d'onde, Eléments finis spectraux, Champs stochastiques, Simulation de Monte- Carlo.*

1. Introduction

L'interaction sol-structure joue un rôle important dans la réponse sismique des structures massives, des barrages ainsi que des bâtiments reposant sur des sols meubles. D'autre part, le champ d'ondes induit par un mouvement sismique est à caractère aléatoire. En plus, les dépôts de sol sont naturellement hétérogènes et l'amplitude et la densité des perturbations des paramètres y régnant et qui sont nécessaires à mener des études dynamiques des sols et des structures affectent la variabilité spatiale du champ d'ondes. Le problème revient alors à étudier la propagation des ondes sismiques dans les milieux aléatoires. Ce problème peut être traité par différentes méthodes (éléments finis spectraux, éléments de frontière, simulations de Monte-Carlo, ...) où le champ d'ondes et/ou les paramètres de sol sont représentés par des champs stochastiques.

La réponse sismique d'une structure est influencée par la réponse du sol, le chargement sismique et les propriétés mécaniques du sol et de la structure. En vue d'un calcul parasismique, c-à-d calcul dynamique d'une structure pour évaluer sa réponse, l'ingénieur doit estimer l'excitation sismique agissant à la base de l'ouvrage. Il doit appliquer cette excitation à la base de l'ouvrage de façon à procéder au dimensionnement des éléments structuraux pour répondre aux exigences du futur séisme. La réponse sismique du système sol-structure est également influencée par le comportement de l'interface entre la structure et l'ensemble sol-fondation. En réalité, les liaisons ne sont pas parfaites et un mouvement relatif comme le glissement et le décollement sur cette interface peut avoir lieu.

La résolution de tout problème de mécanique nécessite une bonne connaissance de ses conditions aux limites. Pour bien comprendre, il est facile d'imaginer, qu'une structure élancée de type poutre encastree à une extrémité, se comporte de manière totalement différente d'une poutre dont l'encastrement est remplacé par une rotule avec ressort. Sa rigidité et ses fréquences propres s'en trouvent réduites alors que ses déplacements peuvent être amplifiés. Le même raisonnement peut être effectué pour un immeuble reposant sur une fondation. La connaissance de la fondation et du sol sous-jacent est essentielle pour bien déterminer le comportement réel de la structure (Grange, 2008).

Les déformations de la structure pendant un tremblement de terre sont affectés par les interactions entre les trois systèmes liés: la structure, la fondation, et les formations géologiques sous-jacentes et entourant les fondations. L'analyse de l'interaction sismique sol-structure consiste à évaluer la réponse collective de ces sous- systèmes à un mouvement du sol en champ libre. L'interaction entre ces

trois sous-systèmes résulte en deux phénomènes physiques se dénommant *Interaction Inertielle* et *Interaction Cinématique*. Ces deux phénomènes se produisent avec un petit décalage temporel.

2. Interaction cinématique et interaction inertielle

L'interaction cinématique désigne l'interaction entre le sol et les fondations sous chargement sismique en l'absence de la structure. Les fondations (Figure 1), forcées à suivre le mouvement du sol, tendent à résister par leur rigidité. En conséquence, des réflexions et dispersions d'ondes prennent naissance et les fondations peuvent avoir un déplacement différent de celui du sol en champ libre.

Tandis que l'interaction inertielle (Figure 2), le mouvement de la fondation induit des vibrations dans la superstructure; les forces d'inertie, générées dans la superstructure, produisent des efforts dynamiques qui seront transmis aux fondations et au sol en contact.

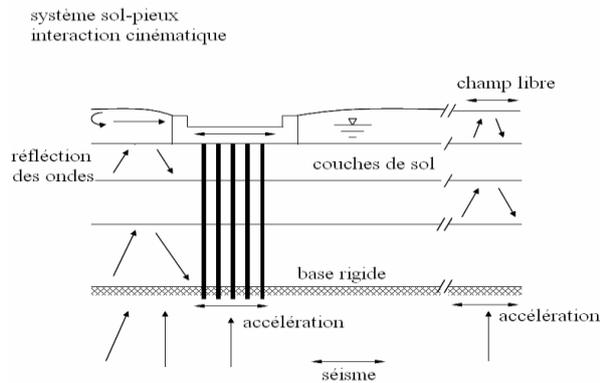


Fig. 1- Interaction cinématique.

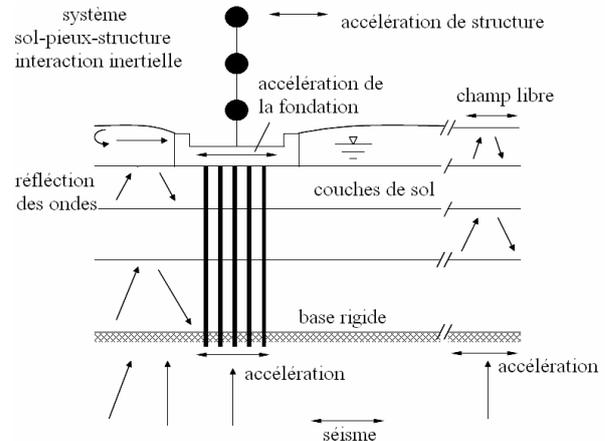


Fig. 2- Interaction inertielle.

3. Modèles simplifiés de l'interaction dynamique

Des modèles d'interaction sol-fondation simplifiés sont élaborés de manière à donner des expressions algébriques des termes de raideur et d'amortissement radiatif intervenant dans l'expression de l'impédance de la fondation, tels que: Modèles de fondation de type Winkler, de Pasternak, de Kerr, Modèle de Kelvin-Voigt, et le modèle du *cône* (Figure 3) (Wolf & Deek, 2004). Ce dernier, utilisé dans cette étude, remplace le demi-espace élastique par un cône tronqué que l'on peut considérer comme une poutre élastique à section variable.

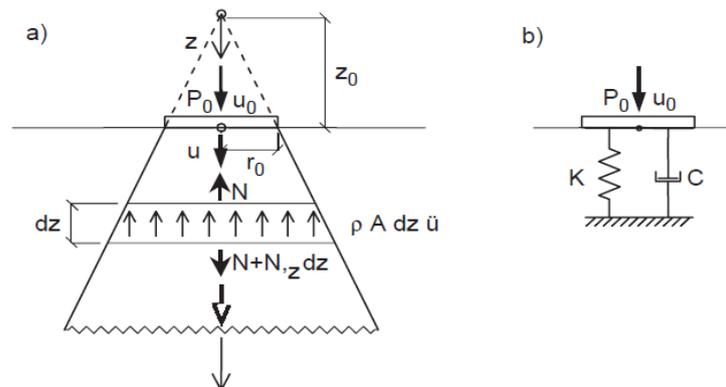


Fig. 3- Model du cône.

4. Réponse sismique d'une fondation enterrée

Le problème consiste à modéliser le champ d'ondes ainsi que l'hétérogénéité naturelle du sol par des champs stochastiques et à incorporer cette variabilité aléatoire dans l'étude de l'interaction dynamique sol-structure et son impact sur la réponse et le comportement du sol et la structure.

La fondation est supposée enterrée dans un milieu de sol multicouche à paramètres aléatoires. La structure est modélisée par une masse m et un ressort statique de coefficient k (représentant la rigidité latérale) connectée à une barre rigide de hauteur h (Figure 4).

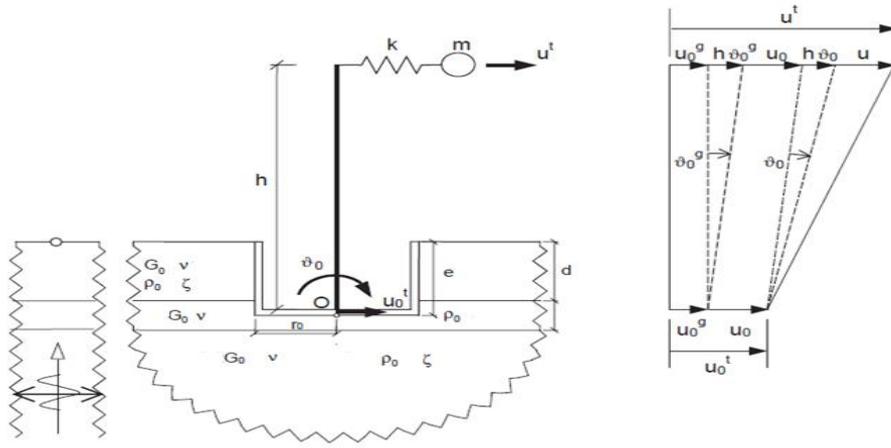


Fig. 4- Système sol-fondation enterrée sous chargement sismique horizontal.

L'équation du mouvement de ce système est de la forme:

$$\begin{bmatrix} \frac{\omega_s^2}{\omega_j^2} (1 + 2\zeta i) - 1 & -1 & -1 \\ -1 & \frac{S_h(\omega_j)}{\omega_j^2 m} - 1 & \frac{S_{hr}(\omega_j)}{\omega_j^2 h m} - 1 \\ -1 & \frac{S_{rh}(\omega_j)}{\omega_j^2 h m} - 1 & \frac{S_r(\omega_j)}{\omega_j^2 h^2 m} - 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u(\omega_j) \\ u_0(\omega_j) \\ h \vartheta_0(\omega_j) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} u_0^g(\omega_j) + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} h \vartheta_0^g(\omega_j)$$

La première étape de résolution consiste à déterminer les fonctions d'impédance du système couplé. Une étape intermédiaire consiste à déterminer les impédances en champ libre « Fonctions de Green » (Figure 5). L'équation donnant les coefficients de rigidité dynamique d'une fondation circulaire enterrée est de la forme:

$$S(\omega) = 2K \frac{1 + i\omega \frac{T}{\kappa}}{1 + \frac{e^{-i\omega T}}{1 + \kappa}}$$

Les résultats obtenus sont montrés sur la figure 6.

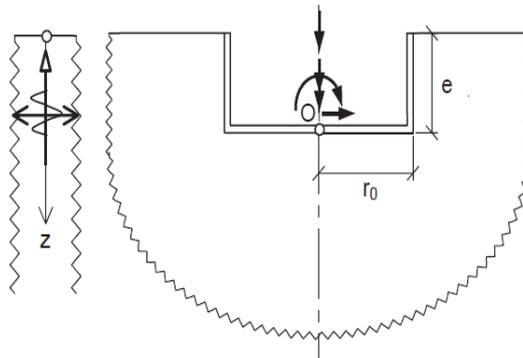


Fig. 5- Fondation circulaire enterrée dans un demi-espace.

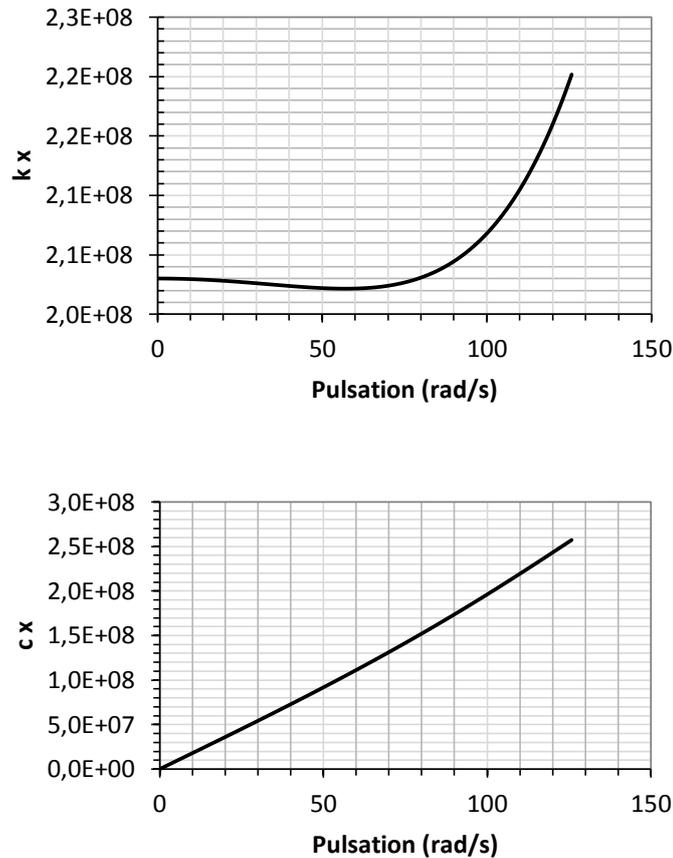


Fig. 6- Coefficient de rigidité dynamique d'une fondation circulaire enterrée dans un demi-espace.

4. Conclusion

Le problème traité a consisté à étudier la propagation des ondes sismiques dans les sols. La seconde étape (en cours) consistera à déterminer la matrice de rigidité dynamique de la fondation enterrée ensuite le mouvement en champ libre de la fondation enterrée. On calculera en dernier lieu le déplacement maximal de la structure. Le problème est résolu de façon déterministe. Cependant, la prise en compte du caractère aléatoire des propriétés de sol se fait par différentes méthodes (*Eléments spectraux, Eléments de frontière, Simulations de Monte-Carlo, ...*) où le champ d'ondes et/ou les paramètres de sol sont représentés par des champs stochastiques.

Références bibliographiques

Wolf J.P., Deeks A.J. Foundation Vibration Analysis: A Strength-of-Materials Approach. Elsevier Books, 2004.

Grange S. Modélisation simplifiée 3D de l'interaction sol-structure: application au génie parasismique. Thèse De Doctorat, Institut Polytechnique De Grenoble, France ,2008.

Roussillon P. Interaction sol-structure et interaction site-ville: Aspects fondamentaux et modélisation. Thèse de doctorat, Institut Nationale des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2006.