

L'Interaction site-ville

Un nouvel aspect de l'aléa sismique

Philippe GUÉGUEN

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
et Laboratoire de géophysique interne et technophysique
Université Joseph Fournier

Pierre-Yves BARD

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
et Laboratoire de géophysique interne et technophysique
Université Joseph Fournier

Jean-François SEMBLAT

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

L'interaction entre les mouvements du sol et d'une structure affecte le comportement dynamique de la structure, en particulier quand celle-ci est fondée sur un sol mou. Lorsqu'une structure est soumise à une sollicitation extérieure, une partie de son énergie de vibration est restituée au niveau de l'interface entre le sol et la fondation. Ce phénomène se traduit par la création d'ondes sismiques se propageant dans les formations superficielles, notamment lorsque le contraste d'impédance avec le substratum sous-jacent est important et lorsque les fréquences de vibration du sol et de la structure sont proches (phénomène de résonance). On peut alors s'interroger sur les conséquences de ce phénomène dans le cas d'une ville, constituée d'une multitude de structures, et sur l'effet de l'évolution de l'urbanisation sur la répartition de l'aléa sismique. L'objectif de cet article est de présenter une série d'arguments expérimentaux et numériques prouvant le bien-fondé d'études sur une telle « Interaction site-ville ». Après une synthèse de quelques observations antérieures, le cas d'une structure isolée est d'abord étudié par l'intermédiaire d'une modélisation numérique calée sur une expérience originale réalisée en Grèce. Le modèle ainsi validé est ensuite appliqué à des groupes d'immeubles simulant une configuration urbaine réelle, celle d'un quartier de Mexico. Ce quartier sert aussi de support à une étude paramétrique de façon à identifier les principaux paramètres contrôlant l'apparition et l'importance de l'Interaction site-ville. Enfin, une approche simple fondée sur des considérations énergétiques est présentée et appliquée avec succès sur l'exemple du quartier de Mexico.

DOMAINE : Géotechnique et risques naturels.

ABSTRACT

The interaction between ground motion and structural motion affects a structure's dynamic behavior, especially if its foundation has been laid in soft soil. When a structure is submitted to external stress, a portion of its vibration energy gets restored at the level of the ground-foundation interface. This phenomenon is manifested by the creation of seismic waves propagating within the surface formations, in particular when the impedance contrast with the underlying substratum is significant and when vibration frequencies of the ground and structure are close to one another (the resonance phenomenon). It then becomes possible to question not only the consequences of this phenomenon on the scale of a city composed of multiple structures, but also the effect of continued urbanization on the breakdown of seismic risk. The objective of the present article is to provide a series of experimental and numerical arguments proving the relevance of studies conducted on this "site-city interaction". Following a summary of several previous observations, the case of an isolated structure is first treated by means of a numerical model calibrated on an original field experiment carried out in Greece. Once validated, the model is then applied to groups of buildings that simulate the actual urban layout of a Mexico City district. This same district also serves as the basis for a parametric study to identify the primary parameters controlling both the presence and magnitude of the site-city interaction. Moreover, a simple approach based on energy considerations is presented and successfully applied to the Mexico City district example.

FIELD : Geotechnical engineering and natural hazards.

Introduction

Depuis longtemps, les spécialistes des structures et les géotechniciens ont pris conscience de l'importance des phénomènes d'« Interaction sol-structure » (ISS). Ces derniers peuvent modifier de façon considérable la réponse dynamique d'ouvrages massifs, en particulier lorsqu'ils sont fondés sur des sols mous. Par ailleurs, depuis les dix dernières années, les sismologues ont acquis la certitude qu'il existe des phénomènes importants d'amplification du mouvement sismique liés aux configurations topographiques et géologiques des sols, traditionnellement appelés « Effets de site » (ES). Par ailleurs, les sismologues ont appris à ne pas installer leurs stations sismologiques à proximité d'arbres, ces derniers pouvant par leurs oscillations perturber les enregistrements du mouvement du sol.

À partir de là, il est légitime de se demander si des structures imposantes, fondées sur des remplissages sédimentaires mous, ne peuvent pas contaminer le mouvement du sol proche (fig. 1), phénomène appelé par la suite « Interaction inertielle structure-sol » (IStS). En présence d'une configuration urbaine dense, il semble aussi raisonnable de s'interroger sur l'effet global de la vibration de la ville lorsqu'elle est soumise à un tremblement de terre. L'objectif de cet article est donc de présenter une synthèse des études et des résultats amenant à considérer cet effet à l'échelle d'une ville, effet appelé « Interaction site-ville » (ISV).

En dépit du nombre considérable de références traitant de l'Interaction sol-structure et des Effets de site, les études abordant les problèmes d'Interaction structure-sol ou d'Interaction site-ville sont étonnamment peu nombreuses. Cet état de fait laisse croire que ces phénomènes n'existent pas, ou à tout le moins sont rares et sans importance. Pourtant, si l'importance de l'Interaction site-ville était démontrée, les politiques d'aménagement, entraînant des modifications d'urbanisme par ajout ou suppression d'ouvrages, auraient pour conséquence directe de modifier la distribution de l'aléa sismique urbain. Des répercussions inattendues pourraient apparaître alors dans certains domaines comme les études de microzonage, les plans d'urbanisme et l'établissement des polices d'assurance, domaines qui aujourd'hui ignorent totalement l'Interaction sol-structure.

Un autre objectif des études menées est de convaincre les communautés des sismologues et des spécialistes des structures de l'importance du phénomène d'Interaction site-ville, en leur montrant en particulier que, dans certaines configurations urbaines, l'Interaction site-ville peut avoir des conséquences non négligeables sur leur domaine d'activité.

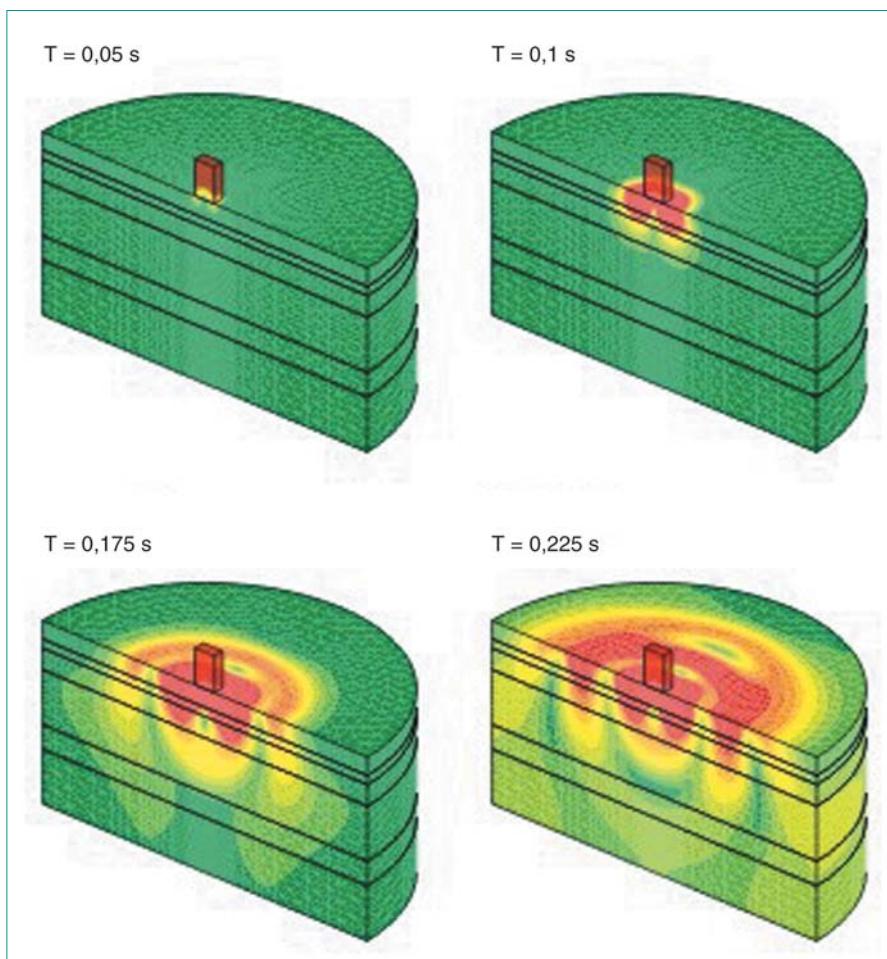


Fig. 1 - Simulation numérique (méthode des éléments finis) du déplacement total provoqué dans un sol stratifié par la mise en vibration d'une structure. L'excitation est provoquée par une force ponctuelle appliquée dans le plan de symétrie du modèle au sommet de la structure, puis instantanément relâchée. Cette représentation simule l'expérimentation réalisée à Volvi (Guéguen, 2000).

Quelques observations remarquables

Dès 1935 au Japon, Sezawa et Kanai (1935) ont remarqué que l'atténuation des effets sismiques avec la distance à la faille semblait plus importante à l'arrière des villes, ce qu'ils ont attribué au fait qu'une

partie de l'énergie de vibration des bâtiments se dissipe dans le sol sous forme d'ondes locales. En 1970, Jennings (1970) réalisa une expérience sur le campus de l'Institut de technologie de Californie. Elle consistait à mettre l'immeuble Millikan Library en vibration à l'aide d'un vibreur placé en son sommet. Jennings (1970) étudia la déformation de la structure et le mouvement proche induit à la surface du sol. Il conclut que, dans le cas d'une excitation extérieure, il est possible d'enregistrer un déplacement induit par le bâtiment jusqu'à environ cinq kilomètres. *A posteriori*, il se rendit compte que, simultanément, la station du Mont Wilson, distante de onze kilomètres, avait également enregistré une onde générée par l'expérience. Elle était parfaitement identifiable car elle possédait un contenu fréquentiel correspondant à la fréquence de la structure. Cette étude confirme ainsi les hypothèses faites par Sezawa et Kanai (1935). Par ailleurs, grâce à elle, Jennings (1970) montra que l'interaction entre le mouvement du bâtiment et celui du sol (« interaction inertielle » IStS) n'était pas uniquement un phénomène local. Les ondes peuvent conserver de l'énergie jusqu'à des distances importantes.

Le 13 août 1989, la navette spatiale Columbia revenait sur terre après une mission dans l'espace. Son entrée dans l'atmosphère provoqua une onde de choc qui fut enregistrée par les stations sismologiques de Californie du Sud. De plus, ces dernières détectèrent une onde impulsive de période 2-3 secondes qui arriva 12,5 secondes avant l'onde de choc principale. Simultanément, cette impulsion fut enregistrée par la station de l'université de Californie du Sud, proche du centre-ville. Mais cette fois, elle arriva trois secondes après le choc principal. Kanamori *et al.* (1991) montrèrent alors que cette onde provenait d'un groupe d'immeubles de grande hauteur, situés dans le centre-ville de Los Angeles : excités par l'onde de choc, ils libérèrent une partie de leur énergie de vibration sous forme d'ondes de compression transmise au sol *via* les fondations. Par ailleurs, la proximité de la fréquence de résonance des bâtiments de celle du bassin de Los Angeles a favorisé la conservation de l'énergie de l'IStS sur des grandes distances.

Les observations réalisées par Jennings (1970) et Kanamori *et al.* (1991) se sont produites pour des cas particuliers où les immeubles sont mis en vibration par des actions extérieures artificielles. Il paraît logique d'imaginer que des phénomènes de même nature peuvent aussi se produire quand la vibration des structures est provoquée par un tremblement de terre. Certes, dans ce cas-là, il est plus difficile d'identifier les ondes provenant des immeubles car elles sont noyées dans l'ensemble des champs d'onde du mouvement sismique incident. Elles ne peuvent être séparées que par des analyses à haute résolution, à partir de réseaux sismologiques denses.

Néanmoins, cette étude a été encouragée par l'observation de vibrations nuisibles provoquées par des sources proches et affectant des structures du génie civil. Une analyse originale réalisée par Erlingsson et Bodare (1996), et complétée par Erlingsson (1999), semble abonder dans ce sens. Lors d'un concert de rock qui eut lieu dans le stade Ullevi de Gothenburg (Suède), le public placé sur la pelouse commença à sauter au rythme de la musique. Les spectateurs des tribunes ressentirent de violentes vibrations. Elles provoquèrent quelques dommages aux installations, mais surtout elles conduisirent une partie du public à quitter le stade, preuve de l'importance de ces vibrations. Après analyse, Erlingsson et Bodare (1996) arrivèrent à la conclusion que les chocs périodiques (2 Hz) assénés à la surface du sol par le public se situaient dans une gamme de fréquence proche de celle du remplissage sédimentaire sous-jacent. Ce dernier, constitué de dépôts argileux, atteint par endroits une cinquantaine de mètres. Des variations latérales d'épaisseur favorisent également le piégeage des ondes et donc la transmission de l'énergie « humaine » aux infrastructures environnantes, provoquant leur mise en vibration. Les auteurs ont estimé la charge due aux sauts à environ 3 kPa et le mouvement induit à la base des tribunes de l'ordre de 2 mm, ce qui correspond à une accélération d'environ 0,3 m/s², à une distance de 100 m de la source humaine. Ces données peuvent difficilement être extrapolées à ce que l'on observe en cas de séisme. Mais en première approximation, la contrainte de cisaillement (appliquée à l'interface entre le sol et la structure) peut être évaluée à partir du rapport entre la force τ de cisaillement F à la base de l'ouvrage et la surface S de la fondation, telle que :

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (1)$$

Si on note α , le coefficient sismique, g l'accélération gravitaire, ρ la masse volumique équivalente de la structure, V son volume et h sa hauteur, on obtient la relation :

$$F = \alpha g \rho V = \alpha g \rho S h \quad (2)$$

et ainsi

$$\tau = \frac{F}{S} = \alpha g \rho h \quad (3)$$

Des équations similaires peuvent être obtenues pour le moment de rotation et les forces verticales appliquées de chaque côté de la fondation. Cependant, dans le cas d'une sismicité modérée ($\alpha = 0,2$), d'un immeuble courant de sept étages avec une densité équivalente de 250 kg/m^3 et une hauteur h de 20 m, on obtient une contrainte de cisaillement de l'ordre de 10 kPa, c'est-à-dire trois fois celle observée dans le stade d'Ullevi. Un immeuble de cette nature a une fréquence de l'ordre de 2 Hz. D'après l'estimation de la charge due aux sauts, on peut donc s'attendre à ce que le phénomène d'Interaction sol-structure (ou d'Interaction structure-sol) génère des ondes provoquant des accélérations de l'ordre de 1 m/s^2 , c'est-à-dire la moitié de l'accélération incidente, jusqu'à des distances de 100 m environ. Même si ces valeurs sont données ici pour avoir un ordre de grandeur et peuvent être erronées d'un facteur deux ou trois en fonction du système sol-structure, elles indiquent néanmoins que les perturbations liées au mouvement de la structure sont loin d'être négligeables.

Les exemples d'interaction entre l'activité humaine et les structures du génie civil sont légion : vibrations provoquées par le trafic routier, ferroviaire, etc. Il est cependant rare de constater qu'elles puissent atteindre de tels niveaux et provoquer des dégâts. L'exemple de la tour Eurocity à Lille est une autre situation (De Sloovere, 1999). Là encore, une vibration externe a transmis, *via* le sol, suffisamment d'énergie pour provoquer des déformations importantes dans un bâtiment de grande taille.

Par ailleurs, une expérience récente (Kitada et al., 1999) a testé la variation de la réponse d'une structure en fonction du voisinage urbain, quand celle-ci est sollicitée par un vibreur artificiel. Kitada et al. (1999) ont notamment observé la modification de la fréquence de résonance du bâtiment sollicité.

Enfin, il faut se souvenir d'observations faites suite à des enregistrements de mouvements forts dans des immeubles instrumentés. Comme cela a été rapporté par différents auteurs (Bard, 1988 ; Farsi, 1996 ; Paolucci, 1993 ; Meli et al., 1998 ; Cardenas et al., 1999), il apparaît souvent que les structures fondées sur des sols mous ont une composante de rotation importante dans leur mouvement total, provoquée par l'Interaction sol-structure, et cela même pour des structures fondées sur des fondations profondes. Il semble qu'en général la rotation puisse atteindre plus de 10 % du mouvement de flexion, atteignant même parfois 100 %.

Au vu de l'ensemble de ces observations, il apparaît légitime de proposer que les phénomènes d'Interaction sol-structure modifient non seulement le comportement de la structure mais aussi le mouvement du sol, impliquant la réciprocité de l'interaction. Plusieurs travaux dédiés à l'étude de ce phénomène ont été entrepris au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et au Laboratoire de géophysique interne et technophysique (LGIT), notamment dans le cadre d'une thèse (Guéguen, 2000).

Le cas des bâtiments isolés

Modélisation bidimensionnelle

À notre connaissance, le premier modèle proposé pour étudier la rétro-diffusion de l'énergie de vibration d'une structure sous forme d'ondes sismiques a été élaboré par Wirgin et Bard (1996). Ce modèle bidimensionnel ne s'intéressait qu'aux polarisations perpendiculaires au plan (cas des ondes de cisaillement de mouvement antiplan, SH). Les immeubles sont constitués de blocs rigides homogènes et distribués périodiquement sur un demi-espace stratifié. La périodicité des immeubles peut être suffisamment longue de manière à les considérer comme isolés sur des temps de calcul adéquats. Ce modèle a été appliqué au cas de Mexico (fig. 2), c'est-à-dire en considérant un sol constitué d'un monocouche particulièrement mou (vitesse des ondes de cisaillement $\beta = 100 \text{ m/s}$; densité $\rho = 1\,300 \text{ kg/m}^3$; épaisseur $H = 50 \text{ m}$; facteur de qualité $Q = 30$) surmontant un demi-espace rigide ($\beta = 600 \text{ m/s}$; $\rho = 2\,000 \text{ kg/m}^3$; $Q = \text{infini}$). Deux modèles de structures ont été définis par les propriétés mécaniques des blocs rigides les constituant ($\beta = 100 \text{ m/s}$; hauteur de la structure $h = 50 \text{ m}$;

dimension dans le plan $L = 30 \text{ m}$; $\rho = 325 \text{ kg/m}^3$ – ligne continue, fig. 2 – et $\rho = 2\,000 \text{ kg/m}^3$ – tirets, fig. 2). Le mouvement incident utilisé est un Ricker de fréquence caractéristique $f_p = 0,25 \text{ Hz}$.

Pour ces immeubles de grandes hauteurs (d'environ quinze étages, soit $h = 50 \text{ m}$ et de période T égale à 2 s), ce modèle montre des effets de rétro-diffusion d'énergie importants (fig. 2). Jusqu'à 1 km de la structure, une onde générée à l'interface sol-structure est visible à la surface du sol, ayant une amplitude de l'ordre de 1/4 à 1/3 de celle de l'onde SH incidente. Cependant, ces résultats doivent être considérés avec précaution pour deux raisons :

- ① la géométrie bidimensionnelle du modèle favorise considérablement l'effet de l'Interaction structure-sol : les ondes de surface émises par les mouvements de la fondation n'ont alors aucune atténuation géométrique. Leur décroissance spatiale ne vient alors que de l'amortissement matériel des matériaux constitutifs du sol ;
- ② ce modèle ne représente que la réponse du milieu pour un mouvement antiplan de sollicitation, tandis que l'Interaction sol-structure se manifeste aussi par des mouvements de rotation dans les structures, des mouvements liés aux ondes de volume P et de cisaillement in-plan SV ainsi que des mouvements induits par les ondes de surface de type Rayleigh qui possèdent des caractéristiques de propagation différentes de celles des ondes de Love.

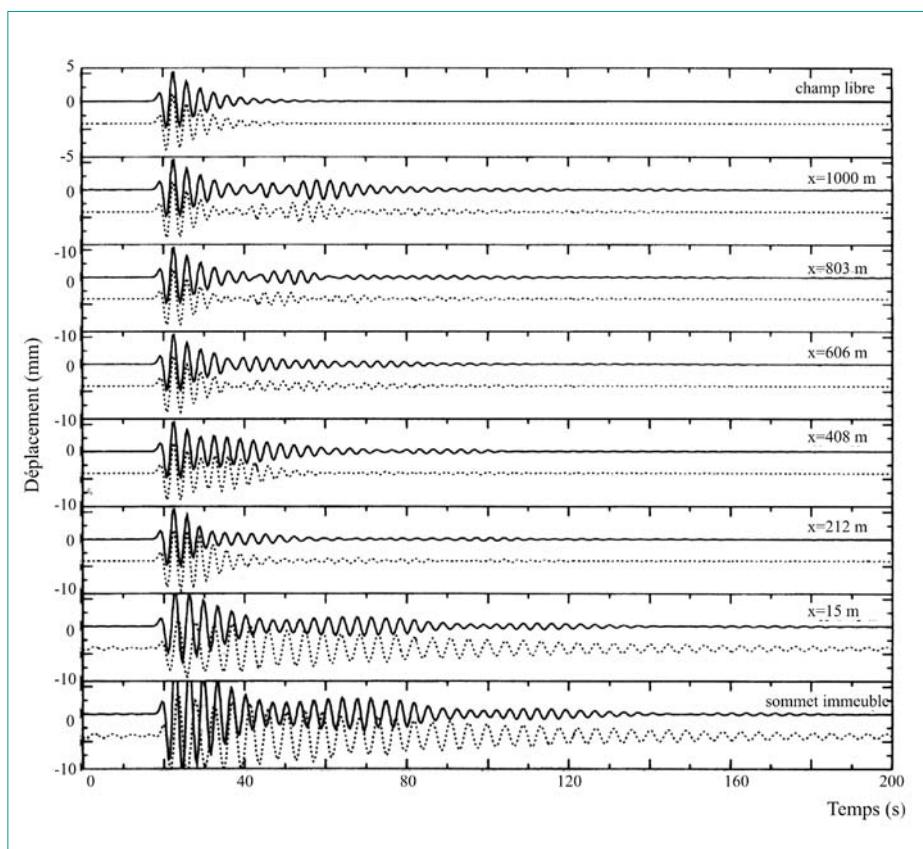


Fig. 2 - Sismogrammes synthétiques calculés au sommet de la structure, à la base ($x = 15 \text{ m}$) et en six points de la surface du sol. Le sol est constitué d'un monocouche.
La trace du haut représente la réponse 1D du monocouche, sans la structure (Wirgin et Bard, 1996).

Modélisation tridimensionnelle

Suite à cette étude, des modèles tridimensionnels ont été mis au point, dont le procédé est expliqué en détail dans les références suivantes : Guéguen (1995) et Bard et al. (1996). L'idée principale de ces modèles est de décomposer le phénomène d'Interaction structure-sol en deux étapes successives.

Étape 1

La structure est assimilée à un oscillateur simple équivalent qui repose sur le sol par l'intermédiaire d'une fondation superficielle (fig. 3). Dans le cas d'une sollicitation harmonique telle qu'un séisme, le mouvement global de la structure peut être déterminé à partir de l'équation du mouvement suivante :

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -\{m\}\ddot{x}_g \quad (4)$$

dans laquelle $[M]$, $[C]$ et $[K]$ correspondent aux matrices de masse, d'amortissement et de raideur du système sol-structure, $\{m\}$ à un vecteur masse associé à l'oscillateur et \ddot{x}_g à l'accélération du mouvement du sol.

En fréquence, la solution de l'équation (4) permet d'obtenir les trois composantes X_1 , X_0 et Φ_0 du déplacement de la structure, qui représentent respectivement le mouvement horizontal dû aux efforts d'inertie dans la structure de masse m_1 concentrée à la hauteur h par rapport à la base, le mouvement horizontal de la fondation m_0 par rapport au sol et la rotation de la fondation par rapport au sol. Cette solution tient compte des caractéristiques dynamiques de la structure, à savoir sa raideur k_1 et son amortissement visqueux c_1 qui dépendent de la fréquence de vibration de la structure et de son amortissement.

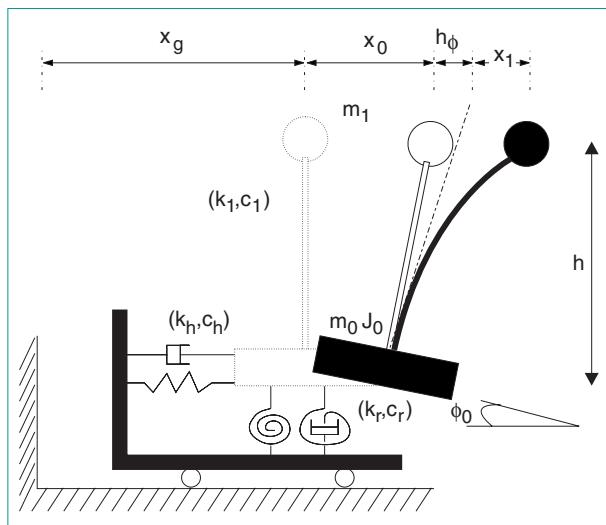


Fig. 3 - Oscillateur équivalent utilisé pour la représentation de la structure [x_g , excitation harmonique ; x_0 , ϕ_0 , déplacement horizontal et rotation de la fondation de masse m_0 et de moment d'inertie J_0 ; x_1 , déplacement inertiel de la structure équivalente de masse m_1 et de hauteur h ; k_i, c_i , impédance de la fondation pour les modes de translation ($i = h$) et de rotation ($i = r$)].

modélisation très simple, les résultats sont en conformité avec ceux obtenus par différents auteurs, validant ainsi la qualité du modèle choisi dans cette première étape.

Étape 2

En vibrant, la structure génère des efforts de réaction qui se développent au niveau du contact entre le sol et la fondation, correspondant à une force de cisaillement horizontale F_o et à un moment de balancement M_o . Une fois les déplacements de la structure connus, ces efforts peuvent être obtenus à partir de la relation générale des fonctions d'impédance reliant les efforts aux déplacements ($K(\omega) = P(\omega)/X(\omega)$). Appliquée à notre modèle, cette relation devient :

$$\begin{Bmatrix} F_0 \\ M_0 \end{Bmatrix}(\omega) = \begin{bmatrix} k_h + i\omega c_h & k_{hr} + i\omega c_{hr} \\ k_{rh} + i\omega c_{rh} & k_r + i\omega c_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_0 \\ \Phi_0 \end{Bmatrix}(\omega) \quad (5)$$

Ces forces sont ensuite assimilées à des sources sismiques ponctuelles et de surface. Le champ d'onde qui leur est associé peut ainsi être calculé en tout point de l'espace en utilisant la méthode du nombre d'onde discret (Bouchon, 1981). Afin de reproduire le caractère étendu de la fondation, ces forces sont uniformément réparties le long du contact sol-fondation.

La contamination du mouvement sismique provoquée par la vibration d'un bâtiment isolé (c'est-à-dire due à l'Interaction structure-sol) a pu ainsi être calculée pour une configuration du type de Mexico. Seul l'aspect inertiel de l'Interaction structure-sol a été pris en compte, la réflexion des ondes sismiques sur la fondation (soit l'interaction cinématique) n'ayant pas été considérée dans cette étude. L'oscillateur

Dans ce modèle, l'Interaction sol-structure est prise en compte à l'aide de fonctions d'impédance associées aux modes de translation horizontale ($k_h + i\omega c_h$), de rotation ($k_r + i\omega c_r$) et de couplage entre la translation et la rotation ($k_{rh} + i\omega c_{rh} + i\omega c_{hr}$). L'objectif de cette étude n'étant pas de calculer de nouvelles fonctions d'impédance, elles ont été choisies dans le manuel des fonctions d'impédance (Sieffert et Cevaer, 1991), qui synthétise les travaux de nombreux auteurs consacrés aux fonctions d'impédance des fondations superficielles. Elles se présentent sous forme d'abaques, donnés en fonction de la nature du système sol-fondation (géométrie de la fondation et propriétés du sol d'assise).

Une étude paramétrique (Guéguen, 1995) a d'abord été réalisée pour montrer l'influence des caractéristiques de l'oscillateur équivalent sur la réponse de la structure (par exemple, l'influence de la vitesse des ondes de cisaillement du sol, la dimension et l'enfonnement de la fondation, la hauteur et la masse de la structure, etc.). Malgré une

équivalent a été choisi à partir des données disponibles sur l'immeuble Jalapa de Mexico pour lequel de nombreuses expérimentations ont été réalisées, permettant ainsi d'avoir une connaissance quasi parfaite des paramètres géométriques et dynamiques de la structure (Paolucci, 1993 ; Meli et al., 1998). Le système de fondation correspond à une fondation carrée enfouie à 13 m de profondeur. Le système sol-fondation-structure a été soumis à une sollicitation sismique représentant un événement régional de la zone de subduction Pacifique, enregistré par le réseau national mexicain à une station de référence, c'est-à-dire sur un site rocheux. Pour considérer cette sollicitation comme le mouvement d'entrée de notre modèle (soit $Xg(\omega)$), la composante horizontale de l'enregistrement a été ramenée au niveau de l'interface sol-fondation en la convolvant par la fonction de transfert unidimensionnelle du remplissage sédimentaire (fig. 4, trace du haut). Le déplacement au sommet de la structure est représenté sur cette même figure. La structure est fondée sur le sol caractéristique de Mexico, constitué d'une couche d'argile très molle ($\beta = 65 \text{ m/s}$) surmontant une formation rigide, ce qui assure un contraste d'impédance important. Trois épaisseurs H_S (25, 50 et 75 m) de la couche superficielle ont été considérées, ce qui permet d'étudier les cas où la fréquence de vibration de la structure correspond au mode fondamental (colonne de gauche, fig. 4) et au premier mode supérieur (colonne de droite, fig. 4) de résonance de la colonne de sol, et enfin le cas où il n'y a pas résonance entre le sol et la structure (colonne du milieu, fig. 4).

Le mouvement du sol ainsi calculé est essentiellement caractérisé par des battements monochromatiques et un allongement temporel du signal. Par ailleurs, on remarque que la quantité d'énergie restituée dans le sol dépend du critère de résonance entre la vibration de la structure et celle du sol. Dans le cas d'un couplage important, c'est-à-dire $f_b = f_s$ (fig. 4), l'effet de la vibration du bâtiment sur le mouvement du sol est très important, favorisant en outre l'allongement du signal, du fait du piégeage des ondes dans la formation superficielle. Ceci confirme que la structure a un effet direct sur le mouvement du sol proche.

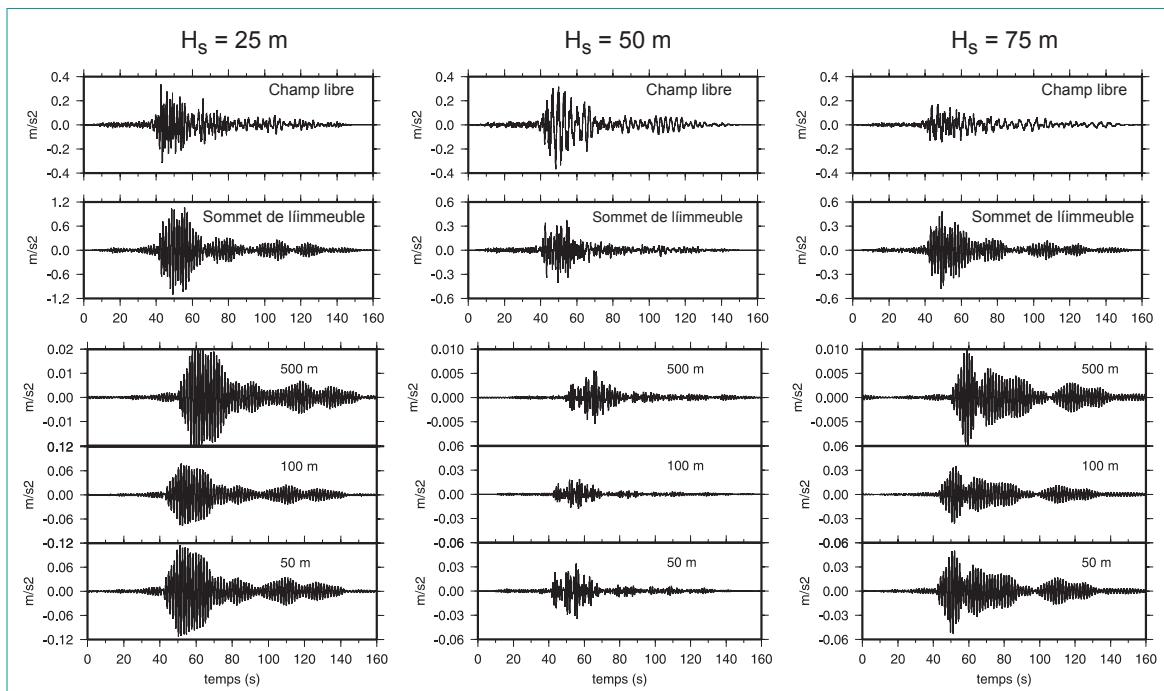


Fig. 4 - Mouvement du sol produit à 50, 100 et 500 m par le moment de balancement d'un bâtiment construit sur une fondation carrée enfouie et reposant sur un sol similaire à celui de Mexico, ayant une épaisseur de couche superficielle variable ($H = 25 \text{ m}$ gauche, $H = 50 \text{ m}$ milieu, $H = 75 \text{ m}$ droite).

Expérimentation sur le site test européen de Volvi (Grèce)

Dans le but de valider la modélisation tridimensionnelle, une étude expérimentale sur le site test européen du bassin de Volvi (Euroseistest, 1995) a été réalisée. Situé près de Thessalonique en Grèce (fig. 5), ce site a été le siège de nombreuses reconnaissances géotechniques et géophysiques, assurant la connaissance précise de la géométrie et des propriétés dynamiques du remplissage sédimentaire.

Une structure en béton armé de cinq étages a été construite à l'échelle 1/3 au centre du bassin de Volvi (fig. 5). Cette structure repose sur le sol par l'intermédiaire d'une fondation carrée superficielle ($3,5 \times 3,5$ m) et ses caractéristiques sont parfaitement bien connues (masses, dimensions, période, etc.).

Les deux étapes de la modélisation tridimensionnelle précédemment citées ont été validées grâce à deux types d'expériences menés sur la structure de Volvi (fig. 6) :

- une première expérience passive a permis de définir la déformation de la structure sous sollicitations sismiques ;
- la seconde, dite active, consistait à forcer la vibration de la structure et à enregistrer le mouvement du sol associé.

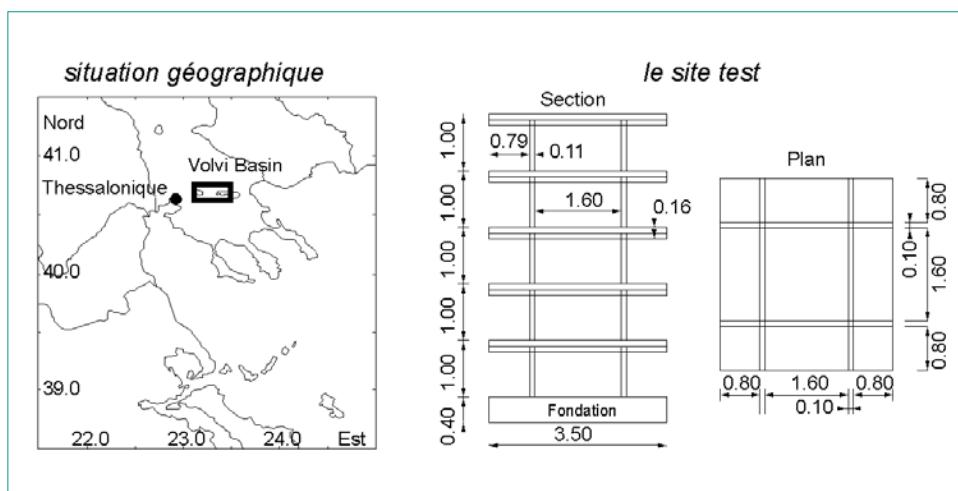


Fig. 5 - Localisation géographique du site test européen de Volvi (Grèce) et schéma de la structure construite à échelle réduite (1/3).

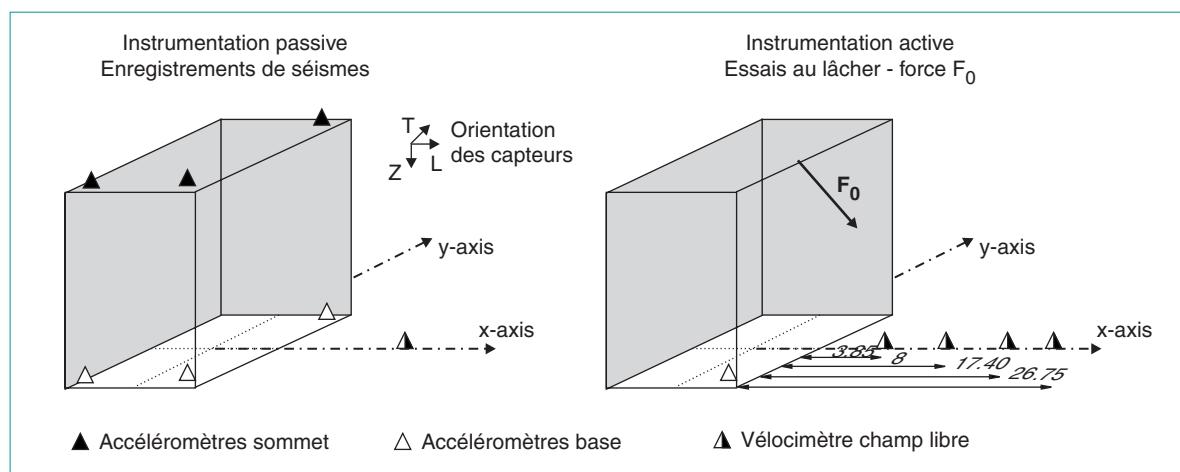


Fig. 6 - Instrumentation de la structure du site test de Volvi lors des expérimentations passives et actives. Les essais au lâcher ont été réalisés dans les deux directions principales de la structure.

Expérimentation passive

L'expérimentation passive a permis d'étudier la déformation de la structure pendant un séisme. La structure était instrumentée à l'aide d'accéléromètres à trois composantes, placés en son sommet et à sa base de manière à pouvoir analyser toutes les composantes du mouvement. En particulier, des informations sur l'interaction sol-structure, sur l'importance de la flexion et du balancement ont été obtenues.

Le modèle a été appliqué à notre configuration expérimentale, permettant de valider les premiers résultats. L'excitation x_g de l'équation (4) correspond à une composante horizontale d'un enregistrement sismique obtenu lors de l'expérimentation passive. En comparant les données numériques aux résultats expérimentaux (fig. 7), on se rend compte que, malgré la simplicité du

modèle, les fréquences de vibration de la structure ainsi que le comportement du système sol-structure sont bien reproduits. En particulier, l'effet de l'Interaction sol-structure sur la réponse de la structure est simulé de manière très satisfaisante.

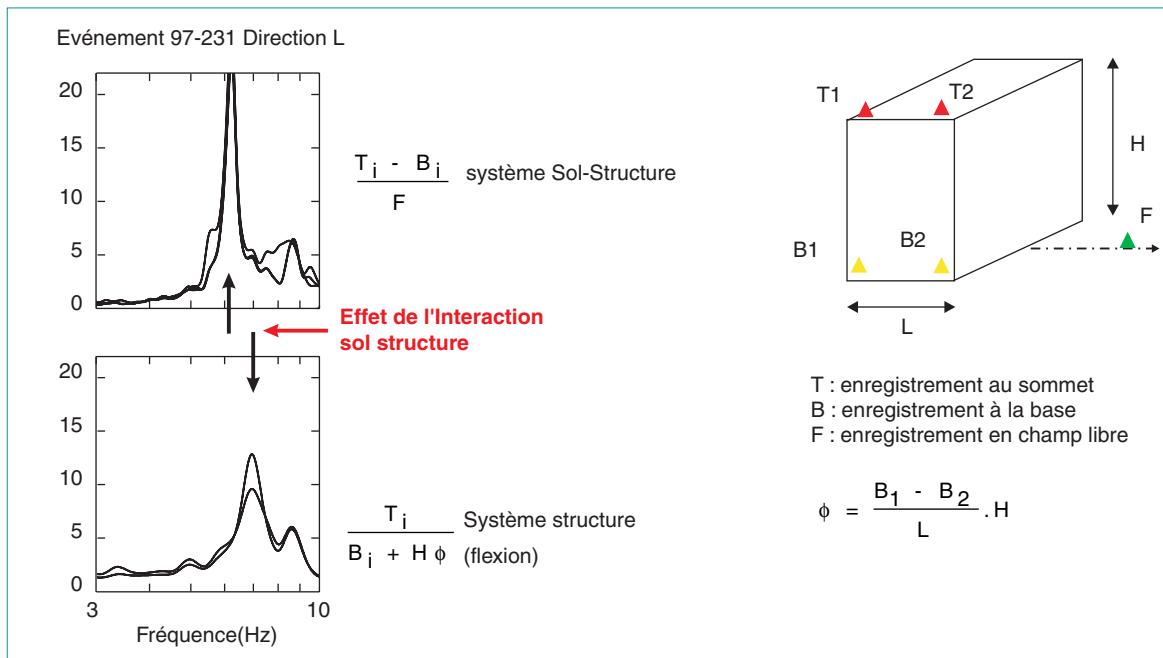


Fig. 7 - Comparaison entre les résultats de l'expérimentation passive et de la modélisation pour définir le mouvement de la structure obtenus dans le cas d'un événement sismique enregistré lors de l'instrumentation du bâtiment du site test européen de Volvi.

(Droite) : Présentation des composantes utilisées pour la définition du mouvement global du bâtiment.
 (Gauche) : Représentation spectrale du déplacement global du système sol-structure (haut) et du système structure (bas) enregistré (noir) et calculé (rouge) au sommet du bâtiment.

Expérimentation active

Des essais au lâcher ont été réalisés, forçant la vibration de la structure dans ses directions principales (longitudinale L et transversale T). Ces essais consistaient à tendre un câble ancré entre le sommet de la structure et le sol et à le couper brusquement. La structure commence alors à osciller librement. Simultanément, un réseau temporaire de capteurs sismologiques à trois composantes a été installé, à différentes distances de la fondation et aligné dans les directions T et L. Chaque capteur était orienté selon les directions principales de la structure, à savoir les composantes horizontales suivant les directions L et T.

En opposition avec l'expression du modèle, l'excitation est une sollicitation extérieure, appliquée au sommet de la structure. Pour obtenir le mouvement de celle-ci, l'équation (4) devient :

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (6)$$

Le vecteur déplacement qui caractérise le mouvement global de la structure est obtenu à partir de son état initial de déformation et des caractéristiques dynamiques du système sol-structure, à savoir sa fréquence $\tilde{\omega} = 2\pi/\tilde{T}$ et son amortissement ζ . À partir de l'équation (5), on obtient les forces de réaction qui se développent au niveau du contact sol-fondation, après être passé dans le domaine des fréquences par transformée de Fourier du vecteur déplacement calculé par l'équation (6).

La figure 8 présente les résultats obtenus à l'aide du modèle développé comparés à ceux observés lors de l'expérimentation active réalisée à Volvi. Trois comparaisons sont présentées qui correspondent au mouvement du sol vertical (colonne de gauche, fig. 8) et longitudinal (colonne du milieu, fig. 8) lors d'un essai au lâcher dans la direction longitudinale de la structure et au mouvement transversal du sol

lors d'un essai au lâcher réalisé dans la direction transversale (colonne de droite, fig. 8). On s'aperçoit ainsi que :

- l'amortissement temporel du mouvement du sol induit est proportionnel à l'amortissement du système sol-structure, à sa fréquence fondamentale ;
- la décroissance spatiale du champ d'onde est successivement proportionnelle à l'amortissement géométrique des ondes de volume (en $1/r$ au voisinage immédiat) et des ondes de surface (en $1/\sqrt{r}$ à partir d'une certaine distance, trouvée sur le site de Volvi égale à environ cinq fois les dimensions de sa fondation) ;
- le modèle reproduit de manière satisfaisante les caractéristiques fréquentielles et temporelles du champ d'onde produit par la vibration de la structure ;
- la vibration de la structure est détectable jusqu'à environ dix fois la taille de la fondation, distance à laquelle les mouvements vibratoires du sol représentent encore 5 % du mouvement de la base de l'immeuble. À une distance de deux fois la taille de la fondation, cette proportion atteint 25 %. L'énergie relâchée dans le sol sous forme d'ondes sismiques peut donc être très significative et modifier le mouvement du sol en champ libre.

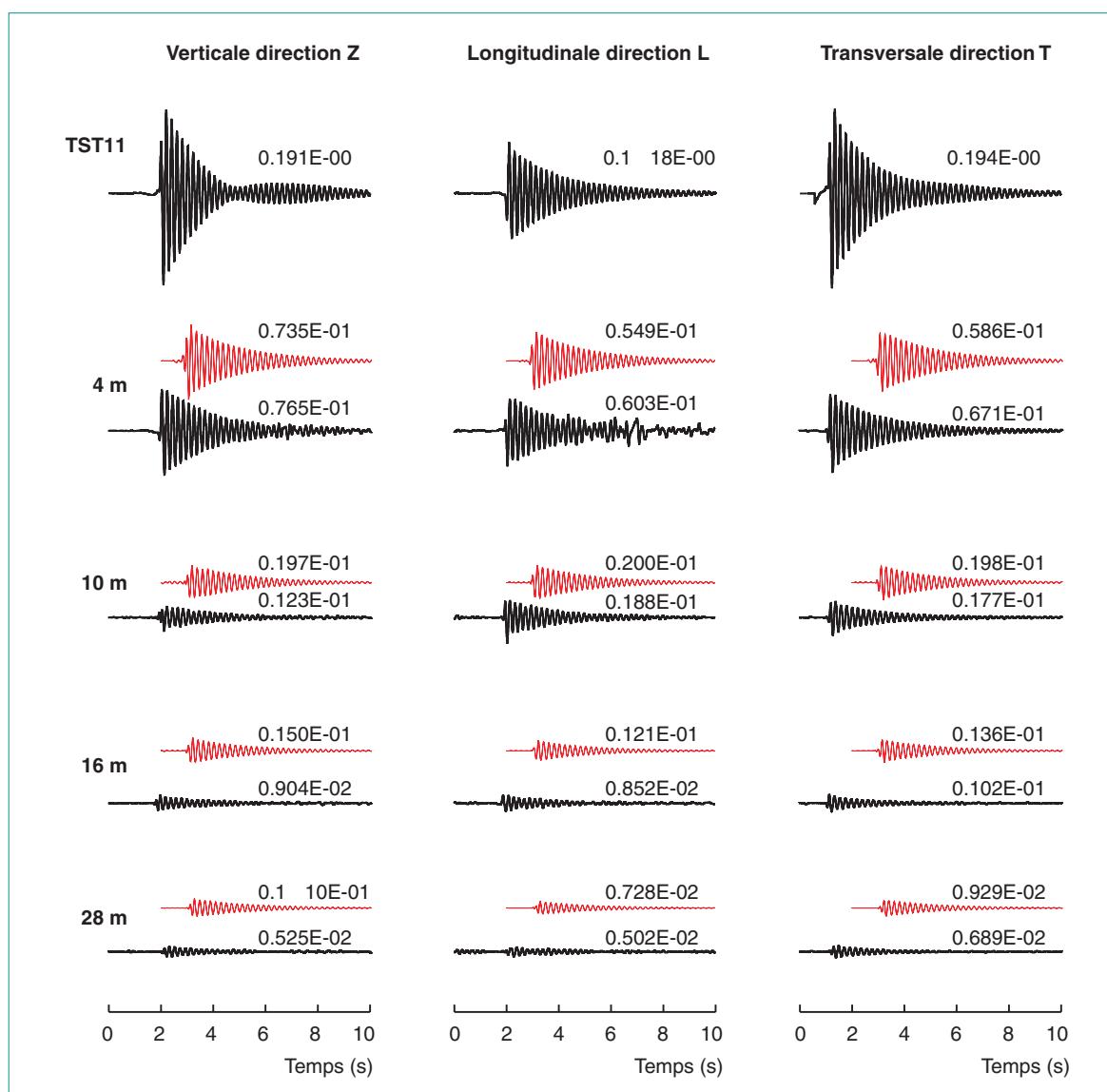


Fig. 8 - Comparaison entre les résultats de l'expérimentation active (noir) et de la modélisation (rouge) définissant le mouvement du sol induit par le mouvement de la structure du site test européen de Volvi lors des essais de lâcher.
Les valeurs au droit de chaque tracé représentent l'amplitude maximale du mouvement calculée ou mesurée à différentes distances de la structure (0 m : station TST11 située sur la semelle de fondation de la structure, puis 4, 10, 16 et 28 mètres).

Cette expérimentation a ainsi permis de montrer que l'Interaction structure-sol existait réellement. En résolvant les étapes 1 et 2 du modèle, les hypothèses utilisées ont aussi été validées et justifiées. Ce modèle simple reproduit l'effet de l'Interaction sol-structure et de l'Interaction structure-sol lors d'un tremblement de terre.

Les effets urbains

Interaction site-ville appliquée au cas de Mexico

En utilisant le modèle analytique développé pour une structure isolée, l'étude de l'Interaction site-ville a été réalisée sur le quartier Roma Norte (fig. 9), l'un des quartiers de Mexico ayant subi des destructions importantes lors du tremblement de terre de Michoacan en 1985. Une conséquence directe de ces destructions a été la focalisation sur ce quartier d'un grand nombre d'études sismologiques mais aussi géotechniques et structurales, fournissant ainsi des informations précises sur la nature du sol et sur les caractéristiques du bâti. À partir de là, l'étude de l'Interaction site-ville a été menée de la façon suivante :

- tous les immeubles de plus de sept étages ont été recensés dans le quartier Roma Norte, en identifiant leur nombre d'étages et leur superficie. Au total, 180 immeubles ont été répertoriés, dont l'ensemble constitue le modèle urbain ;
- en supposant un habitat homogène, les caractéristiques dynamiques et géométriques des structures ont été déduites de celles de deux ouvrages parfaitement connus de Roma Norte : les immeubles Jalapa et Plaza Cordoba. Chaque structure est identifiée par sa hauteur h , sa masse et son système de fondation. Pour ce dernier, une fondation superficielle équivalente a été considérée, déduite des caractéristiques des fondations profondes de Jalapa et Plaza Cordoba : l'enfoncissement de la fondation superficielle correspond à la longueur active des pieux selon l'expression de Gazetas (1991) et sa masse respecte la densité des fondations profondes, soit le ratio entre le volume des pieux et le volume de sol ;
- la période de vibration de chaque structure a été estimée suivant la relation de l'UBC88 : $T = 0,0773 h^{0,75}$;
- l'amortissement structural a été estimé par les travaux de Farsi (1996), au travers de la relation

$$\zeta = 0,0562 \left(\frac{h}{2B} \right)^{-0,15} \quad \text{avec } B \text{ la dimension de la fondation dans la direction de vibration.}$$

L'utilisation du modèle développé précédemment impose de considérer chaque structure comme étant isolée, c'est-à-dire qu'elle ne subit pas l'effet des autres immeubles : c'est ce que l'on appelle l'interaction simple.

Le modèle urbain a été mis en vibration par un séisme mexicain enregistré par une station de référence localisée à proximité de la zone d'étude. Afin d'introduire cette excitation dans le modèle (soit x_g), le mouvement sismique de référence est convolué par la réponse unidimensionnelle de la colonne de sol de la zone Roma Norte, ce qui représente alors le mouvement sismique en champ libre, sans la présence des bâtiments.

Le champ d'onde généré par l'ensemble des structures perturbant le mouvement sismique a ensuite été calculé en estimant les forces de réaction se développant à la base de chaque structure. Le champ rayonné total W^T est alors représenté comme étant la somme des champs d'onde unitaires, provoqués par la force de translation W^F et le moment de balancement W^M . Étant donné la nature tridimensionnelle du mouvement sismique, on considère que les structures sont excitées suivant leurs directions horizontales principales ($j = 1,2$), W^T s'exprimant alors par la relation suivante :

$$W^T = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^n W^{F_{ij}} + W^{M_{ij}} \quad (7)$$

On a choisi de calculer W^T au point Co56 (fig. 9), qui correspond à la localisation d'une station accélérométrique permanente du réseau mexicain, de manière à pouvoir comparer les résultats de la modélisation à l'enregistrement sismique correspondant.

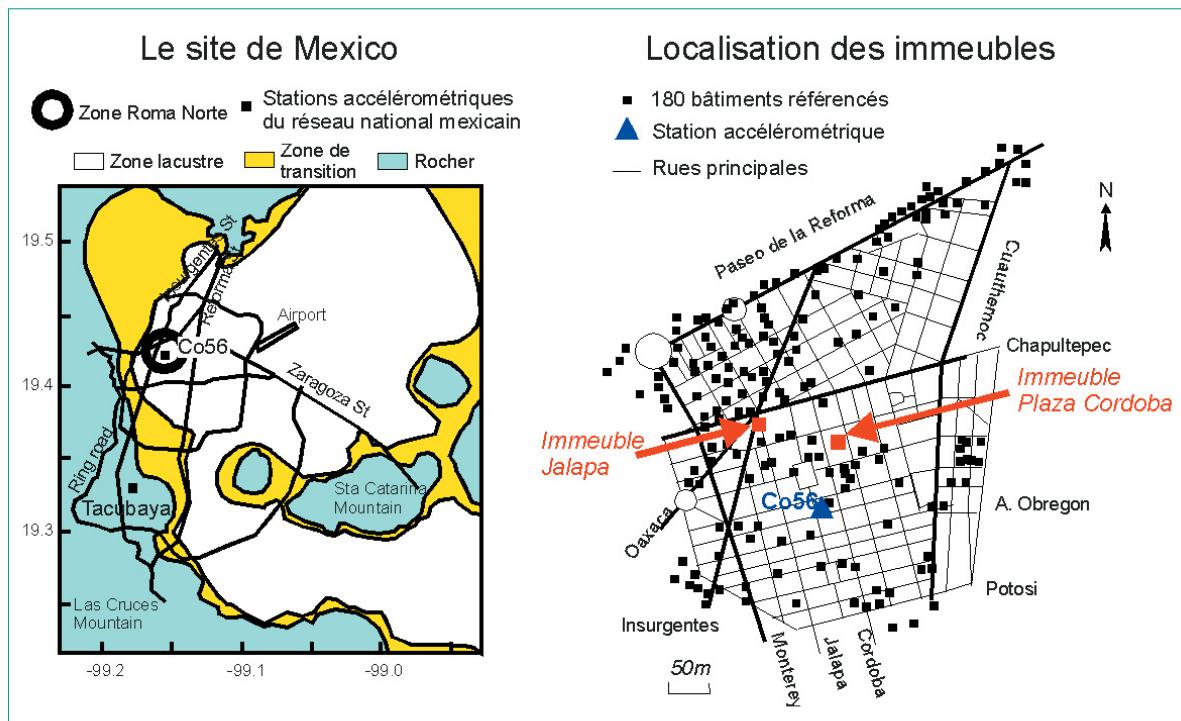


Fig. 9 - (Gauche) : Localisation de la zone Roma Norte et des stations accélérométriques du réseau national mexicain.

(Droite) : localisation des immeubles recensés dans la zone Roma Norte.

Dans le domaine temporel, on s'aperçoit que le mouvement du champ d'onde rayonné par l'ensemble des structures est du même ordre de grandeur que le mouvement sismique incident, ce qui prouve l'importance de l'Effet site-ville dans le cas de Mexico (fig. 10). Le mouvement urbain (par opposition avec le mouvement champ libre) peut alors être estimé comme étant la somme du mouvement sismique incident et du mouvement créé par la vibration des immeubles. Comparé à l'enregistrement sismique obtenu à la station Co56, les mouvements calculés présentent des différences notables, en partie liées, d'une part, au mode de calcul qui ne considère que l'interaction simple et, d'autre part, à la très grande simplicité du modèle de sol stratifié. Néanmoins, on se rend compte que le mouvement du sol semble allongé en temps et en tout cas animé de battements monochromatiques, caractéristiques des enregistrements sismiques de la zone de Mexico.

À partir de ces calculs, l'effet de la vibration des immeubles sur le mouvement du sol peut être analysé dans le domaine fréquentiel. Une méthode largement répandue pour l'estimation des effets de site consiste à calculer le rapport spectral entre les composantes horizontales d'un signal enregistré simultanément sur un site sédimentaire et sur un site rocheux (Borchardt, 1970), soit la méthode du rapport spectral classique (SSR, Standard Spectral Ratio). En supposant que la distance inter-station est très faible devant la distance au séisme, les seules variations d'une station à l'autre sont dues aux effets locaux, c'est-à-dire aux Effets de site.

On a ainsi tenté de savoir si la présence des bâtiments avait une quelconque influence sur l'estimation des Effets de site. Tout d'abord, à partir des données expérimentales, on observe très clairement sur les rapports spectraux (méthode SSR, fig. 10) la fréquence de résonance du sol de Mexico, vers 0,4 Hz, fréquence à laquelle le mouvement sismique sera particulièrement amplifié. Ensuite, les rapports spectraux peuvent être calculés à partir du mouvement en champ libre, sans tenir compte de la présence des immeubles. Ce rapport revient à considérer la fonction de transfert unidimensionnelle utilisée dans le modèle. On se rend compte ainsi que le modèle unidimensionnel ne représente pas la fonction de transfert expérimentale, puisqu'elle sous-estime la fréquence et surtout l'amplification du mouvement du sol. Enfin, ce même rapport spectral est calculé en considérant maintenant le champ libre urbain, c'est-à-dire en tenant compte de la présence des bâtiments. La fonction de transfert se rapproche de celle obtenue expérimentalement, en fréquence comme en amplitude, ce qui tend à prouver que l'estimation des Effets de site en milieu urbain doit tenir compte de la présence des bâtiments.

À notre connaissance, c'est la première fois qu'est envisagée une action anthropique sur la répartition de l'aléa sismique, alors que cette influence est connue dans le cas du risque hydraulique et du risque géotechnique. On peut néanmoins se demander si le cas de Mexico est un cas unique, très particulier car présentant une très forte rugosité (quantité et géométrie des structures très importantes) à la surface d'une couche de sol très mou et de faible épaisseur.

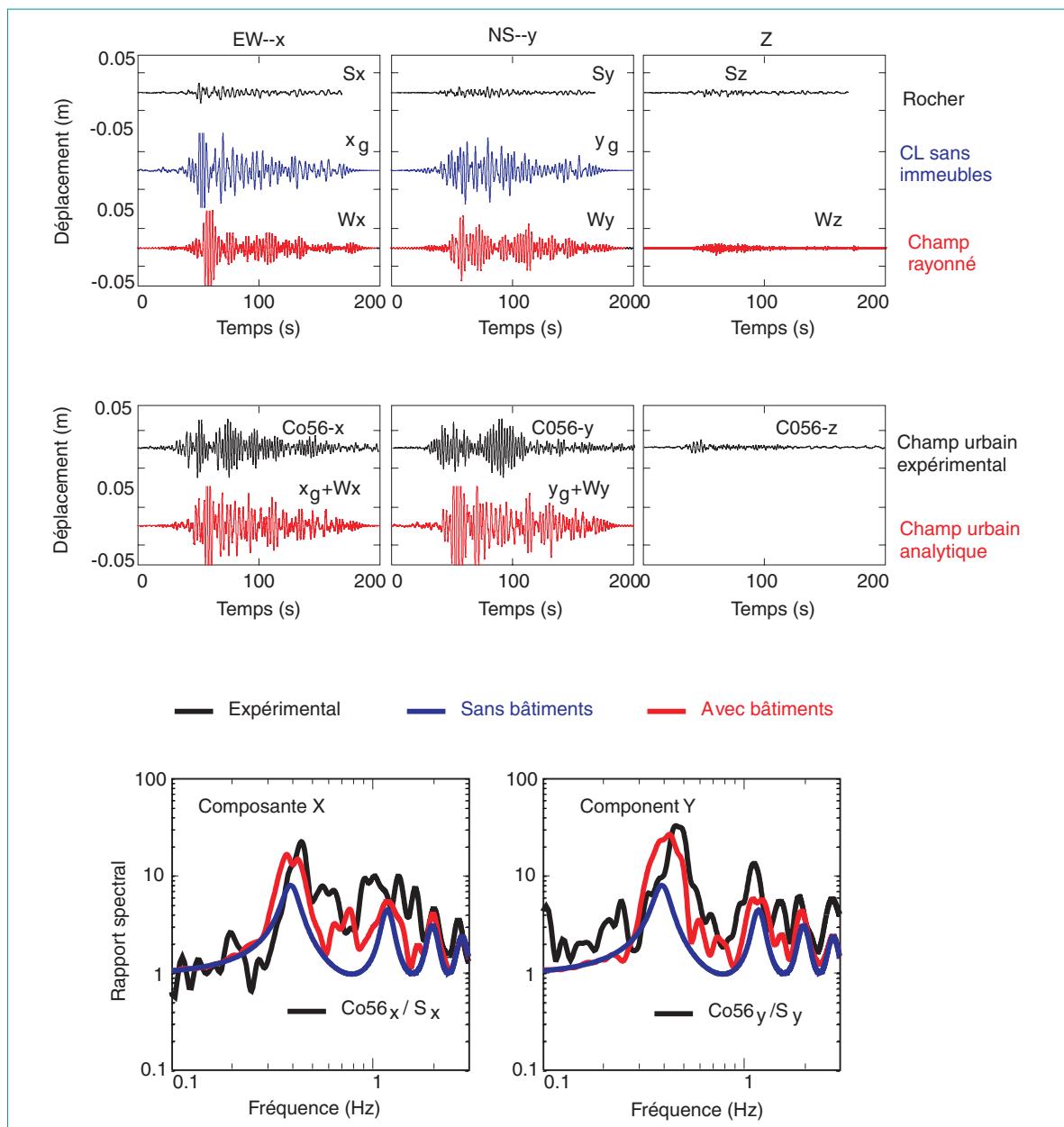


Fig. 10 - Résultats temporels (gauche) et fréquentiels (droite) de l'analyse d'Interaction site-ville sur la zone Roma Norte de Mexico. (Noir : résultats expérimentaux obtenus d'après les enregistrements accélérométriques – Bleu : résultats analytiques sans tenir compte des bâtiments – Rouge : résultats analytiques en tenant compte des bâtiments).

Considérations énergétiques

Les résultats précédents peuvent paraître surprenants, tant pour les sismologues que pour les spécialistes des structures : il semble à première vue que, lors d'un séisme, l'énergie de vibration d'un immeuble, ou d'un ensemble d'immeubles, reste petite (beaucoup pensent même totalement négligeable) devant l'énergie de vibration de l'ensemble du sous-sol. Dès lors, il ne saurait exister d'interaction entre les deux phénomènes. On a donc cherché à quantifier, très grossièrement, ce rapport d'énergie. À cette fin,

un groupe d'immeubles est considéré, reposant sur un remplissage sédimentaire d'épaisseur H_s , sur une superficie totale S_s . L'énergie cinétique maximale E_s de l'ensemble du remplissage sédimentaire, et l'énergie cinétique maximale E_b des immeubles sont successivement calculées : l'objectif est de trouver l'ordre de grandeur du rapport E_b/E_s .

Énergie cinétique du sol

Soit une couche de sol mou, caractérisée par sa masse volumique ρ_s , sa vitesse d'onde de cisaillement β_s et son épaisseur H_s . L'énergie cinétique du sol E_s , de surface S_s , peut s'écrire :

$$E_s = \frac{1}{2} S_s \cdot \rho_s \int_0^z v^2(z) dz \quad (8)$$

où $v(z)$ est la vitesse du sol à la profondeur z . Si l'on suppose qu'il existe un contraste important entre la couche sédimentaire et la formation rigide sous-jacente (environ 4 à 5), le sol joue le rôle de filtre canalisant le maximum d'énergie sismique autour de la fréquence de résonance du remplissage superficiel f_s . On peut alors relier la vitesse du sol à son accélération par la relation :

$$v_{\max} = \frac{K \cdot a_{\max}}{2\pi f_s} = \frac{2K \cdot a_{\max}}{\pi \cdot \beta_s} H_s \quad (9)$$

dans laquelle K est un coefficient proche de 1. Par ailleurs, la variation en profondeur de la vitesse du sol peut s'écrire :

$$v \approx v_{\max} \cos\left(\frac{\pi z}{2H_s}\right) \quad (10)$$

où v_{\max} est la vitesse à la surface du sol. On en vient donc à l'expression suivante pour l'énergie cinétique maximale du sol :

$$E_s = S_s \cdot \rho_s \cdot v_{\max}^2 \frac{H_s}{4} = \frac{S_s \cdot \rho_s \cdot H_s^3 \cdot K^2 \cdot a_{\max}^2}{\pi^2 \beta_s^2} \quad (11)$$

ou encore

$$E_s \approx S_s \cdot (\rho_s \cdot H_s \cdot K^2 \cdot a_{\max}^2) / (16 \cdot \pi^2 \cdot f_s^2) \quad (12)$$

Énergie cinétique des bâtiments

En considérant un nombre n d'immeubles, fondés sur la surface de sol S_s , de dimensions variables (hauteur H_{bi} , surface de fondation S_{bi} , masse m_{bi}), l'énergie cinétique de la ville constituée des n immeubles peut s'écrire :

$$E_b = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_{bi} \cdot V_i^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \rho_b \cdot S_{bi} \cdot H_{bi} \cdot S_v^2(f_{bi}) \quad (13)$$

Dans cette relation, la vitesse est associée à la valeur du spectre de réponse en vitesse, définie à la fréquence du bâtiment, et peut alors s'exprimer en fonction du pseudo-spectre en accélération, soit :

$$S_v = \frac{S_a}{2\pi f_b} \quad (14)$$

Si l'on considère que, comme dans la plupart des cas, la fréquence du bâtiment est supérieure à celle du sol, on se situe sur la région plateau du spectre en accélération. On peut alors appliquer la relation entre la valeur du spectre en accélération et l'accélération du sol, soit :

$$S_a(f_b) \approx R a_{\max} \quad (15)$$

avec R généralement voisin de 2,5. L'expression de l'énergie cinétique de la ville devient alors :

$$E_b = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_b \cdot S_{bi} \cdot H_{bi} \cdot S_a^2(f_{bi})}{8 \cdot \pi^2 \cdot f_{bi}^2} = \frac{R^2 a_{\max}^2 \cdot \rho_b}{8 \cdot \pi^2} \sum_{i=1}^n \frac{S_{bi} \cdot H_{bi}}{f_{bi}^2} \quad (16)$$

Rapport des énergies cinétiques

En supposant que le rapport des densités entre le sol et la structure est de l'ordre de 0,1 à 0,2 et sachant que la fréquence de vibration d'un sol peut être estimée par la relation simple suivante $f_s = \frac{\beta_s}{4H_s}$, le rapport des énergies cinétiques de la ville et du site peut s'exprimer comme :

$$\frac{E_b}{E_s} \approx 2 \cdot \frac{\rho_b}{\rho_s} \cdot \frac{R^2}{K^2} \sum_{i=1}^n \frac{S_{bi}}{S_s} \cdot \frac{H_{bi}}{H_s} \cdot \frac{f_s^2}{f_{bi}^2} \quad (17)$$

La première partie du second terme peut être remplacée par une constante, puisque le rapport des masses volumiques ρ_b/ρ_s varie entre 0,1 et 0,2, R vaut environ 2,5 et K environ 1. On obtient alors :

$$\frac{E_b}{E_s} \approx a \cdot \sum_{i=1}^n \frac{S_{bi}}{S_s} \cdot \frac{H_{bi}}{H_s} \cdot \frac{f_s^2}{f_{bi}^2} \quad (18)$$

avec

$$1,25 \leq a \leq 2,5$$

On s'aperçoit ainsi que ce rapport est principalement contrôlé par trois termes facilement identifiables qui sont :

- la densité urbaine qui représente la surface de sol occupée par les bâtiments, s'exprimant comme le rapport entre la surface totale du bâti et la surface du site considéré ;
- le contraste de masse, et donc de géométrie, entre la ville et le sol, caractérisé par le rapport entre la hauteur moyenne des bâtiments constituant la ville et l'épaisseur du remplissage sédimentaire ;
- un critère de résonance entre la vibration de la ville et celle du sol qui, comme l'avaient déjà montré Guéguen (1995) et Bard et al. (1996), favorise le piégeage des ondes de surface émises par la vibration des bâtiments.

Au vu de la relation (18), plus les bâtiments ont de grandes dimensions par rapport à la géométrie du sol (hauteur/épaisseur et surface), plus le rapport des énergies cinétiques sera élevé. Cette expression indique par ailleurs que lorsque les fréquences des immeubles sont sensiblement supérieures à la fréquence propre du sol, l'interaction site-ville ne pourra pas avoir lieu : pourtant, pour chaque immeuble considéré individuellement, l'interaction sol-structure peut affecter considérablement la réponse de l'immeuble. Mais le rayonnement dans le sol ne peut être piégé par suite du trop grand décalage entre les longueurs d'ondes caractéristiques du sol ($H/4$) et celles émises par les immeubles.

Application au quartier Roma Norte de Mexico

À partir du réseau d'immeubles recensés dans le quartier Roma Norte à Mexico, une étude paramétrique a été réalisée afin de connaître les paramètres les plus importants contrôlant l'effet site-ville.

Pour cette étude paramétrique, la géométrie du système urbain réel du quartier Roma Norte a été conservée. Il est constitué de 180 immeubles (cf. fig. 9), dont on a fait varier les caractéristiques géométriques (autrement dit la fréquence et la surface au sol). Pour mieux apprécier l'influence de ces paramètres, ces réseaux ont été supposés homogènes, c'est-à-dire que les 180 immeubles étaient identiques. Ainsi 180 réseaux urbains différents ont été considérés, en prenant successivement comme immeuble caractéristique l'un des 180 immeubles réels recensés dans le quartier Roma Norte. Tous les modèles site-ville sont soumis à une excitation harmonique identique à celle de la partie précédente.

Pour chacun de ces 180 cas, l'Interaction site-ville a été quantifiée à l'aide de trois estimateurs différents :

- ① le rapport E_b/E_s approché par la formule (18) ;
- ② le rapport \tilde{E}_b/\tilde{E}_s exact calculé sans les approximations sur R et K , c'est-à-dire directement avec les formules (8) et (13) ;
- ③ enfin, un troisième estimateur dit « intensité cumulée » a été considéré et défini en chaque point, à partir du champ réémis par l'ensemble des immeubles, par la quantité

$$P = \sum_{t=1}^{t_{\max}} x^2(t) + y^2(t) \quad (19)$$

où $x(t)$ et $y(t)$ sont les mouvements dans les deux directions horizontales, produits à l'instant t au site considéré par le groupe d'immeubles. Cette quantité est ensuite normalisée par la quantité similaire P_g définie sur le mouvement en champ libre qui existerait en l'absence d'immeubles.

La quantité dP/dt représente le flux d'énergie à l'instant t . En le cumulant sur toute la durée du séisme, on obtient un indicateur du total d'énergie qui a été véhiculé par les ondes rayonnées : cette quantité peut être supérieure à la quantité correspondante pour le champ libre sans que soit violé le principe de conservation d'énergie. Cela veut simplement dire que, par suite de phénomènes d'échos et de réverbérations, les ondes émises sont piégées dans les couches superficielles, et ne peuvent que très lentement restituer l'énergie dans le substratum.

Cette étude paramétrique a permis, d'une part, d'évaluer la pertinence de l'estimateur \tilde{E}_b/\tilde{E}_s et de son approximation grossière E_b/E_s en les comparant à l'intensité cumulée normalisée P/P_g et, d'autre part, d'identifier les paramètres cruciaux contrôlant le mécanisme de l'Interaction site-ville.

La figure 11 représente, pour les 180 cas considérés, la corrélation entre

P/P_g et les estimateurs \tilde{E}_b/\tilde{E}_s et E_b/E_s . Malgré une dispersion certaine, cette corrélation s'avère très satisfaisante, même pour l'indicateur grossier proposé par la formule (18). Dans le cas du quartier de Roma Norte, on observe ainsi que P/P_g ($10 E_b/E_s$). En d'autres termes, pour un rapport d'énergie cinétique de 10 %, l'intensité cumulée du champ rayonné est équivalente à celle du champ libre. C'est d'ailleurs approximativement le cas de la configuration réelle de Roma Norte, représentée par le symbole carré sur la figure 11. Cette figure indique aussi que, dans certains cas, l'intensité cumulée peut être dix fois supérieure à celle du champ libre : les mouvements sont alors quasiment contrôlés par l'Interaction

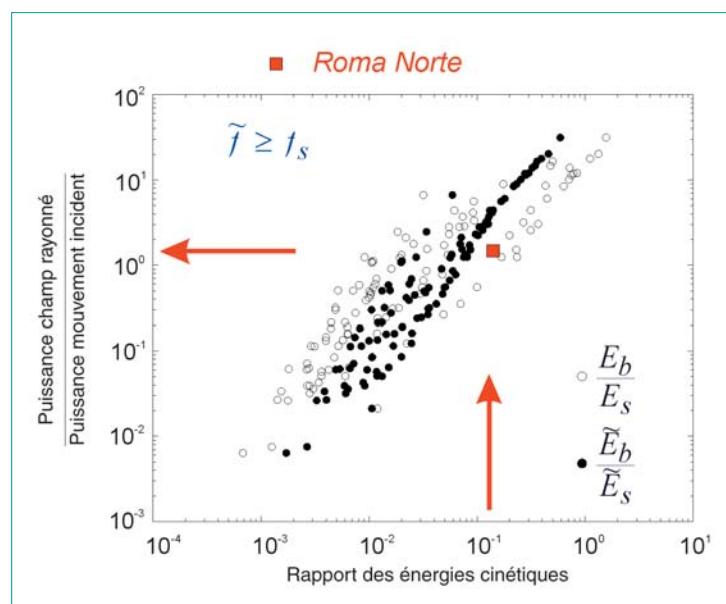


Fig. 11 - Évolution de l'intensité cumulée du champ rayonné par les immeubles, normalisée par la puissance du mouvement sismique incident, en fonction du rapport des énergies cinétiques E_b/E_s calculé par la relation approchée (18), ou à partir du modèle analytique XXXX appliqué aux 180 réseaux homogènes d'immeubles. Le carré représente la configuration réelle de Roma Norte.

site-ville ! La figure 12 permet d'isoler très clairement les deux paramètres principaux qui contrôlent l'importance de cet effet d'interaction, à savoir la densité urbaine, et surtout la coïncidence entre les fréquences du sol et des immeubles, à l'origine du couplage sol-structure.

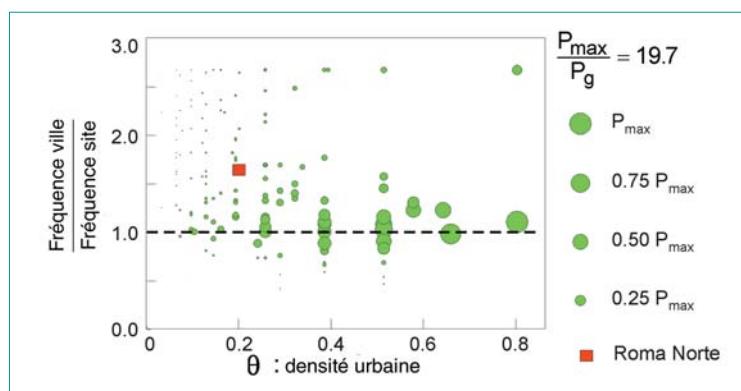


Fig. 12 - Évolution de l'intensité cumulée du champ rayonné par les immeubles, normalisée par la puissance du mouvement sismique incident, en fonction de la densité d'urbanisation (en abscisse) et du rapport f_b/f_s (en ordonnée). Le carré représente la configuration réelle de Roma Norte.

Application aux villes de Grenoble et de Nice

On peut aussi appliquer cette relation à d'autres configurations. Par exemple, le quartier de la Villeneuve à Échirolles, à la périphérie de Grenoble, est certainement l'un des secteurs les plus urbanisés de la ville. En considérant une urbanisation très dense ($\theta = 0,5$), la fréquence f_s et l'épaisseur H_s du remplissage égales, respectivement, à 0,4 Hz et 400 m (Lebrun, 1997), et des bâtiments de hauteur moyenne égale à 30 m, vibrant à environ 2 Hz (Farsi, 1996), le rapport des énergies cinétiques E_b/E_s est d'environ 0,15 %. Cette valeur est faible et d'après la figure 11, elle correspond à un rapport $P/P_g \gg 10^{-2}$, c'est-à-dire un Effet Site-Ville négligeable. Dans ce cas, la forte épaisseur du remplissage, constituée de matériaux assez rigides (vitesse des ondes s $\beta = 400$ m/s), est le paramètre prépondérant conduisant à une faible valeur de E_b/E_s .

La même analyse a été appliquée au cas de Nice. À partir de l'étude du risque sismique réalisée sur la ville de Nice par le Centre d'études techniques de l'Équipement (CETE, 2000), le rapport des énergies cinétiques a pu être calculé approximativement pour quelques secteurs de la ville, permettant d'estimer l'importance de l'Effet Site-Ville (tableau I). L'analyse ne tient compte que de certaines classes de bâtiments de plus de six niveaux ($> R + 5$). Comme pour Grenoble, le rapport P/P_g est estimé sur la figure 11 au moyen d'un intervalle [min,max] de façon à rendre compte de la dispersion des valeurs.

TABLEAU I
Caractéristiques du modèle urbain sur plusieurs quartiers de Nice (CETE, 2000)

Zone	$S_s (10^4 m^2)$	$S_b (m^2)$	q	F_s (Hz)	$E_b/E_s (%)$	P/P_g
Le Port-Riquier	113	467 251	0,4	1,5	0,70	0,04 – 0,5
Ariane-Pasteur	190	233 419	0,12	1,5	0,50	0,03 – 0,4
Saint Roch-Pasteur	168	415 184	0,25	1	0,10	0,009 – 0,01
Nice nord	153	389 274	0,22	2,5	3	0,1 – 1,1
Gare du Sud	113	420 448	0,4	2	2	0,08 – 1,0
Centre	205	932 660	0,45	1	0,30	0,03 – 0,09

Au vu des résultats, sur les secteurs de Nice nord, Le Port-Riquier et Ariane-Pasteur et Gare du Sud, l'Effet site-ville ne devrait pas être négligeable. Dans le cas de Nice nord, il peut même être équivalent à celui calculé à Mexico ($P/P_g = 0,8$).

Conclusions

Dès 1995, les premières études (Guéguen, 1995 ; Virgin et Bard, 1996 ; Bard et al., 1996) envisageaient un éventuel couplage entre le mouvement d'une structure et du sol. Sur la base de modèles analytiques simples, elles ont montré que, sous certaines configurations « favorables », un bâtiment isolé soumis à une excitation sismique produit un champ d'onde détectable jusqu'à des distances de l'ordre du kilomètre. L'énergie relâchée dans le sol semblait indiquer une possible interaction à grande échelle, représentative d'une ville entière. Pourtant, les communautés scientifiques des sismologues et des spécialistes des structures étaient pour le moins sceptiques face à nos résultats, et à la nécessité qui pouvait s'ensuivre de tenir compte de l'environnement urbain dans sa globalité. La plupart du temps, les bâtiments sont étudiés comme s'ils étaient isolés et le mouvement du sol est supposé ne provenir que du séisme. L'idée d'une possibilité de modification anthropique de l'aléa sismique en zone urbaine paraissait totalement incongrue. Des investigations complémentaires ont donc été menées par le LCPC et le LGIT. Il fallait montrer que l'importance de ce phénomène n'était pas négligeable et comprendre ses mécanismes, grâce en particulier à des expériences sur site. Par ailleurs, l'augmentation de la surface construite des agglomérations, du nombre d'habitants et de la densité de l'urbanisation justifiait l'idée de considérer un système couplé site-ville. Avec ces perspectives comme objectif, différentes approches ont été envisagées. Tout d'abord, il fallait valider les résultats obtenus par les modèles développés jusqu'à maintenant. Pour cela, les expériences réalisées sur le site test européen de Volvi ont non seulement permis de montrer clairement que l'interaction structure-sol existait, mais également d'apprécier la pertinence des modèles utilisés. Par ailleurs, la qualité des données obtenues lors de ces expériences a permis d'interpréter le champ d'onde généré par le bâtiment d'un point de vue qualitatif mais aussi quantitatif. Le mouvement induit restait significatif jusqu'à environ dix fois la dimension de la fondation, distance à laquelle les amplitudes correspondaient à peu près à 5 % du mouvement de la fondation. Malgré la taille de la structure testée (échelle 1/3) et le niveau de la sollicitation exercée, l'énergie restituée était significative.

Un double objectif est ainsi atteint : confirmer la potentialité de l'effet du bâti sur le mouvement du sol et se doter d'un outil fiable qui permet alors d'étendre l'analyse au comportement global d'une ville.

La situation de Roma Norte sur la zone du lac de Mexico, les destructions importantes subies lors du tremblement de terre de 1985 et la répartition hétérogène de son urbanisation, avec notamment des structures très imposantes vers le nord de la zone, permettaient d'imaginer de fortes interactions entre la ville et le sol. Un des principaux objectifs de cette analyse était de savoir si la ville pouvait être à l'origine des formes d'onde (allongement et battement) observées sur la station accélémétrique de Roma Norte. Considérant quelques hypothèses simplificatrices, mais cependant raisonnables, la modélisation développée pour un bâtiment a été appliquée à 180 bâtiments sélectionnés sur ce secteur. Les résultats obtenus pour le modèle urbain de Roma Norte sont surprenants par leur ampleur, puisque les mouvements induits par le couplage sol-structure s'avèrent quantitativement comparables aux mouvements en champ libre. Par ailleurs, calculé à la position de la station accélémétrique mexicaine, le mouvement créé par le bâti est par son allure comparable à ce qui a été enregistré pendant le séisme, car comprenant des battements et un certain allongement.

Une mise au point s'impose à ce stade : ce phénomène ne crée évidemment pas d'énergie ! D'une façon générale, l'énergie de vibration véhiculée par les ondes sismiques est transmise aux immeubles, où elle est filtrée par leurs caractéristiques dynamiques. Si le sol était infiniment rigide, l'énergie serait totalement piégée dans les immeubles, où elle serait dissipée progressivement par l'amortissement interne des structures. En situation « standard » (hors forte interaction), cette dissipation interne est peu à peu restituée au sol par l'intermédiaire des fondations (ce qui correspond à un amortissement supplémentaire, appelé amortissement radiatif) : les ondes émises dans le sol sont principalement des ondes de volume, se propageant vers le bas et véhiculant un signal de faible amplitude. Dans les cas évoqués dans cet article, ces ondes restent piégées dans les couches superficielles du sol en raison du fort contraste de vitesse en profondeur, et produisent donc des ondes de surface. Pour peu que la fréquence du sol corresponde à celle des immeubles, le système devient fortement couplé. Comme les ondes sont piégées en surface, les réverbérations successives conduisent à une « intensité cumulée » pouvant largement dépasser « l'intensité cumulée » des ondes incidentes, même si le flux instantané reste bien évidemment globalement décroissant.

Simultanément, une relation analytique simple (Eq. 18) a été développée pour estimer la potentialité d'une agglomération à être sujette à un phénomène d'interaction site-ville important. Cette relation repose sur des considérations énergétiques et consiste à calculer le rapport entre les énergies cinétiques

du bâti E_b et du sol E_s . En première approximation, le rapport des énergies cinétiques E_b/E_s dépend de trois facteurs :

- la densité urbaine, proportion de surface de sol occupée par les immeubles ;
- le rapport des fréquences de résonance de la couche de sol et des bâtiments ;
- le rapport entre la hauteur des immeubles et l'épaisseur de la couche de sol.

Cette relation a pu être validée grâce à une analyse paramétrique sur un quartier de Mexico. Évidemment, ce cas peut paraître extrêmement « favorable » à l'apparition de l'Interaction site-ville. Le rapport E_b/E_s est alors de l'ordre de 10 % et la puissance du champ induit est équivalente à celle du mouvement incident.

Une première étape est ainsi achevée, qui a conduit de l'Interaction sol-structure à l'Interaction site-ville. L'objectif majeur a donc été atteint : confirmer la potentialité de l'effet du bâti sur le mouvement du sol et, à partir de là, se doter d'un outil fiable qui permet d'étendre l'analyse au comportement global d'une ville. Tandis que les analyses d'aléa sismique en milieu urbain ne s'intéressaient qu'à l'événement naturel pour expliquer des éventuelles variabilités spatiales du mouvement sismique, il semble au vu des résultats présentés que la répartition du bâti peut sous certaines conditions, comme celles réunies à Nice ou à Mexico, être à l'origine de grandes variabilités.

Malgré les recherches réalisées jusqu'à maintenant, le sujet est loin d'être clos. Il reste encore des perspectives d'analyses en suspens, que ce soit pour améliorer la connaissance de ces phénomènes, se doter d'outils efficaces pour les estimer, ou simplement les mettre en évidence expérimentalement. C'est l'objet d'un nouveau programme de recherches lancé dans le cadre de l'ACI « Catastrophes naturelles », avec un accent particulier sur la mise en évidence expérimentale (*in situ* et en centrifugeuse), et la prise en compte des interactions multiples, intégrant les couplages entre bâtiments par l'intermédiaire du sol.

Remerciements. *L'idée originale sur la contamination du mouvement du sol par les vibrations d'immeubles a été nourrie de multiples échanges avec A. Wirgin (LMA, Marseille), dont la conviction a permis de surmonter le scepticisme initial de nombreux collègues. Les travaux résumés ici ont pu être effectués grâce à une bourse de thèse du LCPC, à un financement du programme ECOS-ANUIES (coopération bilatérale France-Mexique), et à la collaboration active de F.J. Chavez-Garcia et M. Cardenas de l'Instituto de Ingeniera de l'Universidad Nacional Autonoma de Mexico.*

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARD P.-Y., The importance of rocking in building motion : an experimental evidence, in *Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, August 2-9, **VIII**, 1988, pp. 333-338.
- BARD P.-Y., GUÉGUEN P., WIRGIN A., A note on the seismic wavefield radiated from large building structures into soft soils, in *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, June 23-28, 1996, paper **1838**.
- BOUCHON M., A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **71**, 1981, pp. 959-971.
- BORCHEDT R.D., Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **60**, 1970, pp. 29-61.
- CARDENAS M., BARD P.-Y., Chavez-Garcia F.J., Comportement dynamique des bâtiments sous fortes sollicitations : le cas de Mexico, *5^e Colloque national de l'Association française de génie parasismique*, Cachan (France), 19-21 octobre, **I**, 1999, pp. 181-188.
- CETE, *Risque sismique sur Nice : étude de scénarios de gestion de crise sismique. Définition de l'aléa, de la vulnérabilité et des enjeux*, Centre d'études techniques de l'Équipement, Ministère de l'Équipement, **Phase 1**, 2000, 130 pages.
- DE SLOOVER P., Comportement vibratoire de la tour Eurocity à Lille, *5^e Colloque national de l'Association française de génie parasismique*, Cachan (France), 19-21 octobre 1999, **I**, pp. 323-330.
- ERLINGSSON S., BODARE A., Live load induced vibrations in Ullevi stadium-Dynamic soil analysis, *Soil Dynamic and Earthquake Engenering*, **15**, 1996, pp. 171-188.
- ERLINGSSON S., Three-dimensional dynamic soil analysis of a live load in Ullevi stadium, *Soil Dynamic and Earthquake Engenering*, **18**, 1999, pp. 373-386.

Euro-Seistest, *An European Test-Site for Engineering Seismology, Earthquake Engineering and Seismology*, Final Scientific Report, vol. 2, **1995**.

FARSI M.-N., *Identification des structures de génie civil à partir de leurs réponses vibratoires. Vulnérabilité du bâti existant*, Thèse de doctorat, Université de Grenoble (France), **1996**, 194 pages.

GAZETAS G., Foundation vibrations, in *Foundation engineering handbook*, 2nd edition, H.Y. Fang Editor, Van Nostrand Reinhold, **1991**, pp. 553-591.

GUÉGUEN P., *Interaction sismique entre le sol et le bâti : de l'Interaction sol-structure à l'Interaction site-ville*, Thèse de Doctorat de l'université Joseph Fourier, Grenoble I, **2000**.

GUÉGUEN P., *Interaction entre le bâti existant et le mouvement du sol dans les sites urbains*, Rapport de DEA de l'université Joseph Fourier, Grenoble I, **1995**, 40 pages.

JENNINGS P.C., Distant motions from a building vibration test, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **60**, **1970**, pp. 2037-2043.

KANAMORI H., MORI J., ANDERSON D.L., HEATON T.H., Seismic excitation by the space shuttle Columbia, *Nature*, **349**, **1991**, pp. 781-782.

KITADA Y., KINOSHITA M., IGUCHI M., FUKUWA N., Soil-structure interaction effect on an Npp reactor building. Activities of Nupec : achievements and the current status, *Proceedings UJNR workshop on Soil-Structure Interaction*, M. Celebi and I. Okawa Editors, september 22-23, **1998**, Menlo Park, California, paper **18**.

LDEO, *Seismological Observatory of Impacts and Collapses at World Trade Center*, Web site, prepared by Seismology Group of the Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades NY 10964, version of 9/14/**2001**.

LEBRUN B., *Les effets de site. Étude expérimentale et simulation de trois configurations*, Thèse de Doctorat de l'université Joseph Fourier, Grenoble, **1997**, 209 pages.

MELI R., FACCIOLI E., MURIÀ-VILA D., QUAAS R., PAOLUCCI R., A study of site effects and seismic response of an instrumented building in Mexico City, *Journal of Earthquake Engineering*, **2(1)**, **1998**, pp. 89-111.

PAOLUCCI R., Soil-structure interaction effects on an instrumented building in Mexico City, *European Earthquake Engineering*, **3**, **1993**, pp. 33-44.

SEZAWA K., KANAI K., Decay in seismic vibration of a simple or tall building structure by dissipation of their energy into the ground, *Bulletin of the Earthquake Research Institut*, **XIII**, Part 3, **1935**, pp. 681-697.

SIEFFERT J.-G., CEVAER F., *Handbook of impedance functions, surface foundations*, Ouest Éditions, Presses Académiques, France, **1992**, 173 pages.

UBC88, Uniform Building Code 88, *International Conference of Building Officials*, **1988**, California.

WIRGIN A., BARD P.-Y., Effects of buildings on the duration and amplitude of ground motion in Mexico city, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **86**, **1996**, pp. 914-920.