

Séismes dans la ville

Pourquoi les mouvements sismiques varient-ils d'un point à l'autre d'une ville ? Les analyses des sismologues montrent que les vibrations sismiques peuvent être canalisées par une couche géologique superficielle et amplifiées localement par les oscillations des constructions.

P. Guéguen, P.-Y. Bard, J.-L. Chazelas et J.-F. Semblat

Le 11 septembre 2001, lors des attentats du *World Trade Center*, tandis que les caméras enregistraient les images des avions percutant les tours jumelles, les stations sismologiques de l'État de New York détectaient à leur tour l'événement. Quelques secondes après les impacts, une station située à 34 kilomètres du *World Trade Center* enregistrait le passage de l'onde sismique causée par le choc sur les tours, onde sismique équivalente à un séisme de magnitude 1. Ainsi, les mouvements d'un immeuble, qui, au sommet, ont une amplitude de quelques millimètres (trop faible pour les détruire), engendrent des ondes sismiques similaires à celles d'un petit séisme. Nous verrons que ces ondes émises par les constructions interfèrent, dans certaines zones urbaines, avec les ondes provenant de l'épicentre, modifiant localement les effets des tremblements de terre.

Ce phénomène, déjà connu, a toujours été considéré de façon isolée, bâtiment par bâtiment. Dans le cas des tours du *World Trade Center*, le mouvement engendré dans le sol a-t-il eu des conséquences sur les constructions avoisinantes ? On sait que lors d'un grand séisme, ce n'est pas un, mais des centaines, voire des milliers de bâtiments, qui sont soumis à des secousses. Les ondes réémises sont alors bien plus nombreuses que celles du *World Trade Center*. Comment les bâtiments réagissent-ils à cette avalanche d'ondes

1. Les conséquences du séisme de Guerrero Michoacan, en 1985, ont été dramatiques et inégaux à Mexico : certains quartiers ont été plus touchés que d'autres, et certains bâtiments ont résisté tandis que leurs voisins ce sont effondrés (voir la photographie). Les sismologues ont découvert que la canalisation par la cuvette sédimentaire sur laquelle est construite la ville et des interférences de vibrations entre le sol et ces structures étaient la cause de ces dégâts hétérogènes.



© Nick Weiser/Corbis

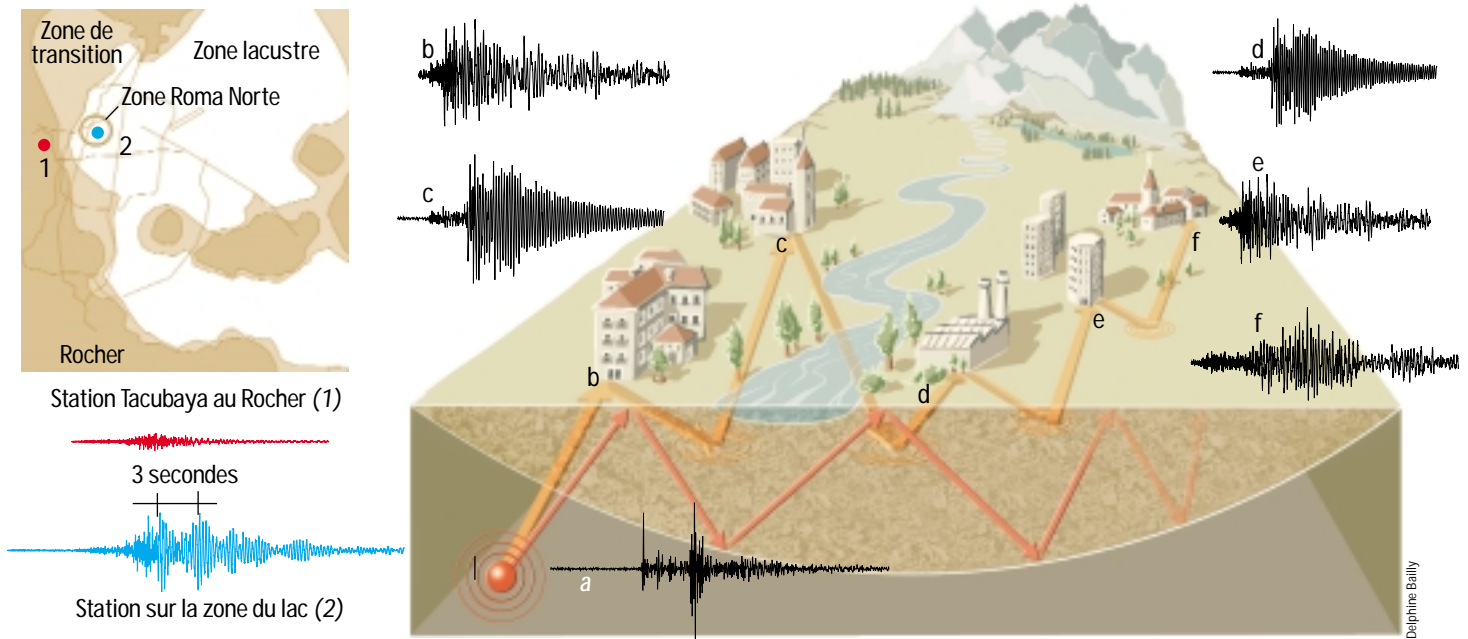
sismiques? Les centres urbains sont souvent bâtis sur des bassins remplis d'alluvions, qui canalisent les ondes sismiques. Quelles sont les conséquences, pour les bâtiments, de l'interférences de ces ondes? On n'imaginait pas que les ondes émises par un séisme puissent être modifiées par l'homme, plus précisément par la construction de bâtiments. Pourtant, nos recherches nous ont conduits à une hypothèse nouvelle : les bâtiments subissent les conséquences des séismes, mais peuvent eux-mêmes être des facteurs aggravants. Même s'il semble difficile de planifier l'urbanisme pour réduire ce risque sismique, des observations et des modélisations ont attiré l'attention sur l'importance potentielle de cet effet dans certaines configurations.

Au cours des dernières décennies, les sismologues ont déployé des efforts considérables pour déterminer les effets des conditions géologiques locales sur les conséquences d'un séisme. Cette étape devenue quasi systématique dans toute étude de risque sismique a été validée au milieu des années 1980. Même si le phénomène avait déjà été observé auparavant, il a été confirmé par la répartition des dégâts survenus à Mexico lors du séisme dramatique de Guerrero Michoacan, en 1985. Bien que Mexico soit située à 350 kilomètres de l'épicentre, le séisme a provoqué dans la capitale des destructions considérables et très localisées. Nous examinerons en quoi la nature du sol en est responsable.

À l'arrivée des Espagnols, Mexico – alors Tenochtitlan –, entourée d'un lac, était peu étendue. Après l'arrivée des conquistadors, la ville s'est agrandie et l'on a progressivement gagné sur le lac qui fut partiellement comblé ; les monuments aztèques qui bordaient l'étendue d'eau furent peu à peu enfouis. Ainsi, le sous-sol de Mexico est constitué d'une couche de quelques dizaines de mètres (60 mètres dans une des zones les plus touchées en 1985, le quartier Roma Norte) d'argile lacustre très molle, qui repose sur une formation rigide. Or, plus la roche est dure, plus les ondes sismiques s'y propagent rapidement : la vitesse de propagation des ondes de cisaillement (les ondes qui font vibrer la roche perpendiculairement à la direction de propagation) dans le sous-sol profond est dix fois supérieure à la vitesse de propagation dans le sous-sol superficiel. Cette différence de vitesse a une conséquence grave : les ondes sismiques se réfléchissent aux limites de cette couche superficielle et sont ainsi piégées, de la même façon que les rayons lumineux sont emprisonnés dans une fibre optique. Les ondes réfléchies dans la couche de surface se superposent aux ondes directes et les amplifient : en certains endroits de la couche sédimentaire, les ondes sismiques interfèrent et leur amplitude augmente.

Depuis le séisme de Mexico, ces effets de site de nature géologique ont été observés à plusieurs reprises,





2. Carte géologique de la région de Mexico et sismogrammes enregistrés lors du séisme de Guerrero Michoacan (à gauche). Dans la zone Roma Norte – l'une des plus dévastées –, l'amplitude des déplacements du sol a été plusieurs fois supérieure à celle enregistrée en périphérie de la ville. Par ailleurs, on a détecté des battements, une oscillation lente de l'amplitude maximale (en bleu). La nature du sous-sol explique ces dif-

férences : Roma Norte a été construite sur une zone d'alluvions (un ancien lac remblayé), tandis que la périphérie a été érigée sur le roc. Le bassin sédimentaire a confiné les ondes sismiques, multipliant leurs interactions avec la surface (à droite) : les ondes issues de l'épicentre (a) ont frappé divers édifices (b, c et d), lesquels réémirent des ondes qui se sont conjuguées aux ondes primaires, touchant d'autres édifices (e et f).

notamment à Spitak lors du séisme d'Arménie de 1988, à San Francisco lors du séisme de Loma-Prieta en 1989, en Iran en 1990, à Kobe en 1995, dans l'État de Gujarat, en Inde en 2001, et à Annecy, en 1996. Ils sont dorénavant pris en compte systématiquement dans les analyses des facteurs locaux aggravants. En France, certaines villes édifiées sur des bassins sédimentaires sont particulièrement concernées : Grenoble, Nice, ou encore Pointe-à-Pitre.

Toutefois, les effets de site n'expliquent pas toutes les caractéristiques des séismes. Lors du séisme de Mexico, le mouvement du sol observé dans la zone dite du Lac, caractérisée par une formation superficielle extrêmement souple, avait une signature anormale (voir la figure 2). Les mouvements étaient beaucoup plus longs que ceux observés sur le rocher et animés de battements réguliers : l'amplitude maximale de vibration oscillait lentement. Nombre d'arguments ont été avancés pour expliquer cette anomalie : la nature des dépôts lacustres, la géométrie du bassin, les hétérogénéités entre l'épicentre et Mexico qui auraient « modifié » le signal initial, par exemple. Ces arguments expliqueraient éventuellement l'allongement du signal, mais pas les battements.

Au milieu des années 1990, l'un de nous (Pierre-Yves Bard) proposa avec Armand Wirgin du Laboratoire de mécanique et d'acoustique du CNRS de tenir compte de l'environnement urbain dans l'évaluation du risque sismique. Nous avons émis cette hypothèse, d'une part, en raison de la nature du bâti de Mexico, où l'habitat, dense et massif, est construit sur un sol souple, et, d'autre part, à cause de la similitude des fréquences de vibration des structures et de la couche de sédiments lacustres de surface : nous avons postulé qu'un couplage s'était établi entre le mouvement du sol et celui des édifices, contribuant à augmenter les dégâts subis par certaines structures. Puisque, lors d'un séisme, de l'énergie est

transférée du sol vers les structures, nous avons pensé que de l'énergie pouvait être transférée de la ville vers le sol : les ondes produites par les vibrations de la ville seraient piégées dans les formations géologiques superficielles et entretiendraient un mouvement du sol à une fréquence de résonance. La théorie d'interaction site-ville était née.

Les bâtiments, sources secondaires

En fait, dès 1935, au Japon, Katutada Sezawa et Kiyoshi Kanai, de l'Université de Tokyo, avaient affirmé que, pendant un séisme, une partie de l'énergie de vibration des bâtiments se dissipe dans le sol. Ce phénomène est aujourd'hui admis et l'on considère généralement que cette fuite d'énergie par le sol est bénéfique, car elle réduit les contraintes accumulées dans la structure. En 1970, Paul Jennings, de l'Institut de technologie de Californie, réalisa une expérience qui consistait à exciter un bâtiment à l'aide d'un vibreur placé à son sommet. P. Jennings étudia la déformation de la structure et les mouvements déclenchés à la surface du sol. Il montra que, dans le cas d'une excitation artificielle appliquée à une structure, on enregistre le passage d'une onde engendrée par l'expérience jusqu'à 11 kilomètres de distance. L'onde était parfaitement identifiable, car sa fréquence, de l'ordre du hertz, correspondait à la fréquence de résonance de la structure. P. Jennings montra ainsi que l'interaction du mouvement du bâtiment et de celui du sol n'était pas uniquement un phénomène local.

Après les travaux de P. Jennings, il fallut attendre 1991 et la parution d'un article original dans la revue *Nature* pour que l'idée d'ondes sismiques engendrées par un bâtiment

réapparaisse. Le 13 août 1989, l'entrée dans l'atmosphère de la navette *Columbia*, de retour de mission, provoqua une onde de choc qui fut enregistrée par les stations sismologiques de Californie du Sud. Le plus surprenant est que les stations détectèrent également une onde très brève dont la période était égale à deux ou trois secondes et qui précéda l'onde de choc de 12,5 secondes. Cette impulsion fut également enregistrée par la station de l'Université de Californie du Sud, proche du centre ville, mais, cette fois, trois secondes après l'onde de choc.

L'équipe de Hiroo Kanamori, de l'Institut technique de Californie, a montré que les deux ondes brèves n'en formaient en réalité qu'une seule qui provenait d'un groupe de hauts immeubles, situés dans le centre de Los Angeles. Excités par l'onde de choc émise par la navette, les immeubles libérèrent une partie de leur énergie de vibration sous forme d'ondes sismiques se propageant dans le sol beaucoup plus vite que les ondes sonores dans l'air (c'est pourquoi le premier signal a précédé l'onde de choc). Par ailleurs, la fréquence de résonance des bâtiments étant très proche de celle du bassin sédimentaire de Los Angeles (qui dépend de l'épaisseur des sédiments et de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement), les vibrations dans les couches superficielles du sol ont été entretenues, et l'onde s'est propagée sur une longue distance (c'est le second signal enregistré après l'onde de choc).

Le cas du *World Trade Center* est très semblable à celui de la navette *Columbia*. La fréquence de l'onde enregistrée à 34 kilomètres des tours jumelles a été de 1,5 hertz. La fréquence principale de résonance d'une structure très élancée comme le *World Trade Center* est d'environ 0,1 hertz (on peut évaluer l'ordre de grandeur de cette fréquence en calculant celle d'un pendule de longueur égale à celle de l'immeuble), mais une analyse des modes de vibration de la structure a révélé une harmonique autour de 1,4 hertz, soit quasiment la fréquence de l'onde qui s'est propagée. Les tours et le sol étaient fortement couplées.

Un sous-sol amplificateur

L'interaction du site et de la ville n'est pas aisée à mettre en évidence sur les enregistrements sismologiques recueillis en milieu urbain : la superposition des ondes directes et indirectes fait que l'on isole difficilement les ondes dues à l'interaction site-ville dans le mouvement du sol, surtout quand il y a résonance entre le bâti et le sol car toutes les ondes, directes et indirectes, ont la même fréquence. Pour cette raison, il a fallu chercher des indices permettant d'identifier et de quantifier la contribution des bâtiments sur les mouvements du sol.

En 1997, notre équipe *Risque sismique* du Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique, LGIT, à Grenoble, a décidé de reproduire en partie l'expérience de P. Jennings. Avec nos collègues, nous avons analysé sur le site test européen de Volvi en Grèce (voir la figure 3) le champ rayonné par une structure dans le sol. Cette expérience a confirmé les observations faites par P. Jennings et nous a permis de comprendre et de reproduire le mouvement de la structure et celui qu'elle engendre dans le sol. Une modélisation numérique a ensuite autorisé la visualisation des mécanismes en

jeu. Nous avons ainsi découvert que l'énergie relâchée dans le sol par la structure est canalisée dans les couches de sol les plus superficielles, bien que la configuration de Volvi ne soit pas la plus favorable au phénomène puisque les fréquences propres du sol (0,7 hertz à Volvi) et de la structure (5 hertz) ne coïncident pas.

Afin de tester ces mécanismes à l'échelle d'une ville, une tentative de modélisation a été engagée : en 2000, l'équipe du LGIT en collaboration avec l'Institut de génie civil de l'Université autonome de Mexico envisagea de reproduire le mouvement du sol observé à Mexico sur la zone du Lac. Pour ce faire, nous avons sélectionné le quartier Roma Norte, un de ceux ayant subi le plus de dégâts en 1985, et sur lequel des enregistrements sismiques montrent les battements mentionnés. L'étude a d'abord recensé l'ensemble des bâtiments de plus de six étages, les a repérés géographiquement et a défini leurs dimensions et leurs caractéristiques dynamiques, la raideur et l'amortissement, lesquels dépendent de la masse et de sa répartition ; la raideur dépend aussi des matériaux utilisés et de leur disposition dans la construction. Chaque immeuble a alors été modélisé comme un oscillateur simple à un degré de liberté, caractérisé par une fréquence de résonance et un amortissement. Le comportement de chaque structure a été calculé en supposant qu'elle avait seulement subi la sollicitation sismique « naturelle » : on a estimé la contrainte qui se serait manifestée à la surface du sol, en l'absence de tout bâtiment.

D'après les enregistrements d'une station proche de Mexico, nous avons modélisé le signal à la surface du sol. Sous l'effet du signal sismique incident, chaque bâtiment



3. Site d'expérimentation de Volvi, en Grèce. Dans ce bâtiment, construit à l'échelle un tiers (les étages font un mètre de hauteur au lieu de trois en moyenne), les dimensions de toutes les structures sont réduites à un tiers de leur valeur, ainsi que les paramètres physiques des matériaux (leur résistance, par exemple). De nombreux capteurs et des instruments de mesure ont permis d'évaluer le comportement de cette structure lors d'un séisme déclenché.

se déforme et engendre des forces de réaction au contact entre le sol et la fondation. On considère alors ces forces comme des sources sismiques, puis on superpose ces ondes et celles que l'on enregistre au point d'observation.

Nous avons eu des difficultés à reproduire rigoureusement le mouvement du sol enregistré au centre du quartier étudié. En revanche, notre modèle a révélé que la contribution du bâti n'est pas négligeable puisque l'ensemble des édifices produit un mouvement sismique indirect du même ordre de grandeur que celui du mouvement direct (venant du sol). Le mouvement sismique indirect est animé de battements réguliers, visibles à des fréquences caractéristiques des édifices de ce secteur. Les battements résulteraient d'interférences des ondes sismiques de fréquences proches, précisément les ondes émises par les

immeubles de tailles similaires. La somme des deux ondes est une onde de fréquence quasi identique aux fréquences d'origine, mais dont l'amplitude varie lentement.

En jouant sur les paramètres dynamiques de nos structures, nous avons confirmé que le terme de couplage entre les fréquences de vibration du sol et celles du bâti est un des facteurs clés de l'interaction site-ville : les ondes réémises par chaque immeuble sont piégées dans la couche superficielle de sédiments comme les ondes venant du sol (et ce d'autant mieux que la fréquence des immeubles et celle du sol sont proches). Deux autres termes sont également essentiels : la densité urbaine, définie comme le rapport entre la surface construite et la surface du sol (l'effet site-ville est d'autant plus fort que la densité de construction est élevée). Le second terme est le contraste de masse des structures et du sol, c'est-à-dire le rapport entre la hauteur moyenne du bâti et l'épaisseur des formations superficielles. Dans le cas de Mexico, tous les paramètres « favorables » sont réunis : une urbanisation dense, une densité urbaine importante sur une couche de sol mince et peu dense et un fort couplage entre le sol et des structures de 10 à 20 étages.

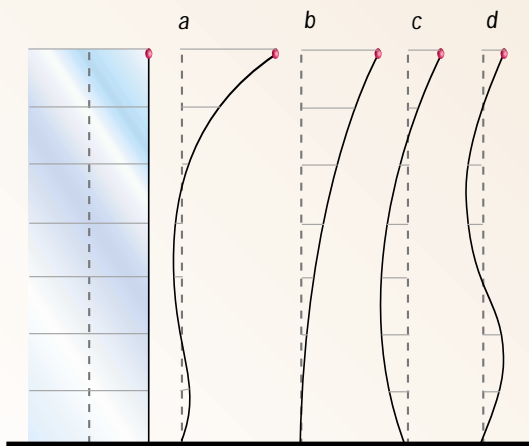
Ce n'est pas le cas de tous les centres urbains situés dans des régions sismiques. Le cas de Grenoble a attiré notre attention en raison d'un effet de site très important lié à une configuration en « cuvette », particulièrement propice au piégeage des ondes sismiques. L'urbanisation n'y est pas comparable à celle de Mexico, puisqu'elle n'est caractérisée que par des constructions moyennes de faible hauteur. De plus, le remplissage sédimentaire de Grenoble est de l'ordre de 600 mètres, soit dix fois celui de Mexico, et il est notablement plus rigide. Ainsi, dans la cuvette grenobloise, la contribution du bâti sur le mouvement du sol en cas de séisme ne représenterait que un pour cent du mouvement sismique direct. En revanche, quelques quartiers de Nice présentent toutes les caractéristiques favorables à une interaction site-ville. Une couche d'alluvions souples de faible épaisseur (quelques dizaines de mètres), sur laquelle les immeubles sont denses et ont des fréquences comparables à celles du sol, risquerait de produire des effets proches de ceux observés à Mexico : le mouvement indirect serait de l'ordre de 80 pour cent du mouvement direct. Nous étudions quelles seraient les conséquences de cet effet site-ville.

Dans l'étude des interactions site-ville, nous n'avons, jusqu'à présent, tenu compte que des interactions simples, c'est-à-dire des mouvements produits par une structure sur le sol. Nous nous sommes également demandé si l'onde émise par une structure ne peut pas mettre en vibration un autre bâtiment situé à proximité. L'interaction sismique de structures par l'intermédiaire du sol a été peu étudiée. En 1996, Sigurdur Erlingsson et Anders Bodare, de l'Institut technique royal de Stockholm, ont constaté que, lors d'un concert de rock qui eut lieu dans le stade Ullevi de Gothenburg, en Suède, le public placé sur la pelouse a commencé à sauter au rythme de la musique. Les spectateurs des tribunes ressentirent de violentes vibrations, qui s'amplifièrent au point d'endommager les installations et d'obliger une partie du public à quitter le stade. S. Erlingsson et A. Bodare en conclurent, après analyse, que les chocs périodiques assésés par le public sur le sol (à une fréquence de deux hertz environ) étaient situés dans une gamme de fréquences proche

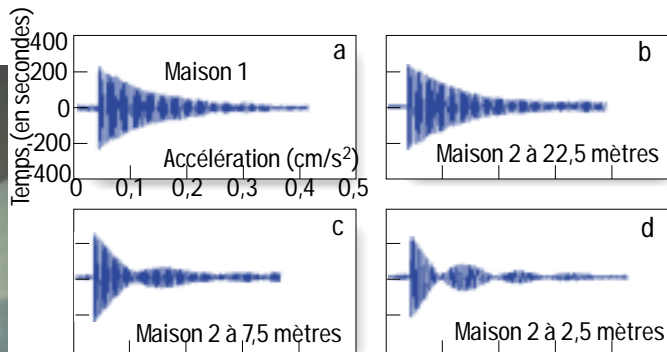
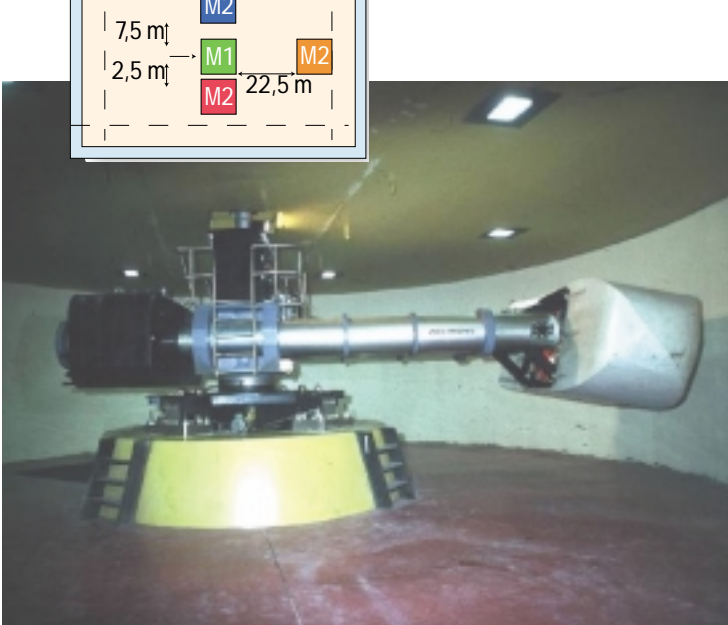
La déformation des bâtiments

Les mouvements sismiques agissent sur les structures parce que chaque point du bâtiment oscille de part et d'autre de sa position initiale. La méthode la plus souvent utilisée pour l'analyse sismique des structures consiste à décomposer la déformation globale en déformations de complexité géométrique croissante. Ainsi, on décompose une déformation (a) en un mode 1 simple (b), auquel on ajoute un mode 2 présentant un nœud – point d'amplitude de vibration nulle – (c), puis un mode 3 (deux nœuds, d) et ainsi de suite jusqu'à ce que la précision requise soit atteinte. On définit ainsi, à chaque instant, le décalage par rapport à la position d'origine de chaque point de la structure, et l'on calcule l'accélération maximale provoquée par le séisme et que la structure devra supporter.

Quand la période de vibration du bâtiment est égale à celle de la vibration du sol, les amplitudes d'oscillation augmentent fortement et la construction est menacée. La période de la structure et celle du sol déterminent la résistance de l'édifice au séisme : un sol mou engendre des déformations d'autant plus importantes que la structure est élevée, tandis qu'un sol dur menace davantage les structures rigides.



Pour étudier et modéliser les déformations d'une structure dues à un séisme, on décompose le mouvement de chaque point de la structure en une combinaison de modes différents : du mode 1, le plus élémentaire, au mode n , contenant n nœuds.



4. Les réactions d'une construction aux ondes émises par un autre édifice varient avec leur éloignement. Ces résultats ont été extrapolés à partir d'expériences faites en centrifugeuse avec des modèles réduits, où un bâti miniature est mis en vibration par un choc. On transpose ensuite les résultats à l'échelle réelle. À une distance de 22,5 mètres, la seconde maison est peu perturbée par la première (a). À 7,5 mètres, ses battements augmentent légèrement (b). Pour une distance de 2,5 mètres, les battements sont nets (c). Pour soumettre un bâtiment de dix centimètres de hauteur à des contraintes mécaniques qui ressemblent à celles d'un immeuble de plusieurs étages, il faut simuler une gravité 100 fois supérieure.

de celle du remplissage sédimentaire du sous-sol. Constitué de dépôts argileux, le remplissage atteignait par endroits une cinquantaine de mètres. Il favorisa la transmission de l'énergie « humaine » aux infrastructures environnantes et provoqua leur mise en vibration. Les exemples d'interaction de l'activité humaine et des structures de génie civil sont légions, les vibrations provoquées par le trafic routier ou ferroviaire, par exemple ; il est cependant rare qu'elles engendrent des dégâts. Plus récemment, une équipe japonaise menée par Yoshio Kitada a testé les réactions d'une structure mise en vibration par un excitateur, en fonction du voisinage urbain. Y. Kitada et ses collègues ont montré que lorsqu'une construction est proche d'un bâtiment similaire, sa fréquence de résonance se divise en deux fréquences proches centrées sur la fréquence initiale. Autrement dit, la présence de constructions au voisinage d'un bâtiment modifie ses réactions aux sollicitations sismiques.

Séisme en centrifugeuse

En 2000, dans le cadre de l'Action concertée incitative catastrophes naturelles (ACI-CATNAT), du ministère de l'Éducation nationale, a débuté un projet de recherche regroupant plusieurs équipes françaises et visant à mettre en évidence et à quantifier les effets d'interaction multiple structure-sol-structure et d'interaction site-ville. Au sein du Laboratoire central des Ponts et Chaussées, LCPC, nous étudions ce phénomène sur des modèles réduits centrifugés. La modélisation simple à échelle réduite simule des phénomènes physiques et en étudie les paramètres essentiels, mais la médaille a un revers : les propriétés mécaniques du sol sont modifiées et les contraintes ne sont pas reproduites. Pour reconstituer ces contraintes, on augmente virtuellement la force de gravitation en réalisant les expériences en centrifugeuse (voir la figure 4). Ainsi un modèle réduit au 1/100^e est testé sous 100 fois la gravité terrestre : une structure de 45 mètres de hauteur en milieu naturel est modélisée par une structure de 45 centimètres sous 100 fois la gravitation terrestre. Un conteneur rempli de sable fait office de sol. À sa surface sont posées des structures dont la masse et la fré-

quence de résonance sont ajustées pour reproduire celles d'un immeuble de sept étages. On inflige, par l'intermédiaire d'un « canon à billes », un choc au sommet de l'une de ces structures. Des capteurs placés en différents points de la structure active (celle qui reçoit le choc) et de la structure passive (celle qui répond aux vibrations transmises par le sol) enregistrent l'accélération instantanée. Cette expérience montre comment la distance entre structures, la proximité des fréquences de résonance de deux structures proches et la direction d'oscillation des structures interviennent dans l'interaction structure-sol-structure. Dans certaines des configurations urbaines étudiées, le sol et la structure passive présentent des battements réguliers similaires. Cette particularité apparaît notamment pour la configuration où la densité est la plus élevée, c'est-à-dire où les deux structures testées sont les plus proches. Il est intéressant de faire le rapprochement avec l'urbanisation dense de Mexico.

Ainsi, l'homme a un rôle dans le risque sismique et nul doute que le bâti contribue au mouvement du sol enregistré dans les centres urbains lorsque se produit un tremblement de terre. Il peut même être considéré comme un des facteurs essentiels à prendre en compte. Dès lors, on s'interroge : les immeubles pourraient-ils être agencés de façon à réduire l'amplitude des mouvements sismiques ? Les ondes qu'ils émettent dans le sol pourraient avoir des caractéristiques vibratoires en opposition de phase avec les ondes se propageant dans le sol, les annihilant partiellement. Cette hypothèse séduisante mérite d'être étudiée.

P. GUÉGUEN, P.-Y. BARD, J.-L. CHAZELAS et J.-F. SEMBLAT travaillent au Laboratoire central des Ponts-et Chaussées. P. Gueguen et P.-Y. Bard, au Centre LGIT de Grenoble, J.-L. Chazelas, au Centre de Nantes et J.-F. Semblat, au Centre de Paris.

P. GUÉGUEN, P.-Y. BARD et F. J. CHAVEZ-GARCIA, *Site-City Interaction in Mexico City-Like environments : An Analytical Study*, in *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 92, n° 2, pp. 794-811, 2002.

A. WIRGIN et P.-Y. BARD, *Effects of buildings on the duration and amplitude of ground motion in Mexico City*, in *Bull. seism. Soc. Am.*, vol. 86, pp. 914-920, 1996.