

Présentation synthétique du projet :

Approche de la vulnérabilité sismique par l'étude du comportement de bâtiments réels

Claude Boutin - Stéphane Hans - Erdin Ibraïm

Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat

Laboratoire Géomatériaux, Département Génie Civil et Bâtiment - URA CNRS1652

Rue Maurice Audin - 69518 Vaulx-en-Velin Cedex

claud.boutin@entpe.fr

Un programme expérimental sur bâtiments désaffectés avant et en cours de démolition a été mené pour renforcer le diagnostic de vulnérabilité sismique du bâti existant. Trois méthodes vibratoires sont utilisées : des enregistrements de bruit de fond mécanique, des mesures sous excitation harmonique et enfin des mesures sous chocs. Les mesures conduisent non seulement à des estimations très cohérentes des paramètres modaux, mais également à une caractérisation réaliste du comportement dynamique que l'on peut traduire par des modèles simples de type 'poutre en cisaillement', 'poutre en flexion', ou 'corps rigide sur sol souple'. Des données sur l'interaction structure-sol et le rôle d'éléments non structurels ont été obtenues. Cette étude plaide en faveur de l'intérêt de méthodes expérimentales pour conforter les diagnostics de vulnérabilité.

Introduction

En Génie Parasismique, de nombreux développements trouvent leur application dans la mise en œuvre de nouvelles techniques pour les ouvrages futurs. Cependant, les bâtiments et ouvrages qui n'ont pas bénéficié de ces avancées sont très nombreux. Se pose donc, de manière de plus en plus insistante, la question de l'auscultation de ces structures : comment établir un diagnostic fiable qui permette de justifier soit un maintien en l'état, soit une intervention pour une remise à niveau par renforcement ?

Le patrimoine urbain est directement concerné, mais l'enjeu est aussi considérable pour les bâtiments industriels. Or actuellement peu d'outils, aussi bien théoriques qu'expérimentaux, permettent d'estimer la vulnérabilité sismique de structures existantes. Cette tâche est délicate car le parc est vaste, diversifié et les informations qui le concernent sont partielles voire inexistantes. Il est donc utopique d'envisager de transposer au bâti construit les méthodes élaborées pour les constructions neuves. Il s'agit au contraire de développer des procédures plus élémentaires, mieux adaptées à la problématique du diagnostic. La démarche est d'extraire des observations expérimentales les mécanismes qui pilotent le fonctionnement des structures réelles.

Problématique

Les méthodes actuelles d'estimation de la vulnérabilité utilisent les connaissances acquises lors des précédents séismes en s'appuyant sur les échelles d'intensité sismique et sur l'observation directe des bâtiments. Ces approches pragmatiques sont utiles mais limitées. La difficulté majeure vient de ce que l'on ne dispose pas d'un étalonnage de l'intensité par des paramètres pertinents (accélération maximale, contenu spectral, durée du séisme, ...) pour estimer l'endommagement du bâti.

Une manière de remédier à ces inconvénients consiste à prendre en compte la structure des bâtiments. L'esprit de ces méthodes est d'établir des modèles simples mais réalistes, puis d'intégrer à ces modèles des seuils d'endommagement et de ruine des éléments structurels. Une courbe 'théorique' de vulnérabilité peut alors être établie sous la forme d'une relation entre niveau d'endommagement et niveau de sollicitation dynamique.

Cette démarche plus physique semble plus satisfaisante que les procédures basées sur l'intensité. Elle n'a cependant de valeur que si les modèles simples utilisés traduisent effectivement la réalité des déformations dynamiques de la structure.

Certains procédés de construction fréquemment mis en œuvre en France (préfabriqués, murs-voiles peu armés...) remettent en cause les hypothèses courantes (participation ou non des éléments non structurels, connexions entre éléments, rôle de l'interaction sol-structure...) et peuvent affecter considérablement le modèle simplifié de structure. Pour identifier les facteurs de vulnérabilité et renforcer l'objectivité des diagnostics, il est donc important de disposer de valeurs expérimentales caractérisant le comportement vibratoire réel.

Lignes directrices de l'étude

C'est dans cette direction que nous avons orienté notre étude en procédant à des essais sur des immeubles existants. Plusieurs raisons expliquent le choix de cette option originale. En premier lieu, les essais sur structures réelles ont l'avantage d'intégrer un ensemble de paramètres difficilement reproductibles en laboratoire (rôle du sol, dispositions constructives, ...) mais qui ont une réelle influence sur le comportement vibratoire. Un autre intérêt des essais en grandeur et en temps réels est d'éviter les questions de similitude qui constituent toujours un point délicat dans l'interprétation des essais de laboratoire. Dernier point marquant, ces expériences ne sont pas limitées à l'identification du comportement d'éléments structurels mais font travailler l'ensemble de la structure sur son sol d'appui et apporte une vision globale de ce système mécanique.

En contre partie, la structure testée n'est que partiellement connue, la sollicitation est faible et par conséquent le bâtiment ne peut pas être conduit à la rupture.

Notre recherche s'est structurée autour de trois lignes de force qui sont :

- d'une part, utiliser les atouts des méthodes vibratoires d'auscultation in situ pour identifier le comportement réel des structures ;
- d'autre part, travailler sur des bâtiments désaffectés (7 au total, des années 60-70), *avant* et *en cours* de démolition, disposant ainsi de constructions "type" afin de mener des larges campagnes expérimentales ;
- et enfin, développer – à partir de considérations sur la structure existante – des modélisations simples mais réalistes et efficaces pour interpréter les observations expérimentales et dégager des informations claires sur son comportement.

Résultats marquants

Les résultats obtenus portent sur le potentiel des trois méthodes d'auscultation in situ, le développement de modèles élémentaires comme cadre d'une première classification du fonctionnement des structures, de l'apport expérimental comme aide aux méthodes d'estimation de la vulnérabilité.

Les méthodes d'auscultation

Cette étude permet d'identifier les avantages et inconvénients de chaque méthode vibratoire sous les angles expérimental et pratique, et de montrer la cohérence des mesures. Rappelons - pour souligner l'intérêt de ces techniques - que nous avons utilisé seulement quatre accéléromètres et des analyses élémentaires de signaux.

Il est très facile par le *bruit de fond* d'obtenir les premières fréquences modales. Compte tenu de l'intérêt de cette information, pourquoi ne pas envisager d'intégrer cette mesure (deux minutes !) dans les procédures d'estimation de la vulnérabilité ?

Dans l'éventualité d'une modification d'immeuble existant ou du renforcement d'un bâtiment vulnérable, de telles mesures effectuées avant l'intervention permettraient de limiter les incertitudes sur le fonctionnement réel de la structure, d'aider dans les choix d'ingénierie, et après intervention d'apprécier l'impact des travaux.

Pour des immeubles qui présentent un enjeu fort pour la sécurité civile, si cette information était acquise avant tout dommage, elle pourrait être comparée à la même mesure après séisme. Ceci faciliterait le travail des experts quant à la réutilisation de l'immeuble et son éventuel renforcement. Pour des structures très critiques on pourrait même préconiser des mesures sous chocs qui permettent une meilleure analyse de l'amortissement (sans aucun doute très sensible à l'endommagement).

Il est clair que ces suggestions supposent un important travail d'acquisition et d'organisation pour l'accessibilité des données.

La méthode de *choc* est généralisable elle aussi. Elle fait appel à une logistique plus lourde (mais courante) et se justifie lorsque les enjeux sont suffisamment importants pour nécessiter des relevés plus précis que ceux donnés par bruit de fond.

On retiendra en particulier que l'obtention de fonctions de transfert empiriques assez précises, fait disparaître tout un pan d'incertitude lié aux modélisations a priori, et permet d'effectuer des simulations ou des recalculs de structure avec un excellent calage vis-à-vis du comportement réel. Ceci ouvre la perspective d'effectuer des calculs réalistes sur des structures existantes mal connues, en couplant la modélisation et les données expérimentales.

Enfin la méthode par *excitateur harmonique* reste du domaine des applications particulières ou des programmes de recherche, où elle s'avère extrêmement efficace. Par contre, sa systématisation est actuellement difficile car elle nécessite un matériel assez rare et coûteux dont l'installation est relativement lourde.

Il subsiste bien sûr de nombreux points qui feront l'objet d'expériences futures. Les investigations porteront sur l'interaction sol-structure, le couplage éventuel entre bâtiments proches, l'analyse des modes de torsion. Des essais par soustraction devraient aussi permettre de déterminer expérimentalement la rigidité effective de murs de maçonnerie en parpaings.

Les modèles élémentaires

On valide expérimentalement le modèle de poutre de cisaillement lorsque, la structure fonctionne comme une superposition de portiques (murs en flexion hors plan). Dans ce cas la répartition des fréquences modales s'accorde assez précisément sur la série 1, 3, 5, 7, ... Or on peut admettre que l'essentiel de l'énergie sismique se situe dans des fréquences inférieures à 10Hz. Ainsi, pour des structures souples, $f_1 < 2\text{Hz}$, ce sont principalement les trois premiers modes qui sont concernés, pour des structures plus rigides, $f_1 > 2\text{Hz}$, les deux premiers modes suffisent et l'on peut se restreindre au premier mode si $f_1 > 3,5\text{Hz}$. Ce dernier cas est courant pour des immeubles de faible à moyenne hauteur.

Lorsque la structure fait essentiellement travailler les murs dans leur plan, avec l'hypothèse d'encastrement parfait dans le sol, on est conduit à un modèle de poutre en flexion. La répartition des fréquences modales s'accorde alors approximativement sur la série des carrés impairs (exceptée la première valeur) $1, 4^2= 9, 5^2= 25, \dots$ Les fréquences sont donc beaucoup plus étalées que dans le cas précédent et dans de très nombreux cas, il suffira de prendre un seul mode en considération.

Les mesures effectuées montrent que le modèle de poutre encastrée n'est pas adapté à toute structure voile. Compte tenu de la forte rigidité des murs à l'effort tranchant, les bâtiments peu élancés présentent un fonctionnement en bloc rigide se balançant sur un sol 'souple'. Avec des valeurs tout à fait raisonnables pour les paramètres du sol, on retrouve ainsi les observations expérimentales.

Ce résultat montre que l'interaction sol-structure est importante pour des immeubles du type de ceux expérimentés. Cependant cette conclusion ne doit pas être généralisée. En effet une structure élevée favorise le balancement, mais en contrepartie, est plus souple. Il y a donc concomitance des deux effets et selon la rigidité du sol et l'élancement de la structure, l'un ou l'autre domine.

On retiendra finalement que, même s'ils sont élémentaires, ces modèles apportent un guide précieux pour une interprétation réaliste du fonctionnement sous vibration. En particulier l'observation de la série des premières fréquences propres est un outil extrêmement efficace pour discriminer des différentes hypothèses.

Dans le futur, l'exploitation des mesures fera l'objet d'analyses plus fines. On espère en particulier clarifier l'origine de l'amortissement : structurel, par dissipation inélastique du sol ou par radiation dans le sol ?

Vulnérabilité

L'approche mixte [expérimentation - modèle élémentaire] est une bonne piste pour améliorer les estimations de la vulnérabilité. Certains constats sont déjà établis :

- les mesures effectuées après suppression de certains éléments de la construction, permettent d'identifier le véritable rôle structurel d'éléments difficilement calculables et dont les liaisons avec le reste de la structure sont mal connues,
- on montre la contribution significative de panneaux préfabriqués à la rigidité de chaque étage. Ces éléments très peu armés interviennent donc dans le comportement vibratoire de la structure bien que ce ne soit pas leur vocation. Cette possibilité de rupture fragile d'éléments parasites accroît la vulnérabilité de la structure,
- il apparaît nettement que l'interaction sol-structure peut jouer un rôle déterminant ce qui

modifie fortement l'analyse de vulnérabilité.

Alors que les principes de conception parasismique s'appuient sur le potentiel de ductilité des structures, l'information obtenue à faible niveau de déformation peut tout de même être exploitée pour formuler des avis qualitatifs sur la vulnérabilité.

Pour accéder à des informations plus quantitatives la démarche doit être poursuivie. Les développements futurs porteront sur l'exploitation conjointe des observations expérimentales et du modèle en adéquation afin d'établir des seuils d'accélération. *Le seuil d'intégrité* correspondant à l'apparition de fissurations pourra être utilisé pour effectuer un premier crible parmi des structures existantes. Il permettra aussi de vérifier si l'état limite de service est atteint dans le domaine élastique. Un deuxième seuil, de ruine, sera établi à partir d'un calcul de résistance ultime.

Un autre intérêt de ce programme, est l'observation de la démolition. La destruction permet d'observer la qualité du béton, des connexions, le taux de ferrailage des voiles, les faiblesses systématiques aux reprises de bétonnage, l'ancrage des éléments préfabriqués,... Ces informations, qui reflètent les dispositions constructives de l'époque de réalisation, sont très utiles pour identifier des points faibles et contribuent à la compréhension de la vulnérabilité des bâtiments.

Pour conclure, rappelons que la vulnérabilité sismique ne se limite pas au bâti récent. Il sera nécessaire dans le futur d'adapter les méthodes expérimentales au bâti ancien, pour lequel la communauté scientifique est très démunie. De plus le genre d'investigations que nous avons mené, est transposable aux ponts, viaducs,... ainsi qu'aux grands équipements industriels dont la vulnérabilité est un souci majeur en zone sismique.