

Propriétés dynamiques des bâtiments beyrouthins: résultats instrumentaux des vibrations ambiantes

Christelle Salameh, Bertrand Guillier, Jacques Harb, Cécile Cornou,
Pierre-Yves Bard, Armand Mariscal, Christophe Voisin

► To cite this version:

Christelle Salameh, Bertrand Guillier, Jacques Harb, Cécile Cornou, Pierre-Yves Bard, et al.. Propriétés dynamiques des bâtiments beyrouthins: résultats instrumentaux des vibrations ambiantes. 9ème Colloque National AFPS2015, AFPS / IFSTTAR, Nov 2015, Marne-la-Vallée, France. insu-01742607

HAL Id: insu-01742607

<https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-01742607>

Submitted on 25 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Propriétés dynamiques des bâtiments beyrouthins: résultats instrumentaux des vibrations ambiantes.

Christelle Salameh^{1,2}, Bertrand Guillier¹, Jacques Harb², Cécile Cornou¹,
Pierre-Yves Bard¹, Armand Mariscal¹, Christophe Voisin¹

1. ISTERre, Université J. Fourier; Grenoble, France
1381 Rue de la piscine, 38400 Saint Martin d'Hères

2. Notre Dame University-Louaizé, Faculté de Génie
Zouk Mosbeh, El Metn, Liban

RÉSUMÉ. Les paramètres dynamiques des bâtiments à Beyrouth (Liban) ont été mesurés en se basant sur la méthode des vibrations ambiantes pour l'évaluation du risque et de la vulnérabilité sismique. Le pays est menacé par un aléa sismique élevé en raison de son emplacement près de failles majeures, combiné à un risque sismique important dû au chaos urbain, économique et politique, en plus de l'absence de l'application d'un code parasismique (introduit récemment en 2005). Ainsi des travaux scientifiques plus poussés sont requis pour réduire ce risque. Pour cette étude, 330 bâtiments en béton armé ont été mesurés, les paramètres dynamiques extraits et une analyse statistique réalisée pour établir des corrélations avec les paramètres géométriques. Les régressions montrent que seule la hauteur du bâtiment ou le nombre d'étages N est statistiquement pertinente pour l'estimation de la période fondamentale T , avec une corrélation linéaire: $T = N/25$ pour les sites rocheux et $N/18$ pour les sites mous. La différence significative conduit à la conclusion que la période fondamentale de la structure dépend du type de sol. Les fréquences mesurées sont également comparées à celles calculées dans le code parasismique. Ce dernier surestime considérablement les périodes enregistrées de 80%, tandis que l'amortissement mesuré montre une corrélation bien nette avec la fréquence; au plus grand bâtiment correspond le plus faible amortissement. Cependant, les résultats obtenus sont cohérents avec ceux obtenus dans d'autres régions. Une partie de l'écart important avec le code du bâtiment peut être dû au très faible niveau d'excitation. Mais cette différence est si large qu'elle n'est pas consistante avec les variations de fréquences observées pour de fortes excitations.

ABSTRACT. Dynamic parameters of buildings in Beirut (Lebanon) were investigated based on ambient vibration method for the risk and vulnerability assessment. Indeed the country is threatened by a high seismic hazard due to its location near major faults, combined to a high seismic risk caused by urban, economic and political chaos in addition to the lack of implementing a seismic design code (introduced recently in 2005). Researchers do not miss any opportunity to trigger the alarm and increase studies in the seismic field to reduce this risk. For this study, 330 RC buildings were measured, dynamic parameters extracted and a statistical analysis performed to identify correlations with geometrical characteristics. The regressions show that only the building height or number of floors N is statistically relevant for the estimation of the fundamental period T and the correlation between them is linear: $T = N/25$ for rock sites and $N/18$ for soft sites. The significant difference leads to the conclusion that the natural period of a structure depends on the type of soil. Moreover measured frequencies are compared to those estimated in seismic building codes. The latter significantly overestimates the recorded periods by 80%, while the measured damping exhibits a striking correlation with the frequency; the taller the building the lower is the damping. However results obtained in other areas based on ambient vibration are coherent. Part of the large discrepancy with building code recommendations may be due to the very low level of excitation. However it is a significant variation to be consistent with the observed frequency shifts for severely damaged structures.

MOTS-CLÉS: Vibration ambiante, Propriétés dynamiques, Code parasismique, Bâtiments beyrouthins, Période, Risque, Aléa.

KEYWORDS: Ambient vibration, Dynamic parameters, Seismic code, Beirut buildings, Period, Risk, Hazard.

1. Introduction

Les réglementations parasismiques ont pour but ultime de limiter les pertes humaines et de réduire les dommages matériels dus à des tremblements de terre. En général, dans la plupart des codes parasismiques, l'évaluation des actions sismiques s'obtient à partir des paramètres dynamiques (la période fondamentale de la structure, l'amortissement et les déformées modales). "La fréquence et l'amortissement d'une structure contrôlent l'amplitude et la durée de sa réponse à un tremblement de terre", comme l'a souligné Housner et Brady (1963). La période fondamentale est le paramètre clé lié à la structure interne des bâtiments (Michel 2007). Les déformées modales indiquent la distribution des déformations dans la structure pendant le tremblement de terre. "Deux structures ayant la même répartition de masse et même période fondamentale développent des forces de cisaillement sensiblement différentes si les structures internes sont différentes", (Housner et Brady, 1963). Il est difficile de calculer exactement la fréquence fondamentale d'une structure existante: le manque de plans structuraux empêche souvent d'estimer la rigidité réelle des bâtiments anciens. Ainsi, il est important de développer des formules empiriques fiables pour estimer cette fréquence pour l'évaluation de leur vulnérabilité. Cependant, le type et les moyens de construction varient considérablement d'une région à une autre, et l'utilisation des relations empiriques spécifiques à une certaine région du monde n'est pas très exacte, surtout comme qu'elles sont établies sur de petits échantillonnages non représentatifs. Les tests in-situ sont donc très utiles pour estimer les propriétés dynamiques d'un bâtiment. L'application de cette méthode sur un nombre représentatif de structures peut conduire à une relation empirique entre les paramètres structurels (tels que le nombre d'étages, les dimensions, l'âge, le matériel et le type de construction, etc.) et les propriétés dynamiques (fréquence, amortissement, déformées modales). Ces tests étaient surtout basés sur des excitations forcées de la structure soit à partir d'une source naturelle (séismes) ou provenant de sources artificielles (explosion, impact d'une masse, oscillateur rotatif). Blume a imaginé en 1935 une machine tournante dont la fonction était de générer des vibrations forcées: celles-ci facilitent l'enregistrement dans les structures, et contrôlent le signal de sortie afin de simuler un mouvement fort, même si la sollicitation se fait à un niveau élevé et non pas au bas du bâtiment. Cependant leur coût élevé, leur difficulté de mise en place et le développement de capteurs sismiques ont favorisé l'utilisation de vibrations ambiantes en raison d'activités naturelles (vent, mer, etc) et/ou anthropiques permanentes (trafic, machines, etc.); cette méthode étant rapide, peu coûteuse et fiable. Trifunac (1972) confirme que les résultats sous vibrations ambiantes sont aussi pertinents et les mesures sont beaucoup plus rapides à réaliser que sous vibration forcée. Des études comparatives entre les vibrations ambiantes et forcées montrent que les fréquences de résonance sous haute excitation sont légèrement plus faibles (10 à 30% tant que le bâtiment n'est pas totalement endommagé). (McVerry et Beck, 1983; Bard *et al.*, 1992; Ulm *et al.*, 1993; Celebi, 1996; Satake, 1996; Meli *et al.*, 1998; Irie et Nakamura, 2000; Mucciarelli *et al.*, 2004; Dunand *et al.*, 2005). La fréquence est donnée par l'équation (1):

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad [1]$$

La diminution de la fréquence suite à un mouvement fort peut être expliquée par une diminution de la rigidité, la masse restant constante. Selon Dunand (2005), les fissures préexistantes dans le béton s'élargissent quand la sollicitation augmente, en particulier au niveau des noeuds d'assemblage, ainsi que sur l'interface sol-structure. Étant donné que les fissures affectent l'inertie de la section fissurée, qui est inférieure à l'inertie de la section non fissurée, la rigidité diminue, conduisant à une réduction de la fréquence fondamentale. Malgré ces inconvénients, la cohérence entre les deux méthodes ainsi que la simplicité de la méthode de vibrations ambiantes favorisent son développement en tant qu'outil pratique et fiable pour déterminer les paramètres dynamiques nécessaires à la modélisation du comportement de la structure sous séisme. Cette technique a été appliquée dans de nombreuses régions dans le monde, et elle est introduite pour la première fois dans la ville de Beyrouth. Le Liban a été

gravement affecté par des tremblements de terre au cours des siècles. Le plus récent a eu lieu le 16 Mars 1956, dans le sud du Liban, et a causé beaucoup de dégâts et un grand nombre de victimes. Beyrouth a fait face à la destruction et reconstruction à plusieurs reprises, et a souffert d'une longue guerre civile durant la période 1975-1990, ce qui a considérablement affaibli un certain nombre de bâtiments existants, et altéré la qualité des ceux construits durant cette période. Ce travail met en évidence l'application de vibrations ambiantes sur les structures beyrouthines. L'objectif principal de cette étude est de tirer des relations empiriques spécifiques à la région entre les paramètres dynamiques et les attributs de construction (taille, âge, matériel, type structural, ...), et de les comparer à celles recommandées dans le code parasismique libanais récemment introduit en 2005. Un second objectif est d'examiner a) si la guerre a affaibli les structures et donc affecté leurs propriétés dynamiques, et b) si les évolutions récentes des codes du bâtiment peuvent être détectées au niveau des paramètres dynamiques mesurés.

2. Estimation de la fréquence fondamentale des bâtiments

2.1. Équations dans les codes parasismiques

L'équation la plus utilisée reliant la période fondamentale au nombre d'étages d'un immeuble est donnée par l'Eq. [2]:

$$T = \frac{N}{10} \quad [2]$$

Cette formule est recommandée par le code américain et appliquée sur les structures métalliques et en béton armé, mais ne peut être appliquée sur les bâtiments avec des refends (Housner et Brady, 1963). Le code propose pour ces derniers la relation basée sur un modèle de console en porte-à-faux (Crowley et Pinho 2010) comme dans l'Eq. [3]:

$$T = C \frac{H}{\sqrt{L}} \quad [3]$$

avec H: hauteur du bâtiment, L: longueur dans la direction du mouvement, et C constante estimée par Carder (1937) en utilisant la méthode de vibration ambiante suite au tremblement de terre de Long Beach en 1933 et complété par les données japonaises de Housner et Brady (1963). Cette relation est également adoptée par le code algérien (RPA88, 1988), le code Coréen (Lee *et al.*, 2000) et partiellement le code français (PS92, 1995). Une autre relation empirique appliquée sur les systèmes poteaux-poutres est proposé dans ATC3-06 (ATC 1978) comme rapportée par Crowley et Pinho (2010) (Eq. [4]):

$$T = C_t H^\beta \quad [4]$$

Elle est utilisée dans l'Eurocode 8 (CEN 2004) et le SIA, Code suisse (2003). UBC (1997), EC8 et SIA utilisent $\beta = 0,75$ pour tout type de structure, bien que basée sur une étude concernant les structures poutre-poteaux (Crowley et Pinho 2010). Dans EC8 cette formule est appliquée uniquement aux bâtiments dont la hauteur est inférieure à 40 m. Le coefficient C_t a été déterminé par Crowley et Pinho (2010), en se basant sur les enregistrements de tremblement de terre de San Fernando; alors que le coefficient β dépend du type de structure. Par exemple, dans EC8, $C_t = 0,05$ pour les murs en béton armé, dans UBC97 $C_t = 0,085$ pour les structures métalliques, $0,073$ pour les systèmes poteaux-poutres, et $0,049$ pour les murs en béton armé. L'ancien Code français (PS92, parfois utilisé au

Liban) estime la période fondamentale à travers les équations Eq. [5] et [6] qui diffèrent d'un type de construction à l'autre.:

$$T = 0.09 \frac{H}{\sqrt{L}}, \text{ pour les structures métalliques et systèmes poteaux-poutres en béton armé} \quad [5]$$

$$T = 0.09 \frac{H}{\sqrt{L}} \sqrt{\frac{H}{H+L}}, \text{ pour les refends} \quad [6]$$

Le code parasismique libanais, qui a été introduit tout récemment au Liban en 2005, indique les règlements appliqués pour une conception de la structure contre un séisme. En raison de l'absence de méthodes expérimentales ou théoriques, la période fondamentale de la structure T est calculé en utilisant la même equation Eq. [7] que celle de UBC97 et EC8:

$$T = \alpha H^{\frac{3}{4}} \quad [7]$$

où $\alpha = 0.085$ pour les cadres métalliques, 0,07 pour les cadres en béton armé, 0,05 pour les autres bâtiments, H est la hauteur totale de la structure (en mètres). Il est à noter que toutes ces formules empiriques ont été établies en se basant sur un nombre limité de mesures effectuées sur des bâtiments à l'aide de la méthode de vibrations forcées. Aujourd'hui, avec le développement de la technique de vibration ambiante permettant un grand nombre de mesures rapides et peu coûteuses, il est possible de vérifier ces expressions et même en créer de nouvelles qui représentent plus la réalité.

3. Estimation expérimentale: méthode de la vibration ambiante

Des relations empiriques linéaires entre les paramètres dynamiques (période, amortissement) et les caractéristiques géométriques sont obtenues dans différentes régions du monde et sont compilées dans le tableau 1.

Le concept de la méthode de vibration ambiante a été introduit dans les années 30 par l'US Coast and Geodetic Survey (Carder 1937) et est devenu de plus en plus utilisée. Un certain nombre de mesures ont été effectuées en France depuis la moitié des années 90. Farsi (1996) a établi un rapport entre la période naturelle et la hauteur du bâtiment, basé sur des mesures de 26 bâtiments à Grenoble (Eq. [8]):

$$T = \frac{H^{1.1}}{100} \quad [8]$$

Michel *et al.* (2010) utilise plus d'enregistrements se basant sur 60 bâtiments à Grenoble, les 26 mesurés par Farsi et Bard (2004), ainsi que 28 bâtiments mesurés à Nice par Dunand (2005), arrivant à la relation empirique (Eq. [9]) entre période et nombre d'étages N (et éventuellement la hauteur H, étant donné que la hauteur d'un étage est égale à 3 m):

$$T = 0.013H = \frac{H}{75} = 0.039N = \frac{N}{25} \quad [9]$$

Dunand (2003) développe une relation similaire basé sur 54 enregistrements in-situ obtenus à Nice. 344 bâtiments RC ont été mesurés par Guillier *et al.* (2014) à Lima (Pérou), et des études statistiques conduisent à trois relations linéaires avant et après 1974 compte tenu de 2 catégories de bâtiments: 0-4 étages, ≥ 5 étages. Le fort tremblement de terre de 1974 a marqué l'histoire du Pérou générant ainsi la création du premier code parasismique péruvien. Oliveira (2004) a mené des études similaires en enregistrant des vibrations ambiantes sur 235 bâtiments au Portugal et en dérive la relation empirique suivante (Eq. [10]):

$$T = 0.045N \quad [10]$$

Table 1: Tableau résumant quelques relations existantes dans différentes régions du monde basées sur la méthode de vibrations ambiantes.

Auteurs	Région	No. de bâtis	T (N)	T (H)	$\xi(T)$
Kobayashi <i>et al.</i> (1987)	Mexico City (Mexico)	20 RC	$T = 0.105 N$		$\xi T = 4.0\%$
Midorikawa(1990)	Santiago de Chile (Chile)	107 RC	$T = 0.049 N$		$\xi T = 0.8\%$
Midorikawa(1990)	Villa del Mar (Chile)	21 RC	$T = 0.049 N$		$\xi T = 1.2\%$
Lagomarsino(1993)		182 RC + SF			$\xi T = 0.0073 + 0.007T^{-1}$
Kobayashi <i>et al.</i> (1996)	Granada (Spain)	21 RC	$T = 0.051 N$		$\xi T = 2.0\%$
Enomoto <i>et al.</i> (1999)	Almeria (Spain)	34 RC	$T = 0.05 N$		$\xi T = 0.8\%$
Espinoza (1999)	Barcelona (Spain)	25 RC	$T = 0.089 N + 0.032$		
Enomoto <i>et al.</i> (2000)	Caracas (Venezuela)	57 RC	$T = 0.06 N$		
Sánchez <i>et al.</i> (2002)	Adra (Spain)	39 RC	$T = 0.049 N$		
Navarro <i>et al.</i> (2002)	Granada (Spain)	89 RC	$T = 0.049 N$		$\xi T = 2.1\%$
Messele et Tadese (2002)	Addis Ababa (Ethiopia)	28 RC	$T = 0.057 N$	$T = 0.018 H$	
Satake <i>et al.</i> (2003)	(Japan)	205 RC + SF		$T = 0.015 H$	$\xi T = 1.4\%$
Dunand <i>et al.</i> (2002)	Grenoble (France)	26 RC		$T = 0.015 H$	$\xi T = 0.7T^{-0.25}$
Oliveira (2004)	Lisbon (Portugal)	193 RC	$T = 0.042 N$		
Navarro et Oliveira (2004)	Lisbon (Portugal)	37 RC	$T = 0.045 N$		$\xi T = 1.1\%$
Navarro <i>et al.</i> (2007)	Adra(Spain)	38 RC	$T = 0.049N \pm 0.001$		
Herak <i>et al.</i> (2009)	Zagreb(Croatia)	100 RC		$T = 0.013 H$	
Gallipoli <i>et al.</i> (2009)	Potenza, Senigallia (Italy)	65 RC		$T = 0.016 H$	
Gallipoli <i>et al.</i> (2010)	Slovenia	47 RC		$T = 0.016 H$	
	Croatia	62 RC			
	Republic of Macedonia	70 RC			
Ditommaso <i>et al.</i> (2013)	L'Aquila (Italy)	68 RC		$T = 0.026 H$	

4. Beyrouth: risque sismique, géologie et histoire de son développement urbain

4.1. Aléa sismique

Le Liban, et surtout sa capitale Beyrouth, est confrontée à plusieurs risques naturels majeurs, dont le plus important est le risque sismique. En raison de sa position géographique entre les plaques arabe, africaine et

eurasienne, le pays est traversé par cinq failles majeures: Roum, Yammouneh, Serghaya, Rachaiya et Hasbaya (Khair, 2001). Anciennement, ces failles ont généré des séismes de magnitude supérieure à 7, conduisant à une destruction totale de Beyrouth et Tripoli. En 551, 1202, 1759 et 1837, les tremblements de terre violents ont dévasté le Moyen-Orient; le plus dévastateur en 551 AD a été accompagné par un tsunami qui a touché toute la côte méditerranéenne allant de Tripoli (nord du Liban) jusqu'à Tyr (sud du Liban) et a anéanti la ville, tuant des milliers de personnes, et détruisant l'activité économique dans la région.

4.2. Géologie de Beyrouth

La géologie libanaise est très complexe, présentant une très grande variabilité spatiale de sol dans une très petite zone. La géologie de Beyrouth et sa banlieue (Dubertret 1944) montre que le sous-sol peut être classé en deux catégories principales: les zones sablonneuses, calcaires ou calcaires marneux. Le premier peut être subdivisé en 6 catégories: Dune Ramleh, dunes de sable, de sable rouge, sable alluvionnaire, sables jaunâtres et remblais sur le littoral. Les couches de calcaires ou de calcaires marneux appartiennent à la période du Crétacée. La colline d'Achrafieh et la partie orientale de Beyrouth, sur le côté ouest de Nahr Beyrouth sont constituées de marnes. Les collines au nord de Beyrouth sont formées de sable rouge recouvrant une couche d'argile. Des alternances de marne et de calcaire apparaissent en surface dans certaines zones. Cette hétérogénéité des sols à Beyrouth génère une variabilité importante de la réponse sismique (Brax, 2013), et fait appel à la nécessité d'entamer des études géotechniques détaillées pour tout projet. Certaines zones de Grand Beyrouth présentent un fort potentiel de liquéfaction en cas de séisme (Harb, 2003). Malgré une telle variabilité au sein de Beyrouth, l'extension urbaine n'est pas encore soumise à des normes de construction strictes.

4.3. Histoire de la construction de Beyrouth

Beyrouth a été soumise à une croissance urbaine spectaculaire au cours des dernières décennies, entraînant une expansion de la ville de la côte méditerranéenne vers le Mont-Liban, effaçant les zones naturelles au détriment de la construction et du développement urbain. Le mandat français, succédant à la période ottomane de 1921 à 1940, a marqué les premiers signes de développement de la ville de Beyrouth au niveau des transports, des infrastructures et de l'assainissement. Bien que cette ville soit au milieu d'une région à risque sismique élevé, aucun code parasismique ni de dispositions particulières n'ont été appliqués avant 2005, lorsque l'Ordre des ingénieurs a émis des règles parasismiques en particulier pour les immeubles à grande hauteur. Toutefois, leur application pratique est douteuse, ce qui conduit à un niveau de vulnérabilité très important pour la grande majorité des bâtiments beyrouthins.

5. Détermination de formules empiriques spécifiques à Beyrouth

Dans le cadre du projet ANR Libris (isterre.fr/annuaire/pages-web-du-personnel/christophe-voisin/article/projet-libris), des enregistrements de vibrations ambiantes ont été effectués sur des bâtiments en béton armé de Beyrouth avec une station d'acquisition CityShark (Chatelain *et al.*, 2000), relié à un vélocimètre à 3 composantes Lennartz (LE3D-5) avec une réponse plate entre 0,2 et 50 Hz, afin d'identifier leurs fréquences fondamentales et amortissement associé. La durée de l'enregistrement est fixée à 15 min et obtenue sur le point le plus élevé de l'immeuble, puisque l'amplitude de vibration est la plus élevée à ce niveau. Cette campagne de mesures vise à tester les formules empiriques actuellement recommandées dans les codes de construction, et, si nécessaire proposer des relations spécifiques à Beyrouth compte tenu de la typologie de la construction locale. Elle a été réalisée sur 330 bâtiments situés comme indiqué dans la figure 1:

- 197 construits sur les sites rocheux, principalement dans les régions de: Sassine (S) Sioufi (Si), Geitawi (G) et le reste dispersés dans: Rmeil (R), Minet El Hosn (MH), Furn El Hayek (FH).
- 133 situés sur un sol mou dans les régions de Bourj Hammoud, Badaro, Jdeideh et Nahr Beyrouth.

Chaque signal est traité comme illustré sur la figure 2 en utilisant le logiciel Geopsy pour extraire les fréquences fondamentales et l'amortissement associé se basant respectivement sur la transformée de Fourier et la technique du décrément aléatoire (Dunand 2005). Ainsi pour chaque bâtiment, les informations obtenues sont ses fréquences fondamentales dans chaque direction (F_{Li} longitudinal et F_{Ti} transverse), les valeurs d'amortissement correspondantes (ξ_{Li} et ξ_{Ti}), les dimensions horizontales (longueur L_i et largeur W_i), la hauteur H_i , et le nombre d'étages N_i .

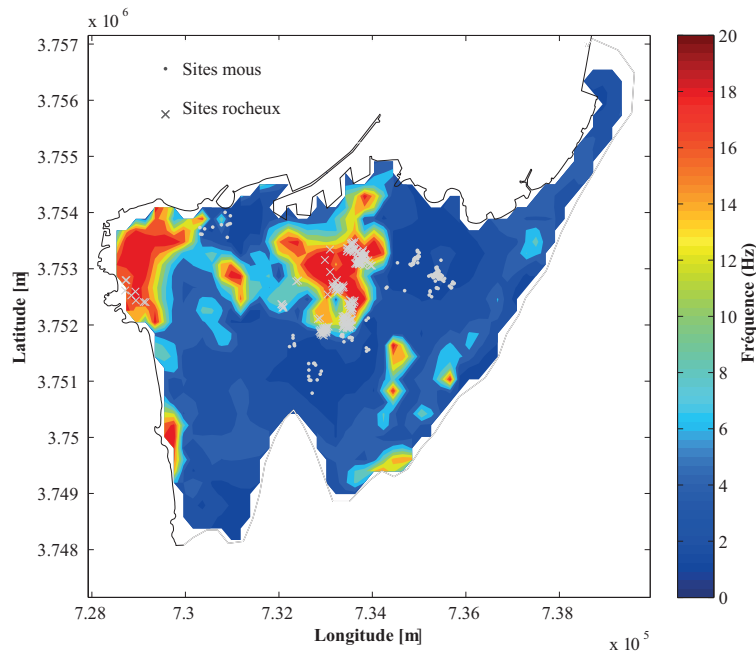


Figure 1: Carte des fréquences fondamentales dans la région de Beyrouth et localisation des 330 bâtiments mesurés sur sites rocheux et mous (Brax 2013 et Salloum et al. 2014). La fréquence est donnée en hertz. La carte est en UTM (Universal Transverse Mercator) (Zone: 36).

Une analyse statistique est établie sur la base de données afin de trouver des corrélations entre les paramètres dynamiques et géométriques des bâtiments à Beyrouth. Certains des résultats sont affichés dans la figure 3a (effet de la taille horizontale), 3b (fréquence longitudinale en fonction de celle transverse) et 3c (amortissement longitudinal en fonction de celui transverse). Les statistiques sur les dimensions horizontales affichées indique que très peu de bâtiments ont une forme carrée, ce qui permet d'étudier la sensibilité de la fréquence fondamentale dans chaque direction (longitudinale et transverse) sur la dimension horizontale correspondante. La courbe de la fréquence transverse en fonction de la fréquence longitudinale, indique que les deux fréquences sont très proches l'une de l'autre, et donc l'absence de tout effet clair de la taille horizontale du bâtiment.

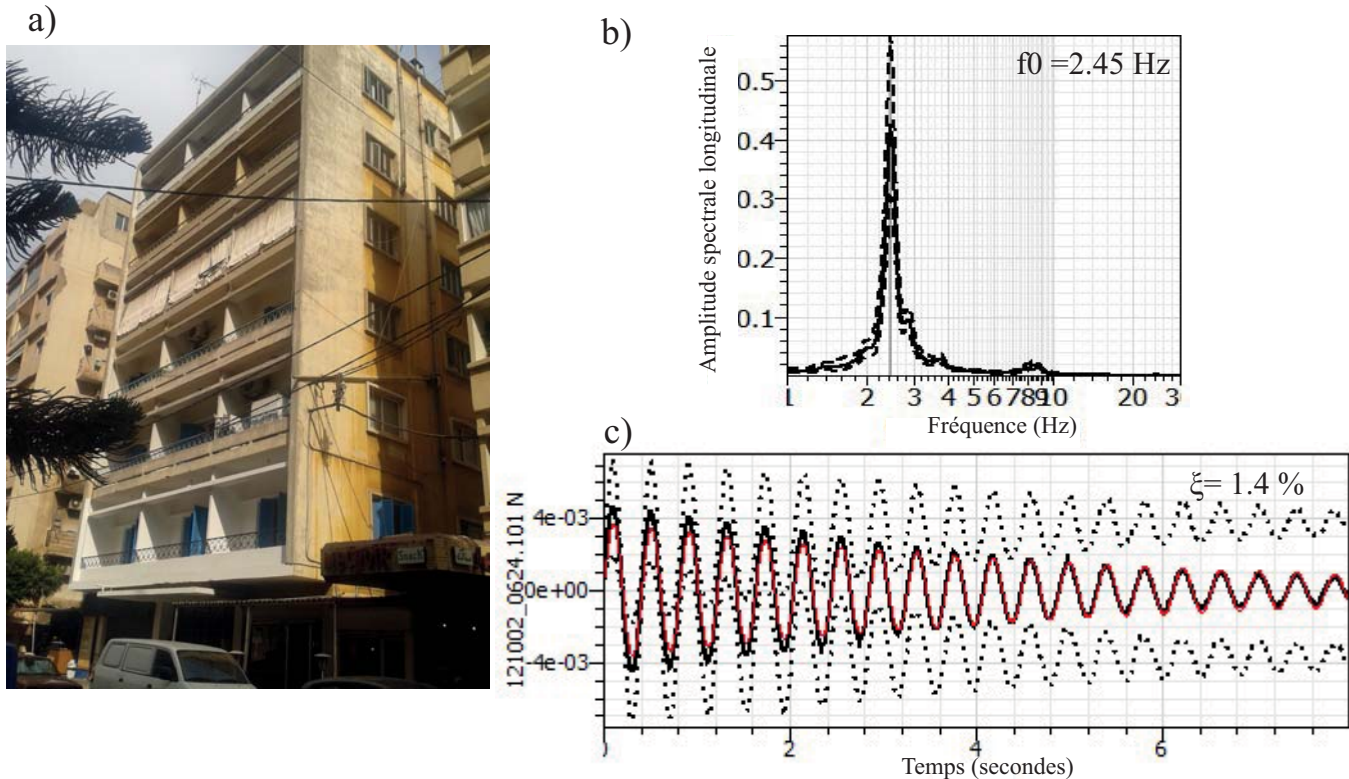


Figure 2: a) Photo d'un bâtiment en béton armé mesuré à Beyrouth, b) courbe spectrale de la fréquence fondamentale, c) courbe de l'amortissement se basant sur la technique du décrétement aléatoire à l'aide du logiciel Geopsy (www.geopsy.org)

Le paramètre clé qui contrôle la fréquence fondamentale est donc sa hauteur (ou encore le nombre d'étages). Une régression linéaire entre la période fondamentale et le nombre d'étages (Fig. 4a) donne les relations: $T = N/23$ sur sols rocheux, et $T = N/18$ sur sols mous, avec des coefficients de corrélation de 0,9 et 0,902, respectivement. Ces fortes corrélations entre la période et le nombre d'étages, et entre les fréquences longitudinales et transverses, permettent de conclure que la taille du bâtiment horizontale n'a pas d'effet significatif sur la fréquence fondamentale, et les paramètres dominants sont la hauteur du bâtiment ou le nombre d'étages équivalent, avec une légère influence du sol de fondation. Les différences entre les deux relations correspondantes à chaque type de sol soulèvent la question de leur signification statistique réelle; des tests statistiques sont donc effectués pour comparer les écarts résiduels (test de Fisher-Snedecor) et les pentes des deux régressions (test de Student). La période légèrement plus élevée sur des sols mous est compatible avec un plus grand amortissement observé sur ce type de sol comme illustré sur la Fig. 4b: l'interaction sol-structure est le candidat le plus probable pour expliquer ces différences, les périodes et amortissements étant légèrement plus élevés en raison du processus de dissipation d'énergie à travers le sol de fondation.

Dans les deux cas, les valeurs d'amortissement présentent une nette croissance avec la fréquence, à partir de valeurs d'environ 1% autour de 1 Hz, jusqu'à 5% autour de 5-7 Hz. Cette tendance est cohérente avec les ob-

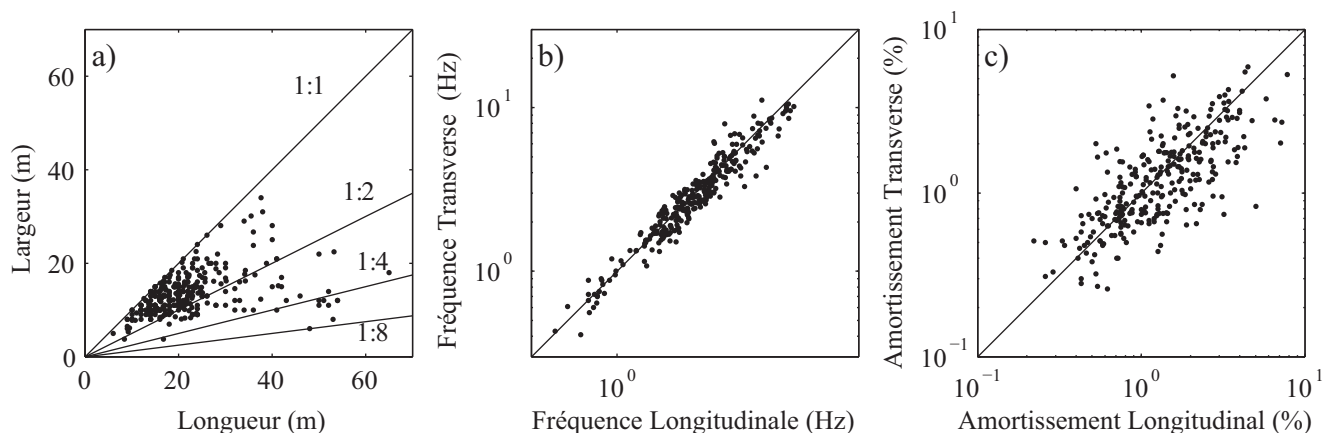


Figure 3: Distribution géométrique des bâtiments mesurés: a) largeur du bâtiment en fonction de sa longueur, b) fréquence transverse en fonction de la fréquence longitudinale, c) amortissement transverse en fonction de l'amortissement longitudinal.

servations précédentes, comme indiqué dans la dernière colonne du tableau 1. Les valeurs mesurées dépassent rarement la valeur conventionnelle de 5% recommandée dans la plupart des codes parasismiques, qui ne considèrent aucune corrélation avec la fréquence fondamentale de la structure. Il convient toutefois de souligner que les valeurs d'amortissement sont obtenues ici sous mouvement très faible, et donc être prudent dans l'extrapolation de ces valeurs à des niveaux de mouvement de terrain plus élevés. Ces résultats mettent en relief la nécessité d'une meilleure compréhension de l'origine de l'amortissement, et de sa sensibilité au matériau, type de construction, taille du bâtiment et niveau de mouvement du sol. Les relations en fonction de la hauteur sous la forme de puissance: $T = CH^\alpha$ donnent des valeurs $C = 0,0187$ et $\alpha = 0,9123$ et un coefficient de corrélation élevé, alors que les relations impliquant la dimension horizontale de la structure ont un coefficient de corrélation plus bas. Une comparaison avec les codes parasismiques (UBC97, EC8 (Eq. [4] et PS92 (Eq. [5] et [6]) souligne un écart significatif entre les périodes mesurées in-situ et celles estimées selon les formules proposées : $T_{théorique}/T_{mesurée} \approx 2.2$ avec un écart-type de 0,58 selon UBC97/ EC8/ Code Libanais et $T_{théorique}/T_{mesurée} \approx 1.5$ avec un écart-type de 0,44 selon PS92 (Fig. 5a et b). Comme les actions sismiques sont généralement inversement proportionnelles à la période dans la conception se basant sur l'approche de force, la surestimation de la période résulte en une sous-estimation des actions sismiques de conception et donc n'est pas conservative. Ce résultat est inversé dans la conception se basant sur l'approche de déplacement. Par contre, une comparaison avec les régressions linéaires obtenues par vibrations ambiantes (Guillier *et al.* 2014, à Pérou; Michel *et al.* 2010, à Grenoble et Nice) montre de meilleures corrélations; ce qui appuie l'utilisation de relations linéaires au lieu de relations de puissance.

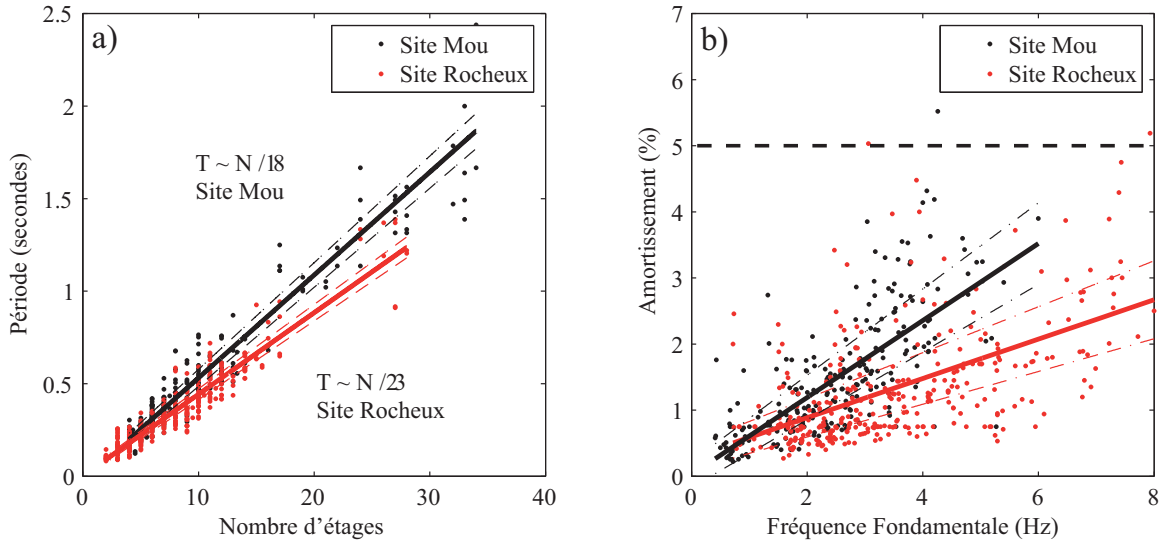


Figure 4: Des corrélations, sur sites rocheux et mous, entre: a) la période fondamentale (T) et le nombre d'étages (N), b) l'amortissement et la fréquence fondamentale: La période légèrement plus élevée sur des sols mous est compatible avec un plus grand amortissement observé. Les lignes en trait plein correspondent à la régression linéaire et les lignes avec points et tirets alternés correspondent à un intervalle de confiance à 95%. La ligne de tiret représente la valeur constante égal à 5% considérée dans les codes parasismiques.

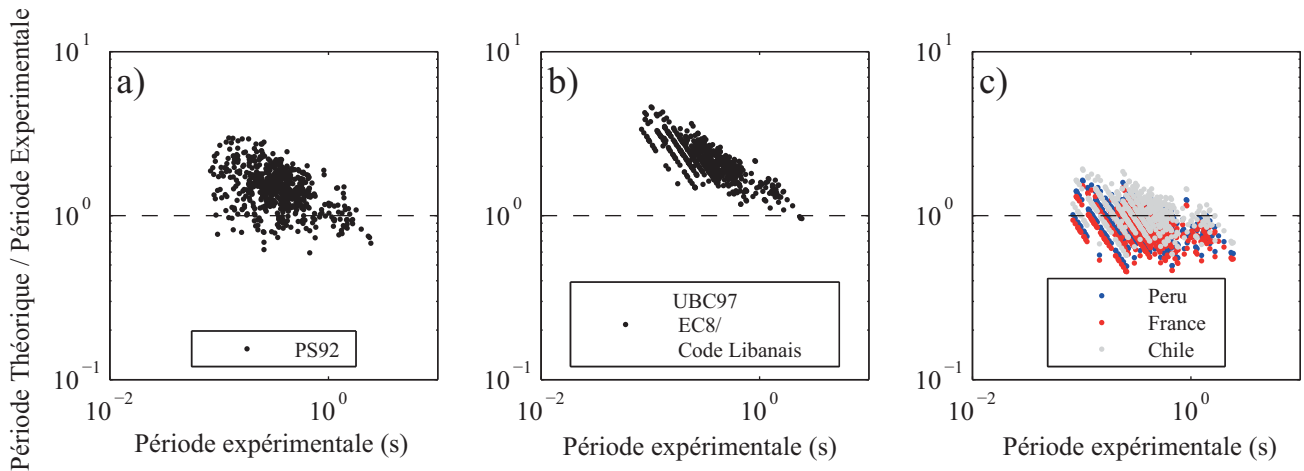


Figure 5: Comparaison entre la période expérimentale obtenue par l'enregistrement de vibrations ambiantes et la période théorique dans: a) PS92 (Eq. [5]), b) UBC97/EC8/Code Libanais (Eq. [4]), c) corrélations linéaires expérimentales obtenues dans: Pérou, France, Chile ($T = \alpha N$).

6. Conclusions

Un ensemble complet de paramètres dynamiques (fréquence et amortissement) a été acquis dans la ville de Beyrouth sur plus de 300 bâtiments se basant sur des mesures de vibrations ambiantes. Les résultats montrent une fois de plus que les périodes sont principalement contrôlées par la hauteur du bâtiment ou le nombre d'étages sous la forme: $T = N/N_{ref}$, avec $N_{ref} = 23$ pour les sites rocheux (coefficient de corrélation 0,889), et $N_{ref} = 18$ pour les sites mous (coefficient de corrélation 0,900). Les différences entre les deux types de sites sont statistiquement significatives et cohérentes avec les effets d'interaction sol-structure. Les autres paramètres géométriques ne contribuent pas statistiquement à la relation. Les résultats issus de vibrations ambiantes indiquent deux différences significatives avec les recommandations du code parasismique du bâtiment: (i) Les périodes mesurées sont beaucoup plus basses que les celles fournies par les codes parasismiques américain et français (PS92 et UBC97) ($T_{code}/T_{mesurée} \approx 2$). (ii) En outre, l'amortissement augmente avec la fréquence fondamentale alors qu'il est considéré comme une constante égal à 5% dans la plupart des codes parasismiques. Les codes ne semblent donc pas être conservateurs dans l'approche de conception basée sur la méthode de force. Ces relations sont importantes pour la ville de Beyrouth. Même si elles sont extraites sous mouvement très faible, nous recommandons qu'elles soient prises en compte dans la discussion de nouvelles corrélations spécifiques pour la ville de Beyrouth.

7. Remerciements

Ce travail a été soutenu par le programme de recherche (ANR Libris 2010-2013) en collaboration entre les laboratoires ISTerre (Grenoble, France), le Centre Libanais Geophysical Research (CRG), l'Université Saint-Joseph de Beyrouth, de l'Université de Notre Dame, Louaizé NDU, IPGP, EDYTEM CETE, et est partiellement financé par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement). [8]

References

- [1] BARD, P.-Y., AFRA, H., AND ARGOUL, P. Dynamic behaviour of buildings: experimental results from strong motion data. *Recent advances in earthquake engineering and structural dynamics* (1992), 441–478.
- [2] BRAX, M. *Aléa et microzonage sismiques à Beyrouth*. PhD thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2013.
- [3] CARDER, D. S. Observed vibrations of bridges. *Bulletin of the Seismological Society of America* 27, 4 (1937), 267–303.
- [4] CELEBI, M. Comparison of damping in buildings under low-amplitude and strong motions. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics* 59, 2 (1996), 309–323.
- [5] CHATELAIN, J.-L., GUEGUEN, P., GUILLIER, B., FRECHET, J., BONDOUX, F., SARRAULT, J., SULPICE, P., AND NEUVILLE, J.-M. Cityshark: A user-friendly instrument dedicated to ambient noise (microtremor) recording for site and building response studies. *Seismological Research Letters* 71, 6 (2000), 698–703.
- [6] CROWLEY, H., AND PINHO, R. Revisiting eurocode 8 formulae for periods of vibration and their employment in linear seismic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 39, 2 (2010), 223–235.
- [7] DUNAND, F. *Pertinence du bruit de fond sismique pour la caractérisation dynamique et l'aide au diagnostic sismique des structures de génie civil*. PhD thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2005.

- [8] FARDIS, M. N., CARVALHO, E., ALNASHAI, A., FACCIOLI, E., PINTO, P., AND PLUMIER, A. *Designers' Guide to EN 1998-1 and 1998-5. Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistant Structures*. Thomas Telford Limited, 2009.
- [9] FARSI, M. N. *Identification des structures de Génie Civil à partir de leurs réponses vibratoires et vulnérabilité du bâti existant*. PhD thesis, 1996.
- [10] FARSI, M. N., AND BARD, P.-Y. Estimation des périodes propres de bâtiments et vulnérabilité du bâti existant dans l'agglomération de grenoble. *Revue Française de Génie Civil* 8, 2-3 (2004), 149–179.
- [11] GUILLIER, B., CHATELAIN, J.-L., TAVERA, H., PERFETTINI, H., OCHOA, A., AND HERRERA, B. Establishing empirical period formula for rc buildings in lima, peru: Evidence for the impact of both the 1974 lima earthquake and the application of the peruvian seismic code on high-rise buildings. *Seismological Research Letters* 85, 6 (2014), 1308–1315.
- [12] HARB, J. Risks of liquefaction in the greater beirut area. In *Soil Rock America 2003, 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering and 39th U.S. Rock Mechanics Symposium, P.J. Culligan, H.H. Einstein and A.J. Whittle Editors, VGE (2003)*, vol. 1.
- [13] HOUSNER, G., AND BRADY, A. Natural periods of buildings. In *Selected Earthquake Engineering Papers of George W. Housner (1963)*, ASCE, pp. 403–437.
- [14] IRIE, Y., AND NAKAMURA, K. Dynamic characteristics of a rc building of five stories based on microtremor measurements and earthquake observations. In *12th World Conference of Earthquake Engineering (WCEE), Auckland, Australia (2000)*.
- [15] LEE, L.-H., CHANG, K.-K., AND CHUN, Y.-S. Experimental formula for the fundamental period of rc buildings with shear-wall dominant systems. *The Structural Design of Tall Buildings* 9, 4 (2000), 295–307.
- [16] MCVERRY, G. H., AND BECK, J. L. Structural identification of jpl building 180 using optimally synchronized earthquake records.
- [17] MELI, R., FACCIOLI, E., MURIÀ-VILA, D., QUAAS, R., AND PAOLUCCI, R. A study of site effects and seismic response of an instrumented building in mexico city. *Journal of earthquake engineering* 2, 01 (1998), 89–111.
- [18] MICHEL, C. *Vulnérabilité Sismique de l'échelle du bâtiment à celle de la ville-Apport des techniques expérimentales in situ-Application à Grenoble*. PhD thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2007.
- [19] MICHEL, C., GUÉGUEN, P., LESTUZZI, P., AND BARD, P.-Y. Comparison between seismic vulnerability models and experimental dynamic properties of existing buildings in france. *Bulletin of Earthquake Engineering* 8, 6 (2010), 1295–1307.
- [20] MIDORIKAWA, S., AND JIGYÖDAN, K. K. *Ambient vibration tests of buildings in Santiago and Viña del Mar*. Departamento de Ingeniería Estructural, Pontificia Universidad Católica de Chile, 1990.
- [21] MUCCIARELLI, M., MASI, A., GALLIPOLI, M. R., HARABAGLIA, P., VONA, M., PONZO, F., AND DOLCE, M. Analysis of rc building dynamic response and soil-building resonance based on data recorded during a damaging earthquake (molise, italy, 2002). *Bulletin of the Seismological Society of America* 94, 5 (2004), 1943–1953.

- [22] OLIVEIRA, C. S. Atualização das bases-de-dados sobre frequências próprias de estruturas de edifícios, pontes, viadutos e passagens de peões a partir de medições expeditas in-situ. In *5th Portuguese Conference on Earthquake Engineering, University of Minho, Guimarães (in Portuguese)* (2004).
- [23] PS92. Règles de construction parasismique, DTU règles, 1995.
- [24] RPA88. Règles parasismiques algériennes. *Regulation of Algerian Seismic Code, Publication OPU, Algiers* (1988).
- [25] SATAKE, N., AND YOKOTA, H. Evaluation of vibration properties of high-rise steel buildings using data of vibration tests and earthquake observations. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics* 59, 2 (1996), 265–282.
- [26] TRIFUNAC, M. D. Comparisons between ambient and forced vibration experiments. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 1, 2 (1972), 133–150.
- [27] UBC97. Uniform building code, earthquake regulations for seismic isolated structures. *Whitter (CA, USA)* (1997).
- [28] ULM, F., CLÉMENT, J., AND ARGOUL, P. Coefficient de comportement: approche chute de fréquence. In *3ème Colloque National AFPS* (1993), vol. 2, pp. 49–56.