



Etude de la reponse structurelle d'un batiment de grande hauteur à partir d'enregistrements accelerométriques et de la modelisation par elements finis

Guillermo Wenceslao Fernández Lorenzo, Maria Paola Santisi d'Avila, Anne Deschamps, Etienne Bertrand, Diego Mercerat

► To cite this version:

Guillermo Wenceslao Fernández Lorenzo, Maria Paola Santisi d'Avila, Anne Deschamps, Etienne Bertrand, Diego Mercerat. Etude de la reponse structurelle d'un batiment de grande hauteur à partir d'enregistrements accelerométriques et de la modelisation par elements finis. AFPS2015 - 9ème Colloque National de L'Association Française du Génie Parasismique, Nov 2015, Paris, France. 2015, <<http://www.afps-seisme.org/>>. <hal-01247459>

HAL Id: hal-01247459

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01247459>

Submitted on 22 Dec 2015

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.

Étude de la réponse structurelle d'un bâtiment de grande hauteur à partir d'enregistrements accélérométriques et de la modélisation par éléments finis

Study of the structural response of a high rise building using accelerometric records and finite element modeling

Guillermo Wenceslao Fernández Lorenzo^{1,2,3}, Maria Paola Santisi d'Avila²,
Anne Deschamps¹, Étienne Bertrand³, E. Diego Mercerat³

1. Géoazur, Université de Nice Sophia Antipolis, CNRS, OCA, IRD
250 rue Albert Einstein, 06560 Sophia Antipolis, France

2. Laboratoire Jean Alexandre Dieudonné, Université de Nice Sophia Antipolis, CNRS
Parc Valrose, 06108, Nice, France

3. CEREMA, DTer Méditerranée, Laboratoire de Nice
56, boulevard Stalingrad, 06359, Nice, France

RÉSUMÉ. La préfecture de Nice est équipée d'un ensemble de 24 capteurs accélérométriques, répartis sur différents étages, qui enregistrent en continu les vibrations du bâtiment. Un modèle par éléments finis du bâtiment est créé à partir des plans de construction et des données sur les matériaux, issues du projet de dimensionnement d'origine. Ce modèle est utilisé pour obtenir les fréquences propres de vibration de la structure, les déformées modales et la réponse sismique dans le temps. Les fréquences modales du bâtiment obtenues par l'analyse des enregistrements sont utilisées pour calibrer le modèle numérique. La réponse du bâtiment aux séismes, en terme de séries temporelles d'accélération aux étages, est évaluée par le modèle d'éléments finis. Les signaux enregistrés lors du récent séisme de Barcelonnette (avril 2014, $M_w = 4.9$) sont utilisés comme sollicitations appliquées à la base du bâtiment. L'imposition d'une seule ou plusieurs excitations à la base de la structure montre l'importance de la prise en compte des effets de «rocking» du bâtiment pour mieux comprendre sa réponse aux séismes. Les signaux numériques sont en accord dans différentes bandes de fréquence, en amplitude et en phase, avec les enregistrements.

ABSTRACT. The Nice prefecture is equipped by 24 accelerometric sensors, located at different levels, which continuously record the building response. A finite element model of the building is created based in design plans and information about materials provided during the conception project. Such model is used to obtain the natural frequencies of the structure, the modal shapes and the seismic response acceleration time histories. Modal frequencies of the building obtained from the data analysis are used to calibrate the numerical model. The response of the building to earthquakes, in the form of acceleration time histories at different storeys, is evaluated using the finite element model. Signals recorded during the recent Barcelonnette earthquake (April 2014, $M_w = 4.9$) are used as excitation at the base of the building. The imposition of a single or multiple signals at the base of the structure shows the importance of taking into account the rocking effects in the building response modelling. The numerical results are in agreement, in amplitude and phase, with accelerometric records filtered at different frequency bands.

MOTS-CLÉS: Bâtiment de grande hauteur, béton armé, enregistrements accélérométriques, éléments finis, réponse sismique, variabilité spatiale, effets de rocking, critère d'Anderson, séisme de Barcelonnette de 2014.

KEYWORDS: High rise building, reinforced concrete, accelerometric records, finite elements, seismic response, spatial variability, rocking effects, Anderson criteria, Barcelonnette 2014 earthquake.

1. Introduction

L'étude du comportement dynamique des ouvrages est importante pour mieux comprendre et prédire la réponse sismique des structures de génie civil. L'utilisation de ces connaissances peut permettre de réduire les conséquences des séismes pour la population. En France, des essais expérimentaux sur des tables vibrantes sont réalisés depuis plus de 35 ans [Sollogoub, 1996]. L'avantage de ces analyses réside dans leur environnement contrôlé, qui permet de tester des cas spécifiques, ou de tester des maquettes jusqu'à la destruction totale. Par contre, pour le passage à l'échelle réelle, des lois d'échelle doivent être prises en compte.

L'instrumentation des structures permet de mesurer des paramètres dynamiques directement sur des structures en grandeur réelle sous charges d'exploitation. Dans des régions de forte sismicité cette démarche est exploitée dans des ouvrages de génie civil. Sur le territoire français, le réseau accélérométrique permanent (RAP) est en charge de coordonner l'instrumentation de bâtiments depuis la fin des années 90 à des fins de recherche [Pequegnat et al., 2008].

Les analyses des données de ce type d'instrumentation, montrent qu'elles permettent de surveiller l'état de la structure et d'identifier d'éventuels changements dans son comportement. C'est un outil montrant un grand potentiel pour suivre la santé structurelle des ouvrages ou pour évaluer leur condition après des séismes majeurs. De plus, il est possible d'utiliser les enregistrements de la réponse temporelle à une sollicitation sismique modérée en différents points d'une structure pour valider les modèles numériques de déformation de cette structure. Ces modèles peuvent ensuite être utilisés pour prédire la réponse à des séismes majeurs pour lequel un mouvement du sol synthétique est calculé.

La réponse d'une structure sous charge sismique peut être différente de celle prévue en phase de dimensionnement à cause, par exemple, des défauts de construction, du vieillissement des matériaux et du poids et de l'effet des éléments non structuraux. L'objectif de cette recherche est de reproduire la réponse sismique d'un bâtiment en béton armé de grande hauteur par un modèle par éléments finis calibré et validé par comparaison avec des enregistrements de mouvements de faible amplitude. Le comportement du matériau est considéré linéaire sous le niveau de déformation analysé.

Les fréquences propres sont estimées par le modèle numérique et comparées à celles obtenues à partir des données, en utilisant des techniques d'analyse modale opérationnelle. Le modèle numérique est amélioré en mettant en cause les choix de modélisation de départ, en termes de conditions aux limites et de variabilité spatiale de la charge sismique imposée, et en réfléchissant sur les effets des joints sismiques dans la rigidité de la structure sous faibles sollicitations.

Le travail est présenté de la façon suivante. Dans la Section 2 sont présentés le bâtiment, l'instrumentation, la sismicité de la région et les enregistrements utilisés. La Section 3 est focalisée sur le modèle numérique et la production de la réponse sismique du bâtiment. Y sont discutés les choix de modélisation et la comparaison avec les paramètres dynamiques estimés à partir des données. La qualité des résultats issus des modélisations numériques est évaluée de façon qualitative et quantitative. Les conclusions sont développées dans la Section 4.

2. Présentation du cas d'étude

2.1. Le bâtiment

Le bâtiment analysé est celui de la préfecture de Nice, construit en 1979 selon les indications du code parasismique français PS69. Il s'agit d'une structure en béton armé de grande hauteur (67.5m), formée par deux tours

identiques séparées par un joint sismique de 10 cm (voir Figure 1). Ses éléments porteurs ne correspondent pas aux critères de régularité en plan et en élévation suggérés par les normes européennes actuelles pour la construction en zone sismique. La préfecture abritant le PC de crise, elle est vitale pour la protection civile en cas de séisme. Elle s'apparente donc à un ORN (ouvrage à risque normal) de la classe IV selon la norme des Eurocodes 8.

Le bâtiment a été instrumenté par le RAP [Pequegnat et al., 2008] en juin 2010 avec 24 capteurs qui enregistrent en continu le mouvement à différents étages. Les différents capteurs sont disposés dans le noyau central d'une seule tour, comme spécifié dans la Figure 2. La station d'enregistrement est une Kephren 24 canaux 124dB. Le réseau est formé de 18 accéléromètres monocomposante Episensor FBA ES-U2 et 2 accéléromètres à trois composantes FBA EST posés sur le dernier sous-sol. Les capteurs mono-composante et 3-composantes sont montrés dans les Figures 3a et 3b, respectivement, et leur localisation est indiquée respectivement en rouge et en vert, sur la Figure 2.



Figure 1: Vue latérale du bâtiment de la préfecture de Nice.

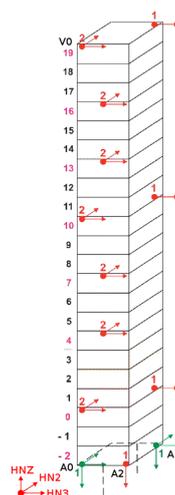


Figure 2: Position des capteurs dans une des tours du bâtiment.



a)



b)

Figure 3: Accéléromètres mono (a) et 3-composantes (b).

2.2. Le contexte sismique

Le bâtiment est localisé dans la basse vallée du Var (Figure 4), entre le massif des Alpes et le bassin Ligure. Il s'agit d'une des régions les plus actives de l'Europe occidentale, ayant une sismicité moyenne (zone 4) selon le zonage sismique français. Parmi les événements historiques documentés, on retrouve le séisme Ligure de 1887 [Larroque et al., 2012], avec une magnitude M_w estimée entre 6.5 et 6.9, qui a été responsable de dommages considérables sur toute la côte Ligure entre Nice et Imperia (Italie). Dans la région de Nice, l'accélération de référence du sol au rocher selon la norme actuelle est de 0.16 g. Des études probabilistes du risque sismique à Nice prédisent une accélération entre 0.15 g et 0.20 g associée à une période de retour de 475 ans [Martin et al., 2002]. Le bâtiment est exposé à des mouvements du sol amplifiés à cause des effets de site lithologiques liés au bassin sédimentaire sur lequel il est construit. Entre 40 m et 60 m de sédiments relativement mous sont en effet présents dans les couches superficielles [Dubar, 2003]. La vitesse moyenne des ondes S dans les 30 premiers mètres de sol est estimée à 235 m/s, ce qui correspond à un sol de type C selon l'Eurocode 8.

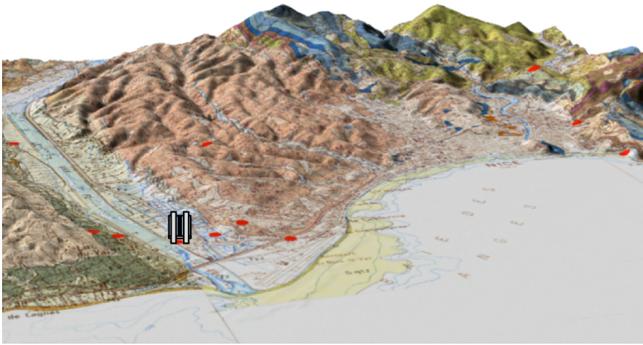


Figure 4: Localisation du bâtiment dans la vallée du Var.

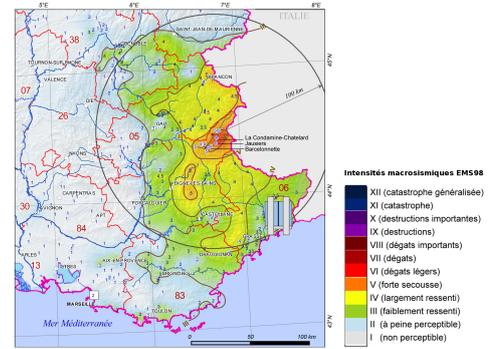


Figure 5: Intensité macrosismique (EMS98) du séisme de Barcelonnette du 7 avril 2014. Tiré du BCSF [Sira et al., 2014].

2.3. Les données enregistrées

A la station NCAD du RAP, des séismes de magnitude entre 3.5 et 4.5 M_w , avec des distances épacentrales entre 50 et 150 km, sont régulièrement enregistrés. Le mouvement du sol plus fort enregistré par les capteurs correspond au séisme de Barcelonnette du 7 avril 2014 [Courboulex et al., 2014]. L'événement a eu lieu environ 100 km au nord du bâtiment, il a été ressenti par la population de Nice, sans causer de dégâts dans la ville (Figure 5). L'histoire temporelle de l'accélération du sol enregistrée en bas du bâtiment (localisation A0 dans la Figure 2) pendant le séisme de Barcelonnette de 2014 est visible dans la Figure 6. La valeur de l'accélération maximale du sol correspond à 0.036 m/s^2 (enregistrée dans la direction HN3, Figure 2). La réponse du bâtiment aux différents étages, illustrée dans la figure 7, est amplifiée par rapport au mouvement à la base, avec une accélération maximale enregistrée en haut du bâtiment de 0.133 m/s^2 .

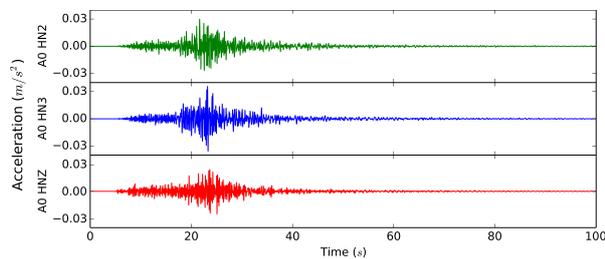


Figure 6: Composantes horizontales (HN2, HN3) et verticale (HNZ) de l'accélération du sol, enregistrée à la base du bâtiment (A0), due au tremblement de terre de Barcelonnette de 2014.

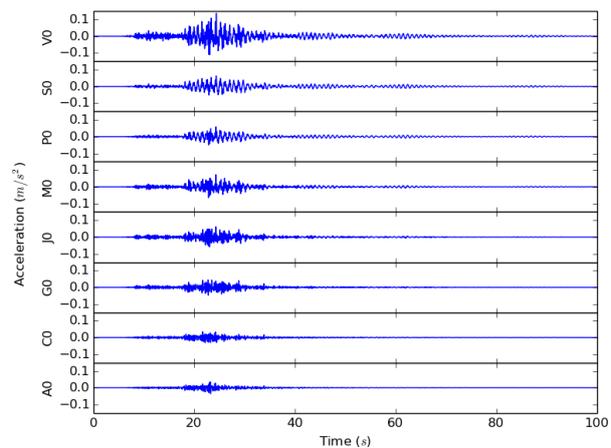


Figure 7: Accélération horizontale (HN3) enregistré aux différents étages du bâtiment pendant le tremblement de terre de Barcelonnette de 2014.

3. Comparaison de la réponse structurelle enregistrée et simulée

Un modèle par éléments finis du bâtiment est créé à partir des plans de construction en utilisant le logiciel Abaqus. Le modèle tridimensionnel du bâtiment est réalisé par des éléments de type poutre de Timoshenko et de type coque avec intégration réduite. Le maillage prévoit une distance entre les nœuds inférieure à 1 m. Une loi de comportement linéaire élastique pour le béton armé a été prise en compte, justifiée par le faible niveau de sollicitation sismique étudiée (voir Section 2.3). La densité du béton armé est typiquement choisie égale à $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$. Son module d'élasticité est estimé à $E = 31 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$, valeur obtenue à partir de la résistance à la compression du béton R_{ck} déclarée dans le projet, selon la formule empirique de l'Eurocode 2, $E = 5700\sqrt{R_{ck}}$, où E et R_{ck} sont donnés en MPa.

3.1. Optimisation du modèle par éléments finis

La validation des résultats issus d'un modèle numérique par comparaison avec des données enregistrées nécessite d'imposer des paramètres mécaniques supplémentaires qui ne sont pas bien connus, comme la charge verticale d'exploitation. Les codes de dimensionnement fournissent une valeur à prendre en compte pour la conception, mais ceci ne correspond pas forcément à la charge réelle à laquelle la structure est soumise pendant son exploitation. Pour déterminer ce paramètre, qui influence la masse dynamique, une charge uniformément distribuée est imposée aux planchers horizontaux du bâtiment. La valeur de cette charge est ajustée pour pouvoir retrouver la fréquence fondamentale du bâtiment obtenue à partir des enregistrements.

Dans le cadre de l'identification des paramètres dynamiques d'une structure, l'utilisation de techniques d'analyse modale opérationnelle permettent obtenir ces paramètres sans avoir besoin d'une sollicitation externe. La décomposition dans le domaine fréquentiel [Brincker et al., 2001] permet d'identifier facilement les modes comme les pics présents dans les valeurs singulières de la matrice des densités spectrales (Figure 8). L'identification des fréquences propres dans ce bâtiment [Fernández Lorenzo et al., 2015] a été effectuée par décomposition dans le domaine fréquentiel et la technique du décrément aléatoire [Cole, 1973]. Les valeurs des trois premières fréquences obtenues à partir des enregistrements (REC) sont données dans le Tableau 1.

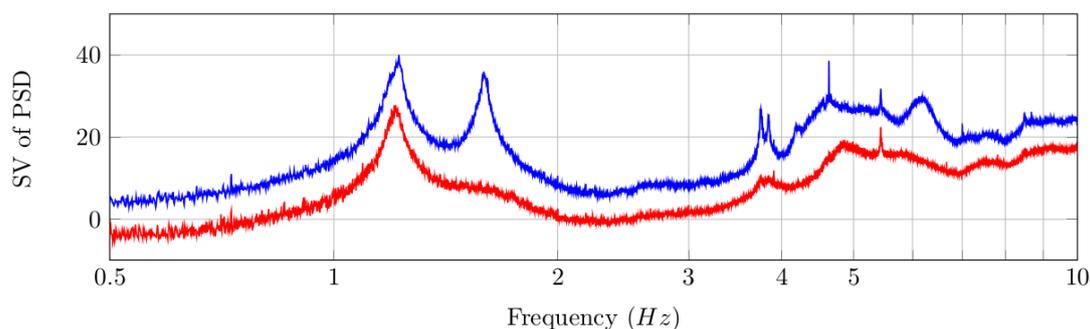


Figure 8: Premier (bleu) et deuxième (rouge) valeur singulière (SV) de la matrice des densités spectrales (PSD) selon la technique de décomposition dans le domaine fréquentiel (FDD). Les modes sont identifiés par la présence d'un pic dans le SV.

La présence d'un joint sismique entre les deux tours du bâtiment pose la question sur les effets du matériel de remplissage sur les propriétés dynamiques de la structure sous faibles sollicitations. Deux modèles numériques

Tableau 1: Valeurs des trois premières fréquences modales du bâtiment à partir des enregistrements (REC), du modèle numérique en considérant les tours indépendantes (FEM1) et en considérant les tours connectées (FEM2).

Mode	REC	FEM1		FEM2	
	$f[Hz]$	$f[Hz]$	$\epsilon[\%]$	$f[Hz]$	$\epsilon[\%]$
1	1.21	1.22	0.8	1.20	0.8
2	1.22	1.24	1.6	1.24	1.6
3	1.60	2.35	46.9	1.59	0.6

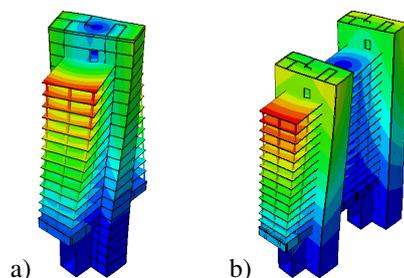


Figure 9: Déformée modale du troisième mode à partir du modèle FEM1 (a) et FEM2 (b). Les couleurs montrent le déplacement normalisé.

sont créés: le premier considère une réponse indépendante des deux tours identiques (FEM1) et le deuxième avec une liaison rigide à la place du joint sismique (FEM2). Les valeurs finales de la charge d'exploitation adoptée sont de 250 km/m² pour le FEM1 et de 300 km/m² pour le FEM2.

La comparaison des valeurs de la troisième fréquence propre obtenues par le modèle numérique et par les mesures, le troisième mode étant de torsion (voir Figure 9), montrent une erreur de presque 50 % pour le modèle FEM1 et moins de 1 % pour le modèle FEM2. Cette observation met en évidence la liaison créée par le joint sismique sous faibles sollicitations et son influence sur les propriétés dynamiques du bâtiment tirées de l'analyse du mouvement enregistré à faible sollicitation. En absence de séismes forts, le modèle FEM2 est utilisé pour reproduire la réponse structurelle aux séismes enregistrés.

3.2. Simulation avec un seul signal triaxial à la base

La réponse numérique du bâtiment au séisme de Barcelonnette de 2014 est obtenue à partir du modèle par éléments finis. Les trois composantes de l'accélération (HN2, HN3 et HNZ) enregistrées en bas du bâtiment (A0) sont imposées comme condition aux limites aux deux niveaux souterrains, en considérant le sol comme infiniment rigide. Les histoires temporelles d'accélération (Figure 2) sont comparées avec les enregistrements dans les différents étages du bâtiment.

La comparaison d'histoires temporelles numériques en haut du bâtiment (V0) avec les enregistrements pour l'une des directions horizontales (HN3) est présentée dans la figure 10, pour une bande de fréquence (0.5 - 10 Hz) qui contient plusieurs modes (voir Figure 8) et pour une bande qui contient uniquement le mode fondamental (0.5 - 1.4 Hz). On peut observer une reproduction correcte des données dans la bande de fréquence la plus large. L'analyse du mode fondamental isolé permet d'identifier qu'une partie de son comportement n'est pas correctement reproduit avec les hypothèses de modélisation considérées.

3.3. Simulation avec plusieurs signaux à la base

Imposer un même signal à l'ensemble de la base du modèle numérique est généralement accepté pour reproduire la réponse des bâtiments. Cette simplification considère donc une base complètement rigide, et néglige la variabilité spatiale de l'excitation existant aux différents points de la base, en négligeant en particulier des rotations possibles de la base. L'instrumentation existante nous permet d'observer les signaux enregistrés à différents points

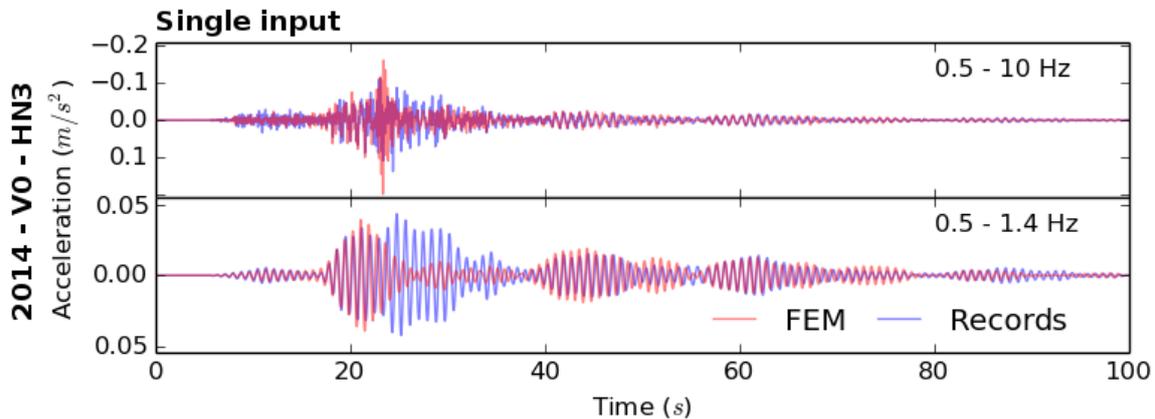


Figure 10: Accélération horizontale (HN3) numérique (rouge) et enregistrée (bleu) en haut du bâtiment (V0) pendant le tremblement de terre de Barcelonnette de 2014, dans le cas où un signal 3-composantes a été imposé à toute la base du modèle par éléments finis.

de la tour. On peut voir dans la Figure 11 que les signaux verticaux ont des différences importantes, alors que les capteurs sont distants de seulement quelques mètres.

Suite à cette observation, les différents signaux enregistrés sont imposés comme condition aux limites sur les nœuds où ils ont été enregistrés (Figure 12) et sur tous ceux sur la même ligne verticale aux deux étages du sous-sol.

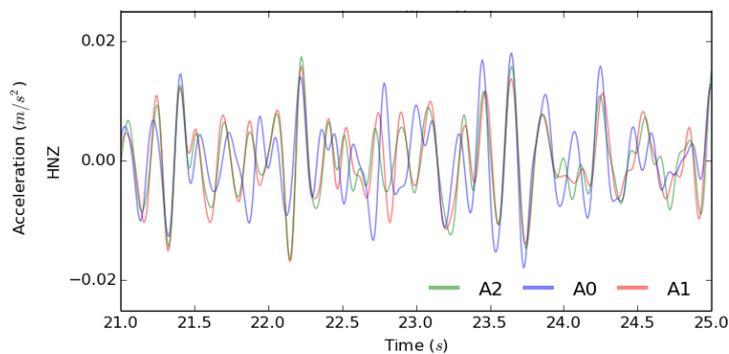


Figure 11: Zoom sur une courte fenêtre des enregistrements verticaux (HNZ) aux différents points instrumentés de la base de la structure (A0, A1 et A2) pendant le séisme de Barcelonnette de 2014.

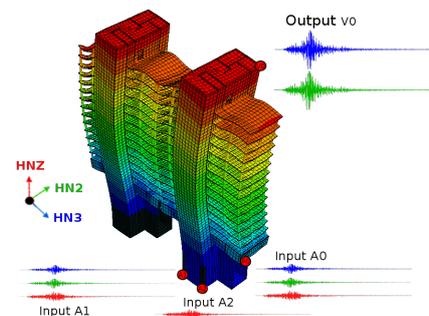


Figure 12: Simulation numérique de la réponse du bâtiment, dans le cas de plusieurs signaux imposés à la base (A0, A1, A2). Localisation en haut du bâtiment (V0) où les histoires temporelles de l'accélération horizontale (HN2, HN3) sont obtenues.

La comparaison avec les enregistrements des réponses en haut du bâtiment, obtenues dans le cas de plusieurs signaux imposés à la base, est montrée dans la Figure 13. Les résultats sont plus en concordance avec les enregistrements que ceux obtenus auparavant en imposant un seul signal triaxial à la base (Section 3.2). Le comportement global est mieux représenté, notamment dans la bande de fréquence autour du mode fondamental qui n'était

pas bien reproduite par le modèle numérique FEM1(Figure 10). Les signaux sont, en outre, en concordance à la fois pour l'amplitude et la phase.

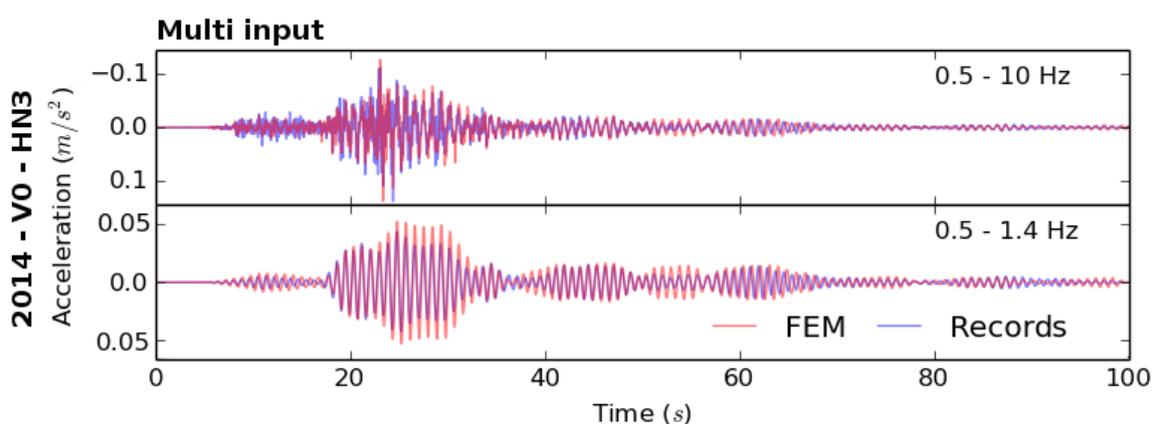


Figure 13: Accélération horizontale (HN3) numérique (rouge) et enregistrée (bleu) pendant le tremblement de terre de Barcelonnette de 2014, en haut du bâtiment (V0). L'accélération numérique a été obtenue en imposant plusieurs signaux à la base du modèle par éléments finis.

3.4. Mesure quantitative de la qualité de l'ajustement

La comparaison visuelle des histoires temporelles numériques et enregistrées, discutée dans les Sections 3.2 et 3.3, permet de juger qualitativement les simulations mais pas de quantifier l'erreur. Une mesure de la qualité des simulations à partir de l'évaluation des paramètres d'Anderson est utilisée [Anderson, 2004]. Un total de dix paramètres sont analysés: durée d'Arias (AD), durée de l'énergie (ED), intensité d'Arias (AI) [Arias, 1970], intégral de l'énergie (EI), accélération maximale (PA), vitesse maximale (PV), déplacement maximal (PD), spectre de réponse de pseudo-accélération (Sa), spectre de Fourier (FS) et corrélation croisée (C*). La comparaison est représentée dans une échelle entre 0 et 10, où moins de 4 est une reproduction pauvre, entre 4 et 6 raisonnable, entre 6 et 8 bonne et entre 8 et 10 excellente.

Les paramètres d'Anderson pour la comparaison des réponses numériques dans le cas d'un (SI) et plusieurs (MI) signaux à la base, avec les enregistrements, sont illustrés dans la figure 14. Une amélioration générale est observée avec l'utilisation de plusieurs signaux à la base. La comparaison donne des résultats excellents dans la plupart des paramètres pour le cas MI. Le spectre de Fourier et l'intensité d'Arias sont montrés dans la Figure 15. La valeur maximale du spectre de Fourier dans le cas MI diminue par rapport au SI et c'est plus en concordance avec les données. Ce phénomène est expliqué par une valeur de fréquence propre conditionnée par la combinaison d'une déformation de translation et de rocking, dont l'effet n'est pas pris en compte dans le cas de charge sismique uniforme à la base (SI). Cet effet réduit la fréquence fondamentale. L'intensité d'Arias montre clairement comme la distribution d'énergie du mode fondamental dans le temps est mieux représentée dans le cas MI.

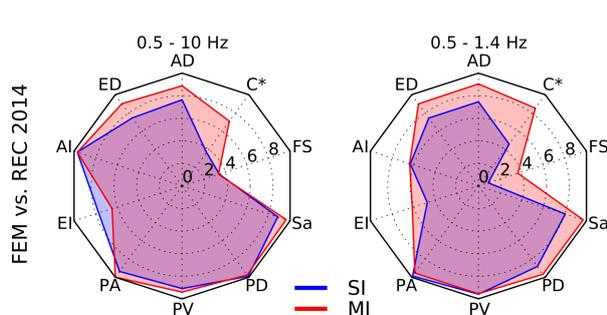


Figure 14: Valeurs des paramètres d'Anderson pour la comparaison d'une composante horizontale du mouvement (HN3) en haut du bâtiment (V0) enregistrée pendant le séisme de Barcelonnette de 2014, avec le signal numérique obtenu dans les cas de modélisation avec un seul signal triaxial (SI) et plusieurs signaux (MI) imposés à la base du bâtiment.

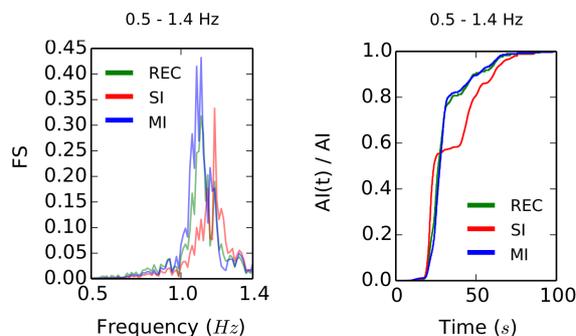


Figure 15: Comparaison du spectre de Fourier (FS) et de l'intensité d'Arias (AI) pour une composante horizontale (HN3) en haut du bâtiment (V0) enregistrée pendant le séisme de Barcelonnette de 2014 et pour les signaux numériques obtenus dans les cas de modélisation avec seul signal triaxial (SI) et plusieurs signaux (MI) imposés à la base du bâtiment.

4. Conclusions

La comparaison des résultats obtenus à partir des mesures de bruit de fond et des modèles numériques a mis en évidence l'influence du matériel de remplissage du joint sismique du bâtiment sous faibles sollicitations. Cette observation est à prendre en compte quand on surveille le comportement en service d'une structure.

L'observation des signaux enregistrés dans des différents points à la base du bâtiment, pendant le séisme de Barcelonnette de 2014, a montré l'importance de la prise en compte de la variabilité spatiale de l'excitation de la structure dans la modélisation numérique. L'utilisation de plusieurs signaux améliore la reproduction de la réponse structurelle de notre cas d'étude. Cette influence est attribuée à la possible présence d'effets de « rocking » pendant le séisme qui les codes de dimensionnement ne prennent pas en compte directement.

Les résultats numériques ont montré une reproduction consistante des données, en amplitude et en phase, du signal en accélération, dans la bande de fréquence autour du mode fondamental.

Données

Les accélérogrammes utilisés dans le cadre de cette étude ont été enregistrés par le réseau accélérométrique permanent (RAP) [RESIF, 1995]. Les données sont disponibles en ligne dans le site web du RESIF (<http://www.resif.fr/>).

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et le FEDER pour le contrat emploi jeune qui finance le travail de G.W. Fernández Lorenzo et la Fédération W. Doebelin, pour le soutien financier qu'ils ont apporté à cette étude.

References

- [Anderson, 2004] Anderson, J. G. (2004). Quantitative measure of the goodness-of-fit of synthetic seismograms. In *13th World Conference on Earthquake Engineering Conference Proceedings, Vancouver, Canada, Paper*, volume 243.
- [Arias, 1970] Arias, A. (1970). Measure of Earthquake Intensity. In Robert J. Hansen, editor, *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, pages 438–483. The M.I.T. Press, Cambridge, MA.
- [Brincker et al., 2001] Brincker, R., Zhang, L., and Andersen, P. (2001). Output-only modal analysis by frequency domain decomposition. In *The International Conference on Noise and Vibration Engineering*, pages 717–723.
- [Cole, 1973] Cole, H. A. (1973). *On-line failure detection and damping measurement of aerospace structures by random decrement signatures*, volume 2205. National Aeronautics and Space Administration.
- [Courboulex et al., 2014] Courboulex, F., Delouis, B., Dujardin, A., Deschamps, A., Bertrand, E., Causse, M., Maron, C., Sira, C., and Cultrera, G. (2014). The two events of Barcelonnette (French Alps), 2012 (Mw4.1) and 2014 (Mw 4.9): the role of directivity on ground motions, macroseismic intensities and site effects. In *Second European conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul.
- [Dubar, 2003] Dubar, M. (2003). The Holocene deltas of Eastern Provence and the French Riviera: geomorphological inheritance, genesis and vulnerability. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 9(4):263–270, doi:10.3406/morfo.2003.1189.
- [Fernández Lorenzo et al., 2015] Fernández Lorenzo, G. W., Mercerat, D., Santisi D’Avila, M. P., Bertrand, E., and Deschamps, A. (2015). Operational Modal Analysis of a high rise RC building and modelling. In *The 6th International Operational Modal Analysis Conference*, Gijón, Spain.
- [Larroque et al., 2012] Larroque, C., Scotti, O., and Ioualalen, M. (2012). Reappraisal of the 1887 Ligurian earthquake (western Mediterranean) from macroseismicity, active tectonics and tsunami modelling. *Geophysical Journal International*, 190(1):87–104, doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05498.x.
- [Martin et al., 2002] Martin, C., Secanell, R., Combes, P., and Lignon, G. (2002). Preliminary probabilistic seismic hazard assessment of France. *Proceedings of the 12th ECEE, Paper Reference 870, Septembre, London, England*.
- [Pequegnat et al., 2008] Pequegnat, C., Gueguen, P., Hatzfeld, D., and Langlais, M. (2008). The French Accelerometric Network (RAP) and National Data Centre (RAP-NDC). *Seismological Research Letters*, 79(1):79–89, doi:10.1785/gssrl.79.1.79.
- [RESIF, 1995] RESIF (1995). RESIF-RAP French Accelerometric Network. RESIF - Réseau Sismologique et géodésique Français. Seismic Network. doi:10.15778/RESIF.RA.
- [Sira et al., 2014] Sira, C., Schulupp, A., Schaming, M., Chesnais, C., Cornou, C., Deschamps, A., Delavaud, E., and Maufroy, E. (2014). Séisme de Barcelonnette du 7 avril 2014. Rapport du BCSF.
- [Sollogoub, 1996] Sollogoub, P. (1996). Tamaris: Des vibrations riches d’enseignements. *Technologies France*, (26):36–37.