



HAL
open science

Évaluation de la vulnérabilité sismique du bâti existant par un “ séisme ” artificiel : Application au patrimoine bâti Ali Tur en Guadeloupe

Alexandre de La Foye

► **To cite this version:**

Alexandre de La Foye. Évaluation de la vulnérabilité sismique du bâti existant par un “ séisme ” artificiel : Application au patrimoine bâti Ali Tur en Guadeloupe. 11e Colloque National de l'AFPS - Le risque sismique dans un contexte multi-risques : Comprendre, gérer, prévenir, Association Française du Génie Parasismique (AFPS), Nov 2023, Le Gosier (Guadeloupe), France. pp.390-395. hal-04405924

HAL Id: hal-04405924

<https://hal.science/hal-04405924v1>

Submitted on 19 Jan 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Évaluation de la vulnérabilité sismique du bâti existant par un « séisme » artificiel

Application au patrimoine bâti Ali Tur en Guadeloupe

Alexandre de la Foye^{1*}

¹Nantes Université, ENSA Nantes, École Centrale Nantes, CNRS, AAU-CRENAU, UMR 1563, F-44000 Nantes, France, delafoye@nantes.archi.fr

Résumé. En France, comme ailleurs, de nombreux bâtiments sont démolis dans le cadre de politiques de rénovation urbaine. Les systèmes constructifs de ces bâtiments sont généralement représentatifs de ceux rencontrés dans notre patrimoine immobilier. Un dispositif mécanique, destiné à exciter des bâtiments voués à la démolition, est en phase finale de développement. Il doit permettre de caractériser leur comportement dynamique en leur imposant de fortes accélérations. Les caractéristiques de ce dispositif, les performances visées ainsi que les applications, passées et en cours, dans le cadre du patrimoine architectural construit par Ali Tur en Guadeloupe, sont présentés ici.

ABSTRACT. In France, as elsewhere, many buildings are regularly demolished as part of urban renewal policy. These buildings have constructive systems which usually reflect our real estate holdings. A mechanical device made to excite these buildings before demolition in order to define their dynamic behavior for high acceleration responses is in its final stage of development. Features and target performances of this device as well as past and current applications in the field of architectural heritage built by Ali Tur in Guadeloupe are presented here.

Mots Clés : essais *in situ*, oscillations forcées, démolition, vulnérabilité sismique, patrimoine architectural, Guadeloupe

1. INTRODUCTION

Les fondements théoriques du génie parasismique sont généralement inspirés ou validés par des observations *in situ* ou en laboratoire.

Dans le premier cas, les comportements des bâtiments peuvent être étudiés dans le contexte d'événements sismiques importants mais, pour la plupart des bâtiments, les conséquences sont observées après coup et aucun mouvement du sol ou de la structure n'a pu être mesuré. Les comportements des bâtiments peuvent également être analysés dans le cadre de campagnes de mesure planifiées, soit sous bruit de fond ambiant [1] soit sous oscillations forcées [2-3], mais les oscillations sont généralement de trop faible amplitude pour être représentatives de celles provoquées par des séismes forts [4]. Alors que le récent laboratoire mobile [nees@UCLA](mailto:nees@ucla.edu) permet théoriquement de produire des réponses en accélération de l'ordre de 2 g [5], l'accélération maximale produite sur un bâtiment en béton armé de quatre

étages n'était que de 0,09 g [6], ce qui est bien inférieur aux accélérations pouvant être rencontrées dans les zones de forte sismicité.

Dans le second cas, les essais sont des reproductions imparfaites des phénomènes physiques (essais à échelle réduite reproduisant très imparfaitement les phénomènes à l'échelle 1 ou essais en vraie grandeur sur des structures « neuves » ne permettant pas de prendre en compte les conditions de production ni le vieillissement des matériaux propres aux bâtiments existants) mais les protocoles expérimentaux permettent de mieux contrôler et mesurer les phénomènes physiques.

Le projet de recherche C1SMA (Constructions à l'échelle 1 Instrumentées soumises à un Séisme Modéré Artificiel), initié en 2014 grâce à un cofinancement de l'INSA-Marseille et de la région PACA, est une combinaison des deux approches : il vise à reproduire les effets de fortes vibrations du sol sur des bâtiments réels tout en bénéficiant de conditions de laboratoire. Des bâtiments voués à la démolition sont ainsi instrumentés et soumis à des oscillations d'amplitude croissante à l'aide d'un dispositif d'excitation reproduisant à chaque étage les forces d'inertie qui seraient générées par une accélération au niveau du sol. Avant et/ou après démolition complète du bâtiment, des prélèvements doivent permettre de mieux caractériser (qualitativement par relevés visuels et quantitativement par essais en laboratoire) la nature du système de contreventement qui a été sollicité.

Si le champ d'application du dispositif C1SMA est théoriquement large, les applications envisagées actuellement concernent l'évaluation, aussi précise que possible, de la vulnérabilité sismique du patrimoine architectural construit par l'architecte Ali Tur en Guadeloupe entre 1931 et 1937. L'objectif est de valoriser ses capacités de résistance aux charges horizontales cycliques afin de réduire les quantités de renforcements (habituellement coûteux et invasifs) nécessaires à la mise en sécurité des occupants et, in fine, contribuer à la préservation et à la valorisation du patrimoine architectural guadeloupéen.

2. DESCRIPTION GÉNÉRALE DU DISPOSITIF D'EXCITATION

2.1 Principe de l'excitation par balourds

Le dispositif d'excitation consiste à équiper chaque dalle du bâtiment étudié de deux balourds tournant de manière contrarotative. Ainsi, chaque étage est soumis à une force sinusoïdale unidirectionnelle (figure 2.1), dont l'intensité dépend du rayon de rotation, de la pulsation et de la masse, comme le rappelle l'équation (1).

$$F(t) = 2mR\omega^2 \cdot \sin(\omega t) \quad [1]$$

Les axes de rotation sont situés de telle sorte que le point d'application de la force résultante (F) corresponde au centre de gravité du bâtiment. Si les dalles remplissent tous les critères leur permettant d'être considérées comme des diaphragmes rigides, l'excitation produite par les balourds peut alors être considérée comme analogue aux forces d'inertie qui seraient produites par des accélérations sinusoïdales du sol.



Figure 2.1: force exercée par une paire de balourds à chaque étage

Plusieurs modes propres peuvent éventuellement être alternativement excités (voire combinés) en faisant varier la fréquence de rotation ainsi que les masses (ou rayons de rotation) des balourds à chaque étage.

2.2 Performances visées

Le tableau 2.1 présente, pour différents nombres d'étages (n), les réponses attendues en termes d'accélération (a) et de déplacement (d) au sommet du bâtiment, ainsi que certaines des données utilisées pour le dimensionnement du dispositif : période fondamentale (T_0), rayon de rotation de chacun des 2n balourds (M.R), force exercée par chaque paire de balourds (F), couple de torsion maximal appliqué à chaque arbre d'entraînement vertical au rez-de-chaussée (T), puissance minimale fournie par le moteur (P).

Tableau 2.1 : réponses visées et données utilisées pour le pré-dimensionnement du dispositif

n	T_0 (s)	M.R (kg.m)	F (kN)	T (kN.m)	P (kW)	a (g)	d (cm)
1	0,07	7	60	41	8	0,6	0,07
2	0,13	26	62	317	30	0,75	0,3
,3	0,2	39	43	477	30	0,55	0,6
5	0,3	72	26	758	30	0,35	1
,10	0,7	142	13	1404	30	0,18	2

Les estimations précédentes sont basées sur les hypothèses suivantes : masse totale d'un étage égale à 200 tonnes, amortissement de 5%, période propre fondamentale égale à $n/15$.

3. DESCRIPTION TECHNIQUE

3.1 Description générale du système mécanique

Le dispositif mécanique, conçu pour être facilement monté et démonté, y-compris par une personne seule, est essentiellement composé des éléments suivants :

- Un moteur asynchrone, commandé par un variateur de vitesse, est relié à deux arbres d'entraînement horizontaux par l'intermédiaire d'un renvoi d'angle. Ces éléments sont posés sur le sol du rez-de-chaussée du bâtiment.
- Deux arbres d'entraînement verticaux sont connectés aux arbres horizontaux par deux renvois d'angle. Ces arbres traversent tous les étages auxquels ils sont reliés par des paliers.
- À chaque étage, deux balourds sont entraînés par les arbres verticaux. Deux modèles de balourds sont considérés. Les "lents", utilisés pour les bâtiments hauts de fréquences propres de 1 à 3 Hz, supportent des masses de 100 à 200 kg excentrées de 1 mètre. Les "rapides", utilisés pour les bâtiments de fréquences propres de 4 à 15 Hz, sont constitués d'une structure en acier supportant des masses de 20 à 40 kg excentrées de 0,3 mètre.

3.2 Motorisation

Tous les balourds sont entraînés par un seul moteur électrique triphasé. Deux gammes de vitesse de rotation peuvent être obtenues par des réducteurs interchangeable. Pour chaque configuration, la fréquence d'excitation peut être ajustée par un variateur de vitesse. La puissance nominale du moteur est de 30 kW.

3.3 Arbres d'entraînement verticaux

Les deux arbres verticaux sont constitués d'une succession de ronds et de tubes en acier connectés par des assembleurs expansibles. Ce type de liaison permet de transmettre des couples élevés mais aussi d'adapter le dispositif à une large gamme de hauteurs d'étages.

Les connexions entre arbres verticaux et balourds sont aussi réalisées par des assembleurs expansibles et chaque liaison entre un arbre vertical et une dalle est réalisée par une paire de paliers.

3.4 Instrumentation

L'instrumentation actuellement utilisée pour caractériser le comportement dynamique du bâtiment avant, pendant et après l'excitation mécanique est composée de deux sismomètres tri axiaux CMG-40T, destinés à la mesure des vibrations ambiantes, avant et après l'excitation mécanique et 8 accéléromètres mono axiaux (sensibilité de 1 V/g) destinés à la mesure des accélérations des planchers sous oscillations forcées.

4. NIVEAU D'AVANCEMENT DU PROJET ET APPLICATIONS PRÉVUES

Le projet de recherche C1SMA a été initié en 2014. Un premier financement de l'INSA Marseille et de la région PACA a permis de concevoir et réaliser un premier prototype du dispositif ainsi que se doter de chaînes d'acquisition de sismométrie et d'accélérométrie. Le dispositif d'excitation a d'abord été assemblé et testé avec succès en décembre 2018 sur une structure en bois construite à cet effet dans les locaux de l'INSA Nantes (figures 4.1 et 4.2).



Figures 4.1 et 4.2 : premier montage du dispositif d'excitation à l'INSA Nantes

Il a été installé pour la première fois sur un bâtiment réel en août 2020 et une deuxième fois en juin 2021. Ces deux tests ont été financés par la Direction des Affaires Culturelles (DAC) de Guadeloupe et ont été réalisés sur l'ancienne école Sainte Geneviève (bâtiment de plain-pied) située à Petit-Canal (Guadeloupe) et vouée à la démolition. Ce bâtiment, comme une centaine d'autres, a été construit par l'architecte Ali Tur dans les années 1930 à la suite des énormes dégâts causés par le cyclone de 1928. Comme tous les bâtiments d'Ali Tur ont été construits à la même époque et avec le même système constructif (ossature en béton armé

avec remplissage en agglomérés de béton), les essais effectués sur certains d'entre eux pourraient permettre d'améliorer l'évaluation du comportement sous séisme des autres.

L'objectif des essais (passés et futurs) sur ce bâtiment est double : (1) finaliser le développement du dispositif d'excitation C1SMA ; (2) caractériser le comportement mécanique du système de contreventement du bâtiment sous des charges cycliques élevées.

Les essais réalisés en 2020 et 2021 ont permis de mesurer une réponse en accélération de 0,15 g sur le toit du bâtiment. Deux problèmes ont empêché d'atteindre des accélérations plus élevées. Le premier, relatif à l'ancrage des paliers dans la dalle creuse en béton, a été résolu. Le second concerne un défaut d'alignement des arbres d'entraînement verticaux et les vibrations parasites produites à partir d'une vitesse de rotation de l'ordre de 10 Hz alors que la fréquence propre fondamentale visée dans la direction transversale est d'environ 14 Hz.



Figures 4.3 et 4.4 : ancienne école St^e Geneviève à Petit-Canal (Guadeloupe) et un des accéléromètres utilisés fixé sur l'une des deux poutres en croix d'une salle de classe.



Figures 4.5 et 4.6 : balourds en rotation sur le toit de l'école et moteur (à gauche), arbres horizontaux, renvois d'angles et arbres verticaux dans une des deux salles de classe du rez-de-chaussée (à droite).

De nouvelles pièces mécaniques ont été conçues et fabriquées en 2022 afin de simultanément réduire le désalignement des arbres d'entraînement verticaux et augmenter leur rigidité latérale. Un banc d'essai installé dans les locaux de l'INSA Nantes a permis d'en valider l'efficacité « à blanc ». Les prochains essais en Guadeloupe, à nouveau financés par la DAC de Guadeloupe, auront lieu en mars 2023. Des réponses en accélérations significativement plus élevées sont attendues : de 0,4 à 0,6 g. Ces accélérations, si elles étaient atteintes, seraient donc comparables à l'accélération imposée par le cadre réglementaire pour les

bâtiments neufs en Guadeloupe et largement supérieures à celles appliquées aux bâtiments existants dans le cas de « travaux lourds ».

En cas de tests concluants, il sera possible d'envisager de nouvelles perspectives pour l'évaluation sismique et la sauvegarde à faible coût du patrimoine architectural guadeloupéen, et, plus généralement, français. Cela nécessitera la mise en place d'un cadre théorique spécifique permettant « d'extrapoler » les données expérimentales obtenues sur quelques bâtiments à d'autres bâtiments dont le système de contreventement est similaire.

5. CONCLUSION

Un nouveau dispositif mécanique est en cours de développement depuis 2014. Les deux premiers essais in situ ont été réalisés en 2020 et 2021 afin de poursuivre son développement et, par la même occasion, caractériser le comportement mécanique d'un bâtiment guadeloupéen des années 30 conçu par l'architecte Ali Tur. Ces essais ont permis d'atteindre une réponse en accélération de 0,15 g en toiture. La prochaine campagne d'essai aura lieu en mars 2023. Des accélérations de 0,4 à 0,6 g sont espérées. Au-delà, l'objectif est la mise en place de nouvelles méthodes d'évaluation du comportement sismique des bâtiments existants pouvant contribuer, à moindre coût et de manière non invasive, à la sauvegarde du patrimoine architectural situé en zone de forte sismicité.

6. REMERCIEMENTS

Nous remercions l'INSA-Marseille et la région Sud (anciennement PACA) pour l'aide financière et le soutien logistique qui ont permis d'initier ce projet de recherche.

Nous remercions également la DAC de Guadeloupe qui finance et soutient le projet depuis 2019 et la mairie de Petit-Canal qui a la gentillesse de mettre à disposition l'ancienne école S^{te} Geneviève et fournir l'aide logistique nécessaire.

7. REFERENCES

- [1] Ivanovic SS, Trifunac MD, Novikova OI, Gladkov AA, Todorovska MI, (2000). Ambient vibration tests of a seven-story reinforced concrete building in Van Nuys, California, damaged by the 1994 Northridge earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19:391-411
- [2] Hans S., Boutin C., Ibrahim O., Roussillon P. (2005). In situ experiments and seismic analysis of existing buildings. Part 1: Experimental investigations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34:1513-1529
- [3] Hans S., Boutin C., Ibrahim O., Roussillon P. (2005). In situ experiments and seismic analysis of existing buildings. Part 2: seismic integrity threshold. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34:1531-1546
- [4] Trifunac, M.D, (1972) Comparisons between ambient and forced vibration experiments. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1:133-150
- [5] Nigbor R.L., Wallace J.W., Stewart J.P., (2012) Capabilities of the NCS@UCLA Mobile Dynamic Structural Testing Laboratory. *Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*
- [6] Yu O., Skolnic D., Whang D.H., Wallace J.W. (2008) Forced Vibration Testing of a Four-Story Reinforced Concrete Building Utilizing the nees@UCLA Mobile Field Laboratory. *Center for Embedded Network Sensing*, 24:4