

Modélisation et investigation expérimentale des églises du Monastère Cozia, Roumanie

Alexandru Aldea
*Université technique de constructions
Bucarest*
Bucarest, Roumanie
<https://orcid.org/0000-0001-8220-3685>

Daniel Bîtcă
*Université technique de constructions
Bucarest*
Bucarest, Roumanie
<https://orcid.org/0009-0003-1415-3913>

Etienne Bertrand
*Université Gustave Eiffel
Marne-la-Vallée, France*
<https://orcid.org/0000-0003-2112-0450>

Mihael-Iulian Theodorescu
S.C. Ideea Proiect Consulting S.R.L.
Bucarest, Roumanie
mihael.theodorescu@ideeaproiect.ro

Aurora Târsoagă
S.C. Credo Design S.R.L.
Bucarest, Roumanie
aurora.tarsoaga@credodesign.ro

Résumé — L'article présente une étape fondamentale de l'évaluation sismique des deux églises du Monastère Cozia (département Vâlcea, Roumanie) : la construction d'un modèle en éléments finis validé par une investigation expérimentale (mesures de vibrations ambiantes).

Mot-clés — monastère Cozia, vibrations ambiantes, modélisation

I. INTRODUCTION

Un des plus célèbres monastères orthodoxes de Roumanie, le Monastère de Cozia est situé au sud de la chaîne des montagnes Carpathes méridionaux, au bord de la rivière Olt, département de Vâlcea, Roumanie. Le Monastère dans son ensemble fait partie des Monuments Historiques de Roumanie (département de Vâlcea, code VL-II-a-A-09697). L'église de la Sainte-Trinité qui est l'église principale est aussi Monument Historique à titre individuel (département de Vâlcea, code LMI VL-II-m-A-09697.01). Sa fondation date probablement de 1388, avec des interventions d'agrandissement en 1705-1707 [1], Fig. 1.



Fig. 1. Église de la Sainte-Trinité, Monastère de Cozia.

Plusieurs autres composantes du Monastère sont également des Monuments Historiques, y compris une deuxième église : l'église des Saints Apôtres (code VL-II-m-A-09697.05) datant de 1542-1543 [1], Fig.2.

Une étude générale pluridisciplinaire a été lancée en 2023 sous la coordination de S.C. Credo Design S.R.L., faisant intervenir plusieurs partenaires (architectes, historiens, artistes, ingénieurs, etc.). Une composante importante de l'étude concerne l'évaluation sismique des deux églises et l'élaboration des propositions pour leur mise en sécurité.



Fig. 2. Église des Saints Apôtres, Monastère de Cozia.

La présente contribution introduit une partie de cette composante sismique de l'étude : la construction d'un modèle en éléments finis validé par une investigation expérimentale (mesures de vibrations ambiantes).

II. MESURES DE VIBRATIONS AMBIANTES

A. L'approche expérimentale et ses applications

Les mesures de vibrations ambiantes (de faibles amplitudes) et leur analyse peut conduire à l'identification des paramètres qui caractérisent le comportement dynamique des constructions dans le domaine linéaire-élastique. Les résultats d'une telle analyse représentent un témoin objectif du comportement in situ de la construction et peuvent être utilisés pour (i) le calibrage du modèle de calcul, (ii) le jugement d'expert sur le comportement d'ensemble de la construction, (iii) la comparaison des caractéristiques dynamiques avec celles après un séisme ou après la réhabilitation sismique.

Les mesures de vibrations ambiantes (méthode robuste, objective et à un prix accessible) sont devenues populaires dans les dernières décennies, en étant utilisées pour toutes les typologies de constructions, y compris pour des monuments historiques (par exemple [2], [3], [4]). En Roumanie cette approche a été utilisée dans le cadre des études d'évaluation sismique (par exemple [5], [6], [7]).

B. Les mesures in situ

Les mesures de vibrations ambiantes sur les deux églises du Monastère Cozia ont été réalisées en juillet 2023, dans des schémas d'enregistrement simultané avec 6 capteurs de vitesses, sur les directions longitudinale et transversale des églises. Des enregistrements sur sol ont également été

effectués, dans le voisinage de chaque église, avec un capteur de vitesse tri-directionnel et de large bande de fréquences. L'équipement utilisé (Fig.1), de fabrication japonaise (Buttan Service-Tokyo & Tokyo Soil Research Co., Ltd.), française (Laboratoire d'Électronique Angelidis et Sarraut, Saint Ismier) et allemande (Lennartz Electronic GmbH) appartient au Centre de recherche Évaluation du risque sismique de l'Université technique de constructions de Bucarest.



Fig. 3. Équipements pour la mesure de vibrations ambiantes.

La Fig. 4 présente un exemple d'enregistrements de vibrations ambiantes sur la direction longitudinale de l'église de la Sainte-Trinité. La fréquence d'échantillonnage des enregistrements est de 100Hz.

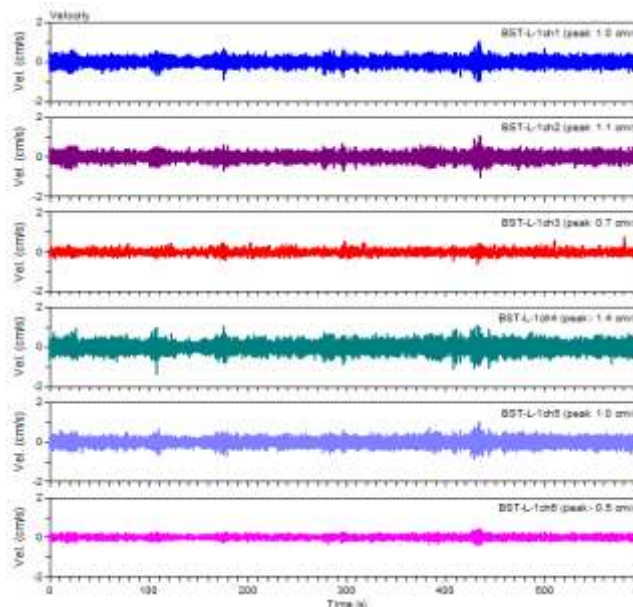


Fig. 4. Exemple d'enregistrements sur la direction longitudinale de l'église de la Sainte-Trinité.

C. L'interprétation des mesures

L'objectif principal de l'analyse des enregistrements de vibrations ambiantes étant l'identification des fréquences propres, une méthode d'analyse fréquemment utilisée est la Peak Picking Method (PP). Dans cette approche, dans le domaine des fréquences, les pics des spectres correspondent aux fréquences modales de la structure. Les pics sont identifiés en utilisant les spectres Fourier d'amplitude, les densités spectrales de puissance, les spectres croisés, etc. et l'identification permet une bonne estimation des fréquences modales (par exemple [8], [9], [10], [11], [12], [6]).

Fig. 5 et Fig. 6 donnent des exemples de spectres de Fourier d'amplitudes correspondant aux enregistrements des vibrations ambiantes dans les deux églises, selon leur direction longitudinale.

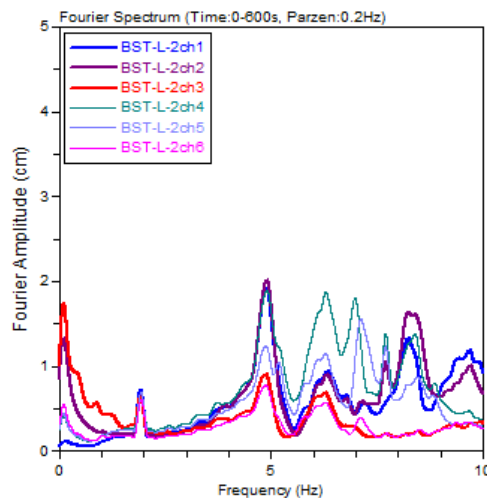


Fig. 5. Spectres Fourier d'amplitudes correspondant aux enregistrements sur la direction longitudinale de l'église de la Sainte-Trinité.

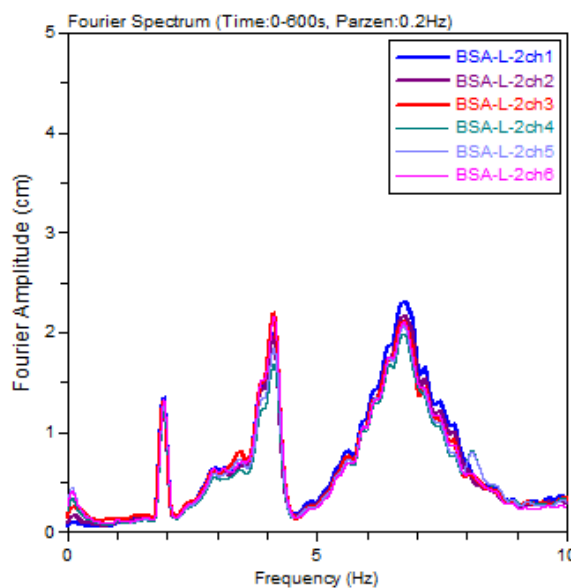


Fig. 6. Spectres Fourier d'amplitudes correspondant aux enregistrements sur la direction longitudinale de l'église des Saints Apôtres.

Un pic étroit et très net est présent à une fréquence de 1,92 Hz, pour les deux églises. Il est cependant très peu probable, voir presque impossible, que deux églises différentes (âge, architecture, système constructif, dimensions, etc.) soient caractérisées par une même fréquence fondamentale de vibration. L'explication de l'existence de ce pic a été donnée par les mesures de vibrations ambiantes sur le sol, à côté des deux églises. Ces enregistrements sur sol ont en effet également présenté des spectres ayant un pic clair à 1,92 Hz (Fig. 7 et Fig. 8), donc cette fréquence n'est pas caractéristique de la vibration des églises, mais elle est due à une source d'excitation locale qui induit des vibrations à cette fréquence. La source a été

identifiée comme étant celle de la turbine de l'hydrocentrale Turnu située en amont sur la rivière Olt à ~1300m. La turbine a une vitesse nominale de 115,4 rotations par minute, qui correspond précisément à 1,92Hz, la fréquence identifiée par mesures.

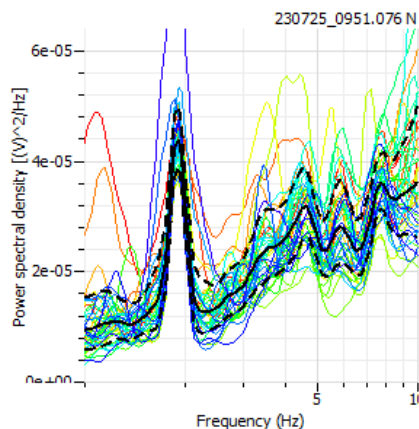


Fig. 7. Densités spectrales de puissances correspondant à des échantillons de l'enregistrement sur sol, direction longitudinale, au site de l'Église de la Sainte-Trinité.

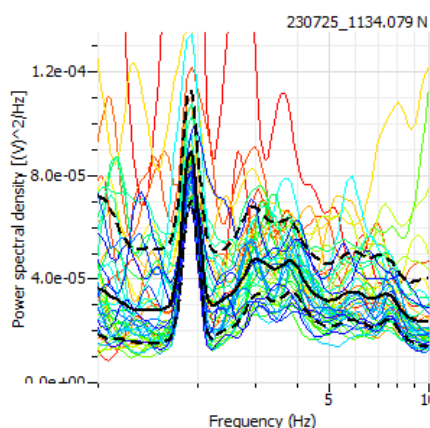


Fig. 8. Densités spectrales de puissances correspondant à des échantillons de l'enregistrement sur sol, au site de l'église des Saints Apôtres.

III. LA MODELISATION DES STRUCTURES DES EGLISES

La construction du modèle numérique est faite à partir des relevés d'architecture et de l'identification du système structural, des matériaux de constructions et de leurs caractéristiques. Les logiciels SAP2000 et Perform 3D (Computers and Structures, Inc., États-Unis), utilisant des éléments finis de type coque et poutres, ont été utilisées. À chaque élément, en fonction du matériau de construction et de ses caractéristiques de comportement, des lois de comportement spécifiques ont été choisies afin de modéliser leur comportement linéaire et non-linéaire. Les structures ont été considérées comme encastées dans un sol rigide non-déformable.

Les modèles numériques ont été utilisés pour l'analyse modale qui identifie les caractéristiques de vibration élastique des structures (i.e. les fréquences modales, les déformées modales, etc.). Ces résultats de l'analyse modale ont été comparés avec les résultats de l'analyse des mesures de vibrations ambiantes et un calibrage des modèles a été

réalisé afin d'avoir des résultats numériques proches de ceux des expérimentaux.

Fig. 9 présente le modèle par éléments finis de l'église de la Sainte-Trinité et Fig. 10 celui de l'église des Saints Apôtres.

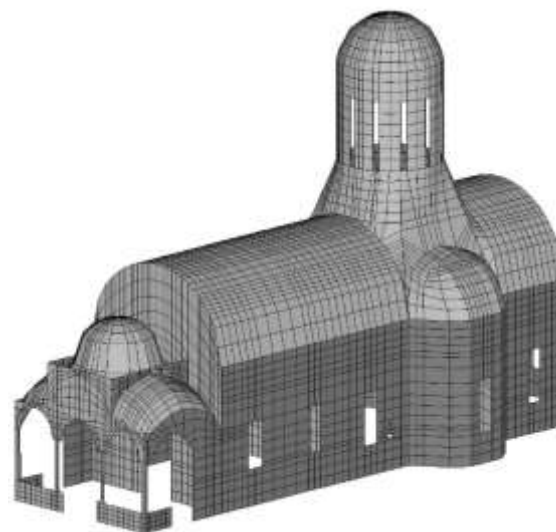


Fig. 9. Modèle par éléments finis l'église de la Sainte-Trinité.

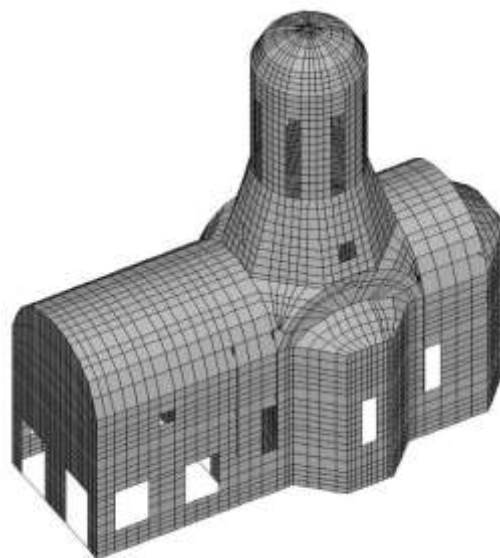


Fig. 10. Modèle par éléments finis l'église des Saints Apôtres.

La comparaison entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux en termes des deux premières périodes modales sur les directions longitudinale et transversale est présenté dans le Tableau I pour l'église de la Sainte-Trinité et dans le Tableau 2 pour l'Église des Saints Apôtres.

Les résultats numériques et expérimentaux sont en bon accord et les modèles des deux églises ont ainsi une validation expérimentale.

Tableau 1 : Périodes propres numériques et expérimentales
– Église de la Sainte-Trinité

Période modale	Direction longitudinale		Direction transversale	
	Num.	Exp.	Num.	Exp.
T ₁ (s)	0,25	0,21	0,25	0,26
T ₂ (s)	0,17	0,16	0,18	0,19

Tableau 2 : Périodes propres numériques et expérimentales
– Église des Saints Apôtres

Période modale	Direction longitudinale		Direction transversale	
	Num.	Exp.	Num.	Exp.
T ₁ (s)	0,26	0,24	0,29	0,29
T ₂ (s)	0,15	0,15	0,19	0,18

La modélisation par éléments-finis est une étape importante pour l'évaluation sismique des structures en permettant des simulations qui donne des prédictions de l'endommagement possible due à des différents niveaux de la sollicitation sismique. Ces simulations portent la structure et les éléments de structure dans le domaine non-linéaire de comportement.

IV. CONSIDERATIONS FINALES

La célébrité et la beauté du monastère ont attiré au fil du temps l'attention des voyageurs étrangers, comme l'artiste français Dieudonné Auguste Lancelot, Fig.11.



Fig. 11. Une fontaine à Cozia [13].

Les constructions qui composent le Monastère ont souffert au court de leur longue existence de causes naturelles et anthropiques.

Trois interventions de sauvegarde ont eu lieu en 20^e siècle [1] : 1928-1936 réparations et restauration, 1958-1961 restauration et 1984 renforcement sismique et restauration.

La mise en sécurité face à l'action sismique, la conservation et la restauration des œuvres d'art (peinture murale, détails d'architecture, etc.) du Monastère Cozia est une action de grande importance pour la protection du patrimoine national culturel et historique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le personnel du Monastère Cozia pour leur soutien pour le déroulement des opérations nécessaires pour la réalisation des relevés d'architecture, des investigations de la structure, des matériaux et pour les mesures de vibrations ambiantes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. Moldovan, I. Tulbure (2023). Etude historique et architectural pour l'évaluation culturelle [...] Monastere Cozia, Rapport H.M.S. ARCHITECTURE S.R.L., Bucarest, pour SC CREDO DESIGN S.R.L., Bucarest.
- [2] L. Krstevska, L., Tashkov, & V. Shendova (2012). Ambient Vibration Testing of Historical Monuments within Monastery Complex "St. Mary Perivleptos" in Ohrid, 15World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa
- [3] T. Salonikios, N. Theodoulidis, K. Morfidis, G. Zacharopoulou, K. Raptis (2018). Efficiency investigation of structural interventions based on in situ ambient vibration measurements on Acheiropoietos Early Byzantine basilica, Thessaloniki, Greece, Journal of Civil Structural Health Monitoring (2018) 8:135-149, <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0262-3>
- [4] C. Spyarakos, Fr. Alessio, K. Panagiotis, P. (2013). Stavros, Seismic Evaluation of the Historic Church of St.Nicholas in Piraeus Before and after Interventions, COMPDYN 2013, 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, M. Papadrakakis, V. Papadopoulos, V. Plevris (eds.), Kos Island, Greece
- [5] D. Lungu, G. Solari, R. Vacareanu, A. Aldea, C. Arion, S. Demetriu, (2005). Ambient vibration measurements and along-wind response of the Brancusi Endless Column, Romania, EACWE4 - The Fourth European & African Conference on Wind Engineering, Abstract Volume, p.214-215 & CD-ROM,10p., Naprsteck & Fisher Ed.
- [6] A. Aldea, C. Neagu, E. Lozinca, S. Demetriu, S.M. El-Amine Bourdim, F. Turano (2018). Toward the Seismic Evaluation of "Carol I" Royal Mosque in Constanța. In: Vacareanu R., Ionescu C. (eds) Seismic Hazard and Risk Assessment. Springer Natural Hazards. Springer, Cham
- [7] A. Aldea, S. Demetriu, C. Neagu, L. Sonia, L. (2015). Identification des caractéristiques dynamiques du bâtiment du Musée National d'Histoire de Roumanie (en roumain), Contrat nr. 224 / 2015Université technique de constructions Bucarest
- [8] M. Iiba, M. Watakabe, A. Fujii, S. Koyama, S. Sakai, K. Morita, K. (2004). A Study on Dynamic Soil Structure Interaction Effect Based on Microtremor Measurements of Building and Surrounding Ground Surface, Building Research Institute, Tsukuba, Japan, 17p.
- [9] M.D. Kohler, P.M. Davis, E. Safak, E. (2005). Earthquake and Ambient Vibration Monitoring of the Steel-Frame UCLA Factor Building. Earthquake Spectra, Vol. 21, No. 3, 715-736.
- [10] R. Ditommaso, M. Vona, M. Mucciarelli, A., Masi, A. (2010). Identification of building rotational modes using an ambient vibration technique, Proceedings of 14th European Conference on Earthquake Engineering, Ohrid, Macedonia, 9p.
- [11] S. Demetriu, A. Aldea, A. Udrea, (2012). Modal parameters of a RC frame structure identified from ambient vibration measurements, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
- [12] Y-J Cha, P. Trocha, O. Büyükoztürk, (2016). Field Measurement-Based System Identification and Dynamic Response Prediction of a Unique MIT Building, Sensors, vol.16, no. 1016, 24p.
- [13] D. A. Lancelot (1868). Le Tour du Monde, Premier semestre, p.294