

Détection de défauts dans les structures en béton armé par analyse de réponse vibratoire

Annexe scientifique

Raphaël Carpine

11 avril 2019

1 Contexte

Pour répondre au besoin accru de surveillance des ouvrages d'art et infrastructures vieillissantes, l'étude du comportement vibratoire des structures se présente comme un moyen peu onéreux de contrôle de leur état de dégradation. Cette méthode permet de plus un suivi de l'ouvrage continu dans le temps, contrairement aux méthodes plus classiques d'inspection visuelle, et ainsi une réaction plus rapide face à un éventuel endommagement. Elle s'impose ainsi comme une solution à envisager, et donc à étudier.

De nombreuses études portent sur la détection d'endommagement par analyse vibratoire, avec des approches classiques comme l'analyse des fréquences propres ou des déformées modales, ou plus modernes comme la transformée en ondelettes⁵. Cette dernière, particulièrement adaptée à l'analyse de signaux non stationnaires⁵, se prête très bien aux problèmes dont les paramètres peuvent être modifiés par des effets extérieurs, comme la température ou l'hygrométrie pour les ouvrages d'art par exemple. Des travaux ont déjà été faits sur l'application de cet outil, sur des poutres et câbles sous tension notamment, utilisant simultanément les déformées modales³, ou non¹. Son utilisation sur des structures en béton armé reste cependant très peu étudiée.

L'enjeu de cette thèse est donc de mettre en évidence une méthodologie permettant la détection de défauts dans les structures en béton armé, notamment grâce à l'utilisation de la transformée en ondelettes.

2 Pistes et verrous scientifiques

2.1 Effets contribuant à la modification du comportement dynamique de la structure

La première étape, pour l'étude de l'endommagement par réponse vibratoire, est de déterminer la nature et l'intensité des effets sur cette réponse des différents paramètres pouvant changer dans la structure. Il est alors important de distinguer les effets extérieurs, comme la température ou le trafic, des effets provenant des défauts internes à l'ouvrage.

L'intensité et la sensibilité des différents effets sont des paramètres critiques dans cette étude, car ils permettent de déterminer si chaque effet est détectable, et avec quelle précision.

2.1.1 Effets non liés à l'endommagement

Une première piste, pour caractériser les effets de l'environnement de type température ou hygrométrie, est de remarquer que ces effets s'appliquent uniformément à la structure, et auront ainsi des conséquences de nature différente sur les déformées modales de celles provenant d'un effet local comme une large fissure par exemple.

2.1.2 Effets liés à l'endommagement

On peut en premier lieu considérer les effets liés à l'endommagement n'entraînant pas au niveau local des comportements non linéaires, comme la perte de masse ou la corrosion. Ces effets n'entraîneront donc pas à priori de non linéarités dans la réponse de la structure, mais se démarquent des effets cités dans la partie précédente par leur nature potentiellement locale (corrosion du béton sur une partie de la structure par exemple). Ainsi, les modifications qu'ils entraînent sur le comportement vibratoire de l'ouvrage peuvent être de nature différente, rendant la discrimination entre ces deux types d'effets possible.

Par ailleurs, certains effets peuvent entraîner des comportements non linéaires au niveau local, comme la fissuration par ouverture et fermeture des fissures en traction-compression par exemple. Cela se traduit alors par un comportement non linéaire de l'ouvrage, qui, en plus des effets cités dans le paragraphe précédent, permet de les discriminer d'effets extérieurs.

2.1.3 Réponse au trafic, vent

Enfin, un point délicat de la modélisation du comportement vibratoire de la structure est l'influence de trafic routier (ou ferroviaire), qui agit à la fois comme une source d'excitation, et comme une masse ajoutée à l'ouvrage variable. Si l'excitation apportée par un trafic relativement constant peut être vue comme un bruit, certains événements plus influents, comme le passage d'un poids lourd ou d'un train, pourraient être traités plus précisément en tant que sources ponctuelles. Ce sujet est abordé dans la littérature².

Le vent est également une source d'excitation pour la structure, pouvant avoir pour origine des phénomènes de couplage, qu'il conviendra de caractériser.

2.2 Techniques d'identification modale

Après avoir prédit le comportement vibratoire de la structure étudiée, il reste à choisir les outils les plus adaptés à la détermination de ses paramètres et à la discrimination entre effets extérieurs et effets dus à l'endommagement. Pour suivre l'évolution de l'état de dégradation de l'ouvrage, il convient d'appliquer ces outils sur plusieurs échantillons de la réponse de l'ouvrage espacés dans le temps, à quelques années d'intervalle par exemple. Ainsi, l'apparition de phénomènes d'endommagement sera bien plus aisée à détecter qu'à partir d'une seule mesure.

La première étape de cette étude vibratoire est la séparation des différents modes de la structure.

2.2.1 Fréquences propres et déformées modales

La première approche est l'étude des fréquences propres de la structure grâce à la transformée de Fourier de son évolution temporelle. Elle présente l'avantage d'être très largement étudiée et maîtrisée, mais ne se prête pas à l'analyse des signaux non stationnaires. En effet, un changement

du trafic pendant la mesure par exemple entraînera un changement de l'inertie de la structure et donc de ses modes, puis des résultats imprécis dans le calcul de la transformée de Fourier.

On peut également envisager une décomposition en déformées modales par la suite, qui pourra apporter une information supplémentaire sur la localisation spatiale des défauts.

2.2.2 Transformée en ondelette

La transformée en ondelettes semble montrer de bonnes propriétés pour ce type de problème. En effet, elle est adaptée à l'analyse de signaux non stationnaires, et apportera donc une information beaucoup plus précise qu'une simple transformée de Fourier. De plus, la décomposition en déformées modales est également possible avec cette transformée, permettant ainsi l'accès à une information spatiale supplémentaire.

2.3 Détection de l'endommagement

Après séparation des différents modes de vibration, il reste à déterminer la présence éventuelle de défauts. Pour cela, plusieurs approches sont possibles à nouveau.

2.3.1 Méthodes classiques

Une première approche consiste à utiliser uniquement la transformée de Fourier et la projection sur les déformées modales. Elle présente l'inconvénient de ne pas être adaptée aux signaux non stationnaires.

Si plusieurs échantillons sont pris à différentes étapes de la vie de l'ouvrage, on peut tenter de caractériser la dérive de ses fréquences propres et de leur amortissement, puis d'en tirer des informations relatives à l'évolution de son état¹.

Le même travail peut être effectué avec les déformées modales, avec l'avantage dans ce cas d'avoir des informations plus précises sur la géométrie de la réponse³.

Enfin, en projetant la réponse sur les différentes déformées, on peut détecter la présence de non linéarités par la présence d'harmoniques dans la transformée de Fourier de l'une de ces projections.

2.3.2 Utilisation de l'ondelette pour des phénomènes non linéaires

La transformée en ondelette présente l'avantage d'être particulièrement adaptée aux signaux non stationnaires, et permet donc d'explorer les pistes évoquées dans la partie précédente en s'affranchissant des problèmes d'imprécision induits par la non stationnarité.

De plus, elle permet de mieux caractériser les comportements non linéaires, avec la possibilité de déterminer une raideur et un amortissement équivalents en fonction de l'amplitude du mode⁴.

Références

- [1] T.-T.-H. Le, N. Point, P. Argoul, and G. Cumunel. Structural changes assessment in axial stressed beams through frequencies variation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 110 :41 – 52, 2016. ISSN 0020-7403. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.02.008>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740316000679>.

- [2] S. Marchesiello, S. Bedaoui, L. Garibaldi, and P. Argoul. Time-dependent identification of a bridge-like structure with crossing loads. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(6) :2019 – 2028, 2009. ISSN 0888-3270. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.01.010>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327009000107>. Special Issue : Inverse Problems.
- [3] G. Ruocci, G. Cumunel, T. Le, P. Argoul, N. Point, and L. Dieng. Damage assessment of pre-stressed structures : A svd-based approach to deal with time-varying loading. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 47(1) :50 – 65, 2014. ISSN 0888-3270. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.09.011>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327013004986>. MSSP Special Issue on the Identification of Time Varying Structures and Systems.
- [4] N. Vacca, C. Rouzaud, G. Herve-Secourgeon, M. Galan, P. Argoul, and C. Rospars. Characterization of dissipative behaviour of a reinforced concrete mock-up after soft impact tests through wavelet analysis. In *40th IABSE Symposium Tomorrow's Megastructures*, page 8 p., NANTES, France, September 2018. International Association for Bridge and Structural Engineering - IABSE. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01904708>. 40th IABSE Symposium Tomorrow's Megastructures, NANTES, FRANCE, 19-/09/2018 - 21/09/2018.
- [5] Y.J. Yan, L. Cheng, Z.Y. Wu, and L.H. Yam. Development in vibration-based structural damage detection technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(5) :2198 – 2211, 2007. ISSN 0888-3270. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.10.002>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327006002226>.