

# Apport de l'analyse vibratoire dans le cadre du suivi de structure de génie civil

<sup>1</sup>V. Garnier, <sup>1</sup>J. Eiras, <sup>2</sup>A. Splavier, <sup>1</sup>S. Rakotonarivo, <sup>3</sup>B. Piwakowski, <sup>1</sup>C. Payan

<sup>1</sup>LMA UMR7031, AMU, CNRS, Centrale Marseille, France

<sup>2</sup>Universidad de la Republica, Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay

<sup>3</sup>Ecole Centrale de Lille, Villeneuve d Ascq, Nord FRANCE

## RESUME :

Le contrôle des évolutions des propriétés du béton ainsi que de son vieillissement sous forme d'endommagements et de fissurations peuvent se faire par des Essais Non Destructifs END d'une façon globale ou/et locale. Des stratégies associant ces deux approches s'imposent avec l'identification ou/et la surveillance de lieux identifiés comme à risque par méthode globale suivi de mesures locales plus précises.

Les approches globales peuvent être appliquées ponctuellement ou dans le cadre du suivi en temps réel. Les projets ENDE et DCND dédiés à la mise en œuvre des END dans le cadre d'évaluation de structures nucléaires, nous ont permis de les développer en fonction d'objectifs déterminés qui sont le suivi de la pression lors d'une visite décennale, l'identification de zones dégradées et la caractérisation de défauts. Pour cela, des techniques d'analyse vibratoire et d'analyse modale linéaire et non linéaire ont été mises en œuvre sur des conteneurs et la maquette VerCoRs d'une enceinte de centrale.

Nous présentons ces développements et proposons une démarche de suivi de structures et d'ouvrages d'arts à longs termes.

**Mots-clefs** END, Analyse vibratoire et modale, Suivi en temps réel, Analyse globale

**Key-words** NDT, Vibration and modal analysis, SHM, Global analysis

## I. INTRODUCTION

Les évolutions des propriétés du béton ainsi que son vieillissement sous forme d'endommagements et de fissurations modifient généralement les capacités de résistance mécanique ou d'étanchéité d'une structure. Les approches pour contrôler un ouvrage de grandes dimensions sont multiples et plus ou moins complexes. Plusieurs voies sont possibles avec des instrumentations ou des essais non destructifs END en réalisant un contrôle de toute la structure, de lieux statistiquement représentatifs du vieillissement ou encore de lieux identifiés comme à risque par un zonage. Des mesures locales peuvent apporter des informations plus précises mais le temps de réalisation et d'exploitation des essais peuvent engendrer un coût élevé. Ce paramètre est déterminant pour choisir la méthode la plus efficace.

Le choix d'une stratégie de suivi global en temps réel d'une structure peut limiter ces coûts et être appliquée en temps réel lors du fonctionnement de la centrale. Pour développer cette approche, il

est nécessaire en premier lieu de tester et de sélectionner les outils adaptés ou/et adaptables et de cerner leurs limites.

Dans le cadre des projets ENDE (Evaluation Non Destructive des Enceintes de confinement) et DCND (Dynamique et Contrôle Non Destructif) dédiés à la mise en œuvre des ENDS dans le cadre d'évaluation de structures nucléaires, nous avons mis en œuvre des approches permettant de comprendre les possibilités de plusieurs types de mesure.

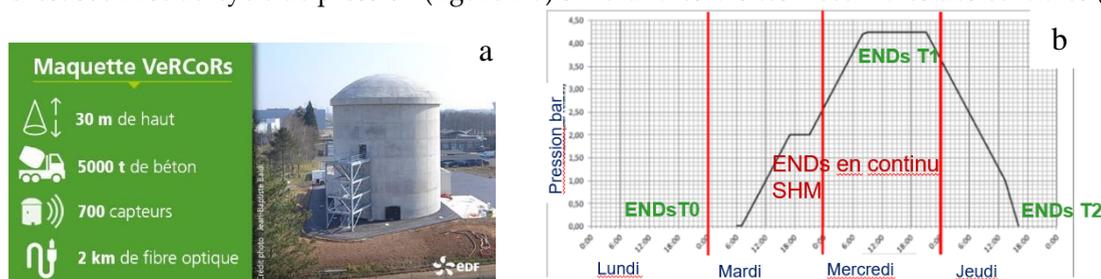
Lors de simulations expérimentales de visites décennales sur la maquette VeRCoRs à l'échelle 1/3 d'une enceinte de confinement (mise en pression à 4.2 bar) et lors de contrôles de conteneurs de stockage de déchets radioactifs, nous avons pu tester le suivi vibratoire ainsi que les analyses modales linéaires et non linéaires des structures.

Nous avons généré des ondes de Lamb se propageant autour du fût de l'enceinte et permettant de suivre la mise en pression. Ce suivi est conforté par l'analyse des vibrations durant le cycle de mise en pression. L'analyse modale réalisée en parallèle montre la possibilité d'identifier les modes de résonance et de simuler numériquement leurs évolutions avec la pression et l'endommagement. Cette approche doit conduire à une démarche de suivi en temps réel de la structure. De plus nous présentons l'analyse modale non linéaire développée sur des conteneurs de stockage qui pourrait être transférée sur une structure de plus grande dimension.

De ces développements, nous proposons, en identifiant les verrous, une démarche de suivi d'une structure à longs termes qui pourraient être envisagée sur les enceintes ou conteneurs du secteur nucléaire mais aussi sur des ouvrages d'art.

## II. CONTRÔLE D'UNE ENCEINTE DE CONFINEMENT

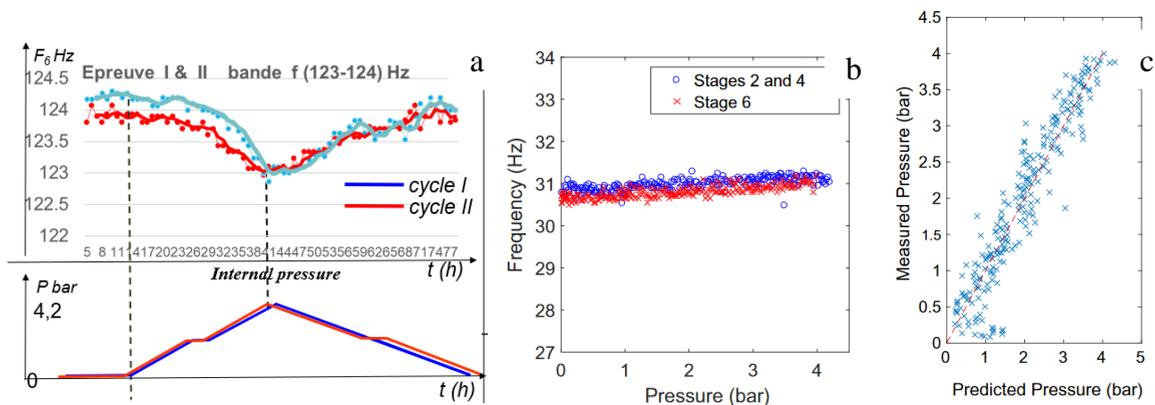
Plusieurs développements ont été réalisés durant le projet ENDE sur la maquette VeRCoRs (figure 1 a). Celle-ci a été réalisée par EDF. Elle est à double parois et à l'échelle 1/3 des enceintes en fonctionnement. Elle a pour objectif de suivre l'évolution de l'étanchéité de l'enceinte lorsque celle-ci est soumise au cycle de pression (figure 1 b) simulant les Visites Décennales des centrales (VD).



**FIGURE 1. Maquette VeRCoRs et cycle de pression lors des Visites Décennales**

Le projet ENDE a pu bénéficier de l'accès à trois VD pour implémenter des ENDS sur site afin de caractériser le béton et de détecter et suivre l'évolution de fissures.

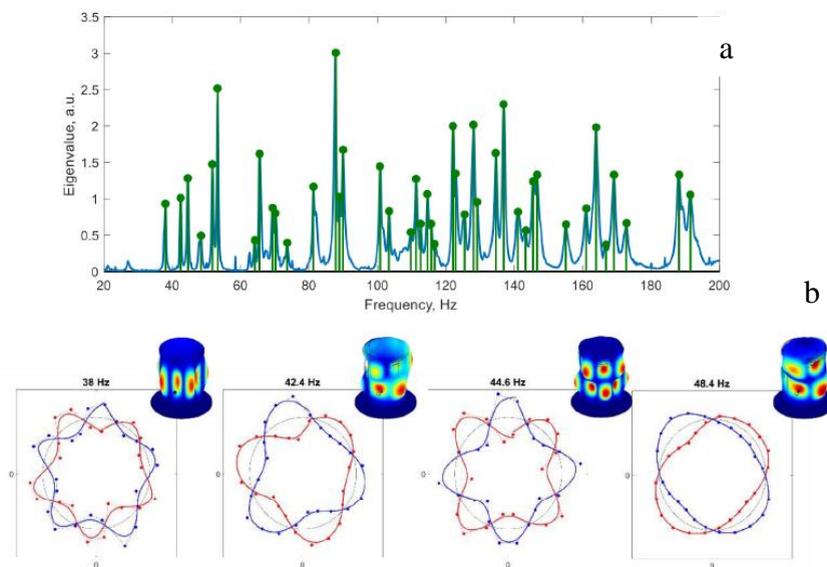
Lors de ces VD, nous avons développé un ensemble de génération et de réception d'ondes de plaques de basse fréquence se propageant sur l'ensemble de la circonférence de l'enceinte. La vitesse et donc la fréquence de ces ondes évoluent avec la pression et le relâchement induit de la précontrainte de l'enceinte [Piwakowski, 2019] lors du cycle de pression (figure 2 a).



**FIGURE 2.** a : Evolution de la fréquence des ondes de plaques lors du temps du cycle de pression  
 b : Evolution d'une fréquence propre en fonction de la pression interne de l'enceinte  
 c : Comparaison de la pression interne prédite par un modèle polynomial et celle mesurée

Une analyse modale lors des cycles de pression (figure 2 b) a permis d'identifier et de suivre les fréquences propres de l'enceinte générées par le bruit du flux d'air dans les conduites. Celle-ci montrent une hystérésis entre les phases de montée et de descente en pression qui peut marquer un endommagement lors du cycle. Les évolutions des fréquences en fonction de la pression sont introduites dans un modèle polynomial qui est optimisé par pondération de celles-ci [Splavier, 2020]. Nous montrons la quantification de la pression interne en fonction des valeurs des fréquences de vibration identifiées. La comparaison avec la pression mesurée est donnée par la figure 2 c.

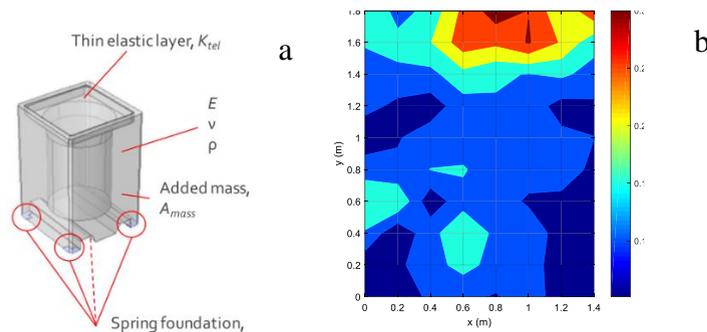
Pour aller au-delà du suivi de la pression, nous avons estimé l'influence d'un endommagement global ou local sur la réponse de l'analyse modale [Eiras 2021 a]. A partir de mesures faites sur l'enceinte VeRCoRs (figure 3 a) générées par des vibrations forcées générées par un marteau instrumenté et enregistrées par 2 accéléromètres, une étude numérique (figure 3 b) montre la sensibilité importante de l'analyse par composantes principales dans le cas de trois scénarii illustrés par le décalage ou la modulation des fréquences et l'apparition de fréquences nouvelles.



**FIGURE 3.** a : Spectre des fréquences propres mesurées sur l'enceinte  
 b : Comparaison des modes de vibration : numérique (3D) et mesurée (Coupe enceinte 2D)

### III. CONTRÔLE D'UN CONTAINEUR

Dans le cadre du projet DCND, l'analyse modale numérique d'un conteneur a été optimisée grâce aux essais vibratoires réalisés avec un marteau instrumenté. Les paramètres matériaux (figure 4 a) sont pris en compte mais aussi les conditions aux limites du modèle (contact avec le sol et couvercle de fermeture). Sur la base de cette analyse ainsi que d'une analyse des courbures, la distorsion des formes modales engendrée par les endommagements permet de localiser les zones endommagées [Eiras 2021 b]. Un des conteneurs a subi un endommagement thermique local à 220 °C. La figure 4 montre la détection de la zone de la fissure par analyse des dérives des formes modales liées à l'endommagement (figure 4 b). Celle-ci peut être augmentée par une analyse modale non-linéaire du béton généré par des amplitudes croissantes des impacts.



**FIGURE 4.** a : Paramètres d'optimisation du modèle de conteneur  
b : Détection de la fissuration d'un conteneur : amplitude de l'analyse modale non linéaire

### IV. CONCLUSION

L'ensemble de ces essais ont montré les différentes possibilités qui s'offrent à nous pour structurer un suivi des enceintes de confinement et des conteneurs. Il apparaît que les analyses vibratoires et analyses modales sont capables de suivre des dérives soit des propriétés de la structure soit de zones défaillantes. Dans un premier temps, un suivi des modes de vibration sur la base d'un modèle optimisé a pour but de conduire à l'identification d'un défaut voire d'une zone pathologique. Dans un second temps une approche numérique doit simuler l'effet des défauts susceptibles d'être existants. Par la suite une analyse modale non linéaire a pour objectif d'augmenter la sensibilité aux défauts. Enfin des ENDS locaux plus usuels doivent permettre de le détecter et de le dimensionner.

### REFERENCES

- B Piwakowski and all (2021), Non-destructive non-contact concrete evaluation using an automated surface wave scanner, Vol 38, Proceedings of Meetings on Acoustics ICU, Bruges 2019
- A. Spalvier and all (2020), Internal pressure monitoring in a post-tensioned containment building using operational vibration, Journal of Nondestructive Evaluation 39 (3), 1-13
- J.N. Eiras and all (2021 a), Vibration monitoring of nuclear power plant containment buildings during the Integrated Leakage Rate Test for structural condition assessment Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics
- J.N. Eiras b and all (2021 b), Damage detection and localization from linear and nonlinear global vibration features, Structural Health Monitoring 20 (2), 567-579