



HAL
open science

Capteurs vibratoires connectés pour l'auscultation continue des ouvrages : exemple du barrage voute de Ribou (Cholet)

Farouk Omar Frigui, Sylvain Genet, Jean-Pierre Faye, Sébastien Judenherc, Carmen Martin, Olivier Dalverny

► To cite this version:

Farouk Omar Frigui, Sylvain Genet, Jean-Pierre Faye, Sébastien Judenherc, Carmen Martin, et al.. Capteurs vibratoires connectés pour l'auscultation continue des ouvrages : exemple du barrage voute de Ribou (Cholet). Colloque CFBR 2018 : “ Méthodes et techniques innovantes dans la maintenance et la réhabilitation des barrages et des digues ”, Nov 2018, Chambéry, France. pp.145-155. hal-02359823

HAL Id: hal-02359823

<https://hal.science/hal-02359823>

Submitted on 12 Nov 2019

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.







Open Archive Toulouse Archive Ouverte

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an author's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/23041>

To cite this version:

Frigui, Farouk Omar  and Genet, Sylvain and Faye, Jean-Pierre 
and Judenherc, Sébastien and Martin, Carmen  and Dalverny,
Olivier  *Capteurs vibratoires connectés pour l'auscultation
continue des ouvrages : exemple du barrage voute de Ribou
(Cholet)*. (2018) In: Colloque CFBR 2018 : « Méthodes et
techniques innovantes dans la maintenance et la réhabilitation des
barrages et des digues », 27 November 2018 - 29 November 2018
(Chambéry, France).

Any correspondence concerning this service should be sent
to the repository administrator: tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

CAPTEURS VIBRATOIRES CONNECTÉS POUR L'AUSCULTATION CONTINUE DES OUVRAGES : EXEMPLE DU BARRAGE VOUTE DE RIBOU (CHOLET)

Connected vibratory sensors for continuous auscultation: example of the arch dam of Ribou (Cholet)

Farouk FRIGUI^{1,3}, Sylvain GENET², Jean-Pierre FAYE³, Sébastien JUDENHERC¹, Carmen MARTIN³,

Olivier DALVERNY³

¹ STANEO SAS, Toulouse

² Service Espaces Naturels et Captages, Direction de l'Environnement, Agglomération du Choletais

³ INP Toulouse/ENIT, LGP, Tarbes

MOTS CLÉS Structural Health Monitoring, surveillance permanente, dynamique des structures.

RÉSUMÉ

La surveillance vibratoire des structures est mise en œuvre depuis quelques décennies à des fins de surveillance de l'état d'endommagement d'équipements industriels ou de structures bâties. Les techniques utilisées reposent le plus souvent sur l'emploi d'accéléromètres dont les signaux sont traités par des méthodes d'analyse des variations des fréquences propres, de calculs de déformées modales ou de calculs de flexibilité. Les objectifs visés sont la détection des dommages nouveaux, leur localisation et le suivi dans le temps de leur évolution. L'équipement permanent d'ouvrages ou de structures est rare compte tenu du coût important des instruments de mesure, à l'achat et à l'utilisation. L'auscultation est donc le plus souvent ponctuelle, dans le temps (installation périodiques d'instruments) et l'espace (suivi de fissures identifiées etc.). La détection et le suivi de dommages requièrent cependant la répétition fréquente des mesures. Nous avons mis au point une approche nouvelle capable de produire un diagnostic continu. Elle repose sur la combinaison d'instruments de faible coût d'installation et d'exploitation d'une part et sur une méthode de traitement robuste d'autre part. L'outil de mesure est composé d'un ou plusieurs capteurs de basse consommation et haute sensibilité assurant les fonctions de transduction, numérisation, pré-traitement et transmission d'une information synthétique vers un système d'analyse centralisé. L'ensemble fonctionne en continu et permet de produire un diagnostic en temps réel au pas de 24h. Nous présentons les résultats de nos analyses sur le barrage de Ribou (barrage voûte de production d'eau potable à Cholet). Trois approches sont comparées : 1/ la modélisation numérique du comportement vibratoire de la structure; 2/ l'interprétation des mesures continues acquises par un instrument placé sur la structure (de type installation permanente, couteuse) et enfin 3/ la simulation des résultats que notre nouvelle approche sera en mesure de fournir. L'auscultation permanente de l'ouvrage permet de suivre sa réponse aux variations des conditions météorologiques (la température en particulier) et de charge du barrage (hauteur d'eau, débit de débordement). L'approche globale de l'ouvrage autorise un suivi continu et économique de son « état de santé ». Ce résultat est obtenu grâce à des algorithmes fiables et robustes alimentés par des capteurs innovants, utilisant les technologies de l'Internet des objets pour transmettre une information condensée des vibrations mesurées.

ABSTRACT

Structural health monitoring (SHM) has been implemented for many decades in order to monitor industrial equipment and civil engineering structures. The monitoring techniques are most often based on the use of accelerometers. This aims to detect new damages, their location and the follow-up of their evolution. The permanent instrumentation of structures is rarely used because of the high cost of measuring instruments. Auscultation is therefore most often punctual, in time (periodic installation of instruments) and space (followed by identified cracks, etc.). However, the detection and monitoring of damage require frequent and repetitive measurements. We have developed a new approach enabling a continuous diagnosis. It is based on the combination of low-cost installation, operating instruments and a robust processing method. The measurement tool is one or many low-power, high-sensitivity sensors which perform the functions of transduction, digitalization, pre-processing and transmission of synthetic information to a centralized analysis system. The set works continuously and allows a real time diagnosis at a 24 hours pace. Herein, we present the results of our analysis on the Ribou arch dam. Three approaches are considered: 1 / numerical modeling of the vibratory behavior of the structure, 2 / the interpretation of the continuous measurements obtained by an instrument placed on the structure (expensive and permanent installation) and 3 / the result of our solution based on the installation of connected sensors.. The permanent auscultation of the structure allows the follow-up of its response to the meteorological conditions variations (the temperature in particular) and the load of the dam (water level, flow of overflow). Our overall approach allows a continuous and economic monitoring. This is achieved by reliable and robust algorithms powered by innovative sensors, using the Internet of Things (IoT) to transmit a condensed information.

1. Description du barrage de Ribou

Le barrage de Ribou, propriété de la Communauté d'Agglomération de Choletais, est un barrage voûte simple en béton armé, dont la fonction est l'alimentation en eau potable et le soutien des débits d'étiage à la Moine. D'une hauteur de 16 m et d'une capacité de retenue de 3,2 hm³, ce barrage est classé B selon le décret du 11 décembre 2007. Sa longueur est de 263 m et présente une épaisseur constante de 1,5 m. Le barrage présente une fissuration subhorizontale du parement aval de la rive gauche [1].



Figure 1 : Barrage de Ribou

2. Modélisation numérique

2.1. Description du modèle numérique

Le modèle numérique, illustré sur la figure 2, est réalisé sur le logiciel de calcul par éléments finis *Abaqus*. Le but de cette approche est d'identifier les zones les plus vulnérables du barrage, face à une excitation sismique.

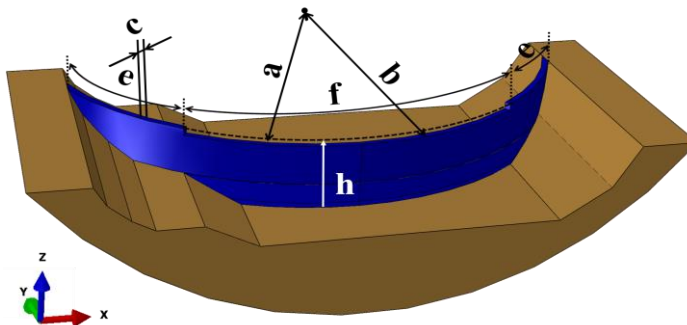


Figure 2 : Modèle numérique du barrage de Ribou

Il s'agit d'un modèle éléments finis, composé d'éléments de type « 3D déformable », et est constitué de trois voûtes superposées. Les articulations entre les voûtes sont modélisées par la mise en place de joints. Les principales caractéristiques du modèle sont résumées dans le tableau 1.

Rayon de courbure intérieur - a	65,5 m
Rayon de courbure extérieur - b	67 m
Épaisseur de la voûte - c	1,5 m
Cote de crête du parapet - e	88,25 m
Cote du déversoir - f	86,7 m
Hauteur maximale - h	16 m
Module d'Young - E	30 GPa
Coefficient de poisson - ν	0,19

Table 1 Propriétés physiques et mécanique pour le modèle numérique

L'interaction entre le barrage et sa retenue peut avoir un effet significatif sur la réponse sismique du barrage et doit être prise en compte. En effet, les mouvements subis par la masse d'eau font apparaître des pressions « hydrodynamiques » variant dans le temps et dans l'espace en fonction du mouvement imposé par les parois de la retenue [2]. Ainsi, en plus de la pression hydrostatique, la pression hydrodynamique a été prise en compte dans notre approche et a été modélisée par des masses ajoutées équivalentes appliquées sur le parement amont du barrage.

Les masses ajoutées sont calculées par la formule de Westergaard généralisée [3]. Les interactions sol-structure ne sont pas prises en compte dans cette modélisation. C'est à dire que la roche n'est pas considérée dans l'analyse dynamique.

2.2. Analyse modale

Le tableau 2 résume les trois premières fréquences propres identifiées par analyse modale sur Abaqus. Les déformées modales associées à ces modes sont illustrées sur la figure 3.

Mode	Fréquence (Hz)
1	8,49
2	9,30
3	10,97

Table 2 Fréquences propres du modèle numérique

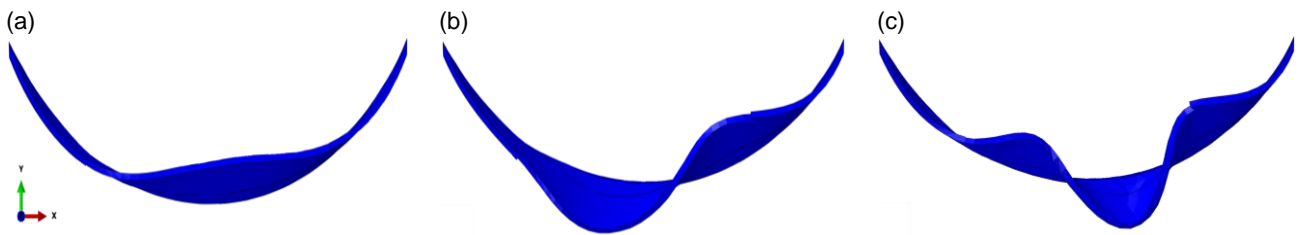


Figure 3 : Déformées modales issues de l'analyse modale sur Abaqus: (a) mode 1, (b) mode 2, (c) mode 3

2.3. Excitation sismique et endommagements

Nous avons choisi d'exciter la structure à sa base, dans les trois directions, par un accélérogramme issu du tremblement de terre de L'Aquila réduit en temps et en amplitude (une durée de 10 s et 10% du signal). Pour représenter le comportement élasto-plastique sous le choc sismique, le modèle d'endommagement plastique, introduisant des variables d'endommagement scalaire, a été considéré comme modèle constitutif du matériau (Concrete Damage Plasticity (CDP)) [4]. Cette loi d'endommagement, implantée dans Abaqus pour les calculs standard et explicites, est recommandée pour l'analyse des structures en béton soumises à des chargements cycliques [5].

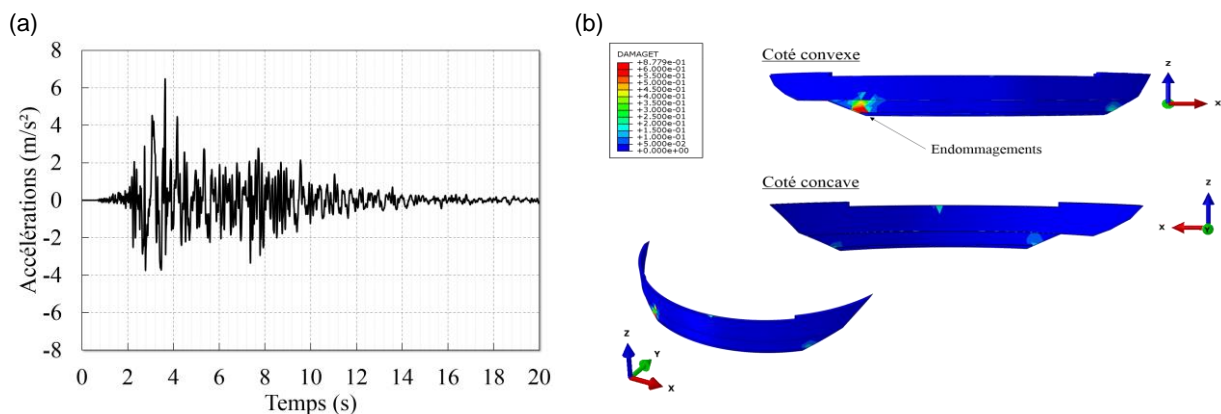


Figure 2 : Endommagement après excitation sismique : (a) signal sismique, (b) apparition des endommagement au niveau de du parement de la rive gauche

Après la sollicitation sismique, la structure s'avère endommagée au niveau des articulations. L'endommagement le plus important est celui de la rive gauche.

3. Auscultation du barrage

Un capteur DW-S (géophone élargi) à trois composantes a été utilisé pour l'instrumentation permanente et la surveillance continue de ce barrage. Nous avons installé le matériel de surveillance sur la partie gauche du barrage dans un petit renforcement pour des raisons pratiques.

Orientés vers le nord, c'est-à-dire vers la voute du barrage, le capteur est branché à une station D6BB-MOB à 6 voies. La station est placée aussi dans le renforcement avec la batterie et le convertisseur qui permet de charger la batterie à partir d'un panneau solaire. Le panneau solaire quant à lui a été fixé au-dessus du renforcement, sur la rambarde d'une des passerelles du barrage. Un module GpsGsmMob est fixé juste à côté du panneau solaire, contenant un GPS haute sensibilité et un module GSM permettant une connexion 3G ou le contrôle de la station via SMS.

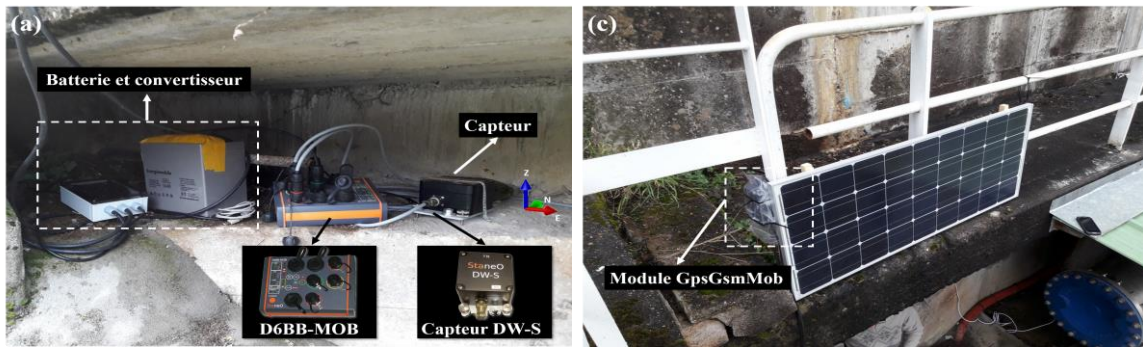


Figure 3 : Installation du matériel de surveillance

La figure 4 illustre un exemple de spectre mesuré dans la direction R (radiale), pour deux segments de 40 s, échantillonnés à 50 Hz et séparés dans le temps de quelques heures. Sur la figure 4.a, trois fréquences sont identifiées : 14,3 Hz, 14,9 Hz et 18,1 Hz, alors que sur la figure 4.b nous pouvons constater une raie supplémentaire qui apparaît, très étroite et de forte amplitude à 17,5 Hz.

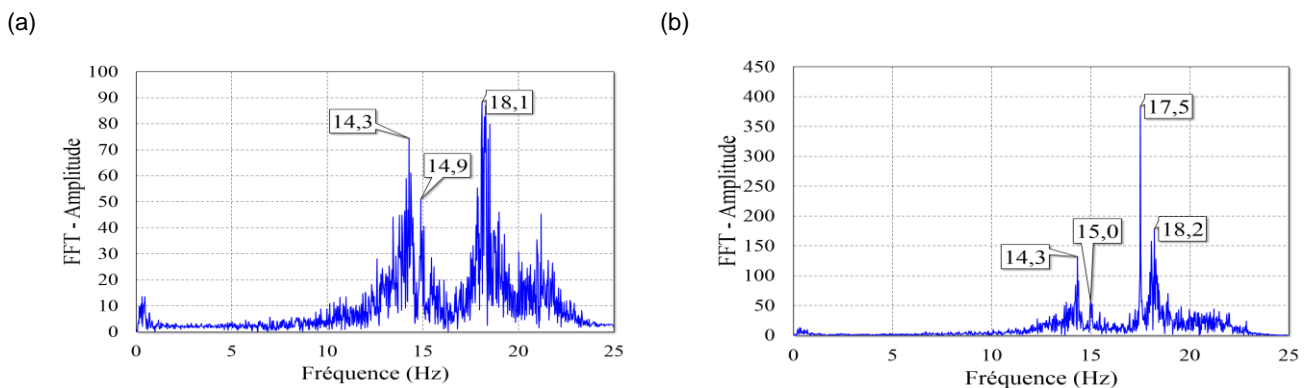


Figure 4 : Spectre des premières mesures sur le barrage - direction R

Afin de suivre l'évolution de ces fréquences propres dans le temps nous avons tracé les diagrammes temps-fréquence sur une période de 24h (le 25 Février 2018). Ces diagrammes sont illustrés sur la figure 5.

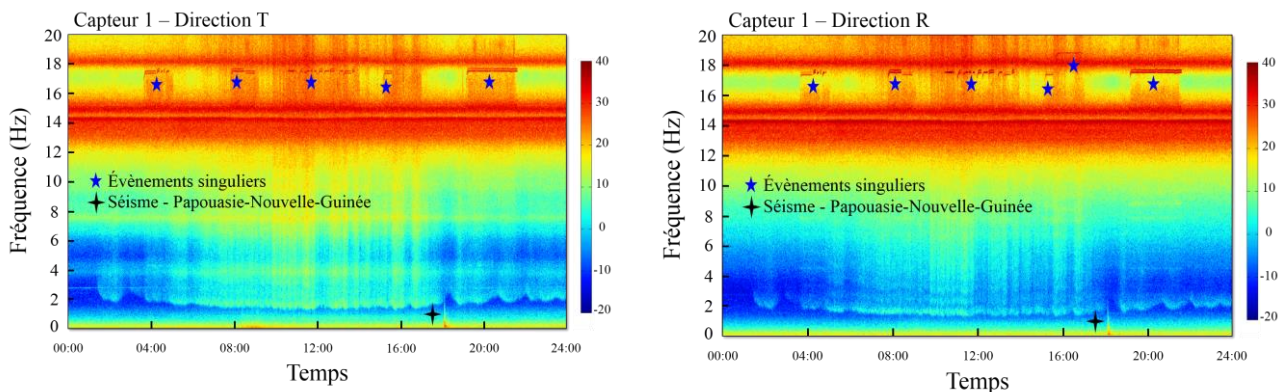


Figure 5 : Analyse temps-fréquences du barrage de Ribou

Ces spectres sont très riches en informations. En effet, ils contiennent non seulement les fréquences propres du barrage mais aussi tous les événements singuliers qui ont eu lieu la même journée. Les spectres présentent par exemple la signature typique en basse fréquence d'un séisme. Ce dernier correspond au séisme qui a frappé la Papouasie-Nouvelle-Guinée le 25 Février 2018. Nous observons aussi des raies constantes de fortes amplitudes et sur de courtes durées à 17,5 Hz et à 19 Hz. Le spectre présente aussi les fréquences propres du barrage : un premier mode à 14,33 Hz, un second mode à 14,9 Hz et un troisième mode à 18,1 Hz.

La surveillance du barrage nécessite l'identification de l'origine de ces fréquences parasites qui peuvent engendrer de fausses indications quant à l'état de santé de la structure. Pour les identifier, nous avons superposé les débits (en m³/h) de l'usine de production du barrage, se trouvant à quelques mètres du barrage avec les diagrammes temps-fréquences.

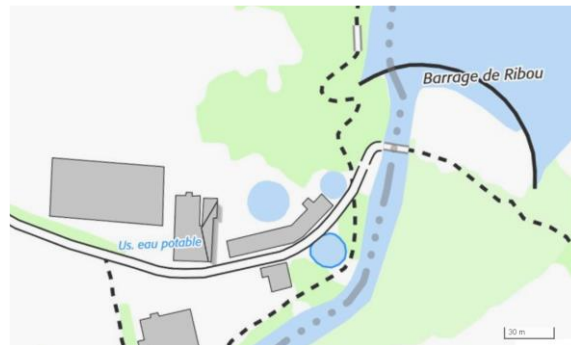


Figure 6 : Plan de situation - barrage de Ribou

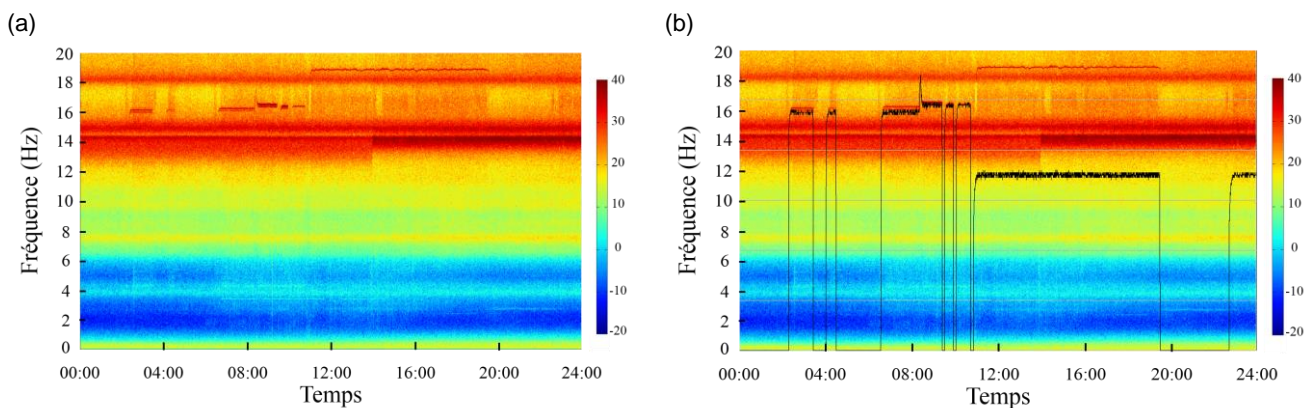


Figure 7 : Superposition des débits de l'usine de production avec les diagrammes temps fréquences du barrage de Ribou

Nous pouvons clairement noter que les fréquences qui apparaissent sur des courtes durées proviennent de l'usine de production d'eau potable. Celles-ci disparaissent à l'arrêt de l'usine. D'autres fréquences parasites, liées au fonctionnement de l'usine de production peuvent apparaître aussi. Afin de contourner les problèmes d'identification liés aux événements singuliers qui peuvent avoir lieu dans l'environnement de la structure (pompes, vannes, claquement des portes, séismes etc.), la sélection des périodes de mesures s'avère essentielle. En effet, en absence d'évènements singuliers nous arrivons à distinguer les fréquences qui sont propres à la structure des fréquences parasites.

4. L'utilisation de capteurs connectés pour l'auscultation des barrages

Au cours des dernières années, les avancées technologiques dans le génie civil et dans les disciplines connexes ont favorisé l'émergence de la surveillance continue comme outil d'aide à la gestion des infrastructures civiles. Bien que relativement limitée, la surveillance en continue des structures intéresse de plus en plus les organismes gestionnaires.

Aujourd'hui, il existe en France quelques bâtiments instrumentés et surveillés d'une façon permanente. Leur instrumentation est basée sur un schéma traditionnel composé de capteurs (accéléromètres FBA), d'un système d'acquisition, d'un récepteur GPS, de câbles pour assurer la synchronisation des capteurs et d'un moyen de transfert des données (ligne ADSL). Le nombre très réduit de bâtiments instrumentés est lié essentiellement à la composition de ce schéma. En effet trois grandes problématiques y sont identifiées : (i) le prix de l'instrument de mesure, (ii) le câblage des capteurs (synchronisation), (iii) la transmission des données.

Afin de surveiller la santé des ouvrages, le suivi des fréquences propres présente un indice très sensible à la présence des endommagements. Plusieurs études ont cependant démontré que l'identification des fréquences propres peut avoir lieu en utilisant des techniques d'analyse modale opérationnelle à partir de données non synchronisées [6, 7, 8].

Le transfert en continu de la réponse de la structure à une excitation ambiante vers une centrale de calcul nécessite un débit assez important. En effet, quelques capteurs à 50 échantillons/s demandent ~1ko/s en continu, cette grandeur n'est pas très importante en absolu, cependant, le besoin en bande passante et en énergie apporte des contraintes généralement levées en utilisant une connexion de type ADSL. Il s'avère très intéressant de réduire la quantité des données en calculant *in-situ* le spectre qui contient les informations nécessaires à l'identification des fréquences propres. La transmission d'une version dégradée de ce spectre, réduite à sa seule partie utile, c'est à dire celle qui permet de déterminer les fréquences propres de l'ouvrage, permet d'utiliser les technologies de type Internet des Objets (*IoT*, Sigfox, LoRA, SMS) pour la transmission des informations.

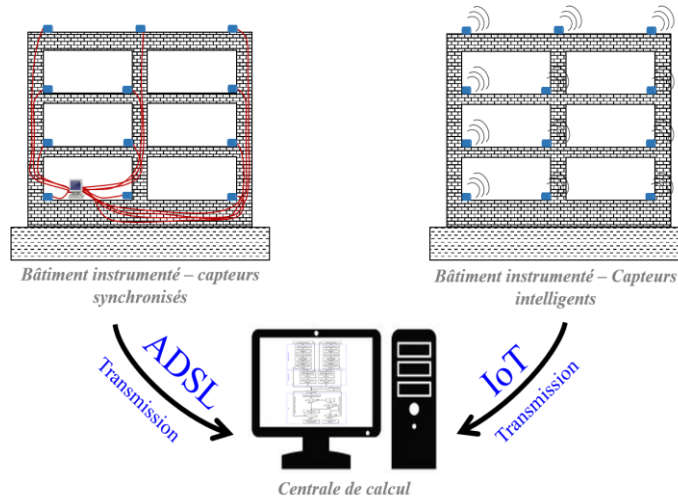


Figure 8 : Les différents moyens de transmission des données

Cette approche réduit considérablement le besoin du système d'auscultation aussi bien en bande passante qu'en énergie, elle peut être généralisée à des structures de typologies différentes. La démarche complète est résumée sur la figure 9.

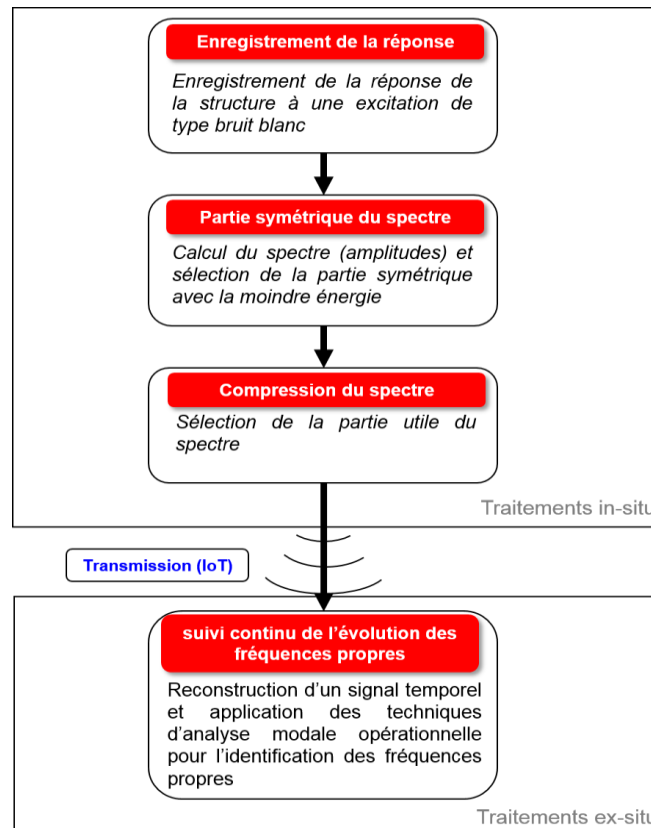


Figure 9 : Processus de compression, transmission et reconstruction de l'information

Ce principe a été appliqué pour la surveillance du barrage de Ribou et l'identification des fréquences propres du barrage a été réalisée avec succès pendant les jours de fonctionnement de l'usine. Les résultats sont résumés dans le tableau 3.

Fréquences identifiées Hz - Direction R			Fréquences identifiées Hz - Direction T		
Jour avec événements	jour sans événement	Jour avec événement + sélection des DSP	Jour avec événements	jour sans événement	Jour avec événement + sélection des DSP
14,35	14,22	14,27	14,35	14,20	14,22
14,91	14,82	14,94	14,98	14,89	14,82
17,52	17,97	18,01	17,46	17,99	17,97
17,99	-	-	18,16	-	-
18,83	-	-	18,79	-	-

Figure 3 : Identification des fréquences propres du barrage de Ribou – Comparaison entre les résultats obtenus en présence d'événements singuliers, en absence d'événements singuliers, et résultats obtenus en sélectionnant les DSP avec la moindre énergie

La première étape à franchir pour le développement d'un système SHM performant et économique est la sélection ou le développement de capteurs appropriés. Il est évident que le capteur doit pouvoir mesurer le paramètre de réponse souhaité. Le choix du capteur approprié dépend non seulement de la grandeur à mesurer mais aussi des contraintes économiques du projet. Pour la surveillance des structures en génie civil, les capteurs d'accélération ou de vitesse sont généralement utilisés. On distingue essentiellement cinq types de capteurs :

- les capteurs FBA (Force Balance Accelerometer),
- les capteurs piézoélectriques,
- les MEMS (Microelectromechanical systems),
- les géophones en court-circuit,
- les sismomètres (capteurs passifs).

Les capteurs FBA, utilisés par exemple pour l'instrumentation de quelques bâtiments test en France métropolitaine, sont adaptés aux besoins de surveillance mais sont bien trop chers pour que leur usage puisse être généralisé. En effet le prix d'un capteur est de plus de 2000 euros. Leur consommation est aussi assez importante (minimum 750 mW). Les capteurs piézoélectriques de bande assez large sont eux aussi coûteux (800-1000 euros par composante). Ils ont une réponse passe haut, mais leur sensibilité est acceptable pour les mesures de vibration des structures civiles. Quant aux capteurs MEMS standards, ils sont très bon marché (quelques euros par unité) mais présentent un bruit très important ne permettant pas l'exploitation des mouvements faibles.

Par conséquent ces capteurs ne sont pas adaptés aux besoins de mesure en génie civil. Il existe aussi les MEMS de haute sensibilité, mais leur prix unitaire reste assez élevé (comparables FBA). Les géophones en court-circuit sont des capteurs bon marché également, présentant une faible consommation mais dont le niveau de bruit est élevé. Ils sont par conséquent adaptés aux mouvements forts et ne permettent pas l'exploitation des mouvements de faible amplitude. Le capteur DW-S, que nous avons utilisé pour la surveillance du barrage de Ribou, permet d'avoir un sismomètre à réponse plate entre 0.2 Hz et 130 Hz et dont la consommation est très faible. Le capteur DW-S, offre le meilleur compromis entre prix, consommation et sensibilité

CONCLUSIONS

Le modèle numérique, à ce stade, a permis d'avoir une idée sur le comportement vibratoire de la structure. Plusieurs incertitudes, notamment sur l'identification du mode fondamentale, nous empêchent encore de caler le modèle. Les mesures sur le barrage se poursuivent et nous prévoyons de modifier la géométrie du dispositif afin de caler le modèle. Le principal défi de la surveillance continue étant de réduire la quantité de données à transmettre vers une centrale de calcul, nous avons mis en place un algorithme de compression permettant de réduire efficacement ce volume de données en calculant le spectre des signaux et en n'en gardant que les informations nécessaires au calcul des fréquences propres. Cette démarche peut avoir lieu in-situ par un traitement embarqué et les informations compressées peuvent alors être transmises en utilisant les moyens de l'Internet des Objets (IoT). Une application de ce principe sur le barrage de Ribou a permis de mettre en évidence tout l'intérêt de cette nouvelle approche. Une deuxième problématique qui concerne les fréquences parasites issues de l'environnement dans lequel se trouve la structure (les pompes, les séismes, etc.) a été traitée, elle aussi *in-situ*. Pouvant affecter l'évaluation de la santé des structures, les fréquences parasites doivent être au moins rejetées à défaut d'être bien identifiées. Afin de choisir les périodes de mesures, nous avons mis en place une méthodologie qui consiste à choisir les spectres qui présentent la moindre énergie. Cette approche a permis d'identifier correctement les fréquences propres de la structure. Finalement, le choix des instruments de mesures a été évoqué. Tenant compte de la qualité de mesure requise et des prix des capteurs, notre choix s'est orienté vers le sismomètre DW-S qui offre le meilleur compromis entre prix, consommation et sensibilité. Notre approche globale permet une surveillance permanente à moindre coût.

RÉFÉRENCES et citations

- [1] Gally H, Moulin X et Bourgoïn T. Rapport de modélisation. Tractebel engineering S.A, Agence de Lyon, France, 2017.
- [2] Mills-Bria B. State-of-practice for the nonlinear analysis of concrete dams at the Bureau of Reclamation, US Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, 2006
- [3] Degao Z, Bin X, Xianjing K, Huabei L et Yang. Z. Numerical simulation of the seismic response of the Zipingpu concrete face rockfill dam during the Wenchuan earthquake based on a generalized plasticity model. Computers and Geotechnics, 2013, p. 111-122.
- [4] Jankowiak T et Lodygowski T. Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model. Foundations of civil and environmental engineering, 2015 (6), p.53-69
- [5] Hibbitt H, Karlsson B et Sorensen P. Abaqus analysis user's manual version 6.10. Dassault Systèmes Simulia Corp: Providence, RI, USA, 2011
- [6] Nagayama T and Spencer B.F. Structural health monitoring using smart sensors. Newmark Structural Engineering Laboratory. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007.
- [7] Feng Z et Katafygiotis L. The Effect of Non-synchronous Sensing in Wireless Sensors on Structural Modal Identification. 3rd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2011), Corfu, Greece, 2011
- [8] James GH, Carne Thomas G and Lauffer James P. The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating structures. Modal Analysis-the International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 1995 (10)4, p 260.