



## **Surveillance de la santé structurelle (SHM) et Analyse Modale Expérimentale (EMA) d'une vanne radiale de barrage en France**



**Case study**

Mars 2025

## Introduction

Dans le cadre de la validation de modèles numériques dynamiques à l'aide de l'analyse par éléments finis, notamment pour évaluer la robustesse sismique des structures mécaniques, il est essentiel de comparer et, si nécessaire, d'ajuster les modèles en fonction des données modales expérimentales.

### A. Principe de l'Analyse Modale Expérimentale (EMA)

La méthodologie consiste à mesurer la réponse accélérométrique en plusieurs points d'un maillage structuré de l'objet testé tout en appliquant une excitation mécanique. Lorsque cela est possible, la force d'excitation est mesurée à l'aide d'un capteur de force dédié. En analysant les Fonctions de Réponse en Fréquence (FRF), qui établissent la relation entre l'accélération en chaque point de mesure et la force d'excitation appliquée, les paramètres modaux peuvent être extraits. Ceux-ci incluent:

- Formes modales
- Fréquences naturelles
- Masse modale
- Facteurs d'amortissement (associés à la résonance structurelle)

Pour les structures de grande envergure, l'utilisation d'accéléromètres autonomes sans fil constitue un avantage majeur, réduisant considérablement les temps d'installations et de tests par rapport aux systèmes filaires traditionnels. De plus, une synchronisation précise des capteurs est essentielle pour garantir un traitement précis des données dans la plage de fréquences cible. Les capteurs ROCK Acceleration sont parfaitement adaptés à cette application, fonctionnant efficacement dans une plage de fréquences de 0 à 200 Hz avec une précision de synchronisation de 10 µs. Leur utilisation améliore considérablement l'efficacité par rapport aux accéléromètres filaires connectés à un système d'acquisition multi-canaux.

### B. Analyse Modale Opérationnelle (OMA)

L'Analyse Modale Opérationnelle est réalisée en analysant des mesures de réponse enregistrées de manière synchronisée, sans contrôler ni mesurer le niveau d'excitation. Si l'excitation dans la plage de fréquences analysée est suffisamment forte, les paramètres modaux peuvent être identifiés, à l'exception de la masse modale, car la force d'excitation n'est pas quantifiée. Pour les structures de grande envergure, les sources naturelles d'excitation peuvent inclure:

- Le bruit sismique de fond
- La force du vent
- Des excitations artificielles indirectes telles que les impacts d'objets, le passage de véhicules sur des obstacles, les effets de pendule, les mouvements de masses mobiles (actionneurs hydrauliques, agitateurs électrodynamiques, moteurs déséquilibrés, etc.)



Image 1: ROCK Acceleration

### VANNE RADIALE DE BARRAGE, ÉLÉMENTS CLÉS:

Structure surveillée:	Vanne radiale de barrage
Application:	Surveillance structurelle (SHM) & analyse modale expérimentale (EMA)
Technologie:	Balise autonome de Syscom ROCK Accélération avec auto-orientation, auto-nivellement et synchronisation temporelle parfaite
Points de mesures:	2 capteurs ROCK Acceleration synchronisés par GNSS avec capteur interne.
Objectifs:	Suivi des fréquences modales, évaluation de l'amortissement et validation de la synchronisation
Durée de surveillance :	6 mois
Société d'ingénierie:	Avnir Energy <a href="https://www.avnir-energy.fr/">https://www.avnir-energy.fr/</a>

### Suivi modal à long terme

Une fois l'analyse modale terminée, la surveillance à long terme de l'évolution des paramètres modaux peut être très bénéfique. Par exemple, dans le cas d'une porte de barrage, il est possible de suivre l'influence des niveaux d'eau et des conditions atmosphériques au fil du temps. Dans de tels cas, seuls quelques points de mesure stratégiquement placés sont nécessaires, car les formes modales ont déjà été identifiées. Ces points sont sélectionnés en fonction des emplacements où les modes étudiés présentent une participation mesurable.

### Avantages de ROCK Acceleration pour la surveillance de la santé structurelle

Pour les applications de surveillance de la santé structurelle (SHM) à long terme, les capteurs ROCK Acceleration offrent une solution puissante:

- Fonctionnement entièrement autonome pendant plusieurs semaines à plusieurs mois (illimité avec de petits panneaux solaires), éliminant le besoin d'intervention humaine.
- Suivi continu des paramètres modaux avec un logiciel dédié et les données d'entrée des ROCK Acceleration, garantissant la détection précoce des changements structurels.
- Enregistrement automatique des événements transitoires (par ex. forces d'impact, activité sismique) avec des flux de données optimisés.
- Alertes en temps réel par e-mail ou SMS en cas de changements structurels critiques pour les différentes parties prenantes.

En intégrant la technologie ROCK Acceleration, les structures peuvent être surveillées en continu, dans le but d'améliorer les stratégies de maintenance prédictive et d'assurer la sécurité structurelle des infrastructures critiques.

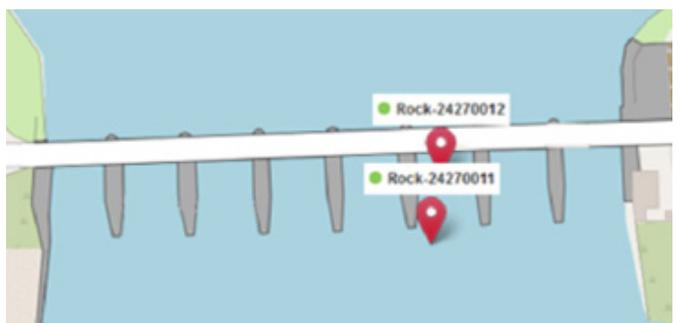


Image 1: Carte de localisation automatique du suivi du projet via SCS - Syscom Cloud Software.

## Objectifs de surveillance

La surveillance des grandes structures hydrauliques, telles que les vannes radiales, est essentielle pour évaluer leur comportement dynamique, leur intégrité structurelle et leur stabilité à long terme. Cette étude de cas se concentre sur une vanne radiale en acier spécifique, où un système de surveillance à long terme a été déployé à l'aide des capteurs Syscom ROCK Acceleration.

Les principaux objectifs de ce projet étaient de:

- Comparer et ajuster le modèle par éléments finis (FEM) existant avec une évaluation initiale de la réponse de la vanne, en utilisant une excitation avec un marteau à haute énergie pour de futures simulations.
- Suivre les variations de fréquence modale et l'évolution de l'amortissement de la vanne au fil du temps.
- Déterminer l'influence des niveaux d'eau en aval sur les vibrations structurelles.
- Valider la précision de synchronisation entre deux capteurs ROCK Acceleration grâce à l'animation simplifiée des formes modales.

En utilisant des techniques avancées de mesure des vibrations et un traitement des données en temps réel, cette étude garantit la détection précoce des changements structurels, facilitant la maintenance prédictive et la réduction des risques au niveau du barrage et en aval.

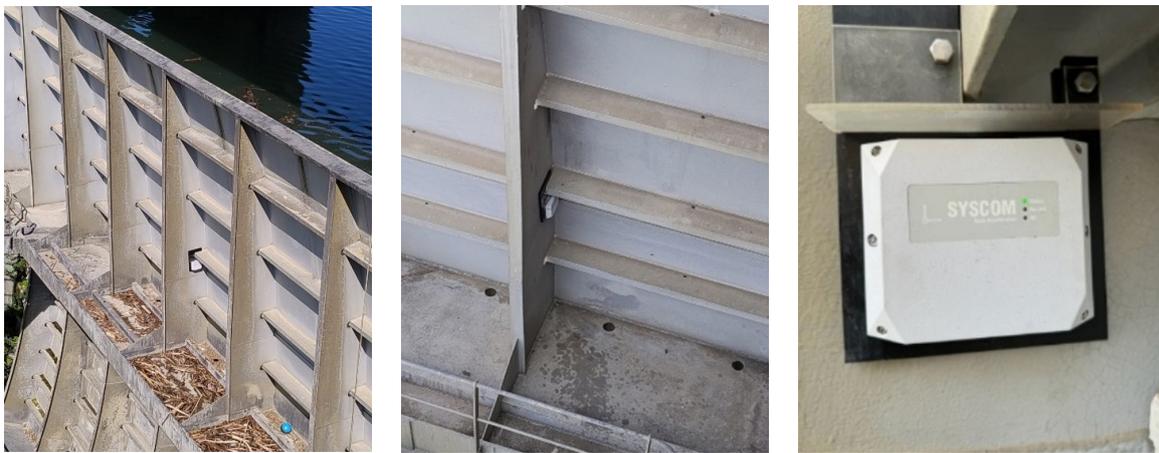


Image 2 : Vanne radiale en acier avec une installation d'un ROCK Acceleration sur une plaque de montage spécifique.

## Configuration de l'instrumentation

Le système de surveillance comprenait deux unités ROCK Acceleration, configurées pour l'analyse vibratoire à long terme, utilisant un mode d'enregistrement temporisé parfaitement synchronisé par GNSS.

## Équipement utilisé

### Phase 0 (2 jours), Analyse Modale Expérimentale (EMA):

- Génération et ajustement d'un modèle par éléments finis (FEM), utilisant un maillage structuré avec une excitation multi-points par un marteau à haute énergie.

### Phase 1 (3 premiers mois), Analyse Modale Opérationnelle (OMA):

- 1 x ROCK Acceleration HD avec capteur MS2010 (haute sensibilité pour une analyse détaillée des vibrations).
- 1 x ROCK Acceleration avec capteur MS2012 (capteur standard pour la surveillance générale).

### Phase 2 (3 mois suivants), Analyse Modale Opérationnelle (OMA):

- 2 x ROCK Acceleration avec capteur MS2012.

Fréquence d'échantillonnage : 250 Hz

Durée de mesure: 7 minutes 30 secondes par session (450 secondes)

Intervalle de mesure: Toutes les 12 heures (15 minutes par jour), enregistrements à intervalle régulier

Programme d'enregistrement: 02h00 et 14h00

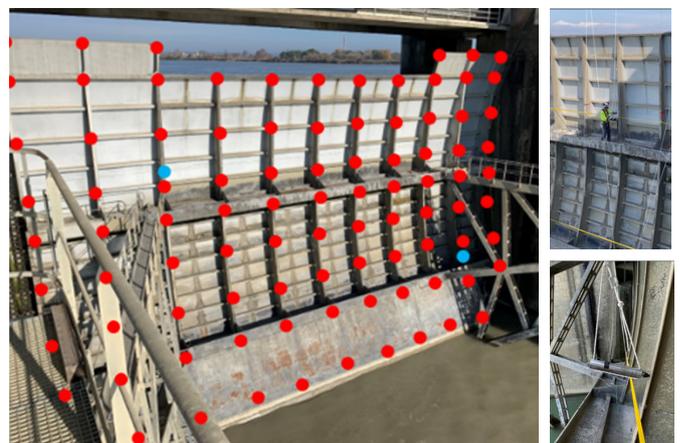


Image 3 : Excitation multi-points de la vanne en rouge avec évaluation de la réponse à l'aide d'un marteau en acier de 24 kg (image de droite). Les points bleus indiquent les emplacements suggérés pour l'installation permanente des capteurs ROCK Acceleration pour la surveillance à long terme.

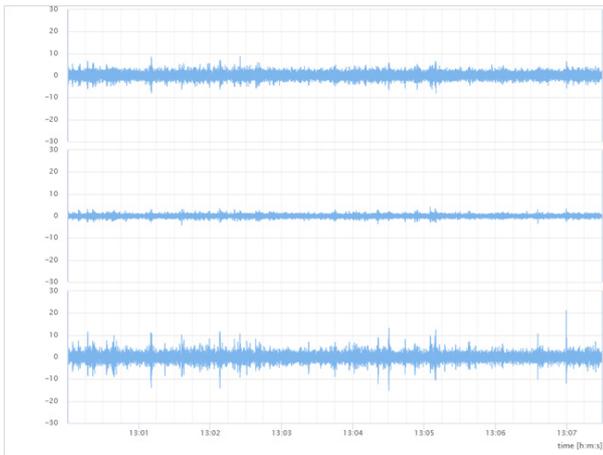


Image 4 : Enregistrement du bruit ambiant triaxial de 75 minutes, XY (horizontal) Z (vertical), amplitude en [mg].

### Résultats et observations

Les données collectées sur six mois ont fourni des informations précieuses sur le comportement dynamique de la porte du barrage.

- Le suivi de l'évolution des fréquences modales a mis en évidence des variations liées aux changements des niveaux d'eau. L'évolution du taux d'amortissement a été surveillée, montrant une dépendance aux niveaux d'excitation (bruit de fond, excitation microsismique et facteurs environnementaux).
- La validation de la synchronisation des capteurs a été réalisée avec succès en animant une déformation modale simplifiée.
- La représentation graphique de l'évolution des modes a confirmé la cohérence entre les deux méthodes d'analyse (SSI-Cov et FSDD).

Ces résultats sont essentiels pour la maintenance prédictive et l'évaluation de la sécurité structurelle, garantissant une détection précoce de la fatigue potentielle, de la dégradation ou des comportements vibratoires anormaux.

### Conclusion

Le déploiement du système Syscom ROCK Acceleration sur la vanne radiale a démontré l'efficacité de la surveillance structurelle à long terme dans les infrastructures hydrauliques. La surveillance entièrement autonome et à distance a permis un suivi des fréquences en temps réel sans intervention sur site. Deux capteurs synchronisés ont fourni une validation très précise des formes modales et un suivi des déformations pendant la période de surveillance. Le traitement basé sur le cloud via le Syscom Cloud Software (SCS - <https://scs.syscom-instruments.com>) a facilité la visualisation fluide des données et la gestion des notifications.

Cette étude de cas met en évidence comment les solutions avancées de SHM peuvent améliorer considérablement la sécurité des barrages et des vannes radiales en fournissant des informations structurelles continues et en optimisant les stratégies de maintenance.

Pour plus d'informations sur les solutions de surveillance de la santé structurelle de Syscom, explorez la solution Syscom SHM pour les vibrations dynamiques et découvrez comment elle peut être appliquée à vos projets d'infrastructure dès aujourd'hui!

### Un grand merci à Avnir Energy

([info@avnir-energy.fr](mailto:info@avnir-energy.fr)), partenaire de Syscom en France, pour le partage des photos et du contenu liés à cette étude de cas.



### Méthodes d'analyse

Pour assurer une identification modale précise et un suivi des fréquences, deux méthodes d'analyse avancées ont été utilisées, avec des calculs effectués à l'aide d'un logiciel dédié d'analyse modale:

**SSI-Cov** (Identification Stochastique par Sous-Espace - Méthode de Covariance) utilisé pour:

- Extraire les paramètres modaux à partir des données de vibrations ambiantes
- Aider à suivre les évolutions structurelles au fil du temps avec une grande précision.

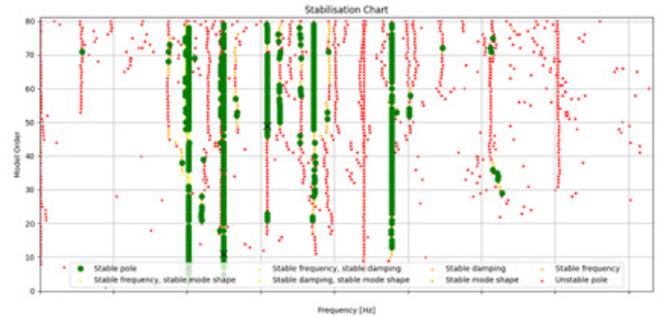


Image 5 : Graphique de stabilisation SSI-Cov généré avec Matlab.

**FSDD** (Décomposition dans le Domaine Fréquentiel et Spatial) utilisé pour:

- Analyse des modes de vibration spécifiques.
- Fournir une représentation graphique de l'évolution modale en fonction de la fréquence

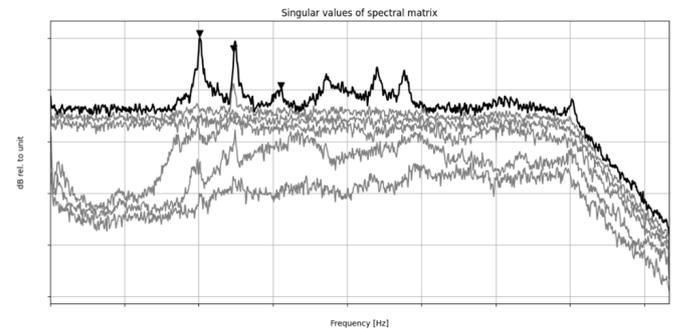


Figure 6 : Représentation graphique de la Décomposition dans le Domaine Fréquentiel et Spatial (FSDD).

### À propos de Syscom

SYSCOM Instruments fait partie de la plateforme Orica Digital Solutions, qui regroupe des marques de technologies de surveillance de confiance. Orica Digital Solutions est la première plateforme du secteur offrant une solution complète, de l'acquisition des données par capteur jusqu'à leur transmission dans le cloud, permettant une prise de décision proactive et éclairée en matière de gestion des risques et de surveillance.

SYSCOM Instruments SA est un fournisseur de premier plan d'équipements de surveillance des vibrations et des séismes destinés aux secteurs du génie civil et de la sécurité, en particulier pour les centrales nucléaires et les terminaux de gaz naturel liquéfié (GNL). La réputation de SYSCOM Instruments SA repose sur la fiabilité de ses produits, résultat d'un contrôle rigoureux de tous les aspects de la conception et de la production.

[www.syscom.ch](http://www.syscom.ch)