

# Auscultation de la contrainte des bétons des barrages pathologiques

Jérôme SAUSSE<sup>1</sup>, Julien SANAHUJA<sup>2</sup>, Frédéric TAILLADE<sup>2</sup>, Etienne GRIMAL<sup>3</sup>

<sup>1</sup> EDF – Division Technique Générale

<sup>2</sup> EDF – Recherche et Développement

<sup>3</sup> EDF – Centre d'Ingénierie Hydraulique

**RESUME** Afin d'améliorer le suivi et le diagnostic des barrages en béton soumis à des phénomènes de gonflement interne, il est étudié dans le cadre de projets de R&D d'EDF le moyen d'ausculter régulièrement l'évolution de la contrainte induite dans le béton. Cette donnée d'auscultation compléterait les essais destructifs par sur-carottage effectués afin d'ajuster et vérifier les résultats de modèles de comportements prédictifs. Une instrumentation test sur un barrage du Massif Central a permis d'adapter l'usage d'un capteur Stressmeter à la problématique des barrages pathologiques tandis qu'une série de modélisation et tests en laboratoire (passage du capteur sous presse au laboratoire des Renardières EDF-R&D) permettent de caractériser la réponse du système d'un point de vue métrologique.

**Mots-clefs** barrage, contrainte, auscultation, gonflement

**Key-words** dam, stress, monitoring, swelling

## I. INTRODUCTION

L'auscultation de l'évolution dans le temps des contraintes dans le béton n'existe pas à ce jour mais serait une avancée dans la compréhension réelle et la surveillance du comportement des ouvrages affectés de gonflement, en particulier en permettant une validation/calage des modélisations des effets du gonflement et du fluage des structures sur le long terme.

L'ordre de grandeur des contraintes à estimer, au vu des modélisations des barrages atteints de gonflement, serait d'environ 1 à 10 MPa avec une cinétique d'évolution de l'ordre de 0,1 MPa/an pour les ouvrages les plus affectés par le phénomène.

En 2019, à l'occasion d'une campagne d'essai destructif de mesure de contrainte par surcarottage sur un barrage du Massif Central (essai Doorstopper), des capteurs (Geokon 4300) de suivi d'évolution de la contrainte du béton ont été implantés dans le forage à titre expérimental. Ces capteurs sont prévus à l'origine pour la mesure de la contrainte des roches lors d'opération de forage par exemple. Un abaque, fonction du module de la roche, permet d'interpréter la mesure en contrainte. Cependant, ce capteur mesure en réalité une déformation. Dans une démarche de qualification, EDF souhaite étudier la réponse métrologique du capteur.

L'objectif des travaux de R&D est d'étudier la manière d'exploiter ces capteurs en identifiant les limites et la validité des mesures obtenues. Le travail consiste à analyser les mesures fournies par

le capteur en laboratoire et par simulations de manière à pouvoir interpréter le plus justement possible les données issues des capteurs implantés sur le barrage.

## II. TRAVAUX RÉALISÉS DEPUIS 2019

### A. Choix du capteur d'auscultation de contrainte en forage

La majorité des barrages EDF affectés de pathologie de gonflement du béton ont fait l'objet de campagnes d'essais destructifs par sur-carottage permettant d'estimer le niveau de contrainte à un endroit donné dans le barrage à un instant « t ». Ces essais sont coûteux et nécessitent potentiellement d'être réitérés au fil des ans pour actualiser les valeurs de contraintes induites par le gonflement et valider les résultats de simulations numériques du comportement des barrages concernés.

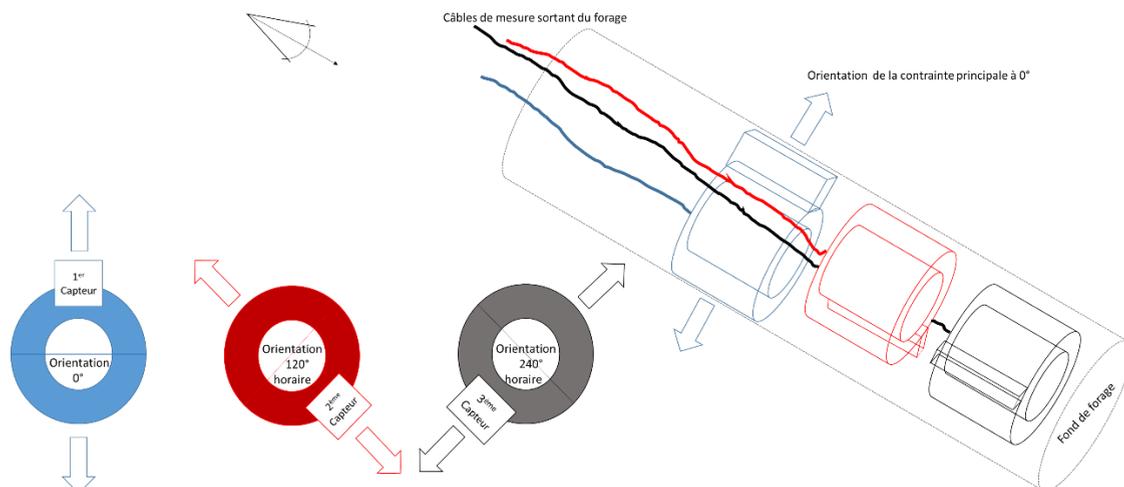
Il a été exprimé le besoin d'ausculter au fil du temps cette valeur de contrainte et essayer d'instrumenter les forages utilisés pour les essais de sur-carottage. Après une étude bibliographique il a été retenu de tester le capteur Geokon Stressmeter 4300. C'est un capteur de mesure de déformation unidirectionnelle radiale en forage, basé sur la technologie à corde vibrante. Il a l'intérêt de pouvoir être inséré dans un forage de diamètre 76 mm sur un ouvrage existant (contrairement à d'autres capteurs qui sont coulés dans le béton d'ouvrages en construction), à l'issue d'une campagne d'essai de mesure in-situ par sur-carottage (même diamètre).



**FIGURE 1. Capteur Geokon 4300**

### B. Instrumentation d'un barrage expérimental dans le Massif Central

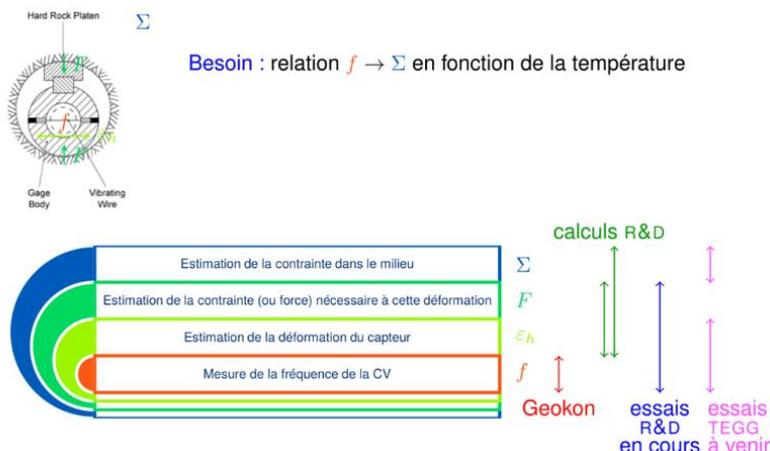
Trois capteurs Geokon disposés à 120° l'un de l'autre ont été installés à 1 m de profondeur dans un même forage, afin de mesurer la direction et l'amplitude de la contrainte principale. Le choix de leur emplacement a été établi en corrélation avec les directions des contraintes obtenues dans le modèle numérique de comportement du barrage de 2017 qui prend en compte les effets du chargement hydrostatique et du gonflement par dilatation thermique. Il est à noter que suite aux mesures, le modèle a été recalibré et mis à jour en 2021 avec un modèle développé spécifiquement pour les réactions de gonflements, ce qui a entraîné une légère modification de la distribution des contraintes. Cette modification aurait pu conduire à un choix différent de l'emplacement des capteurs.



**FIGURE 2.** Installation des 3 capteurs dans le forage du plot d'extrémité de la rive gauche du barrage

C. Programme d'étude et de qualification du système de mesure

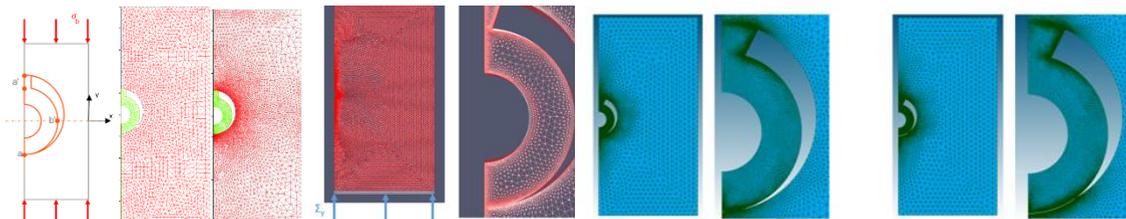
Le capteur Geokon n'est pas fourni avec une courbe d'étalonnage et l'enjeu consiste à transformer les mesures de fréquence du capteur jusqu'à la contrainte régnant dans le béton pathologique du barrage. Cela implique des modélisations et des essais sous presse au laboratoire d'EDF R&D Paris ainsi que possiblement au laboratoire béton d'EDF (TEGG Aix en Provence) qui sont décrits ci-après.



**FIGURE 3.** Programme d'étude pour qualifier le système de mesure de contrainte du béton en forage

*D. Modélisation du fonctionnement du capteur inclus dans un forage*

Avant tout essai de laboratoire, il a été réalisé plusieurs simulations du comportement du capteur inclus dans un orifice d'une matrice de béton soumise à une contrainte. Les modélisations numériques de R&D ont permis une première estimation du comportement du capteur sous chargement imposé en faisant varier plusieurs facteurs d'influences (hypothèses sur les modules d'élasticité des matériaux, des géométries et surfaces de contact, ...).



**FIGURE 4.** Simulations numériques du comportement du capteur

*E. Essais de laboratoire*

Afin de valider expérimentalement les résultats de simulation et lever les doutes sur certains facteurs d'influence, plusieurs essais du capteur ont été menés en laboratoire (essai en température, essai du capteur seul sous presse, essai sous presse du capteur inclus dans une éprouvette de béton).

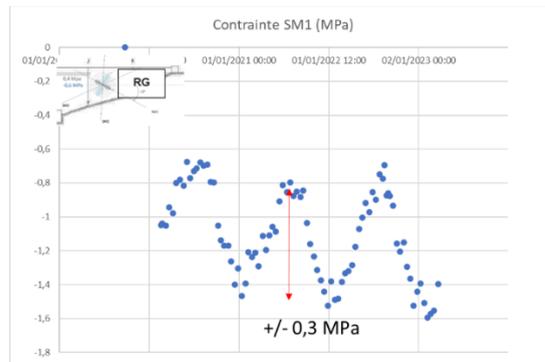


**FIGURE 5.** Campagnes de tests du capteur en laboratoire (sensibilité thermique, et essais sous presses)

*F. Interprétation des mesures in-situ au barrage*

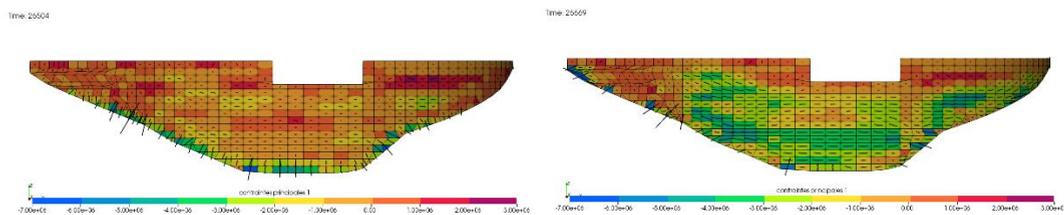
À l'issue des essais de laboratoire (derniers tests sous presse prévus début 2024), il devrait pouvoir être établie une loi de comportement (courbe d'étalonnage) du capteur afin de pouvoir exploiter les mesures réalisées depuis 2020 au barrage test.

La figure suivante, qui devra être fiabilisée par les essais complémentaires prévus, indique la variation de contrainte dans le béton à 1 m de profondeur depuis l'aval, selon l'axe de contrainte principale déterminé lors des essais de surcarottage. Ces données indiquent une variation saisonnière de la contrainte d'environ 0,3 MPa qui est cohérente avec l'attendu physique (compression estivale observée sur les modèles numériques, cf. ci-après). La possible tendance à la diminution de contrainte sur 3 ans sera à confirmer mais il n'est pas exclu d'observer dans la zone une partie légèrement tendue.



**FIGURE 6.** Mesures tirées des capteurs installés au barrage expérimental et premières tentatives d'interprétation (données non-fiabilisées à ce jour)

En effet, la comparaison avec la modélisation des contraintes dans l'ouvrage donne, sur la version actualisée du modèle, une certaine cohérence mais indique vraisemblablement que l'emplacement des capteurs aurait pu être revu. Il s'avère que l'extrémité rive gauche de l'ouvrage, en partie haute, n'est pas soumise à d'importantes contraintes de compression contrairement à ce que laisser présager la première modélisation numérique du barrage en 2017. Ceci illustre bien les incertitudes inhérentes à nos modèles de comportement et tout l'intérêt de la possibilité d'accéder à l'auscultation des mesures de contraintes.



**FIGURE 7.** : Contraintes de compression issues d'un modèle réactualisé en 2021 (à cote de retenue normale en hiver à gauche et en été à droite)

### III. SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

Les travaux d'EDF sur les possibilités d'ausculter l'évolution des contraintes en forage sur les bétons des barrages affectés de gonflement se poursuivent dans le cadre d'un projet de R&D. Cette thématique mobilise également l'ingénierie hydraulique (d'EDF Division Technique Générale), compte-tenu des enjeux et de l'intérêt que permettrait cette technologie pour une meilleure caractérisation du comportement des ouvrages béton atteint de phénomènes irréversible. Les essais de laboratoire permettent de pouvoir établir prochainement une première interprétation des mesures expérimentales menées sur un barrage et de les confronter aux modèles numériques de comportement (RAG/RSI).