

RETOUR D'EXPERIENCE SUR L'USAGE DES MESURES DE CONTRAINTES IN-SITU PAR SURCAROTTAGE DANS LE BETON : VALORISATION POUR LE BILAN D'ETAT DES BARRAGES BETON DU PARC EDF

Feedback on the use of in-situ stress measurement by overcoring in concrete: valuation for the condition assessment of EDF's concrete dams

Pauline DELHALLE, Nicolas HUMBERT, Romain TAJETTI

EDF CIH, 4 allée du lac de Tignes, 73290 La Motte Servolex

pauline.delhalle@edf.fr ; nicolas.humbert@edf.fr ; romain.tajetti@edf.fr

MOTS CLEFS

Modélisation numérique. Barrage béton. Etude de comportement. Mesure in-situ. Surcarottage. Cellule Doorstopper. Contraintes. Gonflement.

KEY WORDS

Numerical modeling. Concrete dam. Structural analysis. In-situ measurements. Overcoring. Cellule Doorstopper. Stresses. Swelling.

RÉSUMÉ

Dans le cadre des Etudes de Dangers (EDD) des barrages, EDF Hydro doit évaluer la sûreté de ses ouvrages pour une situation actuelle mais aussi pour le futur, à la date de la prochaine EDD. Pour les barrages pour lesquels les données d'auscultations sont partielles, ou pour lesquels un comportement est difficilement expliqué, ou encore pour les barrages atteints de pathologie de gonflement, la connaissance de la contrainte in-situ constitue un réel atout pour fiabiliser ou recalibrer les modèles numériques. Les méthodes de mesure de contraintes in-situ par surcarottage utilisées sont présentées. Puis, les exemples de 3 études de comportements, réalisées pour les barrages-voûtes atteints de pathologies de gonflement de Bage, Gour Noir et Gloriettes sont donnés. Enfin, une introduction aux travaux de R&D en cours à EDF sur la qualification de ces mesures est proposée.

ABSTRACT

For the hazard studies of dams subjected to AAR, EDF HYDRO has to assess safety and predict dam future behaviour (until the date of the following hazard study). For dams with partial monitoring data, or with unexpected behaviour, or for dams subjected to AAR, the knowledge of in-situ stress is a valuable data in order to validate or re-calibrate the numerical model. The different types of in-situ stress measurement by overcoring are presented. Then, the examples of 3 structural analysis, performed for 3 concrete arch dams subjected to AAR are detailed: Bage, Gour Noir and Gloriettes. Finally, the on-going research work on the validation of those measurements is presented.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre des Etudes de Dangers des barrages béton, afin de vérifier la conformité du barrage à l'Arrêté Technique Barrage de 2018, EDF doit s'assurer du bon comportement de l'ouvrage jusqu'à la date de l'EDD suivante (10 ans pour les « classe A », 15 ans pour les « classe B »). Ces vérifications s'appuient sur des modèles numériques et doivent couvrir toutes les situations de chargements auxquelles l'ouvrage sera soumis jusqu'à sa prochaine réévaluation de sûreté. Les modèles sont calés sur des données d'auscultations, lorsqu'elles sont

disponibles, qui sont majoritairement des mesures de déplacements. Parfois, ces données sont incomplètes ou ne permettent pas à elles seules d'expliquer et de reproduire avec le modèle numérique le comportement du barrage. Par exemple, il est fréquent de ne pas avoir de donnée sur le comportement au jeune âge. Ou alors, des déplacements inhabituels peuvent être observés dans le cas de resserrement de vallée, déclavage de joints, etc... Aussi, les barrages atteints de pathologie de gonflement présentent généralement des déplacements irréversibles vers l'amont, dont la cinétique peut évoluer avec le temps.

La caractérisation expérimentale de l'état de contrainte in-situ du barrage est pour tous ces cas précieuse car elle apporte une information complémentaire et permet d'améliorer la compréhension du comportement du barrage. Les modèles numériques sont ainsi fiabilisés, ainsi que les prédictions sur le comportement long-terme des barrages dans le cadre des études de dangers.

Ces vingt dernières années, EDF a réalisé un grand nombre de campagnes de mesures de contraintes in-situ, avec plus de 250 mesures réalisées sur 14 barrages bétons. Une présentation des différentes méthodes de mesures est faite au paragraphe 2.

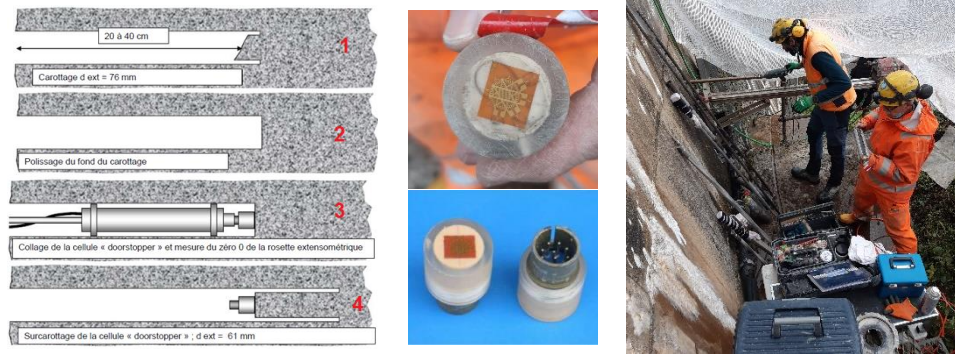
Puis, des exemples concrets d'études comprenant une confrontation aux contraintes issues des modèles numériques sont présentés dans cet article pour 3 barrages atteints de pathologies de gonflement : Bage, Gour Noir et Gloriettes. Pour ces trois ouvrages, les mesures de contraintes auront permis de confirmer le modèle actuel ou d'ajuster à la hausse ou à la baisse le taux de gonflement du modèle numérique afin de reproduire l'état de contrainte mesuré. L'ajustement des modèles numériques a un impact direct sur l'évaluation de la sûreté des ouvrages et donc sur les conclusions des études de dangers.

La mesure de contrainte par surcarottage, qui a été largement employée ces dernières années, n'a, à notre connaissance, jamais été validée en laboratoire sur le matériau hétérogène qu'est le béton des barrages (présence de granulats de diamètres décimétriques). EDF a souhaité évaluer l'incertitude de ces mesures sur un banc d'essai réalisé en 2024 avec 16 échantillons de bétons de 40cmx40cmx100cm testés à contrainte connue. L'analyse préliminaire des résultats de ce banc d'essai est donnée au paragraphe 4 (la campagne étant en cours). La campagne sera certainement poursuivie en 2025.

2. PRESENTATION DES METHODES DE MESURES DE CONTRAINTES IN-SITU PAR SURCAROTTAGE

La mesure de contrainte par surcarottage consiste à mesurer le déplacement (relâchement/extension ou compression) subi par une carotte de béton pendant son forage. La carotte de béton en état de compression subira une extension pendant le forage, et à l'inverse le béton en traction subira une contraction. Afin d'évaluer la contrainte in-situ, la carotte est placée dans une cellule biaxiale afin de mesurer le module du béton. La connaissance du module et de la déformation permet de calculer la contrainte.

Il existe différents types de cellules qui permettent de mesurer ce déplacement. Pour les barrages du parc, EDF a fait appel à deux entreprises qui utilisent deux types de cellules ; l'entreprise SialTec qui utilise des cellules Doorstopper, qu'elle fabrique elle-même, et l'entreprise Ineris, qui utilise une cellule USBM fabriquée par l'entreprise GEOKON. Il convient de noter que ces mesures sont principalement employées dans le domaine de la mécanique des roches et des travaux souterrains, et peu sur les barrages.



Crédit photo ©SialTec [4]

Figure 1 : Principe de la mesure de surcarottage avec cellule Doorstopper



Crédit photo ©Ineris [1]

Figure 2 : Principe de la mesure de surcarottage avec sonde USBM

Une comparaison sommaire des avantages et inconvénients de chaque méthode de mesure est proposée ci-dessous :

	Avantages	Inconvénients
Surcarottage avec cellule Doorstopper	« Faible » coût, permet de réaliser beaucoup de mesures par campagne.	- Les jauges de déformation développées par SialTec ont une longueur de 11 mm qui donne une évaluation de la contrainte très localisée. - Utilisation de la colle rend impossible de faire un essai à une profondeur > 4/5 m (la colle fait prise avant de pouvoir la placer en fond de trou). - Impossibilité de coller la cellule si béton trop humide ou immergé.
Surcarottage avec sonde USBM	- Déformation mesurée sur 38mm. - Peut être réalisé à grande profondeur et sous l'eau. - La mesure est réalisée pendant toute la durée du surcarottage.	Mesure impossible si béton de mauvaise qualité (fracture de la carotte pendant le surcarottage et perte de la déformation).

Tableau 1 : Comparaison des avantages et inconvénients des deux méthodes de mesure de contrainte par surcarottage

En tout, EDF Hydro a réalisé plus de 250 mesures de contraintes (réparties sur 16 campagnes de mesures, sur 14 barrages, dont 11 sont atteints de pathologies de gonflement avérées par l'auscultation et 1 n'a pas d'auscultation mais présente du faïençage en surface). De par le plus faible coût de la mesure, la méthode employée dans la plupart des cas est le surcarottage avec cellule Doorstopper. Le paragraphe suivant présente des exemples concrets d'utilisation des résultats des mesures de contraintes in-situ dans la validation des modèles numériques des études de comportements réalisées ou mises à jour pour les Etudes de Dangers.

3. EXEMPLES D'APPLICATION POUR 3 BARRAGES

Les résultats des études de comportement récentes des barrages-voûtes de Bage, Gour Noir et Gloriettes sont présentés dans ce paragraphe. Ces barrages sont tous les 3 atteints de pathologie de gonflement, qui est modélisée par la méthode d'analogie thermique, la méthode de calcul la plus simple souvent employée en première approche. Un champ de température est appliqué sur l'ouvrage afin de reproduire les déplacements irréversibles observés. L'influence du fluage et du comportement non-linéaire du béton soumis aux réactions de gonflement (qui induit une réduction sensible des contraintes) est prise en compte en appliquant un facteur 3 entre le module d'élasticité initial et le module prenant en compte le fluage ($E_{\text{fluage}} = E_{\text{béton}}/3$), comme cela est recommandé par la CIGB [8] ainsi que par le BPEL [9].

Le Tableau 2 présente les caractéristiques principales de ces trois barrages, qui sont des voûtes minces à simple courbure amont, de hauteurs comprises entre 30 et 45m environ construits dans la période 1940-1950. Les déplacements irréversibles mesurés vers l'amont sont compris entre 0.2 et 0.8 mm/an. Ces barrages sont en bon état général et ne présentent pas de signes apparents de gonflement (pas de fissuration importante ni faïençage...).

Type	Bage	Gour Noir	Gloriettes
	Voûte mince (simple courbure amont ; courbure variable aval)	Voûte mince (simple courbure amont ; vertical aval)	Voûte à simple courbure
Classe	B	A	A
Construction	1948-1952	1940-1946	1949-1951
Fondation	Orthogneiss	Granite	Gneiss
Hauteur max. sur fondation (m)	28.5	44	45
Epaisseur en crête (m)	2	1.7	2
Epaisseur à la base (m)	10	7.8	11
Longueur de couronnement (m)	165	100	136 (hors culées)
Auscultation	Planimétrie	Planimétrie	Planimétrie
Début de gonflement observé d'après l'auscultation	1980	1990	1985 ¹
Déplacement radial max. total vers l'amont en crête (mm)	17 (2018)	6.3 (2023 centre) -17.2 (2023 rives)	25 (2022)
Déplacement radial max. /an vers l'amont en crête	0.45 mm/an	0.19 mm/an (centre) -0.52 mm/an (rives)	~0.8 mm/an
EDD	Prévue 2031	2023 (prochaine 2033)	2023 (prochaine 2033)

Tableau 2 : Caractéristiques principales des 3 barrages présentés

3.1. Barrage de Bage

Le barrage de Bage est un barrage voûte en vallée large, pour lequel l'auscultation montre depuis 1980 une tendance de déplacement des cocardes de crête vers l'amont. Ce barrage a fait l'objet d'une première étude de comportement linéaire réalisée en 2018 [2] (6 ans après la sortie de la première EDD en 2012) dans laquelle les conclusions étaient les suivantes (concernant les cas de charges étudiés avec prise en compte du gonflement) : les contraintes de compressions étaient de l'ordre de 7 MPa en été en parement amont aux plots de rives (et atteignaient localement des valeurs de presque 12 MPa). D'après le calage des déplacements irréversibles, le gonflement affecterait essentiellement les plots de rives (voir Figure 2).

¹ Le gonflement a probablement démarré dès la construction de l'ouvrage mais les effets sont généralement masqués par d'autres phénomènes (retrait et fluage).

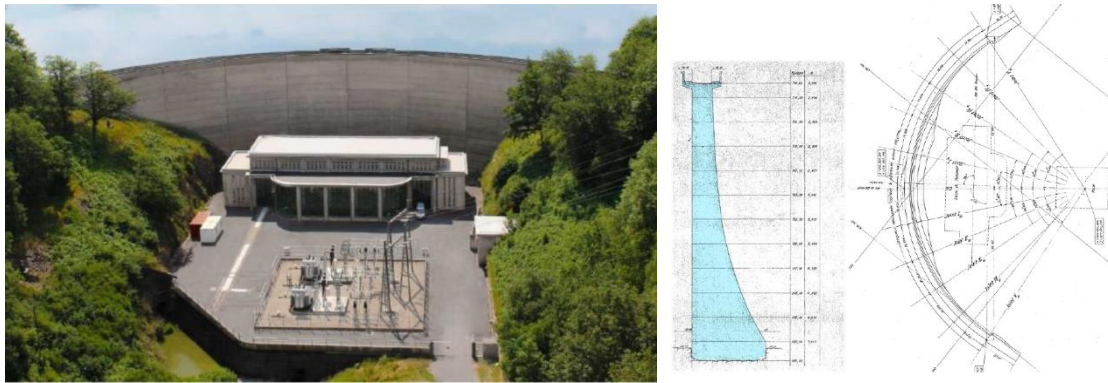


Figure 3 : Vue aval du barrage de Bage – Coupe transversale en clé et vue en plan

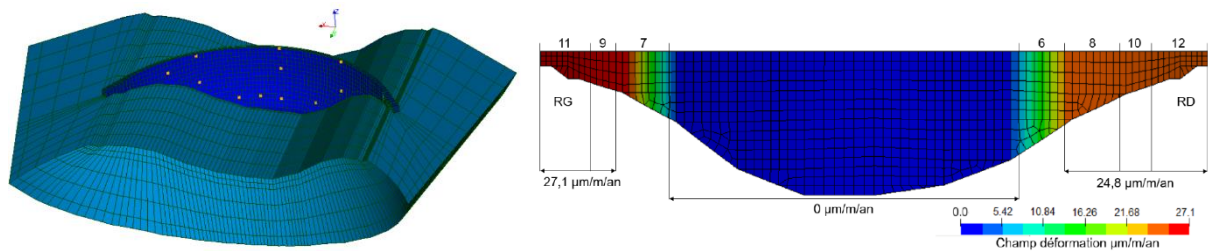


Figure 4 : Maillage du barrage de Bage – Champ de déformation imposé ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{an}$) pour le calage des déplacements irréversibles (vue du barrage depuis l'amont)

A la suite de cette étude, des reconnaissances géotechniques [3] ont été prescrites afin de (entre autres) réaliser des mesures de contraintes dans les zones où les contraintes dues au gonflement sont les plus élevées et les plus homogènes possibles, et si possible avec un accès facile (généralement en pied aval du barrage) pour valider ou ajuster les hypothèses de gonflement du barrage. 6 sondages horizontaux ont été effectués depuis le parement aval du barrage, dans lesquels 3 mesures de contraintes ont été effectuées (voir leur implantation à la Figure 5).

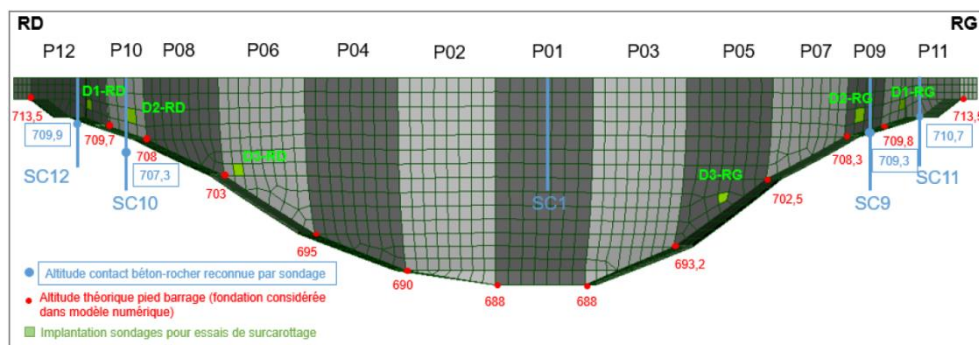


Figure 5 : Implantation des sondages carottés verticaux et des sondages horizontaux depuis le parement aval pour les mesures de contraintes par surcarottage réalisées en Octobre 2020

Les résultats des mesures de contrainte principale majeure comparées aux contraintes en parements du modèle numérique (présentés à la Figure 6) montrent que les contraintes mesurées sont en majorité supérieures à celles estimées par le modèle numérique sans prise en compte des effets irréversibles, ce qui traduit donc la présence de contraintes de compression dues à un gonflement. Elles sont cependant en majorité inférieures à celles estimées par le modèle numérique avec prise en compte des effets irréversibles, ce qui met en évidence que la simulation est probablement trop pessimiste et les contraintes surestimées d'un facteur 2 à 6 en moyenne.

Une mise à jour de l'étude a été réalisée en 2021 [4] en divisant par deux le module long-terme considéré initialement dans l'étude de 2018 (soit en considérant $E_{\text{fluage}} = E_{\text{béton}}/6$), afin d'obtenir pour un même déplacement irréversible, des contraintes dues au gonflement deux fois plus faibles. Le barrage de Bage étant de classe B, sa prochaine EDD est prévue pour 2031. Pour la mise à jour de l'étude de comportement, le dispositif d'auscultation a été complété de cocardes en crête : ces mesures complémentaires permettront de mieux

caractériser les déplacements irréversibles vers l'amont du barrage, ainsi que les vitesses, et donc pour la prochaine EDD d'être encore plus confiants sur le faible niveau de criticité de cet ouvrage. Lors de l'Examen Technique Complet qui doit être réalisé dans les deux ans avant la mise à jour de l'EDD (2029), des mesures de contraintes supplémentaires pourront éventuellement être prescrites afin d'observer leur évolution une petite dizaine d'années après la première mesure, ce qui permettra d'affiner le modèle numérique et de se prononcer sur la conformité du barrage pour une exploitation 2031+15 ans.

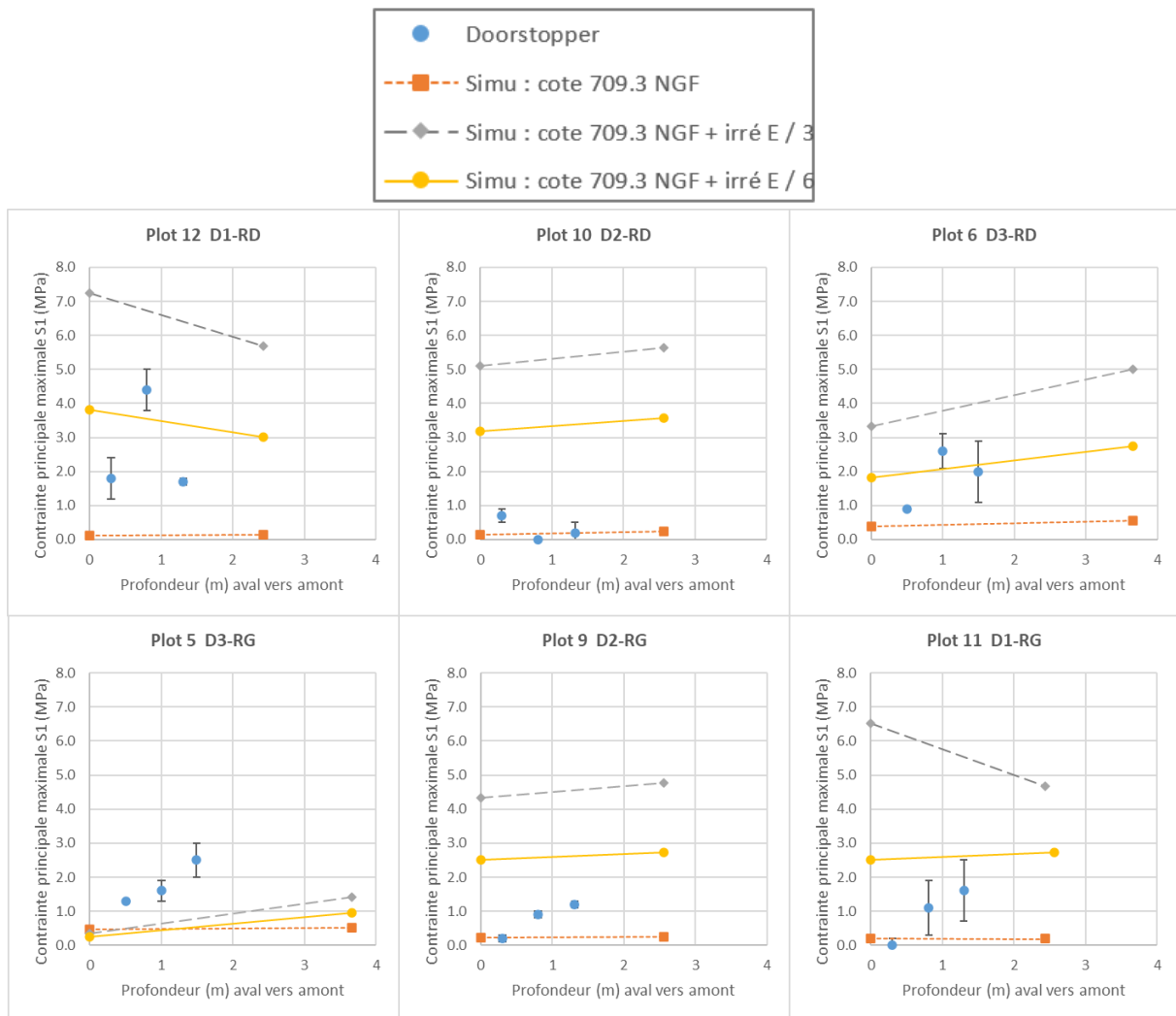


Figure 6 : Mesure de contraintes au barrage de Bage (Doorstopper) en fonction de la profondeur depuis le parement aval comparées avec les contraintes en parement du modèle numérique sans (orange), avec (gris et jaune) prise en compte des effets irréversibles pour deux modules long-terme – Simulation avec module long terme / 6 retenue

3.2. Barrage de Gour Noir

Le barrage voûte de Gour Noir présente depuis 1990 une tendance de déplacements irréversibles vers l'amont. Ce barrage a fait l'objet de plusieurs études incrémentales (études réalisées avec un degré de complexité croissant) et de deux campagnes de mesures de contraintes ; la première en 2015, avec des mesures au vérin plat et la seconde en 2021 avec des mesures par surcarottage avec cellule Doorstopper [5].

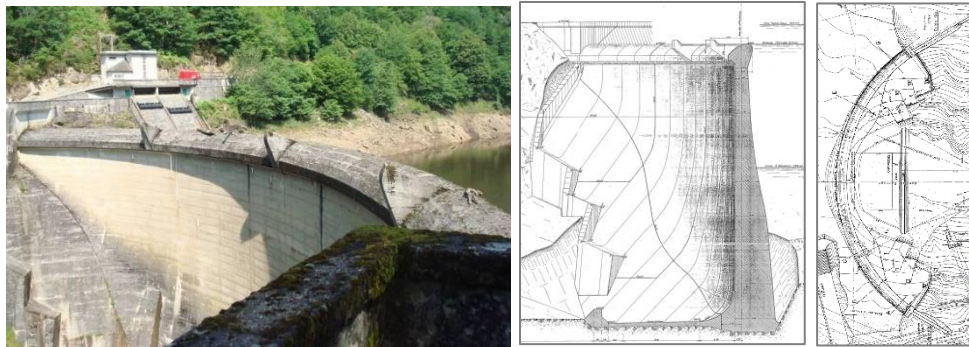


Figure 7 : Barrage de Gour Noir vu depuis la culée RG – Profil central du barrage – vue en plan

Les premières études concluaient que le niveau de contrainte dans le barrage était acceptable (de l'ordre de 5-6 MPa en partie centrale et jusqu'à 10 MPa en pied amont, et de l'ordre de 7 MPa en parement aval à proximité des interfaces voûtes-culées). Le déplacement irréversible pris en compte pour les premières études a été calé en tenant compte des mesures réalisées au vérin plat ; qui montraient un état de traction du parement aval, et dont l'explication pourrait être la différence de gonflement entre parement amont et parement aval de l'ouvrage, lié probablement à un degré de saturation de béton différent.

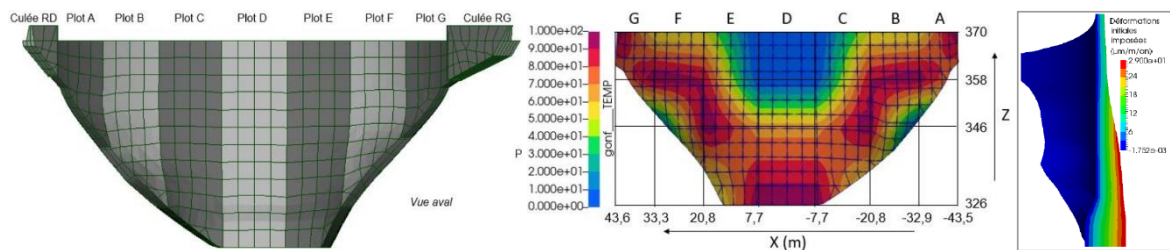


Figure 8 : Vue aval du maillage du barrage de Gour Noir – Champ thermique imposé sur le parement amont (°C) pour reproduire le gonflement des bétons (vue du barrage depuis l'amont) – Gradient amont-aval

Des mesures de contraintes par surcarottage (Doorstopper) ont été réalisées en septembre 2021. En crête, ces mesures ont pu investiguer l'état de contrainte à 40 cm et 80 cm du parement aval (les mesures n'ayant pas été faites plus en amont, de peur d'avoir des venues d'eau de la retenue trop importantes). En partie inférieure, les mesures de contraintes ont été effectuées à des profondeurs de 1, 2 et 3 m. Les contraintes principales majeures (compressions) mesurées varient entre -0.2 et 7.1 MPa (voir Figure 10). Les essais Doorstopper confortent l'ordre de grandeur des contraintes du modèle numérique avec prise en compte des effets irréversibles. Les déformations imposées dans le modèle par analogie thermique sont particulièrement hétérogènes que ce soit entre l'amont et l'aval ou selon la zone du parement amont : compte tenu de ces gradients associés à la pathologie de gonflement et de l'approximation de la localisation des essais sur le modèle, la comparaison entre état de contrainte mesuré et modélisé est considérée satisfaisante. Il y a même une bonne cohérence de la répartition des contraintes entre aval et amont observée avec les mesures par rapport au modèle numérique en crête de l'ouvrage (voir essais dans forages A, D1 et G). Au vu de ces résultats, les mesures in-situ ont confirmé le calage du modèle numérique, il n'y a donc pas eu de recalage de la modélisation [6].

Le comportement du barrage ainsi modélisé (et confirmé par les mesures de contraintes) pour l'EDD 2023 a permis de coter en D l'occurrence du mode de rupture « cisaillement du barrage » (avec barrière de prévention d'abaissement de la retenue). Des préconisations complémentaires en lien avec l'ERC 1 (rupture barrage) sont formulées afin d'améliorer la connaissance du comportement du barrage, comme la réalisation de mesures de déplacements mensuels, et la mise en place d'un suivi thermique du barrage (instrumentation avec thermomètres en parements) sur plusieurs cycles saisonniers. La meilleure connaissance du chargement thermique saisonnier du barrage permettra d'améliorer la modélisation du comportement du barrage.

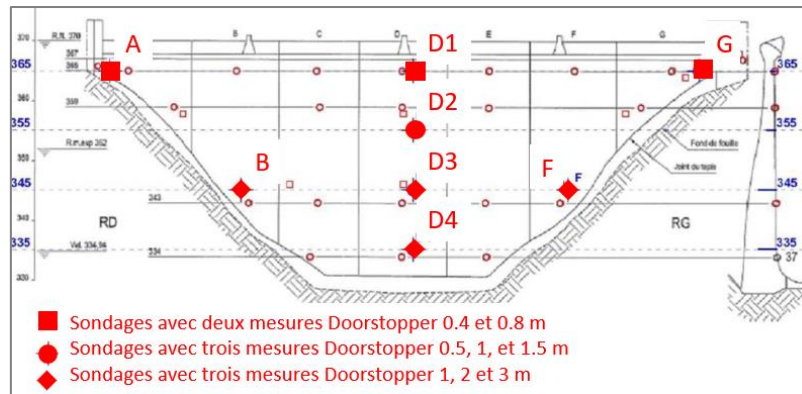


Figure 9 : Positionnement des sondages pour les mesures Doorstopper sur le barrage de Gour Noir

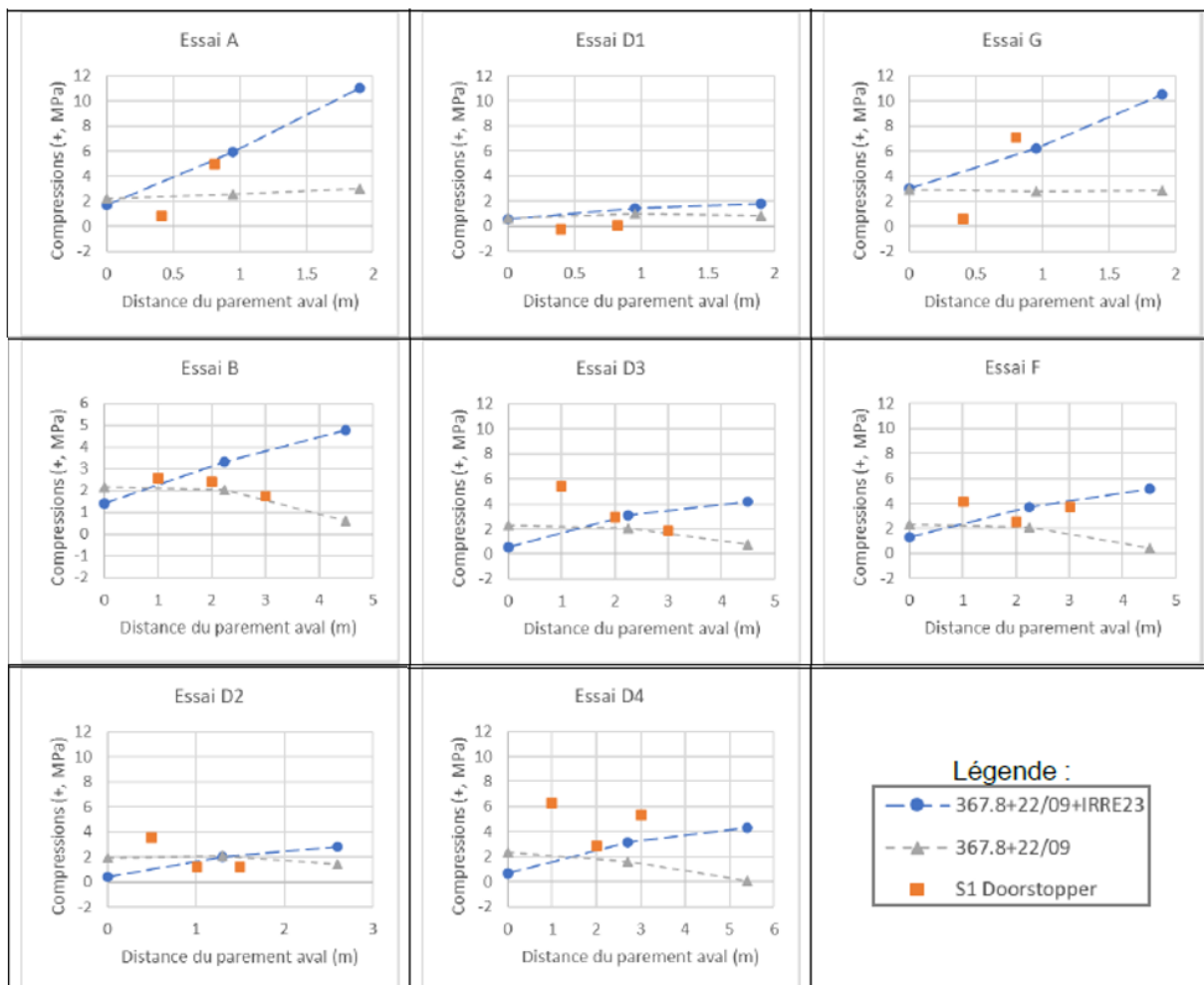


Figure 10 : Mesure de contraintes au barrage de Gour Noir en fonction de la profondeur depuis le parement aval comparées avec les contraintes en parement du modèle numérique sans et avec prise en compte des effets irréversibles

3.3. Barrage de Gloriettes

Le barrage des Gloriettes est un barrage voûte à simple courbure dont les fermetures sont assurées par deux culées, dont la RD qui est une culée-poids avec une surface de fondation légèrement inclinée vers l'aval. L'auscultation présente des déplacements irréversibles vers l'amont depuis le milieu des années 80.

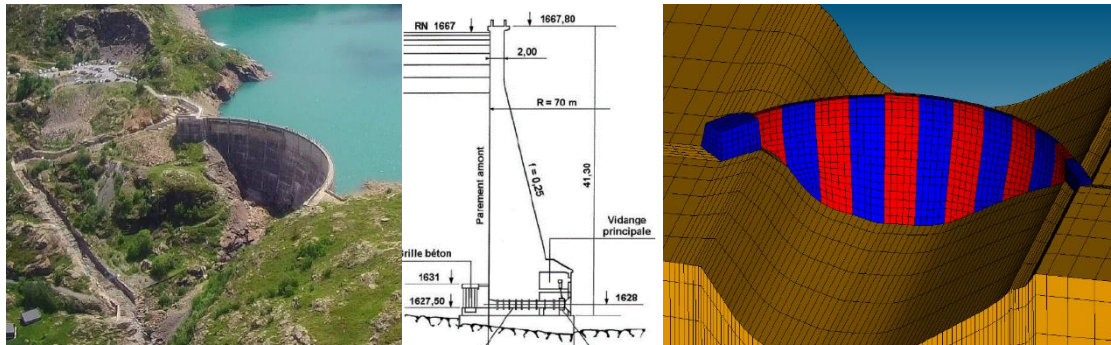


Figure 11 : Barrage des Gloriettes vu depuis l'aval – Profil central du barrage – Maillage utilisé pour l'étude de comportement

Ce barrage a fait l'objet de plusieurs études incrémentales ; la première en 2006 concluait à une forte sollicitation des culées (notamment en RD) mais ne prenait pas en compte le fluage. La seconde étude réalisée en 2013 ajoute des éléments d'interfaces au contact avec la fondation et utilise un module sécant (long-terme) sous chargement de gonflement (égal au tiers du module hydrostatique, comme présenté au début de ce paragraphe). Ce modèle met en évidence un mouvement d'adaptation de la culée sous l'effet de la pression induite par la pathologie de gonflement, circonscrit à la culée en raison de la raideur importante des appuis des plots adjacents. Ce modèle prédit un mouvement d'adaptation similaire de la culée RG qui intéresse également les plots adjacents à cet ouvrage mais qui n'est cependant pas observé via l'auscultation. Cet écart peut s'expliquer par une sous-estimation des effets du fluage, ou une sous-estimation des caractéristiques de cisaillement par des effets d'encastres.

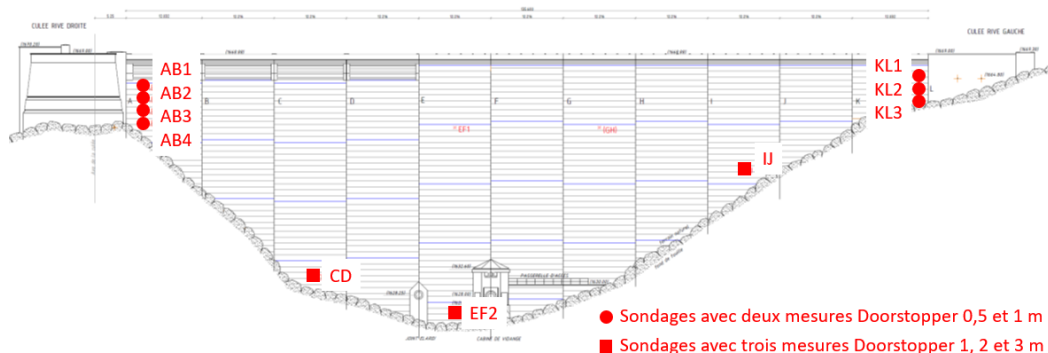


Figure 12 : Emplacement des sondages pour les surcarottages et nombre d'essai par sondage

La dernière étude de comportement réalisée en 2023 [7] réajuste la modélisation en imposant des déformations par analogie thermique afin de mieux représenter les déplacements irréversibles et les contraintes mesurées.

Initialement, le modèle supposait un taux de gonflement croissant entre le pied et la crête de la voute (nul en pied à 1.2°C/an en crête), et nul au niveau des culées. La caractérisation expérimentale des contraintes a montré que cette hypothèse, qui permettait de reproduire les déplacements de la voute, n'était pas satisfaisante vis-à-vis des contraintes mesurées par surcarottage.

En pied d'ouvrage, les contraintes in-situ ont montré des compressions de l'ordre de 3-4 MPa dans la direction parallèle aux appuis alors que le modèle ne prédisait que 1 MPa dans les mêmes conditions de chargement. A l'inverse, les compressions étaient surestimées par le modèle numérique en partie haute (voir Figure 13).

La distribution des cinétiques de gonflement a donc été revue : dans le but d'augmenter les compressions en partie basse, le taux de gonflement est adapté pour varier de 0 en pied à 1/3 du taux de gonflement affecté en crête. Et afin de ne pas trop modifier le calage des déplacements, le taux de gonflement en crête est à l'inverse légèrement diminué (1.1°C/an). Cette dernière simulation constitue un bon compromis : le calage des déplacements est peu affecté et reste satisfaisant, tandis que les compressions en pied sont significativement augmentées et correspondent beaucoup mieux aux résultats des essais par surcarottages.

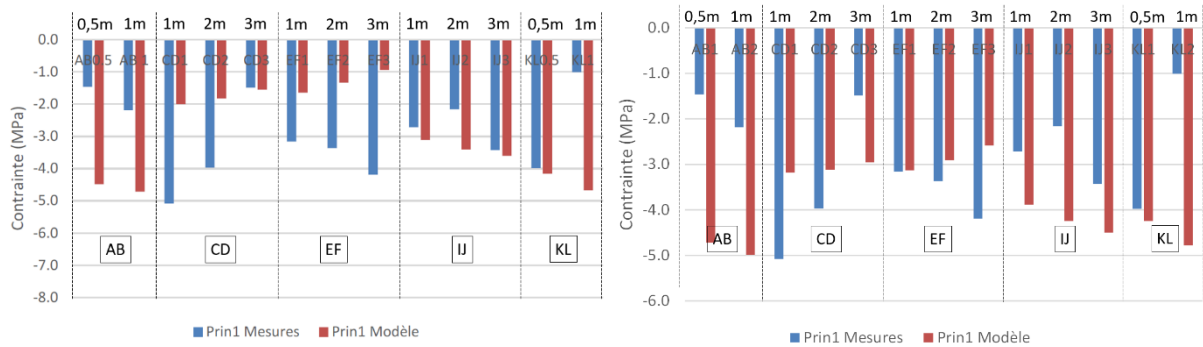


Figure 13 : Comparaison de la contrainte principale majeure calculée par le modèle numérique, avant (haut) et après (bas) recalage du modèle, avec celle mesurée in-situ

Le comportement du barrage ainsi modélisé (grâce aux mesures de contraintes) pour l'EDD 2023 a permis de coter en E l'occurrence du mode de rupture « cisaillement du barrage ». Une étude non-linéaire a été réalisée afin d'évaluer les sollicitations sur les culées dues au gonflement du barrage et a permis de mettre en évidence l'adaptation avec des déplacements faibles des culées. Des mesures compensatoires sont préconisées, comme notamment une étude géologique du rocher de butée RG afin de vérifier le bon comportement de la fondation sous ces sollicitations.

3.4. Conclusion

Pour ces 3 barrages voûte, dont le gonflement modéré est modélisé par analogie thermique, la connaissance de la contrainte in-situ a tantôt permis de valider le modèle numérique (barrage de Gour Noir), ou permis d'ajuster le calage du modèle numérique (contraintes à la baisse pour Bage et à la hausse pour Gloriettes). Dans le cas spécifique du barrage des Gloriettes, la mesure de contrainte a mis en évidence que le gonflement était sous-estimé, avec pourtant un calage initial des déplacements irréversibles satisfaisant.

Ces exemples montrent que le rôle des mesures de contraintes in-situ est primordial dans les études de danger car elles permettent de contrôler la validité des modélisations numériques sur lesquelles s'appuient largement l'évaluation du niveau de sûreté de l'ouvrage, pour son exploitation actuelle et future projetée à la date de la prochaine EDD. Elles permettent de préconiser des actions complémentaires pour les prochaines études de dangers, afin de mieux décrire les comportements de nos ouvrages et évaluer leur criticité.

Au vu de ces enjeux, EDF a entrepris un travail de qualification de ces mesures. En effet, ces mesures très largement employées dans le domaine de la mécanique des roches n'ont (à notre connaissance) jamais été validées sur banc d'essai pour un béton de barrage avec gros granulats (matériau localement hétérogène). Le travail de recherche est présenté succinctement dans le paragraphe suivant.

4. TRAVAIL DE RECHERCHE SUR LA QUALIFICATION DE LA MESURE

Les mesures par surcarottage montrent que, sur un même barrage, parfois dans un même sondage, une disparité importante de contrainte et d'orientation peut être observée. De nombreux phénomènes affectent l'état de contrainte du béton (chargement thermique, gonflement, état de saturation...) qui sont à l'origine de ces disparités. Il est essentiel d'évaluer la précision de la mesure sur un banc d'essai à contrainte connue afin de pouvoir les utiliser « au plus juste » dans la modélisation du comportement de nos ouvrages.

EDF Hydro a commandé la réalisation de ce banc d'essai à son laboratoire interne (TEGG). Pour des aspects pratiques et financiers (facilité d'utilisation sans colle, réemploi de la même cellule pour tous les essais, possibilité de l'acquérir sur catalogue), la cellule USBM a été retenue dans un premier temps.

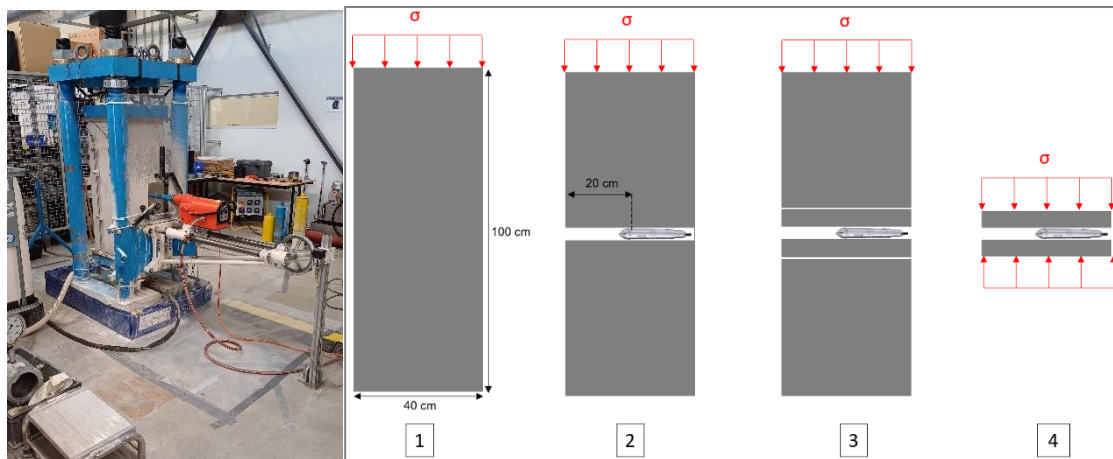


Figure 14 : Banc d'essai (presse) utilisée pour la qualification de la mesure de contrainte in-situ par surcarottage dans le béton – Phase de l'essai

11 éprouvettes de béton conventionnel (avec diamètres de granulats max de 20 mm) ont été testées pour des contraintes allant de 0 à 7 MPa, et 5 éprouvettes de béton de barrage (granulats de diamètre 80 mm) ont été testées pour une contrainte de 7 MPa. Les éprouvettes sont de dimension 40 * 40 * 100 cm, et la contrainte est appliquée uniformément en face supérieure. L'application du chargement uniforme a constitué le premier challenge de cette campagne. Le second challenge a été la compréhension de l'état de contrainte interne du béton dû à son retrait de dessiccation de peau, qui induisait un écart systématique d'environ 2,5 MPa de la mesure par rapport à la contrainte appliquée. L'écart a pu être considérablement réduit en re-saturant l'éprouvette avant de réaliser l'essai ; la contrainte mesurée a été de 6,8 MPa (pour une contrainte de 7 MPa appliquée sur l'échantillon).

La campagne sera poursuivie en 2025 avec de nouvelles éprouvettes de béton de barrage testées à différentes contraintes, afin de conforter les observations de la première campagne de 2024. EDF a aussi la volonté de qualifier les essais Doorstopper sur ce banc d'essai. Suite à cette campagne, le REX de ces essais sera capitalisé afin d'établir des recommandations sur la réalisation de ces mesures dans les barrages béton, qui serviront ensuite de données d'entrée dans les études de comportement alimentant les études de dangers.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les mesures de contraintes in-situ permettent d'apporter des données complémentaires à l'auscultation, qui peuvent simplement confirmer le calage des modèles numériques, ou parfois permettre de les réajuster afin d'obtenir des niveaux de contraintes plus conformes à ce qui est observé. Les trois exemples d'études cités dans cet article concernent des barrages atteints de pathologie de gonflement pour lesquels la modélisation par analogie thermique est utilisée, mais les mesures de contraintes in-situ peuvent aussi être utilisées pour valider des modèles RAG plus complexes (calcul de la cinétique en fonction des paramètres influant : température atteintes au jeune âge, quantité de réactifs, porosité initiale, etc... et prise en compte des phénomènes qu'elle induit, fluage, endommagement...) ou encore pour expliquer des déplacements inhabituels (resserrement de vallée, déclavage de joints...).

Dans le contexte des études de dangers et de la nécessité de statuer sur le comportement futur de l'ouvrage, les essais permettent d'améliorer la compréhension du comportement mais aussi d'identifier les zones à surveiller en cas de pathologie évolutive. Ces essais permettent de d'aider à la cotation des différents EI de l'ERC1 « rupture barrage ». Ils viennent compléter les données d'auscultation et permettent d'établir des préconisations. Ces mesures représentent donc un atout majeur pour EDF Hydro pour garantir la sûreté de ses ouvrages.

Toutefois, se posent régulièrement les questions de la validité de ces essais sur des bétons de barrage composés de très gros granulats, ainsi que de la précision des mesures et de leur orientation. Dans ce cadre, EDF a lancé une campagne de validation basée sur le surcarottage d'éprouvettes de béton massives d'environ 300kg et visant à répondre à toutes ces questions ainsi qu'à établir un guide de bonnes pratiques pour ces essais. La campagne est en cours et sera prolongée jusqu'en 2025. Les résultats seront très certainement publiés en 2026.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] « Barrage de Séloge (73) – Mesures de contraintes – Rapport de chantier » Hydrogéotechnique, C.19.42076 Indice 3 (10/12/2019)
- [2] « Barrage de Bage – Etude de comportement du barrage-voûte – Analyse linéaire » EDF CIH, réf. H30575708-2018-000113.A (P. Boffety, 15/03/2019)
- [3] « Barrage de Bage – Mesure des contraintes par essai Doorstopper – Octobre 2020 » Sial.Tec (20/11/2020)
- [4] « Barrage de Bage – Analyse des résultats des reconnaissances et compléments à l'étude de comportement » EDF CIH, réf. H30575708-2021-000099.A (P. Boffety, 25/04/2022)
- [5] « Barrage de Gour Noir – Mesure des contraintes par essai Doorstopper – Septembre 2021 » Sial.Tec (11/10/2021)
- [6] « Barrage de Gour Noir – Etude de comportement – Conformité à l'ATB » EDF CIH, réf. H30575708-2023-000114.A (N. HUMBERT, 04/12/2023)
- [7] « Barrage des Gloriettes – Etude de comportement du barrage – Conformité à l'ATB » EDF CIH, réf. H30575708-2023-000106.A (R. TAJETTI, 31/07/2023)
- [8] « The physical properties of hardened conventional concrete dams” – ICOLD Bulletin 145 – January 2009
- [9] Règles B.P.E.L 91 : règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint, suivant la méthode des états-limites. Paris : Eyrolles; 1993