

RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LA RUPTURE D'UN CLAPET D'UN BARRAGE MOBILE EN RIVIÈRE

Feedback on the flap gate rupture of a gate structure dam

Anthony MOUYEAUX, Rémy TOURMENT, Laurent PEYRAS

INRAE, Centre PACA - UMR RECOVER – Equipe G²DR, 3275 route de Cézanne 13182 Aix-en-Provence
anthony.mouyeaux@inrae.fr ; remy.tourment@inrae.fr ; laurent.peyras@inrae.fr

Arnaud ISAAC

ARTELIA-SPRETEC, 6 rue de Lorraine 38130 Echirolles
Arnaud.ISAAC@arteliagroup.com

Dominique LENNE

DREAL Auvergne-Rhône-Alpes, 7 rue Léo Lagrange 63033 Clermont-Ferrand Cedex 1
Dominique.LENNE@developpement-durable.gouv.fr

MOTS CLEFS

Barrage mobile, rupture, clapet

KEY WORDS

Gate-structure dam, rupture, flap gate

RÉSUMÉ

Le barrage de Vichy est un barrage mobile en rivière sur la rivière de l'Allier, mis en service en 1963. Il appartient à la Ville de Vichy. L'ouvrage comporte sept passes équipées de clapets déversants d'origine, à l'exception du clapet n°2 qui a été remplacé en 2012. Ces clapets ont une largeur de 29,5 m, une hauteur de 4,15 m et sont manœuvrés par des chaînes Galle, actionnées manuellement ou électriquement par un motoréducteur.

Suite à un diagnostic, un programme de restauration du barrage prévoyait fin 2015 de remplacer entièrement les autres clapets (n°1 et n°3 à 7). Les travaux de restauration des clapets ont démarré en 2020 et devaient se poursuivre jusqu'à fin 2024.

Dans la nuit du 27 au 28 juin 2021, aux alentours de 3h, le clapet n°6 du barrage s'est rompu brutalement, alors que la rivière connaissait une crue de période de retour courante et que les travaux de remplacement étaient en cours sur le clapet n°7, dont la passe était batardée. Les travaux de remplacement du clapet n°6 étaient envisagés à partir de septembre 2021.

La rupture du clapet n°6 a fait l'objet d'une déclaration en EISH orange. Suite à cette rupture, il a été réalisé un diagnostic détaillé permettant de définir les causes ayant mené à la rupture du clapet, et d'évaluer le risque de rupture des clapets restant à remplacer. L'étude de diagnostic a compris : i) des mesures d'épaisseur et l'analyse des soudures du clapet rompu, ii) une modélisation aux éléments finis du clapet n°6 visant à reproduire le mécanisme de rupture, iii) une modélisation hydraulique avec simulation de différents cas de batardage des passes, et iv) une analyse de risques pour la gestion de la suite des travaux de remise à niveau.

L'article propose d'établir un retour d'expérience de cet accident, basé notamment sur les résultats de l'étude de diagnostic, en présentant les circonstances de la rupture, les causes mécaniques, les modélisations structurelles et/ou hydrauliques et les actions qui ont été entreprises à sa suite, dans le contexte particulier des travaux de remplacement des clapets en cours et de fortes contraintes locales d'usage de l'ouvrage et de contraintes environnementales.

ABSTRACT

The Vichy's dam is a gate-structure dam put into service since 1963 on the Allier River. Its owner is the City of Vichy. The dam includes seven openings with overflowing gates dating back to the dam's origin, excepting gate no.2 which has been replaced in 2012. These gates are 29.5 m wide, 4.15 m high and are manually operated with a sprocket chain or electrically with a geared motor.

At the end of 2015, following a diagnosis, a restoration program considered to replace all the remaining gates (no.1 and no.3 to 7). The restoration operations have begun in 2020 and had to be pursued until the end of 2024.

On the night of June 27-28, 2021, around 3:00 AM, the gate no.6 of the dam collapsed brutally, while the river was receiving a flood with a common return period. The opening no.7 was closed with a bulkhead gate because of the replacement works of gate no.7. The replacement of gate no.6 was scheduled to start in September 2021.

The rupture of gate no.6 was reported as an orange « regulatory declaration of potentially dangerous hydraulic events », which is a regulatory document in France. Following this rupture, a detailed diagnosis was done, allowing to identify the causes of the collapse and the risk of failure of the other flap gates. The diagnosis studies include : i) thickness measurements and welding analyses of flap gate no.6, ii) a finite elements modeling of gate no.6 in order to reproduce the failure mechanism, iii) an hydraulic modeling with different openings closures situations and iv) a risk analysis to handle the remaining replacement operations.

The paper proposes to draw up a feedback on this accident, based on the results of the diagnosis and presenting the rupture circumstances, the mechanical causes, the structural and hydraulic modeling and the actions undertaken, in the particular context of replacement operations and strong local usage and environmental requirements.

1. PRÉSENTATION DU BARRAGE DE VICHY

1.1. Description du barrage de Vichy

Le barrage de Vichy est un barrage mobile en rivière de classe B barrant la rivière de l'Allier. L'ouvrage appartient à la Ville de Vichy, alors que le tablier du pont (Pont de l'Europe) appartient au Conseil Départemental de l'Allier (route départementale D6e). Le barrage a été mis en service en 1963, pour des usages halieutiques, sportifs (loisirs et compétitions) et d'alimentation en eau potable des villes de Vichy et Bellerive-sur-Allier, respectivement en rives droite et gauche de la retenue.



Figure 1: Vue du barrage de Vichy depuis l'amont (Source : BRLi)

Le barrage capte un bassin versant de 9 200 km² et crée une retenue de 2,2 km de long, d'une surface de 100 ha et d'un volume de 2,5 hm³ à la cote de retenue normale (RN) de 251,55 m NGF. La cote des plus hautes eaux du barrage est 252,80 m NGF (crue T = 1000 ans).

L'ouvrage a une hauteur sur fondation de 10,4 m, la cote inférieure du radier étant 245,00 m NGF. Il est composé de sept passes séparées par six piles en béton armé de 3 m de large. Ces piles supportent la route départementale en crête. Chaque passe a une largeur de 29,5 m et est équipée d'un clapet mobile déversant en « ventre de poisson », d'une hauteur de 4,15 m. La manœuvre des clapets est motorisée et commandée localement. Ils peuvent également être manœuvrés manuellement en cas de besoin. Les clapets 1 et 3 à 7 sont actionnés par un treuil à chaîne Galle en rive droite de chacune des passes, alors que le clapet 2 est actionné par un vérin hydraulique d'un seul côté, également en rive droite. Des passes à poissons sont présentes en rive droite et en rive gauche du barrage.

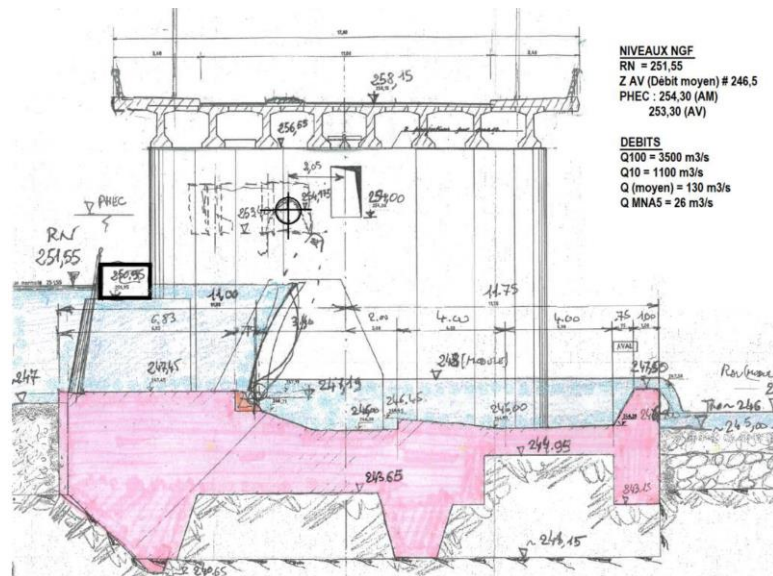


Figure 2: Coupe-type du barrage (Source : BRLi)

1.2. Historique des travaux réalisés sur le barrage

Depuis la mise en service du barrage en 1963 et pendant environ 30 années d'exploitation, aucuns travaux d'importance n'avaient été faits sur les clapets en dehors des travaux de maintenance courante. En 1991, une intervention lourde a néanmoins été réalisée sur le treuil du clapet n°4 à la suite d'un abaissement intempestif complet du clapet ayant conduit à une vidange totale de la retenue (d'après l'EDD du barrage [1]).

Une opération de réhabilitation du barrage a été lancée en janvier 2007 et a conclu à la nécessité de réaliser des travaux autant sur le génie civil que sur les clapets eux-mêmes et leurs organes de manœuvre. Les travaux d'entretien mécanique des clapets prévus envisageaient entre autres : i) le remplacement des organes de manœuvre des clapets n°2, 4 et 6 et la remise en état des quatre autres, ii) la réfection des étanchéités latérales des clapets, iii) la réparation ponctuelle des tabliers, déversoirs et aérateurs et iv) la mise en place d'un verrou de chômage.

En 2012, les travaux ont débuté par la rénovation du clapet n°2. L'entreprise chargée des travaux a alors constaté que les dégradations sur ce clapet étaient plus importantes qu'attendues. Cela a donc conduit au remplacement complet du clapet n°2. À la suite de cette intervention, les travaux ont été suspendus puisque l'intégralité du budget avait été consommé pour la rénovation du clapet n°2. Des travaux électriques ont toutefois été réalisés par anticipation sur les autres clapets restant à rénover, ainsi que des opérations assez lourdes d'entretien/maintenance qui ont eu lieu sur les moteurs, treuils et chaînes Galle.

Le programme de réhabilitation du barrage a été repris en 2015 [2]. Il indiquait qu'il convenait de remplacer entièrement les autres clapets (1 et 3 à 7) dans un délai de 5 ans maximum. Initialement, il était prévu que les travaux débutent à l'automne 2019 et s'échelonnent sur trois ans. Les travaux de remplacement des clapets ont en fait démarré en 2020, le chantier de 14 millions d'euros devant s'échelonner sur quatre ans. Le premier clapet à être remplacé était le clapet n°7, dont la passe a été batardée depuis septembre 2020 et l'était toujours en juin 2021.

2. RUPTURE DU CLAPET N°6

2.1. Événement de la nuit du 27 au 28 juin 2021

Dans la soirée du 27 juin 2021, des orages importants ont traversé le Nord de l’Auvergne et se sont concentrés dans l’Allier et le Puy-de-Dôme, engendrant un cumul de pluie important (84 mm entre 19h et 5h). Dans la nuit du 27 au 28 juin 2021, la rivière de l’Allier connaît une petite crue. Son débit est compris entre 70 et 80 m³/s au niveau de la station de Saint-Yorre, auxquels s’ajoutent les débits de deux de ses affluents rive droite, le Jolan et le Sichon, qui connaissent également des crues. Au total, le débit maximal estimé au niveau de l’ouvrage est d’environ 120 m³/s, dont 40% provient des affluents. Ce débit reste néanmoins modeste pour l’Allier et est sensiblement inférieur à celui de la crue de période de retour T = 2 ans au niveau du barrage (590 m³/s d’après [3]). Il est toutefois à noter que l’évolution du niveau du plan à la hausse est assez rapide à cause des apports des affluents de l’Allier, instrumentés ou non : + 12 cm en environ 1h20 (Figure 3).

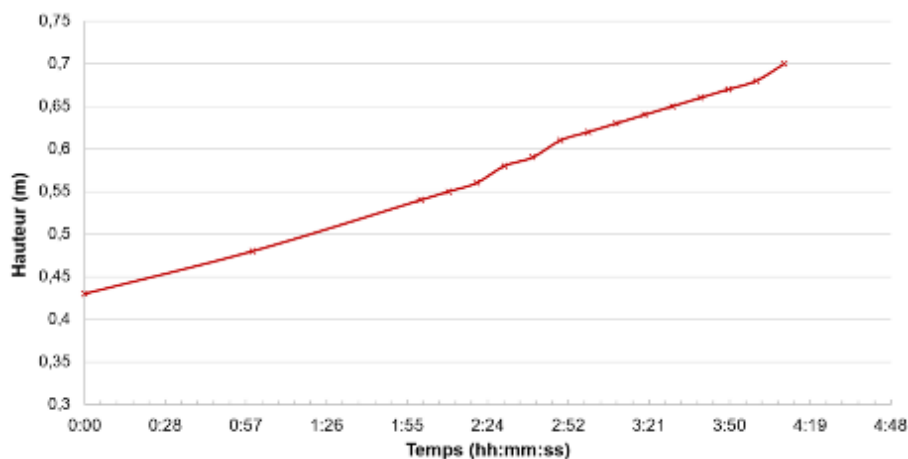


Figure 3: Evolution de la hauteur d’eau mesurée à la station de Saint-Yorre, à l’amont du barrage de Vichy

Le 28 juin 2021, à 3h23, le niveau de l’Allier à l’amont du barrage chute brutalement d’une trentaine de centimètres alors que le niveau à son aval augmente d’environ 80 centimètres (Figure 4). L’exploitant du barrage de Vichy est alerté à 4h07 par l’alarme de niveau bas (251,00 m NGF). L’agent d’astreinte s’est alors rendu sur site à 4h26 et a constaté la rupture du clapet n°6, à environ 4 m de la fixation du clapet à sa chaîne de manœuvre en rive droite de la passe. À 5h36, le niveau d’eau amont était à la cote 250,36 m NGF et a continué à baisser.

Le service de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques (SCSOH) de la DREAL a été prévenu le lendemain matin à 10h16 par la DDT de l’Allier et des échanges ont eu lieu par téléphone avec l’exploitant dans la matinée. L’inspecteur du SCSOH s’est rendu sur site le lundi 28 après-midi et a pu constater avec les agents d’exploitation que seule la partie rive droite du clapet était visible, le clapet étant certainement affalé au fond de la passe ou ayant été emporté (Figure 5).

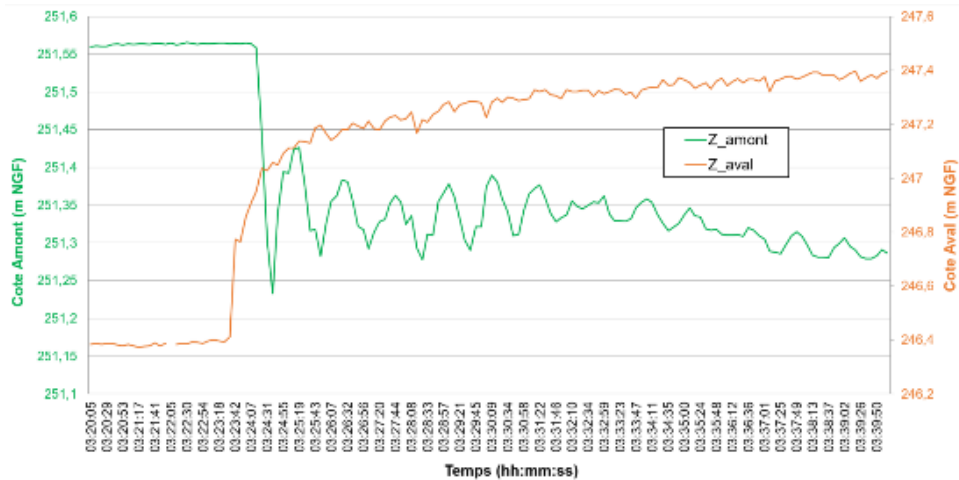


Figure 4: Evolution de la cote de l'Allier à l'amont (courbe verte) et à l'aval (courbe orange) du barrage de Vichy centrée sur l'heure de l'événement

Lors de la rupture, la cote du plan d'eau était 251,56 m NGF, qui est quasiment égale à la cote RN, alors que le clapet était abaissé de façon à ce qu'il y ait une lame d'eau déversante de 74 cm. Cela correspond à un débit évacué de 35 m³/s. Le clapet 6 avait été manipulé pour la dernière fois le samedi 26/06/2021 (relevé d'un maillon de chaîne). Il s'agissait du clapet qui était le plus abaissé lors de l'épisode pluvieux de la nuit du 27 au 28 juin 2021. Le sur-débit engendré par la rupture du clapet n°6 a été estimé à environ 350 m³/s. Compte tenu de l'horaire auquel la rupture est survenue, aucune personne à l'aval n'a été mise en danger par cet accident.

Pour l'anecdote, des informations sur la rupture du clapet étaient déjà disponibles en ligne sur un journal local (*La Montagne*) dès 9h05 le 28 juin 2021. Dans le cadre des travaux en cours, la passe n°6 devait être batardée début septembre 2021, le clapet n°6 étant le suivant à devoir être remplacé.



Figure 5: Photographie de la passe n°6 prise depuis l'aval le 09/07/2021 (Source : journal La Montagne)

2.2. Actions menées suite à la rupture

Suite de la rupture du clapet n°6, le maître d'ouvrage a engagé des actions immédiates afin de prévenir les conséquences de l'accident. Les pompiers ont été prévenus et ont procédé à une reconnaissance à l'aval immédiat du barrage. Le service de production d'eau potable a également été prévenu pour sécuriser l'approvisionnement, vu que les prises d'eau se situent dans la retenue et que leur fonctionnement est de fait influencé par le niveau du plan d'eau. Les usagers du plan d'eau ont également été informés.

Dès le lendemain de l'accident, le SCSOH s'est rapproché de son appui technique INRAE afin d'avoir des échanges constructifs sur les suites à mener. Dans un premier temps, il a été indiqué qu'il était nécessaire de déclarer cet incident comme un Événement Important pour la Sécurité Hydraulique (EISH). Un EISH « orange » (« événement sans conséquence matérielle grave immédiate mais susceptible d'entraîner des conséquences graves ») a été déclaré par le maître d'ouvrage. Par la suite, il a été convenu que la remise en eau du plan d'eau, demandée rapidement par le maître d'ouvrage, n'était pas la priorité par rapport à la sécurité hydraulique et au risque non négligeable de rupture d'un autre clapet. Durant le mois de juillet, de nombreux échanges ont eu lieu entre la DREAL et INRAE, concernant notamment la Visite Technique Approfondie (VTA) post EISH à réaliser suite à la rupture [4], et afin de définir le contenu des études de diagnostic qu'il était nécessaire de produire pour statuer sur le niveau de sûreté du barrage. Celles-ci sont décrites dans un avis INRAE circonstancié daté du 18 août 2021 :

- Examen et diagnostic du clapet et de la passe n°6 permettant de déterminer les causes physiques de la rupture et les dommages sur le génie civil ;
- Examen et diagnostic des clapets existants (n°1, 3, 4 et 5) afin de comparer leur état avec celui du clapet n°6 ;
- Étude(s) hydraulique(s) analysant plusieurs niveaux de crues, différents scénarios de batardage des passes et de gestion des clapets en service, dans le but à chaque fois de caractériser les zones inondées à l'amont et à l'aval du barrage ;
- Analyse de risques combinant les résultats des études précédentes pour déterminer le nombre de passes pouvant être batardées simultanément, définir des consignes temporaires d'exploitation pendant la phase travaux, ainsi que des seuils d'alerte adéquats et des mesures de maîtrise des risques pertinentes.

Dans le contexte de continuation des travaux et d'accélération du remplacement des clapets anciens, la question de batarder deux passes à la fois a été étudiée, bien que cette solution n'était pas autorisée dans le règlement d'eau (nécessité d'une demande de dérogation). Les études menées (hydraulique, faisabilité technique, organisation et optimisation du chantier, financières) ont toutefois conduit le responsable à abandonner cette éventualité.

Les travaux ont été accélérés sur la passe n°7 afin que la passe n°6 puisse être rapidement batardée afin de remettre en eau le plan d'eau (dès fin juillet) pour satisfaire les besoins en eau potable et les autres usages du plan d'eau (dont un événement sportif international). Des mesures de réduction des risques ont été mises en place par le responsable d'ouvrage, en accord avec le service de contrôle :

- Abaissement du plan d'eau de 20 cm (contraintes liées aux prises d'eau potable et à l'alimentation des passes à poissons) ;
- Gestion courante du plan d'eau avec les deux clapets rénovés (n°2 et n°7) et maintien en position fermée (non déversant) des clapets anciens et modification des consignes de crue ;
- Surveillance renforcée des clapets ;
- Pour le risque aval, sensibilisation du public avec mise en place de panneaux d'avertissement et mise en place d'une alarme (niveau et gradient) ;
- Pour le risque amont, agrandissement de la zone d'interdiction d'usage en amont du barrage.

3. ÉTUDES DU DIAGNOSTIC DE SURETE

3.1. Études hydrauliques

Deux études hydrauliques ont été réalisées suite à la rupture du clapet n°6 : une étude de simulation de rupture d'un clapet [5] et une étude de simulation du batardage simultané de deux passes [6]. Le modèle hydraulique 2D de l'EDD [1] a été repris pour ces deux études. Le modèle a été calé sur différents événements : la crue de 2003, l'événement de référence du PPRI (crue de 1866), ainsi que sur l'événement ayant mené à la rupture de l'ouvrage. La Figure 6 montre que le modèle est à même de reproduire cet événement de façon satisfaisante.

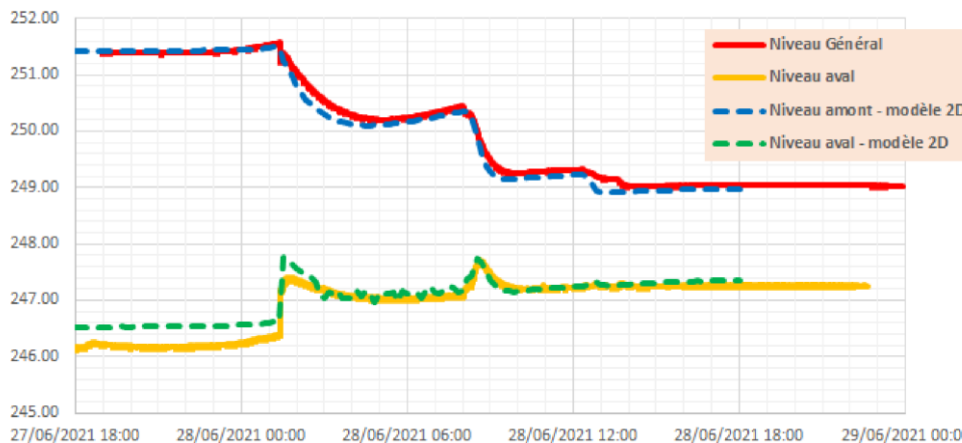


Figure 6: Evolutions des niveaux d'eau amont et aval, observés et calculés par le modèle hydraulique (source : ISL [5])

Sans rentrer dans le détail des résultats des deux études, celles-ci ont permis de disposer d'informations importantes sur les impacts à l'amont et à l'aval du barrage d'une rupture d'un clapet et du batardage de deux passes. La modélisation de la rupture d'un clapet permet de montrer que des vitesses d'écoulement importantes se développent à l'amont du clapet rompu, sur des distances relativement importantes (120 m). À l'aval, l'augmentation des niveaux peut dépasser 1 m mais l'hydrogramme de rupture est rapidement laminé et se maintient ensuite à un débit relativement élevé, tout en restant inférieur à une crue courante. Le batardage de deux clapets a un impact sur les zones inondables en lit majeur dès une crue de période de retour comprise entre 10 et 20 ans.

Toutefois l'étude [5] ne considère que la rupture du clapet n°1 (situé côté rive gauche) et ne propose pas plusieurs scénarios différents de rupture. De la même façon, l'étude [6] ne considère que le batardage des clapets n°6 et n°7, sans envisager différents autres cas d'indisponibilité de passes.

3.2. Diagnostic sur site [7]

Suite à la rupture du clapet n°6, le bureau d'études SPRETEC, mandaté par la Ville de Vichy dans le cadre de l'étude de diagnostic de la rupture du clapet n°6, s'est rendu sur le site afin d'apporter des éclaircissements sur la/les cause(s) ayant amené à sa rupture. Les mesures d'épaisseurs effectuées sur le bordé amont ont eu pour but de fournir des données pour les calculs dans les conditions de la rupture.



Figure 7: Vue de la rupture du clapet n°6

Les relevés d'épaisseurs sont concentrés autour de la zone de rupture (Figure 8). Des mesures sont réalisées en dehors de cette zone afin de confirmer les hypothèses pour l'ensemble du clapet. Sur le clapet n°6, 64 points de mesure ont été réalisés au total. Les tôles étant fortement martelées, les mesures ultrasons sont corrigées pour obtenir les épaisseurs minimales réelles. Les corrections sont faites avec un échantillonnage des irrégularités mesurées à la pige et au pied à coulisse.



Figure 8: Zones mesurées (à gauche), détail déchirure (à droite)

Sur la base des mesures réalisées sur le clapet n°6, n°1, n°3 et n°4, ainsi que d'autres mesures menées quelques années auparavant sur plusieurs clapets, quatre zones d'épaisseurs différentes peuvent être identifiées (Figure 9). Ces zones sont perceptibles sur tous les clapets de manière plus ou moins marquée.

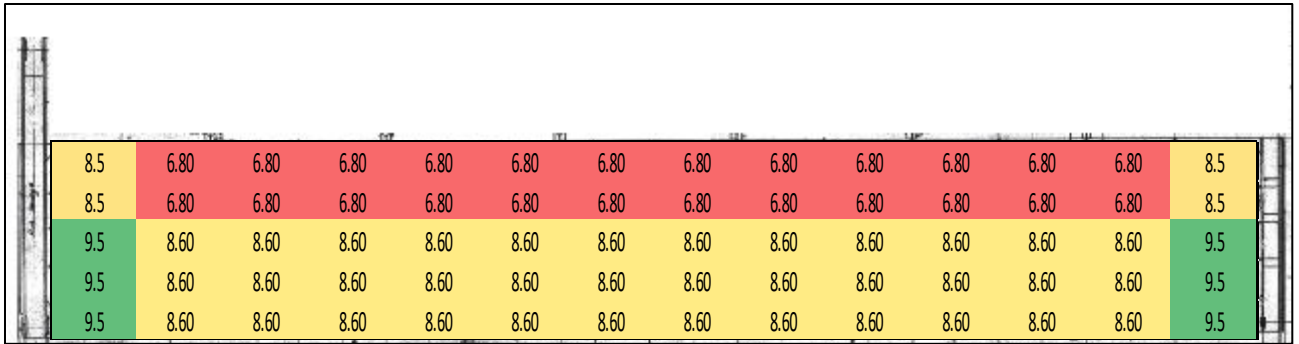


Figure 9: Hypothèse de distribution des épaisseurs dans le bordé amont

On peut distinguer une zone « rouge » en partie haute du clapet sur laquelle l'érosion est très importante. Dans cette zone, l'épaisseur résiduelle est de 6,8 mm en moyenne avec des minimums à 5 mm, pour une épaisseur à l'origine de 12 mm. Cette forte érosion s'explique par le fait que la vitesse d'écoulement est maximale en partie haute du clapet, là où la lame d'eau s'amincit et s'accélère. Deux zones « vertes » sur les bords en partie basse. Dans ces zones, les vitesses d'écoulement sont plus faibles du fait de la présence de bajoyers. Trois zones « jaune » au centre du clapet en partie basse, ainsi que sur les bords proches de la surface. Sur ces zones, l'érosion est moins conséquente que dans la partie haute centrale. Cette moindre érosion correspond à des vitesses d'écoulement plus faibles. Les pertes d'épaisseurs sont très importantes. Sur la base des différents relevés, une hypothèse de distribution des épaisseurs du bordé amont a été réalisée. Cette distribution est celle qui est présentée sur la Figure 9. On note que seul le bordé amont présente une forte érosion. Le reste du clapet (côté aval du « ventre de poisson » et voiles verticaux) n'a presque pas subi de perte d'épaisseur.

3.3. Diagnostic numérique [8]

Sur la base des relevés d'épaisseurs du bordé amont du clapet n°6, confortés par des mesures sur d'autres clapets, un modèle aux éléments finis de la structure du clapet a été réalisé. Le matériau du clapet n'étant pas indiqué sur les plans d'origine, les caractéristiques d'un acier de type E24 (S235) ont été considérées d'après une étude réalisée antérieurement.

Le clapet est modélisé dans la situation où il se trouvait lors de sa rupture, avec la cote de la retenue relevée par les sondes (251,56 m NGF) et un angle d'ouverture de 49.09° par rapport à l'horizontale. Les charges sur le clapet sont son poids propre et la poussée hydrostatique (le déversement n'est pas modélisé). Les conditions aux limites sont des liaisons pivot pour les articulations du clapet et un blocage de déplacement suivant l'axe de la chaîne au point de fixation. Le modèle du clapet érodé (Figure 10) tient compte des hypothèses d'épaisseur présentées sur la Figure 9. Les calculs sont réalisés dans le domaine linéaire élastique en petits déplacements.

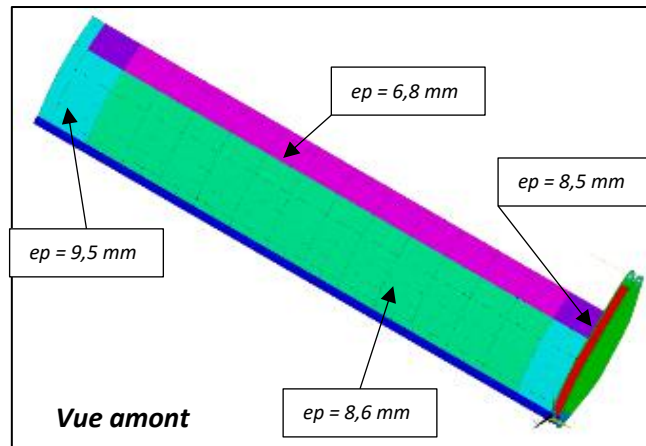


Figure 10 : Modèle éléments finis du clapet n°6

Le clapet est une structure soumise à de la flexion et de la torsion. Pour cette dernière, en effet, la charge hydrostatique génère un moment de basculement du clapet autour des pivots qui est équilibré par le bras de manœuvre en rive droite. Ainsi, le clapet subit une torsion qui croît linéairement de la rive gauche à la rive droite du côté du bras de manœuvre. Cette torsion est reprise par la section fermée en forme de « ventre de poisson » du clapet. Le clapet est donc soumis à des contraintes de cisaillement dues à la torsion dans la section. Ainsi, les contraintes de cisaillement sont maximales à proximité du bras de manœuvre. Les résultats du modèle permettent de bien constater cela. On constate également que les contraintes sont plus importantes sur les zones les moins épaisses.

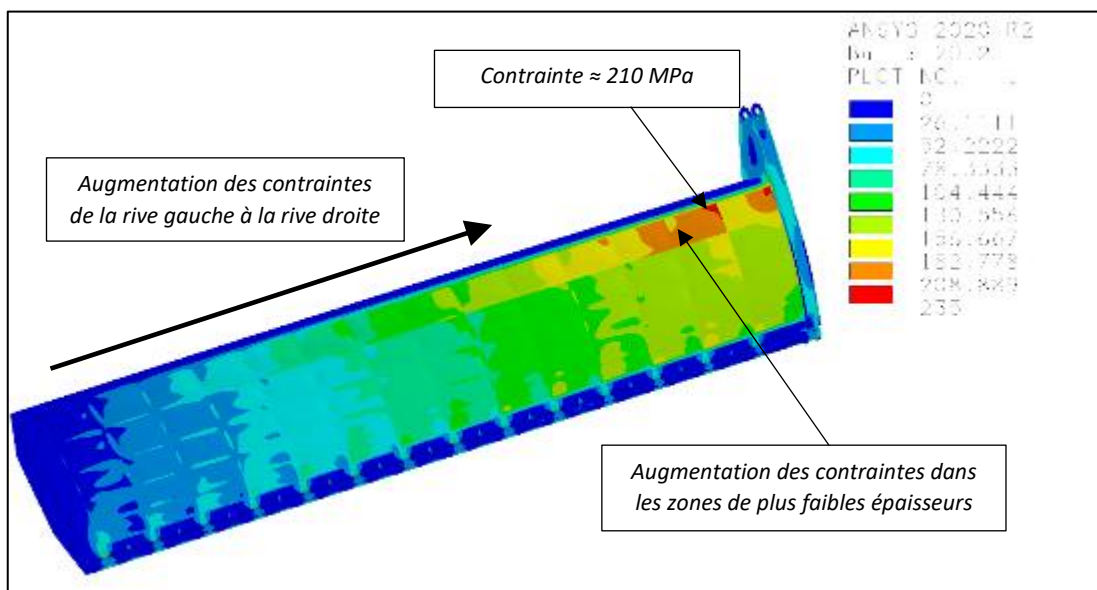


Figure 11 : Contraintes de Von Mises en membrane

On voit sur la Figure 11 que les contraintes maximales de Von Mises en membrane dans le bordé sont de l'ordre de 210 MPa pour une épaisseur modélisée de 6,8 mm dans cette zone. Ces contraintes sont essentiellement des contraintes de cisaillement de torsion. En effet les contraintes de cisaillement maximales sont de 122 MPa, d'où une contrainte de Von Mises de $\sqrt{3} \times 122 = 211 \text{ MPa}$. On rappelle que les épaisseurs du bordé amont corrodé sont des moyennes estimées à partir des relevés faits sur le clapet dans la zone de déchirure.

La contrainte dans le bordé est principalement due à la torsion du clapet. Or, comme le montre la théorie de l'élasticité, la contrainte de torsion est inversement proportionnelle à l'épaisseur. La contrainte de membrane de 211 MPa relevée dans le modèle avec une épaisseur de 6,8 mm passe donc à $211 \text{ MPa} \times (6,8 \text{ mm} / 5 \text{ mm}) = 287 \text{ MPa}$ dans la zone de plus faible épaisseur (zone d'initiation de la fissure). La contrainte est donc localement bien supérieure à la limite élastique de 235 MPa.

Les panneaux du bordé soumis à des contraintes de cisaillement sont aussi soumis au risque de voilement. Sur le modèle aux éléments finis, le calcul fait l'hypothèse d'une géométrie sans défaut et d'un niveau de contrainte dans le domaine élastique. Avec ce modèle théorique parfait, on obtient un voilement pour un coefficient critique (rapport entre la charge critique et la charge appliquée) de l'ordre de 0,7 (Figure 12). C'est bien ce voilement qui a été observé sur les clapets d'origine (Figure 13).

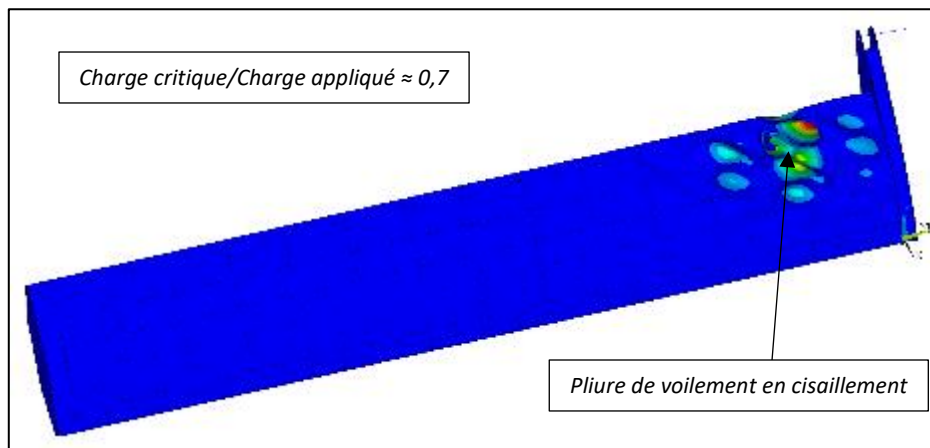


Figure 12: Mode de voilement en cisaillement sur un modèle élastique parfait



Figure 13 – Voilement en cisaillement avec déformation plastique permanente

Cette instabilité est un voilement en cisaillement des panneaux les plus chargés. Ce mode de voilement correspond à une mise en traction de la diagonale « a » et un « flambement » de la diagonale « b » (Figure 13). Il résulte de ce voilement que seule la diagonale tendue « a » est capable de reprendre les efforts après voilement. Ce mode de voilement n'est pas nécessairement dommageable lorsque les contraintes sont relativement faibles. Cependant, dans le cas présent, les contraintes étant de l'ordre de la limite élastique avant le voilement, elles augmentent fortement après voilement. Les contraintes dans la diagonale tendue « a », qui sont déjà au-dessus de la limite élastique, augmentent donc en réalité au-dessus de celles qui sont obtenues dans le modèle linéaire élastique en petits déplacements.

Les déformations plastiques deviennent alors importantes et la structure peut perdre localement sa géométrie. Ainsi, les effets de grandes déformations peuvent apparaître et augmenter à leur tour les contraintes. Deux effets se combinent alors :

- Augmentation des contraintes dans la diagonale « a » par voilement de la diagonale « b » ;
- Modification des conditions géométriques par déformations plastiques.

Ces deux effets mènent les contraintes au-delà de la limite de rupture (340 MPa). Une fois la rupture initiée en partie haute de la tôle de bordée, une déchirure se propage de bas en haut jusqu'à la ruine totale du clapet. La rupture du bordé amont entraîne une perte de l'inertie de torsion du « ventre de poisson » qui a son tour entraîne une rupture du bordé aval et un découplage avec les voiles verticaux de manœuvre du clapet en RD. La rupture du bordé aval se fait entre autres par arrachement des soudures.

4. SYNTHÈSE

La rupture du clapet n°6 du barrage de Vichy n'a heureusement pas eu de conséquences graves autres qu'un abaissement prolongé du plan d'eau. Les défauts sur cet organe de vantellerie étaient connus depuis de nombreuses années et les travaux de remplacement du clapet étaient prévus deux mois après sa rupture.

Bien que cet accident de vantellerie aurait pu être évité en engageant plus tôt les travaux de remplacement des clapets, les études de diagnostic ont permis de montrer que l'état structurel du clapet était la cause directe de sa rupture, qui n'est pas due à une sur-sollicitation de l'organe en crue, même si l'événement pluvieux a été soudain, sans être particulièrement intense.

À la suite de la rupture et des études de diagnostic, il a été demandé au maître d'ouvrage d'adapter ses consignes d'exploitation et de poursuivre les travaux de remise en état des clapets restants, qui avaient été diagnostiqués comme étant dans un état similaire à celui du clapet n°6. Pour continuer l'exploitation, des raidisseurs ont néanmoins été mis en place début 2023 sur les clapets 1, 3 et 4 afin de renforcer les structures dans l'attente de la dépose et du changement de ces trois clapets.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Ville de Vichy pour les informations fournies et leur accord de publication.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] ISL (Aout 2015), EDD Barrage de Vichy – Etude de dangers du barrage de Vichy, rapport n°14F-183-RL-1 révision D, 159 p.
- [2] BRLi (Décembre 2015), Restauration du barrage de Vichy – Programme_Rév.1, 83 p.
- [3] ISL (Novembre 2019), Mise à jour de l'EDD du barrage de Vichy – Etude des crues extrêmes du barrage de Vichy, rapport n°19F-115-RL-3 révision A, 6 p.
- [4] BRLi (Aout 2021), Barrage du Pont de l'Europe – Visite technique approfondie – Campagne 2021 – Rapport de visite, 50 p.
- [5] ISL (22 octobre 2021), Barrage de Vichy – Etude de modélisation hydraulique – Simulation de la rupture d'un clapet, rapport n°21F-136-RL-1 révision A, 26 p.
- [6] ISL (22 octobre 2021), Barrage de Vichy – Etude de modélisation hydraulique – Simulation de deux passes batardées, rapport n°21F-136-RL-2 révision A, 22 p.
- [7] SPRETEC (26 octobre 2021), Réhabilitation du barrage de Vichy – Rapport de diagnostic – Rupture du clapet n°6
- [8] SPRETEC (19 octobre 2021), Barrage de Vichy – Diagnostic – Clapet n°6 – Note de calcul, rapport n°5200511 NDC 002, 30 p.